

## 銀河系内ダストの減光を用いた宇宙近赤外線背景放射の絶対値測定

大西 陽介 (東京工業大学大学院 理工学研究科)

### Abstract

宇宙背景放射は全ての赤方偏移における輝度の積算から成る拡散光である。特に近赤外線波長域の背景放射は宇宙史における天体の形成と進化を色濃く反映している可能性があり、その観測は重要である。

近赤外線波長域の拡散光には宇宙背景放射の他に、惑星間ダストによって太陽光が散乱された成分である「黄道光」と銀河系内ダストによって星の光が散乱された成分である「銀河系内拡散光」が寄与している。特に黄道光は背景放射の 10 倍以上の明るさをもつと予測され、その差引の不定性が背景放射の観測精度に著しく影響する。したがって、黄道光による不定性がない背景放射の観測が必要とされている。

そこで、私は韓国の小型衛星に搭載された 3.7 度の広視野を持つ観測装置 MIRIS を用いて、I バンド (1.05  $\mu\text{m}$ )、H バンド (1.6  $\mu\text{m}$ ) の 2 バンドで銀河系内ダストの掩蔽を用いた黄道光差引に依存しない背景放射の観測 (暗黒星雲法) を試みた。この手法による観測では、背景放射を十分に掩蔽するために、銀河系内ダストが濃い領域を観測する必要がある、必然的に銀河系内拡散光が強い領域を観測することになる。一方で、星からの光は、ダストに散乱されるだけでなく、ダストを暖め、ダストは遠赤外線を再放射する。したがって、銀河系内拡散光と遠赤外線放射の間には相関があり、それを用いることで銀河系内拡散光を測定及び分離し、背景放射の測定を行うことができる。本観測では、ダストが非常に濃い領域の観測を行ったことで、今までにない精度で銀河系内拡散光を測定することができた。また、その結果は CIBER/LRS や COBE/DIRBE による結果と矛盾がない。また、暫定的ではあるが、銀河系内拡散光を分離することによって、得られた背景放射の値は、モデルで予測される背景放射の値と矛盾がない。

### 1 はじめに

宇宙背景放射は空の明るさから太陽系内、銀河系内の放射を差し引いた銀河系外起源の光の積算である。したがって、その中には必ず系外銀河からの光が含まれる。しかしながら、現在わかっている可視光から近赤外線にかけた背景放射の絶対値は既知の系外銀河の足し合わせでは説明できない超過成分を持っていることがわかっている。現在までに観測されている可視光から近赤外線にかけた背景放射の観測値を図 1 に示している。超過成分の起源として最初に考えられたのが、宇宙初期に形成された種族 III の星々である。しかし、超過成分を高赤方偏移の星生成 (Salpeter の初期質量関数を仮定) で説明しようとする、 $\sim 1 [M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-3}]$  という過剰な星生成率が必要となることや種族 III の星々が背景放射の起源とされる場合、そのスペクトルは銀河間吸収によって 1  $\mu\text{m}$  付近で急落する構造をもつとされる。これらの事柄から、最近では別のアイデア

が提唱されるようになり、最近挙がった有力な説として系外銀河のハローに予想以上の光源 (Intra Halo Light, IHL) があり、それが超過成分として観測されているのではないかというものがある。これは、赤外線背景放射の空間的なゆらぎを観測したことで、そのパワースペクトルは IHL を主とする成分の足し合わせで説明が可能であるという主張である (Zemcov et al, 2014)。しかし、IHL をもってしても図 1 に示した大きな超過成分となお矛盾があるのである。ここで、考えるべきことは黄道光の存在で、可視光から近赤外線波長域では背景放射に対して 10 倍ほどの強度を持つため、その差し引きは背景放射に著しい不定性を及ぼす。私たちは、黄道光の差し引きを行う際に COBE/DIRBE の全天観測に基づく黄道光モデル (Kelsall et al, 1998) を用いて差し引きを行っており、そのモデルでは黄緯によって変化する成分のみが含まれている。したがって、黄道光に等方成分が存在する場合は、その分離ができていない可能性

