PUBLICATIONS OF THE KOREAN ASTRONOMICAL SOCIETY
22: 177 ~ 181, 2007

과학기술위성 3호 다목적 적외선 영상시스템 적외선 우주배경복사 관측 감도 계산
SENSITIVITY CALCULATIONS FOR THE COSMIC IR BACKGROUND OBSERVATIONS BY MIRIS

이대희[1], 이성호[1], 한원용[1], 박장현[1], 남욱원[1], 진호[1], 육인수[1], 박영식[1], 박성준[1], 이형목[2], 박수종[3], TOSHIO MATSUMOTO[4], ASANTHA COORAY[5]

[1]한국천문연구원
[2]서울대학교
[3]경희대학교
[4]Institute of Space and Astronautical Science, Japan
[5]University of California, Irvine, USA
E-mail: dhlee@kasi.re.kr
(Received October 17, 2007; Accepted December 28, 2007)

ABSTRACT

We present the sensitivity calculation results for observing the Cosmic Infrared Background (CIRB) by the Multi-purpose IR Imaging System (MIRIS), which will be launched in 2010 as a main payload of the Science and Technology Satellite 3 (STSAT-3). MIRIS will observe in I (0.9~1.2 um) and H (1.2~2.0 um) band with a 4 x 4 degree field of view to obtain the large scale structure (~ 3 degree) of the CIRB. With the given specifications of the MIRIS, our sensitivity calculation results show that the MIRIS has a detection limit of ~ 9 nW m^{-2} sr^{-1} (I band) and ~ 6 nW m^{-2} sr^{-1} (H band), which is appropriate to observe the large scale structure of CIRB.

key words: instrument, optics, infrared, cosmic background

1. 서 론

2007년 5월에 "다목적 적외선 영상시스템" 과제가 과학기술부의 과학기술위성 3호 주탑재체로 선정됨으로써 한국천문연구원은 한국과학기술원, 서울대학교 등과 협력하여 MIRIS (Multi-purpose IR Imaging System)의 개발을 담당하게 되었다. MIRIS는 우주관측용 및 지상관측용 두 개의 적외선 카메라로 이루어져 있으며 우주관측용 카메라는 우리은하 평면에서의 방출선 관측 및 적외선 우주배경복사 관측을 목표로 하고 있다. 이 중 본 논문에서는 적외선 우주배경복사 관측을 위한 기기의 감도 계산 결과에 대해 논의하고자 한다.

2. 과학적 배경

우주 초기의 원시성 (종족 III)들이 초기 은하를 형성하면서 오늘날 관측되는 근적외선 파장 대역에 두가지 특징적인 형상을 남기는데, 하나는 Ly-α 분광 형상이고, 다른 하나는 공간적 비등방성이다 (Cooray & Yoshida 2004). 빅뱅 이후 최초의 별들이 생성되면, 이들 별들에서 방출되는 빛에 의해 성간 공간에 있는 수소 원자가 재이온화 되기 시작한다. 따라서 Ly-α선 (121.6 nm)보다 에너지가 큰, 즉 파장이 짧은 빛은 수소 원자에 의해 차단되게 되며, 원자외선 영역에서의 이러한 형상을 Ly-α 분광 형상이라 한다. 적색이동이 약 10-20에 이르는 우주 초기에서 방출된 이 빛이 오늘날 지구까지 도달하면서 적색이동을 겪게 되어 약 1-2 μm 정도의 근적외선 영역에서 관측되게 된다 (Matsumoto et al. 2005). 한편, 큰 적색이동을 갖는 원시은하들에서 방출되는 적외선 우주배경복사는 원시은하들의 공간 밀도 분포에 따라 국부은하단과 구별되는 공간적 비등방성을 갖게 된다 (Kashlinsky et al. 2005). 이러한 근적외선 우주배경복사의 Ly-α 분광 형상 및 공간적 비등방성은 Diffuse Infrared Background Experiment (DIRBE, Wright 2001; Cambresy et al. 2001), Infra-Red Telescope in Space (IRTS, Matsumoto et al. 2005), Hubble Space Telescope (HST, Bernstein., Freedman & Madore 2002), 그리고 2 Micron All Sky Survey (2MASS, Kashlinsky et al. 2002) 등에서 제한적으로 관측되었는데, 그 이유는

표 1. 적외선 관측연구별 관측파장

프로젝트	관측파장 (μm)
MIRIS	0.9 - 2.0
CIBER	0.8 - 2.0
ASTRO-F	> 1.7
Spitzer	> 3.6
IRTS	1.4 - 4.0
HST	< 2.0
2MASS	1.25 - 2.16
DIRBE	> 1.25

