

# アルマー ALMAr 冒険の

## 第05回 「電波天文学の歴史」

これまで、電波による天体観測の方法を紹介したり、実際に太陽からの電波を受信するなどの実験を行ってきましたが、そもそも電波とは一体、何なのでしょう？ 今回は、電波の正体と電波天文学の始まりについて調べてみましょう。

- 「アルマーの冒険」制作ユニット  
 絵／藤井龍二 (FUJII Ryuji)  
 文・構成／川村 晶 (KAWAMURA Akira：星の手帖社)  
 監修／平松正顕 (HIRAMATSU Masaaki：国立天文台チリ観測所)  
 編集／高田裕行 (TAKATA Hiroyuki)  
 デザイン／久保麻紀 (KUBO Maki)  
 特別ゲスト／石黒正人 (ISHIGRO Masato：国立天文台名誉教授)



千里奈央  
 (せんり・なお)

蒼天高校の2年生。星空や宇宙が大好き。将来の夢は天文学者になること。天文部の春合宿中に、ひょんなことから「アルマー」や「いざよい」と出会い、ともに電波宇宙の危機を救うとされる「グランドアルマーの宝剣」を探す冒険の旅に出る。

アルマー  
 (ALMAr)



電波宇宙から可視光宇宙へやってきたこの子の竜。電波宇宙に危機をもたらす謎の妨害電波「ジャミング」を浴びて意識が遠のくが、そこに9つの頭をもつ巨大な竜が現れて「電波宇宙を守るために、グランドアルマーの宝剣を探せ」と告げられ、気がつくや野辺山高原の草むらに倒れていた。

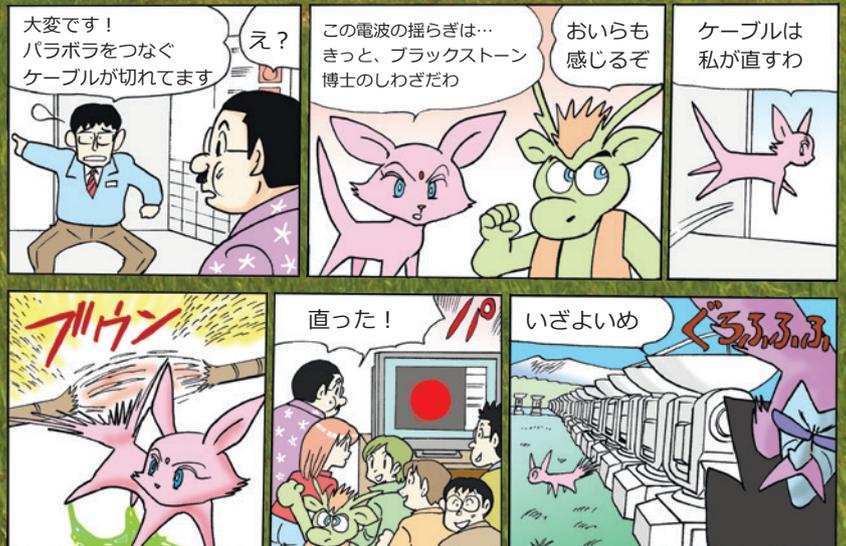
いざよい  
 (十六夜)



奈央とアルマーの前に現れた謎のメスネコ。可視光と電波の世界を見わける特殊能力の持ち主。電波宇宙や可視光宇宙について豊富な知識を持ち合わせている。どうやら、アルマーの過去を知り、電波宇宙の危機の原因やグランドアルマーの宝剣のありかを知っているようなのだが……。

