

## 連載

## 望遠鏡 400 年【5】

## 可視光以外の望遠鏡：電波からガンマ線まで

半田利弘（東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター）

## 1. 天体からのさまざまな信号

宇宙からの信号は長らく可視光だけだと考えられてきた。そのため、今でも“天体望遠鏡”と言え、可視光の望遠鏡がまず思い浮かぶ。多くの辞典で望遠鏡は「遠くの像を拡大してみる光学機器」などと書いてあることからそれが覗える。けれども、天体からは可視光以外の電磁波も放射されており、それを検出して分析することが天体の正体を知る上で極めて重要であり、現代天文学の知識の多くはそれらの成果に基づくことは、皆さん、よくご存じのことだろう。

電磁波自体の性質は波長の分だけ縮尺すると全く同じである。しかし、これと物質との相互作用に着目すると、波長が大きく異なれば全く異なった性質を示すように見える。そこで、この観点に基づいて波長で大きく分け、長い方から電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線と呼ぶ。現代天文学では、これら全ての波長域に渡って観測が行われ、それぞれ、特徴的な機構や構造を持つ望遠鏡が使われている。

電磁波以外の信号も検出可能になると、天体からのこれらの信号を検出する天文学も行われるようになる。ニュートリノと重力波が現在、この段階にある。

これらいずれの信号を検出するものでも、現代の望遠鏡は3つの構成要素から成り立つ。天体からの信号を集める集光部、それを検出して人間が容易に処理できる信号(今では、ほとんどの場合、電気信号)に変換する検出部、その信号を処理して蓄積するデータ処理部である。集光部は光学系、検出部は観測装置、

データ処理部は記録装置と呼ばれることも多い。分光観測も盛んに行われているので、必要に応じて、分光器が検出部の前後に組み込まれる。偏光板などが組み込まれることもある。

初心者が使用する光学望遠鏡は、検出部が肉眼、データ処理部が自分の頭脳に相当する。

検出できる信号が異なれば別の種類の望遠鏡が必要となる。これを区別するため、対象となる信号名を冠して電波望遠鏡などと呼ばれる。ただし、可視光だけは例外で、慣例的に光学望遠鏡と呼ばれる。

## 2. 可視光以外の電磁波検出の歴史

天体が可視光以外の電磁波を放射していることを最初に発見したのは、天王星の発見で有名なハーシェルである。1800年、ハーシェルは日光を分光した際に赤より長波長側でも温度上昇が発生することを発見し、これを目に見えない光によるものと考え、熱線と名付けた。今日、赤外線と呼ばれる光線である。これは可視光以外の電磁波の発見であると同時に、天体(太陽)から可視光以外の光線が届いていることを最初に発見した例となる。しかしながら、これが直ぐには赤外線天文学へと発展することは無かった。星から熱が放射されているとは考えにくかったためだろうか。

紫外線は1801年にリッターが発見した。しかし、これも天文学へは直ぐには結びつかなかったようだ。とはいえ、写真は紫外線に感度があるので、事実上は紫外線天文学が行われていたと言ってもよいかも知れない。

1888年、ヘルツが電波の存在を証明。多く

の物理学者が天体からの電波信号検出に挑戦するが、ことごとく失敗。今日で見れば、波長が長すぎて電離層(当時、存在が知られていなかった)を透過しないことと感度不足が原因である。[1]

こうして、可視光以外の天文学が開始されるのは 1931 年のジャンスキーによる銀河電波の発見まで待つこととなる。遠距離無線通信の背景雑音を測定していたジャンスキーは 23 時間 56 分周期でゆっくり変動する弱い電波を検出した。恒星日と同じ周期で繰り返すことから、彼は直ぐにこれが太陽系外起源であることを認識する。この発見の報を受け、高性能受信機とパラボラアンテナを作ったのがリーバーである。これが世界初の電波望遠鏡(図 1)であり、世界初の非可視光望遠鏡である。

地球には大気があるために宇宙からの信号が全て地表まで届くわけではない。それほど



図 1 米国立電波天文台グリーンバンク観測所に保存されている世界初の電波望遠鏡 (Anish Roshi 撮影)

減衰せずに地表まで届く波長域を「大気の窓」(図 4)と呼ぶが、比較的広い波長範囲で「窓」が開いているのは可視光と電波に限られる。したがって、それ以外の波長域での観測を行うには事実上、大気圏外に出る必要がある。

1962 年、ジャッコーニらはロケットに X 線検出器を搭載して大気圏外へ打ち上げた。当時、ほとんどの科学者は太陽以外の天体からの X 線が観測できるとは予想していなかった。とはいえ、一度も見えていないだけに何が見えるかわからない。実際、この最初の観測で、さそり座といて座に予想外の X 線天体を発見。後に、これがブラックホール起源だとわかり、X 線天文学の幕開けとなったわけである。

ガンマ線は放射線の 1 つとされるが、これも電磁波である。1967 年、他国の核実験を監視するために打ち上げられた米国の衛星が宇宙からのガンマ線を検出してしまったことが始まりである。当初は、異星人の核戦争の証拠かなどと取りざたされたが、やがて自然現象であることが判明し、ガンマ線天文学の始まりとなる。

可視光は大気の窓を通過できるが、電波との間は大気の窓が閉まり気味である。波長方向を空間方向に例えるならば格子戸やすだれのような状況である。この隙間を狙うことで、赤外線天文学が始まる。その嚆矢は 1960 年代のベックリンとノイゲバウアー、クライマンとローなどによる原始星の観測である。

中間赤外線や遠赤外線の観測では、赤外線天文衛星 IRAS が大きな働きを示した。1975 年に運用を開始したカイパー空中天文台も赤外線天文学の初期を築いた望遠鏡といえる。これは、現在まで事実上唯一の飛行機搭載望遠鏡である。

大気の窓を通らない紫外線の観測は、X 線天文学の長波長端として始まるが、1973 年、NASA のスカイラブが太陽コロナの観測を開

始したことを紫外線天文学のはじまりと位置づけることもできよう。1978年に打ち上げられた米英欧共同の IUE(国際紫外線天文衛星)も 20 年以上の長期にわたり、恒星の紫外線スペクトルを観測した有名な衛星である。

