

還暦を迎えた電波天文学

前田 耕一郎

〈兵庫医科大学物理学教室 〒663 兵庫県西宮市武庫川町1-1〉

e-mail: a52478@jpnkudpc.bitnet

ジャンスキーが銀河背景放射の発見についての論文を発表してから去年(1993年)で60年が経過した。ジャンスキーの発見は短波帯で成されたが、その後、電波天文学は飛躍的な発展を遂げ、今日では観測周波数領域がミリ波・サブミリ波といった高周波数まで広がっている。初期の低周波数での観測を紹介すると共に、低周波数での観測の今日的意味について考える。

ニューヨークタイムズの第一面

1933年5月5日のニューヨークタイムズ紙は第一面の左端全段を割いて、ジャンスキーが、我々の銀河の中心方向から来る電波(以下では銀河電波と呼ぶ)を発見したことを次のような見出しで報じている。

NEW RADIO WAVES TRACED TO CENTRE OF THE MILKY WAY —Mysterious Static, Reported by K. G. Jansky, Held to Differ From Cosmic Ray. —DIRECTION IS UNCHANGING —Recorded and Tested for More Than Year to Identify It as From Earth's Galaxy. —ITS INTENSITY IS LOW—Only Delicate Receiver is Able to Register—No Evidence of Interstellar Signaling

訳すと次のようになる。

天の川の中心から来る新発見の電波—ジャンスキーによって報告された神秘的な擾乱電波、宇宙線とは異なる—到来方向は不変—1年以上の観測・検証により我々の銀河から来ていることが判明—強度は低い—感度の良い受信機でのみ検出可能—星間通信信号であるとの証拠なし

ジャンスキーは、1933年4月27日にワシントンで行われた国際電波科学連合のミーティングで、銀河中心方向から来る電波の発見についての発表を行った。このジャンスキーの発見については、彼が所属していたベル電話研究所からマスコミにも発表された。ニューヨークタイムズ紙の記事は、その発表を基にしたものと思われる。天体からの電波をはっきりとした形で捉えたのはジャンスキーの銀河電波の観測が最初である。1933年を電波天文学が誕生した年と考えると、去年(1993年)で電波天文学はかぞえて61歳、つまり還暦を迎えたことになる。

一般に、電波の利用は技術的発展に伴って低周波数から高周波数へと進んで来た。ジャンスキーがベル電話研究所に勤め始めた頃、短波帯の電波が長距離通信に利用されるようになった。それまでは、もっと波長の長い、長波帯の電波が長距離通信に利用されていた。短波帯の電波は長波帯の電波に比べて直進する性質が強く、地上の2地点間の通信を考えた場合、地球の曲率によって到達距離が限られると考えられていたからである。ところが、1920年代に短波帯の電波が意外に遠くまで届くことがわかって来た。また、そのことがその頃発見された電離層による電波の反射と関係することも認識されて来た。アメリカのAT&T社

では1929年から短波を用いた大西洋横断の電話サービスを開始している。音声の情報を送るには数kHzの周波数幅が必要であるが、より高い周波数の電波を使えば通信チャンネル数が増大でき、顧客の需要に答えることができる。

電波通信を行う場合に問題となるのは、通信を妨害する電波（混信）の存在である。短波帯では、人工的な電波雑音だけでなく、大気中の放電現象によって発生する雑音電波（空電）が通信の妨害要因になる。当時、長波帯における空電の性質についての資料はあったのだが、短波帯ではまだほとんど空電の調査が行われていなかった。ジャンスキー達のグループは短波帯における空電の調査を行うために波長14.6m（周波数20.5MHz）で観測を始めた。しんちゅうのパイプを用いて水平方向に指向性を持つアンテナを作り、車輪を取り付けた木枠の上に組み上げた。シンクロナス・モーターを用いて20分間でアンテナが1回転するようにセットし、アンテナに入射して来る電波の強度をペン書きの記録計で記録した。指向性のあるアンテナを回転させながら、当時としては極めて

高感度の受信機により観測が行われたのである。観測の主要な目的は空電の発生状況と到来する方位を調査する事であった。ジャンスキーは1931年に観測を始めたが、その際、すでに空電と異なる電波成分の存在に気付いていた。受信機の低周波数出力の音を聞いていると、空電の場合にはガリツというような音がするのだが、その電波の音は受信機の内部雑音と同じようなシューという音（ヒス）を発していた。1932年に入ってからヒスを発する原因不明の電波の系統的な観測が始められた。アンテナが1回転すると電波の強い方位にピークが現れたが、ピークの方角は時間が経過すると共に東から西へと移動し、ほぼ1日後にはまた同じ方位に戻って来た。図1は1932年9月16日の記録である。

