

金沢大学サテライト・トプラザ ミニ講演

日時：平成19年8月25日（土） 午後2時～3時30分

会場：金沢大学サテライト・プラザ 講義室

演 題：「X線で探る熱い宇宙」

講 師：藤本 龍一 （金沢大学大学院自然科学研究科 准教授）

はじめに

今日皆さんにお話するのは、X線天文学という天文学の一分野についてです。天文学というと普通は可視光の天文学を思い浮かべると思います。例えばハッブル宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡などについてはご存じの方も多いでしょう。これに対して、X線天文学や、X線観測で分かってきた熱く激しい宇宙については残念ながらあまり知られていないと思います。X線天文学は今や天文学の非常に重要な一分野になっていて、X線天文学なくして現代天文学全体を語ることはできません。今日はX線天文学で分かってきた熱い宇宙の姿の一端を皆さんにご紹介します。

私は2006年11月までJAXA（宇宙航空研究開発機構）で「X線天文衛星すざく」の開発とX線天文衛星を用いた観測的研究を行ってきました。X線衛星すざくについては今日の話の中でも少し紹介する予定です。2006年12月に金沢大学に着任して、現在は宇宙物理学研究室でX線天文学の研究を行っています。

多くの方にとって宇宙は「冷たい暗黒の世界」というイメージがあるのではないかと思います。宇宙の年齢は約137億年で、年齢相応の広大な空間です。ただし、そのほとんどには何も存在しません。真空だと思っていただければよいでしょう。例えば太陽系のお隣の恒星までの距離は4.3光年、つまり光で4.3年かかる距離です。われわれは天の川銀河という銀河に所属していますが、お隣の銀河であるアンドロメダ銀河までの距離はおよそ200万光年です。ごく近い天体と言ってもそれぐらい離れているのです。

これはパロマ天文台で撮影された可視光で見たアンドロメダ銀河の写真です。暗黒の宇宙の中にぽつんと銀河が浮いていますが、これが冷たく暗い宇宙のイメージの源ではないかと思います。

宇宙は非常に大きな空間ですので、例えばメートルなど普段使っている単位を使うと、ものすごく大きな数になってしまい不便です。それで天文学の世界では独特の単位を使用

します。一つは「天文単位」と呼ばれていて、これは地球と太陽の距離を基準にしたものです。地球と太陽の距離は約1億5000万kmあるのですが、これを1天文単位と呼びます。太陽系ぐらいのスケールを考えるとときには、この天文単位という単位が非常に便利です。なお、1億5000万kmは 1.5×10^8 kmと書くことがあります。 10^8 は1の後ろに0が8個並ぶという意味です。

天文単位は（宇宙においては）比較的近い距離を考えるときに使う単位ですが、もっと一般的に使われているのは「光年」です。1光年は光が1年間に進む距離です。したがって、われわれになじみがあるkmに直すと、およそ10兆kmです。10兆kmというとピンとこないと思いますが、1の後ろに0が13個並んだkmです。そのくらいの距離でわずか1光年です。隣の恒星までの距離が4.3光年で、お隣の銀河までの距離が200万光年ですから、いかに宇宙が大きいかわかりいただけると思います。

温度について。われわれの日常生活では「摂氏温度（℃）」を使っています。これはわれわれが生活する上で非常に便利な単位で、水が凍る温度を0℃、水が沸騰する温度を100℃とし、この間を100等分した温度です。したがって、われわれが普段暮らしているような世界ではちょうどいい値を示す温度です。

ただ、科学の世界では摂氏温度は必ずしも便利な単位ではなく、「絶対温度（K）」が使われています。これはどういう単位かというと、まず、絶対温度0Kが到達できる最も低い温度です。負の温度にはなりません。そして、絶対温度の一目盛りは摂氏温度の一目盛りと同じであると定義されています。このことから、「絶対温度＝摂氏温度＋273度」と書くことができます。例えば室温（二十数℃）を絶対温度に直すには273を足せばよいので、約300Kになります。太陽の表面温度は約6000Kですが、ここまで大きくなると摂氏温度でも絶対温度でもだいたい同じです。

以下の話では絶対温度を使いますが、必要に応じて摂氏温度も示しますので、あまり気になさならなくて結構です。ただ、絶対温度という単位が使われていることはぜひ知っておいて下さい。

身近な世界を考えてみよう

われわれにとって最も身近な宇宙といえば、何と言っても地球です。地球の写真はいろいろなところでご覧になったことがあると思いますが、これは1972年にアポロ17号が月に行ったときに撮影された地球の写真です。半径が約6400kmで、われわれが生活する上で

は非常に大きな天体ですが、宇宙全体からすればごみ粒のように極めて小さな存在です。

地球の表面温度は平均して絶対温度 290K（摂氏温度 20℃くらい）です。これは人間にとって非常に快適な温度です。最近では地球温暖化のせいか、40℃近くになることもありますが、それでも絶対温度で 300~310K ですから、ごく狭い温度範囲で振れているということになります。

ただ、ちょっと注意していただきたいのは、地球には立派な大気が存在しているということです。月も地球も太陽からはほぼ同じ距離にありますが、大気のない月では平均 250K（-20℃）くらいです。しかも月の場合は昼側と夜側で温度が大きく異なります。われわれの地球は大気のおかげで、人間にとって快適な温度に保たれているのです。この熱の源は太陽にあります。先ほども言いましたが、地球と太陽の距離は 1 億 5000 万 km、1 天文単位離れています。