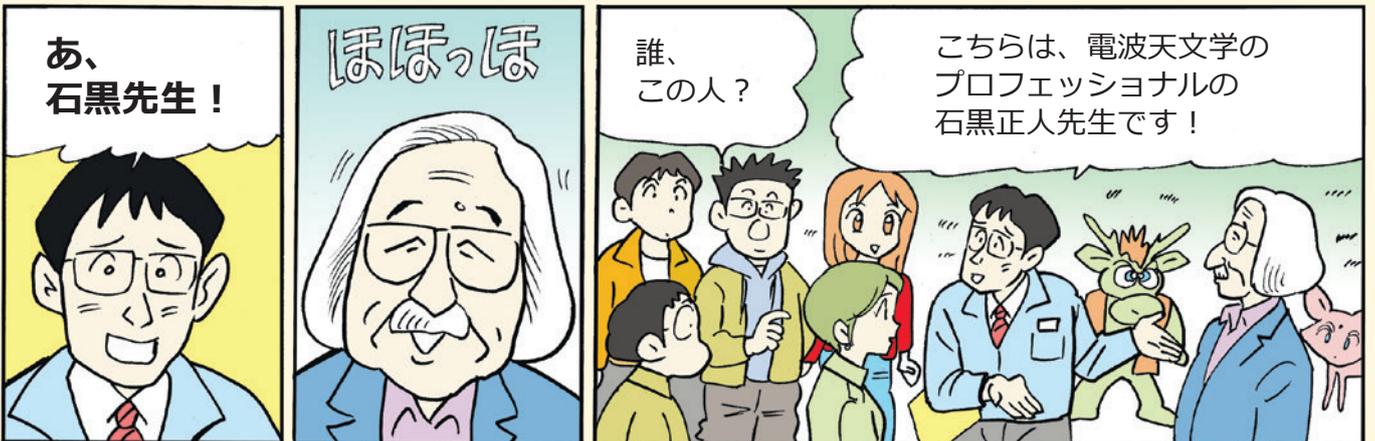
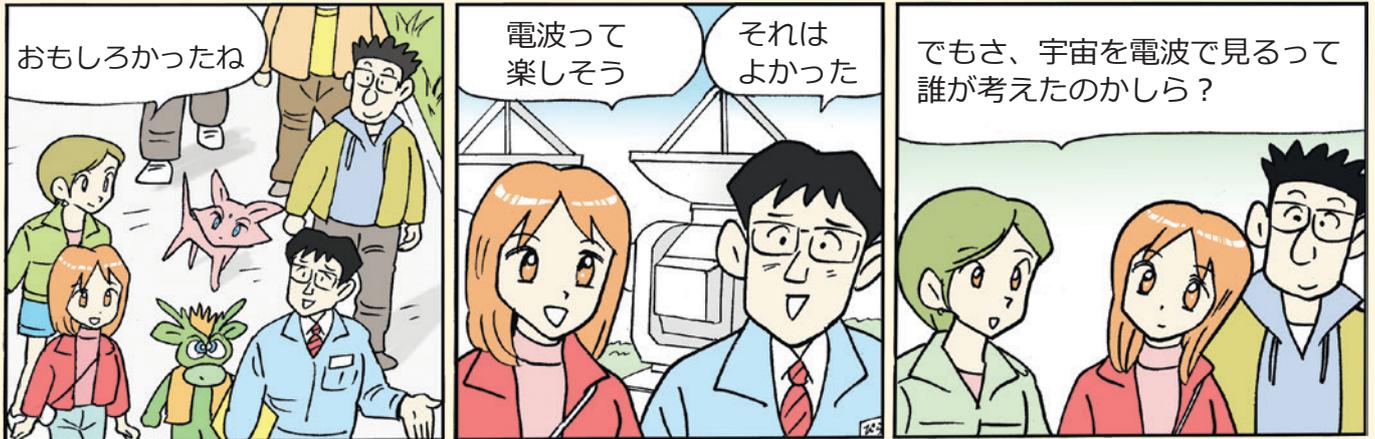
★前号・第04回「宇宙からの電波をキャッチ！その2・太陽電波編」までのあらすじ

中華ナベでBS放送を受信できた奈央たち蒼天高校天文部メンバー。さらに、野辺山宇宙電波観測所スタッフの協力で、中華ナベを使った太陽電波観測を体験できた。その直後、野辺山太陽電波観測所のヘリオグラフに異常発生。ブラックストーン博士の企みで、ケーブルが切断され、太陽画像の受信が不可能になってしまったのだ。しかし、いざよいの活躍で、無事に復旧することができた。奈央たちに付きまとうブラックストーン博士とは、いったい……？



電波観測のプロフェッショナル  
第5-1章 石黒先生登場の巻

太陽の電波画像が得られるヘリオグラフを見学した奈央たち。その帰り道に突然現れたのは？



## 電波が生まれるしくみ

これまで電波について、その性質や特徴を学んできましたが、そもそも電波はどのように発生するのでしょうか。

### ●電気と電場と磁場と電波

電波は光（可視光）より波長の長い電磁波の一種であるということは繰り返し紹介してきました（アルマーの冒険01～04回参照）。とはいえ、光のように眼に見えない電波は、昔からその存在が知られていたわけではありません。電波が発見されたのは、今からほんの130年ほど前の19世紀後半のことです。

電波の発見の歴史を参考に、私たちも簡単な実験で電波を作り出し、その存在を確かめてみましょう。電波を発生させるしくみは、いまではさまざまなものが知られていますが（p08参照）、もっとも単純なのは、電線に電流を流すという方法です。

中学校の理科の授業では、電線に方位磁石を近づけて電流を流すと、方位磁石の指針が動くという実験をします。電流が流れると「電場」によって「磁場」ができて、磁力が発生するというものです。「磁場」とは、磁石の周りに砂鉄が吸い寄せられるような力が働く空間を指します。こうした現象をもとに、電流とその周りにできる磁場の関係を表したのが「アンペールの法則」★01です。

