

「あかり」中間赤外線全天 diffuse マップの作成

石原大助^{*1}, 金田英宏^{*1}, 毛利彰男^{*1}, 近藤徹^{*1}, 鈴木慧士^{*1}, 山岸光義^{*1}, 大藪進喜^{*1},
尾中敬^{*2}

Development of AKARI Mid-Infrared All-Sky Survey Diffuse Map

Daisuke ISHIHARA^{*1}, Hidehiro KANEDA^{*1}, Akio MOURI^{*1}, Toru KONDO^{*1}, Satoshi SUZUKI^{*1},
Mitsuyoshi YAMAGISHI^{*1}, Shinki OYABU^{*1} and Takashi ONAKA^{*2}

Abstract

AKARI, a Japanese infrared astronomical satellite, has surveyed all the sky with the 6 photometric bands centered at from 9 to 160 μ m. The mid-infrared all-sky survey was performed by one of the on-board instruments, the Infrared Camera (IRC), with two photometric bands centered at 9 μ m and 18 μ m. The AKARI 9 μ m all-sky map is unique as a tracer of the inter-stellar polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emission. We have developed further new special reduction processes for the previous maps employed in generating the point source catalog; for example, we have corrected the ionizing radiation effects in the South Atlantic Anomaly (SAA) and the stray light component of the bright moon. Using the improved diffuse maps, we can investigate faint diffuse emission, which leads us to new science.

Keyword: Data reduction, infrared observation

概要

日本初の赤外線天文衛星「あかり」は、波長 9 ~ 160 μ m の 6 つの赤外線波長帯で全天を観測した。この内、搭載装置 IRC によって行われた波長 9 μ m 帯および 18 μ m 帯での全天観測は、過去の IRAS 衛星の成果を一桁凌ぐ感度と空間分解能で塗り替えた。波長 9 μ m 帯のマップは、星間空間の芳香族炭化水素 (PAH) 輝線放射のトレーサーとしてもユニークである。我々は、点源カタログを作成する際に作成したマップに対し、南大西洋磁気異常帯 (SAA) での放射線ヒットの間接的影響の補正、月の迷光の補正、明るい天体の迷光の補正、黄道光の季節間差の補正など、詳細で地道な解析をさらに追加し、より信頼性の高いマップを作成した。これにより、淡く広がった放射成分の議論が可能になり、様々なサイエンスに繋がっている。

1. はじめに

日本初の赤外線天文衛星「あかり」¹⁾は、2006年2月に打ち上げられ、波長 9 ~ 160 μ m の 6 つの赤外線波長帯で全天を観測した。この内、中間赤外線の 2 波長帯 (9 μ m 帯と 18 μ m 帯) の観測は、搭載装置の一つ近中間赤外線カメラ (IRC)²⁾ の検出器のユニークな運用方法により実現した³⁾。IRAS の 12 μ m 帯、25 μ m 帯を一桁凌ぐ感度 (9 μ m 帯で 90 mJy) と空間分解能 (~4") で全天をカバーし、観測結果は既に点源カタログとして C-SODA から世界へ公開している⁴⁾。このカタログは、星形成・晩期型星から系外銀河に至るまで、天文学の様々な分野の研究に活用されている^{5,6,7)}。

星間空間からの放射の観測において、「あかり」9 μ m 帯マップは、IRAS を感度と空間分解能で凌ぐだけでなく、芳

*1 名古屋大学 理学研究科 物理学専攻

*2 東京大学 大学院 理学研究科 天文学専攻

香族炭化水素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon; PAH) 輝線放射のトレーサーとしてのユニークさを持つ (図 1, 図 2). PAH は星間空間における有機物の最小単位として注目されている. また, 一般的なダストとは加熱や破壊の特性の異なる物質として, 星間現象の解明に利用することができる^{8,9)}.

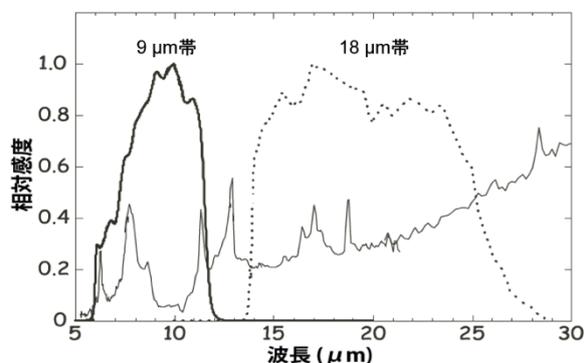


図 1 「あかり」9 μm 帯, 18 μm 帯の波長感度曲線と, 典型的な星間空間のスペクトルの比較. 「あかり」9 μm 帯は星間空間の PAH の 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 μm 放射をカバーし, 18 μm 帯は数百 K に加熱された暖かいダストからの熱放射をカバーする.

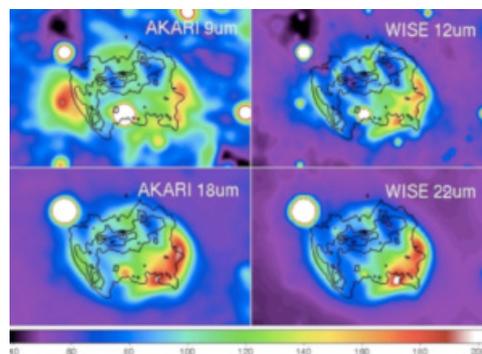


図 2 超新星残骸 W49B の「あかり」9 μm 帯, 18 μm 帯と, WISE 12 μm 帯, 22 μm 帯の画像の比較. Contour は「すざく」X線 (0.2–12 keV). 「あかり」9 μm 帯は特にユニークな情報を提供する.

