

「あかり」がとらえた遠赤外線宇宙背景放射



松浦周二

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇宙物理学研究系

〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉

e-mail: matsuura@ir.isas.jaxa.jp

赤外線で極めて大きな光度をもつ銀河「赤外線銀河」の正体は、ガスやダストに埋もれた爆発的星生成銀河や活動的銀河核である。赤外線銀河は、近傍宇宙では希な存在であるが、星生成が活発な高赤方偏移の宇宙ではありふれた存在だと考えられている。われわれは、赤外線天文衛星「あかり」によるディープサーベイにより、赤外線銀河を大量検出しただけでなく、遠方の赤外線銀河の群れを宇宙赤外線背景放射としてとらえた。その結果、赤外線で見えた大規模構造について新たな知見が得られるとともに、遠方の赤外線銀河だけでは説明がつかない謎の背景放射成分が見つかった。

1. はじめに

宇宙背景放射は、遠方宇宙からやってくる空間的に一様に広がった淡い光である。近傍宇宙の知られた天体の向こう側にあるという意味で「背景放射」である。

宇宙背景放射といえば、ビッグバン後の灼熱の宇宙が出した光の名残である、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) があまりにも有名である。CMBは、その名のごとく、ミリ波～マイクロ波の波長 (1-10 mm) にピークをもつ、温度2.73 Kの黒体放射として観測される。黒体放射だけあって非常に明るく、宇宙に広がるあらゆる波長の電磁波の背景放射エネルギーの90%以上を占める。宇宙最初の光がこの世で最も明るいのは、宇宙創成を探究する科学者にとって、願ってもない幸運といえるだろう。

では、2番目に明るい背景放射は何かといえば、もう少し波長の短い赤外線 (1-300 μm) の宇宙背景放射 (Cosmic Infrared Background; CIB) である。そのうちの約半分を遠赤外線 (波長30-300 μm) が占め、残りは近赤外線 (1-5 μm) か

らなる。図1に示すように、本稿で紹介する遠赤外線の背景放射エネルギーは、宇宙全体の2-3%を占めると見られる (この割合自体が本稿の話題であるが)。CIBの起源は、現在のところCMBほど明らかではないが、後で詳しく述べるように、個別に分解観測できない $z>1$ の遠方天体の放射が折り重なったものと考えられている。つまり、CIBの観測により、遠方天体の統計的な性質を探ることができる。全宇宙でCMBに次ぐ放射エネルギーを担うCIBの研究なくして宇宙進化は語れないことは明らかであろう。

しかし、明るいはずのCIBの観測は、実は容易ではない。その一因は、太陽系やわれわれの銀河、系外銀河に至るまで、前景のさまざまな天体が強い赤外線を放射するため、背景放射との成分分離が容易ではないことである。また、地球大気が宇宙からの遠赤外線をすべて吸収してしまうため、放射の絶対的な明るさを正確に測定するには飛翔体を用いるほかなく、観測機会が少ないことも要因であった。本稿では、以上のような困難を乗り越えるべく、赤外線天文衛星「あかり」を用いて遠赤外線での宇宙背景放射を観測したとこ

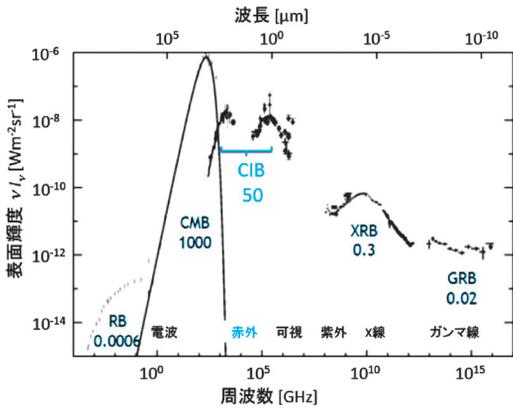


図1 さまざまな波長（周波数）での宇宙背景放射の明るさ。数字はCMBを1,000としたときの積分強度を示す。宇宙初期天体にかかわる宇宙赤外線背景放射（CIB）はCMBに次いで明るい（H. Dole氏提供の図を改変）。