太陽はわれわれの最も身近にある恒星です。恒星というのは、自分自身で核融合反応を起こして光を放出している星のことです。太陽では、4 個の水素が 1 個のヘリウムになるという核融合反応が起きることによって、膨大な熱エネルギーが賄われています。

太陽の中心温度はおよそ 1500 万度と非常に高温です。表面温度は約 6000 度で、これもわれわれの普段の生活から考えるとかなり高温です。したがって、太陽そのものは灼熱の世界と言えます。ちなみに、太陽の半径は約 70 万 km で、地球の半径のおよそ 100 倍です。

地球より内側にある惑星の温度は地球に比べてかなり高いのですが、では、地球の外側にある惑星や衛星はどうでしょう。それらの表面温度は地球や月よりもさらに低くなり、極寒の世界です。

例えば火星は太陽から 1.5 天文単位離れています。つまり地球と太陽の距離の 1.5 倍の距離なのですが、表面温度は 210K（-60℃）とかなり低くなります。

土星の衛星の一つであるタイタンの場合はどうでしょうか。地球から順番に、火星、木星、土星と続きますが、土星は太陽から約 9.5 天文単位のところにあります。そうになると温度はさらに低くなり、94K（-170℃）程度です。

冥王星はつい最近まで一番遠い惑星だったのですが、惑星から格下げになって準惑星と分類されるようになりました。太陽からの距離は大体 40 天文単位です。表面温度は 44K（-230℃）と限りなく低い温度になっています。

つまり、われわれ地球は太陽からちょうどよい距離にあって、人間が暮らすのに非常に適した温度なのですが、それよりも外側の天体になってしまうと極寒の世界で、人間が生

きていくのはかなり困難になってしまいます。

今日の本題からはちょっとはずれるのですが、最近は惑星探査が随分進歩していて、人工衛星を送り込んでその表面の写真を撮ることがかなり行われています。これはマーズパスファインダー (Mars Pathfinder) という衛星が撮った火星の表面です。火星に関しては、1970年代ぐらいから米国が人工衛星を送っていますから、皆さんもどこかでご覧になったことがあると思いますが、きれいな写真が撮れるようになって、赤茶けた大地にある山や、石ころなどが鮮明に見えるようになっています。

一方、2004年には「カッシーニ (Cassini)」という土星探査機に積まれていた「ホイヘンス (Huygens)」という小さな人工衛星がタイタンに突入してその表面に到達し、タイタン表面の写真を撮ることに成功しました。ここに写っているのはタイタンの石です。実際に衛星がタイタンにまで行ってこういう写真が撮れる時代になったのです。これらは米国やヨーロッパの成果ですが、日本も頑張っています。

2005年には日本の「はやぶさ」という探査機が、小惑星イトカワに到達しています。その後ははやぶさはイトカワに着陸して表面の土を採取し、今地球に向かって戻ってきているところです。イトカワの土を無事に地球に送り届けられるかどうかはまだ分かりませんが、2010年ごろには地球に戻ってきてカプセルを投下する予定です。日本も頑張っているということを知っていただきたいと思い、紹介しました。

話を戻します。太陽系の次は宇宙背景放射についてです。宇宙背景放射というのは、宇宙のあらゆる方向から一様にやってくるマイクロ波の放射のことです。マイクロ波は波長が非常に長い光で、電波の一種なのですが、電子レンジで使われている光です。電子レンジで使われている光が、宇宙のあらゆる方向からやってきます。しかも、その強さが方向によらず一定なのです。

これは、最近WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) という衛星で撮られた宇宙背景放射の写真です。この写真を見るとすごくむらむらがあるように見えますと思いますが、このむらの大きさは電波の強さの10万分の1ぐらいの非常に小さいものです。この写真はそのむらを強調して作った写真なのでこのように非常にむらむらがあるように見えるのですが、基本的に宇宙背景放射は非常に一様です。

あちらからもこちらからも全く同じ強さの光がやってくるというのは非常に不思議なことです。同じ強さの光がやってくるということは、大昔に光を出した領域同士に何らかの関係があったということになります。ところが、宇宙の向こう側の端とこちら側の端にそ

んな関係があったというのは、常識的に考えるとあり得ないことです。だから、宇宙背景放射というのは非常に不思議な放射なのです。

実は、これが宇宙誕生 40 万年後の名残だと言われています。「宇宙は昔非常に小さな点で、ビッグバンという大爆発で始まった」というビッグバン宇宙論が今では広く信じられていますが、宇宙背景放射はその決定的な証拠だと考えられています。昔は宇宙が非常に小さかったため空間同士が関係することができて、一様な強さの光が生まれた。その光が、今のように大きな宇宙になっても名残として残っているのです。宇宙背景放射は宇宙の始まりを理解する上で非常に重要な発見でした。

ここではその話は置いておいて、宇宙背景放射にも温度があるということを話します。その温度は絶対温度でわずか 3 K です。摂氏温度に直すと -270°C とものすごく低いのです。宇宙背景放射は宇宙のあらゆるところを満たしていますから、基本的に宇宙の至るところが 3 K の光で満ち満ちているということになります。

以上から、恒星とその周辺、例えば水星や金星などは非常に高温で、地球くらいだと快適で、それ以外の世界は太陽系の中といえども非常に冷たい世界で、もっと宇宙全体を見わたせば、絶対温度で 3 K の放射で満たされているわけですから、宇宙というのは非常に冷たいというのが常識的な考え方です。実際に天文学の世界でも、ある時期まではそのように考えられていました。