観測データには, 銀河系の星間空間からの放射 (太陽系外からの放射) 以外に, 黄道光 (太陽系内の惑星間空間塵の熱放射), artifacts (検出器や光学系に由来する偽のシグナル), ショットノイズが乗っている. 太陽系外の星間空間からの放射を定量評価したい場合には, 観測データから黄道光と artifacts を除去しなければならない. Artifacts には, 様々な空間スケールを持つものがあり, ゲインとして乗ってくる成分 (感度の劣化など真の出力に対するかけ算効果になる成分) も, オフセットとして乗ってくる成分 (迷光や散乱光など真の出力に加算される成分) もある. これまでの, 点源カタログの作成⁴⁾や, 同じ観測装置を使った IRC 指向観測のデータ解析²⁾の際にも, artifacts の解析・処理はある程度行われてきた. しかし, 点源カタログを作成する際は, 点源周囲のローカルなスカイ (~数十秒角) を差し引いてから測光をするので, それより大きな空間スケールを持つオフセット成分に関しては補正する必要がなかった. また, 点源カタログ作成の際には, 検出天体数よりも信頼性を重視するコンセプトで処理していたので, artifacts の影響を比較的強く受けたデータについては補正せずに捨てていた. また, 指向観測のデータ解析でも, 視野 (~10 分角) より大きな空間スケールを持つオフセット成分は, 補正する必要がなかった. ところが広域マップを作成し, 広がった放射成分の議論をする場合には, 空間スケールの大きな (数十秒角~数度角) artifacts の影響も受ける. しかも, 複数スキャンのデータを重ね合わせて深いマップを作ることで, artifacts も強調されてしまうので, より精密な処理が必要となる. また, 評価したい対象の広がった天体を構成するデータの中に artifacts の影響を強く受けたデータがあり, それを取り除くと穴が空いてしまう場合は, 捨ててしまわずに可能な限り補正を施して利用することで, 不定性の範囲内で議論が可能になる.

そこで我々は, 点源カタログを作成する際に点源の抜き出しのために作成したマップに対し, 南大西洋磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly; SAA) での放射線ヒットの間接的影響の補正, 月の迷光の補正, 明るい天体の迷光の補正, 黄道光の季節間差の補正など, 他の赤外線衛星プロジェクトでは手を入れていない高度な処理をさらに幾つか追加し, より信頼性の高いマップ・よりカバー率の高いマップの作成を試みた. 検出器の光検出の原理や光学設計など, 観測装置の物理に基づいてデータを解析することで, artifacts に埋もれた真の信号を引き出し, 新しい科学的発見に繋がり, 次の衛星の設計にも重要な情報を得ることができる.

2. データ解析の概要

2.1 観測方法とデータ解析の概要

「あかり」の軌道は, 半年で全天をカバーできる, 上空 700km の太陽同期極軌道である. 半年毎に同じ領域を観測するが, 半年後の観測ではスキャン方向が 180° 回転し, 1 年後の観測では再び同じスキャン方向になる. 冷媒の液体ヘリウムは約 16 ヶ月保ったので, 殆どの領域を 3 つの季節で, 残り領域も 2 季節で観測している. スキャン幅は $10'$ であ

り、その軌道は黄道で4'ずつずれるので、連続的にサーベイしていれば、1回の季節の観測のみでオーバーラップを生じながら空を埋め尽くすことができる。マップの作成では、これら重複したデータをフルに活用し、領域あたり1つのマップを作る。ただし、「あかり」は時々、天文台型運用(指向観測)も行っており、その間に通りすぎた空はデータ欠損となる(gap)。Gapを除いても、全天の90%以上を観測できている⁴⁾。

マップ作成のプロセスの概略を図3に示す。生データはまず、点源カタログ作成時と同様、スキャンパス毎に基本パイプラインで処理する⁴⁾。ここでreset anomaly, linearity, flat, カメラ内散乱光, 宇宙放射線ヒットのスパイクノイズの除去, など基本的な処理を行う。この基本的な処理を終えた段階では、マップのピクセルスケール(4.68")でのノイズレベル(~1MJy/sr)に比べて、最大で数十倍(例えばSAAや月の迷光中)、平均で2~3倍程度のartifactsの影響が残っている。次にこの後述べる、マップの作成のための特殊処理, SAAにおける放射線ヒットの間接的影響の補正, 月の迷光の差し引き, 明るい天体周囲に生じる迷光の補正等, を追加した。各スキャン毎に処理したデータは、重ね合わせ・繋ぎ合わせて1枚の画像にする。

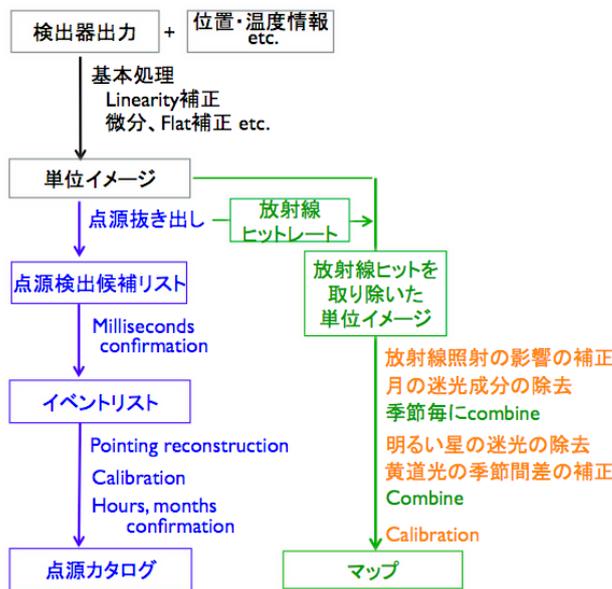


図3 マップ作成プロセスの概要。黒字：共通プロセス部分。青字：点源カタログ作成のためのプロセス。緑字：マップ作成のためのプロセス。赤字：マップ作成のために今回新たに追加したプロセス。

2.2 SAA における放射線照射の間接的影響の補正

南大西洋磁気異常帯(SAA)とは、地球の南大西洋にあって磁場が顕著に弱い領域である¹⁰⁾。「あかり」がそのSAA上空を横切る間、宇宙放射線は地球磁場に妨げられないので、他の天域よりも10倍から最大で200倍も多く観測視野に降り注ぐ。その宇宙放射線は、直接的には観測データ上にスパイクノイズを添加するが、間接的にも出力全体にわずかな増加をもたらすという現象が見られた(図4左)。「あかり」は1日に地球を14.4周するが、この内3~4周がSAAに重なるため、影響を受ける領域は多い。詳細な解析により¹¹⁾、(1)この増加成分がゲインではなくオフセットであること、(2)放射線ヒットレートの関数で表されること(図5)、(3)原因は、除去しきれていない小さなスパイクノイズの集合ではなく、読み出し回路のオフセット変動でもなく、暗電流のわずかな増加であること、をつきとめ、放射線ヒットレートの関数で、系統的に補正することに成功した(図4右)。