우주배경복사를 관측하기에는 단위 시야각이 너무 커서 confusion에 의한 영향을 많이 받거나 (DIRBE/ IRTS의 경우 0.7°) 또는 단위 시야각이 너무 작아서 공간 분포를 구하기 어렵기 (HST) 때문이다. 작은 시야각으로 넓은 영역을 관측하는 모자이크 방법에 의한 공간 분포 분석은 기기의 감광 감도 특성 변화 때문에 쉽지 않다. 또한 2MASS의 경우, 지상 관측이 가지는 한계 때문에 적외선 우주배경복사 관측이 제한적이며, 기존의 다른 적외선 우주망원경의 경우, 종족 III에 의한 성분이 검출될 것으로 기대되는 1 μm 전후의 파장 대역을 모두 관측하지는 않는다.

따라서, MIRIS는 광대역 밴드패스 필터를 이용해 1.05 및 1.6 μm 대역을 약 4도의 시야각 및 약 60"의 공간 분해능으로 전천 관측함으로써 이러한 근적외선 우주배경복사의 공간 섭동을 검출하려고 한다. 위의 두 파장을 선택한 이유는 두 파장 대역 사이에서 초기 별들에 의한 우주배경 복사량의 차이가 제일 크고, 황도광 또는 우리 은하 내의 광원에 의한 잡음들과 잘 분리할 수 있기 때문이다 (Bock et al. 2006). 그리고 Matsumoto et al. (2005)이 IRTS로 관측한 적외선 우주배경복사 공간 섭동 결과에서 공간주파수가 2 - 4도 되는 구간에서 적외선 우주배경복사의 초과 성분이 검출되었다고 주장하였기에, 이러한 적외선 우주배경복사의 거대 구조 (약 3°)를 관측하기에 적당하도록 MIRIS의 시야각 및 공간 분해능을 설정하였다.

표 1에서 각 관측기기의 관측파장을 나타내었다.

3. MIRIS 기기

3.1 개요.

MIRIS는 그림 1에서와 같이 위성체의 구조 안에 위치한다. 우주관측 및 지상관측 두 대의 카메라와 센서를 냉각시키기 위한 냉동기, 그리고 전자부로 구성되며, 적외선 센서와 필터는 냉동기에 의해 절대 온도 77 K의 온도를 유지한 상태에서 작동된다. 두 대의 카메라에 공통적으로 운용되는 전자부 시스템은 데이터 획득 및

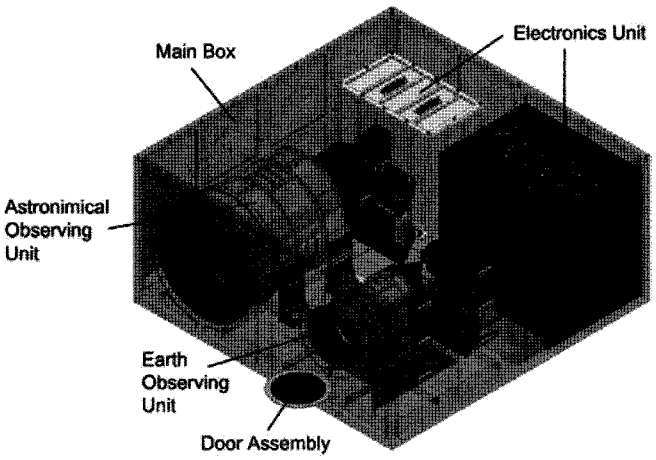

그림 1. MIRIS 기기의 투시도.

위성과의 인터페이스를 담당한다.

3.2 적외선우주배경복사 관측 요구 조건

적외선우주배경복사 관측을 위해서는 다음과 같은 기본적 잡음을 고려해야 한다. 즉 기기 자체에서 방출되는 열잡음, 우리은하 내의 별이나 먼지에서 방출되는 빛, 그리고 태양 빛에 의한 황도광 (zodiacal light) 등을 제거해 주어야 한다. 특히, 외부 은하에서 방출되는 잡음의 공간적 섭동을 추출할 수 있도록 해야 한다. 즉, Pop III 성분이 없을 것으로 예상되는 I 밴드와 Pop III 성분이 추가되었을 것으로 예상되는 H 밴드를 공간적 파워 스펙트럼으로 분석, 비교하였을 때, Pop III 성분을 구할 수 있을 정도의 감도 및 공간 분해능이 요구된다.

