

近赤外線サーベイ その歴史と将来

長 田 哲 也 ， 佐 藤 修 二

〈名古屋大学大学院理学研究科 〒 464-01 名古屋市千種区不老町〉

E-mail: nagata@zlab.phys.nagoya-u.ac.jp, sato@zlab.phys.nagoya-u.ac.jp

近赤外は星や銀河の分布を調べるのに最適の波長域である。大規模な近赤外掃天観測（サーベイ）が発表されてから 30 年。赤外線アレイ検出器の発達を受けて高感度のサーベイがヨーロッパとアメリカで開始された。この 2 つのプロジェクトを概観するとともに、私達が計画している、領域を限ったさらに高感度のサーベイについてもふれたい。

1. はじめに

「管を以て天をうかがい、錐を用いて地を指す」——竹の管からのぞいても天の広大さを知ることではできない、キリを使って大地を測ることはできない——と莊子（秋水編）にあるように、宇宙の全貌を知りたいと言うのに視野が小さい望遠鏡をふりまわすのはいかにもばかげている。とは言え、新しい観測手段や未知の波長域で全天にわたって暗い天体まで観測し、ガイドマップを作りたいとか新しい現象を見つけ出したいならば、視野を絞ってより暗いものまで検出する望遠鏡なるものに頼らねばならない。まさに老莊が他の個所で説いているように、効率を追いかけるのとは一見逆の方向をたどるわけだ。結局私たちは管をのぞきながら天の広大さを知ろうと努めることになる。

近赤外線（1–2.5 μm ）は、2 つの理由で星や銀河の分布を調べるのに適している。第一に、主系列から進化して赤色巨星となった星のスペクトル・エネルギー分布がこの波長域でピークを持つ。このため、普通の銀河を全体として見たとき、この波長域が最も明るい。第二に、2 μm になると星間塵による減光が可視光に比べ 1 / 10 しかないため、星間塵に邪魔されずに見通すことができる。これらの特徴は、初期の近赤外サーベイでは銀河系内の赤色巨星の分布を描き出すのに役立ち、現

在の高感度なサーベイでは可視光での「禁止領域（Zone of Avoidance —— 銀河面の星間塵にさえぎられて系外の銀河が見えない）」を透かして遠方の銀河を検出するのに役立つ。さらに現在では、核融合を起こすには質量が小さすぎて赤外線だけでエネルギーを細々と出している星、褐色矮星を発見するという興味も生じている。

ここではまず、30 年前に行なわれた最初の 2 μm サーベイやその後のサーベイをふりかえった後、1980 年代後半からすばらしい発達をとげた赤外線アレイ検出器を使って最近始まったサーベイについて解説する。なお、赤外線天文学のあけぼのから赤外線天文衛星 IRAS の成果までは「サーベイのサーベイ」という論文を Price が書いているので参照されたい¹⁾。

2. 初代 2 μm サーベイ (IRC カタログ)

1965 年 1 月から 1968 年 4 月まで、カリフォルニア工科大学のグループが、カリフォルニアのウィルソン山に口径 62 インチ（157 cm）の望遠鏡を作って行なった。赤緯 81 度から -33 度までをカバーし、約 20000 天体を検出した。そのうち、K バンド（波長 2.2 μm ）で 3 等より明るい 5612 個を IRC カタログとして発表している²⁾。

それまでも近赤外線でのサーベイはいくつか試みられている¹⁾が、このサーベイは手法の斬新さと



結果の見事さで今もお光を放っている。エポキシ樹脂を回転させながら硬化させ回転放物面の $f/1$ 主鏡を製作し、それにアルミニウムを蒸着した。その主鏡を 20 Hz で振動させて差動信号を取り出すこと（チョッピング）により、背景放射を打ち消している。観測は、時角 ± 30 分という、ほとんど真南や真上の範囲で、日周運動の 18 倍の速さで東西にスキャンして行なわれた。4 ペアの PbS 検出器（個々の視野は $3' \times 10'$ ）を使い、I バンド（波長 $0.84 \mu\text{m}$ ）のデータも Si 検出器でとっている。