このような観測が1年以上にわたって根気強く続けられた。その間に、ピークが南の方角に現れる時刻は日々早まって行き、ほぼ1年後にまた同じ時刻に南の方角に現れた。このことは、電波強度の高い方向が恒星と同様に空のある方向に固定されていることを示唆していた。ジャンスキーは

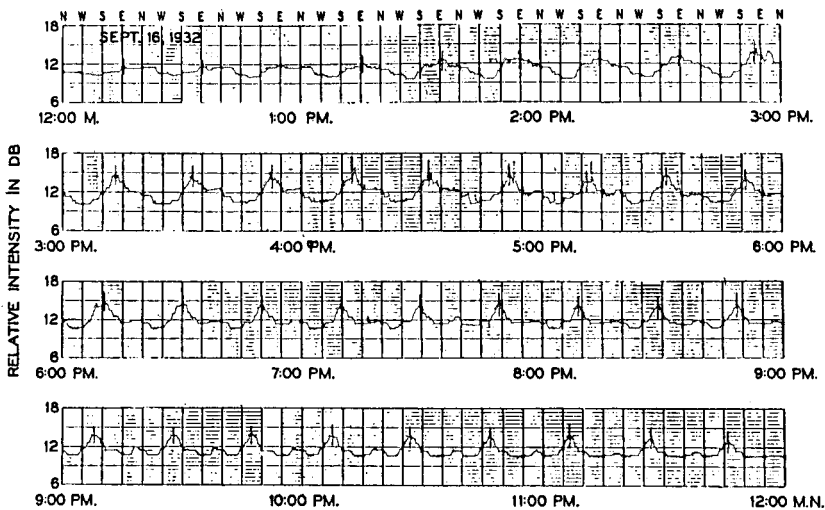


図1 ジャンスキーによる1932年9月16日の記録。正午（12:00 M.）から夜の12時（12:00 M.N.）までの記録であり、電波の相対強度の変化がデシベル（DB）値で示されている。観測は、アンテナを20分に1回のスピードで回転させながら、波長14.6mで行われた。上端にアンテナの向いている方位（N：北，W：西，S：南，E：東）が示されている。（©1933, IRE（現IEEE））

電波の来る方向を仮定してシミュレーションを行い、観測と比較することにより、電波の強い方向が我々の銀河の中心方向に当たることを突き止めたのである。

ジャンスキーは持病の腎臓病がもとで1950年に44歳の若さで亡くなっている。ジャンスキーは、死の5カ月前に書いた手紙の中で、「明白なことだが、銀河電波を最初に記録したのはまったくの偶然であり、記録は遅かれ早かれ誰かが行ったに違いない。私に認められるところがあるとすれば、絶えざる好奇心を持ったことである。好奇心が未知の電波の説明を求め、また、電波の到来方向を決定するのに必要であった長期間の観測を行わせた。」と述べている。ジャンスキーの観測記録は、彼の死後も注意深く保存されていたが、1950年代の後半に研究室の移転に伴う大掃除を行った際、誤って破棄されてしまった。残念ながら、今ではジャンスキーの論文の中でしか彼の記録を見ることはできない。

あるアマチュア無線家

ジャンスキーの発見を確認したのは、電波技師であり、アマチュア無線家であったリーバーである。リーバーはジャンスキーの論文を読んで銀河電波の観測に興味を持った。天文学者に電波観測の働きかけを行ったが、はかばかしい返事が得られず、1937年に自らパラボラアンテナを自宅に作り観測を始めた。天体電波の観測を行うことを目的として作られた最初の電波受信装置であり、初めての本格的な電波望遠鏡と言える。ジャンスキーの発見した電波が周波数に対して熱的な強度分布をしているとすると、高周波数ほど強度が高いはずだと考えて、リーバーは波長9cmで観測を開始した。当時実用化されていた最も高周波数の電波であった。しかし、波長9cmで銀河電波は検出されず、より低い周波数で観測を試みた。そして、1939年の春頃に波長1.87m(160MHz)で銀河電波を捉え始めた。銀河電波の強度分布は熱的