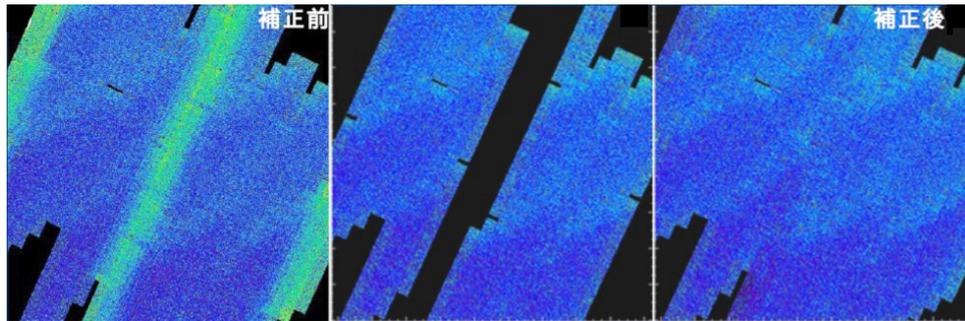


図 4 SAA における宇宙放射線照射の間接的影響とその補正。例として、(R.A., Dec.)=(23h50m48s, -19° 42' 00") 付近の 1.7° 四方の領域に対して、1 季節目の観測機会で取得したデータのみを使用し、マップを構成したものを示す。(左) SAA の影響を受けているデータも使って作成したマップ。スキャン方向を矢印で示す。衛星は、SAA の中心部を 14.4 周に 1 度の頻度で通過し、軌道(スキャンパス)は周回ごとに 4' ずつずれるので、スキャン方向に沿って約 1° おきに SAA の影響のピークが現れている。(中) SAA 通過中に取得したデータを除外したマップ。(右) この章で述べる方法で、放射線照射の影響を補正したマップ。

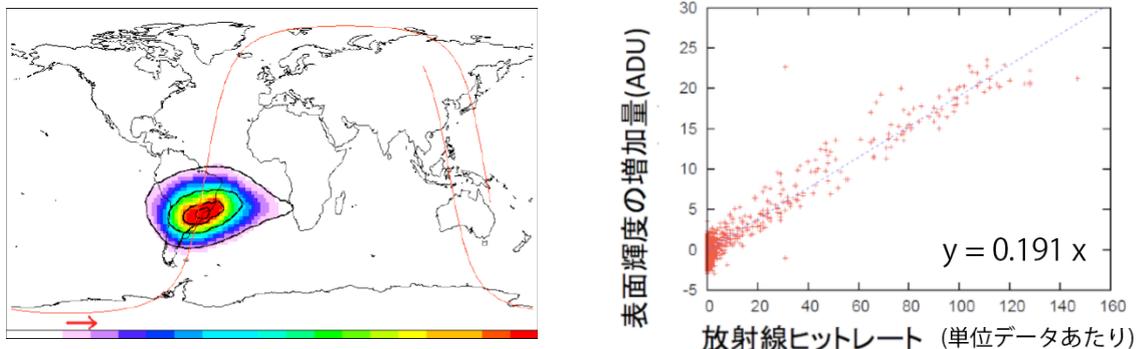


図 5 (左) 宇宙放射線照射に起因すると思われる出力の増加量(カラーマップ)と放射線ヒットレート(contour)の分布を地球座標で示す。ヒットレートの高い場所ほど出力の増加量も多い。赤線と矢印は、とある周回での衛星の軌道を示す。(右) 宇宙放射線のヒットレートと検出器出力の増加量の関係。ヒットレートは、データ処理上の「単位データ」あたり、検出器が受けている放射線ヒットの数(1 素子 30 μ m 角の 256 \times 2 素子の検出器が 13.5 秒の間に受ける放射線ヒットの合計数)を表している。このプロットから、極端に外れている点は除外し、一次式(青点線)でフィットし、この関係を補正式として使うことにした。

2.3 月の迷光成分の除去

観測視野の近くに月があると、直入射を防いでも迷光の影響を受ける(図 6a)。月齢によって迷光の形状や強度が異なり、トラス形状を反映した特徴的な構造も示すため、使えるデータと使えないデータを、単純に月離隔だけで区別するのは難しい。

そこで、月の迷光のパターンを定量的に評価した。まず月入射の前後のデータを集め、月を中心とした検出器座標系(縦軸がスキャン方向、横軸がクロススキャン方向)で、強度マップを作成した(図 7 左)。この時、銀河面が写っているデータは除外し、点源は差し引いた。さらに、月の影響を受けていない部分(クロススキャン方向に離隔 $\sim 50^\circ$ 付近)のデータから黄道光の成分を推測し、この強度マップからは差し引いた。銀河面成分である淡い小構造が含まれる場合もあるが、各月で作成した強度マップの median をとることで、月起因で無い成分は落とされる。月との相対ベクトル空間を全て埋められる訳ではないので、データが無い部分(図 7 左の黒い筋に相当、全体の約 50%)は内挿した。

月入射の機会ごとに作成した月の迷光強度マップの median 画像を、図 7 中に示す。迷光は、(1) 離隔 40° に渡って広がっており、(2) 非対称な構造で、(3) トラス起因と思われる 3 対の円弧構造が見られる。また、このパターンは、季節間や上向き下向きスキャンの間で、比較的安定であることが分かった。図 7 右に、各季節での迷光パターンの分散画像を示す。よって、この迷光強度マップを使ってマップから迷光成分を差し引き、差し引き誤差の大きな部分(迷光パターンの季節間分散が大きい部分)はマスクすることで、使えないデータは明確に排除し、月の影響を受けたデータもある程度(離隔 17° 以下を捨てた場合に失っていた領域の 50% 以上を)再利用できることになった。

