

日本天文学会 公開講演会

# 新しい望遠鏡で未知の宇宙をさぐる

ガリレオの驚きから400年、果てしない宇宙の謎を間近に

2009.3.28 13:00 ~ 17:00 (開場 12:30) / 大阪府立大学 なかもずキャンパス 学術交流会館 多目的ホール



# ご挨拶

ガリレオが望遠鏡を自作し、人類として初めて宇宙を観測したのは今からちょうど 400 年前のことです。ガリレオが宇宙の姿を見て驚愕したのと全く同じように最先端の技術で作られた望遠鏡をのぞくと、私たちは想像を超える宇宙のありさまに胸をおどらせます。現代の望遠鏡とはいったいどんな物なのでしょうか。そこにはどのような技術が使われているのでしょうか。講演会では最新の技術を駆使した望遠鏡について、また、それらの望遠鏡による観測結果について解説していただきます。さらに実際に最先端の技術にふれることができるよう、望遠鏡などの展示も行っております。

大阪府立大学 理学系研究科

小川 英夫

## 大阪府立大学 宇宙物理学研究室 のご紹介

私たち、大阪府立大学宇宙物理学研究室では電波望遠鏡を作っています。自分たちで作った望遠鏡を用いた天体観測の醍醐味は何にも変えられません。(1)

宇宙からの信号は大変弱いので、受信機の性能を上げることは望遠鏡にとって死命を制するものとなります。今では超伝導体などを使用して高性能な受信機を開発しています。(2)

宇宙の研究には今や世界との協力は欠かせません。私たちの研究室では、日米欧で進められている ALMA 計画、JAXA が進める宇宙電波望遠鏡計画、国立天文台の望遠鏡整備計画に協力しています。(3)

私たちが観測をする電波では、光には見えない宇宙の冷たい物質を捕らえることができます。そこでは新しい星が生まれていると考えられています。(4)



(1) 大阪府立大学 1.85m 電波望遠鏡



(2) 大阪府立大学 実験室の様子



(3) ALMA 電波望遠鏡 提供: 国立天文台



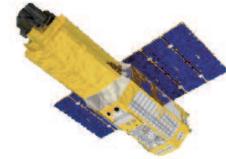
(4) 国立天文台 ASTE 電波望遠鏡  
提供: 国立天文台

# プログラム

1

想像を超えた激動の世界を見る X 線望遠鏡  
國枝秀世 (名古屋大学 教授)

13:10 ~



遠くの宇宙に第二の地球を探す赤外線望遠鏡  
芝井 広 (大阪大学 教授)

14:00 ~

2

休憩 (20分)

3

光では見えない闇の世界をとらえる電波望遠鏡  
小川英夫 (大阪府立大学 教授)

15:10 ~



見えないブラックホールをとらえる電波望遠鏡  
井上 允 (国立天文台 教授)

16:00 ~

4

## 展示コーナー

- ・ すぐく X 線望遠鏡に使われた鏡
- ・ ALMA の最初に使用された受信機
- ・ 宇宙電波望遠鏡用 8GHz 帯受信機
- ・ 電波受信機の部品

## 実験コーナー

- ・ 携帯電話の出す電波を見よう
- ・ パラボラ実験

# 想像を超えた激動の世界を見る X線望遠鏡

名古屋大学大学院理学研究科 國枝秀世

人類は永く、可視光だけで宇宙を見て、その謎を明らかにして来ました。1940年代からは宇宙を見る目が電波へ、1960年代からは、紫外線、X線、赤外線へと広がり、「想像を越えた激動の世界」が見えて、宇宙の理解が革命的に変わりました。これについて、X線による観測を中心にお話します。

