

簡単な電波望遠鏡による低周波電波天文学

4. 木星電波の観測

前田 耕一郎*

1. 木星からの電波

天体から来る電波のフラックス密度を周波数に対してプロットした図をその天体からの電波のスペクトルと呼ぶ。図1は木星から来る電波のスペクトルである。図1に見られるように、木星からの電波放射は3つの成分に分けられる。数10 GHzあたりでは木星表面の雲からの熱放射が観測され、そのスペクトルは約130 Kの黒体放射のスペクトルで近似される。数10~数1000 MHzの領域では木星磁場に捕らえられた高エネルギー電子からのシンクロトロン放射が観測される。1973年にアメリカの探査機パイオニアにより木星の磁場と粒子の計測が行われ、それまで地上観測を基に推測されていたシンクロトロン放射仮説がみごとに検証された。天体からのシンクロトロン放射が直接確かめられた唯一の例である。木星は40 MHz以下で非常に強い電波を放射している。この成分は木星デカメータ放射と呼ばれており、1955年にアメリカのバークとフランクリンにより22.3 MHzで発見された。以下では、木星デカメータ放射の観測について考えるので、簡単のため木星デカメータ放射のことを単に木星電波と呼ぶことにする。木星電波は定常的に観測される電波ではなく、30分~2時間程度続くバーストの集合（ストーム（嵐）と呼ぶ）として観測される。後で述べるように、ストームの発生は観測者から見た木星の体系IIIでの中央経度とガリレオ衛星イオ（Io）の軌道位置と密接に関係している。木星電波の放射周波数は電子のサイクロトロン周波数に近いと考えられている。パイオニアの測定から推定される表面磁場の最大値（約14 Gauss）に対応する電子サイクロトロン周波数が木星電波の最大周波数39.5 MHzと符合しているのが有力な理由の1つである。放射機構としては、サイクロトロンメーザーと呼ばれる機構が有力視されているものの、まだ定説はない。

磁場を持つ惑星からは、木星電波と同じ発生機構によるとみられる電波が放射されている。地球からは、波長がキロメートル程度の電波が放射されており、オーロラ活動と相関を持つことが知られている。惑星探査機ボイジャーは光学観測、磁場、粒子の観測などと共に電波観測

も行った。ボイジャーの観測により、土星、天王星、海王星からも電波が放射されていることが明らかにされた。このような惑星からの電波は惑星磁場の回転に同期して強度変動を行ったり、発生確率が変化したりする。磁場は惑星の深いところ、つまり惑星本体で生じているので、電波観測から惑星本体の自転周期を知ることができる。この自転周期と雲の模様（渦）の回転周期を比較することにより、東向きの風が吹いているのか西向きの風が吹いているのかが決められるので、惑星大気の運動を調べる際には、電波観測から得られる自転周期が重要な意味を持つ。

図2にボイジャーから送られて来た木星電波のダイナミックスペクトルの1例を示す。黒い部分が電波放射を

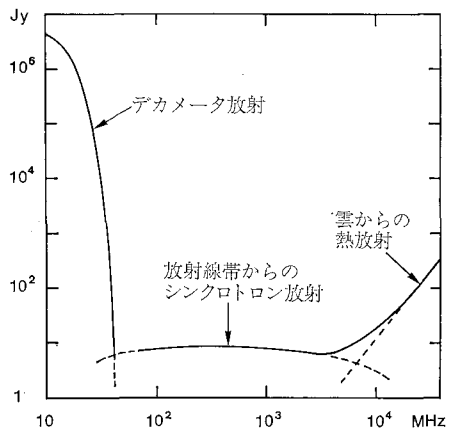


図1 木星の電波領域のスペクトル

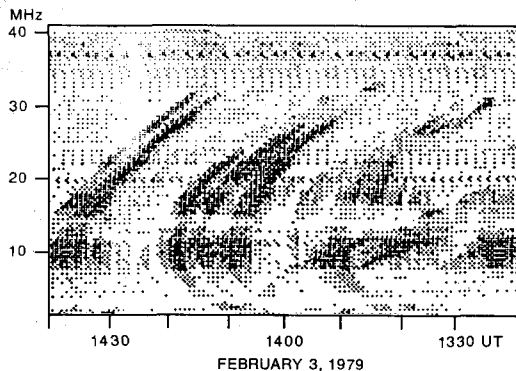


図2 ボイジャー1号により観測された木星電波のダイナミックスペクトル

* 兵庫医大 Koitiro Maeda: Low Frequency Radio Astronomy with Simple Radio Telescopes 4. Observations of Jovian Decametric Radiation