電磁波以外では、小柴がカミオカンデで 1987 年に超新星からのニュートリノを捉えたことが記憶に新しい。重力波の検出には未だ成功していないが、これによって天文学を行おうという試みは既に実行に移されている。

### 3. 非可視光望遠鏡の特徴と仕組み

現在では電磁波の全ての波長帯が観測対象となっているが、先に述べたように物質との相互作用に大きな違いがあるため、それらを捉える望遠鏡には機構上の大きな違いがある。電磁波以外の信号では、もっと大きく異なった機構となる。

以下では、それぞれの波長帯・信号に対する望遠鏡の特徴を述べていくことにしよう。

#### 3.1 電波望遠鏡

電波望遠鏡は、電波を集めるアンテナ、それを電気信号に変換する受信機、受けた電気信号を波長に分ける分光器や信号強度を測定する検波器などからなる。

アンテナは、ほとんどのものがパラボラ鏡である。可視光の主鏡と同じく、回転放物面で電波を反射し焦点に集めるようになっている(図 2)。電波は金属板で反射するので、反射面はアルミ板などでできている。電磁波は波長の 1/10 程度以下の形状には影響を受けないので、波長が約 10cm 以上の場合には金属網で構成される。主焦点のほか、反射板で適当な位置に中継された焦点を用いるのは可視光の望遠鏡と同様である。

焦点には受信機が設置されている。これは、電磁波の電場で励起された導体内の電子の振動を交流電気信号として取り出せるように作



図2 国立天文台野辺山 45m 電波望遠鏡(国立天文台野辺山の web ページ (<http://www.nro.nao.ac.jp/>) より)。

られた装置で、基本的にはラジオや携帯電話と同じ動作原理で電波を電気信号に変換する装置である。ただし、高感度でかつ低雑音であることが要求されるため、異なる物理現象が利用されるのが通例で、超伝導効果を利用する SIS 受信機、十分に高い周波でも増幅作用を持つトランジスタを利用した HEMT 受信機などが利用されている。動作条件や雑音低減のため、 $-270^{\circ}\text{C}$ 程度に冷凍された電子素子が使われることが多い。

受信機で得られた交流信号は電磁波の波形を保持しているので、この信号を分光することで受信した電波のスペクトルを得ることができる。現在、よく利用されるのはフィルターバンク型、相関型、音響光学型の 3 種類である。

フィルターバンク型は、共振回路などによって構成される特定の狭い周波数範囲の信号のみが透過するフィルター(濾波器)を通してから強度を測る機器を、透過周波数を少しず

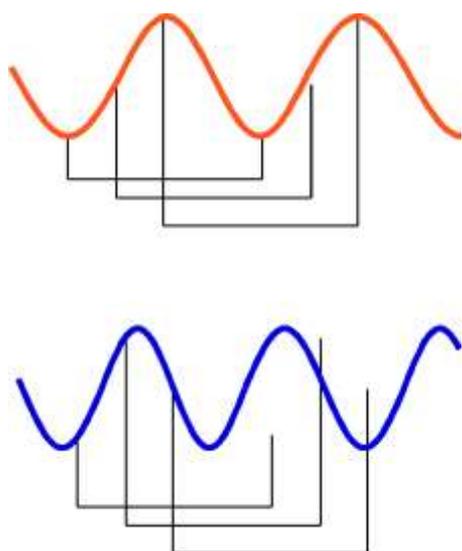


図3 自己相関と信号周期の関係。一定の時間隔てた測定データは、それが信号の周期と一致していれば、常に同じ値の組になるが、ずれていると少しずつ異なった値の組になる。この値の組の積を多数回集めて平均すると、比較時間間隔と信号周期とが整数倍で一致するものだけが残る。これを数学的に処理することで分光器を構成できる。

つづらして多数並べたもので、原理としては最も簡単な電波分光器である。ただし、周波数幅を狭くするのが難しいため、他の電波分光器に比べると高い分解能を得るには向いていない。

相関型は、様々な時間間隔で得た信号強度の積(自己相関)を長期間にわたり平均すると信号の変動周期の整数倍に一致しない時間差のデータは0になるという性質を用いた分光器で、得られた自己相関をフーリエ変換すると分光スペクトルになる(ウィナーヒンチンの定理)。信号測定部とデータ記憶部分とフーリエ変換部からなり、初期にはアナログ電気回路で構成していたが、現在ではデジタル論理になっており、事実上、専用コンピューターであるといつてよい。高い周波数分解能は得やすいが、広い周波数範囲にわたるデータを得るためには高速の信号測定部が必要とな

る。とはいえ、デジタル機器の急速な進歩で、現在、電波分光器の主流となっている。

音響光学型は、電波信号から作った音波信号を透明な結晶中を通してできる粗密の周期構造を回折格子として可視光を通すことで分光スペクトルを得る分光器である。光源は一定の波長であることが要求されるためレーザー光線が用いられる。特性は他の2つの型の中間的なものとなる。電波天文学用は主に日本で開発されたものが実用化されている。

検波器は交流信号の強度を得る素子からなる。単純には整流作用によって交流信号強度に対応する直流電圧を得るものである。

電波観測では、アンテナの方向を順に変えることで得られる電波信号の違いを蓄積し、データ処理によって画像とする。1点ずつ丹念に観測した結果を総合してようやく1枚の画像が得られるわけである。ただし、近年では多数の受信素子を焦点面に設置できるほど小型に作り込んだ受信機の製作が可能となり、盛んに利用されるようになってきた。電波カメラともいうべき、この受信機はマルチビーム受信機と呼ばれ、日本では野辺山45m鏡に搭載された25素子受信機が最大である。

