

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。



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 Röntgen）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 に近いため、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な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 年に米国海軍研究所 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”の開口径は、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に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<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。

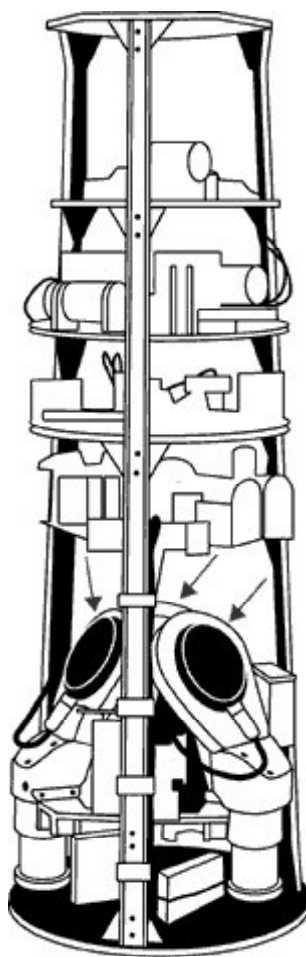


図7 エアロビーロケットに搭載された X 線観測装置。ジャコーニのグループが 1962 年の 6 月に打ち上げたこの実験装置によって、太陽系外で最初の X 線源が記録された。3 つのガイガーカウンターが矢印で示されている。

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。

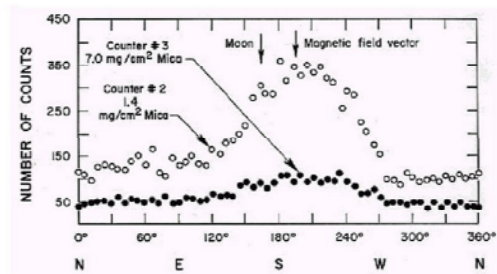


図 8 図 7 の装置のガイガーカウンターで得られた計数記録。雲母でできた窓の厚味が異なる 2 種類のガイガーカウンターの計測数が示されている。その結果からは、月とは違う X 線源の存在がわかる。また宇宙 X 線背景放射の存在も示唆される。

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、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。スピンド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。これらの新しいデータにもとづいて、引き続く数年の間に、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）。

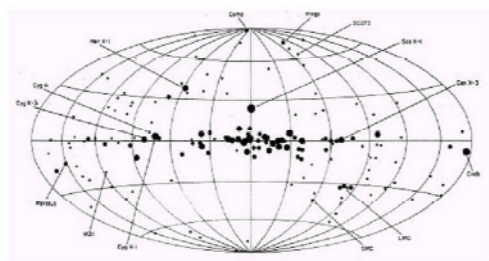


図 9 UHURU のデータにもとづく 3U カタログから得られた、銀河座標で表した X 線源の分布。UHURU のデータ精度はあまりよくないので、それぞれの X 線源の位置は近似的なものである。また黒マルの大きさは X 線強度の対数に比例している。天体物理学上とくに興味深い X 線源がいくつかマークされている。

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 NSA 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。

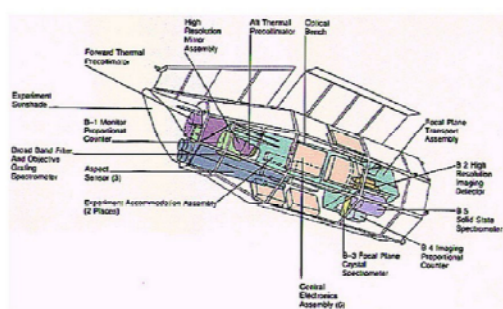


図 10 アインシュタイン天文台の構造。全長はおよそ 5m だった。

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、遠方のクエーサーだったが、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つた。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つたのだ (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)。クエーサーが 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)。

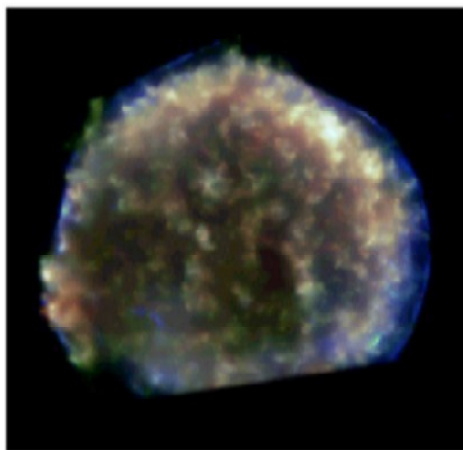


図 1 1 爆発した星である超新星の残骸。図はカシオペア座の超新星残骸 CasA で、チョコ・ブラーエが 1572 年にヘレバドスクロスター観測所で発見し詳細に記録したもの。超新星は地球から 7500 光年の距離にあって、20 光年の広がりをもっている。この画像はチャンドラ衛星が X 線領域で観測したものである。NASA/CXC/SAO より。

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 線バー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 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 年間にお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）などに大まかに分けられるが、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 以下でいたい 0.77 μm 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に利用されている。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 年にウランウムの放射能（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。

fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp