

〈天体列伝(25)〉 重力レンズ

重力によって光が曲がるという重力レンズ作用は、一般相対論的な効果のひとつであり、時空の曲がりによって起こる。重力レンズ作用は1919年に太陽による星の光の曲がりの測定という形で確認された。しかし、レンズという名にふさわしい多重像やアーク状の像やリング状の像が発見されたのは1979年以降のことである。

重力レンズという言葉は、重力レンズ天体そのものをさして使われることは少ない。実際、重力レンズ天体は銀河や銀河集団やコンパクト星などであって特別な天体ではない。それにもかかわらず重力レンズという特別な言葉を使用するのは、そうした天体付近を通過してくる光の軌跡が、その重力によって曲げられレンズ「作用」があらわれるためである。したがって、「重力レンズ」と言うときは、重力レンズ作用や重力レンズ効果のことを意味するのが普通である。

重力によって光の軌跡が曲げられると述べたが、ニュートン重力（万有引力の法則）を知っている人なら光に重力の影響が及ぶとは思えない。ニュートン重力の式からわかるように、重力は二つの物体の質量の積に比例しているのだから、質量のない光は重力を感じない。したがって、ニュートン重力の範囲では、重力レンズによる光の曲がりという現象は起こり得ない（光のエネルギーを「質量」だとみなすと、ニュートン重力によっても光が曲がるが、その曲がりの大きさは以下に述べる時空の歪みを考えた場合の半分でしかない）。

ところで、1915年にアインシュタインは物理法則の普遍性への信頼と重力と慣性力の類似性から、それぞれを一般相対性原理と等価原理という二つの仮定としてまとめ、それらを使って重力の

理論である一般相対論を作りあげた。その一般相対論では、重力は時空の歪みの現れであると考えられる。時空とは時間と空間をあわせたもので、時空が歪むというのは、物質やエネルギーの存在によって時間の進み方や空間の曲がり方が影響を受けることを意味している。重い天体の存在によって、その天体付近での時間の進み方は、天体から遠く離れた点での時間の進み方に比べてゆっくりとなる。また、重い天体付近の空間は遠く離れた地点に比べてのびている。

運動というのは、「空間」の中における位置の「時間」的な変化である。したがって、運動を考える場合、空間や時間が一樣でないことの影響は質量のある無しにかかわらず及んでくる。つまり、重力は質量の積に比例するものではなく、時間と空間の一樣性からのずれであるが故に、質量のない光の運動にも影響するのである。

歪んだ時空中での物体や光の軌跡は、時空中の二点を結ぶ世界間隔を適切なパラメータを使用してあらわしたとき、それを停留値にする停留曲線で与えられ、その曲線を測地線という。たとえば、平面上では測地線は直線であるが、球面上の2点を結ぶ停留曲線（測地線）は大円となる。このように、物体や光の運動は空間の曲がりを反映して「曲がる」わけだが、時空の曲がりや重力の現れと考える立場からすると、光の軌跡は重力によって「曲がる」と考えてもよい。もちろん光は重力源へ引き付けられる向きへと曲がる。

アインシュタインは一般相対論を発表したとき、一般相対論の効果として、遠方の恒星からの光が太陽の重力場によって角度にして2秒程度曲がることを予想した。イギリスのダイソンは日食の際に恒星の位置を測定し、太陽の存在によって恒星の位置が変ることを見いだした（1919年）。恒星の位置の変化は、恒星からの光の軌跡の変化を意味し、それはアインシュタインの予想通り光が重力によって曲がることを確認したことになっている。太陽による光の曲がりについては普通、重

力レンズという言葉を使わないが、本質的には重力レンズの効果である。このように、非常に弱い重力レンズ効果は1919年の段階で見いだされていたといえる。しかし、1919年の観測は光の微小な曲がり測定したものにはすぎなくて、レンズ効果と呼ぶには少々貧弱な現象である。

この重力レンズに関しては、それ以後60年にわたって理論的な研究がなされてきた。たとえば、1935年にチェコの電気技師のマンドルがアインシュタインに宛てた手紙の中で、恒星が重力レンズ効果を起こす可能性にふれ、それをうけてアインシュタインは1936年に恒星の重力によって二つの像を作るような「レンズらしいレンズ」に関して計算し、二つの像の強度はレンズ効果のない場合に比べて強くなることを示したが、実際に観測できるチャンスはないであろうと予想した。その後も、ソ連のティコフが1937年に重力レンズによる像の強度を一般的に求めたが、その方法は大変に複雑であったので、ドイツのレフダグが1964年に簡単な幾何学的な考察から導きなおしたり、また同じく1964年にはリースが同様な幾何学的な考察によって重力レンズによる像の性質を調べている。ツイッキーは1937年に恒星ではなく銀河による重力レンズを考察した。その後も多くの人が重力レンズを天文学的な側面から調べた。しかし、これらはあくまで理論的な考察にとどまり、レンズらしい重力レンズの作用が観測されたのは1979年のことである。

1979年にウォルシュたちが双子のクエーサーを発見した。双子と呼ばれるのは、観測された二つのクエーサーがほぼ同じ方向（角度にして6秒の違い）にあつて、しかもそのスペクトルや赤方偏移がほとんど同じであったためである。この二つのクエーサーが極めて似ている理由がいろいろと考えられたが、一番無理がなく自然な考え方は、一つのクエーサーからの光が途中の銀河の重力場のレンズ効果で二つの像として観測されたとするものである。つまり、典型的な重力レンズ効果が

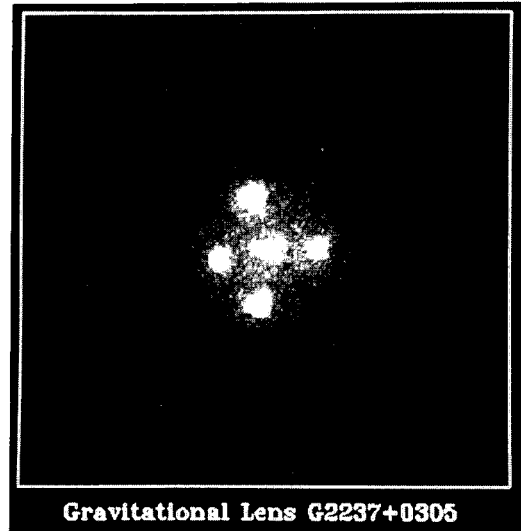


図 Q2237+031のアインシュタインの十字架

発見されたのである。

重力レンズはこのように、遠方にある天体から出された光が、その天体と地球の間にある銀河や銀河集団などによって曲げられて、地球ではいくつかの像となって観測されるものである。像の数は、双子のクエーサーのように2個であったり、それ以上の多重像（4個のときは、アインシュタインの十字架、アインシュタインのクローバといったりもする）となるが（Q 0957+571, Q 2237+031 など7例）、それは光源とレンズ作用をする天体と地球との位置関係やレンズ作用をする天体の形状や密度分布等による。像の形はリングやアーク状になることもあり、実際に電波源がリングの像となるもの（MG 1131+0456 など5例）や銀河がアーク状の像となる例（Abell 370 など13例）が発見されている。

重力レンズ効果を考えると、ハッブル定数や宇宙膨張の減速パラメータさらにはダークマターといったことを議論できるが、スペースもなくなったので割愛する。

江里口良治（東大教養）