代表的な電波望遠鏡として“野辺山45m鏡”を図2に示す。

### 3.2 赤外線望遠鏡

電波と可視光の間に当たるのが赤外線である。この波長帯の望遠鏡は可視光の望遠鏡と同様に、主鏡などの光学系、分光器、検出器からなり、検出器以外は可視光で使われているものとはほぼ同じ原理で動作する。とはいえ、可視光と赤外線とでは反射率などが大きく異なる物質もある。可視光では反射鏡はアルミでメッキされているが、赤外線では金が用いられることも多く、レンズやプリズムにはサファイヤ(近赤外線用)やゲルマニウム(遠赤外線用)などが用いられることがある。

### 宇宙からの電磁波が半分に弱まってしまう位置

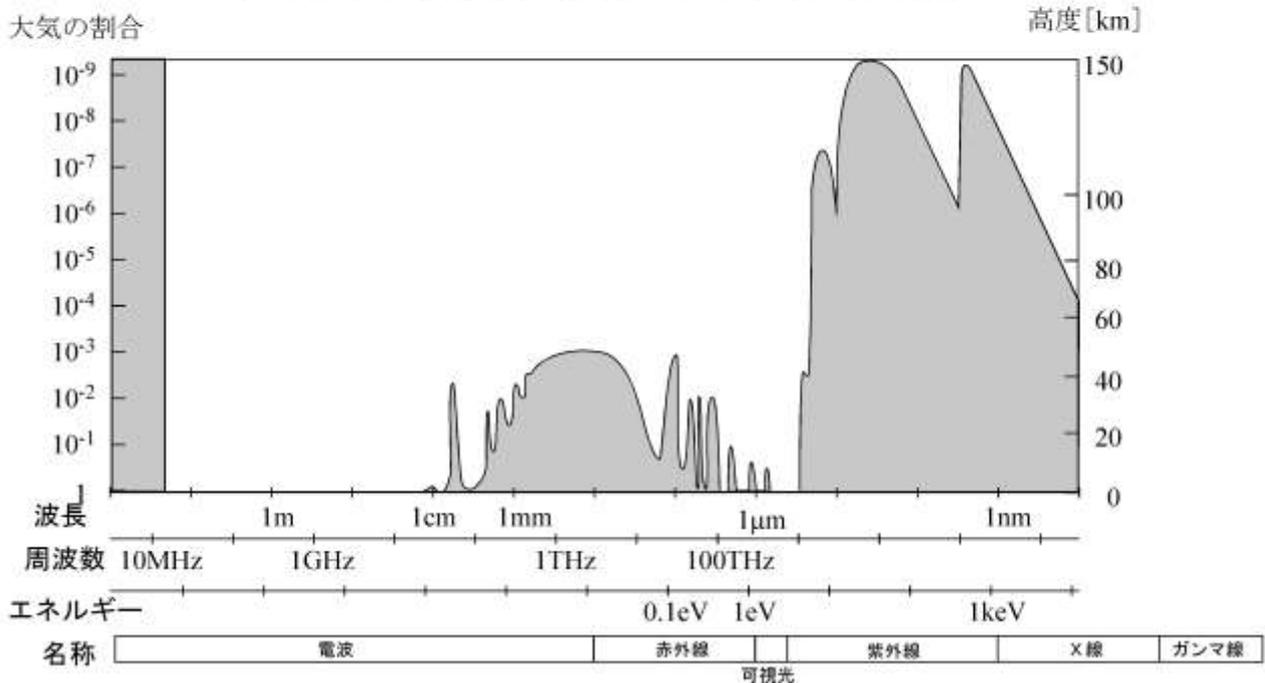


図4 大気の窓。波長によって大気透過率が大きく異なり、地上で観測できる波長範囲は限られる。なお、細かく見ると、特に赤外線の領域では、狭い範囲で透過率が高い部分が図で見るよりも多数あり、海拔にも大きく影響される。データは[2]より。

電波と可視光の間の波長の電磁波は全て赤外線と呼ぶが、天文学の観点からいうと近赤外線、中間赤外線、遠赤外線の3つに分けた方がわかりやすい。

波長が数十 $\mu\text{m}$ より長いものは遠赤外線と呼ばれ、地球大気の吸収により地上では観測がほとんど不可能である。また、地上の典型的な温度ではあらゆる物体がこの波長の赤外線を強くはなっているため、それを考慮する必要がある。このため、遠赤外線望遠鏡は人工衛星に搭載されるのが普通である。

一般に光学系は透過率や反射率を100%とすることは不可能で、その分だけ赤外線を放射する。この赤外線放射を最小限にするためには絶対零度(0K= $-273^{\circ}\text{C}$ )に近い極低温に冷却することが効果的である。分光器や検出器は当然のこと、可能であれば主鏡まで冷却

する。このため、冷媒として液体ヘリウムが搭載され、その気化熱で必要な部分を冷却する。これは通例1年程度で全て気化してしまう。赤外線天文衛星の活躍時間が限られるのは主にこのためである。

分光器は原理としては可視光と同じで、ファブリペロー分光器や回折格子が用いられる。もちろん、これらの機器も極低温まで冷却して使用される。

検出器には電波の受信機と同じ動作原理のものが使われることもあるが、赤外線が当たると電流が発生したり電気伝導度が変わったりする固体素子などが使用されることが多い。ガリウム砒素半導体やゲルマニウム半導体などが実用化されており、多素子のカメラも作られている。



図 5 赤外線天文衛星あかりの軌道上での想像図。宇宙情報センターの web ページ (<http://spaceinfo.jaxa.jp/>) より。

他にも、熱容量が非常に小さな素子の温度変化を図ることで、そこに当たった赤外線の放射エネルギーを測定する素子も実用化されている。これはボロメーターと呼ばれ、原理的には全ての波長の電磁波を検出することができるため、フィルターを適宜組み合わせ使用されることが多い。

波長  $3\mu\text{m}$  程度より長い赤外線は中間赤外線と呼ばれる。ここは大気の窓がとびとびに開いており、高山や高空では窓が広くなり、観測可能な波長範囲が広がる。遠赤外線ほどではないが、熱放射の影響は強く、分光器や検出器は低温に冷凍される。

光学系や分光器は可視光や遠赤外線と原理的には同じものを用いるが、主鏡の端から漏れ込む熱放射が最小限になるように、可視光に比べて、副鏡からの見込範囲を主鏡より小さめに作るのが普通だ(オーバーサイズ主鏡)。