우리는 우주관측 카메라의 주어진 사양 및 이러한 요구 조건을 고려하여 표 2와 같은 적외선우주배경복사 관측 요구 조건을 도출하였다.

표 2. 적외선우주배경복사 관측 요구 조건

Parameter	요구조건	비고
관측 파장	0.9-1.2 um (I) 1.2-2.0 um (H)	Lyman break (1.2um) 구분
시야각	4 degree	Pop III 거대구조 성분 (3 도) 구분
공간 분해능 (해상도)	~ 60 arcsec	4 도/ 256 픽셀
관측 영역	> 10x10 degree NEP	전천 관측 요망 주관측 대상

표 3. MIRIS 우주관측카메라 사양 제안

F ratio	2
Dimension	256 x 256 pixels
FOV	3.67 x 3.67 degrees
Pixel scale (Pixel size)	51.6 x 51.6 arcsec (40 x 40 um)
Band Pass Wavelength	1.05(I), 1.6(H) μm
$\Delta\lambda/\lambda$	0.5, 0.5
Array QE	0.55
Optics throughput (OT)	0.33
Dark current	< 2 e-/s
Readout noise (CDS)	40 e-

3.3 MIRIS 우주관측 카메라 사양

주어진 적외선우주배경복사 관측 요구 조건을 고려하여 표 3과 같이 MIRIS 우주관측 카메라의 사양을 제안하였다. MIRIS 우주관측 카메라는 약 8 cm 구경을 가지는 굴절망원경으로 센서부와 필터는 77K까지 냉각되어 사용된다. 초점면에는 256 x 256 PICNIC 센서가 장착되어 3.67도 x 3.67도의 시야를 51.6"의 각분해능으로 관측할 수 있게 하였다. 두 개의 광대역 필터는 각각 1.05 μm (I band) 및 1.6 μm (H band) 대역의 파장에 맞추어졌다. 다음 표 3은 MIRIS 우주관측 카메라의 사양을 나타낸 것이다. 센서의 양자효율 (QE) 값은 제조사로부터 얻은 값이며 광학계의 효율은 윈도우와 필터의 투과율 각각 0.9 및 0.7, 그리고 6장의 카메라 렌즈에 대해 각각 0.9의 투과율을 계산한 것이다. 센서의 암잡음 (Dark current) 및 Read noise는 제조사에 제공한 스펙에서 얻은 값이다.

4. 적외선우주배경복사 관측 감도 계산

4.1 MIRIS 우주관측 카메라 점광원 관측 감도

적외선 우주배경복사 검출을 위해서 제거해야 할 점광원 (point source)에 대한 관측 감도를 아래와 같이 계산하였다.

$$S/N = \frac{F_{target} \cdot t_{\exp} \cdot n_{\exp}}{\sqrt{n_{pixel} \cdot t_{\exp} \cdot n_{\exp} (F_{target} + F_{bg} + N_{dark} + \frac{N_{RD}^2}{t_{\exp}})}} \quad (1)$$

식 (1)에서 S/N는 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio)이며, F_{target}은 관측대상에 의한 전자 flux [e-/sec]를 나타내며, F_{bg}는 배경복사에 의한 픽셀당 전자 flux [e-/sec/pixel], N_{dark}는 암잡음 [e-/sec/pixel], 그리고 N_{RD}는 readout noise [e-/pixel]를 나타낸다. n_{pixel}는 point source의 상이 차지하는 픽셀 개수를 말한다. 현재의 설계안에 따르면 광학계에 의한 상의 퍼짐은 1/2 픽셀 이내, 자세제어에 의한 상의 퍼짐은 1 픽셀 이내가 될 것으로 예상되므로 $n_{pixel} \sim 1$ 이 된다. 또한 $t_{\exp}$는 단위 프레임 당 노출시간을 말하며, $n_{\exp}$는 노출적분 프레임 수를 표시한다. 아래의 식 (2)에서 point source 관측에서의 관측한계(detection limit or sensitivity)를 나타내었다.

$$S_{detection} = \frac{S/N \cdot \sqrt{n_{pixel}} \cdot E_{ph}}{A \cdot OF \cdot QE \cdot \Delta\lambda} \cdot \sqrt{\frac{F_{bg} + N_{dark}}{t_{\exp} \cdot n_{\exp}} + \frac{(N_{RD}/t_{\exp})^2}{n_{\exp}}} \quad (2)$$

식 (2)에서 A는 망원경 집광면적, $\Delta\lambda$는 필터 밴드폭, E_{ph}는 필터 밴드 구간의 평균 광자 에너지를 나타낸다.