## 宇宙を見る目

地球を覆う大気はわずか30kmであり、地球の半径6000kmに較べると、1/200に過ぎないごく薄いものです。しかし、地上の生命を育み、また宇宙からの粒子、X線、紫外線を遮ってくれます。生命の進化には有益ですが、一方で宇宙からの情報を遮っているのです。右の図は、上空から飛来する電磁波がどの高さで1/100になるかを波長ごとに示したものです。例えば、紫外線では200kmまでに大気に吸収され、地上には届きません。

そのため、X線、紫外線、赤外線では、人工衛星に望遠鏡を搭載し、大気の壁を乗り越えて、宇宙の観測をすることになります。X線天文学はロケットが使えるようになってから始まり、まだ50年に満たない若い学問です。

## X線で宇宙を見ると

X線で宇宙を見ると何がわかるのでしょうか。右の図はX線でみた太陽です。可視光ではのっぺりとした、太陽表面(光球)だけが見えますが、X線では太陽から高温のコロナが激しく吹き出している様子が見えます。可視光だけでは想像できない激動の世界をそこに見ることができます。

## 熱い宇宙

温度の低い星は赤く、温度の高い星は青いという話を聞いたことがあるかと思います。波長が短い光ほど温度が高い天体を見ることができます。X線は青色の光の1/1000の波長で、青い星より1000倍も温度が高いところから放たれています。例えば、太陽の光球が6000度であるのに対し、コロナは数百万度以上に達します。宇宙にはこうした高温の領域があちこちにあり、X線で観測すると、それらを選択的に観測することになります。

恒星の中では、水素がヘリウムに、さらに酸素、炭素へと核融合が進み、そのエネルギー源となっています。そして、ついには鉄の原子核まで核融合が進みますが、そこで、急激な収縮を起こします。

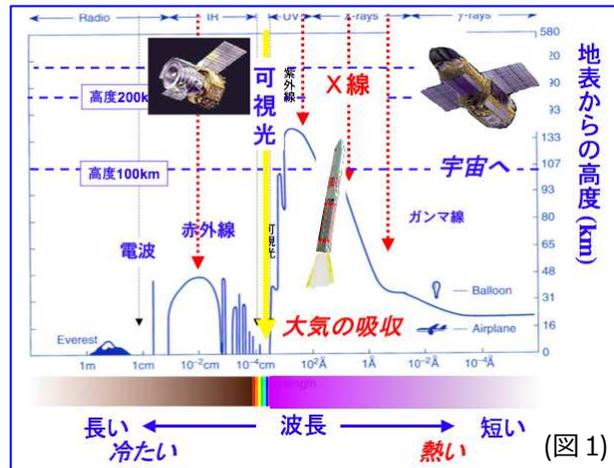


図1:宇宙からの電磁波は大気に邪魔されて地表まで届く波長範囲が限られます。

地上に届かないX線や赤外線などの観測には気球やロケット、さらには人工衛星に望遠鏡を載せる必要があります。

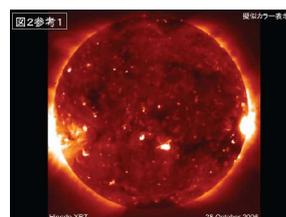


図2:太陽観測衛星ひのでによるX線で見た太陽。可視光でのイメージとは全く違います(JAXA 提供)。



図3:X線天文衛星チャンドラによる超新星残骸カシオペアA (NASA 提供)。

直径 1000 万 km 以上の星が数 km に縮むため、莫大な重力エネルギーが解放されます。その一部が、周りのガスを高速で押し出し、星間空間に広がります。前項の下図は X 線で見た超新星の残骸で、爆発を起こした星の記録をそこに読み取ることができます。

## 極限の世界

重い星が大爆発を起こすと、爆縮により内部に重く高密度のコアを作ります。太陽の 30 倍より軽い星が爆発すると、半径 10km の中性子星ができ、それより重い星では、ブラックホールになります。中性子星やブラックホールと言った、小さく、重い星にガスが流れ込むと、膨大な重力エネルギーが解放されます。そのため、大変高温になり、X 線を放射します。ですから中性子星やブラックホールの周りを調べるには X 線が最も適しています。