上空へ運ぶ手段としてはロケット、気球、航空機などが用いられる。この順に到達高度がより高くなり条件がよくなるが、滞空時間や操作性などは逆順になりがちで、どれが最適なのかを観測の仕様によって判断する必要がある。人工衛星に搭載してしまう場合もあり、遠赤外線観測装置と共に搭載されている場合には、冷媒が切れた後でも宇宙空間にあ

ることによる冷却効果を利用した設計がなされていれば観測が継続できる。

検出器には遠赤外線検出器と同じ動作原理のものが用いられ、ゲルマニウム検出器やシリコンと他の元素の複合結晶を使った検出器が使用されている。

波長約  $3\mu\text{m}$  と可視光との間は、近赤外線と呼ばれる。この波長域では、可視光とほとんど同じ方法で観測が行われており、検出器以外は可視光の望遠鏡と共用の場合が多い。検出器には赤外線まで感度がある CCD のほか、 $\text{HgCdTe}$ (水銀・カドミウム・テルル)や  $\text{InSb}$ (インジウム・アンチモン)の複合結晶を用いたカメラが実用化されている。なお、可視光で用いる CCD で感度がある  $1\mu\text{m}$  より短い波長の赤外線は観測技術上、可視光と同一であるため可視光の一部として扱う場合も多い。



図 6 すばる望遠鏡。可視光の望遠鏡として知られるが、近赤外線でも多くの観測が行われている。国立天文台ハワイ観測所の web ページ (<http://subarutelescope.org/>) より。

遠赤外線望遠鏡の代表として、“あかり”を図5に、近赤外線望遠鏡の代表として光学望遠鏡でもある“すばる望遠鏡”を図6に示す。

### 3.3 紫外線望遠鏡

可視光を通り越すと紫外線の領域にはいる。波長が200nmより長い紫外線は近紫外線と呼ばれ、大気を透過するので地上で観測可能である。物質との相互作用も可視光とあまり変わらない。したがって、近赤外線と同様に、この波長域では可視光との違いはあまりない。

これより波長が短い紫外線は真空紫外線とも呼ばれ、観測にはロケットや人工衛星が必要である。さらに、波長10nmを切ると極端紫外線と呼ばれ、波長が長めのX線望遠鏡とほぼ同じ構造になってくる。

検出器には、蛍光を利用して可視光に変換して検出するものや、光電効果を利用したものが使用されている。

現代を代表する紫外線天文衛星としては“GALEX”が挙げられる。

### 3.4 X線望遠鏡

X線は波長が原子間隔程度であるため、金属であっても単純に当てると反射が起きない。けれども、軟X線と呼ばれる波長が0.1~1nm程度以上あるX線ならば、浅い角度で斜めに当てると反射させることができる。これをかすめ入射反射鏡と呼ぶ(図7)。近年では、異なる間隔の金属層を多数積層して深い角度でも反射する面を構成する多層膜スーパーミラーも開発されている。

より波長が短いX線は硬X線と呼ばれる。現在の技術では硬X線の反射鏡を作ることができない。このため、特定のパターンで硬X線を遮るマスクを通して観測し、そのマスクによる影のパターンからデータ処理によって画像を再生するという方法がとられる。この方式の最初のもの、すだれコリメータの名

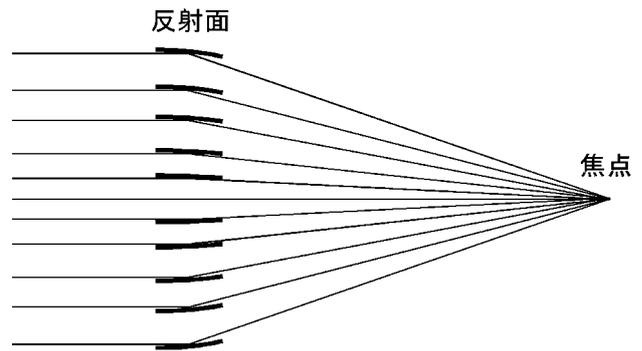


図7 X線望遠鏡の主鏡に用いられる、かすめ入射鏡の原理

で知られる。2重のすだれを通して景色を見ると、見込む角度によって外の見え方が変わることにはヒントを得て小田稔が開発したものである。現在では情報処理理論に基づく最適なマスクパターンが利用されており、コーデッドマスクと呼ばれている。これは“集光”はしていないが、光学系をなしている。

かすめ入射鏡もコーデッドマスクも90°以上の反射がないため、観測対象からみて光学系の後ろに検出部が位置し、屈折望遠鏡に似た配置となる。

地上には全く届かないので、望遠鏡は全て人工衛星搭載である。短時間観測の場合には衛星軌道に達しないロケットが利用されることもある。

X線は集光した後でも光子の到達頻度が低いので、より波長が長い電磁波とは異なった考え方で検出器や分光器が利用される。

軟X線の検出器には、可視光で用いられるのとほぼ同じ特性を持つCCDが用いられる。X線の光子がCCDに当たるとそのエネルギーに応じた量の電荷を生じるので、2つ目の光子が当たる以前に読み出してしまふことでX線光子のエネルギーを知ることができる。明るさは、多数回の読み出しデータ中での検出頻度として測定する。

蛍光によって可視光に変換して検出するシンチレーター、X線で誘発される放電を利用



図 8 X線天文衛星すざく。JAXA デジタルアーカイブスの web ページ (<http://jda.jaxa.jp/>) より。

した計数管、上記の CCD と同じ動作原理による半導体検出器もよく用いられる。また、赤外線検出器のところでも述べたボロメーターが使用されることもあり、X線の場合にはマイクロカロリメーターと呼ばれている。この場合も、CDD の場合と同じ理由で光子 1 個のエネルギーを測定でき、分光性能をもつ。より高い分解能が必要な場合には、結晶を利用した回折格子が用いられることもある。

