

ロケット実験 CIBER による宇宙赤外線背景放射の観測

東京工業大学 修士課程 1 年 大西陽介

Abstract

宇宙赤外線背景放射 (Cosmic Infrared Background, CIB) は空の明るさから黄道光や星の光を差し引いても残る銀河系外の拡散光である。過去の IRTS(JAXA)や COBE(NASA) などの観測結果から、CIB の近赤外線領域のスペクトルには既知の系外銀河の重ね合わせを超過する成分があることが分かっている。その超過の原因としてダークエイジ終盤の宇宙年齢数億年 (赤方偏移 $z \sim 10-30$ に相当) に形成された巨大な第一世代の星が、非常に高温のため紫外線領域で輝き、放出された紫外線とその紫外線により電離した星間物質からの Lyman- α が赤方偏移したものが寄与しているとの考えが理論的研究により有力である。第一世代の星々は非常に遠方にあるため、個別に検出するのが非常に困難である。しかし、多数の星々を宇宙赤外線背景放射としてまとめて観測すれば検出可能となり、得られた観測値から前景にある銀河や星の寄与を差し引いてやれば超過成分を見積もることができる。CIBER は CIB の $1\mu\text{m}$ 付近でのスペクトル絶対値と CIB の空間的ゆらぎを観測するためのロケット実験であり、現在までに 3 度のフライトを行っている。

1. 研究の背景

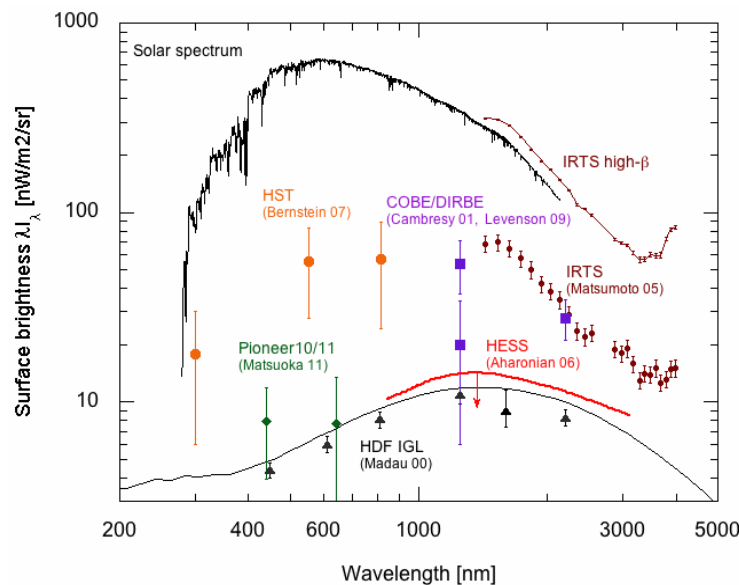


図 1: $1\mu\text{m}$ 付近での空のスペクトルを示している。最も大きな絶対値をもつ黒い線で描かれたスペクトルは黄道光といって、惑星間の塵が太陽光を散乱した光を示し、茶色の点は過去に IRTS によって観測された CIB を示し、最も小さな絶対値の黒い線は既知の系外銀河の足し合わせを表している。

図 1 からわかるように、過去に観測された CIB は既知の系外銀河の足し合わせに対して超過を示している。この超過成分には、点源として検出不可能である第一世代星 (Population III) から放たれる紫外線及び、その紫外線によって電離した中性水素の再結合線である Lyman- α が赤方偏移したものが寄与している可能性がある。その一方で WMAP による CMB 観測の結果から宇宙の再電離は $z \sim 11-20$ と予測されており、第一世代星が宇宙の再電離源である可能性が考えられる。したがって、第一世代星の情報が含まれている CIB を観測することは宇宙の進化及び、ダークエイジを理解する上で非常に重要となる。しかし、過去に観測された CIB は黄道光とスペクトルの形が似ていることから、黄道光の差し引き不足の可能性もあることも考えられる。このことと $1\mu\text{m}$ 付近での観測データが得られていないことから、本実験では特に CIB の $0.8-1.6\mu\text{m}$ での連続スペクトルの観測を目標としている。

2. ロケット実験 CIBER (Cosmic Infrared Background Experiment)

本実験は日本、アメリカ、韓国の国際共同ロケット実験である。また、CIBER には 3 種類 4 つの観測機器が搭載されており、それぞれ CIB のスペクトル絶対値を観測するための LRS (Low Resolution Spectrometer)、CIB の I-Band, H-Band 2 色での空間的ゆらぎを観測するための撮像機 (Imager)、前景光の大部分を占める黄道光の絶対値を測定する NBS (Narrow Band Spectrometer) からなる。主に日本では LRS のデータ解析を積極的に行っている。これらの観測装置は熱放射による影響及びノイズ源となる検出器の暗電流を低減させるため、液体窒素によって 80K 程度まで冷却されている。また、ロケットは高度 200km 以上で約 400 秒に渡り複数の天域を観測した後に回収され、次回の実験に再利用する。CIBER の観測天域を以下に示す