右の図はあるブラックホールの周りから観測された X 線の「スペクトル」です。本来は黒い線で示した様に、一定のエネルギーを持つ狭い線（輝線）になるはずですが、左（低いエネルギー側）へ広がり、裾を引いています。右下の図はこのブラックホールへ流れ込むガスの様子を示しています。円盤状に渦巻いて流れ込み、その中心付近が光っています。X 線の輝線は、円盤から出ていると考えられていて、そこはブラックホールの強い重力場で時間の進みが遅く（一般相対論効果）、遠方から見ると、波長が長い方へずれることとなります。スペクトルで見られる左へ流れる裾はそのためだと考えられています。つまり、強い重力場の効果を、実際に観測できたわけです。これによって、私たちは初めてブラックホールに手を触れたといえることができるでしょう。

## X 線で宇宙を見るために

X 線を観測する望遠鏡とはどんなものなのでしょうか？X 線は波長の短いために、金属板で鏡を作っても垂直に近い方向からあてると透過してしまいます。しかし、鏡面から 0.5 度くらいのすれすれの角度であてれば、なんとか反射させることができます。実際には少し絞った円錐の内面を反射面にします。この円錐をバームクーヘンのように入れ子にすることで、宇宙のはてから来る、微弱な X 線を集め画像を得ることができます。右の図は 2005 年に打上げられたすざく衛星と、それに搭載された X 線望遠鏡です。小型バスくらいの大きさと重さの衛星には 5 台の望遠鏡が搭載されています。すざくは現在も激動の宇宙を観測し続けています。さらに 2013 年の打上げを目指して新しい望遠鏡も開発しています。

図6: X線望遠鏡の鏡(右上)とそれを搭載したX線天文衛星すざく(右)(JAXA 提供)。

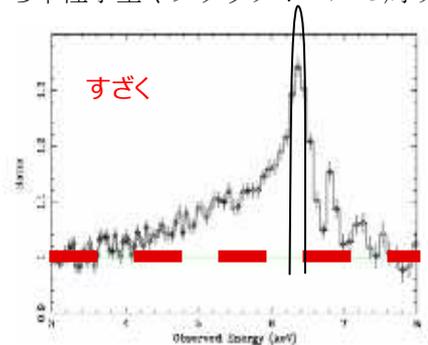


図4: X線天文衛星すざくが観測した活動銀河 MCG-6-30-15 の中心にあるブラックホールが放つ輝線。本来は黒線で示した幅の狭い輝線が放たれているはずですが、実際は左側(長波長側)に裾を引いていま

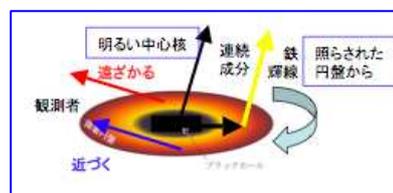
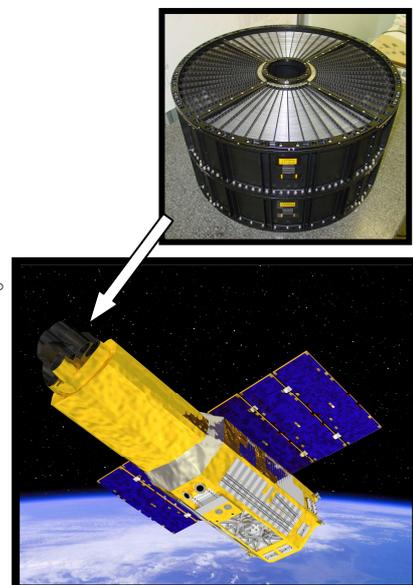


