

解説

詳報：2002年度ノーベル物理学賞

X線の巻

福江 純（大阪教育大学）

前回のパートI<ニュートリノ天文学>に引き続き、パートII<X線天文学>に関して、スウェーデン王立科学アカデミーの公式的な詳報 (<http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/phyadv02.pdf>) を訳出する。なお、X線についての補足説明は付録につけた。また [] 内は訳注である。

Advanced information on the Nobel Prize in Physics 2002, 8 October 2002



KUNGL.
VETENSKAPSAKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Information Department, P.O. Box 50005, SE-104 05 Stockholm, Sweden
Phone: +46 8 673 95 00, Fax: +46 8 15 56 70, E-mail: info@kva.se, Website: www.kva.se

図0 スウェーデン王立科学アカデミー

パートII X線天文学

1 物理的背景

最初のノーベル物理学賞は1901年にヴィルヘルム・レントゲン (Wilhelm Rontgen) に与えられた。受賞理由は彼がその6年前に(後年、彼の名前が付けられる)“特殊光線”を発見したことだ。彼は陰極管の実験中に特殊光線を発見したのだが、その光線を“X線”と呼んだ。この発見は物理分野と医療分野の研究の奔流をもたらした。すぐに関心をもった物理学者は、アーノルド・ゾンマーフェルト (Arnold Sommerfeld)、J.J. トムソン (J.J. Thomson)、チャールズ・バークラ (Charles Barkla) たちだった。マックス・フォン・ラウエ (Max von Laue) はX線回折を導く提案を1912年に行い、それは彼に1914年のノーベル賞をもたらした。ブラッグ父子 (W. and L. Bragg) はX線回折の研究を行った翌年にノーベル賞を取った。バークラはX線散乱の研究に対して1917年のノーベル賞受賞者となっ

た。マンネ・シーグバーン (Manne Siegbahn) はX線分光器を開発して1924年にノーベル賞を得た。X線天文学が展開する50年以上も前には、[X線物理学において]このような集中的な発展があったのである。

X線天文学の創始が遅れた第一の理由は、宇宙から飛来したX線が地球の大気によって効率よく吸収されてしまうためだ。[大気中の窒素や酸素の原子核によって吸収される]比較的強度の強い宇宙X線だと思われる3keV付近のエネルギーの軟X線を観測するためには、頭の上に乗った空気の量が地上のたった100万分の1ぐらいになる高度まで検出器をもっていかなければならない。そのためには最低でも地上80kmまで飛んでいくロケットが必要だ。もっとエネルギーの高いX線は大気中深くまで貫通する。たとえば30keVのエネルギーの硬X線だと約35kmの高度まで侵入するので、高高度バルーンの実

験でも対応できる。

X線天文学が遅れた第二の理由は、初期のX線検出器では到来方向の情報を得ることが難しかったからだ。X線の屈折は非常に弱くて、屈折率はほとんど1に近いので、実際、レントゲンは屈折率を測定できなかった。そして1920年代になって、ラーソン (A. Larsson)、ウォラー (I. Waller)、シーグバーンらがはじめて、X線もたしかに屈折することを証明し、屈折率が1よりもほんのわずかだけ小さいことを測定したのである。この事実は光学的な解法を示唆した。すなわち、入射角を回折角に近づけたときに到達する全反射による方法だ。X線で結像する光学系の製作は非常に難しい問題だが、前世紀の中葉にはじめてX線顕微鏡が製作された (H.A. Kirkpatrick, A.V. Baez and H. Wolter)。

2 X線天文学のパイオニア時代

(1949年—1970年)

第二次世界大戦後にアメリカに搬送されたドイツのV2ロケットによって、宇宙からのX線を研究する可能性が開かれた。1949年に米海軍研究所NRLのハーバート・フリードマン (Herbert Friedman) たちのグループは、ロケットに積んだガイガーカウンターを使って、太陽からのX線を検出した (Friedman et al. 1951)。しかしながらX線放射によってもっと遠い天体を研究する機会はありませんと思われた。というのも、もっとも近い星のX線を検出するためには、その星が太陽と同じくらいのX線を放射しているとして、1960年前後に手に入った検出器の10万倍もの感度が必要だと思われたからだ。というわけで、当時は太陽の研究に精力が傾けられたのである。