地球大気の OH 夜光や熱放射によって K バンドは 1 秒角平方あたり 13–14 等の星に相当する背景放射がある。また、後で述べる DENIS サーベイのように望遠鏡や観測装置からの熱放射を多くひろってしまう場合には 1 秒角平方あたり 11 等もの背景放射となる。この場合、 $3' \times 10'$ の視野からは 0 等星の数倍もの背景放射がやってくるわけで、主鏡による空間チョッピングなくしては高感度の観測はできなかったに違いない。

IRC カタログに含まれる 5612 個の天体はほとんどが晩期型星である。O, B, A, F, G 型の星は 318 個しかなく、炭素星が 215 個、S 型星が 65 個、残りは K, M 型の巨星・超巨星である³⁾。IRC カタログは、可視光の Bright Star Catalog と対応するものと考えられるかも知れない。ジャンスキー (Jy であらわし、1 Hz あたり 1 平方メートルあたりに 10^{-26} ワットの何倍のエネルギーがやって来るか) という単位で言えば、IRC カタログの限界は 40 Jy である。一方、Bright Star Catalog には 9091 個の天体が含まれ、完全性の限界等級は V バンドで 6.4 等で、ジャンスキーで言うと 10 Jy である。可視光で見た空とは違って、銀河系内に散らばる赤色巨星と超巨星をあざやかに見せてくれたのが IRC カタログであった。

しかし反面、K バンドで 3 等という限界等級では星形成領域に埋もれた若い星は検出できなかった。オリオンの BN 天体も K バンドでは 5 等に

かならない。これ以降、星形成領域を中心とするサーベイは $K = 7.5$ 等 (Elias の暗黒星雲のサーベイ⁴⁾) からそれ以上の限界等級をねらう代わりにかなり狭い範囲だけのものとなってゆく。アレイ検出器のない時代に 1 個の検出器で高感度を目ざすと、サーベイできる天域が小さくなるのはしかたないことだった。

私たちの銀河系の中心領域に対しても、日本のグループのいくつかのサーベイ^{5), 6), 7)}とともに南アフリカ天文台で見事な 2 平方度のマップが作られた⁸⁾のが単素子検出器による最後で最大のサーベイと言えよう。これらからはいくつかの興味深い天体が見つかったものの、銀河中心での星形成を系統的に解き明かすほどの規模と感度にはならなかった。これは残念ながら PtSi アレイ検出器でのサーベイ⁹⁾でも同じで、私たちが次世代のサーベイを計画している理由の一つになっている。

なお、IRC カタログは赤緯 -33 度よりも南が抜けているわけだが、南天をサーベイしようという試みはいくつかあった。1967 年にニュージーランドのジョン山から赤緯 -30 度と -52 度の範囲の約半分の領域を K バンドでの限界等級 3.5 等でカバーしたもの¹⁰⁾、1982 年からバリ・ムードン天文台の Epchtein らがサンパウロ大学の 60cm 望遠鏡を使って銀経 240 度と 360 度の範囲で ± 5 度を同様の限界等級でカバーしたもの¹¹⁾などがある。このフランスとブラジルの共同研究はやがて後述の DENIS サーベイへと発展する。

3. その後のサーベイ AFGL など

K バンドよりもやや長い波長域で、70 年代と 80 年代に大規模なサーベイがなされたのはロケットや人工衛星からであった。1971 年 4 月から 1972 年 12 月の 7 回と、オーストラリアからの 1974 年 9 月の 2 回のロケット観測で得られたのが AFGL (Air Force Geophysics Laboratory) サーベイである¹²⁾。口径 16.5cm で液体ヘリウムで冷却された望遠鏡を使い、24 個の光伝導型素子で $3.4' \times 10.5'$ (オーストラリアからの南天は $5.1' \times 10.5'$) の視野

の検出器を使用した。それぞれの波長で観測時間は合計 30 分以下にすぎない。4.2 μm · 11 μm · 20 μm · 27.4 μm の 4 バンドで、それぞれ全天の 78 %、90 %、87 %、37 % をカバーしている。波長 4.2 μm での天体数は 1982 個である。