図5: ブラックホール周囲の回転円盤の想像図。



# 遠くの宇宙に第二の地球を探す赤外線望遠鏡

大阪大学理学研究科 芝井 広

「水金地火木土天海という私たちの太陽系の惑星以外にも、他の恒星の周りに惑星があるかもしれない、それを発見したい」というのは人類長年の夢でしたが、観測がとても難しく、研究者の努力にも拘わらずなかなか成功しませんでした。しかし 1995 年になって、ペガサス座 51 番星の周りを木星よりやや軽い惑星が周期 4 日で周回していることが間接的に発見され、太陽系の惑星以外の惑星（系外惑星と呼ぶ）として、最初の発見となりました。それ以来今日まで 300 個以上の系外惑星が発見されています。

このようにして発見された系外惑星は、ほとんどが木星のような重い惑星でした。系外惑星が周回していると、その周期で恒星が揺らされ、その結果恒星の速度が変化します。この現象を測定（視線速度法という）して、間接的に惑星の存在を知る方法なので、惑星が重いほど検出されやすいためです。しかし最近では技術の進歩によって、地球と同程度の重さのものも発見され始めています。最も軽いものは地球の 5 倍程度の質量ですが、まもなく地球と同じくらいの系外惑星も発見されるでしょう。

ここ 2、3 年、視線速度法以外の方法でも系外惑星の検出ができるようになり、惑星の素性が少しずつ解り始めてきました。例えばたまたま系外惑星が恒星の前面を通過するような軌道を周回している場合は、周期的に恒星の光の一部が系外惑星によって隠されます。この時の明るさやスペクトルの変化から、系外惑星の大きさや密度（比重）や大気の成分がわかるようになってきました。その結果、これまでに発見されているもののほとんどは木星や土星のような巨大ガス惑星であることや、大気に水が大量に含まれていることがわかってきました。マイクロ重力レンズ法という特殊な方法によっても、とても興味深い系外惑星系が発見されています。

2008 年 11 月になってビッグニュースが伝えられました。「コロナグラフ」と「補償光学」という二つの高度な技術を併用して、大望遠鏡を用いて近赤外線観測を行い、系外惑星が輝いている様子を直接撮像したというものです。ペガサス座にある HR8799 という恒星を隠して周辺を近赤外線で撮影したものです。右の図がその像です。少なくとも二つの惑星が検出されていて、数年間でわずかに場所が変わっていることから惑星と考えて間違いのないでしょう。

いずれも木星の 10 倍程度の重い惑星です。これ以外にも、画架座ベータ星にも同じような惑星が発見されました。この恒星の周辺には円盤状に固体微粒子が濃く漂っていることがわかっており、固体微粒子は惑星形成プロセスの途中でできた破片と考えられています。今回、惑星が直接撮影されたことから、惑星形成過程の現場を直接観察できると期待が膨らんでいます。

このような大発見が続く中で、地球を含む太陽系の惑星や、系外惑星系がどのようにしてでき

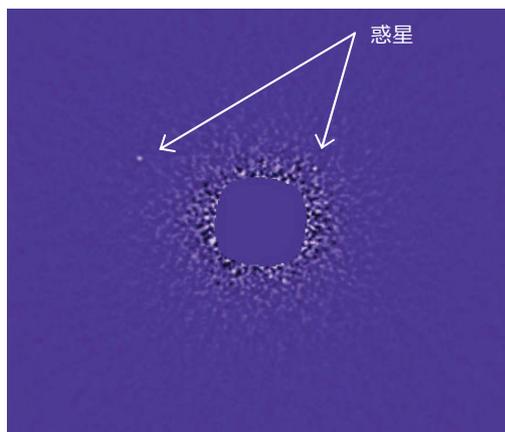


図1:ジェミニ望遠鏡で観測された HR8799 の周囲を巡る惑星(ジェミニ天文台提供)。

たのかについての研究も精力的に行われています。これらの惑星は、太陽のような中心の恒星ができた後に、周囲に取り残された固体微粒子やガス（原始惑星系円盤という）が、あちらこちらで集まって小さな塊となって惑星になったと考えられています。実際、原始惑星系円盤と考えられるものが、赤外線観測によって多くの恒星の周りに発見されています。これらを精密に観測してみると、円盤の濃さや大きさ、形には多くのバリエーションがあることがわかってきました。