このころの初期の原始的な“X線望遠鏡”の開口角は、単純なコリメータマスクによって決められた。角分解能を上げるための興味深い試みの一つとして、NRLのチームは1958年

の日食で、太陽面を横切る月の進行の間の一連のロケットを打ち上げた。このような方法によって彼らは、太陽からのX線放射が黒点周辺の狭い領域と広がった太陽コロナから発していることを突き止めたのだ。その2年後にチュブ (T.A. Chubb) は、単純なピンホールカメラの原理を用いて太陽のX線写真を撮影した。もっともその写真は、ロケットの自転のためにかなりピンボケだったが。

1959年、弱冠28歳のクリカルド・ジャコーニ (Riccardo Giacconi) は、アメリカン・サイエンス・エンジニアリング社 (AS&E) に就職した。この会社は主にMITの若い科学者たちに国防省やNASAからの仕事を委託していた。MITの著名な宇宙線物理学者であったブルーノ・ロッシ (Bruno Rossi) はAS&E社の筆頭顧問だった。彼はNASAを補佐するために全米科学アカデミーが立ち上げた、宇宙科学研究の戦略を策定する委員会で働いていた。ジャコーニはAS&E社において、X線天文学のプログラムを進展させる仕事で宇宙科学に責任を負ったのであった。

ジャコーニとロッシは1960年の先駆的な論文で、X線顕微鏡のデザインに関する初期の仕事に触発されて、X線望遠鏡を製作する可能性について議論した。彼らは共通光軸をもった放物面鏡の光学系を提案した。そのような光学系では、光軸に平行に入射したX線は、放物面の内側ですれすれに反射して焦点に集められるのだ。これらのアイデアは後にジャコーニたちによって発展させられ実行に移す試みがなされた。しかしながら、ジャコーニの最初の観測は、もっと単純な装置によって行われた。

ジャコーニたちのグループができて数年後、彼らは最初の太陽系外X線源を発見した (Giacconi et al. 1962)。彼らはエアロビーロケットに積んだ3個のガイガー計数管を使った (図7)。研究の主目的は、太陽X線によって生じた月面からの蛍光X線を見つけること

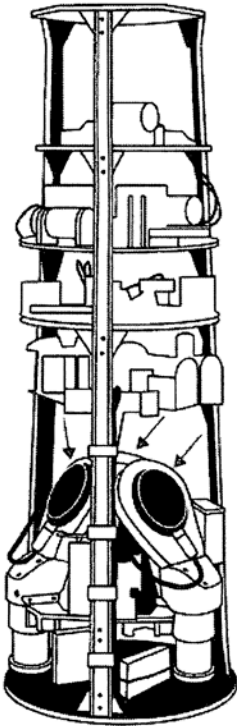


図7 エアロビーロケットに搭載されたX線観測装置。ジャコーニのグループが1962年の6月に打ち上げたこの実験装置によって、太陽系外で最初のX線源が記録された。3つのガイガーカウンターが矢印で示されている。

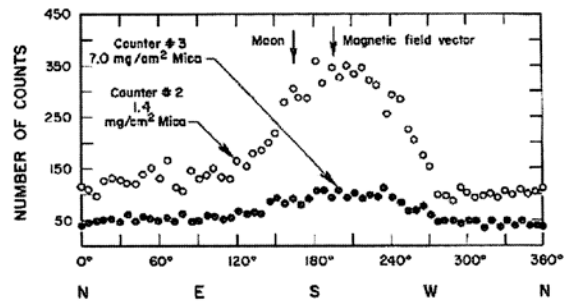


図8 図7の装置のガイガーカウンターで得られた計数記録。雲母でできた窓の厚味が異なる2種類のガイガーカウンターの計測数が示されている。その結果からは、月とは違うX線源の存在がわかる。また宇宙X線背景放射の存在も示唆される。