ろ、系外銀河では説明がつかない未知の放射成分が見つかったという成果¹⁾を紹介する。

2. 宇宙初期の赤外線銀河探査

宇宙初期の天体形成

量子ゆらぎに起源をもつ初期宇宙のわずかな密度ゆらぎは、宇宙膨張に伴って自己重力により成長し、やがて現在見られるような星や銀河・銀河団などの多彩な階層の天体の形成に至ったと考えられる。重力相互作用のみのダークマターが支配する宇宙の構造形成シナリオは、現在、かなり確たるものとなっている。しかし、実際の天体形成では、光る物質であるバリオンが関与する複雑な物理過程を伴うため第一原理に基づく理論予測は難しく、観測的研究が特に重要となる。

CMBが示す赤方偏移 $z=1,100$ の晴れ上がり期以降、最遠方の銀河が見え始める $z\sim 8$ までの間に、最初の星や銀河の形成が起こったはずであるが、その現場をとらえるべく宇宙初期($z>3$)を探査する多くの取り組みがさまざまな波長で行われている。日本初の本格的な赤外線天文衛星「あかり」のプロジェクトにおいても、宇宙初期天体を探査する観測が行われた。本稿で紹介する遠赤

外線のCIB観測はその一つであるが、CIBの観測結果を示す前に、以下では同観測の動機である遠方の赤外線銀河の探査について述べたい。

宇宙の星形成史

銀河を構成する主成分は星であるため、銀河の総放射エネルギーを星生成率として表すことが多い。星の核融合により水素がヘリウムや重元素へと転換する量と発生する放射エネルギーとがよく関係づけられているからである。特に、紫外線光度は、短寿命である大質量星からの放射が支配的となるため、星生成率の良い指標である。最初に銀河が誕生した頃の高温環境では、大質量星の形成が活発であり、その紫外線は大きく赤方偏移して近赤外線として観測されることが予想される。

これまでに近傍から遠方までさまざまな銀河の観測が行われた結果、星生成率は時代をさかのぼるにつれて急激に大きくなり、赤方偏移 $z\sim 1$ にピークを迎えることがわかってきた²⁾。星形成活動の指標となる紫外線は、銀河内の星間ダスト（固体微粒子）により強く吸収・減光されるため、高密度領域では紫外線光度から推定した星生成率には大きな不定性がつきまとう。星生成率を正確に知るには、紫外線により暖められたダストの熱放射も再放射エネルギーとして漏れなく測定することが必要である。赤外・サブミリ波域における銀河のダスト放射の観測によれば、星生成率は $z\sim 1-3$ の間でほぼ一定値をもち高赤方偏移に向けて徐々に低下することが示されている³⁾。 $z>3$ ではダストに隠された星生成が始まっていたことになる。

赤外線銀河とは

ダストに隠された星生成は、われわれの銀河系内の星生成領域ではよく知られた現象である。銀河系外に目を向けると、爆発銀河として有名なM82では、星生成が銀河全体の規模で爆発的に起こっている。また、可視光の1,000倍ものエネルギーを赤外線として放射する「大光度赤外線銀河（ULIRG）」では、赤外線光度が $10^{12} L_{\odot}$ 以上に

達し (L_{\odot} は太陽光度), さらに大きな規模の爆発的星生成が起こっていると考えられている. その星生成率は, われわれの銀河と比べて100倍高い. 銀河中心部の巨大ブラックホールへの物質降着が主たるエネルギー源である「活動的銀河核 (AGN)」も, ダストに埋もれていれば, ULIRGと同様に強大な赤外線源となる. 原因が星生成にせよブラックホールにせよ, 強烈な紫外線にあぶられて暖められた星間ダストからの赤外線が放射エネルギーのほとんどを担う.

赤外線光度が $10^{11} L_{\odot}$ を超える特殊な銀河「赤外線銀河」の発見は, 1983年に打上げられた世界初の赤外線天文衛星IRASによりなされた最も重要な功績の一つである. そこで見つかった近傍宇宙の赤外線銀河は, 銀河の全体数の1%にも満たない特異な存在である. IRASの後継である赤外線天文衛星ISO (1995年打上げ) やSpitzer (2003年打上げ) による, より遠方の銀河の観測では, 時代をさかのぼるほど赤外線銀河の数が急激に増える光度進化を示すことがわかった. 星生成が活発な宇宙初期には, 赤外線銀河はありふれた存在であったと結論できる. それらの多くは, 現在は星形成活動を終えた楕円銀河へと進化したと考えられている. このような赤外線銀河の進化を明らかにすることが, 最新の赤外線天文衛星である「あかり」(2006年打上げ) の使命となった.