が示唆され、黄道光差し引きの不定性によって IHL を起源とする説と背景放射の絶対値との間に矛盾が生じている可能性がある。これらを受けて黄道光差し引きに依存しない背景放射の観測が必要とされている。

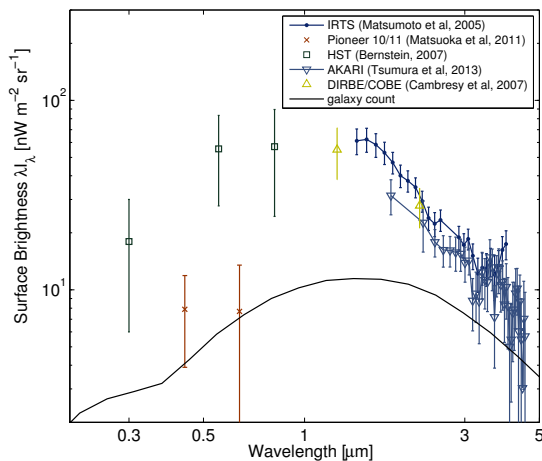


図 1: 可視光から近赤外線にかけて背景放射観測値

## 2 暗黒星雲法による観測

前述した問題点から黄道光による不定性がない背景放射の観測が必要である。そこで私は、銀河系内のダストの減光を用いた背景放射の観測（暗黒星雲法）を行った。これは、銀河系内のダストクラウドを観測し、その周囲のダストがない領域との差を取ることで、ダストによって減光を受けた背景放射を負の信号として検出すると同時に、クラウドより前方にある一様な黄道光がキャンセルされるため、黄道光差し引きの不定性に依存しない、背景放射の観測を行うことができる手法である。図 2 にその概念図を示している。

Mattila et al, 2012 では地上望遠鏡を用いて可視光での暗黒星雲法が試みられた。しかしながら、背景放射より何百倍も明るい地球大気による強い観測的弊害のため、良質な結果が得られなかった。したがって暗黒星雲法による測定を行う場合、宇宙空間からの観測が必要となる。観測を行う波長は、今までに前景放射、背景放射ともにスペクトル観測など

が行われデータが多いかつ、背景放射の星間減光も十分である 1 μm から 2 μm にかけての波長帯が好ましい。これらのことから、私は、韓国の衛星搭載の天文観測装置 MIRIS を用いて 1.05 μm と 1.6 μm での暗黒星雲法による背景放射測定を行っている。

暗黒星雲法による観測で重要なことは、銀河系内ダストによって星からの光が散乱された「銀河系内拡散光」をどれだけ精度よく分離できるかである。この銀河系内拡散光はダストの視線方向に対する柱密度に依存してその強度が変わってくる。したがって、ただ単純にダストクラウド領域と周囲のブランクスカイの差を取るだけでは銀河系内拡散光の強度差から背景放射を測定することはできない。

星からの光はダストに散乱されて銀河系内拡散光として観測されると同時に、ダストに一度吸収され、再放射されることで、遠赤外線としても観測される。したがって、銀河系内拡散光の強度と遠赤外線の強度の間には相関があり、この相関を利用することで、観測されたデータから銀河系内拡散光を分離することが可能である。