だった。ただし、ロケットが自転して検出器が天空を走査するために、太陽系外のX線源を探査することも可能になったのだ。2度の失敗の後に1962年の6月18日に実験は成功し、検出器には毎秒100個もの光子が入射するほど強くて新しいX線源が見つかったのだ(図8)。機械的なコリメータはなかったので到来方向の情報は貧弱だった。したがってX線源はいかなる既知の天体とも同定できなかった。後になって、さそり座X-1(Scorpius X-1)と命名されたのである。さらに一様で広がったX線背景放射が発見された。まもなくグループはさらに2つのX線源を発見した。そのうちの1つは、NRLのチームが月の掩蔽を用いて、かに星雲に同定した。かに星雲というのは、1054年に中国の天文学者が観測した有名な超新星残骸である。

太陽系の彼方でX線源を検出する見通しに関しては、以前は悲観的だった。この見通しは、既知の恒星に関して、可視領域の放射に比べてX線領域での放射の比率が非常に小さいという見積もりに基づいていた。ところが

実際に発見されたさそり座X-1は、可視光に比べてX線で数千倍も多くエネルギーを放射しており、まったく新しくかつ予想もしなかったX線源だったのだ。さらにかに星雲にいたっては、太陽に比べて数百億倍も大量のX線を放射していることが見出されたのである。

これらの発見はX線天文学という分野の扉を開き、そこへ強烈な関心を引き起こした。技術の進歩もあって、ガイガーカウンターは比例計数管に置き換わった。後者の受光器は数分角よりもよい角分解能をもたらしたのだ。さらにまた望遠鏡がX線源の方向を向き続けるとができるようにロケットの安定性も改善され、その結果、感度も大幅に改良された。そしていまやAS&Eのグループはさそり座X-1の位置を絞り込むことができるようになり、ついに13等級の星と同定できた(Gursky et al. 1966)。別の新しいX線源、はくちょう座X-1も位置が突き止められた(Giacconi et al. 1967)。その後の4年の間で、ロケットとバルーンの実験により、50個ほどの新しいX線源が発見された。1965年にはNRLのグループによって、おとめ座銀河団の活動的な楕円銀河M67の中に、最初の銀河系外X線源も発見された。かにパルサーからは、可視光と同じ周期(毎秒30ヘルツ)のX線パル

スが検出されるという画期的な発見もあった。

X線源の探査と平行して、ジャコーニたちは検出技法も発展させた。1960年代初期から暖められていたX線望遠鏡のアイデアは、ロケット実験で試行され (Giacconi et al. 1965)、スカイラブに搭載された装置でさらに改良されて、後にアインシュタイン衛星へ受け継がれた。X線の天界を撮像するためには、撮像光学系の実行は何にもまして重要な階梯だった。ジャコーニは撮像光学系の発展にとって大きな牽引力を示した。

3 衛星時代 (1970 年以降)

X線のロケット観測では毎回数分間の観測時間しか許されないのが、感度には大きな制限があった。バルーン実験はもっと長く観測できるが、高度が低いため20keVより高いエネルギーにはしか有効ではなく、多くのX線源は受からなかった。ジャコーニは1963年にはX線探査を行うためにX線衛星を提案していた。その後、ジャコーニやAS&Eのグループによってそのような衛星が開発され、そして1970年の10月12日にケニアから打ち上げられたのだ。その衛星は、[打ち上げ日がケニアの独立記念日だったことから]、スワヒリ語で自由を表す「ウフルUHURU」と命名された。スピンで安定化された衛星には、合計で840平方cmもの開口面積をもつ2組の比例計数管が搭載された。この衛星ははじめてX線で全天走査を行った。限界強度はかに星雲の1000分の1で、特定領域に限られていたロケット実験に対して10倍ほど弱いだけだった (Giacconi et al. 1971)。検出されたX線源の数は一挙に339個に増加した (Giacconi et al. 1972)。毎週毎週、軌道上のウフルは、それまでのすべての実験で集められたよりも多くのデータを吐き出した。もっとも予期せざる出来事は、コンパクト星をもった非常に多くのX線連星が発見されたことだ。これらの新し

