

大気圏外からの宇宙観測

牧 島 一 夫

〈東京大学理学部 〒113 東京都文京区本郷7-3-1〉

光と電波を除き、電磁波は地球の大気を透過しない。従って、それらを用いて宇宙を観測しようとする、観測ロケット、気球、科学衛星などを用いる必要がある。ここでは科学衛星を用いた宇宙観測の現状を紹介する。こうした研究はビッグサイエンスの一つであり、関連する研究分野や社会との関わりを無視しては考えられないので、それらについても独断と偏見に満ちた論旨を展開させていただく。

1. いろいろな電磁波

この世には電波からガンマ線まで、いろいろな電磁波がある。その中で、なぜ地球の動物の眼には、波長0.4-0.7ミクロンという狭い範囲の「可視光」だけが見えるのだろうか。理由が3つほど考えられる。まず動物の視覚は化学反応を利用しているから、可視光のエネルギーが化学反応のエネルギーに近いことは理由の一つだろう。第2の理由は、太陽の放射スペクトルが可視光の付近にピークをもつこと。そして、地球の大気が可視光に対して透明なことも忘れてはいけない。この3番目の理由は図1に示されており、天体からの電磁波のうち地球の表面に到達できるのは、光と電波のみであることがわかる。この第2と第3の理由のおかげで地上には可視光が満ち溢れ、動物の眼はその状況に合わせて発達してきたに違いない。さらに、多くの恒星が太陽とよく似た放射スペクトルをもつことを考えると、光の天文学がかくも早く発達したことは十分に納得できよう。

2. 磁場とプラズマの世界

しかし光で見える姿が宇宙のすべてではない。異なる波長で観測すると、思いもかけない宇宙の姿が見えてくる場合がある。その例として図2に、軟X線で見た太陽の姿を光の像と並べて示そう。これらは8月30日に誕生したばかりの「ようこう」衛星の、軟X線望遠鏡が撮影したものである。軟X線では太陽全体はかなり暗いが、黒点の集まった活動領域とよばれる部分は、極めて明るく輝いている。しかも軟X線で見た太陽の姿は、じつに複雑に刻々と変化してゆくのである。

図2に映し出されたものは、プラズマ（電離気

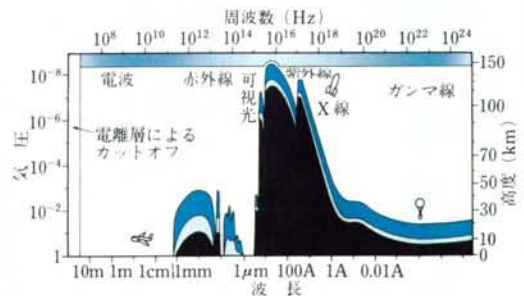


図1 色々な波長の電磁波の強さが1/2以下（青色）、1/10以下（灰色）、1/100以下（黒色）になる高度を示す。

Kazuo Makishima: Astronomical Observations from outside the Atmosphere

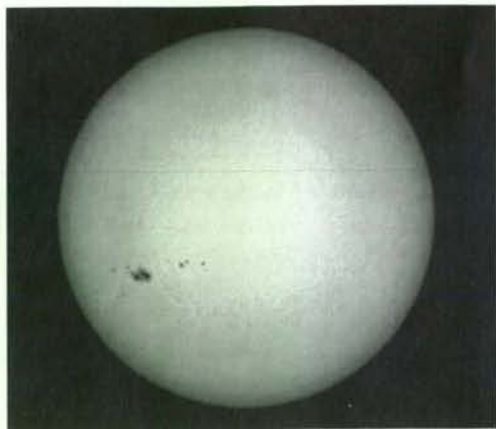


図2 「ようこう」の軟X線望遠鏡が撮影した、太陽の光学像(左)と軟X線像(右)。光で暗い黒点領域では、逆に軟X線が明るくなっている。

体)と磁場のせめぎあいの現場である。磁場とプラズマは切っても切れない関係にあり、磁場はプラズマを強く閉じ込める一方、プラズマの運動は新たな磁場を作り出す。太陽の表面下では、プラズマの運動エネルギーの一部が磁場を作る。できた磁力管は浮力のため光球の外に顔を出し、黒点として観測される。顔を出した磁力管は、そのエネルギーの一部を費やして高温プラズマからなるコロナを作る。図2で軟X線を出しているのは、こうして磁場に閉じ込められたコロナなのである。このように磁場とプラズマの相互作用のおかげで、表面温度6000度の太陽に数百万度に達する高温のコロナが作られるわけだが、その様子を他の波長域で捕えることは難しい。