赤外線銀河を個別に研究することは重要であるが, 宇宙の大局的な構造進化もまた重要な研究課題である. 特に, ダストに隠された宇宙の大規模構造を調べるには, 可視光で見える銀河の分布を調べるだけでは十分でない. 星生成は宇宙の中でも密度が高い領域で活発に行われることが予想されるため, 赤外線銀河が大規模構造の重要なトレーサーとなるであろう. サーベイ衛星として設計された「あかり」の広域観測能力は, 赤外線銀河の空間分布を調べるにあたっていかに発揮される.

3. 「あかり」による銀河探査

南天あかりディープフィールド (ADF-S)

宇宙初期を探る方法としてすぐに思い当たるのは, できる限り遠方の銀河を個別に観測し, それらの個数密度やスペクトルなどを統計的に調べることである. われわれは「あかり」搭載遠赤外線サーベイ装置 (FIS) を用いて, 波長50–180 μm における遠方銀河のディープサーベイ観測を行った. 観測天域には, 南黄極付近の「南天あかりディープフィールド (ADF-S: AKARI Deep Field South)」と名づけた高銀緯の領域を選んだ. この天域は, 遠方天体の観測の妨げとなるわれわれの銀河系内のダスト放射が最も弱い「宇宙論的観測の窓」が10平方度以上に開かれた領域として選ばれた. 観測領域の面積 (約12平方度) は, 「あかり」の主目的である全天サーベイと比べれば, 4千分の1しかないが, そのぶん各所で長時間露出して暗い天体まで検出できるように計画した.

図2に示すのは, 波長90 μm で観測したADF-S領域の遠赤外線画像である. FISの画角は8分角しかないが, 視野をずらしながら270回の観測を1年半かけて行い, 広域をカバーした. 太陽系内の前景放射である黄道光 (惑星間ダストの熱放射) は, 地球公転とダスト円盤との位置関係により強度が日々変化するため, COBEの全天データに基づくモデル⁴⁾ を利用して毎観測ごとに差引いた. 黄道光差引後の全観測データを重ね合わせて得たのが, この1枚の画像である.

個別の銀河観測の限界から背景放射へ

図2の画像中に見える多数の輝点はすべて系外銀河であり, 銀河系内ダスト放射は大きなスケールの濃淡として見える. われわれは, この画像を元に, 2,000個以上の銀河を検出した. いまのところ明るい銀河しか赤方偏移を測定できていないが, 暗いものでも比較的近傍にあると推定される. つまり, 赤外線光度が $10^{12} L_{\odot}$ のULIRGを仮

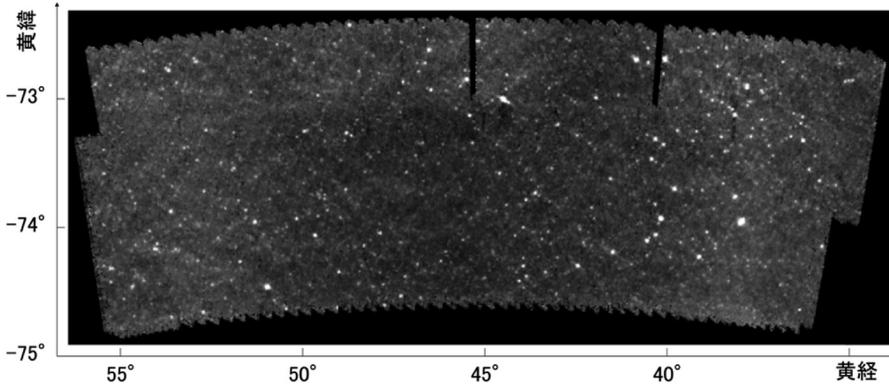


図2 「あかり」による波長90 μm におけるADF-S領域の遠赤外線画像. 観測領域の広さは約12平方度である. 白っぽい輝点として見えるのは系外銀河であり, この画像から2,000個以上の銀河が検出された. 背景にはさらに莫大な数の遠方の赤外線銀河がひしめいており, それらはCIBを形成している.

定すると, 本観測の検出限界 ($\sim 20 \text{ mJy}$) に相当する赤方偏移の上限は $z < 1$ であり, もう少し暗い $10^{11} - 10^{12} L_{\odot}$ のいわゆる LIRG では $z < 0.4$ にとどまる. もちろん, $z > 1$ の銀河の存在も期待されるので, 今後のフォローアップ観測による研究を進める. 高感度を誇る「あかり」ではあるが, 高赤方偏移の赤外線銀河を検出するのは難しいというのが現状である.