また、電線を巻いたコイルの中に棒磁石を通して動かすと、コイルに電流が発生するという実験も理科の授業で習います。棒磁石の動きで「磁場」が変化すると「電場」ができて、電流が発生するという実験です。この現象は「ファラデーの電磁誘導」★02と呼ばれています。

ふたつの実験から「電場」と「磁場」が表裏一体の関係にあることがわかります。この関係をさらにくわしく調べ、伝わり方も含めて理論化されたのが「電磁波」という考え方なのです（図01・くわしくはp05を参照）。ですから、電磁波の一種の電波を作り出すためには、電流を流して電場・磁場を生み出せばよいことになります。

ラジオやテレビの送信所、スマートフォンなどでの通話送信では、電流をたいへん速い速度で流したり止めたりを繰り返す（高周波電流といいます★03）ことで、必要な電波をアンテナから発生させているのです。

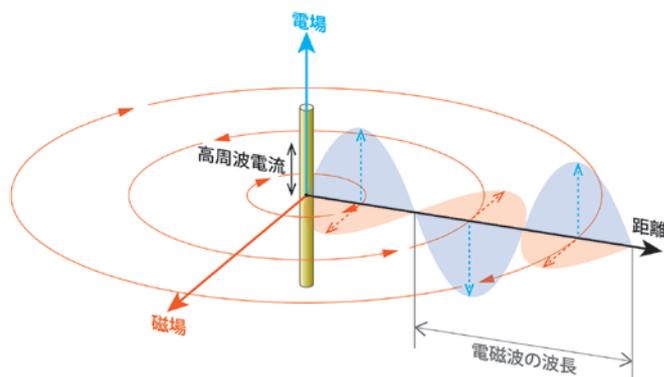


図01 電波は、電場と磁場の振動（時間的な変化）が波として伝わる現象です。電流を電線に周期的に流せば、磁場が継続的に変化するので、図のように磁場は電場を、また電場は磁場をそれぞれ直交方向に発生させながら、電波が空間を進んでいきます。

★01 アンдре-マリ・アンペール（Andre-Marie Ampere 1775年～1836年）は、フランスの物理学者であり数学者。アンペールの法則を発見しました。電子が発見される60年前に「磁気学的な現象は電気を帯びた数多くの微小粒子が導線のなかを移動することによるもの」と考えるなど、19世紀の物理学に大きな影響を与えた人物です。

★02 マイケル・ファラデー（Michael Faraday 1791年～1867年）は、イギリスの科学者であり物理学者。専門教育を受けていませんでしたが、持ち前の探究心と行動力で電気と磁気に関するさまざまな実験を行い、電磁誘導の法則などを発見したことで知られています。化学の分野でも大きな功績を残し、19世紀最大の科学者とたたえる人も少なくありません。

★03 現代の生活に欠かせないスマートフォンでは、周波数が1GHz（メガヘルツ）以上の電波を使っている機種も少なくありません。周波数とは、一定の時間内に繰り返す波の数のこと（アルマーの冒険03・03ページ参照）。電波ではHz（ヘルツ）と呼ばれる単位を使います。これは、1秒間当たりの波の数を示します。1GHzの電波を作るには、1秒間になんと10億回ものスイッチのオンオフを行うことで高周波電流を発生させる必要があります。もちろん、物理的にスイッチを操作してはととても間に合いませんので、電子回路によって高周波電流を発生させています。

### 石黒正人先生

ISHIGURO Masato

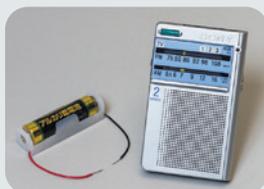
世界的に著名な電波天文学者である石黒正人先生。野辺山宇宙電波観測所の10mアンテナ6基によるミリ波干渉計の生みの親であり、電波干

渉計のプロフェッショナルです。日米欧の国際協力プロジェクトであるアルマ望遠鏡の構想・計画立案・建設では、日本側のプロジェクトリーダーを務めるなど、電波天文学の発展に尽力されています。現在は、国立天文台名誉教授として活躍されています。