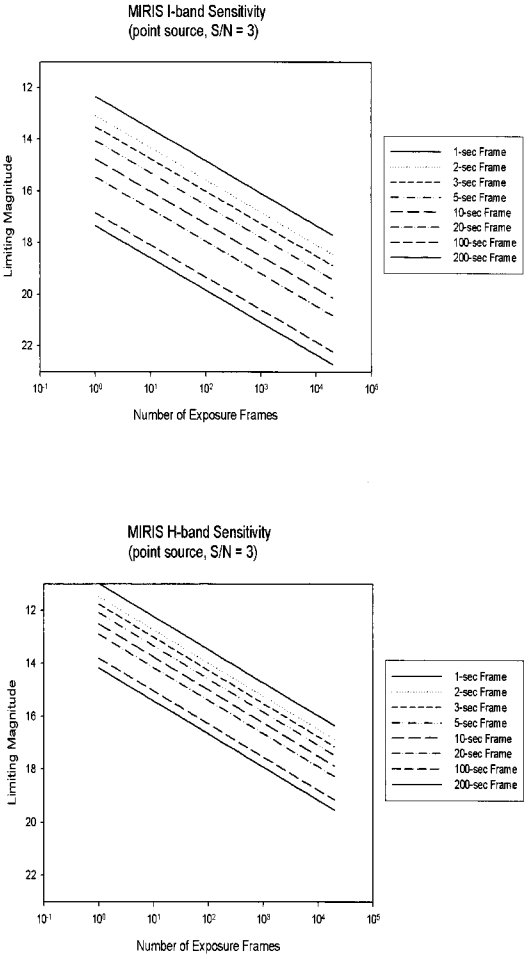

그림 2. MIRIS 우주관측카메라 I 밴드 (위) 및 H 밴드 (아래) 점 광원 관측 감도 (Vega system). Frame 당 노출 시간이 커짐에 따라 관측 한계 등급도 커짐을 알 수 있다.

표 4. MIRIS 우주관측 카메라 관측 한계

Band	I	H
Aperture [cm]	8	
Pixel size [arcsec]	52	
FOV [degrees]	3.67	
λ (μm)	1.05	1.6
Δλ/λ	0.5	0.5
Optics throughput (OT)	0.33	0.33
Array QE	0.55	0.55
$\nu I\nu$ (200 K) [nW m^{-2} sr^{-1}]	3.20E-18	5.14E-04
$\nu I\nu$ (300 K) [nW m^{-2} sr^{-1}]	1.23E-06	1.69E+03
$\nu I\nu$ (Sky*) [nW m^{-2} sr^{-1}]	800	390
Photo current [e-/s]	197	165
T (integration time)	5 sec	
Pixel numbers	100	
N_{RD} (CDS) [e-]	40	
ΔF (inst, 3σ) [Vega mag]	16.7	15.9
ΔF (conf**, 3σ) [Vega mag]	17.6	16.2
ΔF (total, 3σ) [Vega mag]	16.6	15.7
$\Delta\nu I\nu$ (inst, 1σ) [nW m^{-2} sr^{-1}]	7.9	4.4
$\Delta\nu I\nu$ (conf, 1σ) [nW m^{-2} sr^{-1}]	4.4	3.7
$\Delta\nu I\nu$ (total, 1σ) [nW m^{-2} sr^{-1}]	9.1	5.7

*Bock et al. (2006)

** Madau & Pozzetti (2000)

표 3에 주어진 우주관측 카메라의 사양을 식 (2)에 대입하여 계산하면 한 frame 당의 노출 시간에 따라 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림에서 각각의 frame 노출 시간에 따라 다른 종류의 선들로 표시하였다.

그림 2에서 알 수 있듯이 한 frame 당 노출 시간이 길어지면 관측 감도가 좋아짐을 알 수 있다. 이는 read-out noise의 영향 때문인데 frame 당 노출 시간이 10배 길어지면 1 mag 정도의 감도가 좋아짐을 확인하였다. 위의 계산 결과는 광학계를 냉각시키지 않은 상태 (약 300 K)를 고려한 것으로, 만일 광학계가 200 K 까지 냉각된다면 관측 감도는 더 좋아질 것으로 기대된다.