「あかり」の検出限界は, 望遠鏡の口径68.5 cmと波長との比で決まる角分解能の回折限界により制限されている. 「あかり」の角分解能は約0.5分角であり, 人間の視力と同等である. さまざまな波長の望遠鏡の多くが1秒角以下の角分解能をもつことを考えると, 遠赤外線の望遠鏡は技術的に遅れていると言わざるをえない. 感度が優れていても角分解能が悪いと, 天空上で近接する銀河の像が互いに折り重なってしまい, 個別に検出できなくなる (コンフュージョン限界). 赤外線銀河が大量に見つかったと思っていたら, その奥にはさらに膨大な数の銀河がひしめいているのだ.

以上のような状況にあって, さらに遠方の宇宙を研究したい欲望にかられたわれわれは, 検出限界以下の銀河の重ね合せを宇宙背景放射CIBとして抽出することを試みた. 遠方の銀河は個別に暗

くとも立体角あたりの個数が多いので, それらの総計であるCIBはあまり暗くならないからだ.

4. 宇宙背景放射の検出

CIBの観測は, 観測された空の明るさから太陽系や銀河系の放射成分を差引いて, なお残る銀河系外からの放射を選別することにより行う. ただし, 比較的近傍にある銀河も含めて観測してしまつては元も子もない. 遠方宇宙の放射を選別するためには, 個々に検出できる銀河はできるだけ暗い (遠方の) ものまで取り除く必要がある. 同波長域で唯一のCIB観測であったCOBE衛星 (1989年打上げ) による約20年前の観測では, 角分解能が0.7度しかなく, あらゆる天体を区別なく観測せざるをえなかった. 「あかり」は, COBEの50-100倍も高い角分解能をもち, 桁違いに暗い銀河までも取り除くことができた. つまり, 「あかり」によるCIB観測なら自信をもって遠方の銀河からなると言えるのだ.

ライバルのSpitzerは, 角分解能に優れているため銀河の検出能力は「あかり」よりも高い. しかし, CIBの明るさ測定に必要なコールド・シャッターを有するにもかかわらず, 動作不具合を恐れて, ついにそれを一度も観測に用いることがなかった. 「あかり」プロジェクトでは, 最初

の観測からコールド・シャッターをフルに稼働させたのだが、両陣営の考え方の違いは興味深い。

観測結果

黄道光を差引いたデータ（図2）から、銀河系内ダスト放射成分を、IRASとCOBEの全天データを元に作成された100 μm強度マップ⁵⁾との線形相関を利用して差引いた結果、CIBの観測値を得ることができた。図3には、今回得られた「あかり」の観測結果をCOBE/DIRBEの結果⁶⁾と比較した結果、両者はよく一致していることがわかった。これは、COBEでは取り除けなかった明るい銀河のCIBへの寄与がさほど大きくなかったことを意味する。実際、図3に示すように、「あかり」で検出された銀河の積分強度は、CIB観測値の10%程度にとどまっている。

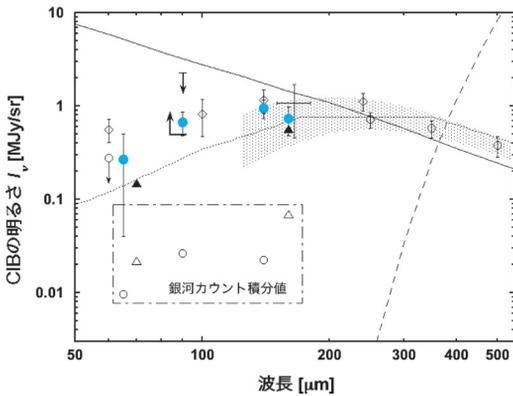


図3 「あかり」によるCIB観測値（●）。過去のさまざまな観測結果； COBE/DIRBE（◇）、COBE/FIRAS（120 μm以上の陰影部分）、BLAST（○）、Spitzerスタッキング解析（▲）、ISO/ISOPHOT（90 μmの上限値、170 μmの+）、IRAS（60 μmの上限値）と比較している。銀河進化モデルによるCIB予測値¹⁰⁾（点線）を主な前景放射である黄道光（実線）とCMB（破線）とともに示した。黄道光モデルに依存しない「あかり」の90 μmでの下限値（本文参照）を上向き矢印で示す。「あかり」とSpitzerにより検出された銀河を足し合わせた明るさ（一点鎖線で囲んだデータ）はCIBのたかだか10%程度しかないことがわかる。