もちろん今日お話しするのは、熱い宇宙についてです。先ほどお話しした「常識」が実は常識ではなくて、宇宙はもっと多様な世界だという話をこれからしていきたいと思えます。

光、温度と光、X線（予備知識）

光（電磁波）というと、普通は目に見える光のことを思い浮かべると思います。目に見える光は正式には可視光線と呼ばれていて、電磁波の一種です。光というのは波で、振動して伝わっていきます。光の山と山の間隔のことを波長と呼びます。波長は波を特徴づける基本的な物理量です。図は横方向に波長を取っています。可視光線は図の虹色のところに当たり、波長が 0.3~0.8 ミクロン程度の電磁波です。この波長帯の光だけは人間の目で感じるできるので、したがって人間が見ることのできる光（可視光線）ということになります。

実際の光は波長の長い側や短い側にもっとずっと広がっています。例えば波長の長い方

にいくと、赤外線、電波、逆に波長が短い方は、紫外線、X線、ガンマ線となっています。X線やガンマ線は可視光線と比べて、波長が1000倍以上短い光です。

光の波長はエネルギーと反比例の関係にあります。波長が1000倍短いということは、エネルギーが1000倍以上大きい、つまりX線は可視光線に比べて1000倍以上大きなエネルギーを持った光なのです。夏になると日焼けを気にされる方が多いと思いますが、日焼けは可視光線よりも高いエネルギーを持っている紫外線が人間の皮膚に当たることによって起きます。X線やガンマ線は、紫外線よりもさらに高いエネルギーを持った光です。

次に、温度と光についてです。温度と光は関係ないと思われるかもしれませんが、実は両者には密接な関係があって、ある温度の物体からはその温度で決まる光が放射されます。例えば地球や人間はおよそ300K（20～30℃）の温度ですが、そういう温度の物体からは赤外線が出ます。つまり、われわれ人間は赤外線を放射しています。赤外線カメラで見ると、人間は明るく輝いています。それに対して太陽の表面温度は約6000Kです。このくらいの温度になると可視光線が放射されます。太陽は表面温度が6000Kだからわれわれ人間には非常に明るく見える、ということもできます。

光と温度には以上のような関係があるのですが、X線は可視光よりも1000倍もエネルギーが高い光ですから、可視光よりも1000倍温度が高い領域から出てくることになります。温度が数百万度以上という非常に高温の物体が存在すると、そこからはX線が放射されます。逆に言えば、X線は非常に高温の現象、あるいは非常に活動的な現象を見るのに適した光なのです。

もう一つ特徴的なのは、X線の中でもエネルギーが高いものは非常に透過力が強いということです。レントゲン写真がそのよい例です。X線はレントゲンという人によって発見されましたが、彼が奥さんの手を撮った写真が今でも残っています。骨はX線を通さないのですが、皮膚はX線が簡単に通過してしまうので、骨の様子を見ることができるのです。このように透過力が強いというのがX線の特徴です。

しかし、X線は地球大気には完全に吸収されてしまいます。この絵は、横軸が波長で、波長の長い方から電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線と続きます。それに対して縦軸は高度を表していて、宇宙からやってきた光がどこまで到達するかを描いたものです。例えば電波は地上まで到達します。赤外線も一部は地上まで到達します。可視光は、非常に狭いバンドですが、なぜかすべて地上に到達します。それに対して紫外線やX線はほとんど完全に大気に吸収されてしまいます。ガンマ線もかなり吸収されます。そのおかげ

げで人間は安心して暮らすことができるわけです。もし、X線や紫外線が地表まで降り注いでいたら、人間は外を平気で歩くことなどできません。幸いにも大気が全部これを吸収してくれるので、夏は日焼けが気になりますが、そういった特別な時期を除けば、あまり気にならないわけです。

ところが、これは天文学的には非常に悲しいことです。地上にいる限り絶対にX線やガンマ線を観測することができないのです。観測を行なうには、気球やロケット、人工衛星といった飛び道具が必要になります。

X線放射の一例として太陽を紹介します。太陽の光球の外側には「コロナ」と呼ばれている非常に高温の薄いガスが広がっています。コロナの温度は数百万度に達していて、X線を放射しています。これは2006年に打ち上げられた「ひので」という日本の衛星が取得した太陽のX線写真です。普段皆さんがイメージされている太陽とは随分違うと思います。太陽の表面は6000度ですから、X線を全然出さないで、ほとんどのところは非常に暗い、つまり黒いのですが、一部に非常に明るいところがあります。これはちょうど黒点のところに対応していて、黒点では非常に激しい活動が起きていて数百万度の高温ガスが存在しているのです。さらに太陽の周辺部にも、非常に希薄ですが、高温ガスが存在していて輝いているのがX線で見えます。

太陽からのX線は非常に強いので、人類は随分前から太陽からX線が出ていることを知っていました。しかしながら、太陽の次に近い恒星は4.3光年離れています。4.3光年というと非常に近いように思われるかもしれませんが、地球と太陽の距離の27万倍も離れているのです。太陽は例外的に近く、その隣の恒星は非常に遠いのです。

例えば太陽を今の距離から27万倍遠ざけたところに置けば、そのX線の強さは27万の2乗分の1になってしまいます。ですから、太陽以外の天体からのX線の観測は非常に難しいと考えられていました。