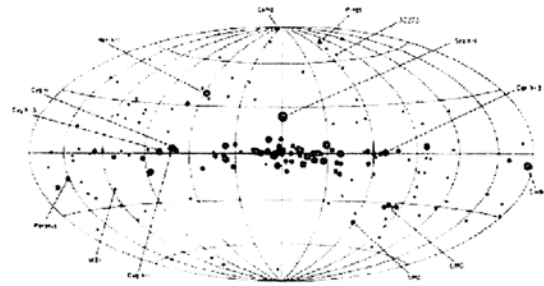


図9 UHURUのデータにもとづく3Uカタログから得られた、銀河座標で表したX線源の分布。UHURUのデータ精度はあまりよくないので、それぞれのX線源の位置は近似的なものである。また黒マルの大きさはX線強度の対数に比例している。天体物理学上とくに興味深いX線源がいくつかマークされている。

いデータにもとづいて、引き続き数年の間に、ジャコーニたちは膨大な数の論文を出版した。もっとも重要な論文の中には、高温の超巨星のまわりを回る高速回転している中性子星、ケンタウルスX-1、に関する論文もあった。超巨星の外層大気が中性子星の重力に引っ張られて高速に加速され、中性子星の表面に達して減速してX線の領域で制動放射を出しているのである。さそり座X-1も同種の天体であることが判明した。不可思議なX線源はくちょう座X-1は、0.1秒よりも短いランダム的な時間スケールで急激に変動し、もっと短い数ミリ秒の時間で爆発現象を示す (Oda et al. 1971)。ジャコーニたちによる他の重要な発見は、遠方の銀河団もまた強いX線源であるということだった (Gursky et al. 1972)。

ウフルの発見 (図9) に続いて精力的な活動がいまや開始された。異なった諸団体によって9つの新しいX線衛星が開発され打ち上げられた。はくちょう座X-1には多大な関心が向けられた。というのも、はくちょう座X-1は太陽の10倍くらいの質量をもつコンパクト天体を有しており、それはまず間違いなくブラックホールだろうと考えられているからだ。新しい発見も多数あった。たとえば、球

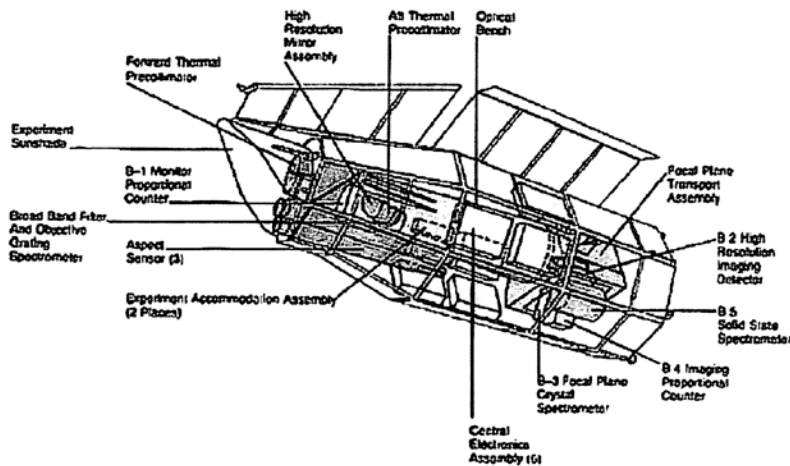


図10 アインシュタイン天文台の構造。全長はおよそ5mだった。

状星団NGC6624で起こった激しい突然のX線バースト（爆発）現象は、星団の中に含まれる中性子星の表面での爆発的な核融合反応を意味していた。また電波銀河ケンタウルス座AからのX線放射の急激な変動は、銀河中心核の驚くほど小さい領域からの強い放射を示していた。

1977年から1978年にかけてNASAは2つの新しくとても重要なX線衛星を打ち上げた。HEAO (High Energy Astrophysical Observatory) の1号機と2号機だ。HEAO-1は新しくより感度の高い走査を行える装置だったが、フリードマンとNRLのグループが主導的な役割を果たした。HEAO-1の探査では842個のX線源が発見されたが、角分解能が十分によかったため、それらの多くは光学的な天体と同定された。さらにHEAO-2は、打ち上げが成功した後に“アインシュタインX線天文台”（図10）と命名されたが、広視野で2秒角もの角分解能をもった撮像型X線望遠鏡を搭載していたのだ。AS&Eのジャコーニが主任研究者でアインシュタイン天文台の台長でもあった。装置の製作も調整も検査もすべて彼の采配のもとで行われた。このプロジェクトがNASAの天文学探査委員会で勧告されたのは1965年だったが、1978年になってこれらの計画はとうとう実現したのである。