波長 4.2 μm の天体の 89 % が IRC カタログや Bright Star Catalog の天体に同定されるのに対し、波長 11 μm · 20 μm では同定率が 60 % · 41 % と下がる。また、それぞれのカタログで 1000 番目に明るい天体を波長エネルギー分布の図の上にプロットしてやると Bright Star Catalog (0.55 μm) · IRC カタログ (2.2 μm) · AFGL カタログの 4.2 μm では絶対温度 4000 K の黒体放射の線にほぼ乗っているのに対し、11 μm · 20 μm となるにしたがってそれから上にずれてくる。進化して周囲に自らが吹き出した塵をまとった星や、まだ主系列に到達せずやはり塵をまとっている星など、もっと低温の成分が卓越した天体を見るようになるからである。

1983 年 1 月に打ち上げられた赤外線天文衛星 IRAS は、波長 8 μm から 120 μm の領域を 4 バンドに分け (12 · 25 · 60 · 100 μm)、全天の 96 % 以上をサーベイした^{13), 14)}。約 25 万個の点源カタログや 5425 個の明るい赤外線源の低分解能スペクトル (LRS) カタログなどを作成している。IRAS のサーベイは有名でもあるし、上に述べたように近赤外線で見えるのとはかなり違うものを見ているわけで、詳しくは述べない。

COBE (Cosmic Background Explorer) 衛星は 1989 年 11 月に打ち上げられ、赤外線領域では DIRBE (Diffuse Infrared Background Experiment) という観測装置をもって 1.25 μm から 240 μm までの波長で全天のサーベイを行なっている¹⁵⁾。確かに近赤外のバンドも含んでいるが、視野のサイズが 0.7 度と大きく、まさにひろがった (diffuse) 赤外背景放射観測用のものなのでここではとりあげない。また、1995 年 3 月に打ち上げられた日本の IRTS (Infrared Telescope in Space) プロジェクトでも、口径 15 cm の望遠鏡と波長 1.4 μm から 12 μm をカバーする

分光器によって 10000 天体以上のスペクトルが得られているらしいが、詳細はパブリの特集号¹⁶⁾などを参照されたい。

MSX (Midcourse Space Experiment) 衛星は 1996 年 4 月に打ち上げられた軍事関係の衛星だが、1 日のうち何十分かは天体観測にも利用されている。観測の実際やデータはインターネットの Web の上 (<http://gibbs1.plh.af.mil/>) などでようやく出始めたところで、まだ全貌がわからないのだが、1995 年の Price の論文¹⁷⁾をもとにまとめてみる。冷媒の液体窒素がなくなるまでの最初の 1 年半の間に赤外線での観測を行ない、IRAS のデータに欠けていたものを補完するようなサーベイをしているはずである。紫外・可視域の観測装置とともに、4.2 μm から 26 μm までの波長領域を 5 つに分けた 18" の素子サイズの測光器と、2.6 μm から 28 μm までのフーリエ分光器を搭載している。IRAS がサーベイし残した領域の観測と、銀河面の観測が第一の目的である。銀河面は、IRAS の大きな視野では天体が重なり合って訳がわからなくなってしまい暗い天体を拾い出すことができなかった。銀経 60 度以内では銀緯 ± 5 度、それ以外の銀経では ± 3 度の範囲をサーベイしたはずである。さらに第二の目的として、銀河面のいくつかの領域・おうし座などの分子雲・大小マゼラン雲などを選択的に何度もスキャンして第一のサーベイより 10 倍も感度のある観測も行なったはずだ。先日の IAU 総会の銀河中心シンポジウム、ポスター発表での見事な中間赤外線マップから推察されるように、すばらしいデータが出てくるのが期待できる。

4. DENIS サーベイ

(Deep Near Infrared Survey)

256 × 256 素子の 2 次元アレイ検出器が赤外線です使えるようになって計画された大サーベイのひとつがこの DENIS である。1995 年 12 月から本観測が始まっており、今世紀中の完了をめざしている。