## 実験その04 電波を作ってみよう！

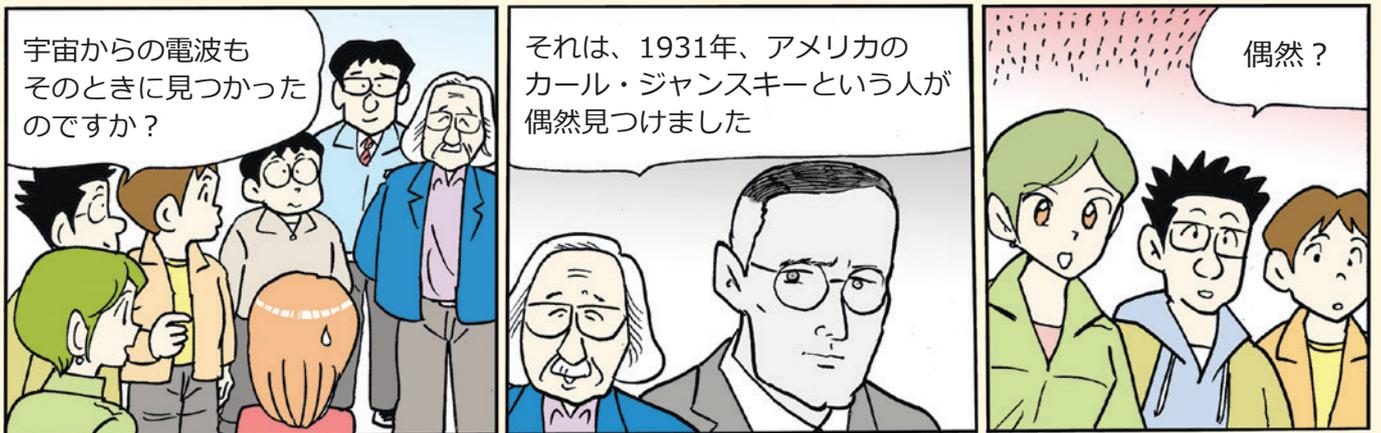
AMラジオの電源を入れて、放送のない周波数に合わせて、スピーカーから「サー」というノイズだけが聞こえるようにします。そしてその近くで乾電池（1.5ボルト）のプラス極とマイナス極にとりつけた2本の銅線の端を一瞬付けたり、離したりします。すると、その瞬間にラジオのスピーカーから「ガリッ」と音が出るでしょう。銅線が触れた瞬間、または離れた瞬間に、電流が流れたり止まったりして電場が変化し、電波が発せられるのです。



電池につないだ2本の銅線の端をつないだままだと、いわゆるショート（短絡）の状態になって、銅線や電池が発熱するので危険です。実験では、銅線の端をつなげるのは、一瞬にするように注意しましょう。

## 第5-2章 宇宙からの電波は偶然に～石黒先生特別講座・その1～

納得光線不要の石黒先生。電波の発見と宇宙からやってくる電波についての特別講義が始まるよ。



★01 納得光線とは？  
いざよいが放つ不思議な光線。浴びるといざよいやアルマの存在を何の疑問も持たずに受け入れてしまうという効果がある。

# 電波の発見と宇宙からの電波

電波は19世紀の科学者によって存在が予言され、実験によって確認されました。さらに宇宙からも…。

## ●電波の存在を予測したマクスウェル

実際に電波が発見される以前、電波の存在を予測した人がいました。イギリスの理論物理学者のジェームズ・クラーク・マクスウェル (図02) です。それまでに知られていたマイケル・ファラデーの電磁場理論 (03ページ参照) をもとに、1864年にマクスウェルの方程式を導きだしました。

$$\text{div}\vec{D} = \rho$$

・電荷 (密度) ( $\rho$ ) が存在したとき、発散 (div) するように電場 (電束密度) ( $D$ ) が生まれる

$$\text{rot}\vec{E} + \partial\vec{B}/\partial t = 0$$

・磁束密度 ( $B$ ) の時間的変化 ( $\partial t$ ) が、右ねじと反対方向 ( $-\text{rot}$ ) に電場 ( $E$ ) を生む

$$\text{div}\vec{B} = 0$$

・磁荷というものはない (磁束密度 ( $B$ ) は、発散 (div) しない (0))

$$\text{rot}\vec{H} - \partial\vec{D}/\partial t = \vec{j}$$

・電流 ( $j$ ) と、電場 (電束密度) ( $D$ ) の時間的変化 ( $\partial t$ ) が、右ねじの方向 ( $\text{rot}$ ) に磁場 ( $H$ ) を生む

$E$  電場  $H$  磁場  $D$  電束密度  $B$  磁束密度

見るからに難しい4つの式ですが、このマクスウェルの方程式は、電場や磁場の振る舞いのすべてを表すことが可能なのです。この方程式から、光も電磁波であり、他にも同じような電磁波、すなわち電波の存在を理論的に予想したのです。



図02 ジェームズ・クラーク・マクスウェル (James Clerk Maxwell 1831年~1879年) はイギリスの物理学者。マイケル・ファラデーの電磁誘導をもとに、マクスウェルの方程式を導いて古典電磁気学を確立しました。土星の観測でも知られています。(図: NRAO/AUI/NSF)

## ●電波を発見したヘルツ

1890年頃、カールスルーエ工科大学 (ドイツ・ベルリン) の物理学教授だったハインリヒ・ルドルフ・ヘルツ (図03) は、自宅の実験室で電波の存在を初めて実証しました。