他波長の観測データとの比較

中赤外域（波長5-30 μm）では、黄道光があまりにも強すぎて宇宙背景放射の観測は困難であったが、高い角分解能と優れた検出器が存在する利点がある。Spitzer/MIPSによる波長24 μmの観測では、銀河の重ね合せからなるCIBの明るさが一定値に漸近するほど暗い銀河まで検出されている⁷⁾。つまり、CIBのほぼすべてが個別の銀河として分解されたと考えられる。そこで、Spitzerでは、波長24 μmで検出された銀河の座標に合わせて、遠赤外線（波長70, 160 μm）のデータを重ね合わせる「スタッキング解析」により、統計的にCIBの下限値を得ることに成功している⁸⁾（図3）。

サブミリ波（波長300-1,000 μm）は、銀河のダスト熱放射スペクトル（温度30 K程度）のレイリー・ジーンズ領域に位置し、遠赤外線と比べてz>3のような高赤方偏移の銀河でも個別に検出しやすい。最新鋭のサブミリ波天文衛星Herschel（2009年打上げ）と同じ検出器を搭載して行われた気球望遠鏡BLAST実験では、COBE/FIRASによるサブミリ波域のCIB観測値が個々に検出された銀河の重ね合せでほぼ説明できることが示されている⁹⁾（図3）。

以上のような、銀河の重ね合せからなるCIBの観測値は、通常銀河や典型的な赤外線銀河の個数密度やスペクトルを基本とする現象論的な銀河進化モデル¹⁰⁾でよく説明されている。さまざまな銀河進化モデルが提案されているが、いずれも銀河カウントの観測結果に基づいているため、それらが予言するCIBの明るさに大きな違いはない¹⁾。

謎の超過成分

遠赤外線におけるわれわれのCIB観測値についても、上記の銀河進化モデルで説明できることが期待された。しかし、実際に得られた結果では、図3に示すように、波長90 μmでのCIB観測値はモデル予測値より約2倍も明るかったのである。これは一大事である。感度キャリブレーションに間違いがないかを何度も確認したが問題は見つか

らず、約5%の精度でCOBE/DIRBEと整合していることも確認できた。また、今回の観測は銀河系内物質が最小の領域を選んで観測したため、銀河系ダスト放射の不定性が超過成分を生むことはない。

ところで、われわれのCIB観測値は、主たる前景成分である黄道光をCOBEの全天データに基づくモデルを用いて差し引いて得たものである。黄道光モデルの不定性はCIBに2倍もの違いを生むものではないが、若干の黄道光の差し引不足が原因でCIBを明るめに算出した可能性は否定できない。黄道光の放射スペクトルは約270 Kの黒体放射で近似できることがわかっており、遠赤外域では短い波長ほど明るい。「あかり」の観測波長のうち、最短の65 μm でのCIB観測値のエラーバーが大きいのは、黄道光モデルの不定性の影響である。そこで、65 μm のCIB観測値がすべて黄道光の差し引不足によると仮定し、これを追加差し引くことにより、長波長でのCIBの下限值を得た(図3)。その結果、CIBは銀河進化モデルの予測値より少なくとも1.5倍明るいことが結論づけられた。

CIB観測値のかなりの部分は遠方の分解できない赤外線銀河の重ね合せからなるが、それだけでは説明のつかない謎の放射成分が同等量存在することになる。たかが50%ほどの超過と思うかもしれないが、宇宙の全放射エネルギーにかかわることなので深刻である。例えば、この超過分のエネルギーが $z>3$ の宇宙初期の星生成により供給されたとすると、宇宙の全バリオンの1%程度がヘリウムや重元素へ転換されたことに相当する。現在の太陽近傍のヘリウムを含む重元素量の原始組成との差(6%)と比較して、無視できない量が過剰生成されたことになるのだ。