プラズマや磁場は宇宙のいたるところに存在するから、図2と似たような現象は宇宙のあちこちから起きているはずである。X線による観測は、その絶好のプロープとなる。たとえば渦巻き銀河でも、磁場に閉じ込められた高温コロナがそれを取り巻き、かすかなX線を出しているのではないかと私は思っている。

3. 大気圏外への乗り物

ところで赤外線、X線、ガンマ線などは大気に

吸収されてしまうから、それらの電磁波で宇宙を観測するには、気球やロケットを用いて観測装置を大気の上層あるいは外へ運ぶ必要がある。しかし小型の観測ロケットは打ち上げてから数分で装置もろとも落下してしまうから、本格的な観測を行なうには装置を科学衛星に組み込み、大型のロケットを用いて大気圏外の軌道に乗せてやらねばならない。わが国では共同利用機関である宇宙科学研究所(宇宙研)が、M-3S IIと呼ばれるロケットを用い、鹿児島県の大隅半島にある内の浦町から科学衛星を打ち上げている。宇宙研はまた、この約2.5倍の打ち上げパワーを持つM-5型ロケットを開発中であり、1995年頃から実用になる見通しである。(これに対して、気象衛星、放送衛星などの実用衛星は、国内では宇宙開発事業団がHロケットを用い、種子島から打ち上げている。)

図3に示すように、M-3S IIは固体燃料を用いた3段式ロケットで、全装備重量は61トン。400kgクラスの衛星を高度およそ600kmの地球回りの軌道に打ち上げ、また130kgクラスの探査機を惑星間空間に投入することができる。巨大な1段目ロケットは、厚い大気の壁を突き破ることに全力を費し、発射後わずか84秒、高度およそ110kmで切り離される。残留大気の摩擦で衛星軌道

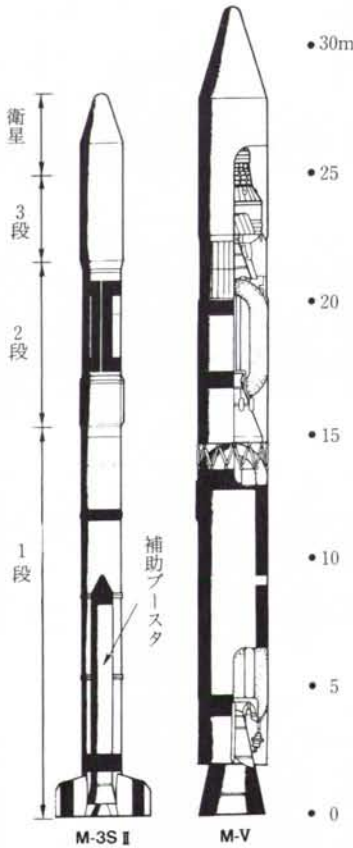


図3 M-3S IIロケットと、開発中のM-Vロケット

が急速に下がるのを防ぐには、円軌道だと500 km程度より高くしないといけないが、この高さをかせぐのが2段階目ロケットの役目である。その最高到達点で第3段階ロケットがほぼ水平に噴射し、地球周回に必要な毎秒7.2 kmの速度を衛星に与える。ここまで発射からわずかに10分足らず。夢中に過ぎてしまう一瞬であるが、この間の複雑なシーケンスのどの一つが失敗しても、衛星は死産に終わってしまう。

4. 日本の科学衛星

宇宙研は表1と表紙に示すように、ほぼ年に一機のペースで、これまで20個の人工天体を打ち上げてきた。これらの目的は、地球物理観測、工学

試験、惑星探査、天文観測などに分類される。中性子星やブラックホールなど、宇宙X線源の観測のためには「はくちょう」、「てんま」および「ぎんが」、そして太陽X線・ガンマ線観測のためには「ひのとり」および「ようこう」が打ち上げられ、また「さきがけ」と「すいせい」はハレーすい星への接近を果たした。