そこで、どのような原始惑星系円盤から、どのような惑星ができるのかについて、望遠鏡による観測や理論研究、コンピューターシミュレーションが盛んに行われています。私たちの太陽系についてはかなり研究が進み、ほぼ定説が確立してきました。しかしながら系外惑星については疑問が多く残っています。疑問を解明するためには原始惑星系円盤を詳しく観測することが重要です。特に、円盤の温度をなるべく正確に測ることで、そこからどのような惑星ができるのかについて、より正確な予言ができるようになると考えられます。

円盤の温度を正確に測るためには、解像度の高い遠赤外線望遠鏡が必要です。このような技術はこれまでになかったので、私たちは宇宙遠赤外線干渉計という新しい望遠鏡を開発しています（右下写真）。上空3万5千メートルまで打上げて、1秒角程度の空間分解能で観測ができるものです。

将来はこの技術を発展させて、系外惑星を赤外線ですべて詳しく観測し、生命活動を発見することができるのではないかと期待しています。宇宙にどのような生命がいる（いた）かはわかりませんが、地球に存在するような光合成をする植物が繁栄すると、その惑星の大気が酸素を豊富に含むように変化します。この酸素やそこから科学的に発生するオゾンを検出することができれば、地球と同じような生命がいる（いた）という強い証拠になるからです。

このように、私たちの太陽系や地球の一般性と特殊性を、系外惑星との比較研究によって追及することで、地球や私たちの生い立ちも迫っていけると期待しています。



図2:我々が製作中の宇宙遠赤外線干渉計。気球を使って地上3.5万mまで上昇させて観測します。

# 光では見えない闇の世界をとらえる電波望遠鏡

大阪府立大学理学系研究科 小川英夫

## 光では見えない闇の世界を明らかにする電波

電波領域は可視領域と並んで、宇宙に開かれた「大気の窓」といわれ、地上から天体観測ができます。宇宙からの電波は1932年カール・ジャンスキーによって発見され、1950年以降、水素の21cmスペクトル線をはじめとして、宇宙背景放射、クェーサー(活動銀河核)、分子線など天文学上の大きな発見が続いています。ミリメートル波帯の観測は1970年、米国ベル研究所のペンジラスがキャットピークの11m電波望遠鏡で宇宙空間に存在する一酸化炭素分子( $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ )の波長2.6ミリメートル回転遷移スペクトルの検出に成功したのを皮切りに、約100種に及ぶ星間分子が主にミリメートル波帯で現在までに検出されています。こうした星間分子の研究により、今まで人類の目に触れることがなかった低温( $-200^\circ\text{C}$ 以下)、高密度( $10^3\sim 10^6/\text{cc}$ )な領域を調べることができるようになりました。これによって光では見るできなかった冷たい領域-暗黒星雲-の内部では何が起きているのか初めてわかるようになってきました。

「星の赤ちゃん」=原始星は赤外線の観測で見つけることができます。つまり赤外線で輝いていることが、原始星を探す場合には「目印」になります。では、「星のたまご」に相当する星のもとを探す目印は何でしょう? 「星のたまご」は内部に熱源をもっていないため、赤外線では探すことができません。ここに電波観測の出番があります。 $-200^\circ\text{C}$ 以下の世界でも分子は回転運動を行い、そこから波長が数mmの電波が放射されます。これを地球で探知することができるのです。その冷たい場所のことを私たちは分子雲と言っています。星が生まれる場所は分子雲の中でも密度が一万個/ $\text{cm}^3$ 程度と高く、大きさが一光年程度の「ガス塊」です。電波望遠鏡で「ガス塊」を探すこと、これが「星のたまご」を探す「目印」になります。いろいろな分子の電波を使用することで、冷たい暗黒星雲の中で、たまごから幼虫へそして一人前になるように、星の生成過程が手にとるように明らかになってきました。