高温の放射スペクトル

サブミリ波と中赤外では暗いが遠赤外で明るい天体など存在するのであろうか。謎の超過成分の大きな放射エネルギーを限られた宇宙全体の物質

量で賄うには、高い放射効率が必要になる。また、超過成分の放射スペクトルは、波長200 μm 付近にピークをもつ遠方銀河の重ね合せよりも短い波長で明るく、見かけの放射温度が30 K以上の高温である。これが高赤方偏移にある場合は、実際はさらに高温の物質による放射といえる。このような点から、超過成分の放射エネルギー源は、爆発的星形成よりもむしろブラックホールへの降着の可能性が高い。遠赤外線でのみ明るいことから、極めて深くダストに埋もれたブラックホールがその候補である¹¹⁾。

5. 宇宙背景放射のゆらぎ

ゆらぎの観測的制限

CMBの非等方性(ゆらぎ)の測定が宇宙の構造形成の種の存在を明らかにしたのと同様に、CIBのゆらぎから赤外線銀河が満ちていた宇宙初期のダストに隠された物質分布を明らかにできる可能性がある。CIB超過成分との関係も気になる。

図2の波長90 μm の画像では、明るい銀河によるゆらぎが目立つが、銀河を取り除いた後はかなり滑らかになり、小角度スケールのゆらぎは平均輝度の5%程度である。大角度スケールでは、銀河系内ダスト放射の濃淡が顕著になる。このようなCIBゆらぎの角度依存性を調べるため、フーリエ解析により角度に対するゆらぎパワースペクトルを算出した(図4)。「あかり」の高い角分解能と広域観測とが相まって、他に類を見ない広い角度範囲での連続的なCIBゆらぎの角度パワースペクトルが得られた。

このパワースペクトルは、特徴的ないくつかの成分からなっている。まず、分解しきれなかった暗い銀河による角度に依存しないショット雑音(ポアソン雑音)が見られる。角度の3乗に比例する成分は、銀河系内ダスト放射によるものであり、星間物質の空間分布がフラクタル次元1.5のフィラメント状構造をもつことに起因している。

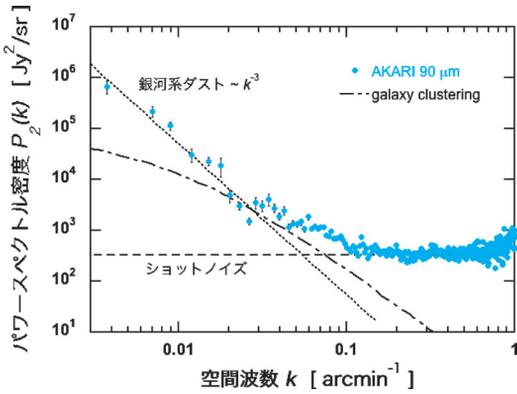


図4 「あかり」によるCIBゆらぎの観測結果. 波長90 μm におけるCIBの空間的ゆらぎをパワースペクトルとして空間波数(角度の逆数)に対して表している. 個々の銀河による一定のショットノイズ(破線)と角度の3乗に比例する銀河系内ダスト放射成分(点線)が明確に判別できる. $k=0.03\text{--}0.1$ (10–30分角に相当)にはクラスタリングの兆候が見られる. 一点鎖線は銀河クラスタリングのモデル¹²⁾.

この3乗則は、比較的放射が強い領域で詳しく研究されてきたが、今回最も放射が弱い領域で確認されたことは、本研究の主題ではないが特筆すべきことである。

銀河クラスタリング

ゆらぎパワースペクトルにおいてさらに注目すべき点は、上記の成分の他に、およそ10–30分角の角度スケール(図4の $k=0.03\text{--}0.1 \text{ arc min}^{-1}$)にクラスタリング(互いに群れ集まる傾向)の兆候が見られることである. この成分は、角分解能が悪いCOBEでは検出しようがなく、高角分解能の観測で初めて見えてくる. われわれは、赤外線銀河が示す大規模構造を発見したのであろうか.

Spitzerでは、CIBの絶対値は観測されなかったが、ゆらぎ観測は波長160 μm にて行われた¹²⁾. また、サブミリ波では、BLAST実験によるゆらぎ観測が行われ¹³⁾、最近ではHerschel/SPIREを用いた結果が得られている¹⁴⁾. これらの観測で得られたゆらぎのパワースペクトルは、「あかり」