ヘルツは、電気を空気中に放電させて火花を発生させる装置を送信機としました。また、1本の銅線を受信機としました。受信機とした銅線は、その一端ともう一端をわずかに隙間 (ギャップ) を空けて固定しました。そして、送信機側で放電による火花を発生させると、受信機側の銅線のわずかな隙間にも火花が発生することを確認しました。これは、送信機で電波が発生し、送信機と受信機間の空間を飛び越え、受信機の銅線に電波が到達し、銅線に電気が流れることで銅線の隙間にも火花が飛んだ、というわけです。

その後、電波の送受信の技術が確立して、無線電信 (トン・ツーのモールス信号) や音声を伝えるラジオが開発されていきます。また、人工的なものではなく、自然界からもさまざまな電波 (その多くはまとめてノイズとして受信されます★04) が生み出されていることもわかってきました。



図03 ハインリヒ・ルドルフ・ヘルツ (Heinrich Rudolf Hertz 1857年~1894年) はドイツの物理学者で、マックスウェルが予言した電磁波の存在を実験によって初めて証明しました。アンテナの開発や気象学にも興味を持ち、新型の湿度計などを考案しています。病気のため36歳の若さで亡くなりました。(図: NRAO/AUI/NSF)

## ●そして、宇宙からの電波を発見したカール・ジャンスキー

電波を使った無線電話が普及し始め、1930年代の初めには、大西洋をはさんでの通話が実用化されました。電話会社はより良質なサービスのために、通信の邪魔になるノイズの状況を調べようと観測を始めました。

アメリカのベル研究所で技術者をしていたカール・G・ジャンスキー (図04) は、1931年、観測中に奇妙なノイズ (雑音) があることに気が付きました。それは、「ヒス」と呼ばれるノイズで、もともと受信機から生まれる連続したノイズとあまり変わらないものでした。

そこで、彼は1932年1月から、20.5MHzの周波数でヒスノイズの観測を始めます。アンテナは大型の高感度な短波用で、円形レールに載せられていて、水平方向に360度回転させることができます (図05)。このアンテナを1回転させながら観測すると、ある方向でノイズがいちばん大きくなって、ピークを示すことがわかりました。しかも、その方向は時間とともに動いていったのです。



図04 カール・ジャンスキー (Karl Jansky 1905年~1950年) は、アメリカの物理学者であり、民間企業の無線技術者。1931年に空の一角からの電波がやってきていることに気がつき、それが天の川の中心方向からの電波であることを発見しました。現代の電波天文学で用いられる電波強度の単位であるジャンスキー (Jy) は、彼の名まえにちなんだものです。(図: NRAO/AUI/NSF)

この時、ちょうど太陽と同じ方向で、ノイズがいちばん大きなピークとなったことから、ジャンスキーは太陽の光によって、大気中で電波が発生しているのではないかと考えました。ところが、日を追うごとに、ノイズがピークとなる方向が太陽のある方向よりも西寄りに先行し始めたのです。ジャンスキーは根気よく観測を続け、1年後には再びノイズのピークとなる方向が太陽の方向と一致することを確認しました。

こうしたことから、ジャンスキーはノイズの原因が地球の外の一方向から常にやってきている電波だと結論づけました。問題はどこからやってきているのかです。ジャンスキーは、天の川銀河の中心方向と仮定するとノイズのピーク方向の動きに合致することに気づきました。偶然にも、宇宙からやってくる電波が見つかったのです。

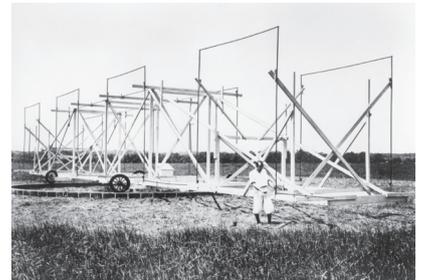


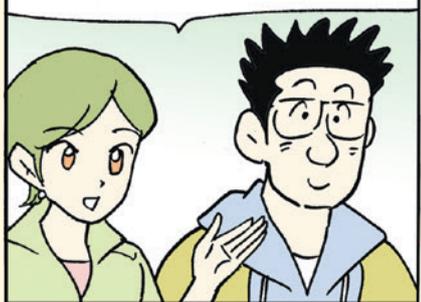
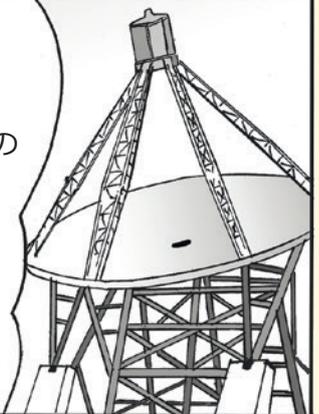
図05 宇宙からの電波を発見したジャンスキーのアンテナ。(図: NRAO/AUI/NSF)