なお MIRIS によって、3つのダストクラウドの観測が完了し、データ解析を行った結果を次に示す。

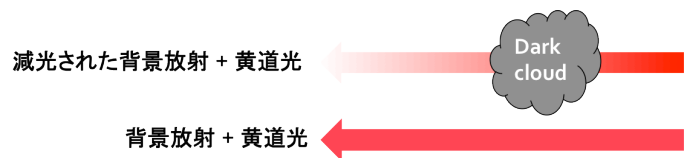


図 2: 暗黒星雲法の概念図

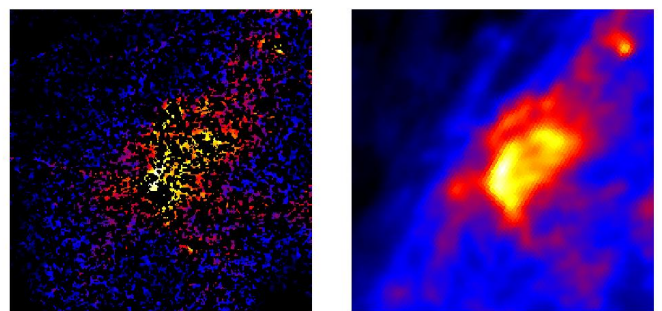


図 3: 左図が MIRIS の画像から点源を除いたもの、右図が IRAS100 μm の画像。

### 3 結果

ここでは、スペースの都合上、解析方法は割愛して結果のみを示す。解析方法についてはポスター掲示を確認してほしい。

まず、図4に観測値を IRAS の  $100 \mu\text{m}$  マップに対してプロットしたものを示した。前述したように銀河系内拡散光と遠赤外線放射は相関関係があり、観測したダストクラウドは光学的に薄いととして、近赤外線の観測値  $I_{\text{obs}}$  は遠赤外線放射 ( $100 \mu\text{m}$ ) との線形相関  $I_{\text{obs}} = aI_{100\mu\text{m}} + b$  を仮定し、その際の傾き  $a$  [ $\text{nW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{MJy}^{-1}$ ] が銀河系内拡散光に相当する。本研究で得られた銀河系内拡散光の結果を図6に示した。また、この結果は CIBER/LRS と COBE/DIRBE による結果と矛盾がない。ここで  $b$  は相関の切片、すなわち銀河系内拡散光を取り除いた後の背景放射を含む全拡散光の明るさである。

一方で、遠赤外線放射  $I_{\text{FIR}}$  はダスト温度  $T_D$ 、プランク関数  $B_\lambda$  及びダストの視線方向への柱密度  $n_D$  を用いて

$$I_{\text{FIR}} \propto n_D B_\lambda(T_D) \quad (1)$$

と線形関係で書き表せる。したがって、温度マップからダスト温度を考慮した上で、ダストの柱密度を見積もり、光学的厚み  $\tau$  へと変換すれば、近赤外線における観測値  $I_{\text{obs}}$  は  $\tau$  について式 (2) で表すことができる。

$$I_{\text{obs}} = I_f + I_{\text{EBL}}e^{-\tau} + \alpha\tau \quad (2)$$

ここで  $\alpha$  は定数であり、銀河系内拡散光の項は、遠赤外線放射に対してと同様に、光学的厚み  $\tau$  との線形関係を仮定している。さらに式 (2) から、off-cloud 領域では式 (3) を仮定、それに対して on-cloud 領域では式 (4) を仮定した。ここで  $I_f$  は銀河系内拡散光以外の前景光成分、 $I_{\text{EBL}}$  はダストによる減光を受ける前の本来の背景放射の明るさである。

$$I_{\text{off}} = I_f + I_{\text{EBL}} + \alpha\tau \quad (3)$$

$$I_{\text{on}} = I_f + I_{\text{EBL}} + (\alpha - I_{\text{EBL}})\tau \quad (4)$$

off-cloud 領域におけるフィッティングから傾き  $\alpha$  と切片  $I_f + I_{\text{EBL}}$  を求めて、on-cloud 領域の相関に対して背景放射  $I_{\text{EBL}}$  を決めた結果を図6に示した。