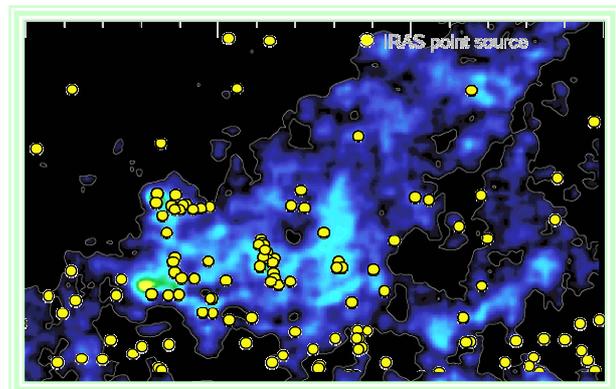


図1 へび座にある星形成領域

左 可視光で観測した図(CfA提供)。

右 電波で観測した強度図。黄色い点は赤外線観測データ(IRAS)

## 電波をとらえる触角－アンテナ

アンテナはもとより昆虫の触角の意味です。アンテナは電波を送受信することが可能であり、電波を効率よく照射するアンテナは電波を効率よく受信するアンテナということになります。ここでは、説明を容易にするため、アンテナの動作を照射の方で説明します。

テレビ（地上波）などでは、一般に八木-宇田アンテナと呼ばれるアンテナが使用され、その基本は受信信号の反波長の長さを用いたダイポールアンテナです。アンテナの長さが電界強度と比例するものではありません。左下図のように波長と関係があるのです。

電界方向(偏波面)はダイポールアンテナに添う方向です。屋根の上のテレビアンテナがすべて水平に設置してあるのは、テレビ塔から送信される電波の偏波面に合わせているためです。さて、天体観測にもちいるアンテナはパラボラアンテナです。このアンテナによって照射される信号は、右下図の様にパラボラアンテナの開口面上にダイポールアンテナを規則正しくならんでいと考えればよく、それぞれのダイポールアンテナの指向性が合成されてパラボラの指向性となります。

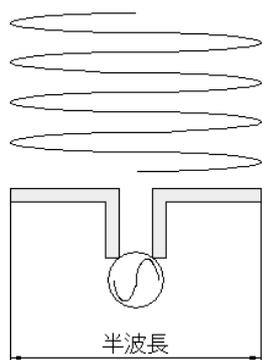


図2 ダイポールアンテナの特性

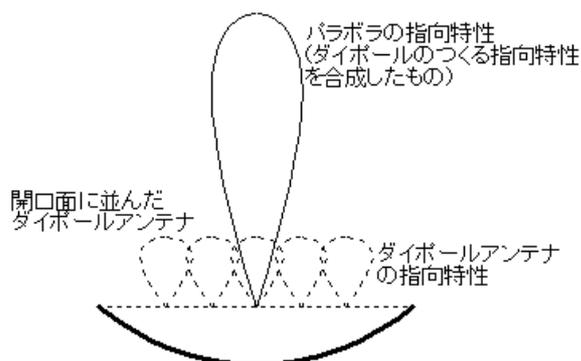


図3 パラボラアンテナの特性

並ぶアンテナ数が多い（アンテナの面積が大きい）ほど、鋭いビームがつけられます。きちんと計算してみるとビーム幅  $\Delta\theta$  とアンテナの口径  $D$  には、 $\Delta\theta = \lambda / D$  という関係があります（ $\lambda$  は観測を行う電波の波長）。

このように電波は波の性質を利用することで、その分解能(解像度)を小から大まで変化させることができる便利さを持っています。多くのアンテナからなる干渉計では、その間隔が望遠鏡の大きさとなり、光では到底達成できない解像度を得ることができます。