8カ国（ABC順でオーストリア・ブラジル・フランス・ドイツ・ハンガリー・オランダ・イタリア・スペイン）の20研究機関が協力してのもので18,19), ESO（ヨーロッパ南天文台）のラシヤ観測所に1966年に設置された最初の望遠鏡である口径1m f/15カセグレン望遠鏡を占有し、3バンドでのサーベイを行なう。3バンドはI (0.8 μm), J (1.25 μm), Ks (2.15 μm)で、検出器はIバンドが1024 × 1024素子のCCD, J・Ksバンドが256 × 256素子のNICMOS検出器（HgCdTe）である（図1）。J・Ksバンドでは1素子が3"に相当する。

観測方法は、望遠鏡を止めて1.22秒間の露出を9回行なう。この間に焦点面近くの鏡をごくわずかずつ動かし、点源の測光精度を高めるとともに位置の精度として約1"を達成する。この約10秒間の観測の後、望遠鏡は赤緯方向に10'移動し新たな視野で観測を続ける。3" × 256素子で全体の視野は約12'なので、2'だけ次の視野と重なることになる。こうして12' × 30度の細長い領域がサーベイできるとそれが1単位である。この細長い領域が5112個集まると赤緯+2度から-88度

の範囲がすべておおえる。実際の観測は最低1人の研究者が行ない、1夜の終わりに取得したデータを計算機にかけておき、起きた時にはその夜の観測の質が判断されて、OKであったか観測をやり直す必要があるかがわかっているという²⁰⁾。

パリとライデンにデータ解析センターを持ち、それぞれ、ひろがった天体に対する100万枚の画像とIバンドでは10億個の点源のカタログとを発表する計画である。

これまでの観測からそれぞれのバンドでの限界等級が推算されている。平均的にはI = 18.0等, J = 16.1等, Ks = 13.5等が点源に対する限界等級（ノイズの5倍）として達成できている。各バンドの検出器の前の、冷却されていない場所にレンズや反射鏡やダイクロイック鏡があるため、それらの光学素子からの熱放射を拾ってKsバンドでの限界等級が悪くなっている。

1993年12月からJ・Ksバンドの観測装置をつけ、試験観測（プロト・サーベイと称している）を行ない、2000平方度をサーベイした。天文学データの解析に5つのワーキング・グループができています：1) 晩期型星, 2) 低質量星, 3) 銀河構

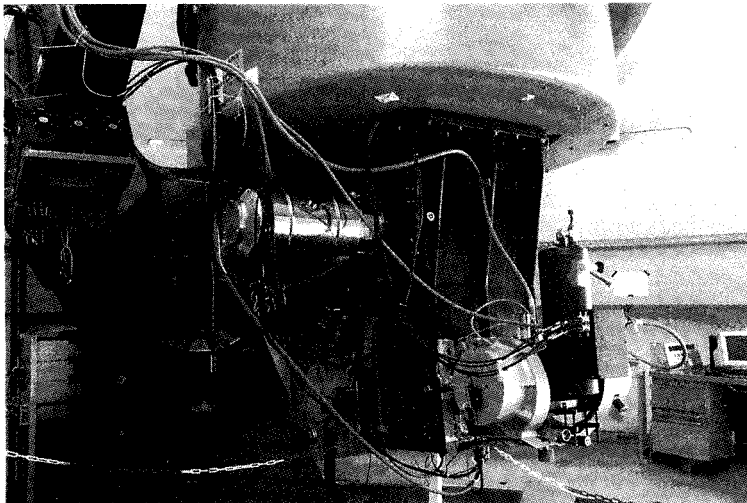


図1 ヨーロッパ南天文台の1m望遠鏡に取り付けられたDENISの観測装置。焦点部の左側にCCDのステンレス製デュワー、右側にNICMOS検出器を含むデュワーが見える。もう一つのNICMOS検出器用のデュワーはかくれて見えない。（Epchtein et al. 1997 ESO Messenger より）



造, 4) 星形成, 5) 系外銀河と宇宙論. その結果はすでに論文となって発表されつつある.