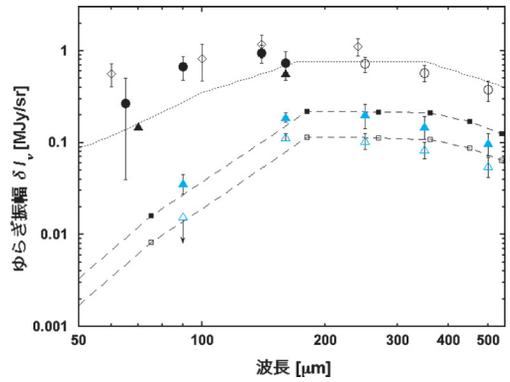


図5 CIBゆらぎの放射スペクトル. 図4のショットノイズ成分(\blacktriangle , $k=0.3 \text{ arc min}^{-1}$)とクラスタリング成分(\triangle : 上限値, $k=0.03 \text{ arc min}^{-1}$)の振幅を, Spitzer (160 μm)とBLAST (250, 350, 500 μm)によるそれぞれの結果と比較している. 破線はULIRG (Arp220)を $z=2$ に置いた場合のスペクトルを示す. 図3と同じCIB観測値(\bullet : あかり)と銀河進化モデルと比較のため示す.

と同じ角度スケールでクラスタリングを示す. これらの観測を総合すると、クラスタリング成分の放射スペクトルは、波長200 μm 以上にピークをもち(温度にすると13 K以下)、ULIRGが高赤方偏移($z>2$)にある場合と似ていることがわかった(図5). また、ゆらぎのショットノイズ成分のそれともよく似ている. クラスタリング成分の赤方偏移を $z\sim 2$ と仮定すると、観測されたゆらぎの典型的な角度スケール(10–30分角)は、現在の距離にして20–50 Mpcの大規模構造に相当する.

クラスタリング成分の振幅は、近傍の赤外線銀河の数密度のゆらぎと比べて2倍以上も大きい. これは、遠方の赤外線銀河が、特別に大きな質量ピークで選択的に星生成活動をしていることを示している. クラスタリング成分の測定精度は、銀河系内ダスト成分とショットノイズ成分の推定誤差により制限されており、いまのところ構造進化について言及できるレベルにないが、今後のデータ解析の進展により、精度の改善が期待される.

6. 謎の超過成分の起源は？

クラスタリング成分は別物

クラスタリング成分のゆらぎは、サブミリ波ではCIBの平均輝度の $\sim 10\%$ に達するのに対し、波長 $90\ \mu\text{m}$ では 3% 以下でしかない(図5)。サブミリ波では、CIBの大部分が高赤方偏移にあるクラスタリングが強い高光度銀河からなるが、同成分は遠赤外のCIBにはさほど寄与しないのだ。すでに述べたように、CIB超過成分は莫大な数の暗い天体から構成されていることが推察される。

宇宙初期天体か？

実は、近赤外域(波長 $1\text{--}5\ \mu\text{m}$)における宇宙背景放射も系外銀河で説明できない超過成分を示すことがわかっており¹⁵⁾、そのスペクトル形状から $z\sim 10$ の初代星のライマン α 輝線による解釈が提案されている。これが真実ならば、前述の重元素の過剰生成問題に陥るため、重元素を超新星爆発の残骸ブラックホールに閉じ込めるなどの機構が必要である。乱暴な推論かもしれないが、遠赤外のCIB超過は、この残骸ブラックホールへのガス降着による放射である可能性はないだろうか。CIB超過成分の高温スペクトルと小さなゆらぎを説明するには、高密度領域で生まれた巨大な銀河ではなく、個別には暗く小さいが大量に存在する天体のほうが好都合なのである。初代星が生成したダストの熱放射という考えもあるが、重元素の閉じ込めと整合的な本説には魅力がある。

AGNの活動源である巨大ブラックホールの起源は重要な研究課題であり、その生長の種として初代星の残骸ブラックホールは一つの候補である。ただし、現存する巨大ブラックホールの総質量は宇宙の全バリオンの 0.01% にも満たないが¹⁶⁾、CIB超過の説明に必要な初代星の総質量は全バリオンの 1% 以上の程度であることから、AGNになり損ねた多数の残骸ブラックホールはどこへ行ったのかという疑問は残る。この整合性については、観測結果の推移を見ながら検討すべきであ