そのひとつが、現在、日本、アメリカ、ヨーロッパを中心とした多数の国の国際協力により、チリに建設中のALMAです。この80台のアンテナからなる干渉計はハッブル宇宙望遠鏡の約10倍、0.01秒角の解像度を得ます。これによって、星や惑星の形成過程はもちろん、遠くて、生まれて間もない銀河など多くのことが明らかになると期待されます。

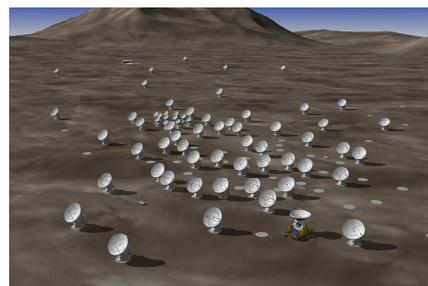


図4 ALMA 完成予想図(国立天文台提供)

# 見えないブラックホールをとらえる電波望遠鏡

国立天文台 井上 允

## 何でも吸い込む？

ブラックホールは光さえも吸い込んでしまうので、何も見えない、といわれます。ブラックホールには狭い所に物質が大量に集まっていて、その強い重力に引かれて光が外に出て来られない状態になっています。

強い重力に引かれるのは光だけではなくありません。ブラックホールの周りにはあるガスなど物質もブラックホールに引かれます。このときのガスの動きを人の動きになぞらえて描いたのが下の図です。

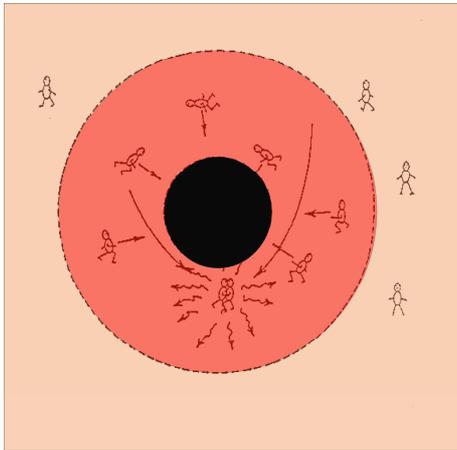


図1:ブラックホールに周囲から大量のガスが流れ込んでくると、それぞれが押し合いへし合いして互いにぶつかります。こうしてブラックホールの周囲には高温のガスができ、それが電波やX線を放っています。

真ん中の黒丸がブラックホールで、ガスはそれに向かって重力で強く引かれます。引かれたガスがブラックホールの周りに大量に集まり、互いにぶつかり、押し合いへし合いします。すると温度がとても高く（数十万度～数億度）なり、光り輝きます。何でも吸い込むからこそ、その周りは輝いて見えるようになるはずですが。

## 黒い穴？

明るい円盤の中心に黒い穴が見えたら、それがブラックホール！？

そうです。明るい円盤の中に、まさに黒い穴が見えるのではないかと考えられています。下の図はその想像図です。でも、まん丸ではなく、少しいびつですね。ブラックホールの周りのガスは高速で回っています。この速度があまりに速いので相対論的な効果で、円盤の回転が我々に近づいてくる側は明るく、逆に遠ざかる側は暗く見えます。この図は時計回りに回っている円盤を斜め上から見た様子を示しています。

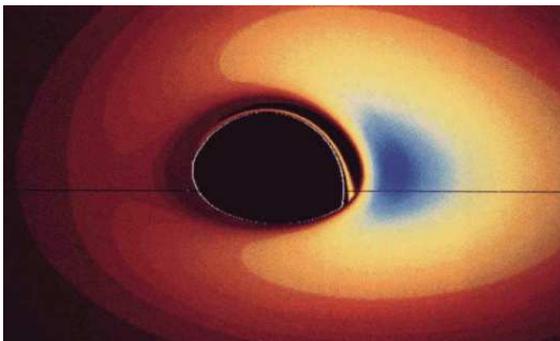


図2:ブラックホール周囲にあるガス円盤の想像図。高速回転しているため、観測者に近づいてくる側(この場合には右側)が明るく青っぽくなり、反対側は暗くなります。中央の黒い部分はブラックホールに光が吸い込まれる部分に相当します。