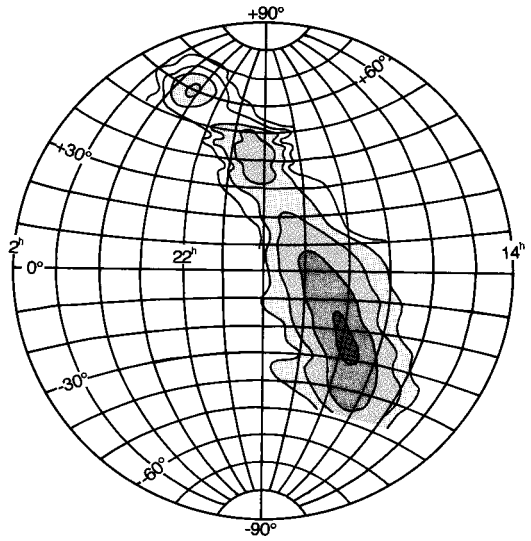


図2 リーバーが描いた波長1.87mでの銀河電波の強度分布図。銀河中心方向(赤緯 -25°)で特に強い。上方にある二つの電波の強い領域はカシオペア座A($+60^\circ$)及びはくちょう座A($+40^\circ$)である。(S & T誌のご好意による。原図はApJ誌に掲載されたものである。)

な分布とは逆に低周波数ほど強まっていた。このような非熱的な強度分布をしていることから、銀河電波は銀河系内の高エネルギー電子が銀河磁場により螺旋運動する際に発生するシンクロトロン放射であると考えられている。

リーバーは色々な赤緯の方向にアンテナを傾けて観測することにより、銀河電波の強度分布図を作成した。リーバーの得た波長1.87mにおける強度分布図(図2)では、銀河面に沿って強度の高い領域が広がり、銀河中心の方向で最も高くなっていた。

ジャンスキーもリーバーも太陽から来る電波の発見者とはならなかった。ジャンスキーの場合には、観測を行ったのが太陽活動極小期に当たっていたからであり、リーバーの場合には、昼間仕事をし夜間に観測を行ったためである。

電波天文学の進展

我々は、現在、ラジオ、テレビ、衛星通信から携帯電話まで様々な周波数の電波を広く利用している。一般的に言って、電波の利用は低周波数から高周波数へと進んで来た。その大きな要因のひとつは通信情報量の増加にある。電波の利用が高周波数へと広がるにつれて電波天文観測に使われる周波数も高周波数へと推移して来た。現在、野辺山電波観測所では、ミリ波で世界をリードする観測が行われている。また、最近完成したマイクロ波での電波ヘリオグラフも世界の注目を集めている。波長1mmの電波の周波数は300GHzであり、ジャンスキーが観測した電波の周波数の約15000倍である。高周波数の電波で観測すると利点がある。電波望遠鏡に限らず単体の望遠鏡の分解能は観測する電磁波の波長と口径（レンズやパラボラ反射鏡の場合）によって決まる。口径をD、波長を λ とすると、角度分解能は λ/D [ラジアン]となる。同じ口径のパラボラであれば波長の短い高周波数の電波で観測する方が角度分解能は高くなる。ただし、波長がパラボラ面の凹凸と同程度まで短くなると、アンテナとしての性能は著しく低下する。電波は光に比べてはるかに波長が長いので相対的に分解能が悪くなり、これが電波観測の弱点であると考えられていた。(ただし、今は電波干渉計の技術が発達したので一概にそうとは言えない。)高周波数の電波を用いると、この点が改善される。天体電波は電子によって放射される場合が多いが、高周波数の電波ほど現象の中核部でできたフレッシュな高エネルギー電子から放射される。現象の中心的部分に迫るには高周波数の電波で観測する方が有利である。また、ミリ波の領域には星間分子から来る電波が存在することがわかって来た。高分解能を求めると共に、高エネルギー現象の研究や新しい観測分野の開拓を目指して、電波天文学は高周波数を指向して来たと言えるだろう。このような動きは1970年前後から特に