X線天文学の曙とX線連星、ブラックホール

「真実は小説より奇なり」と言います。1960年代までは天文学者でさえ、太陽以外の天体からのX線を観測することは無理だろうと考えていたのですが、それでも観測を試みる人たちがいるわけで、そういう人たちが意外な発見をしていくようです。1962年にロケット実験により、初めて太陽以外のX線天体が発見されました。その実験をやったのはジャコーニ(Giacconi)を中心とするグループです。観測装置は今から見れば原始的なものです

が、好運なことに「さそり座 X-1」と呼ばれる全天で最も明るい X 線天体がたまたま視野の中に入って、太陽以外の X 線天体が初めて発見されました。

この天体は非常に不思議な天体です。太陽は X 線を強く出していますが、可視光に比べると 10^{-6} 、つまり、可視光のエネルギーの 100 万分の 1 ぐらいの X 線しか放射していません。ところが、さそり座 X-1 は可視光では非常に暗くて、X 線が可視光の 1000 倍も明るいのです。しかも、太陽の全放射エネルギーの 1000 倍にも達するエネルギーを X 線として放射しているという、全く新種の天体でした。

最初のロケット実験をリードしたジャコーニは、2002 年にノーベル物理学賞を受賞しました。実はこのさそり座 X-1 の同定に当たっては、日本の小田稔先生も非常に大きく貢献されています。残念ながら、小田先生は 2001 年にお亡くなりになりましたが、ジャコーニたちと並んで X 線天文学を始めた一人と言ってもいいのではないかと思います。

さそり座 X-1 がどういう天体かお話しします。実は初期に見つかった明るい X 線天体のほとんどは「高密度天体と恒星の連星系」です。高密度天体というのは、取りあえず非常に密度の高い天体だと考えてください。これは想像図ですが、太陽のような恒星と、非常に小さく密度の高い高密度天体があります。この二つは連星、つまり二つが重力的に引き合って互いに回転運動をしている系を作っています。このような高密度天体と恒星の連星系では、恒星が持っている水素ガスがはぎ取られて高密度天体の強い重力に引かれて落ち込んでいく、ということが起こります。高密度天体の重力が非常に強いために、解放された重力エネルギーにより落ち込んだガスの温度は数千万度にまで達します。その結果、太陽の 1000 倍以上のエネルギーを X 線として放射するのです。このようなメカニズムで X 線連星では非常に強い X 線が放射されることが分かってきました。

では、高密度天体とは何か――星の進化の最後に作られる非常に密度の高い天体のことです。高密度天体にも幾つか種類がありますが、X 線連星の多くは「中性子星」と呼ばれる星であることが分かりました。これは名前のお通り、中性子の塊の星です。われわれの身の回りにある物質は、原子核と電子で構成された原子でできていますが、原子核をさらに細かく分けると、陽子と中性子という二種類の素粒子に分けることができます。そのうち中性子だけでできた天体が中性子星です。

星の中心は、その最期を迎えた時にもものすごく圧縮されます。太陽と同程度の重さの星が半径 10km ぐらいの領域にまでぎゅっと押しつぶされると中性子星になります。どのぐらい密度が高いかというと、角砂糖 1 個の大きさで重さが 10 億 t にもなります。想像を絶す

る密度ですね。

やや専門的な話になりますが、中性子星は「中性子の縮退圧」と呼ばれる、極限的な状況で発生する特別な力で支えられています。中性子というのは非常に小さな粒子ですが、それがぎゅっと押し縮められたときに、中性子同士がお互いに反発します。中性子星はこの力で支えられている天体です。こんな星が本当に存在するということが自体が驚きですが、それがX線観測で次々に見つかってきました。

これは「かに星雲」と呼ばれる天体のX線と可視光・赤外線の写真です。「メシエカタログ」の1番めに登録されていることから「M1」とも呼ばれています。この天体の中心には中性子星があり、そこからガスが吹き出しています。中性子星は高速で回転しており、らせん状の構造を作っています。これは想像図ではなくて本当の写真です。かに星雲の中性子星は連星ではありませんが、観測されている中性子星の多くはX線連星を作っています。

以上のような、想像を絶する天体である中性子星が幾つも見つかったのですが、それをさらに詳しく調べていくと、一部の天体は中性子星よりもさらに重いということが分かってきました。中性子星よりもさらに重い天体では、星自身を中性子の縮退圧で支えることができません。そうするともう何も支えることができなくて、完全につぶれてしまいます。つまり、中性子星よりも重い天体というのは「ブラックホール」でしかあり得ないのです。

例えば太陽と同じ重さの星であれば、3kmまでぎゅっと縮めることができれば、ブラックホールになります。当初ブラックホールは理論的な産物だと考えられていたのですが、実際に観測によって、ブラックホールであるとしか考えられない天体が幾つも見つかっています。最も有名な天体は「はくちょう座X-1」とよばれている天体です。

ブラックホールは高密度という言葉にはなじまないかもしれませんが、いずれにしても中性子星やブラックホールといった高密度天体から強いX線が放射されていることが明らかになってきました。

これは少し専門的な絵になります。もし、分からなければこのスライドは飛ばして下さい。縦軸が重力エネルギーの大きさ、横軸が距離（天体の大きさ）を表しています。太陽は半径が70万kmありますから、重力の大きさはこれだけです。それに対して、中性子星は半径10kmぐらいですから、ここまで重力エネルギーが大きくなります。ブラックホールは半径3kmですからさらに大きくなります。もし、十分遠方からものが落ち込んできた場合、太陽であれば、これだけの重力エネルギーを得ることができます。それに対して中性