## 本当に見えるの？

明るく輝くいびつな円盤とその中の黒い穴が、そう簡単に見えたら大変です。そんなに大きく見えたら、ブラックホールが目の前にあるということを意味するからです。ブラックホールは、とても小さく、太陽の数億倍の重さのブラックホールでも、せいぜい太陽系の大きさ程度です。しかも、幸か不幸か、このような巨大質量ブラックホールはとても遠くにあります。ですから吸い込まれる心配はないのですが、見かけの大きさは1秒角の数十万分の1。並大抵のことでは見えません。月面上の数ミリの大きさを見分ける能力がなければならないのです。

## ブラックホールを見る電波望遠鏡

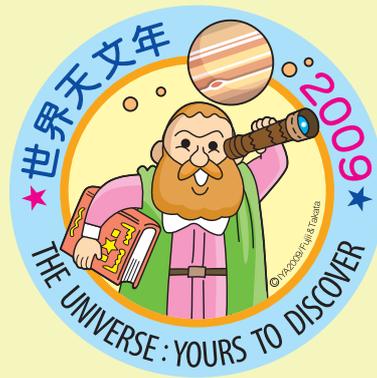
こんな細かいものでも、それを見るための望遠鏡があります。まだ建設中ですが、VSOP-2 と呼ばれています。良い香りがしそうな名前ですが、VLBI スペース観測所プログラム2号の略です。1号はVSOPで、「はるか」という名の人工衛星が中心でした。「はるか」と世界各国の電波望遠鏡が協力して観測を行いました。

VLBI は電波干渉計の一種です。干渉計は多くの望遠鏡で構成されています。お互いの望遠鏡の間の距離が離れば離れる程、細かいものが見えるようになります。日本とアメリカ、ヨーロッパ、などと結んだ VLBI が行なわれています。しかし、地球上の望遠鏡だけを使う限り、それらの距離は、地球の直径以上には離す事ができません。



図3:VSOP-2 で建造中の電波天文衛星。地球上の電波望遠鏡と結ぶことで地球の直径を上回る大きさの電波干渉計を構成し、ブラックホールの“黒い穴”を見る能力を実現します(JAXA 提供)。

それなら、電波望遠鏡を宇宙に打ち上げれば、さらに細かいものが見える、と日本が世界で初めて「はるか」を打ち上げました。そして今、それに続く衛星を製作しています。「はるか」では、残念ながら黒い穴は見えませんでした。それよりも10倍細かく見える能力を持つ VSOP-2 で、ブラックホールがどこまで見えてくるか、日本を中心に進められている VSOP-2 に世界中の期待が集まっています。



主催：(社)日本天文学会

後援：大阪府立大学 / 世界天文年2009日本委員会 / 大阪府教育委員会 / 堺市教育委員会  
大阪市教育委員会 / 大阪市立科学館 / 日本惑星協会 / 朝日新聞社 / 毎日新聞社  
読売新聞大阪本社 / 日本経済新聞社 / 大阪日日新聞 / **NHK** 大阪放送局 / 毎日放送  
朝日放送 / 関西テレビ放送 / K B S 京都 / サンテレビジョン / ラジオ関西 / ラジオ大阪  
F M 大阪 / エフエム京都

写真： ↙ ASTRO-G 電波望遠鏡のイメージ図 提供：JAXA  
↗ すざく X線望遠鏡のイメージ図 提供：JAXA  
↘ ALMA 電波望遠鏡 提供：国立天文台  
↘ 赤外線望遠鏡 提供：大阪大学