ろう。

CIBの点源分解の進展

Herschelには遠赤外線($100, 160\ \mu\text{m}$)の観測装置PACSが搭載されているが、望遠鏡($\sim 80\ \text{K}$)の熱放射ノイズにより観測性能が制限され、同じ積分時間での検出感度は「あかり」のほうが高い。しかし、時間さえかければ、 $3.5\ \text{m}$ の大口徑望遠鏡が威力を発揮する。Herschel/PACSによるディープサーベイでは、「あかり」よりも 1 桁暗い($\sim 2\ \text{mJy}$)銀河まで検出された¹⁷⁾。しかし、Spitzerの $24\ \mu\text{m}$ での結果と同様に、限界まで暗い銀河を足し合わせても銀河進化モデルのCIB予測値を超えそうになさそうである。「あかり」が観測したCIB超過成分は、まだ謎のままだ。

CIBの超過成分はエキゾチックな物理現象が起源である可能性もある。未発見のダークマター粒子の光子への崩壊¹⁸⁾などの可能性も視野に入れ、Herschelや「あかり」のデータを用いた統合解析による研究を進めていきたい。

7. 将来展望

JAXAが推進する将来の大型赤外線衛星SPICAでは、 $3\ \text{m}$ 超級の冷却望遠鏡($\sim 5\ \text{K}$)と超高感度検出器の採用により、遠赤外線において、Herschelと同等の角分解能と「あかり」の 100 倍以上の検出感度を目指す。CIBのすべてを銀河に分解するだけでなく、分光観測による詳細研究も可能になる。検出した銀河をすべて取り除いたとき、謎の超過成分は背景に残るのか。この問いに直接答えられる計画は、今のところSPICAだけであろう。

われわれは、近赤外CIB観測のロケット実験CIBER¹⁹⁾や、JAXAのソーラーセイル搭載装置により深宇宙から黄道光の影響なくCIB観測を行うEXZIT²⁰⁾など、CIB超過の謎の解明へ向けて総合的な取り組みを続けていく。CIBの測定精度向上の先には、宇宙論的に重大な発見が待ち受けているであろう。本稿を機にCIBの観測的研究に

興味をもっていただければ幸いです。

謝 辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の「あかり」衛星プロジェクトによる、MPプログラム (FBSEP) の観測に基づいており、日欧の研究チームメンバーと共同で行ったものです。この観測を生み出した「あかり」プロジェクトの全メンバーに感謝いたします。また、本研究は文部科学省科学研究費助成事業 (19540250, 21111004) による支援を受けています。

参考文献

- 1) Matsuura S., et al., 2011, ApJ 737, 2
- 2) Elbaz D., et al., 2007, A&A 468, 33
- 3) Chapman S.C., et al., 2005, ApJ 622, 772
- 4) Kelsall T., et al., 1998, ApJ 508, 44
- 5) Schlegel D.J., et al., 1998, ApJ 500, 525
- 6) Hauser M.G., Dwek E., 2001, ARAA 39, 249
- 7) Papovich C., et al., 2004, ApJS 154, 70
- 8) Dole H., et al., 2006, A&A 451 417
- 9) Devlin M., et al., 2009, Nature 458, 737
- 10) Lagache G., et al., 2004, ApJS 154, 112
- 11) Blain A., et al., 2002, Phys. Rep. 369, 111
- 12) Lagache G., et al., 2007, ApJ 665, L89
- 13) Viero M.P., et al., 2009, ApJ 707, 1766
- 14) Amblard A., et al., 2011, Nature 470, 510
- 15) Matsumoto T., et al., 2005, ApJ 626, 31
- 16) Shankar F., et al., 2009, ApJ 690, 20
- 17) Berta S., et al., 2010, A&A 518, L30
- 18) Kim S.-H., et al. 2012, JPSJ 81, 024101
- 19) Zemcov M., et al., 2011, arXiv: 1112.1424
- 20) Matsuura S., 2002, Proc. Far-IR, Sub-mm & MM Detector Technology Workshop, NASA/CP-211408, ed. J. Wolf, J. Farhoomand, C. R. McCreight, http://www.sofia.usra.edu/det_workshop/papers/intro/i-04_matsuura_cr_edjw021007.pdf

The Cosmic Far-Infrared Background detected by AKARI

Shuji MATSUURA

The Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara-shi, Kanagawa 252-5210, Japan

Abstract: Infrared luminous galaxies are identified as star-forming galaxies and active galactic nuclei obscured by dense gas and dust. Although infrared galaxy is rare in the local universe, it is believed to be numerous at high redshifts. A far-infrared deep galaxy survey with AKARI satellite allowed us to probe into infrared galaxies and the cosmic infrared background. This new background measurement provided us an infrared view of the large-scale structure and a new finding of unknown background excess over the integrated light from galaxies.