子星だどこまで落ち込んで、これだけのエネルギーを得ます。ブラックホールであれば、ここまで落ち込んで、これだけのエネルギーを得ます。

太陽の重力は地球に比べれば確かに強いのですが、表面まで行ったところでたかが知れています。それに対して中性子星やブラックホールでは、非常に大きな重力エネルギーを得ることができます。その結果、落ち込んだ物質が加熱されて 1000 万度くらいの高温になり、X線を放射するのです。

ここで話が少し飛びます。今お話ししたのは星の進化の最後にできる中性子星やブラックホールでしたが、銀河の中心には桁違いに巨大なブラックホールが存在すると考えられています。これまでの観測により、銀河の中心のごく狭い領域に、太陽のおよそ 100 万倍とか、銀河によっては 10 億倍という、非常に大量の質量が集中していることが分かってきました。これを説明できるほぼ唯一の解が「巨大ブラックホール」です。つまり太陽の 100 万倍、あるいは 10 億倍という、非常に質量の大きなブラックホールが銀河の中心には存在しているのです。

これは想像図ですが、銀河の中心に巨大ブラックホールが存在しています。そこに物質が重力に引かれて落ち込んでいきます。先ほど紹介したX線連星と同じで、巨大ブラックホールの強い重力場に物質が落ち込むと、高温に加熱されて紫外線・X線を放射します。

最近では、巨大ブラックホールがどの銀河にもあることはほぼ間違いないと考えられています。さらに、銀河そのものが形成されていく過程と、巨大ブラックホールの形成とは密接に関係しているだろうと考えられています。銀河がどのようにできたのか、あるいは巨大ブラックホールがどのようにできたのかは、現在最もホットな研究テーマの一つです。

X線天文衛星の時代へ

初期のころは、ロケットにX線観測装置を載せてプューンと飛ばしていましたが、観測ロケットではごく短い時間しか観測できません。それだとなかなかいい観測ができないので、やがて人工衛星を使って観測をしようということになってきたわけです。最初のロケット実験は 1962 年でしたが、1970 年には世界で初めてのX線天文衛星が米国によって打ち上げられました。衛星になると、地球の周りをぐるぐる回って長時間観測することができますから、格段に観測条件がよくなります。この世界初のX線天文衛星はいろいろな方向を調べて、約 300 個のX線天体を発見しました。

1979 年には世界で初めて、X線反射望遠鏡を搭載したX線天文衛星が打ち上げられまし

た。それまでのX線観測は望遠鏡を使用せず、単に観測装置を載せてそこに入ってくるX線を観測していたのです。反射望遠鏡を使うことによって感度が格段に向上しました。

X線は、反射をさせることが非常に難しい光です。可視光だと鏡を用意すれば簡単に反射させることができますが、X線は非常に波長が短くてエネルギーが高いため物質を通り抜けてしまい、反射させることがなかなか難しいのです。ではどうするかというと、やってくるX線に対して鏡をすれすれの角度で置きます。そうすると辛うじてX線を反射することができます。そういうすれすれの鏡を何層も用意することで、反射望遠鏡としての面積を大きくします。このような非常に特殊な光学系が必要になるので、X線反射望遠鏡が実用化されるまでには時間が随分かかりました。

(質問) その鏡は鉛ですか。

(藤本) 基板の表面に、例えば金をコーティングしたものが使われています。

1979年に米国では反射望遠鏡を搭載したX線天文衛星が打ち上げられましたが、この頃から日本も衛星を次々と打ち上げることに成功しています。最初の衛星が1979年の「はくちょう」で、続いて83年の「てんま」、87年の「ぎんが」、93年の「あすか」、そしてつい最近ですが、2005年に「すざく」が打ち上げられています。重量も初期の衛星は100kg足らずだったのですが、だんだん重たくなってきて、すざくでは1.7トンになりました。あすか、すざくではX線反射望遠鏡が搭載されています。検出器も初期のガス検出器から、最近ではX線CCDカメラや、あるいはもっと進んだ観測装置が搭載されるようになっています。小さいながらもユニークな性能を持った衛星を5～10年弱の周期で連続して打ち上げて途切れることなく観測を続けることにより、日本はX線天文学の発展に非常に大きく貢献してきました。

少しだけX線天文衛星すざくの話をしてします。すざく(英語ではSuzaku)はあすかに続く日本の5番目のX線天文衛星で、2005年7月10日に打ち上げられました。地上では太陽電池のパドルを閉じて、望遠鏡の鏡筒部分を引っ込めていますが、衛星軌道上では太陽電池パドルを開いて、鏡筒部分を伸ばします。総重量が1.7tで、焦点距離は4.75mです。

JAXAを中心に、金沢大学を含む国内の多数の大学、研究機関、さらには日米国際協力によりNASA(航空宇宙局)や米国の大学とも一緒に開発を行いました。私もこの衛星

の開発に10年以上携わっており、非常に思い入れのある衛星です。宇宙の大規模構造形成を探る---大規模構造については後ほどお話します---ことと、先ほどお話ししたブラックホールの近傍の物理状態を探ることの二つを大きな科学的目標として掲げています。

衛星の製作というのは、構想に5年もしくはそれ以上、そのあと予算が認められて、まず最初に試作品を造るのに2年、次にフライト品、つまり本物の衛星を造るのにまた2年、そして1年かけて地上でいろいろな実験を行って、ようやく打ち上げ場に持っていくことができます。