X線望遠鏡の代表として X線天文衛星“すざく”を図 8 に示す。

### 3.5 ガンマ線望遠鏡

ガンマ線も地上には達しないので、直接検出は衛星軌道で行われる。この場合、光学系や検出器は、使用している物質などに違いはあるものの原理は硬 X線と同様な現象を利用した装置が用いられている。

現代を代表するガンマ線天文衛星には Integral や HETE2 衛星がある。

ガンマ線望遠鏡としてユニークなのは大気チェレンコフ望遠鏡である。これは地球大気上層をガンマ線が通過する際に生じる荷電粒子(主に電子)が大気と相互作用して生じるチェレンコフ光を地上から観測するもので、いわば地球大気自体を検出器の一部として使用

するものである。観測対象となるチェレンコフ光は可視光であり、光学望遠鏡に類した装置が用いられる。ただし、大集光力が必要なのに対してチェレンコフ光に対する角分解能は低くても問題がないため一般の光学望遠鏡とはかなり異なった見かけをしている。複数のチェレンコフ光観測装置を組にすると荷電粒子の飛来ルートを推定することができるため、ガンマ線に対する角分解能はこちらで決まる。

大気チェレンコフ望遠鏡の代表として東大宇宙線研究所の“カンガルー望遠鏡”を図 9 に示す。

### 3.6 ニュートリノ望遠鏡

電磁波以外ではニュートリノも真空中を伝播するので、その飛来方向を特定できれば望遠鏡を作ることができる。

ニュートリノは現在の技術では反射・屈折はおろか阻止もできないので光学系が作れない。そこで大気チェレンコフ望遠鏡と同じ原理を用いる。ただし、ニュートリノはガンマ線以上に相互作用が稀なので、より高密度で透明な物質を用いる。つまり、巨大な水槽を高感度の可視光検出器で取り囲むことでニュートリノ望遠鏡を構成する。

ニュートリノ望遠鏡は現在、僅かな数しか



図 9 カンガルー望遠鏡。大気チェレンコフ光を観測することでガンマ線を捉える。甲南大学の web ページ (<http://www.hep.konan-u.ac.jp/pukiwiki/index.php?CANGAROO>) より。

建設されていない。“スーパーカミオカンデ”が代表である。

### 3.7 重力波望遠鏡

重力波も真空中を伝播する信号である。これは未だに直接検出に成功していない信号である。重力波が到達すると時空の歪みが生じ、到達した重力波に応じて一時的に同一点間の距離が変動する。そこで、2 地点間の距離をレーザー干渉などの技術で超精密測定することで重力波を検出する試みがなされている。検出に成功すれば、それ自体が素晴らしい発見であるが、その飛来方向などを知ることができるため、人類は新たな種類の望遠鏡を手にすることとなる。

国立天文台三鷹には、基礎技術の開発を目的とした重力波望遠鏡“TAMA300”があり、極めて特異な現象が発生すれば、その重力波パルスを検出できると言われている。

### 3.8 電波干渉計

ここまで述べてきた望遠鏡は、大気チェレンコフ望遠鏡を除くと、全て、1 ヶ所に設置された望遠鏡が全システムとなる。根本的には光学系で1 ヶ所に集めた信号を検出器で検出するという構成になっている。

ところで、望遠鏡を用いる大きな理由の1 つに、高い角分解能で画像を得たいということがある。このためには同じ波長ならば、より口径の大きな主鏡を用いる必要がある。けれども、現実的には建設可能な主鏡の大きさには限界がある。望遠鏡の進歩は、必要な精度を保ちながら、いかに大口径の主鏡を実現するか大きな努力が払われてきたかの歴史であると言ってもよいだろう。

光学の原理に戻って考えてみると、口径が大きな望遠鏡ほど到達可能な分解能が高くなるのは、鏡面の各点で反射した光が相互に干渉して像を作るからである。したがって、鏡



図 10 米国にある電波干渉計 VLA。25m のアンテナ 27 台で 1 台の電波干渉計を構成している。米国立電波天文台の web ページ (<http://www.nrao.edu>) より。

面の各点に到達する光が焦点で干渉した場合にどのような像を作るのかを回路や計算で求めることができるならば、鏡面を実際に構成して焦点を結ばせる必要はない。この原理を電波で実現したのが電波干渉計である。

先に述べたように電波の受信機は、電磁波の波形を保持したままの電気信号を出力できる。これを電線などを通して集めて干渉させ、焦点で生じるはずの画像情報を得るのである。この処理を行って画像を再現するには、多くの異なった距離と方向を持つ組で得られた干渉データが必要であり、これを全て考慮して同時に答えを得る必要がある。原理的には逆フーリエ変換を適用すればよいのであるが、実際には、データ取得に際して生じる様々な制約を克服するために CLEAN や MEM (最大エントロピー法) などと呼ばれる特殊な画像処理技術を用いてコンピューターによる画像合成が行われている。

波形が記録できるならば干渉をその場で発生させる必要はない。電気信号の場合だと、正確な記録時刻と共に“録音”しておけばよい。この原理を用いた干渉計が VLBI (超長基線干渉計) である。カナダで開発された後の改良が加えられ世界には多くの VLBI 網がある。そのうち、専用アンテナによる常設 VLBI 網が米国で運用されている VLBA である。