この文を書いている時点で、打ち上げ後3か月を経た「ようこう」は順調に定常観測をスタートしており、世界の多くの太陽研究者たちが、息をのんでその新しい成果を見守っている。いっぽう「ぎんが」も世界のX線天文学に大きな功績をもつ名機として、軌道上で4年9か月のあいだ元気に働き続けてきたが、しだいに軌道高度が下がり、11月1日ごろ、ついに大気圏に再突入し燃え尽きてしまった。しかし後継機のASTRO-Dは1993年2月の打ち上げに向けて、この10月から宇宙研キャンパスで組立てにはいった。また新型M-5ロケットの一番機は、折り畳み式の宇宙電波アンテナを積んだ衛星を長楕円軌道に投入し、地上の電波望遠鏡との間に、世界最初の宇宙VLBI(電波干渉計)ネットワークを構築しようとしている。赤外線観測グループが開発中の遠赤外線望遠鏡IRTSは、日米共同の小型宇宙プラットフォームに搭載される予定である。

5. 科学と技術と

日本の天文衛星計画は、基礎科学の中では異例に大きい予算措置を頂き、これまで幸いほぼ順調に歩んできた。しかし特色をもった独自の観測技術の開発なしには、激しい国際競争を勝ち抜くことは難しい。私たち衛星に携わる研究者が十分な技術開発を続けてきたかどうかは棚に上げるとしても、それを補ういくつかの要素があることを述べておきたい。第1は自前の打上げロケットをもっていること。これ無しには大気圏外からの観測は研究分野として成り立たないも同然である。第2に、国際協力によって「ぎんが」大面積比例計

表1 日本の天文科学衛星のまとめ

衛星計画名	衛星の愛称	ロケット	打上げ年月日	観測目的
1				
2	MS-T1			
3				
4	REXS			
5	MS-T2			
6	SRATS			
7	MS-T3			
8	EXOS-A			
9	EXOS-B			
10	CORSA-b			
11	MS-T4			
12	ASTRO-A			
13	ASTRO-B			
14	EXOS-C			
15	MS-T5			
16	PLANET-A			
17	ASTRO-C			
18	EXOS-D			
19	MUSES-A			
20	SOLAR-A			

数管や「ようこう」軟 X 線望遠鏡など、優れた観測装置が実現してきたこと、ASTRO-D も大がかりな国際協力に基づいている。第3に国内企業の技術力の向上により、衛星に必要な特殊技術がみな国産で手に入るようになってきたこと。しかも日本企業の技術陣は、自社技術に大きな誇りと強い責任感をもち、また勤勉さでも世界に類を見ない。こうした資質は、科学衛星プロジェクトを支える心強い柱となっている。

しかし衛星プロジェクトの抱える悩みも多い。衛星の費用は年々ふくれ上がり、他の研究分野への圧迫が問題となりつつある。大学の予算や人員は慢性的に伸び悩む一方で、大手企業は資金力をバックに基礎研究への投資を増やしており、目先のきく人材はどんどん研究環境のよい民間へ流出する。残った研究者は実験装置の仕様書を書き、大金を払って装置を丸ごと開発してもらい、へたをすると観測や実験まで企業に外注し結果だけを得るようになってきた。こうした研究スタイルに明日は無い。ビッグサイエンスとしての宇宙

科学が肥満児になるのをどうやって防ぐか、人手不足をどう補い技術開発を着実に進めるか、企業といかに上手に協力してゆくかなど、切実な課題がいっぱいである。

6. 宇宙論への挑戦

光の天文学ではいよいよ「すばる」望遠鏡計画がスタートを切った。そのねらいの中でも特に重要なのは、宇宙論的な観測であろう。X 線の領域でも「ぎんが」などにより、銀河系の外の広大な宇宙についてホットな発見が進みつつある。その成果を受けつぐ ASTRO-D は、宇宙論を中心課題として掲げ、他の波長域では得られない貴重な情報を得ようとしている。その一部を紹介しよう。