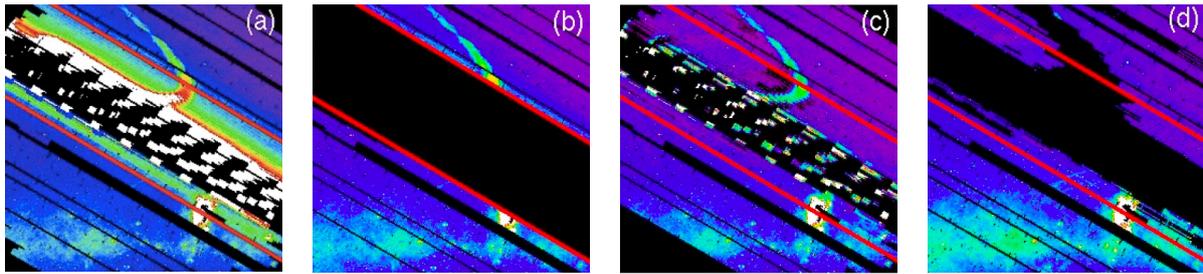


図 6 月の迷光の影響とその補正の様子. 例として, $(l, b)=(354.5^\circ, 2.5^\circ)$ 付近の 8° 四方の領域のマップを示す. (a) 月が近くにいる 1 季節目の観測機会で, 月の迷光を受けたマップを示す. 多数回のスキャンの間に観測視野と月との相対位置が変わっていくので, 月の迷光もまたクロススキャン方向に少しずつずれていく様子を表している. 図の中央上部分に見られる釣り針状の構造は, トラス起因の迷光である. 2本の赤線に囲まれた範囲が月からの離隔 17° 以内の領域に相当する. 左下の赤線付近を観測している時は, 月本体は視野の右上の離隔 17° 付近に存在している. 月の影響を一番受けている真ん中付近を観測している頃には, 月も視野付近に存在している. 右上の赤線付近を観測している頃には, 月本体は視野の左下の離隔 17° 付近に存在している. 中心部で白黒の斑模様になっているのは, 飽和ぎりぎりの高いレベルと, 飽和したデータ(マスクされてゼロになっている)が入れ子になっているため. (b) 月離隔 17° 以下のデータを除外して作成したマップ. (c) この章で述べる方法で迷光成分を差し引いたマップ. (d) この章で述べる方法で迷光成分を差し引いた上, 差し引き誤差の大きい部分をマスクしたマップを示す. このマスクされた部分は, 半年後もしくは1年後に正常な観測ができれば, 埋めることができる.

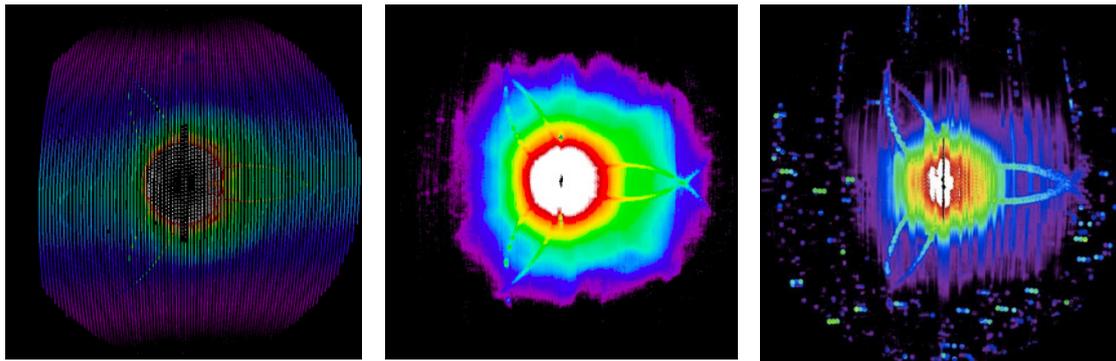


図 7 月を中心とした検出器座標で描いた迷光強度マップ ($9 \mu m$ 帯). 縦軸がスキャン方向, 横軸がクロススキャン方向に相当する. サイズは $80^\circ \times 80^\circ$. (左)2006/6/1 ~ 6/8 のデータから構成したデータ. (中)左図に対し, データが無い領域は内挿し, 黄道光を差し引いたものを, 各月入射の前後で作成し, それらの median 画像を作成したもの(月の迷光のテンプレート). (右)中図に対する σ 画像. 強度が強い部分は, 各月入射の度に再現性が低いことを示す.

2.4 明るい天体の迷光の除去

観測視野からある方向に離隔 1° くらいのところには明るい天体があると, 視野内に強い迷光が現れる. 2.3 章の月の迷光とは, 強度・形状ともに異なる現象である. マップ上でこの迷光は, 明るい天体を中心とし楕円弧形状に現れる(図 8a,8b). 幾つかの事象の解析結果から, 迷光の表面強度は迷光源の数 % 程度であり, 円弧の半径はだいたい 1° であることが分かった. しかし, 多くのケースで迷光源が飽和していたり構造をもっていたりするため, 迷光パターンを迷光源の強度の関数で定量的に表現するのは難しい.

そこで個々のケースに対して, データの性質に基づいて個別に対応することにした. 2.1 章で述べたように, 「あかり」は半年後に同じ領域を反対向きでスキャンする. 迷光の円弧形状がスキャン方向に対して非対称であるため, 半年前と後では天球座標に対する迷光パターンの形状が異なる(図 8a,8b). このため, 同じ領域の半年前と後での観測データの差分をとると, リアルな成分は消え, 迷光成分だけが残る(図 8c). この迷光成分を, それぞれのマップからマスクすることにした(図 8d). 迷光成分を同定する際, 図 8c において, 単純にあるレベル以上の値を示す部分を迷光と定義してしまうと, ノイズも拾ってしまうので, smooth をかけて空間周波数の高いノイズは落として, 迷光形状を同定するようにした. ただし, 2つの円弧の交点では両方のデータに迷光が載っているため, 両方のデータに対してマスクが必要で

あり、結果的にデータが残らない。マップ利用の際には、明るい天体のスキャン方向上下約 1° 付近にある2点の黒い gap に注意する必要がある。このような処理がなされた明るい天体は、全天で計20天体存在する。

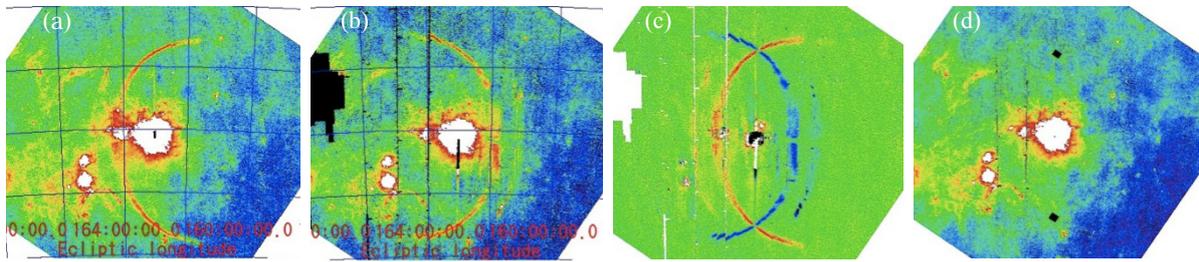


図8 明るい天体周囲に現れる迷光成分とその除去方法。RCW38 周囲 3° 四方のマップの例。(a) 季節1の観測で得られた画像。(b) 季節2の観測で得られた画像。矢印は衛星のスキャン方向を示す。(c) (a) - (b) の差分マップ。リアルな構造は両方のマップで等しく移っているため差分画像上には残らず、(a) のマップ上にだけ乗っている迷光パターン(左側の円弧)がプラス成分として、(b) のマップ上にだけ乗っている迷光パターン(右側の円弧)がマイナス成分として現れている。(d) この章で述べる方法により、迷光成分を除去した画像。