表 1: CIBER の観測天域

天域	黄経	黄緯	銀経	銀緯
SWIRE ELIAS-N1	207	72.7	84.9	44.6
NEP(北黄極)	280	89.3	96.1	29.8
Elat10(黄緯10°)	213	35.1	357	46.1
Elat30(黄緯30°)	234	10.7	23.5	63.3
BootesA	201	46.7	58.8	66.8
BootesB	200	44.9	55.4	68.0

3. LRS のデータリダクション

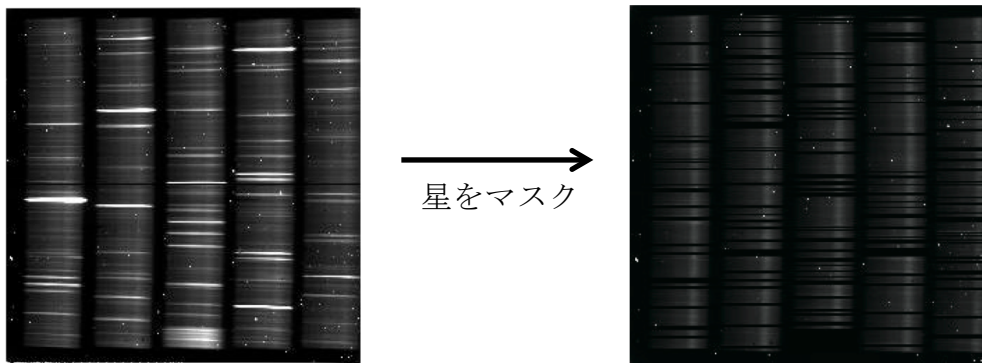
前述したように CIB は空の明るさから前景放射を差し引くことによって求めることができる。その差し引きの際の手順及び方法について以下に記す。

① 暗電流の差し引き

暗電流とは検出器に光が当たっていない状態でも熱的に励起された電子によって生じるシグナルのことである。LRS の検出器の一部にはマスクされた領域を設けている。このマスク領域には光が当たらないため、それを利用することによって観測中の暗電流値をモニターすることができる。

② 点源として観測された星のマスク

Vega 等級で 12 等までの星は LRS によって点源として検出でき、その検出された星をマスクする。



③ 黄道光の差し引き

黄道光は空の明るさの大部分を占めるため、正確な CIB を求めるためには高い精度で黄道光を推定しなければならない。近似的に黄道光は全ての天域で同じであると考えてられている。黄道光の差し引きには 2 通りの手段があり、今までの実験では後者の方を採択している。

・吸収スペクトルを用いた差し引き

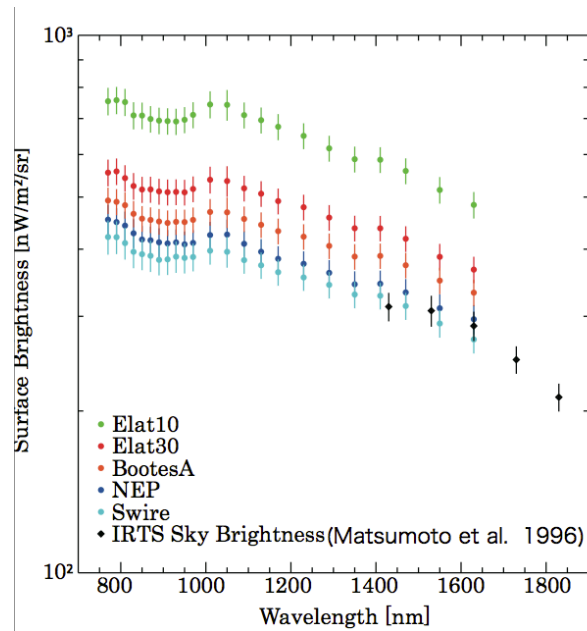


図 2: LRS によって得られた各天域でのスペクトル

黄道光は $0.9\mu\text{m}$ 付近に特異な吸収構造をもつことがわかっている。黄道光は空の明るさに対して支配的であるため、観測される空のスペクトルは黄道光に影響され、 $0.9\mu\text{m}$ 付近に吸収構造が見えていることが図 2 からわかる。そこで ELAT10 でのスペクトルから、他の天域でのスペクトルと差分を取りそれらを平均して黄道光の雛形を作る。この雛形をスケールリングして空の明るさから差し引いたときに $0.9\mu\text{m}$ 付近の特異な吸収構造が消えるように黄道光を推定する。