現在では、軌道上にアンテナを飛ばすことで地球直径を凌ぐ距離だけ離れたアンテナ間

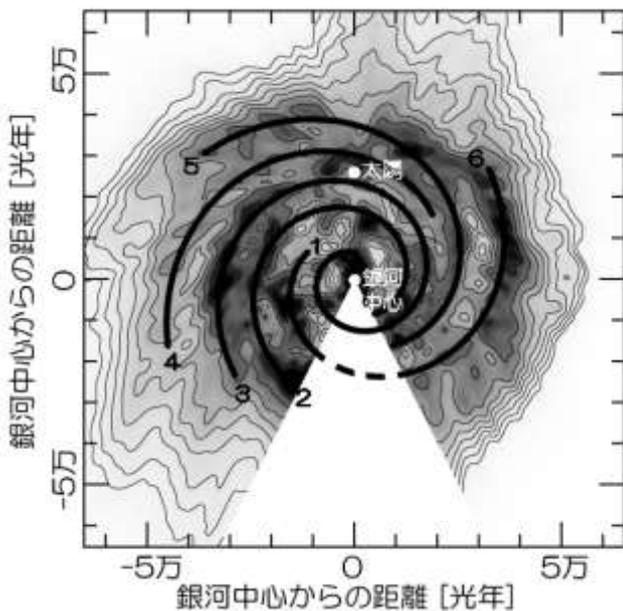


図 11 HI および CO の観測から得られた天の川銀河のガス分布。鹿児島大学中西らによる。下の 3 角形状の領域は解析方法の都合で正確な分布が得られない。

の干渉を調べることが可能となり、電波天文衛星はるか VLBA の組合せによって超高分解能観測が実現している。

干渉計技術のおかげで、最も角分解能が高い観測が実現している波長帯は、実は現在は電波観測なのである。

チリで建設中の ALMA も電波干渉計である。電波干渉計の代表例として、“VLA(Very Large Array 大型電波干渉計)”を図 10 に示す。

電波干渉計は原理的には受信信号が波動的性質を持ってさえいれば良く、電波であることが本質ではない。したがって、赤外線や可視光、あるいは X 線で干渉計を構成することも可能であり、そのための技術開発が進められている。ただし、当然のことながら、原理がわかっているならば直ぐに実現できるわけではない。大気揺らぎや熱などによる伝送路長の変動を含めた様々な不安定要因を取り除く方法の研究などが進められている。

#### 4. 非可視光望遠鏡による歴史的成果

これまでに紹介した望遠鏡を用いることで、人類はそれまでに知られていなかった宇宙の様子を次々と明らかにしてきた。その歴史的成果を振り返ることは、現代天文学の歴史そのものといってよい。したがって、本稿でその全てを正しく紹介することは不可能だが、何も語らないのもよろしくないので、私の独断と偏見で最小限に絞って紹介したい。

##### 4.1 電波天文学

電波天文学の起こりは先に述べたようにジャンスキーとリーバーによる。彼らが発見した銀河電波は当初、天の川銀河内の星間塵が発する熱放射であると考えられていた。リーバーがパラボラアンテナを作ったのは、これを確かめるには幅広い波長にわたって観測する必要があると知ったからである。

ところが得られたスペクトルは予想とは全く異なるものであり、特殊な星＝電波星によるのではという仮説が出された。しかし、実は星ではなく、星間磁場に高エネルギー電子が巻き付いて発生するシンクロトロン放射であった。しかし、このことがわかるのは発見から 10 年以上も後のことである。

一方、始まったばかりの電波観測で何ができるのかを物理理論から考えたのがファンデフルストである。オールトの指示により彼が考えて得た結論は、中性水素原子(HI)が放つ 21cm 輝線であった。実際の検出は 1951 年にユーインとパーセルが成功。わずかな遅れで、オランダとオーストラリアも観測に成功する。その後の観測データを総合することで、1958 年、オールトらによって、天の川銀河内の HI ガスの分布が明らかとなり、天の川銀河が渦巻銀河であるというオールトらの予想を裏付ける結果が得られた。これに相当する最新データによる HI と水素分子ガスの総量分布を図 11 に示す。

電波望遠鏡の分解能が上がると、シンクロトロン放射の源が超新星残骸や特殊な銀河であることがわかってくる。後者は、電波干渉計の開発によって「2つ目玉」であることがわかる。1つの銀河を挟むように2つの電波源が見つかるのである。これは、その後、中央の銀河から噴き出すジェットの高速度端が電波で光っているためだとわかる。

宇宙での電波源が恒星ではないとわかると、当然ながらその正体を追求する動きが出てくる。こうしてシュミットらが1964年に発見したのがクェーサーである。電波観測の分解能が上がり光学同定天体が判明すると、3C273と3C48の可視光でのスペクトルが観測され、著しく赤方偏移した極めて明るい天体の存在が明らかとなる。その後、これは遠方の活動的な銀河の核であり、そこにあるブラックホールをエネルギー源とするものだと判明する。そして、ジェットを出す電波銀河との関連が知られるようになった。

こうして示唆された銀河中心のブラックホールは、渦巻銀河NGC4258中心でのメーザー電波源の運動を用いることで中井らが1993年に存在を確認することになる。

HIの観測によって星間ガスの存在が明らかになった一方で、1970年代には種々の星間分子ガスの存在が判明する。遊離水酸基OHを皮切りに、一酸化炭素COが発見され、地上でもおなじみの分子や地上では見かけない分子まで、1980年代以降も続々と発見が続く。予想以上に複雑な炭素系分子が発見されるに至り、生命の起源は星間分子にあるのではないかという仮説が提唱されるまでになった。

星間分子ガスの発見で特に研究が進んだのが星の形成過程である。1970～80年代に進んだ星間ガス雲の観測は原始星周囲のガス円盤と双極ガス流の存在を明らかにし、赤外線観測と共に、恒星の形成過程のあらすじを確定するに至っている。

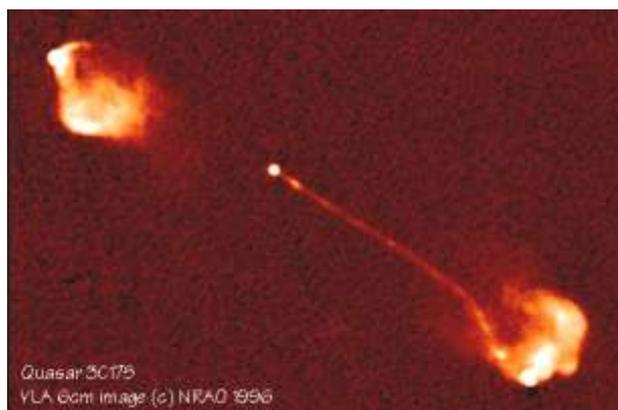


図12 VLAで観測したクェーサー3C175のジェット。NRAOのwebページより

宇宙背景放射も忘れてはならない。宇宙膨張を単純に外挿することで得られたビッグバン宇宙論は、提唱者であるガモフ自身により宇宙背景放射が予言され、それを1965年にペンジャウスとウィルソンが発見する。もっとも発見者の2人はそのような事情は知らず、具体的な天体は何もない宇宙からの電波強度を測定すること自体を目的として観測していた。いわば、偶然の産物がノーベル賞に結びついたわけである。