示しているが、きれいなアーク状の構造を描いている。このようなアークの形を手がかりにして、木星電波のビーム構造の研究が進められている。

2. 木星電波ストームの発生の特徴

木星電波の電波源は木星のオーロラ帯に発生し、電波は電波源から鋭いビーム状に放射されると考えられている。ストームの発生とは、電波源で“電波が発生する”という意味ではなく、観測者にストームとして“電波が観測される”という意味である。図3は 21.86 MHz での観測例である。銀河電波に重なって、強度が時間的に激しく変動するバーストとして木星電波が記録されている。バーストは2時間近くわたって観測されており、バーストの集合全体がストームである。このようなストームの発生には、次に述べるような際立った特徴がある。まず、ストームの発生確率は、観測者から見た体系IIIでの木星の中央経度に依存している。パークとフランクリンによる発見直後、18.3 MHz で観測を行っていたオーストラリアのシェインはデータを遡って調べ、ストームの発生に周期性のあることに気づいた。そして、木星電波の初期の研究はストーム発生の周期を求めることに焦点が当てられた。その後、ストームの発生確率の詳しい研究から回転周期は9時間 55分 29.7秒と求められ、この電波観測から求められた周期を基に木星の体系III経度が決められている。体系III経度の回転周期は木星磁場の回転周期であることも明らかとなっている。ちなみに、体系I経度は赤道付近の模様の回転周期に、また、体系II経度は中緯度帯の模様の回転周期に基づいて定義されている。

1964年に、ビッグが木星電波ストームの発生確率が、観測者から見た衛星イオの軌道位置にも関係していることを発見した。現在ではイオが電離層を持っていることが知られており、木星磁場とイオとの相対運動によって発生した擾乱が磁力線に沿って木星表面近くまで伝わ

り、イオ関連の木星電波を発生させると考えられている。

このようなストーム発生の特徴は、観測者から見た体系IIIでの木星の中央経度 (λ_{III}) を横軸に、イオの外合からの位相角 (γ_{Io}) を縦軸にとった面上に、ストームの発生した期間をプロットするとよくわかる。図4に λ_{III} と γ_{Io} を示す。図5は 21.86 MHz で、約2年間 (1977~1979) に同定されたストームを λ_{III} - γ_{Io} 面にプロットしたものである (図5の実線)。観測は3素子八木アンテナあるいはそれと同程度のアンテナを用いた簡単な電波望遠鏡 (1989年7月号参照) で行われた。各線が右上がりとなっているのは、観測がそのような線に沿って行われるためである。経度だけについて考えると、発生確率のピークが現れる3つの経度帯があり、源-B ($\lambda_{III}=80^\circ\sim 200^\circ$)、源-A ($\lambda_{III}=200^\circ\sim 300^\circ$)、源-C ($\lambda_{III}=300^\circ\sim 360^\circ$) と呼ばれている。各経度帯においてイオ位相により確率が際立って高くなる領域があり、Io- を前につけて Io-A、Io-B、Io-C と呼ばれている。各イオ関連成分の領域を図5に点線で示す。Io-B のストームは $\gamma_{Io}=60^\circ\sim 110^\circ$ あたりで、また、Io-A および Io-C のストームは $\gamma_{Io}=220^\circ\sim 260^\circ$ あたりで起こる。イオに関

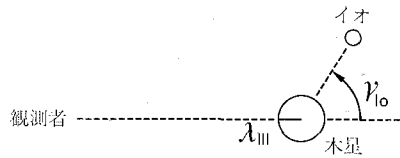


図4 観測者から見た木星の中央経度 (λ_{III}) とイオの位相 (γ_{Io})