2.5 黄道光の季節間差の補正

「あかり」は、ある天域を観測した半年後に、地球の公転軌道上の反対側の位置から同じ天域を観測する。しかし、衛星の惑星間空間の中での位置は、半年前と後で異なるので、前景放射成分(オフセット)としての黄道光(惑星空間塵放射)のレベルは異なる。一番効いているのは、earth trailing dust cloud 成分¹²⁾と考えられる。このオフセット成分の空間周波数は低い(～数十分角)ので、数 \times 数 $^\circ$ 程度のマップ上では、季節間差を2次曲面でfittingし、片方の季節のマップから差し引くことでレベルを揃えることができる(図9)。現在は、最初に観測した季節(2006/5/8-2006/11/8)でのオフセットレベルに揃えている。

なお、黄道光の差し引きは行っていない。現在知られている黄道光モデル¹²⁾は比較的単純であるため、とくに黄道面周辺のダストバンド付近で、実際のデータと表面輝度のずれが大きい。とくに中間赤外線長の波長では黄道光放射のピークにあたるため、この不定性の影響を他波長よりも大きく受けてしまう。IRAS の配布マップ(ISSA)でも、 $12\ \mu\text{m}$ および $25\ \mu\text{m}$ では、黄道光差し引きにより混入したartifactsが強く残っている。このため現時点では、黄道光をモデルで差し引かないデータをプロダクトとして保持する方針にしている。

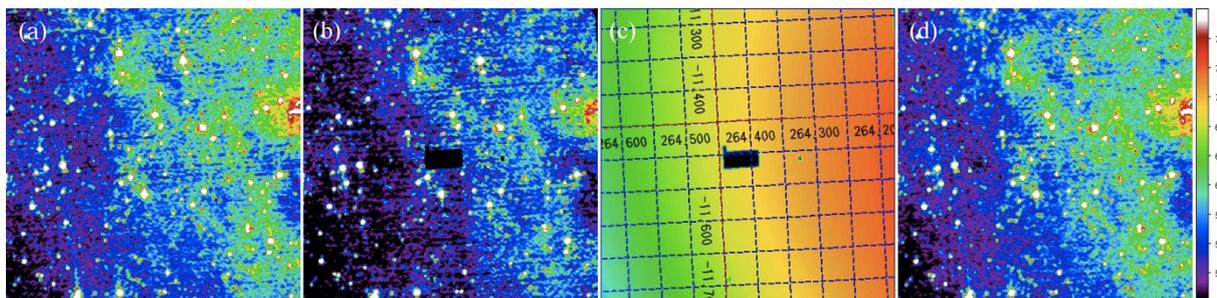


図9 背景光(黄道光)の季節間差の補正例。(a) ある領域($l, b=(353^\circ, -0.7^\circ)$)付近の 0.4° 四方)の季節1の画像。(b) 同じ領域の季節2(季節1から半年後の観測機会)の画像。(c) (a) - (b)。空間周波数の低いオフセット成分が乗っている。グリッドは黄道座標を示す。(d) オフセットを合わせてcombineした画像。(a),(b),(d)のスケールは統一している。(c)は、わずかなオフセット成分を強調するため、(a),(b),(d)に比べ20倍スケールを拡大している。

2.6 面輝度較正

全天サーベイ観測で取得した画像のピクセル値(ADU pix^{-1})を物理単位(MJy sr^{-1})に変換する、キャリブレーションのための換算係数を求めた。指向観測で、同じ装置(IRC)の同じフィルタで取得した画像は、標準星の観測結果を元にキャリブレーションすることができる¹³⁾。そこで、指向観測モード(584 ms 露光)で観測・キャリブレーションしたdiffuse

天体 (反射星雲 NGC7023) を、全天サーベイ観測モード (44 ms 露光) で観測し、この換算係数を求めた (図 10)。また、これと並行して、MSX 衛星や Spitzer 衛星で確立されつつある、赤外線標準面光源¹⁴⁾ によるキャリブレーションも試し、クロスチェックを行った。

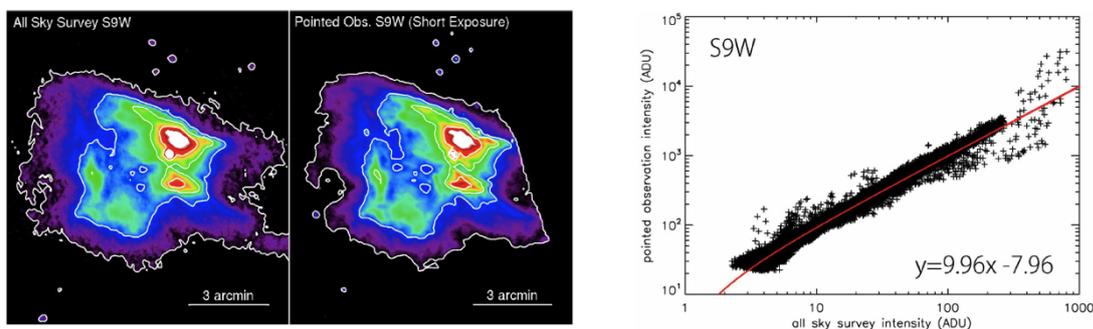


図 10 (左) NGC7023 の全天サーベイモードでの取得画像 (44 ms 露光)。(中) 同じ天体を撮像モードで取得した画像 (600 ms 露光)。図右端は視野外のためデータが切れている。(右) 撮像モードでの出力値 vs. 全天サーベイモードでの出力値。フィッティングで求めた傾きと、撮像モードでのキャリブレーション結果から、全天サーベイモードでの換算係数を決めた。

3. 結果

図 11 に、2 章で述べた様々な補正を施し、全観測機会のデータを使って作成した $9 \mu\text{m}$ 帯マップの例を示す。様々な artifacts の影響を、典型的な銀河面でのマップのオリジナルのピクセルスケール ($4.68''$) でのショットノイズレベル ($\sim 1 \text{ MJy/sr}$) 以下に抑えることができた。このデータは、C-SODA を通じて全世界への公開を計画している。