偶然から出たノーベル賞といえば、パルサーの発見もそうである。星間プラズマの斑による電波天体の瞬きを観測しようとヒューイッシュが作った電波望遠鏡を使って、1秒ほどという短時間で周期的に変動を繰り返す電波天体をベルが1967年に発見したのである。これによって、時間分解能を高くすることで新種の天体が発見されることが示された。探していないところには常に新発見が待っているということである。

これらの発見によって、宇宙のイメージは静的なものから一変し、極めて活動性に富んだ場であることが広く認識されるようになった。これこそ電波天文学がもたらした最大の成果といえるだろう。

## 4.2 赤外線天文学

ハーシェルの後、事実上、赤外線天文学を

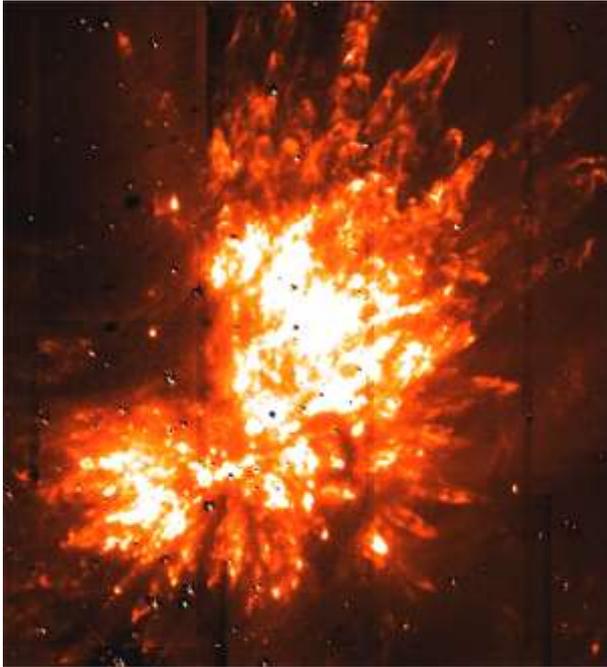


図 13 すばる望遠鏡見たオリオン KL (クラインマン・ロー) 天体の近赤外線画像。国立天文台ハワイ観測所の web ページより

始めたのはベックリンとノイゲバウアーである。近赤外線での掃天観測を行った結果、1967年に彼らが発見したのが、オリオン星雲などにある原始星である。彼らは1960～70年代にかけて全天サーベイを実施し、赤外線天体のカタログを作成した。

中間赤外線や遠赤外線観測は赤外線天文衛星 IRAS による掃天観測が事実上の始まりである。オランダが計画し、英国および米国との共同計画として実施され、 $12\mu\text{m}$  から  $100\mu\text{m}$  の 4 バンドでの全天図と点状源カタログを作成した。20年近くにわたって赤外線源を調べるといえば IRAS カタログと言われる時代を築いた。このデータを用いて 1991年に中田らが天の川銀河のバルジが棒状であることを最初に指摘したことも重要な発見といつてよいであろう。

核融合が始まる前の恒星は温度が低い上に、母胎となる暗黒星雲が取り囲んでいるために可視光での観測は困難であった。赤外線観測によって、恒星形成の最終段階が明らかとな

ったのである。また、原始星や恒星によって加熱された星間塵は赤外線を発する。このため、星形成が盛んな領域の研究には赤外線は必須の観測情報源となっている。

地球との間に暗黒星雲が密集している天の川銀河中心やその向こう側も可視光では観測できない。赤外線観測によって、天の川銀河中心には多数の恒星が密集していることがわかり、5年以上に及ぶ継続観測によって、その軌道運動から、電波天体いて座 A\* が超大質量ブラックホールであることが確定した。これは、2002年頃に、ゲッツら Keck のグループ、ゲンツェルとシュネーデルら ESO のグループにより独立に示されている。

宇宙は膨張しているので、遠くの天体ほど発せられた電磁波は現地でよりも長い波長で観測される。したがって、遠方の銀河が発する可視光は赤外線でも観測されることになる。このため、宇宙初期の銀河の様子を調べる目的で多くの赤外線観測が実施されている。

宇宙背景放射も、遠赤外線での観測がなされ、そのスペクトルが完全に黒体放射であることが確認されている。輝度の様からのずれを検出することでビッグバン直後の宇宙の密度分布が求められており、宇宙年齢などの情報が得られている。これは、専用衛星である COBE や WMAP の観測データが中心であるが、他にも多数の観測が総合されてこそ得られた結果であることも認識すべきである。

### 4.3 紫外線天文学

中性水素ガスは  $91.2\text{nm}$  (光子エネルギー換算で  $13.6\text{eV}$ ) より短い紫外線を効果的に吸収するため、紫外線では遠方の天体は観測できないと考えられてきた。このため、紫外線天文学の対象は太陽表面での活動現象や近傍の恒星の観測に限られてきた。あるいは、吸収を用いて星間ガスの研究がなされている。

ところが、実際に観測をしてみると、予想より遠くの天体も見ることがわかってきた。X線観測から示唆されていたのだが、太陽系近傍が電離ガスで満たされているためである。

宇宙膨張の効果を考えると、可視光で観測される遠方宇宙の様子は、近傍宇宙では紫外線で見えた様子に対応する。この意味で、紫外線観測の重要性が近年強く認識されるようになってきている。

#### 4.4 X線天文学

ジャッコーニによって発見されたX線天体は、ブラックホール周囲の降着円盤が発しているものであることが、その後の研究でわかった。逆に、このような天体の研究にはX線観測が欠かせない。いて座A\*も、短時間で著しい強度変動を示すことが発見されたのはX線が最初である。