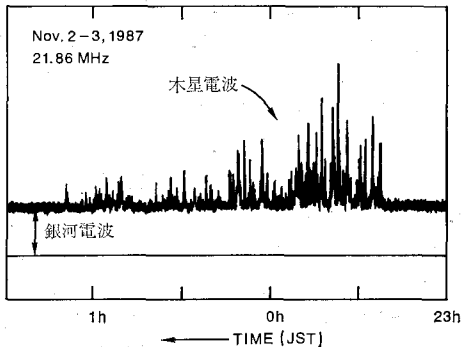


図3 簡単な電波望遠鏡により観測された木星電波。ペンレコーダの紙送りスピードは 5 cm/h, Io-A のストームである。

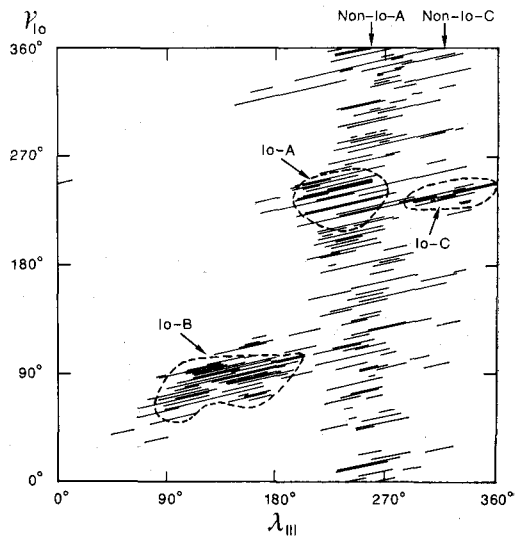


図5 中央経度 (λ_{III})-イオ位相 (γ_{Io}) の面上への木星電波ストームのプロット。約2年間 (1977~1979) に同定されたストームがプロットされている。

連する成分は、一般に強度も発生確率も高い。したがって、 $\lambda_{III-\gamma_{Io}}$ 面における観測の線が Io-A, Io-B, Io-C 領域の中心を通過する場合には、ほぼ 100% の確率でストームが観測されると考えてよい。イオの位相に関連しない成分は non-Io- をつけて呼ばれる。22 MHz あたりにおいて最も確率よく観測されるのは non-Io-A, 次に non-Io-C と続くが、non-Io-B は非常に弱いので3素子八木アンテナ程度のアンテナではほとんど観測されない。

木星から見た地球の赤緯は木星の公転周期 11.9 年で $-3.3^{\circ} \sim +3.3^{\circ}$ の間を変化する。このわずかな角度の変化が、ストームの発生確率や各成分の中心経度に系統的な変化をもたらすことが知られている。一般に、地球の木星中心赤緯が大きいほどストームの発生確率は高くなる。この傾向は、特に、non-Io-A において顕著である。現在、地球の木星中心赤緯は約 2.5° で、これから減少して行く。したがって、ここ 2~3 年が木星電波を観測するチャンスである。

3. 木星電波と惑星間空間シンチレーション

木星電波源から放射された電波は地上の観測者に到達するまでに、太陽風（太陽から放射状に流れ出すプラズマ流）の中を通過して来る。太陽風の中には電子密度の“むら”があり、そのために電波の波面が乱され回折現象が起こる。色々な方向に散乱された電波が干渉し、その結果、地上には電波強度の強弱の回折模様ができる。この回折模様は、太陽風の流れのために地上を移動する。したがって、地上の1地点で観測すると、木星からは一定強度の電波が放射されていたとしても、太陽風による回折のため強度変動が観測される。これは地球大気密度の不均一によって星の光が瞬くのと同様の現象であり、惑星間空間シンチレーションと呼ばれている。点源である恒星が瞬くのに対して広がりを持った惑星は瞬かない。個々の木星電波源は非常に小さい（0.1 秒角以下）のでシンチレーションを起こす。このことは、長基線干渉計による観測によっても確かめられている。木星電波源が瞬く時間スケール（1~10 秒程度）は太陽風が視線を横切るスピードと関係する。したがって、太陽—地球—木星の幾何学的関係により瞬きの時間スケールが変化する。図6に示した角度 ϵ が 180° に近づくと、視線に直角方向の速度成分が相対的に小さくなるために個々のバーストの時間スケールが長くなる。図6に3つの ϵ について、木星電波の強度変動を示す。 ϵ が 180° に近づくと、バーストの時間変化がゆっくりとなることがわかる。