・ Kelsall model (Kelsall et al. 1998) を用いた黄道光の差し引き

Kelsall model を用いてスペクトルを J バンドでスケールリングして求める。このモデルは DIRBE/COBE のデータをもとに作られているので DIRBE の J バンド の透過率を用いて黄道光の雛形をバンド内で平均化してこれをスケールリングすることによって黄道光の絶対値を推定する。

④ 大気光の差し引き

高度の低い位置で観測されたデータには特に大気光の寄与がのっており、この大気光を観測値から差し引かなければならない、大気光のスペクトルには $1.6\mu\text{m}$ と $1.1\mu\text{m}$ にピークをもつ。このピーク強度の高度依存性と時間依存性から大気光の強度を推定する。

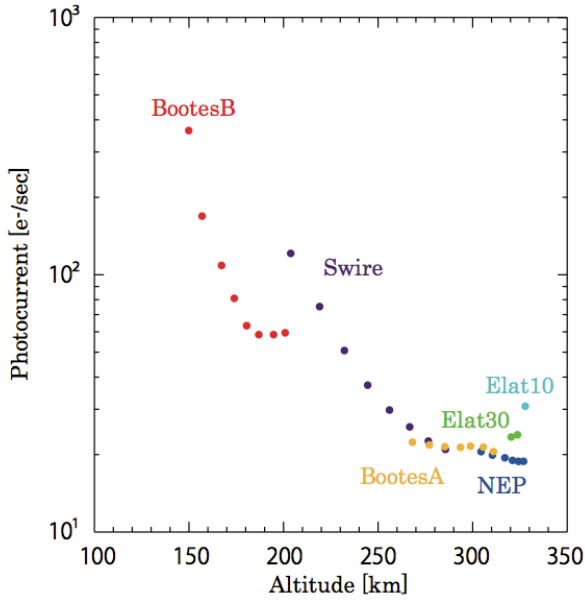


図 3: 大気光のもつ $1.6 \mu\text{m}$ でのピークの高度変化

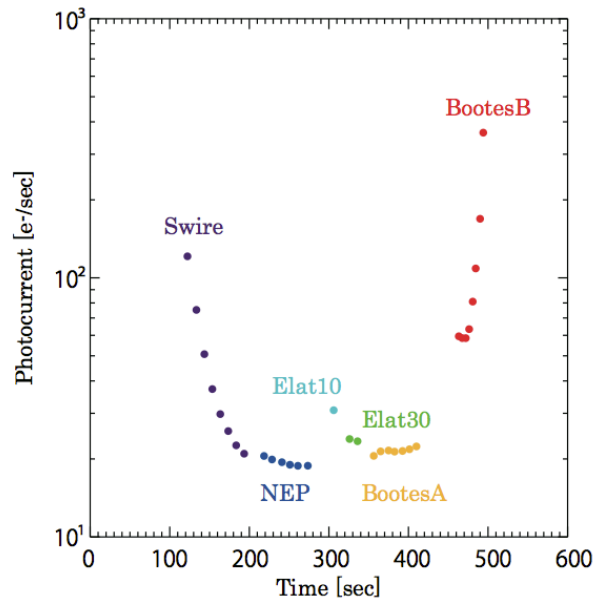


図 4: 大気光のもつ $1.6 \mu\text{m}$ でのピークの時間変化

図 3, 図 4 からわかるように上昇時の方が下降時よりも大気光が強い。これはロケット上昇時にロケットに付随してまき上げられた大気からの光があるためである。よって大気光は高度依存成分の他に時間依存成分があるといえる。よってスケールハイト S_h と減衰時間 τ を用いて次のように表す

$$A(t, H, \lambda) = \alpha(\lambda) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \beta(\lambda) \exp\left(-\frac{H}{S_h}\right)$$

まず、スケールハイト S_h を求めるために、BootesB のデータを用いる。BootesB は下降時のデータであるため時間依存成分は高度依存成分に対して非常に小さくて無視できるとして差分 $A(H_n, \lambda) - A(H_{n-1}, \lambda)$ を最小二乗法でフィットしスケールハイトを求める。

次に減衰時間 τ を求めるために Swire のデータを用いる。Swire は上昇時のデータであり十分に高度があり時間依存成分のみを含むとして差分 $A(t_n, \lambda) - A(t_{n-1}, \lambda)$ を最小二乗法でフィットして減衰時間を求める。

⑤ 点源として観測できない星の光の差し引き

Vega 等級で 12 等より暗い星はスターカウントモデル (Waincoat.R.J 1992) を用いて差し引く

⑥ 銀河内拡散光の差し引き

銀河内拡散光は星間ダストからの熱放射などの寄与である。これはモデル (Mattila K. 2006) によってスペクトルの形を求め SFD ダストマップ (Shlegel et al. 1998) から絶対値を推定する。

4. 現在までの成果の解釈

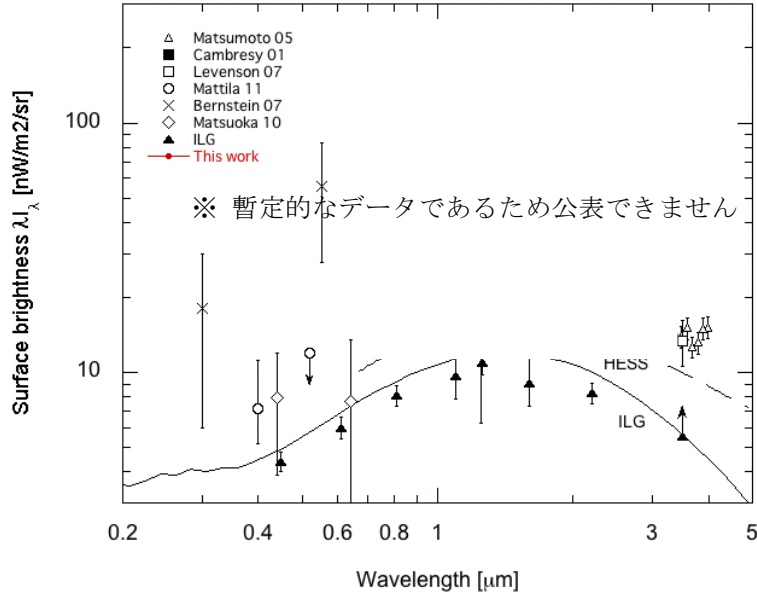


図 5: CIBER 実験によって得られた $1 \mu\text{m}$ 付近での CIB スペクトル

CIBER の現在までの観測結果は過去の IRTS の観測値とよく一致し $1.5 \mu\text{m}$ 付近にピークを観測している。さらに CIB のピークが $1.5 \mu\text{m}$ だとするとその起源は $z \sim 12$ となり WMAP による再電離期と一致する。またこの背景放射の観測値からそれに対応する星生成率(SFR)へ換算することができる。以下のように z についての共動座標系における光密度関数 $L(z)$ を z について積分することで、背景放射を全波長で足し上げた強度 I と関連付けることができる。

$$I = \left(\frac{c}{4\pi} \right) \int_0^\infty L(z) \left| \frac{dt}{dz} \right| \frac{dz}{1+z} \quad (1)$$

$$= 9.63 \times 10^{-8} h^{-1} \int_0^\infty \left[\frac{L(z)}{L_{\text{solar}} \text{Mpc}^{-3}} \right] H_0 \left| \frac{dt}{dz} \right| \frac{dz}{1+z} \quad (2)$$

ここで

$$H_0 \left| \frac{dt}{dz} \right| = (1+z)^{-1} \left[(1+z)^2 (1 + \Omega_M) - z(2+z)\Omega_\Lambda \right]^{-1/2} \quad (3)$$

である。臨界密度で規格化した物質の密度及び宇宙項、WMAP の観測結果から $\Omega_M = 0.28$, $\Omega_\Lambda = 0.72$ である。さらにサルピーターの初期質量関数を仮定すると、光密度 $L(z)$ と SFR: $d\rho_*/dt$ の関係は

$$L(L_{\text{solar}} \text{Mpc}^{-3}) = (7-14) \times 10^9 d\rho_*/dt$$

これを式(1)に代入すると

$$d\rho_*/dt \approx 0.2hI_{100}$$

I_{100} は $100 [\text{nW}/\text{m}^2/\text{sr}]$ で規格化された背景放射強度である。観測された背景放射のピークの値を用いると

$d\rho_*/dt \approx 0.1 [\text{M}_{\text{solar}} / \text{yr} / \text{Mpc}^{-3}]$ となる。この値は、宇宙年齢で平均した値だが局所的な z で集中的に星

生成がなされる場合 SFR は現在の 100 倍程度になる。この結果から重元素の大量生成がなされ、現在観

測される重元素量を上回ってしまうという結果になる。この矛盾が生じないためには、超新星爆発を起こさず、ブラックホールに閉じ込められるメカニズムが必要となってくる。そのために太陽質量の 240 倍以上の質量をもった星が存在しなければならない。よって観測結果からは超大質量の第一世代星が存在したと考えるのが妥当である。

参考文献

- [1] T.Matsumoto, et al. ApJ Vol. 626, pp. 31-43, 2005
- [2] K.Tsumura, et al. 2010 ApJ, 719, 397-402
- [3] Kelsall, T, et al. 1998. ApJ, 508, 44M
- [4] Hauser & Dwek, 2001. Annual Review on Astronomy and Astrophysics. 39, 249-307