5. 2MASS サーベイ (2 Micron All Sky Survey)

マサチューセッツ大学とカリフォルニア工科大学・NASA のジェット推進研究所とが中心になって行なう²¹⁾. 北半球と南半球に同じ望遠鏡と観測装置を設置し, 全天のサーベイを行なう. 口径 1.3 m の専用望遠鏡 (図 2) と 3 個の NICMOS 検出器を使った 3 バンド同時カメラが置かれるのは, 北はアリゾナ・ホプキンス山, 南はチリのセロトロロ天文台である (図 3). DENIS とは違ってこちらの 3 バンドは近赤外でよく用いられる J ($1.25 \mu\text{m}$), H ($1.65 \mu\text{m}$), Ks ($2.16 \mu\text{m}$) で, ノイズの 5 倍で表わした限界等級は J = 16.5 等, H = 15.8 等, Ks = 15.0 等をめざしている. H バンドが加わっていることと, 焦点面の光学素子をすべて冷やしたため Ks バンドでの限界等級が良いことが特徴である.

サーベイのしかたで DENIS と異なる点は, 望遠鏡の動きである. 望遠鏡は, 1 秒間に約 $1'$ の速さで赤緯方向になめらかに動いて行く. 一方望遠鏡の副鏡は逆の方向に動いて, 1.3 秒間の露出のあいだ焦点面の像は動かない. 検出器アレイの信号を読み出している間に副鏡はもとの位置にさっと戻り, $1.3'$ あまり南北にずれた次の露出を行なう. こうして $8.5'$ の視野の中に一つの天体は 6 回検出されることになる.

1992 年 5 月から 1993 年 5 月にかけてアリゾナ・キットピーク天文台の 1.3 m 望遠鏡にプロトタイプ赤外線カメラを取り付けて 5 夜のテスト観測を 5 回行なっている²²⁾. プロトタイプカメラは素子が $2.3''$ に対応することと, 1 度に 1 バンドしか観測できない点が違うだけで, 望遠鏡や副鏡のスキャンは本番の観測と同様に行なわれ, 800 平方度がサーベイされたという. 1995 年の春にも新しい光学

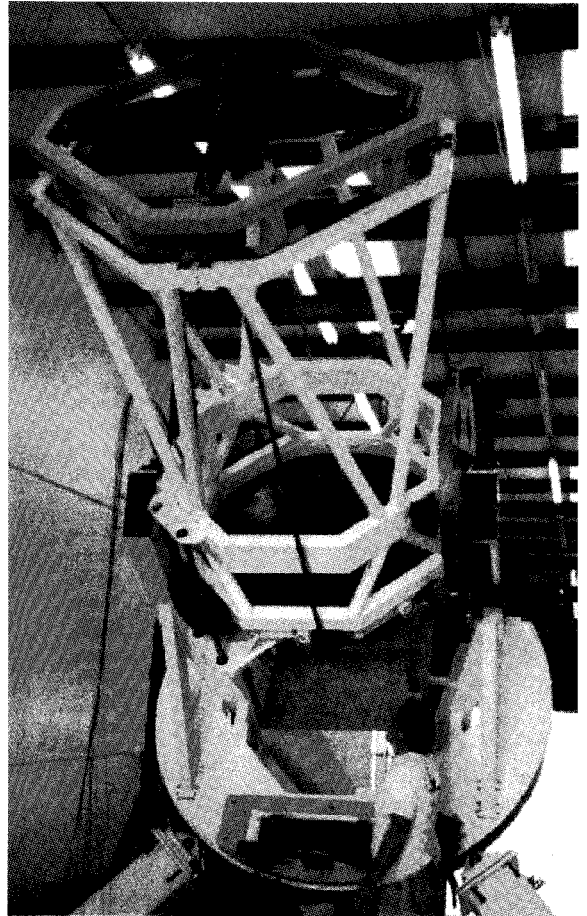


図 2 アリゾナ・ツーソンの工場では組み立て中の 1.3 m 望遠鏡

系でキットピーク天文台での観測が行なわれた. 本観測は北半球が 1997 年から, 南半球が 1998 年から始まり, 2001 年の完了をめざす.