アインシュタインX線天文台には、X線を集光し結像する望遠鏡に加え、効率のよいカメラと感度の高い分光器も搭載され、その結果、高い波長分解能を与えた。これらの機器のいくつかの主要部分は、アインシュタイン天文台のためにわざわざ開発されたものである。

初期の実験装置に比べて性能がきわめて改善されたことにより、アインシュタインの探査は大成功だった。X線点源の観測に対する装置の感度は、ウフルの装置の1000倍も良好だった。アインシュタイン天文台で観測されたもっとも微かな天体は、遠方のキューサーだったが、そこからのX線は、毎秒単位面積あたりにたった0.00003個のX線光子が記録されるだけなのだ。ジャコーニはいまではさそり座X-1よりも100万倍も弱いX線源さえ観測できた。そのさそり座X-1こそは、20年前にX線天文学者としての彼の経歴の出発点を印したもののなのだ。

アインシュタイン天文台からはとてつもない量の成果があがった。それらは観測時間の割り当てをもらったゲスト観測者のプロジェクトで実施されたものだった。既知のX線源に対しては非常に詳しい精査が行われたし、通常の恒星大気のような弱いX線源に対しても研究がなされた。高い分解能のおかげで、

超新星残骸のような広がったX線源について細かいX線分布図を作ることが可能になった。X線のスペクトルは超新星残骸には爆発した星によって生成された重元素が大量に含まれていることを示した。ジャコーニたちのグループが出版した数々の発見の中には以下のようなものがあった。たとえば、晩期型星からもX線が放射されており、しかもX線は星の自転と外層大気での対流と強い相関があったのだ (Vaiana et al. 1981)。またアンドロメダ銀河にも点状のX線源が見つかった (van Speybroek et al. 1979)。さらに近傍の電波銀河の中心からはX線のジェットが噴出していた (Feigelson et al. 1981; Schreier et al. 1982)。キューサーがX線を放射していることや、それら遠方のX線源が広がったX線背景放射に多大な寄与をしていることも詳らかになった (Giacconi et al. 1979b)。

アインシュタイン天文台がまだ現役で頑張っていた1976年、ジャコーニとタナンバウム (Harvey Tananbaum) は新しいX線望遠鏡 - AXAF を NASA に提案した。NASA によって科学作業部会が立ち上げられ、X線天文学での主導的立場を離れ他の重要な仕事へ移る1981年まで、ジャコーニがその作業部会の委員長を務めた。その望遠鏡はアインシュタイン望遠鏡よりもさらに進歩したもので、角分解能は0.5秒角にもおよび、実に可視光の観測で得られるものに匹敵するまでになった。感度もアインシュタインより大幅に上がり、CCD検出器やマイクロチャンネル撮像装置や分光器などを取り付けた数連のカメラが搭載された。NASAの財政事情のために遅れに遅れた末、新しいX線望遠鏡は1999年7月について打ち上げられ、チャンドラセカール (S. Chandrasekhar) にちなんで、チャンドラ衛星 (Chandra) と命名された。チャンドラ衛星は新しい成果をどんどん生み出しつつある (図11)。

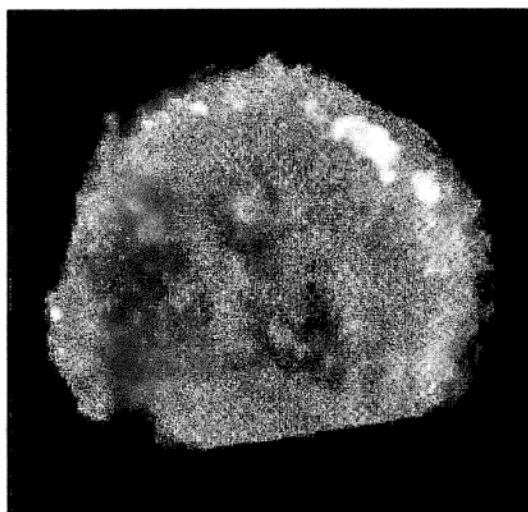


図11 爆発した星である超新星の残骸。図はカシオペア座の超新星残骸で、チョコ・ブラーエが1572年にヘレバドスクロスター観測所で発見し詳細に記録したもの。超新星は地球から7500光年の距離にあって、20光年の広がりをもっている。この画像はチャンドラ衛星がX線領域で観測したものである。NASA/CXC/SAOより。