4. 簡単な電波望遠鏡による木星電波の観測

地上から観測する場合、20 MHz 以下の周波数は混信の影響が大きいので観測にあまり適さない。一方、木星

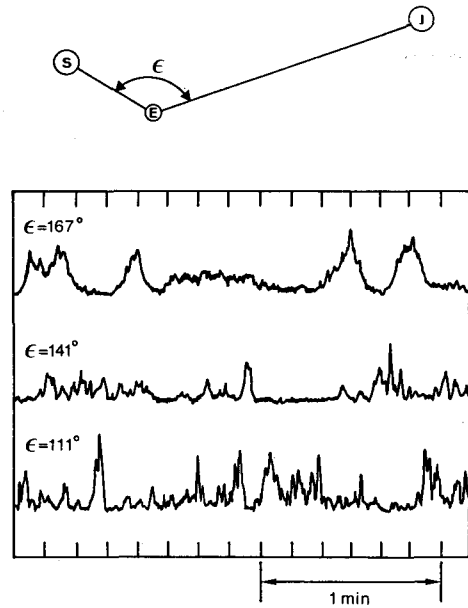


図6 木星電波と惑星間空間シンチレーション。太陽(S) —地球(E)—木星(J)のなす角(ϵ)により強度変動の時間スケールが変化する。

電波は周波数が高くなるにしたがい強度が急激に低くなるとともに発生確率も減少する。したがって、20~25 MHz あたりで混信の少ない周波数帯を選んで観測を行う。21 MHz にアマチュアバンドがあるので、21 MHz バンド用に市販されているアンテナを少し縮めて 22 MHz 程度で観測を行うとよい。ここでは、市販の3素子八木アンテナによる 21.86 MHz での観測を紹介する。

21 MHz バンド用の3素子八木アンテナを 21.86 MHz 用のアンテナとするために約 3% 相似的に短縮する。アンテナは、1989年9月号の銀河電波のマッピングの所で述べたように南へ傾けられるようにして、八木アンテナのブームが木星の南中時刻の方向を向くように傾ける。木星の南中高度が高いときにはアンテナのブームを天頂に向けて観測してもよい。同軸ケーブルによりアンテナと通信型受信機を接続する。接続のコネクターはM型の場合が多い。1989年7月号で述べたように、通信型受信機のAF出力を付加回路で検波して得られる直流電圧をペンレコーダに記録する。

昼間の観測では、一般に、混信から逃れることはできない。太陽バーストの場合は、混信をはるかに凌ぐ強度に達するので混信の中でも同定は可能である。しかし、木星電波の場合には受信強度が銀河電波と同程度で、それほど強くないから混信の中で同定することは困難である。そこで、観測は木星南中時刻が夜間となる時期に、南中時刻を中心として6時間程度行う。したがって、観測期間は1年の内6カ月程度に限られる。自動観測する

場合はオーディオ用のタイマーで観測時間を設定するとよい。ペンレコーダの紙送りのスピードはモニター観測の場合、5~20 cm/h が適当である。木星電波は、その強度が特徴的な時間変化を示す。その特徴は言葉では表現しにくい、見慣れると識別できる(図 3 参照)。あまり紙送りスピードを遅くするとそのような特徴が見にくくなる。また、あまり速くすると記録紙が沢山必要となり不経済である。より詳しく強度変動を見たい場合には、ペンレコーダの記録とは別に、AF 信号をテープレコーダに録音しておき、後で再生して色々な紙送りスピードの記録を作ればよい。

5. 音による木星電波の同定

音による同定について、太陽電波バーストの観測(1989年11月号)のところで述べたが、木星の場合にも音による同定は有効な方法である。フロリダ大学の電波観測所では今も音をモニターすることにより同定の確率を高めている。上で述べたように、地上からの観測においては、太陽風によるシンチレーションの影響を受ける。強度変動の時間スケールは、上で述べた角度 ϵ によって変化するが、それにしたいが、音の様子が変わる。 ϵ が比較的小さい($\epsilon \sim 90^\circ$)場合には、暴風雨の中に立って吹き降りの雨音を聞いているような音がする。もう少し ϵ が大きく($\epsilon \sim 120^\circ$)になると、強度変動の時間スケールが長くなり、海岸に寄せては返す波の音のようになる。衝近く($\epsilon \sim 180^\circ$)になると、波の音でも、ずいぶん穏やかな波の音へと変わる。以上が基本的な音の変化だが、Io-B に関しては、S (Short の略) バーストと呼ばれるミリ秒にも達する時間変化の速いバーストが現れることがある。その場合には、プッププップという速い断続音が聞こえて来る。