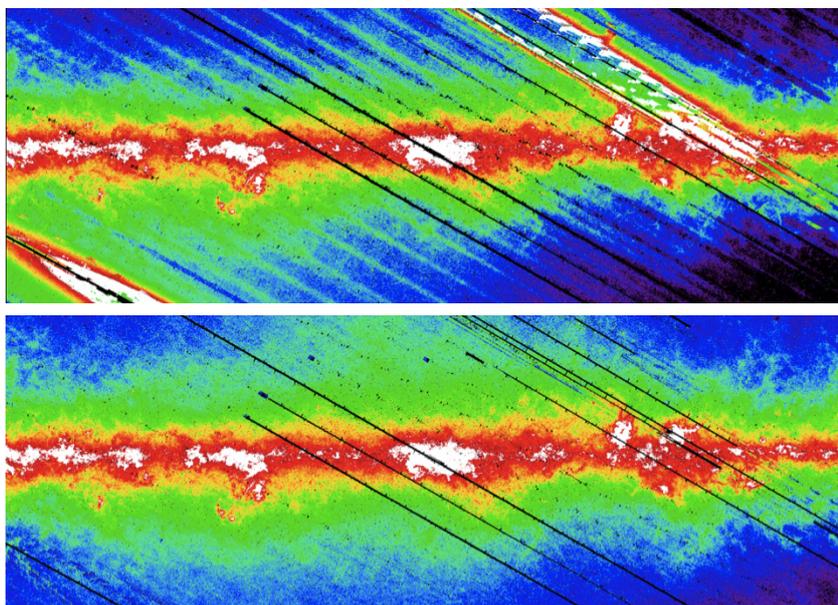


図 11 銀河中心付近 $40^\circ \times 20^\circ$ の $9 \mu\text{m}$ 帯マップの例。(上) 2 章で述べた様々な補正を行う前。とくに目立つのは、SAA 中の放射線照射に起因する縞々構造と、マップ右上と左下の月の迷光の影響。(下) 補正を施した後。画面上に残る黒い筋は観測データが無い領域であり、データ処理上の問題では無い。

4. 議論

4.1 マップ作成プロセスの改善により可能になったサイエンス例

2 章で述べた様々な補正により、マップの精度や信頼性を上げることで、可能になるサイエンスがある。これまでの報告例の中から幾つかを紹介する。

磁気浮上ループの物質の物理状態の解明⁹⁾

太陽表面のコロナのように、銀河磁場のパーカー不安定性によりループ状に物質が持ち上げられた構造が、「なんてん」望遠鏡での電波観測により銀河面上で見つかった(磁気浮上ループ)¹⁵⁾。持ち上げられた物質が落下してきた根元では、激しい衝突が推定される。2章で述べた様々な補正によって精度が改善された「あかり」中間赤外線マップを用いて、この磁気浮上ループの周辺の放射構造を解析した。その結果、まずこのループの一部に沿った赤外線放射構造が明らかになった(図12左)。また、星間空間において、PAH放射と遠赤外線のcold dustの放射強度は、(個数密度比がほぼ一定であることと、必要な放射場硬度が同程度であるため)一般に相関が良いと言われているが¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾、「あかり」9 μm 帯とIRAS 100 μm 帯の強度の比のマップから、一般的な星間空間のダストに対するPAH放射の割合が、ループの根元で小さくなっていることが分かった(図12右)。(なお、「あかり」の遠赤外線画像はこの時点で較正が終わっていなかったため、IRAS 100 μm をcold dust放射として利用した)。「あかり」2~5 μm 帯の分光観測でも、ループ根元付近では、PAH放射が一般的な星間空間よりも弱く、そのかわり炭素系ダストの破壊により生じる鎖状炭化水素の放射が増えていることが分かり、小さな粒子であるPAHが選択的に破壊されている状況が明らかになった。これらの解析により、分子雲観測とは独立に、星間空間のダストの物理の視点から、磁気浮上ループの存在とループ根元でのショック状態を、検証することができた。

Type Ia 超新星残骸でのダスト生成の発見⁸⁾

Tychoの超新星残骸に於いて、「あかり」18 μm 帯でトレースする暖かい(~100 K)星間ダストの分布と、電波観測で調べた分子雲の分布と、X線観測で調べた放出物質の分布・衝撃波面の位置・不連続面(放出物質の先端)の位置を比較することで、超新星の衝撃波との相互作用で加熱された星間物質と、放出物質の中で新しく生成されたダストを区別することに成功した(図13)。Type Iaの超新星残骸でダスト生成の兆候が見つかったのは世界で初めてであり、宇宙の化学進化の研究に大きなインパクトをもたらした。

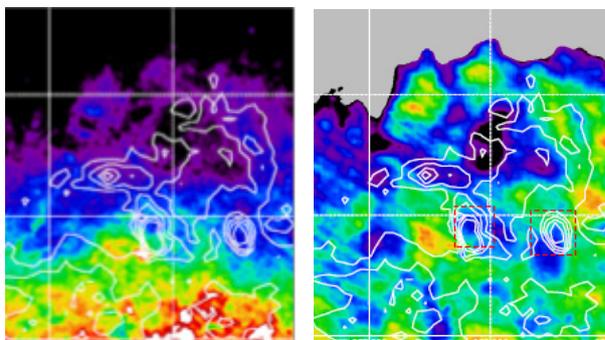


図12 (左) $(l, b) = (-3.8^\circ, +1.5^\circ)$ 付近の $2.5^\circ \times 2.7^\circ$ の「あかり」9 μm 帯画像。「なんてん」電波観測により見つかった、磁気浮上ループの一つ、分子雲ループ215を白のcontourで示す。(右)同領域の「あかり」9 μm 帯 / IRAS 100 μm 帯放射の比の画像。赤点線で囲った部分が、ループの根元に相当する。

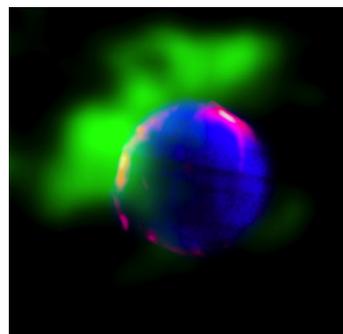


図13 Tychoの超新星残骸、 $(l, b) = (120.1^\circ, 1.415^\circ)$ を中心とした $20' \times 20'$ の3色合成画像。青がSuzaku X線(0.2-12 keV)、緑が電波観測による一酸化炭素輝線の分布、赤がAKARI 18 μm 帯放射を表す。

4.2 今後の課題

これまでに、様々なartifactsの補正によりマップの精度と信頼性が向上し、新しいサイエンスが可能になった。今後も様々な補正を追加することで、さらに淡い構造や大きな空間スケールの構造の議論が可能になるはずである。「あかり」中間赤外線全天サーベイデータ、とくに波長9 μm 帯のデータは、天文学的にも貴重なリソースであり、労力を費やして精度良いマップを作る価値は高い。今後3年のタイムスケールで取り組むべき課題としては、以下の項目が挙げられる。