4 ジャコーニの貢献

太陽から発したX線をはじめて観測したとき以来、疑いもなく、宇宙の描像は劇的に変化した。高エネルギー過程を顕著に示す多数の天体が発見された。これらの天体の時間スケールはしばしば短く、それらが非常にコンパクトな天体であることを示していて、極端に強い重力や磁場をもっていて粒子を相対論的なエネルギーにまで加速していることを表している。数億度から数十億度もの温度のプラズマも発見された。中性子星の物理やブラックホールの物理そして高温銀河間ガスの物理は、X線観測によって基本的に解明された。いまでは数千個ものX線源が発見されている。活動的な恒星コロナ、高温のガス領域に取り囲まれた超高温星、強い恒星風によって加熱された巨大バブルなどが見つかった。X線連星の大珍獣動物園が見つかって調査され、X線バスターが発見され研究され、ブラックホール天体が精査された。実際のところ

ろX線天文学は、宇宙におけるブラックホールの存在と性質と効果を調べるためのもっとも有効な手段を提供しているのだ。超新星残骸の新しい知識も集積された。銀河やそれほど活動的でない銀河の中心核も詳細に調べられ、それらが超大質量ブラックホールによって駆動されているという証拠をますます蓄積した。銀河団もX線で光っていることがわかり（それらの300個ほどはアインシュタイン衛星が見つけた）、ダークマターの存在に関する新しい証拠を導くことになった。X線観測はまた、謎のガンマ線バーストが非常に遠方の銀河に同定する上で役に立ったのだ。

これらの素晴らしい新しい知識のすべては、もちろんチームとしての努力の賜物でもあるが、個々人の活躍に帰するものだ。X線天文学の最初の30年間に於いて最大の指導者は、フリードマンとジャコーニだった。と同時に、研究者の先輩としてジャコーニの師匠として、ロッシも大変に重要な役割を果たした。この3人は、X線天文学の手法と装置の開発で重要な貢献をただけでなく、それらの方法を科学的な仕事へ適用し、とても豊富で重要な発見へと導いたのだ。こうして彼らは、X線天文学という新しい観測手段が天体物理学にとって根本的に重要であることを証明したのである。そしてそのことは、彼らや他の者たちをして、さらに技術を磨き発展させるように仕向けたのだ。フリードマンとロッシはいまでは物故している。ジャコーニは最初のX線衛星を開発し、はじめてX線望遠鏡を機能させ、それらの装置を用いて先駆的な発見を成し遂げたのである。

参考文献

(省略)

参考 URL

- ★ノーベル賞の Information to the Public のホームページ (<http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/public.html>)

- ★詳しい情報 Advanced Information の PDF ファイル (<http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/phyadv02.pdf>)

- ★過去の受賞者などの The Nobel Prize Internet Archive のページ (<http://almaz.com/nobel/nobel.html>)

■付録：X線および電磁波について

ふつうの目に見える光—可視光に加え、ラジオの信号を運ぶ電波や身体を透視するX線など光の仲間を総称して、「電磁波」と呼んでいる。電磁波は、波長（*注）の長いものから順に、ラジオやテレビの電波（radio）、テレビのリモコンなどに使われる赤外線（infrared；IR）、目に見える可視光（optical）、日焼けを起こす紫外線（ultraviolet；UV）、医療で身体を透視するX線（X-ray）、そして非常に高エネルギーの γ （ガンマ）線（gamma-ray）などに大まかにわけられるが、それらの境は明瞭に決まっているわけではない。