ロケット打ち上げ場という日本では種子島が有名ですが、種子島の対岸の九州本土の内之浦というところにも発射場があります。すざくは内之浦スペースセンター（USC）から打上げられました。ロケットはH-2Aではなくて、M-5という全段固体のロケットです。

打ち上げ後にトラブルがあって観測装置の一つが使えなくなったのですが、現在は軌道上で順調に観測を行っています。今日の話とは直接は関係ありませんが、参考までにすざくの最新成果を紹介します。先ほど銀河の中心に存在する巨大ブラックホールについてお話ししましたが、すざくは一見普通に見えるあまり活動的ではない銀河の中心に、大量の物質に覆い隠されている特殊な（これまでに知られていなかったタイプの）巨大ブラックホールが存在しているというのを発見しました。これは想像図ですが、ESO 005-G004 という名前の銀河の中心に巨大ブラックホールがあって、X線を強く放射しています。ただし、その周りを非常に大量の物質が覆っているため、ほとんどの光はそこで吸収されてしまっただけでは見えません。ところが、非常に透過力の強い硬X線（エネルギーの高いX線）帯域を高感度観測することにより、そこを漏れ出してくる硬X線をとらえることができたのです。

これは去る7月30日に京都大学のグループによって記者発表されました。新聞にも出ていたので、もしかしたら記憶されている方が・・・、いらっしゃらないですね（笑）。今後もし記者発表になることがあるはずですので、もし、すざくという名前を見つけたら、あのときの衛星かと思っていただければ幸いです。

星の一生と銀河における高温ガス

このスライドは、星の一生のうちのいくつかの重要な段階にある天体の写真を並べたものです。このX線連星だけ想像図ですが、それ以外はすべて本物の写真です。

左上の写真はすばる望遠鏡で撮影された「星間物質」の写真です。これが星の材料になり、ここから「原始星（子供の星）」が生まれます。やがてこの原始星が成長して、核融合反応を起こして自分で輝くことができるようになりますと、それが大人の星「主系列星」です。われわれの太陽は今この段階にあります。太陽の寿命は大体 100 億年ぐらいと言われていて、現在は 45 億歳ぐらいです。人生の半分ぐらいを過ごした、まさに今が盛りの星です。

太陽があと 50 億年ぐらいすると、外層がどんどん膨らんで密度の低い非常に大きな星になります（赤色巨星）。これはハッブル宇宙望遠鏡で撮影された「イータカリーナ」という名前の天体の写真です。進化の最後の段階にある星で、星から放出されたガスが鉄アレー状に分布しているのがわかります。

星が軽い場合には、中心に「白色矮星」と呼ばれる残りかすのような天体ができて、その周りに飛び散ったガスは「惑星状星雲」になります。惑星状という名前がついていますが惑星とは全然関係なく、惑星のように見えたからこのような名前がつけられました。

これに対して、太陽の数倍の質量を持つ重い星の場合には、「超新星爆発」と呼ばれる華々しい最後を迎えます。この写真は大マゼラン星雲で 1987 年に起こった超新星で「超新星 1987A」と呼ばれる天体です。超新星 1987A は天文学が現在のような精密科学になってから初めてわれわれの近くで起きた超新星であり、これによって様々なことが明らかになりました。

超新星爆発の後には、吹き飛ばされたガスが「超新星残骸」として残ります。名前のとおり超新星の残骸です。後で紹介しますが、これは非常に高温で、X線で明るい天体です。中心には先ほどお話しした高密度天体（中性子星あるいはブラックホール）が残ります。それが連星になると、非常に明るいX線天体になります。超新星残骸として宇宙空間に放出されたガスは、いずれ星間物質に戻り、新しい星を作る際の材料になります。これが大ざっぱな星の一生です。

星の一生において、実はほとんどの段階で多かれ少なかれX線を放射しているのですが、特にX線で明るく輝くのは、大爆発を起こして最後を迎えた後であり、X線の観測が重要になります。高密度天体については既に説明しましたので、次に超新星残骸について話します。

超新星爆発が起きたとき、星の大部分は吹き飛ばされて星間空間に飛び散っていきます。それが星間物質に衝突すると、数百万～数千万度に加熱されます。この図は加熱のメカニズムを模式的に示したものです。左側で超新星爆発が起きてガスが吹き飛ばされて、右方

向に非常に高速で飛ばされたという状況だと思ってください。特徴は、みんなそろった速度で同じ方向に進んでいるという点です。

星間空間には星間物質と呼ばれる冷たい物質が存在していて、これがある種の壁を作っています。超新星爆発で吹き飛ばされた物質は毎秒数千 km という非常に速いスピードで壁にぶつかるのですが、そうすると行き場がなくなって、今まできれいにそろった運動をしていたのが、ここでぐちゃぐちゃな運動になります。専門的には「乱雑な運動」と言いますが、これが非常に温度の高い状態に相当しています。つまり、超新星爆発によってみんなそろったスピードで飛ばされたものが、何かにぶつかることによってぐちゃぐちゃな運動状態になって、高温になるのです。このようなプロセスにより温度が数百万度～数千万度にまで加熱されます。

これは、西暦 1006 年に起きた超新星の残骸の X 線写真です。米国のチャンドラ衛星（チャンドラセカールにちなんで命名された）によって撮影されたものです。余談ですが、1006 年の超新星というのは、藤原定家の『明月記』と呼ばれる作品の中にも書かれていて、文献の情報と最近の観測結果を合わせて、これが 1006 年に起きた超新星の残骸であると特定されました。