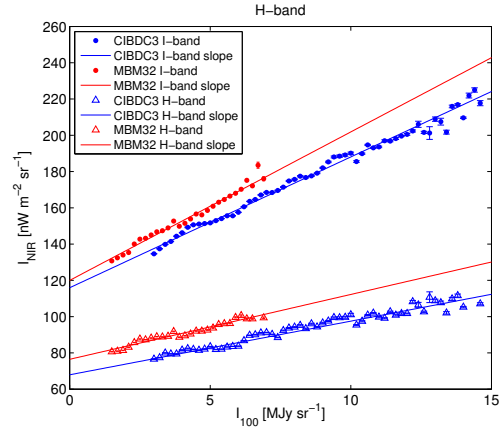


図 4: MIRIS の観測値と  $100 \mu\text{m}$  の相関図

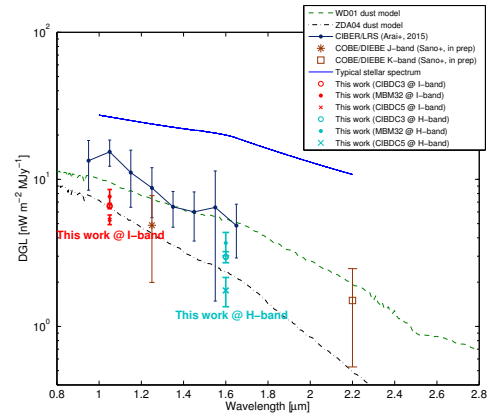


図 5: MIRIS による銀河系内拡散光の観測結果

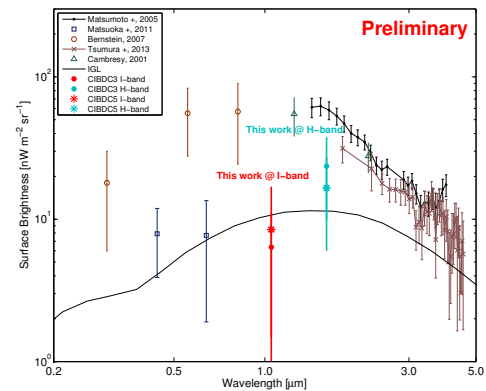


図 6: MIRIS による背景放射の観測結果

## 4 結果についてと今後の課題

まず、銀河系内拡散光のスペクトル (図 5) に典型的な星のスペクトルをプロットすると、典型的な星のカラーより散乱された銀河系内拡散光のカラーは青くなっていることがわかる。さらに、ダストサイズが  $0.06 \mu\text{m}$  の ZDA04 モデルと観測値はよく一致しており、銀河系内ダストに関してはサイズの小さいものが支配的であることがいえる。また、ZDA04 及び WD01 はともに散乱成分のみを考えたモデルであり、COBE/DIRBE の K バンド ( $2.2 \mu\text{m}$ ) では、ダスト自身の放射で少し観測値がモデルに対して上に出ていると考えられる。

次に MIRIS による暗黒星雲法で観測した背景放射の超過成分は IHL 起源の上限値で説明できるような値である。しかしながら、観測された背景放射のカラー  $I_{1.05\mu\text{m}}/I_{1.6\mu\text{m}}$  はハローに存在するとされる年老いた星のスペクトルと一致しない。もし、MIRIS で観測された背景放射のカラーが本当であるとするならば、 $1 \mu\text{m}$  から  $2 \mu\text{m}$  にかけての波長帯で、種族 III 銀河のライマン端が観測される可能性が再び浮上してくる。いずれにせよ、この観測結果は、MIRIS で観測を行った最も濃いダストクラウドを一つ用いたことによって得られた暫定的な値であり、他のダストクラウドのデータを用いて、同じ解析方法で背景放射の等方性の確認を行う必要がある。また、暗黒星雲法による解析のストラテジーを再考する必要があると考えている。

今回示した銀河系内拡散光の結果は、ダストが光学的に薄いとして、銀河系内拡散光と遠赤外線放射の線形相関を仮定した上のものである。しかし、観測天域は I バンドにおいて、最もダストが濃い領域で  $\tau \sim 0.8$  程であり、光学的に薄いと仮定することは後ろめたい。ダストが光学的に薄くないとすると、銀河系内拡散光自身も source function となり減光を受けるので、銀河系内拡散光の放射輸送は銀河系内拡散光の強度  $I_{DGL}$  と光学的厚み  $\tau$  を用いて式 (5) で表すことができる (Henry, 1937)。

$$\frac{dI_{DGL}}{d\tau} + (1 - \gamma) I_{DGL} = \gamma I_{ISRF} \quad (5)$$

ここで  $\gamma$  はダストアルベド、 $I_{ISRF}$  は星間放射場の等方的な強度を表す。式 (5) を解いて、銀河系内拡散

光の強度  $I_{DGL}$  について書き表すと式 (6) となる。

$$I_{DGL} = \frac{\gamma}{1 - \gamma} I_{ISRF} \left[ 1 - e^{-(1-\gamma)\tau} \right] \quad (6)$$