6. これからの赤外線サーベイ

DENIS と 2 MASS は初代 $2 \mu\text{m}$ サーベイよりも数万倍も暗い天体をとらえ, 何億個もの天体のカタログを作る予定である. ヨーロッパ各国の協力や, IRAS のデータをあつかったジェット推進研究所が支えるからこそできたプロジェクトであろう. これらが着々と進んでいるいま, 近赤外線サーベイはもう成熟の時代を迎えてしばらくは注目すべ

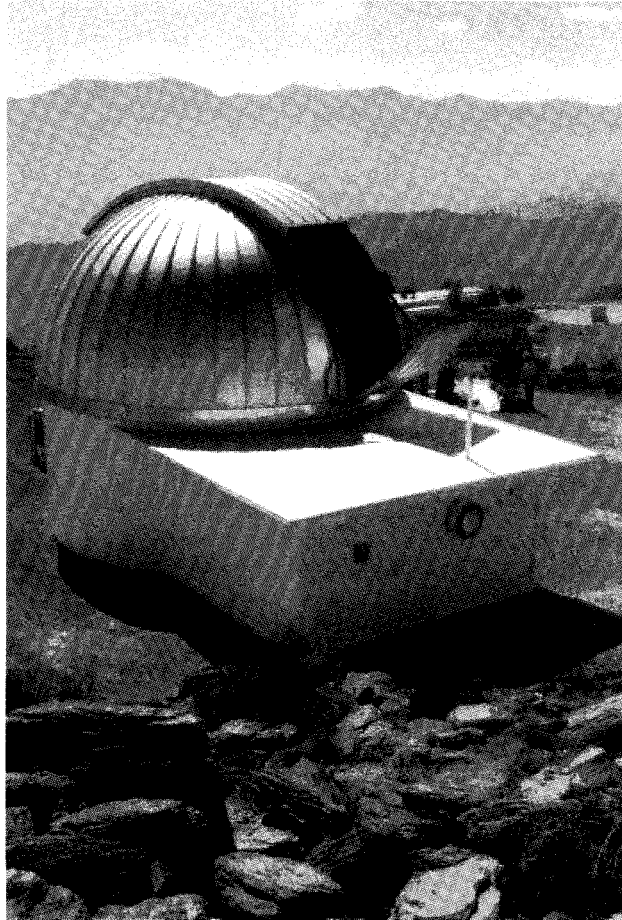


図3 セロトロロ天文台に建設中のドーム (ともに写真提供は2 MASSプロジェクト)

き成果が出ないだろうか。いや、多くの赤外線天文学者は DENIS や 2 MASS を期待をもって見ているものの、この両サーベイだけでは不足だと考えている。先に初代 $2\ \mu\text{m}$ サーベイを Bright Star Catalog にたとえたが、DENIS と 2 MASS はさしずめパロマサーベイであろうか。パロマのシュミット望遠鏡で得られたチャートは天文研究機関が備えているものではあっても、研究はそこから出発すべきなのである。

ここでは DENIS と 2 MASS の欠点を 2 つだけ挙げておこう。第一に空間分解能の不足である。どちらのサーベイも、微妙にずらして観測するテクニ

ックを使って天体の位置を $1''$ の精度まで出そうとしてはいる。しかしながら、銀河面や星団の中心部など、天体が混み合っている場所では $3''$ や $2''$ の素子サイズのため、それ以上こまかい空間情報は得られず、感度も天体の混み合いで制限されてしまう。DENIS グループのシミュレーションもそれを予測している²³⁾。第二に問題なのが、Ks バンドで 14 等前後の限界等級である。どちらのサーベイも口径 1 m から 1.3 m の望遠鏡を使いながら実質 10 秒程度の積分時間で次の領域へと移って行くため、こんな浅い限界となってしまう。その結果、暗い銀河や褐色矮星などの興味ある天体がこぼれ