この X 線写真で赤く輝いているところが先ほど述べたプロセスで加熱された領域で、温度が 1000 万度ぐらいです。左上と右下に青く光っているところがありますが、ここはおそらく磁場が強い領域で、電子が加速されて異なるメカニズムで X 線が放射されています。

超新星残骸は生物の誕生という点で非常に重要な役割を担っています。水素とヘリウム以外の元素（天文学ではこれを「重元素」と呼びます）、例えば炭素や酸素、鉄などはすべて星の中での核融合、あるいは超新星爆発によって作られたものです。こうした過程で作られた重元素が超新星残骸という形で星間空間にまき散らされ、それがまた何かのきっかけで集まって、星が誕生します。今度は重元素を含んだ物質で星や惑星が作られますから、人間のような生物が誕生することが可能になります。最初の星だと水素とヘリウムしかありませんから、生物が生まれる余地はないのです。つまり、われわれ全員がかつてどこかで超新星爆発を経験した物質でできているのです。

今は星のスケールでの話でしたが、銀河全体で考えると、いろいろな場所で超新星爆発が起こったり、それ以外にも高温ガスを供給する様々な現象が起こっていると考えられます。観測によって明らかになってきたのは、天の川銀河の中心あるいは円盤に沿って、温度が数千万度の非常に高温のガスが存在するという点です。

左の図はすざくが撮影した銀河中心付近のX線写真です。もっとも明るいところが銀河中心で、図中の一目盛りが35光年に相当しています。銀河中心が明るいのはともかくとして、全体的にぼうっと広がって光っていますが、これが銀河中心付近に存在している温度数千万度の高温ガスです。この高温ガスがどのようにしてできたかということは、実はまだよく分かっていません。

さらに銀河全体に目を向けていると、至るところに温度が数百万度の高温の星間ガスが存在しています。右の図は、ドイツのローサット衛星が全天を観測して作った軟X線（エネルギーの低いX線）の全天写真です。中心付近に見えているのは「バルジ」と呼ばれている銀河の中心付近のちょっと膨らんだ領域からの強い軟X線放射です。バルジを取り囲む形で、不完全な円環（ループ）構造が見られますが、これはおそらくわれわれの近くにある超新星の名残だろうと考えられています。それ以外にいくつか明るく見えている小さな構造は、すべて超新星残骸です。これらの構造以外の青や紫のところからはX線がきていないわけではなく、弱いのですがX線がきています。つまりバルジや超新星残骸などの天体からだけではなく、至るところからX線がやってきているのです。これらは温度が数百万度の高温の星間ガスからの放射であると考えられています。量としては少ないのですが、そういった高温星間ガスが銀河全体にわたって存在していることが分かってきました。

起源はさまざま、もしくはまだよく分かっていないのですが、星の進化や構造形成の結果、銀河の至るところにこういった高温ガスが存在しています。われわれの銀河が特殊なのではないかと思われるかもしれませんが、決してそうではありません。むしろわれわれの銀河はごくありふれた存在で、もっとすごい銀河が宇宙にはたくさん存在しています。

この写真は「M82 銀河」（メシエカタログの82番めに登録されている銀河）と呼ばれている、おおくま座にある銀河です。この写真はX線・可視光・赤外線の写真を重ねたものなのでやや分かりにくいですが、左下から右上にかけて白く光っている領域がM82銀河の円盤です。この銀河は星形成が爆発的に起きていることでよく知られています。つまり、われわれの銀河と比べると、ずっと高いレートで星がどんどん作られています。今非常に活動の盛んな銀河です。

この銀河から写真の左上と右下に向かってガスが噴き出しています。青く見えているのがX線で、温度が数百万度のガスです。赤く見えているのが温度が1万度程度の水素ガスで、この辺に赤く見えているのが塵（ちり）です。つまり、百万度の高温ガスと、1万度

の水素ガスと、冷たい塵が一緒くたになって宇宙空間にわーっと放出されている様子を示しています。爆発的に星形成が起きると、当然超新星爆発もたくさん起きます。その結果吹き飛ばされた物質が、銀河の外に向かって風のように噴き出します。そういったことが実際に起きている銀河が存在しています。

これまでに述べたことは、銀河における物質の循環としてとらえることができます。星は星間物質から生まれ、さまざまな重元素を合成し、超新星爆発でもっと重元素が作られます。重元素を含んだ高温ガスは惑星状星雲や超新星残骸という形でまき散らされます。星によっては一部がブラックホールや中性子星、白色矮星といった非常に密度の高い天体として残されます。大部分はまた宇宙空間にまき散らされて戻っていきます。そういったガスは重元素を含んだ星間物質となり、その一部は星形成の材料となります。一部のガスは銀河の外に放出されていきます。

銀河の外には星がないので重元素は存在しないはずですが、そういったところでも重元素が見つかっています。それはなぜかという、銀河の中で作られた重元素が銀河の外に放出されて、銀河の外の空間を「汚染」しているからです。汚染というのもちよっと変ですが、水素とヘリウムしかなかったきれいなガスを汚すというニュアンスでしょうか。