顕著となった。

タスマニア島

1987年3月、アイオワ大学の友人で宇宙物理学者であるカルバートが私の住む京都を訪ねて来た。当時、私は三重県柘植町に広帯域アンテナ8基で構成されるアレイを作り、短波帯で木星電波や太陽電波の観測を行っていた。そのアレイを見たいと言うのである。案内する前日、夕食を共にした後で雑談をしていたとき、銀河電波のことが話題に上った。その際、リーバーがオーストラリアのタスマニア島で観測を続けているということを知られた。カルバートはタスマニア大学のエリスと木星電波の協同研究を行うためにタスマニア島を訪れたことがあった。リーバーは歴史上の人物だと思っていた私は驚いた。

1990年1月、アメリカで“低周波数における天体物理学”と題して会議が開かれた。私は会議の集録を読んで、リーバーがその会議で発表を行ったことを知った。リーバーは、高周波数へと向かう一般的な電波天文学の流れと逆行して、ジャンスキーの観測した周波数よりさらに低い周波数で銀河電波の観測を試み続けていた。地球上層大気は太陽からの紫外線やX線により一部電離され、100~500kmの高さに電子密度の高いプラズマの層ができる。これが電離層である。プラズマは電波を反射したり、屈折させたりする。電離層内の最大電子密度によって決定される特性周波数以下の周波数の天体電波は電離層によって反射されて地上まで到達しない。特性周波数は日変化を示し、昼間は10数MHz、夜間には数MHzの程度となる。特性周波数は地球上の場所によってもかなり異なる。さらに、太陽活動と関連して変化し、太陽活動極小期には特性周波数が全体的に低くなる。リーバーは、より低周波数での観測を行うために電離層の特性周波数が低いタスマニア島に1954年に移り住んだ。会議の集録にあるリーバーの論文の末尾に挙げられていた参考文献を読ん

で、1960年代の太陽活動極小期にリーバーがタスマニア島で行った波長144 m (2.1 MHz)での観測の詳細を知ることができた。低周波数で分解能を良くするには、広い面積（大きな口径に相当）のアレイを建設しなければならない。リーバーが観測に用いたのは直径1075 mの円内に、192本のダイポールアンテナを設置したアレイである。これまでに作られた電波望遠鏡の中でも最も大きなもののひとつであろう。私は、一度、自分の目でリーバーの作ったアレイを見てみたい、また、彼にも会ってみたいと思い手紙を出した。返事には、「もうアンテナはほとんど取り壊されているので見るべきものはない。私の書いた論文の参考文献を見てくれ。」とあり、また、「くれぐれも私と会うためだけに来ることはするな。」とあった。

1992年4月、私は、1989年10月に北海道でオーロラが見られた際、柘植町において30 MHzで受信された、それまでに経験したことのない奇妙な電波の原因を考えていた。電離層の吸収が減少したために、見かけ上、銀河電波が強まったのではないかと考えていたが、長年観測を続けて来たリーバーの意見が聞きたくて手紙を書いた。その手紙を出すとき、冒頭で紹介したニューヨークタイムズ紙の記事のコピーを同封した。ふと、ジャンスキーが銀河電波を発見した時リーバーはこの記事を読んでいただろうかと思い、確かめてみたくなったのである。彼からの返事には、「記事のことについて聞いてはいたが読んだことはなかった。記事の議論が知的だ。大切にしまっておく。大変喜んでいいる。」と書かれていた。私もニューヨークタイムズ紙の記事が、当時の状況を踏まえた論理性のある、実に知的な内容の記事であると思う。ジャンスキーの記事の右側には、日本の中国侵略やナチスの大集会に関する記事があり、紙面右上のトップ記事はその年に大統領に就任したルーズベルトのニューディール政策に関するものである。ジャンスキーの発見を歴史的に位置付ける意味でも興味深い。

ちなみに、リーバーの示唆により、私が30 MHzで観測した電波は、オーロラと関連して発生した高エネルギー電子からのシンクロトロン放射であると確信するようになった。

低周波数での観測とレッドシフト

遠方の銀河から来る光を分析すると、例外なくスペクトル線が赤い方にずれている。この現象をレッドシフトと呼ぶが、銀河が我々から遠ざかっているために起こるドップラー効果の結果であると解釈してスピードを求めてみると、遠くの銀河ほど速く遠ざかっている。これはハッブルによって発見された法則である。ハッブルの法則は宇宙が膨張していることを示す証拠と考えられており、マイクロ波でペンジアスとウィルソンによって発見された絶対温度2.7度の宇宙背景放射と共にビッグバン宇宙論が支持される観測的根拠となっている。

リーバーは、2.1 MHzで南半球から行った電波観測に基づき、レッドシフトについてドップラー効果とは異なった解釈を試みている。先に述べたように、10 MHz程度以上の周波数では、銀河面に沿って電波の強い帯が観測され、銀河座標の極方向では電波強度が低い。ところが、リーバーが2.1 MHzで得た強度分布図では、銀河面に沿って電波強度の低い領域が広がり、銀河座標の南極方向で電波強度が高まっていた。南極方向での強度は温度1000万度の黒体から放射される強度に相当していた。この強い電波は、我々の銀河の周りの銀河間空間から来ていると考えられる。銀河の南極方向で強度が高まっているのは、銀河面を横切って来る電波が銀河面に沿って存在する多量のガスにより強い吸収を受けるのに対して、極方向から来る電波はあまり吸収を受けないと考えると、説明がつく。また、大マゼラン雲の場所では、周囲よりわずかに電波が弱まっているのが観測されたが、このことも、電波が大マゼラン雲の背後の銀河間空間から来ていることを示唆してい

る。大マゼラン雲の背後からほぼ一様な強度の電波が来ているとすると、大マゼラン雲中のガスによる吸収のために大マゼラン雲は周囲より電波の弱まった領域として観測される。では、銀河間空間で電波はどのようにして発生しているのだろうか。リーバーは、銀河間空間に希薄なプラズマが存在し、プラズマ中の電子によって低周波数の電波が放射されていると考えている。電波を放射することにより電子はエネルギーを失うが、どこからエネルギーが補充されているのだろうか。リーバーは、光子が衝突によって電子にエネルギーを与え、逆にエネルギーを失った光子はレッドシフトを起こすと考えている。ハッブルはレッドシフトをドップラー効果の結果であると解釈することにためらいを持っていた。ドップラー効果と解釈するということは、例えば100億光年もの彼方から、光子はその銀河の運動に関する情報を変形されることなく運んで来たことになる。果して100億光年もの遠くから来る光子に銀河間空間で何事も起こらなかったのだろうか。我々はそのことについてもっと知る必要がある。リーバーのレッドシフトに対する考え方の当否はさておいたとしても、リーバーの2.1 MHzでの観測は銀河間空間が光子に何の影響も与えないほど虚無の空間ではないことを示しているようだ。

リーバーとハッブルはシカゴの近くにある小さな町の同じハイスクールを卒業している。ハイスクールでハッブルに2年間理科を教えた女性教師がいた。その女性教師が後にリーバーの母となった。リーバーは母から、高名な天文学者となったハッブルの本を与えられて天文学の知識を得た。天文学になじんでいたために、電波技師であったリーバーはジャンスキーの銀河電波の発見に特別な興味を持ったと想像される。また、レッドシフトをドップラー効果と解釈する考え方に疑問を持つ根拠が、ハッブルの本の中に書かれている記述にあるのは興味深い。

リーバーは南半球からの観測に続いて、今度は、

北半球から観測を行おうと1986~87年の太陽活動極小期に、放置されていたアレイを用いてカナダで観測を試みたが、アンテナの傷みがひどく思わしい結果は得られなかった。そのため1996年頃の太陽活動極小期に向けてタスマニアに作ったのと同様のアレイを建設しようと考え、カナダの当局者達に働きかけていた。しかし、結局成功せず、時間切れで計画は挫折してしまった。リーバーの年齢は80歳を越えている。最近の手紙の中に、「私は遠くの国でビッグプロジェクトを行うには年をとり過ぎている。興味のあることがタスマニアにはまだまだ沢山ある。」と述べたくだりがある。リーバーが南半球で得た結果を確認することも、また、リーバーが行ったのと同様の観測を北半球から行うことも今後の課題として残されている。

低周波観測の勧め

話を論題に戻そう。還暦とは干支を一回りして、生まれたときの干支に還ることである。干支を周波数と読み替えて、これを機会に低周波数での観測にも少し興味を向けてみてはどうだろうか。数MHz程度以下の周波数での宇宙の詳しい観測はほとんど行われていない。高周波数の電波は現象の芯の部分を見るのには適しているが、星間空間や銀河間空間にあるような密度の薄い物質を見るのには低周波数の電波の方が向いている。事実、探査機ボイジャーは太陽圏境界（太陽系空間と星間空間の境界）から来ると思われる周波数2~3 kHzの電波を捉えている。低周波数で、しかも高分解能で観測したとき宇宙がどのような姿を現すのか興味を持たれる。