超新星残骸の研究もX線観測の大きなテーマの1つで、電波観測との比較が重要である。超新星残骸内部を満たしている超高温プラズマがX線を、その膨張によって圧縮された磁場と加速された高エネルギー電子が電波を放射するため、両者が関連するからである。

太陽表面では随時、爆発現象が発生している。その研究にはX線と電波の観測が重要な手がかりを与える。プラズマと磁場の相互作用という点で、両者の輻射が関連しているからである。さらに、原始星からもX線が放射されていることが小山らの観測から明らかとなり、この分野でもX線観測の有効性が認識された。

銀河団中の銀河の運動から見失われた質量の存在がツビッキーにより指摘されていたが、X線観測により、銀河団には可視光で観測される銀河の総質量より大きな質量が超高温プラズマとして存在することが明らかとなった。ところが、このプラズマを銀河団中に引き留めておくためにはプラズマを含めた質量でも

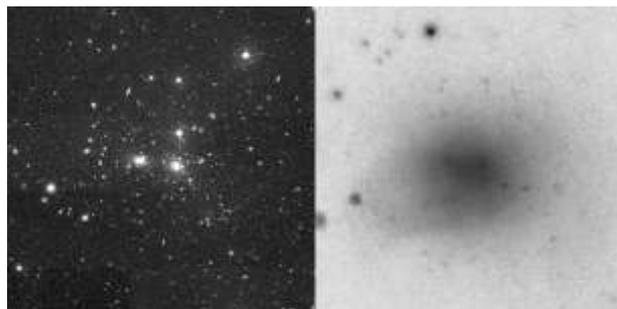


図 14 かみのけ座銀河団の可視光像(左、陽画)とX線像(右、陰画)。SkyViewより作成。DSSおよびROSAT衛星によるデータ。

不足であることがわかり、失われた質量の問題は結局解決できていない。このため、銀河や銀河団に付随する暗黒物質の存在を仮定するのが現在の説となっている。

#### 4.5 ガンマ線天文学

先に述べたようにガンマ線天体の発見は全くの偶然であった。このとき発見されたのがガンマ線バースト(突発的ガンマ線天体)である。軍事衛星のデータであったためか発見は1973年とされている。最初の本格的なガンマ線天文衛星は1991年打ち上げのコンプトンである。これにより270個のガンマ線天体カタログが作られる。現在では、ガンマ線バーストの正体は超新星の中でも特に高いエネルギーで非等方に爆発するものであろうと推定されるようになったが、それには、ガンマ線バースト発生直後に、X線を含む様々な波長での観測が即応して実行されるようになったことが大きく貢献している。

定常的なガンマ線源としては、1975年のCOS-B衛星による観測が挙げられる。高エネルギー宇宙線が星間ガスと相互作用すると $\pi^0$ 中間子が発生することがあり、これが素粒子崩壊する際にガンマ線を放射する。これを捉えることで星間ガス中の陽子密度と宇宙線強度を決めることができる。つまり、ガンマ線観測から星間ガスの総量を得ることができるのである。これによって、電波観測で得られ

る水素分子ガスの相対分布を物質質量に変換する係数を見積もることができるようになった。

近年では、大気チェレンコフ光望遠鏡である HESS により、TeV エネルギー領域でのガンマ線源も発見されているが、対応する X 線天体が存在しないなど従来の予想を裏切るものが見つかっており、宇宙での粒子加速について新たな疑問を投げかけている。

#### 4.6 ニュートリノ天文学

天体ニュートリノは、1967 年に開始したデービスの実験による太陽ニュートリノの検出が最初である。しかしながら、彼の実験装置は、ニュートリノの飛来方向を特定できないものであったため、望遠鏡とは言いがたい。

飛来方向を特定できる最初の装置がカミオカンデである。この後、大型化などによって感度を上げたスーパーカミオカンデが建設されたほか、水の代わりに重水を用いたサドバリー・ニュートリノ天文台などが建設され、3 種あるニュートリノの種類が識別できるようになるなどの経緯を経て、ニュートリノ自体の性質と同時に研究が進んでいる。

現在の装置では、太陽以外は超新星など突発的な天体からのニュートリノしか検出できないが、電磁波では直接観測できない恒星内部の核反応を直接調べることができる唯一の手段であり、その発展に期待する人は多い。

#### 4.7 重力波天文学

重力波は、一般相対性理論の結論として存在が予言され、テイラーとハルスが発見した連星パルサーの公転周期の変化などから間接的に検出されてはいるものの、直接検出には、成功していない(1969 年のウェーバーの“発見”は再現性に問題があり、重力波検出に成功したとは言えないと扱う人が多い)。

電磁波では観測できない、天体内部の質量分布を直接調べられるのではないかと期待す

る人が多いが、天体望遠鏡として利用するには、感度を含めて様々な問題を乗り越えて改良していく必要がある。

#### 5. むすび

以上、非常に大急ぎで、可視光以外の天体望遠鏡の仕組みや歴史的成果を紹介した。この短い文書で十分な理解を得るのは難しいだろうし、ここには書ききれなかった面白い話も数多くある。可視光以外の全ての望遠鏡についてまとめたものはなかなか見かけないが、天文学の入門者向けの書籍 [3, 4] や教科書 [5, 6] が参考になろう。また、発見に関連した歴史については、多くの書籍があるが、その中から 1 冊だけ [7] 紹介しておく。

#### 参考文献

- [1] 赤羽賢司、海部宣男、田原博人『宇宙電波天文学』共立出版(1988 年)
- [2] Rohlfs & Wilson『Tools of Radio Astronomy 4<sup>th</sup> ed.』Springer (2006)
- [3] 半田利弘『よくわかる宇宙の基本と仕組み』秀和システム(2007 年)
- [4] 池内、半田、大内、橋本『図鑑 Neo 宇宙』小学館(2004 年)
- [5] 『現代天文学講座 第 11・12 巻 宇宙の観測 I・II』恒星社厚生閣(1982 年)
- [6] 『現代の天文学 第 15~17 巻 宇宙の観測 1~3』日本評論社(近刊)
- [7] 半田利弘『ミステリアスな宇宙』誠文堂新光社(2006 年)

半田利弘