4.2 MIRIS 우주관측 카메라 관측 한계

한편, 점광원이 아닌 표면 밝기 (surface brightness)에 대한 MIRIS 우주관측 카메라의 관측 한계 (detection limit)를 구하였다. 다음 표 4는 표 3에 주어진 우주관측 카

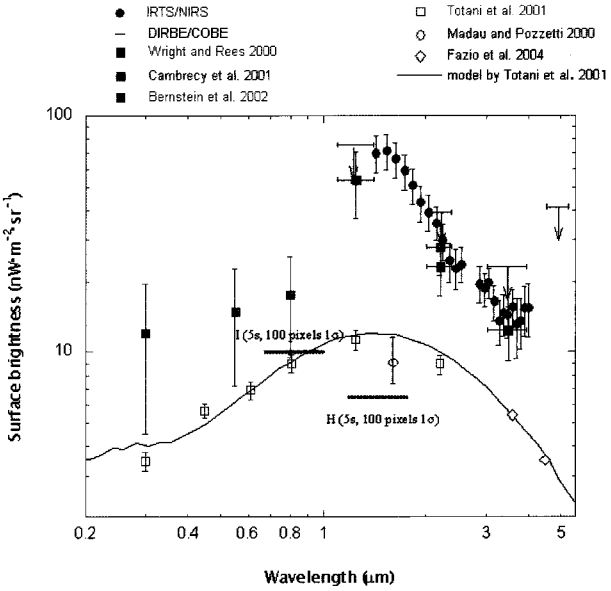

그림 3. 1 초 노출로 5 초 동안 관측한 영상의 픽셀 100 개를 더하여 계산한 MIRIS 우주관측 카메라 관측 한계 (빨간 실선).

메라의 사양을 이용하여 구한, 관측 한계 계산 과정에서의 주요 결과들을 표시한 것이다.

표 4에서 배경 복사 (sky brightness) 값은 DIRBE로 관측한 NEP (North Elciptic Pole)의 값을 1.5 배 한 것이다 (Bock et al. 2006). I 밴드의 경우, 망원경이 냉각되지 않아도 (300 K) 열 복사량이 배경 복사보다 훨씬 작지만 H 밴드의 경우, 300 K에서의 열 복사가 배경복사보다 약 4배 가량 크기 때문에 200 K로 냉각시키는 것이 S/N를 더 좋게 함을 알 수 있다. 300 K인 경우를 가정하고, 주어진 배경 복사 값을 이용하여 계산하면 I 밴드와 H 밴드의 광전류 (photo current)는 각각 197 및 165 e-/s로 주어진다. 한편, 배경 복사의 잡음에 해당하는 점광원에 대한 전자 flux를 구해보면 I 및 H 밴드에 대해 각각 15.8 및 15.0 Vega mag로 주어짐을 알 수 있다. 이때 점광원의 confusion limit은 Madau & Pozzetti (2000)의 결과를 바탕으로 구한 것인데, MIRIS의 픽셀 크기가 52 초로 매우 크기 때문에 큰 영향을 주지는 않는다. Readout noise의 경우 N_{RD}가 약 40 e-/s로 비교적 크기 때문에 그 영향이 컸다. 암잡음 N_{dark}의 경우는 그 크기가 2 e-/s/pixel 이하로 작기 때문에 본 계산에는 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 다만 N_{RD} 및 N_{dark}가 시간에 따라 변화하여 전체적인 성능에 대한 변화를 줄 수 있는데 이는 추후 구체적인 검교정 과정을 통하여 분석되어야하나 기본적으로 암잡음 크기 이하로 안정되는 것이 바람직하다.

그림 3은 표 4의 계산 결과에 따라 1 초의 노출 시간으로 5 초 동안 관측한 픽셀 100 개를 더해 적외선우주배경복사 관측 한계 계산 결과이다.

한편, 관측한 배경 복사에서 Pop III에 의한 적외선 우주배경복사를 구하기 위해서는 배경 복사를 구성하는 요소들 중 foreground 성분, 즉 별빛 및 황도광을 제거해야 한다. Matsumoto et al. (2005)에 따르면 IRTS로 관측한 경우, 총 관측 세기 350 nW m^{-2} sr^{-1}에서 (1.4 um 대역), 황도광에 의한 성분이 약 90 % (~ 250 nW m^{-2} sr^{-1}) 정도를 차지하고, foreground 별빛에 의한 성분이 ~ 70 nW m^{-2} sr^{-1}으로 약 10 % 미만이며 그 나머지 성분 ~ 30 nW m^{-2} sr^{-1} 이 Pop III에 의한 우주배경복사이라고 주장하였다. 그 결과에 따르면 그림 3과 같이 MIRIS 우주관측 카메라의 I 밴드 및 H 밴드가 각각 ~ 9 nW m^{-2} sr^{-1} 및 ~ 6 nW m^{-2} sr^{-1}의 표면 밝기 관측 한계를 가지므로 MIRIS 우주관측 카메라가 Pop III에 의한 우주배경복사 성분을 충분히 관측할 수 있으리라 기대한다. 황도광 성분은 모델에 따라 편차가 크지만, 공간적 섭동이 1 %도 안 될 만큼 공간적으로 균질하기 때문에 우주배경복사의 비등방성을 연구하는 데는 큰 문제가 안 된다.