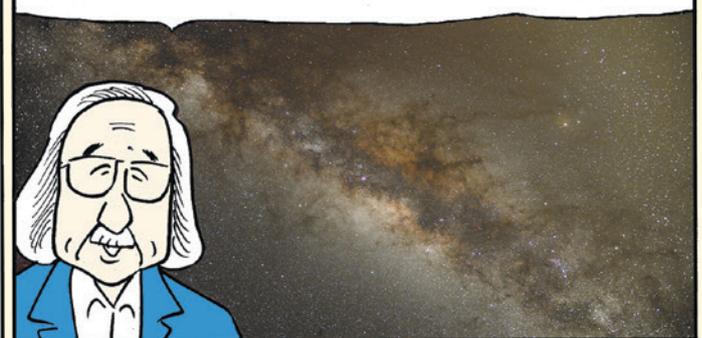
★04 人類が目的を持って利用したい人工的な電波以外はすべてノイズですが、天体からの電波を観測する天文学者にとっては人工的な電波や観測対象以外からやってくる電波がノイズとなります。天体からの電波はとても微弱なので、たくさんのノイズの中から目的の電波を確実に信号として取り出して観測するためには、さまざまな創意工夫や蓄積されてきたノウハウが必要になります。

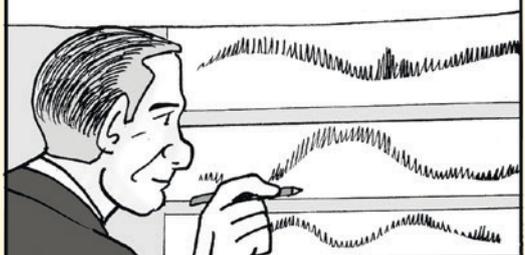
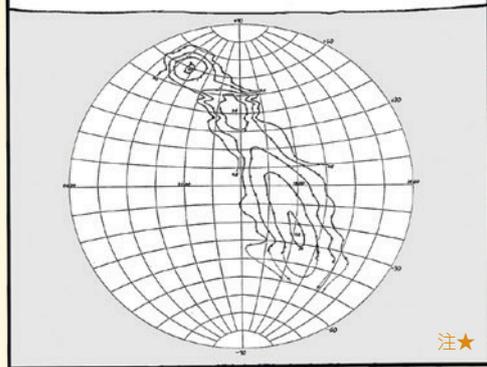
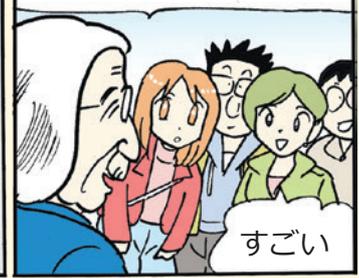
★03 天球は地球の自転による日周運動で、24時間よりも4分ほど短い約23時間56分 (恒星時) で1回転しています。この周期的変化が観測されたことから、ノイズは地球上、すなわち宇宙から来ているといえるのです。

第5-3章 電波天文学のはじまり～石黒先生特別講座の巻・その2～

はじめて捉えられたのは天の川銀河からの電波。そんな話をする石黒先生が奈央にはダブって見えた!?

<p>ジャンスキーが電波観測を始めたんですか？</p> 	<p>天文観測に利用したのはアメリカの電気技術者だったグロート・リーバーです</p> 	<p>リーバーは自宅の庭に直径9.4mのパラボラアンテナを作って観測をしました</p> 
---	--	---

<p>すごい</p> <p>電波界のガリレオだ</p> 	<p>どんな観測をしたのです？</p> 	<p>ジャンスキーが見つけたのは、実は天の川銀河から来ていた電波だったのです</p> 
--	--	--

<p>リーバーはそれを確かめるために空のあらゆる方向の電波を測り、1944年、天の川銀河の電波強度分布図を描いたのです</p> 	<p>こんな電波宇宙地図が得られました</p> 	<p>天の川銀河にさまざまな強さの電波源があることがわかったのです</p>  <p>すごい</p>
---	--	--

<p>そんな電波望遠鏡ってぼくらでも作れますか？</p> 	<p>もちろんですよ</p> <p>ほほっほ</p> 	<p>ええ？ 石黒先生がなんだかダブって見えるわ</p> 	<p>奈央まさかおまえ</p> <p>なんなの？</p> 
--	--	---	--

## 電波天文学の幕開け

ジャンスキーの発見の重要性に気づいたのは、電波になじみのない天文学者ではなく、ひとりの電波技師でした。

### ●初めて電波で天体観測を行ったリーバー

宇宙から電波が届いているというジャンスキーの大発見。しかし、当時の天文学者はあまり興味を示しませんでした。それまで光（可視光）による観測しか行ったことのない天文学者にとって、電波は未知の領域で、どうしてよいのかわからなかったのでしょう。