銀河が多数集まった銀河団では、深い重力ポテンシャルに高温のプラズマが閉じ込められ、強い X 線を放射する。プラズマの閉じ込めに必要な重力源の質量を X 線データから計算してみると、銀河団に含まれる星やガスやプラズマ自身を足し合わせた質量より、はるかに大きくなる場合が多い。

つまり「暗黒物質」があることになる。「ぎんが」は近傍の銀河団の観測から、暗黒物質について優れた情報を得た。X線ミラーを用いるASTRO-Dは2分角の分解能でX線画像を得ることができ、また「ぎんが」の数十倍の感度をもつので、ずっと遠方の銀河団についてもこうした情報を得ることができるだろう。暗黒物質は本当にあるのか、そしてその正体は何か。これは素粒子論にとっても重大な問題である。

銀河団のX線スペクトルには、電離した鉄イオンの輝線が見られる。輝線が弱ければ、水素とヘリウムからなる宇宙始原ガスがプラズマの主体ということになるし、輝線が強ければ、星の原子炉で作られた重元素が銀河団へと大量に吹き出した証拠になる。「ぎんが」の観測などによると、近傍の銀河団ではプラズマの半分ないし2/3が宇宙始原ガスであるらしい。ではずっと遠方、つまり宇宙の初期ではどうだろうか。もし遠方で鉄が減っていれば、宇宙進化の途上でまず銀河団ができ、あとからそこに銀河や星が生まれたことになる。そうでなければ、まず銀河や星ができ、それらが重力で集まって銀河団になったといえる。銀河が先か銀河団が先か。これは宇宙論の中で未解決の大問題のひとつであるが、日本のお家芸の鉄輝線観測により、まったく新しい展開が開けそうである。

7. クエーサーとその向こう

宇宙の果てには、クエーサーと呼ばれる怪物天体がひしめいている。銀河系の近くに見られるセイファート銀河やBL Lac天体は、そのミニチュア版だ。これらの天体は活動銀河と総称され、中心核から強烈な光や電波やX線を発している。しかし、中心核の放射機構は何か、その正体は巨大質量のブラックホールか、なぜ宇宙初期には活動銀河が多かったのか、活動銀河と通常銀河はどこが違うかなど、活動銀河の本質はいぜん謎に包まれている。「ぎんが」は、セイファート銀河の中心

核がどれも濃いガスに囲まれていること、クエーサーやBL Lac天体ではそうした証拠が見られないことを発見した。このため私は中心核からの放射が、降着円盤の放射とジェットからの放射に分解できるだろうと思っている。ASTRO-Dはずっと多くの、またはるかに遠方の活動銀河まで観測できる。宇宙の昔に遡るにつれ、活動銀河の数や中心核の性質がどう変わるか、大いに注目される。

近年の光のサーベイによると、私たちの近傍では目に見える物質の分布が極めて不均一で、銀河団はさらに連なって超銀河団などの大構造を作っているらしい。一方でマイクロ波背景放射の示す太古の宇宙は、信じられないほど一様だ。この対照的な宇宙の二つの姿を無理なく結びつけることは、極めて難しい。いったい宇宙の大構造は、どの時点で生じたのだろうか。クエーサーは宇宙で最初に出現した「天体」であるが、ではその分布は一様なのか、はたまたクエーサーの分布も大構造をもつのか。その答えは、宇宙進化の謎解きにとって重大な岐れ路となる。ASTRO-D一機には手に余る難問であるが、いずれX線の詳しいサーベイによって、この答えが得られると期待している。

マイクロ波背景放射はビッグバン宇宙論を支える重要な観測事実だが、X線領域でも空に一様に広がる背景放射が存在することが、X線天文学のごく初期から知られていた。その正体は今でも謎のままである。これが宇宙に充満した熱いプラズマからの放射であるという説は、赤外線衛星COBEの測ったマイクロ波背景放射のスペクトルの形から否定されてしまった。残る可能性は、多数のクエーサーの出すX線の足し合わせが見えているという説である。たしかにドイツのX線衛星ROSATの最新の結果では、クエーサーなどの足し合わせでX線背景放射の約30%が説明できるという。しかし「ぎんが」が測ったクエーサーのスペクトルは、X線背景放射のスペクトルとは明らかに異なる(図4)。宇宙X線背景放射の正