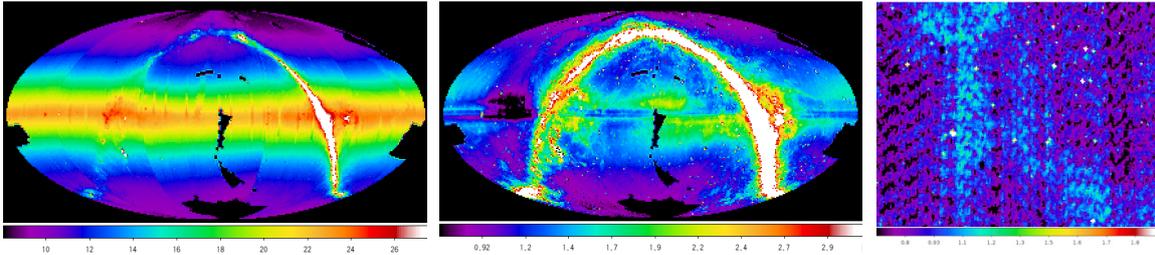


図 14 (左)黄道光込みの「あかり」9 μm 全天マップ (中)モデル 12)に基づいて黄道光を差し引いた「あかり」9 μm 全天マップ。差し引き残渣が見える。(右)中図の $(l, b) = (90^\circ, -38.5^\circ)$ 付近を拡大し、3' のガウシアンカーネルで smooth した図。1 MJy/sr 以下のレベルではあるが、linearity と reset anomaly 補正及び、フラット補正とカメラ内散乱光補正の不十分が原因と思われる縞模様が見られる。左図及び中図で共通して見える黒い部分は、全天のマスプロセスの際に生じたバグによる物であり、将来的には埋まる予定。

黄道光の定量評価と除去

波長 9 μm 帯および 18 μm 帯では、天域によっては、黄道光が銀河面放射よりも強い(図 14 左)。黄道光の分布は空間周波数が低いので、小さな(少数度)放射構造の議論では、「スカイ」を差し引けば問題ないが、銀河面の大きな(数度~数百度)空間スケールの構造を議論する時には、この黄道光の差し引き精度が問題になる。この黄道光成分を差し引き、太陽系外からの赤外線放射(銀河面からの放射、銀河系外からの放射)のマップを作成する。IRAS マップ(IRSA)に於いても、波長 12 μm 帯および 25 μm 帯のマップでは、黄道光の差し引き誤差が大きく、「あかり」のデータに含まれる黄道光もこれまでの標準的なモデル¹²⁾では説明できないことが分かっており¹⁹⁾、難しい課題である(図 14 中)。そのため、既存のモデルに依存するのではなく、全天の各画素での SED フィッティングを行い、地球軌道付近のダストの熱放射(~270K)相当の成分を分離するなどの、独自のアプローチを試している。

地球の高層大気の洩れ光の定量評価と除去

「あかり」の軌道面は、地球公転面の法線に対して夏至の頃に最大 35° 傾く。この前後に、極付近で地球の高層大気の放射の洩れ込みが原因と思われる迷光が現れる。さらに、望遠鏡の遮光面は太陽方向に対して高くなっているため、この時期、南極よりも北極で地球に対する遮蔽が低くなり、迷光も強く出る(図 15)。この影響を正確に評価し、差し引いたマップを作成する。

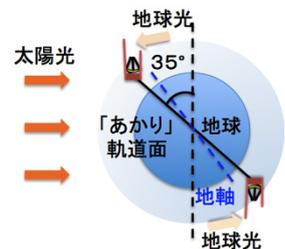


図 15 夏至の頃の「あかり」軌道面を横からみた模式図。

明るい天体を見た後の感度劣化の定量評価と補正

月を見た後 100 分以上のタイムスケールで、検出器の感度の低下が見られる。この影響を定量的に評価し、マップを補正するとともに、その現象を物理的に理解し、次の衛星の検出器試験計画に情報を反映する。

近軌道デブリが視野を通過したデータ等の除外

機械的な処理で除外できない異常なデータの除去を、一つ一つ手作業で行う。例えば、全天サーベイ中に時々、数秒間程度の間、視野全体が明るくなる現象があるが、この原因は、近軌道のデブリが視野を横切ったためと考えられている。

Linearity と reset anomaly の補正式の改善

電荷蓄積型の検出器を使い、非破壊読み出しにより観測を行っているので、光電荷が蓄積すると検出器にかかる実効バイアスが低下し、観測中にゲインが低下してしまう(linearity 劣化)⁴⁾。また、蓄積電荷をクリアするために定期的リセットをかけているが、このリセット時に流れる電流によって極低温部の読み出し回路が一瞬温度上昇し、その後ゆっくり冷えてゆくため、出力のオフセット変動を招く(reset anomaly)⁴⁾。Linearity 劣化や reset anomaly によって、出力信号は最大 8 割変化する(それ以上補正が必要なデータはマスクしている)。この 2 つの現象は、「検出器が一定の光量を受けていても、リセットから時間が経過すると出力が低下してくる」という同じ外見を示すので、分離して評価するのが難しい。点源カタログ作成時は、この影響を、実験室で定常光を当てた時のデータを元に、電荷蓄積開始直後は linearity 劣化をゼロと見做す、全ピクセルの素性が同じと見做すなど、様々な仮定を入れて評価していたが、とくに点源フラックス評価時には影響が少ないがマップ作成の際には影響の大きい、reset anomaly の評価が不十分であった(図 14 右)。全天サーベイ時の多くの時間帯は、星などの天体が見えず、空全体に広がる黄道光成分を見ている。これらを材料にすれば、様々

な空の強度・様々な電荷蓄積量に対する応答を調べるための大量のサンプルが得られるので、1ピクセルずつ **linearity** と **reset anomaly** を同時に考慮して **fitting** を行い、より現実的な補正関数を作成することが可能である。

フラットとカメラ内散乱光補正式の改善

背景光を光源とし、カメラ内で生ずる散乱光が、検出器上の全ピクセルにまたがって淡く広がっていることが分かっている。検出器全体に散乱光(ピクセル毎に違うオフセット成分)が乗っている状態では、「一様な空(黄道面や銀河面から離れた、一見何も写っていないような天域の多数枚の画像のモードを取るなどして作成したスカイフラット)」の観測から **flat**(ゲインのピクセル間ばらつき)を求めることができない。そのためこれまでは、同じ星を様々なピクセルで観測することで、**flat** の滑らかな成分(空間周波数の低い成分)だけを評価していた。しかし、「一様な空」の観測から高空間周波成分も評価し、より精度の高い **flat** を作成したい。また、点源のカメラ内散乱光については多数の具体的なサンプルが得られているため、点源の強度と視野中の位置の関数で、カメラ内散乱光の強度・パターンを表現し、**convolve** することで、カメラ内に一様に入ってきた光や広がった光源に対する散乱光も精度良く記述できると期待される。

5. まとめ

「あかり」の波長 $9 \mu\text{m}$ 帯と $18 \mu\text{m}$ 帯での中間赤外線全天マップは、感度と空間分解能で過去の IRAS サーベイマップを上回り、とくに波長 $9 \mu\text{m}$ 帯は PAH のトレーサーとしての恒久的価値も持つ。我々は、点源カタログを作成する際に作成したマップに対し、幾つかの新しい処理を追加し、マップの精度と信頼性を向上させた。マップの **artifacts** のレベルは、オリジナルピクセルスケールでのノイズレベル以下に抑えることができた。新しく追加した処理は、SAA での放射線ヒットの間接的影響の補正、月の迷光の補正、明るい天体の迷光の補正、黄道光の季節間差の補正など、他の赤外線衛星プロジェクトでは稀に見る地道な解析を含む。改善したマップにより、淡く広がった放射成分の定量評価に基づく議論が可能になり、銀河面の磁気浮上ループの物理状態の解明や、超新星残骸中で熱放射が見えているダストの起源の解明など、様々なサイエンスに繋がっている。マップの改善を通じて、装置の特性が明らかになり、次の赤外線天文衛星の開発に反映できる新しい技術情報も得られた。今後もデータ解析方法の開発を継続することにより、さらに淡い放射成分や広がった放射成分の議論を可能にし、「あかり」全天サーベイデータでしかできない新しいサイエンスに繋がりたい。

謝辞

This research is based on observations with AKARI, a JAXA project with the participation of ESA. This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research (24740122) from Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), and the Nagoya University Global Center of Excellence Program, “Quest for Fundamental Principles in the Universe” (QFPU) from the Japan Society for the Promotion of Science and the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan. We thank all the AKARI/IRC team members, for beneficial suggestions on the processing of the in-flight data. We also express many thanks to the anonymous referee for a careful reading and constructive comments.

参考文献

- 1) Murakami, H., et al. : The Infrared Astronomical Mission AKARI, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, (2007), pp.369-376
- 2) Onaka, T., Matsuhara, H., Wada, T., et al. : The Infrared Camera (IRC) for AKARI - Design and Imaging Performance, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, (2007), pp.401-410
- 3) Ishihara, D., Wada, T., Onaka, T., et al. : Mid-Infrared All-Sky Survey with the Infrared Camera (IRC) on Board the ASTRO-F Satellite, The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, (2006), Vol. 118, pp.324-343
- 4) Ishihara, D., Onaka, T., Katata, H., et al. : The AKARI/IRC mid-infrared all-sky survey, Astronomy & Astrophysics, Vol. 514, (2010), id. 1

- 5) Ita, Y., Matsuura, M., Ishihara, D., et al. : AKARI's infrared view on nearby stars. Using AKARI infrared camera all-sky survey, 2MASS, and Hipparcos catalogs, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 514, (2010), id. A2
- 6) Ishihara, D., Kaneda, H., Onaka, T., et al. : Galactic distributions of carbon- and oxygen-rich AGB stars revealed by the AKARI mid-infrared all-sky survey, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 534, (2011), id. 79
- 7) Oyabu, S., Ishihara, D., Malkan, M., et al. : AKARI detections of hot dust in luminous infrared galaxies. Search for dusty active galactic nuclei, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 529, (2011), id. A122
- 8) Ishihara, D., Kaneda, H., Furuzawa, A., et al. : Origin of the dust emission from Tycho's SNR, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 521, (2010), id. L61
- 9) Kaneda, H., Ishihara, D., Mouri, A., et al. : Processing of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Molecular-Loop Regions near the Galactic Center Revealed by AKARI, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.64, No.25
- 10) Adriani, O., Barbarino, G. C., Bazilevskaya, G. A., et al. : The Discovery of Geomagnetically Trapped Cosmic-Ray Antiprotons, *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 737, (2011), id. L29
- 11) Mouri, A., Kaneda, H., Ishihara, D., et al. : Effects of High-Energy Ionizing Particles on the Si:As Mid-Infrared Detector Array on Board the AKARI Satellite, *The Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 123, (2011), pp.561-567
- 12) Kelsall, T., Weiland, J. L., Franz, B. A. et al. : The COBE Diffuse Infrared Background Experiment Search for the Cosmic Infrared Background. II. Model of the Interplanetary Dust Cloud, *The Astrophysical Journal*, Vol. 508, (1998), pp.44-73
- 13) Tanabé, T., Sakon, I., Cohen, M., et al. : Absolute Photometric Calibration of the Infrared Camera (IRC) aboard AKARI, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.60, (2008), pp.375-388
- 14) Cohen, M., Green, A. J., Meade, M. R., et al. : Absolute diffuse calibration of IRAC through mid-infrared and radio study of HII regions, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 374, (2007), pp.979-998
- 15) Fukui, Y., Yamamoto, H., Fujishita, M., et al. : Molecular Loops in the Galactic Center: Evidence for Magnetic Flotation, *Science*, Vol. 314, (2006), pp.106-109
- 16) Onaka, T., Yamamura, I., Tanabe, T., Roellig, T. L., & Yuen, L. : Detection of the Mid-Infrared Unidentified Bands in the Diffuse Galactic Emission by IRTS, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 48, (1996), pp. L59-L63
- 17) Draine, B. T., Dale, D. A., Bendo, G., et al. : Dust Masses, PAH Abundances, and Starlight Intensities in the SINGS Galaxy Sample, *The Astrophysical Journal*, Vol. 663, (2007), pp.866-894
- 18) Bendo, G. J., Draine, B. T., Engelbracht, C. W., et al. : The relations among 8, 24 and 160 μ m dust emission within nearby spiral galaxies *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 389, (2008), pp.629-650
- 19) Pyo, J., Ueno, M., Kwon, S. M., et al. : Brightness map of the zodiacal emission from the AKARI IRC All-Sky Survey, *Astronomy & Astrophysics*, Vol.523, (2010), id. A53