そこに登場したのが電波技師をしていたグロート・リーバー（図06左）です。彼は、イリノイ州ホイトンにある自宅の裏庭に直径約9.4mものパラボラアンテナを自作して（図06右）、宇宙からの電波の観測を始めたのです。史上初の電波望遠鏡の誕生です。1937年のことでした。リーバーはジャンスキーの発見を知り、天文学者たちに電波による観測を進言しましたが、残念ながらよい返事はもらえなかったようです。そこで、自分で観測しようと電波望遠鏡を作り上げたのです。

リーバーの電波望遠鏡の基本的な構造は、木材で作られていました。もちろん、パラボラのアンテナ面は電波をよく反射する金属製です。アンテナを向ける高度は変えられましたが、全体を水平に回転することはできませんでした。しかし、地球が自転していることから、観測対象が日周運動で動いて行くので、アンテナの向きを上下に動かすことができれば、空のほとんどを観測可能です。受信機を作るのは、電波技師のリーバーにとって、それほどむずかしいものではなかったでしょう。真空管などを使った受信機も作り上げたといえます。

しかし、すぐには宇宙からの電波を捉えることができませんでした。電波には、いくつかの発生原因があります（P8参照）が、リーバーは電波の発生原因を熱によるものと考えました。熱では、周波数が高いほど電波が強くなる傾向が知られていました。そこでリーバーは、ジャンスキーが観測に使った20.5 MHzよりもさらに高い3300 MHzという周波数で観測を開始しました。ところが、予想に反して、なかなか電波を受信できません。そこで、リーバーは周波数を低くしながら観測を行い、ようやく160 MHzという周波数で電波を捉えることができました。1939年のことです。

その後もリーバーは観測を続け、宇宙の電波地図ともいえる電波の強度分布図を描き上げました（図07）。そこには、天の川銀河に沿って電波の強い場所が連なり、ジャンスキーが予想した通り、銀河中心が最も電波が強くなっていました。こうして、銀河電波の存在が明らかになり、電波天文学の歴史が始まったのです。

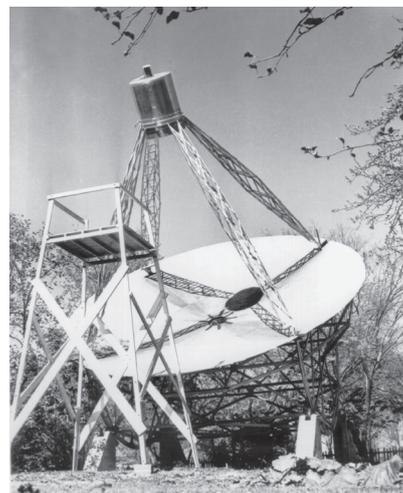


図06 グロート・リーバー（Grote Reber 1911年～2002年）は、アメリカの電波技術者。電波望遠鏡（右）を自作して継続的な天体観測を行いました。多くの電波源を発見し、天球の電波強度図を作成するなど、電波天文学の先駆者となりました。ちなみに、宇宙膨張を発見したエドウィン・ハッブルとリーバーは高校の同窓生で、ハッブルに理科を教えたのはリーバーの母親でした。（図：NRAO/AUI/NSF）

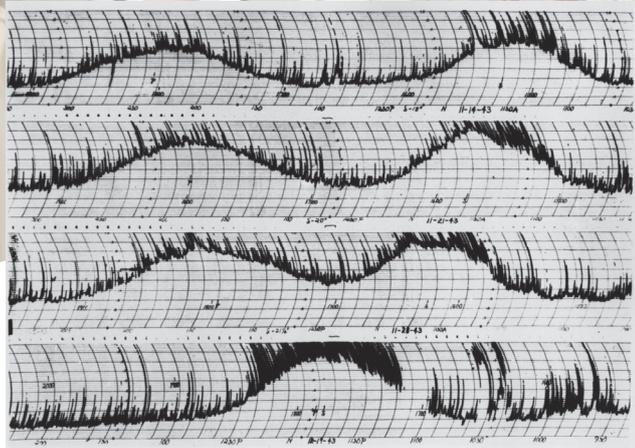


図07 リーバーが記録した宇宙電波のチャート（注★）。リーバーはアンテナを地面に固定して観測していたので、時間（すなわち地球の自転＝横軸）が進むとともに、宇宙からの電波の強度変化がとらえられます。チャートのなだらかなピーク（山型）を作っているのが、天の川と太陽からの電波です。細かいイシジ状の線は、自動車のエンジンによるノイズです。