したがって、近赤外線観測値  $I_{obs}$  は式 (7) で表すことになる。

$$I_{obs} = I_f + I_{EBL} e^{-\tau} + \frac{\gamma}{1 - \gamma} I_{ISRF} \left[ 1 - e^{-(1-\gamma)\tau} \right] \quad (7)$$

ここで、アルベド  $\gamma$  をあらかじめ与えて暗黒星雲法を適用し、背景放射の強度  $I_{EBL}$  を決定する。Draine, 2003 で I バンドにおけるアルベドは  $\gamma \sim 0.6$  であるとされる。しかし、この値がどの程度の確かさをもっているかがわかっておらず、 $\gamma$  をあらかじめ与える際にその不定性を考慮しなければならない。そこで、この手法から背景放射を得る際に、その結果がアルベド  $\gamma$  の値でどの程度左右されるかをある程度知っておく必要があり、背景放射  $I_{EBL}$  の  $\gamma$  依存性をシミュレーションで確かめた。その結果を図 7 に示した。アルベドはその中心値によらずその精度が  $\pm 10\%$  であれば、背景放射が  $\pm 20\%$  ほどで決まることになる。例えば  $\gamma$  の不定性が  $\pm 10\%$  だとし、予想される背景放射の強度が  $20 [\text{nW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$  とした際、その不定性は  $\pm 4 [\text{nW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$  となり、この手法で背景放射の強度に制限をつけることが有望だと思われる。

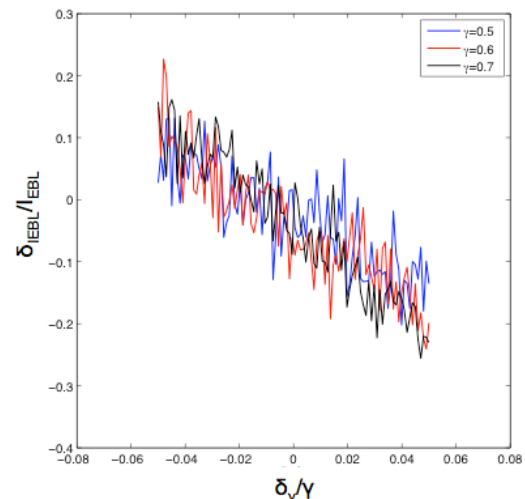


図 7: 背景放射測定におけるダストアルベド依存性

## 5 まとめ

現在までの可視光から近赤外線波長域にかけた背景放射の観測結果は黄道光の差し引きによって不定性が多く含まれている。このことは可視光から近赤外線波長域にかけた背景放射の起源を解明するにあたって、大きな弊害となる。

そこで、黄道光に依存しない背景放射の測定手法として、暗黒星雲法を韓国の小型衛星に搭載された 3.7 度の広視野を持つ観測装置 MIRIS を用いて、I バンド、H バンドの 2 バンドで行った。その結果、銀河系内拡散光に関しては COBE/DIRBE などの他観測と矛盾がない結果となり、銀河系内ダストは小さいサイズのものが支配的であることがほぼ確実となった。一方、背景放射の測定結果に関して、暫定的ではあるが、低いレベルの背景放射を検出した。今後、他のダストクラウドにおいても解析を行い背景放射の等方性の確認と暗黒星雲法によるストラテジーを再考した上で、改めて背景放射の値を決める必要があると考えている。

## Reference

- Arai, T. et al., 2015, ApJ, 806, 69
- Brandt, T. D., Draine, B. T. 2003, ApJ, 744, 129
- Cooray, A., et, al., 2012, Nature, 490, pp.514-516
- Hauser, M, G. and Dwek. E., 2001 ARA & A, 39, 784
- Kelsall, T. et al., 1998, ApJ, 508, 44
- Matsumoto, T. et al., 2005, ApJ, 626, 31
- Matsuoka, Y. et al., 2011, ApJ, 736 119
- Mattila, K., 1980, A & AS, 39, 53
- Zemcov, M. et al., 2014, SCIENCE, 346, pp.732-735