落ちる。

私たちにはヨーロッパを結ぶネットワークもジェット推進研究所もないが、重要な領域の選択的なサーベイなら、適切なサイズの望遠鏡と2次元アレイ検出器と努力とでできる時代になってきた。いまや DENIS や 2 MASS が採用した世代の次の 1024×1024 素子の検出器が入手できる。まず小さなプロジェクトとして、口径 25 cm の冷却望遠鏡を用い²⁴⁾炭素-水素の結合が出す $3.3 \mu\text{m}$ 輝線や水素分子輝線を使って銀河面の大規模な構造を見たいと考えている。さらに、 1024×1024 素子の検出器を使って J · H · Ks バンド同時のカメラを作り、口径 1.3 m クラスの専用望遠鏡を使うことを計画している。1 素子あたりの視野を $0.5''$ に設定したとして 2 MASS と同じく $8.5'$ の視野が得られ、数百秒間の露光で Ks = 17 等の限界等級に達することができる。こうしてマゼラン雲の多くの球状星団・銀河中心の数百 pc という領域で、ごく高空間分解能で高感度のサーベイを行なえると考えている。たとえば銀河中心では数平方度にわたって若い O 型星クラスターを分離でき、最近の星形成をさぐる規模と分解能と感度をもつ。また、私たちから 200 pc 以内の星形成領域にある、生まれたばかりの褐色矮星も見出すことができよう。

単素子の赤外線検出器を使って管をのぞいていた時代から、大規模アレイ検出器の時代へ。かつて Tokunaga 氏が天文月報で紹介された説にあるように、誰もが予想だにしなかった新しい天体現象をとらえる²⁵⁾ことができるだろうか。三百万素子の検出器をたずさえ、「夢の中に胡蝶となって空に舞い戯れ、自ら愉しみて志に適い」たいものである。

参考文献

- 1) Price, S. D. 1988, PASP 100, 171
- 2) Neugebauer, G., Leighton, R. B. 1969, Two Micron Sky Survey, NASA SP-3047
- 3) Jura, M. 1993, in Sky Surveys: Protostars to Protogalaxies, ed. B. T. Soifer, ASP Conf. 43, p.1

- 4) Elias, J. H. 1978, ApJ 224, 453 & 857
- 5) Kawara, K., Kozasa, T., Sato, S., Kobayashi, Y., Okuda, H., Jugaku, J. 1982, PASJ, 34, 389
- 6) Kobayashi, Y., Okuda, H., Sato, S., Jugaku, J., Dyck, H. M. 1983, PASJ 35, 101
- 7) Nagata, T., Hyland, A. R., Straw, S. M., Sato, S., Kawara, K. 1993, ApJ 406, 501
- 8) Glass, I. S., Catchpole, R. M., Whitelock, P. A. 1987, MNRAS 227, 373
- 9) 上野宗孝 1995, 天文月報 88, 399
- 10) Price, S. D. 1968, AJ 73, 431
- 11) Epchtein, N., et al. 1985, A&AS 61, 203
- 12) Kleinmann, S. G., Gillett, F. C., & Joyce, R. R. 1981, ARA&A 19, 411
- 13) Beichman, C. A. 1987, ARA&A 25, 521
- 14) Soifer, B. T., Houck, J. R., Neugebauer, G. 1987, ARA&A 25, 187
- 15) Wright, E. L. 1993, in Sky Surveys: Protostars to Protogalaxies, ed. B. T. Soifer, ASP Conf. 43, p.61
- 16) Murakami, H., et al. 1996, PASJ 48, L41
- 17) Price, S. D. 1995, Space Sci. Rev. 74, 81
- 18) Epchtein, N. 1997, in The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys, eds. Garzon, F., et al. (Kluwer), p.15.
- 19) Epchtein, N., et al. 1997, ESO Messenger 87, 27
- 20) Fouque, P., et al. 1997, in The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys, eds. Garzon, F., et al. (Kluwer), p.33
- 21) Skrutskie, M. F., et al. 1997, in The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys, eds. Garzon, F., et al. (Kluwer), p.25
- 22) Kleinmann, S. G., et al. 1994, Ap&SS 217, 11
- 23) Holl, A., Deul, E. 1994, Ap&SS 217, 19
- 24) 長田哲也 1997, 天文月報 90, 428
- 25) アラン・トクナガ 1994, 天文月報 87, 54

Near Infrared Sky Survey: Its History and Future

Tetsuya NAGATA, Shuji SATO

Department of Physics, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-01

Abstract: Near infrared is the wavelengths where we can investigate the global distribution of stars and galaxies most straightforwardly. It is thirty years since the first successful near-infrared sky survey was made. The huge advances of infrared detector technology have made deep large-scale sky surveys possible. We report the status of such sky surveys DENIS and 2MASS, and describe smaller but more sensitive surveys we are planning.