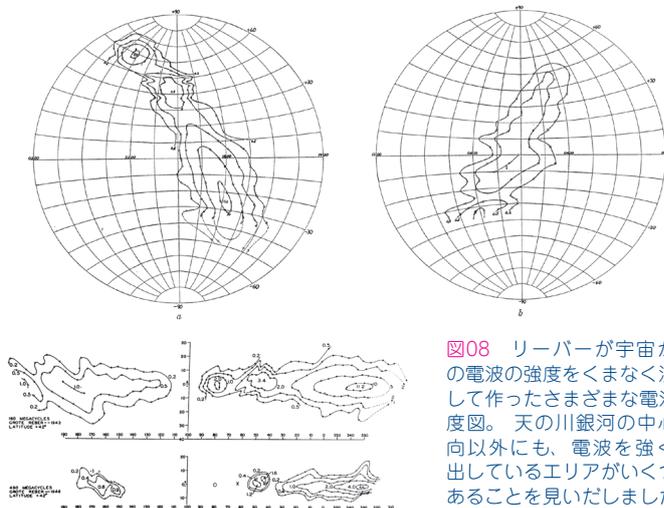


図08 リーバーが宇宙からの電波の強度をくまなく測定して作ったさまざまな電波強度図。天の川銀河の中心方向以外にも、電波を強く放出しているエリアがいくつもあることを見いだしました。それらは後に系外銀河や超新星残骸であることがわかりました。（図上：注★、図左：NRAO/AUI/NSF）

注★：Grote Reber "Cosmic Static", *The Astrophysical Journal*, 100, 279 (11/1944) より引用

## 宇宙から届く電波には さまざまなものがあるよ！



実験04「電波を作ってみよう」でもわかるように、人工的な電波は電流を流す（電子を移動させる）ことで簡単に作ることができます。それでは自然界では、どのような電波の発生原因があるのでしょうか。身近な自然現象としては、雷があります。雷は大規模な静電気の放電（電子が移動する）なので、AMラジオを聞いていると稲光と同時に「ガリッ」というノイズが入るのがわかります。純粋な自然界というわけではありませんが、冬場の乾燥している場所で服を脱ぐときなどに発生する静電気でも、光と音を伴う「パチパチ」という小さな放電と同時に電波も発生しています。いずれも電流が流れることで発生する電波です。こうした電流による発生以外にも、宇宙ではさまざまな電波の発生原因があります。現在の電波天文学で観測されている天体からの電波は、発生のしくみの違いによって、①熱的放射、②シンクロトロン放射、③原子や分子のスペクトル線の3つが知られています。

### ①熱的放射（左下画像）

温度のある物体は電磁波を放ちます。物体の温度が高いほどその放射は強くなります。私たちの体からも、地球からも、遙か彼方の天体やガスからも、その温度に応じた電波が出ているのです。熱的に安定になった状態（熱平衡状態）にある物体からの放射を「熱的放射」と呼び、理想的な物体（黒体）からの

放射を「黒体放射」と呼びます。また空間を飛ぶ電子が荷電粒子の電磁気力によって曲げられたときに出る放射を「制動放射（自由-自由放射）」と呼びます。電子の運動（熱）によって放射が変わるため、これも熱放射に含まれます。

### ②シンクロトロン放射（中下画像）

相対論的な速度（光速に近い速度）で飛ぶ電子が磁場によって曲げられる際に出る放射を「シンクロトロン放射」と呼びます。熱とは関係ない電波なので、非熱的電波とも呼ばれます。ジャンスキーやリーバーが受信した電波もシンクロトロン放射によるものです。宇宙空間には磁場が存在し様々な作用を及ぼしているため、シンクロトロン放射の観測は宇宙磁場の理解にとっても重要な役目を果たします。

### ③原子・分子のスペクトル線（右下画像）

熱的放射やシンクロトロン放射は幅広い周波数帯域にわたって電磁波を放ちますが、特定の周波数のみで出る放射を「スペクトル線」と呼びます。原子や分子、それに含まれる電子が何らかの理由でエネルギーを失うとき、そのエネルギーに対応する周波数で放射が発生します。エネルギー差が大きいほどその周波数は高くなります。このエネルギー差は原子や分子の種類によって決まっているので、特定の周波数の電波を受信した場合、そこに存在している物質の組成やエネルギーの状態を知ることができます。

「アルマーの冒険」05回

発行日／2015年9月1日

発行／国立天文台天文情報センター出版室

制作協力／野辺山宇宙電波観測所

★「アルマーの冒険」バックナンバーは  
<http://www.nao.ac.jp/naoj-news/almar/> をご覧ください。



①熱的放射で観測された天体の例：アルマ望遠鏡で観測した「おうし座HL星の原始惑星系円盤」。塵が放つ熱的放射を捉えた。[ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)]



②シンクロトロン放射で観測された天体の例：ヘルクレスA。銀河の中心から放たれたジェットからの放射が捉えられている。[NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)]



③原子・分子のスペクトルで観測された天体の例：野辺山45m電波望遠鏡で観測したオリオン大星雲周辺。一酸化炭素分子が放つ電波を観測している。