*注 [電磁波は、真空を伝わる一種の波なので、波の山から山（谷から谷）までの長さに対応する「波長」と、単位時間あたりに何個の山が来るかという「振動数」をもっている。そして、真空中を伝わる電磁波では、波長と振動数の積は常に一定で、

真空中の光速 c (=約30万 km/s) に等しい。したがって、波長（あるいは振動数）を与えれば、振動数（あるいは波長）は一意的に決まることになる。]

さて、電磁波を波長が長いものから短いものまで波長の順に並べたもの（あるいは振動数の順に並べたもの）が、「電磁波のスペクトル」である。

電波は、もう少し細かく分けると、波長10km以上を超長波、1kmから10kmを長波、100mから1kmを中波、10mから100mを短波、1mから10mのものを超短波、1cmから1mをセンチ波、1mmから1cmをミリ波、そして0.1mmから1mmの波長の電磁波をサブミリ

波などと呼ぶ。日常の生活では、さまざまな波長の電波が利用されている。ラジオやテレビ以外にも、たとえば、電子レンジでは波長15cm (2GHz) 程度のマイクロ波を発生して水分子を加熱している。電磁波は、1864年にジェームズ・クラーク・マクスウェルが完成した「マクスウェルの電磁理論」によって予言されたものだが、1888年になってH.R.ヘルツがはじめて電波の存在を立証したものだ。ラジオの周波数(振動数)で、キロヘルツ(kHz)とかいうときのヘルツは、この電波を立証したヘルツにちなんだ単位である。

赤外線(IR)は、波長が1mm以下でだいたい $0.77\mu\text{m}$ 以上の電磁波で、人の目には見えない。熱い物体から放射されるので熱線と呼ばれることもある。農業、工業、医療、家庭、通信、資源探査、気象観測など、赤外線はさまざまな分野で利用されている。1800年にF.W.ハーシェルが、目に見えないのに温度計の温度が上昇することから、赤外線の存在に気づいたのが最初だ。

可視光線は、ご存じ、目に見える光のことだが、1666年にアイザック・ニュートンがプリズムを用いて太陽光線を分散させ光のスペクトルを見出した。

紫外線(UV)は、400nmぐらいから10nmぐらいまでの波長の電磁波で、やはり目には見えない[ここでnm(ナノメートル)は10億分の1mのこと]。紫外線は日焼けに代表されるように化学作用を引き起こすので化学線と呼ばれることもある。化学作用のようすなどから、波長によって、400nmから320nmぐらいまでのUVA、320nmから290nmぐらいまでのUVB、290nmから190nmぐらいまでのUVCにわけられることもある。殺菌灯やブラックライトなどいろいろな利用されている。紫外線は、塩化銀の発光現象から、1801年にJ.W.リッターが発見した。

X線は、ドイツの物理学者W.K.レントゲンが、1885年、陰極管(真空管)の実験をして

いるときに、そばに置いてある蛍光紙(シアン化白金バリウムを塗った紙)が緑色に光っていることに気づいたことに端を発する。レントゲンは、陰極線(電子線)の当たる陽極から強い放射線が出ていることが原因だと突きとめ、未知を表すXからこの不思議な光線をX線(X-rays)と名づけた。レントゲンは、この放射線の発見によって、1901年に第1回ノーベル物理学賞受賞を受賞している。さてその後、X線は波長の非常に短い電磁波の一種であることがわかり、まあX(未知)ではなくなったのだが、相変わらずX線と呼ばれている。レントゲン写真に代表されるように、医療用その他、X線はいろいろな分野で利用されている。

ガンマ線(γ 線)は、電磁波スペクトルの中でもっともエネルギーの高い領域の放射である。1896年にウラニウムの放射能(物質から放射線が出てくる現象)として、A.H.ベクレルが発見した。その後1900年になって、X線よりエネルギーの高い電磁波であることがわかったものだ。放射線が謎だった当時には、発見された放射線を順番に、アルファ線(ヘリウムの原子核)、ベータ線(高エネルギーの電子)、ガンマ線(高エネルギーの光子)と名づけていたのだが、その呼び方がいまでも残っている。ガンマ線はガン治療や品種改良などにも使われている。