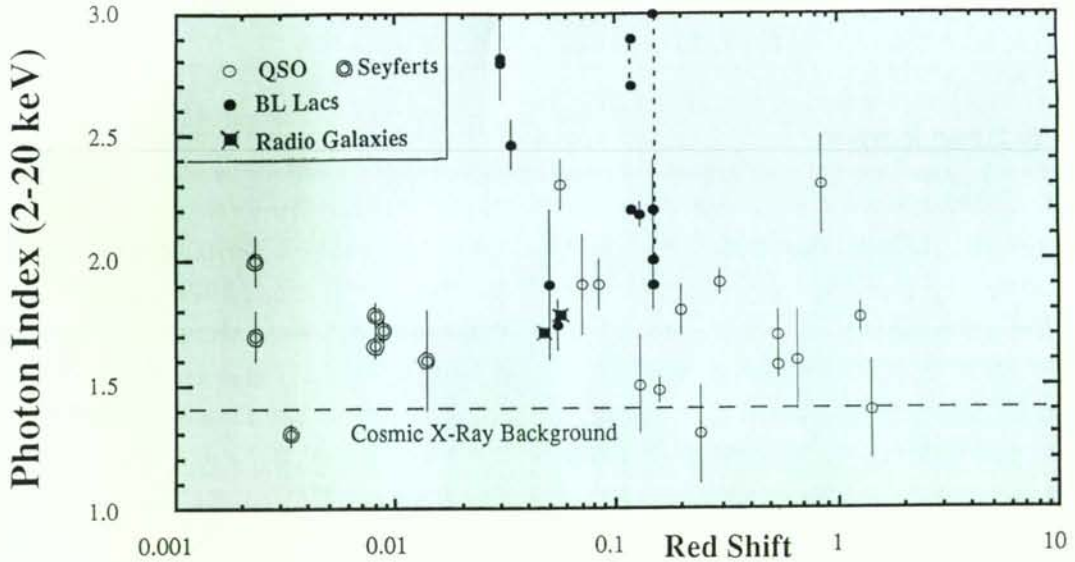


図4 「ぎんが」の測った活動銀河核のX線スペクトル指数(光子指数)を、赤方変移に対してプロットしたもの、宇宙X線背景放射の傾き(点線)とは明らかに異なる。

体はいったい何なのか、ASTRO-Dはさまざまな角度から、このX線天文学の最大の課題に挑戦する。「X線背景放射=クエーサーの足し合わせ」という平凡きわまりない答ではなく、「X線背景放射=クエーサーの向こうの未知の天体」というワクワクする答を期待したいところである。

8. 宇宙の「一般」と「個別」

ところでこうした宇宙論には、ひとつの奇妙な問題が含まれているようである。いっばんに人文系の学問に比べ理科系の学問では「個別」(個々の例の詳しい理解)より「一般」(個別の向うにある一般法則)を重視し、とくに物理学はふつうは、再現性のない1回限りの現象を扱うことはしない。ところが私たちが目にしていているのは、じつはたった1個の宇宙の、しかもただ1回限りの進化だけなのである。もちろん「この宇宙」は私たちにとっては唯一無二の宇宙だから、それを個別にくわしく記述することは確かに特別な意味をもつであろう。しかし宇宙論は、個別の記述をする博物学ではなく、宇宙の始まりと進化

を記述する一般的な数理の枠組みであってほしい。そのためには、今のこの宇宙の姿のうち一体どこまでが一般でどこからが個別なのかを明らかにできなければならない。一般と個別を、必然と偶然と言い替えてもよいかもしれない。