木星電波や太陽電波の音をテープレコーダで録音し、後で聞いて楽しむこともできる。

6. 中央経度とイオの位相の計算

中央経度とイオ位相の計算を行い、前もって木星電波の発生確率の高い日を知ることができる。

各日の日本標準時 (JST) 9 時における中央経度が観測年表(地人書館)に与えられている。厳密に言えば、観測年表に与えられている値は太陽光の当たっている部分の中央経度だが、影の部分も含めた中央経度とは高々 0.5° 程度しか違わないので、補正せずにそのまま用いても実用上さしつかえない。木星の体系 III 経度は、西回りに 0° から 360° まで測られている(つまり、西経である)ので、木星の自転により時間と共に λ_{III} は $36.27^\circ/h$ の割合で増加する。イオの位相 (γ_{Io}) は、アメリカ歴 (American Ephemeris) に世界時 (UT) で与えられているイオの外合時刻を用いて計算する。アメリカ歴は一般には手に入りにくいと思われるが、イオの外合時刻の部

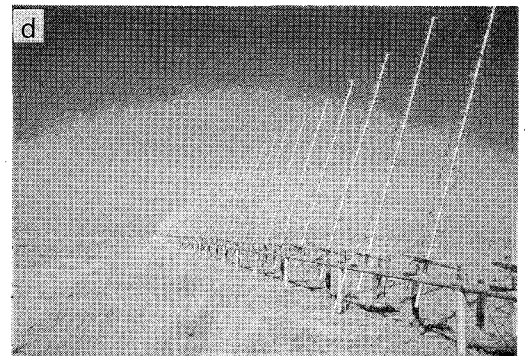
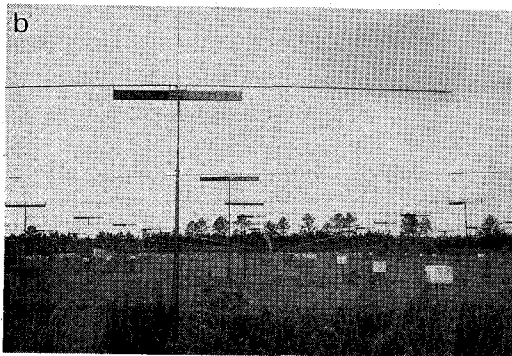
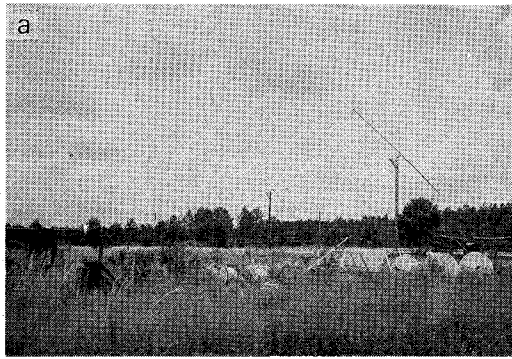
分は 1 ページだけであるので、科学館や天文関係の研究室を持つ大学などからコピーを手に入れるとよい。イオの外合時刻が $\gamma_{Io} = 0^\circ$ に対応し、時間と共に $8.48^\circ/h$ の割合で増加する。アメリカ歴の表で観測時刻に最も近いイオの外合時刻から観測時刻の γ_{Io} を計算する。

計算例を示しておこう。1989年10月29日の木星の南中時刻は 4 時 JST 頃である。4 時 JST における λ_{III} および γ_{Io} を求めてみよう。観測年表から 10 月 29 日 9 時 JST の中央経度は 312.8° である。4 時 JST の値を求めるには、5 時間遡らねばならない。5 時間に対応する λ_{III} の進み (181.4°) を 312.8° から減じて、 131.4° を得る。イオの位相は次のように計算する。アメリカ歴を見ると 10 月 28 日 23 時 25 分 UT が最も近い外合時刻である。この時刻は 10 月 29 日 8 時 25 分 JST に当たるので、4 時 JST まで、4 時間 25 分、つまり γ_{Io} で 37.5° だけ 360° から遡り、 322.5° を得る。長期にわたって観測を続ける場合には、9 時 JST における λ_{III} および γ_{Io} を表にしておくなど、利用しやすいように工夫するとよい。

南中時刻を中心に 6 時間を観測時間とし、観測開始時刻と観測終了時刻での λ_{III} および γ_{Io} を求め、 $\lambda_{III} - \gamma_{Io}$ 面上で開始時刻と終了時刻に対応する 2 点を結ぶと、その日の観測が $\lambda_{III} - \gamma_{Io}$ 面上でどのような線に沿ってなされるかを知ることができる。この観測の線が Io-A や Io-B の領域の中心部を通る場合には、ほぼ 100% の確率で木星電波が受信される。