5. 결론 및 토의

과학기술 3호의 주탑재체인 MIRIS는 우주관측 카메라 및 지상관측 카메라를 포함하고 있으며, 그 중 우주관측 카메라는 I 밴드, H 밴드 두 개의 광대역 필터를 이용하여 적외선 우주배경복사 관측을 목적으로 하고 있다. 우주관측 카메라는 구경 8 cm의 굴절 망원경을 사용하며, 필터와 256x256 PICNIC 적외선 센서는 77 K로 냉각되어 작동된다. 주어진 우주관측 카메라의 사양 및 적외선 우주배경복사 요구 조건을 고려하여, 적외선 우주배경복사 관측 감도 계산을 수행하였다. 계산 결과, 좋은 감도를 얻기 위해서는 단위 frame 당 노출 시간을 길게 할수록 좋으며, MIRIS 우주관측 카메라의 I 밴드 및 H 밴드가 각각 ~ 9 nW m^{-2} sr^{-1} 및 ~ 6 nW m^{-2} sr^{-1}의 표면 밝기 관측 한계를 가지는 것을 알아내었다.

MIRIS를 이용한 적외선 우주배경복사 관측 결과는 기존의 IRTS의 적외선 우주배경복사 관측 자료를 보완, 향상 시키는 중요한 결과가 될 것으로 기대되어 국제 선도적인 연구를 수행하게 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 과학기술위성 개발사업 "과학기술위성 3호 주탑재체 다목적 적외선 영상시스템 개발"의 일환으로 수행되었다. 본 논문을 정확하고 날카롭게 심사해 주신 심사위원님과 편집위원님께 정중한 감사를 드립니다.

참고 문헌

Bernstein, R. A., Freedman, W. L., & Madore, B. F., 2002, The First Detections of the Extragalactic Background Light at 3000, 5500, and 8000 Å. I. Results, ApJ, 571, 56

Bock, J., et al., 2006, The Cosmic Infrared Background Experiment, New Astronomy Review, 50, 215

Cambresy, L., et al., 2001, The Cosmic Infrared Background at 1.25 and 2.2 Microns Using DIRBE and 2MASS: A Contribution Not Due to Galaxies?, ApJ, 555, 563

Cooray, A. & Yoshida, N., 2004, First Sources in Infrared Light: Stars, Supernovae and Miniquasars, MNRAS, 351, L71

Fazio, G., et al., 2004, Far-infrared Source Counts at 70 and 160 Microns in Spitzer Deep Surveys, ApJS, 154, 87

Kashlinsky, A., et al., 2002, Detection of Small-Scale Fluctuations in the Near-Infrared Cosmic Infrared Background from Long-Exposure 2MASS Fields, ApJ, 579, 53

Kashlinsky, A., Arendt, R. G., Mather, J., & Moseley, S. H., 2005, Tracing the First Stars with Fluctuations of the Cosmic Infrared Background, Nature, 438, 45

Madau, P. & Pozzetti, L., 2000, Deep Galaxy Counts, Extragalactic Background Light and the Stellar Baryon Budget, MNRAS, 312, L9

Matsumoto, T., et al., 2005, Infrared Telescope in Space Observations of the Near-Infrared Extragalactic Background Light, ApJ 626, 31

Wright, E. L., 2001, DIRBE minus 2MASS: Confirming the Cosmic Infrared Background at 2.2 Microns, ApJ, 553, 538

Wright, E. L. & Reese, E. D., 2000, Detection of the Cosmic Infrared Background at 2.2 and 3.5 Microns Using DIRBE Observations, ApJ, 545,43

Totani, T., et al., 2001, Diffuse Extragalactic Background Light versus Deep Galaxy Counts in the Subaru Deep Field: Missing Light in the Universe?, ApJ, 550, L137