じつは同じことが生物についても言えるのである。地上の生物はある一般的な法則に従いつつ、地球という個別の環境に即して進化してきたはずだが、ここでも必然と偶然の切り分けは未だにできていない。だが生物については豊富なデータがある。これに対して宇宙論では、「他の宇宙」だの「この宇宙の前世」だの(もしあれば)を観測的に認識できるとは思えないから、純粹思考の中で答えを見出すしかないだろう。ここで必要となるのは、形の無いところから星や銀河や生物というシステムが現れ育つという、システム形成を記述する新しい学問体系である。そこでは、もとになる法則が一つであっても、環境や歴史に応じて無限のパラエティをもったシステムが発現しうることになる。これは決定論的な法則からそうでない結果が出るという意味ではカオスの概念に似るが、

それよりはるかに高度な内容をもっており、手詰まりになりかかっている現代科学の根底に迫る大きなチャレンジであるといえよう。

9. 世のため人のため

純粋な学問の世界を離れると、天文学はしばしば「社会一般とは関わりのない学問」、天文学者は「世間に疎い変人」というレッテルを貼られてきた。だがこうした評価も、いいかげんに返上したいものである。20世紀後半の日本は、技術力をバックにした経済力で国際的にの上昇してきた。しかし当然の結果として、経済的強者に対する国際的な風当りは年ごとに厳しさを増しつつあり、考え方を切りかえる時期が来ていることは否めない。では、経済力に代わる21世紀の日本の切り札は何だろうか。私は、基礎科学研究を通じて世界に貢献すること以外にありえないと思っている。天文学者は他の基礎科学の研究者とともに、大いに胸を張ると同時に、十分な覚悟をきめる必要がある。

天文学がより積極的に果たすべき役割もある。例えば「地球に優しく」という流行語をイカサマな免罪符にしないためには、その内容を多くの角度からきちんと問う必要がある。ために宇宙から地球を眺めてみると、植物をベースにした生態系が地球環境の根幹だということが鮮明に見えてくる。じっさい植物は光合成の原料として、水と炭酸ガスという宇宙で最もありふれた安定な化合物を用い、しかも動物の目と同じく、地球における可視光の利点をフルに利用している。したがって植物は地球上に現れるべくして現れた、宇宙の申し子である。しかもその結果、大量の遊離酸素を含む大気という、こちらは宇宙の常識からすると驚異とも言うべき環境が作られ、動物の棲息が可能になった。こうした植物の生態系を懐くことは、宇宙の美学への犯罪と言わねばならない。

ところが現代の日本人は、国内では森を潰し山を削り動物の棲息地を奪って、無用そのもののゴ

ルフ場やリゾートマンションを作りまくり、愚かにもそうした生活がトレンドイダと思込んでいる。経済力にものを言わせて、熱帯雨林の破壊や紙資源の浪費など、国際的にも多大な迷惑を及ぼす。自分がクルマを乗り回すことと地球環境とは、まったく無関係と思っている。生物が数億年かけて蓄えた化石燃料を人類が数百年で使い尽くそうとしているという恐るべき事実も、日本人にあってはほとんど他人事ではない。おそらく政治も行政も財界も、そして国民一人ずつも、拝金主義的な自己幻想に縛られている結果、地球に優しくすべきなのは自分自身であって他人事ではない、といういたって簡単な事実が見えないのであろう。こうした宇宙の美学にそぐわない日本の現状を暴き出すことも、基礎科学の役目ではなかろうか。

10. おわりに

天文学や宇宙物理学は、潜在的には洋々たる前途をもって私には思っている。しかし明るい未来を確保することは、現実にはなま易しくはない。予算、研究者定員などの問題はもちろんのこと、大学院生を中心とする若手の力をどうやって確保するかも大切な鍵であると思う。それには大学院生およびポストドクター（大学院修了者）に対する経済的支援を大幅に増やす必要があるが、腰の重いことで定評のある行政だけに頼ってはいはダメなことは明らかで、別の方策も真剣に考えねばなるまい。同時に、やる気のある優れた若手をどうやってこの分野に集めるかも大切である。幸い、望遠鏡や星座やロケットが大好きな子供たちがいっぱいいる。彼等や彼女らを、まんまと受験体制の裏をかいて天文学にかき集めよう、ぐらいの意気込みと柔軟な発想が必要であらう。私たちひとりひとりの努力とともに、日本天文学会、国立天文台、および宇宙科学研究所のご尽力に大いに期待したい。