7. 色々なアンテナ

現在、木星電波の観測にどのようなアンテナが使われているかを紹介してみよう(図 7)。いずれも低周波電波天文観測で使われる典型的なアンテナと考えてよい。まず、フロリダ大学電波観測所のアンテナを紹介する。キャンパスのあるゲインズビルからメキシコ湾に向かって西に車を走らせること 2 時間余り、スワニー川を越えてしばらく行った所に電波観測所がある。(a) はフロリダ大学の八木アンテナ群である。16.7, 18.0, 20.0, 22.2, 26.3 MHz で木星電波のモニター観測が行われている。(b) は 640 本のダイポールアンテナからなる 26.3 MHz 用の大アレイである。ダイポールアンテナはすべて手作りであり、1989年9月号で紹介したダイポールアンテナと基本的には同じものである。余談だが、フロリダ半島には山がない。雷は平地の高いものに落ちて来る。各ダイポールアンテナには針金をねじった避雷針? が付けられている。効果の程は疑問だが、ほとんどの避雷針に赤トンボがとまっていたのは、ほほえましい光景であった。フロリダ大学ではアンテナからの信号の増幅に通信型受信機が使われており、アンテナが大規模なだけで我々の簡単な電波望遠鏡と基本的には同じである。



次に、テキサス大学の電波天文観測所のアンテナを紹介しよう。キャンパスのあるオースチンから、アクセルに置く足の裏が痛くなるほど西へ西へと車を走らせること 8 時間余り、アルパインという小さな町に着く。観測所までは、まだ広大な牧場を横切る悪路を行かねばならない。翌日、迎いのジープに乗り牧場を横切って進むこと約 25 km、やっと観測所にたどり着く。この辺はもうメキシコ国境に近く、UFO がよく目撃されることで知られる砂漠地帯である。テキサス大学の観測所では 16.7、22.2、30.0 MHz で木星電波のモニター観測が行われている。(c) のように 4 隅に木のポールを立ててワイヤーを十字に張り、いわゆるクロスダイポールとして観測に用いている。もちろん手作りである。東西の 2ヶ所にアレイを作り、干渉計として観測を行い同定の確率を高めている。ついでに、木星用ではないが、テキサス大学の重要なアレイ (d) を紹介しておこう。各素子はスパイラルアンテナで、これも手作りである。このようなアレイを 3.2 km×3.2 km の広さの土地の数ヶ所に配置して干渉計とし、空のマッピングを行うことにより、電波源の正確な位置を求めるという地味だが極めて重要な仕事が日夜続けられている。(e) は、我々が三重県柘植町に作った木星電波観測用のコニカルログスパイラル 8 素子のアレイである。ガラスファイバーのポールとガラスファイバーのロープを使って円錐面を作り、細い同軸ケーブルを巻き付けてアンテナとしている。すべて、アマチュ

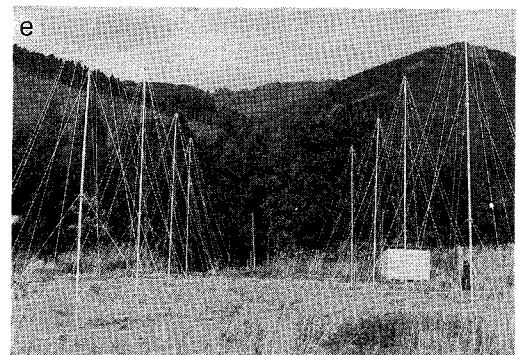


図 7 色々なアンテナ (いずれも著者撮影)。フロリダ大学電波観測所の八木アンテナ群 (a) およびダイポールアレイ (b)、テキサス大学電波天文観測所のクロスダイポールのアレイ (c) およびスパイラルアンテナのアレイ (d)、兵庫医大のコニカルログスパイラルアンテナのアレイ (e)。

ア無線用などに市販されている部品で作られている。このアンテナは右回りに円偏波した電波に感度を持つように作られている。木星電波は多くの場合右回りに偏波しているため、このようなアンテナが観測には効果的である。フランスのナンセイ観測所でもコニカルログスパイラルの大規模なアレイが木星観測に使われている。

次回は、簡単な電波望遠鏡をグレードアップする方法および干渉計によるカシオペア A やシグナス A などの観測について述べる。