上でも述べたが、地上から低周波数で観測することを困難にしているのは電離層の存在である。1970年を前後して、2機のRAE (Radio Astronomy Explorer) 衛星が打ち上げられ、宇宙空間から低周波数での観測が試みられた。RAE-1号により、電離層の外に出ても周波数帯によっては地球からの人工ノイズやオーロラから発生する電波

が天体電波観測の障害になることがわかった。RAE-2号は月を回る軌道に打ち上げられ、最も観測条件の良い場所は、地球からの混信を遮ることのできる、月の裏側であることが確認された。政治的、経済的条件に左右されるので予測することは難しいが、月面での人類の活動は20~30年程度先には始まるだろう。そのとき、技術的困難の少ない低周波数での電波観測がまず行われる可能性がある。月の裏側からの観測はいわば究極的な目標である。今は、地上から可能な限りの低周波数で天体電波観測を行うと共に、スペースや月面からの観測を見越した機器やノウハウの開発を進める時期ではないだろうか。

リーバーは21世紀の電波天文学の最前線は低周波数にあり、宇宙に関する重要な発見がなされると公言してはばからない。また、スペースからの観測は“pie in the sky”のようなものであると言いつち、地上から電離層の性質をつかみながら観測することをもっと行うべきだと主張している。電波天文学の夜明けから、自らも観測を行いつつ電波天文学の進展を見続けてきた先達の言葉に我々は答えねばなるまい。

参 考 文 献

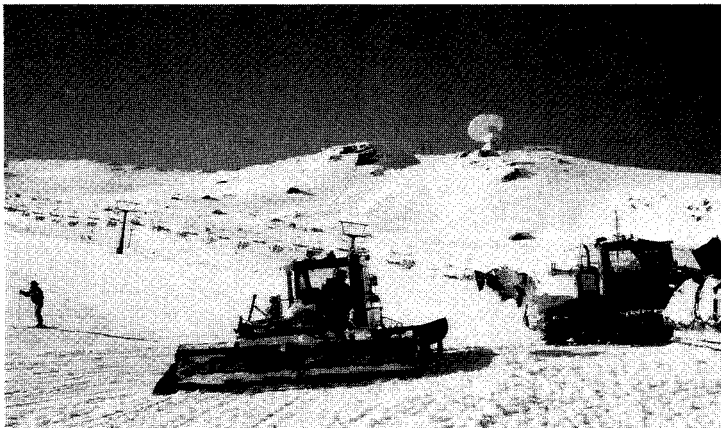
- Jansky, K.G., 1933, Proc. Inst. Radio Eng., 21, 1387.
 Kassim, N.E., K.W. Weiler (Eds), 1990, Lecture Notes in Physics 362: Low Frequency Astrophysics from Space, (Springer-Verlag, New York).
 Reber, G., 1944, ApJ 100, 279.
 Reber, G., 1968, J. Franklin Inst. 285, 1.
 Reber, G., 1986, IEEE Trans. on Plasma Sci. PS-14, 678.
 Spradley, J.L., 1988, S & T 76, 28.
 Sullivan, W.T., III, 1984, in The Early Years of Radio Astronomy, ed. W.T. Sullivan, III, (Cambridge University Press, New York), p. 3 (この論文の参考文献も参照)

Rebirth of Low-Frequency Radio Astronomy

Koiti Maeda

Department of Physics, Hyogo College of Medicine

Karl G. Jansky accidentally discovered natural radio waves from the Milky Way at a low frequency of about 20.5 MHz (wavelength=14.6m) in 1933, and opened a new window on the universe. In the course of the development of radio astronomy, the move to ever higher frequencies to achieve higher resolution with fixed dish and array sizes took place relatively rapidly. As a result, most areas at low frequencies still remain to be fully exploited with modern techniques and instruments. It is already time to begin long-range planning for new low-frequency observations from space and the moon as well as from Earth. Grote Reber, who followed up Jansky's investigations in the late 1930's, is of the opinion that the exciting frontier of future radio astronomy is in the nearly unexplored region of radio waves longer than 100m. Don't forget this last unexplored window on the astrophysics of the universe.



スキー場にある電波望遠鏡・IRAM30m鏡 (スペイン・ピコベレタ)