宇宙の巨大構造

「銀河団」と呼ばれる天体があります。数百万光年の広大な空間に数百個の銀河が集まった巨大な天体です。左の写真は「かみのけ座銀河団」と呼ばれる銀河団の中心付近を可視光で見た写真です。白くぼうっと見えているもの1個1個が銀河です。そういった銀河がたくさん集まって銀河団と呼ばれる巨大な天体を作っています。可視光で見ると銀河団は銀河の集まりでしたが、X線観測によって単純に銀河の集まりということでは説明がつかないということが分かってきました。

右がX線で見た写真です。中心が一番明るく、周辺にいくにしたがってだんだん暗くなっています。可視光写真とX線写真でほぼ同じところを見ているのですが、X線写真では個々の銀河が全然見えず、広がったガスが写っています。その温度は1億度くらいです。可視光で見ている限りでは銀河の集団だったのですが、X線観測により、実は銀河団全体が温度が1億度程度の非常に高温のガスで満たされているということが分かってきたのです。

どうしてそんなに高温のガスで満たされているのでしょうか。今お見せした高温ガスの

温度と分布を詳しく調べることによって、高温ガスを閉じ込めている質量の分布が分かります。もう少し平たく言うと次のようになります。ここに銀河団の高温ガスがあり、中心が明るくて、周辺に行くほどだんだん暗くなっています。この高温ガスは、例えば重力の容器の中に閉じ込められています。高温ガスの分布を詳しく調べることで、重力の容器がどんな形をしているのかが分かります。この重力の容器は質量の分布によって作られているので、重力の容器の形が分かれば、質量がどう分布しているかが分かるのです。

そういう観測が幾つも行われて、そこから分かってきたことは、高温ガスの10倍ぐらいの見えていない質量がないと重力の容器が作れないということです。つまり、X線で見えている高温ガスの10倍ぐらいの見えていない質量が存在しているのです。目に見えない暗い物質ということで「暗黒物質（ダークマター）」と呼ばれています。暗黒物質の存在は可視光の観測からも独立に分かっています。いろいろな観測から、目に見えている物質の数倍から10倍ぐらいの質量がないと辻褄が合わないことが分かってきたのです。

銀河団よりもさらに大きなスケールで宇宙を見ると、現在の宇宙では物質が蜘蛛の巣状に分布していることが分かってきました。これらの図は計算機シミュレーションによって得られた宇宙の大規模構造の様子を示していますが、緑や赤の明るいところは物質がたくさんあるところ、暗いところは何もありません。物質はこのように蜘蛛の巣のような形で集中して存在して、その真ん中にはほとんど何もありません。

先ほど話したように、銀河団の構造は、高温ガスや星・銀河ではなく、暗黒物質（ダークマター）によって決まっています。それはさらに巨大な構造でも同じで、構造自体は暗黒物質の分布で決まっています。

左の図はシミュレーション計算による暗黒物質の分布です。赤・黄色のところは暗黒物質の密度が高く、緑のところでは少し下がって、青、黒とだんだん密度が下がっていきます。一方、普通の物質の半分以上は、暗黒物質の重力にとらえられた際に、数百万度に加熱されると考えられています。右の図は、高温ガスの分布を示しているのですが、ちょうど暗黒物質の分布に沿って存在していることがわかります。特に密度が高いところ、つまりこの図の中で特に明るいところが銀河団に相当しています。

ここまではまだ多少なりとも理解しやすい話だったのですが、今度はわれわれ天文学者にとっても謎に満ちた話です。最近になっていくつかの観測事実から、「宇宙の膨張は加速している」ことが分かってきました。そこからどういうことが分かってきたかという、われわれが知っている普通の物質は全体のわずか4%しかなく、暗黒物質が23%を占めて

います。そして残りの73%は「暗黒エネルギー」と呼ばれる、正体不明の謎のエネルギーなのです。

暗黒物質はまだ観測にかかっていないけれども、未知の素粒子ということで説明がつくのでしょうか、暗黒エネルギーについてはまだ全く分かっていません。ただ、とにかく暗黒エネルギーが存在して、宇宙の膨張を加速していることが、最近はっきりしてきたのです。

ちなみに普通の物質は4%しかないのですが、われわれの周りを見回すと、そのうち可視光で見える星や銀河などは1割程度、X線で見えるような高温ガスは1~2割、残りは実はまだ見つかっていません。この残りのほとんどが蜘蛛の巣状に高温ガスとして存在していると考えられているのです。

宇宙の果て(?)

「宇宙の果て」というのはちょっとおこがましいので「(?)」をつけておきました(笑)。最近はずばる望遠鏡をはじめとする大型望遠鏡がたくさん作られ、宇宙年齢137億年に対して、130億年くらいかなたの宇宙が観測されるようになってきています。宇宙がビッグバンで生まれてから最初にできた星、あるいは最初のブラックホール、あるいは最初にできた銀河を観測するためにはどうすればよいかということが現在真剣に議論されており、近い将来、実際に観測されることになるでしょう。

これはハッブル宇宙望遠鏡で得られた、「ハッブル深宇宙探査領域」の写真ですが、この中には130億年くらい離れた、非常に遠い銀河も含まれています。心なしかいびつな形をした銀河がたくさん写っているようにも見えます。宇宙初期のまだ形成途中の銀河が徐々に見え始めてきているのかもしれませんが、宇宙初期については、現在どんどん研究が進められています。

今の話は可視光で、X線ではまだそこまで遠くは見えていないのですが、X線、あるいはガンマ線の分野で宇宙の果てで起こっている現象として、「ガンマ線バースト」を紹介しておきたいと思います。これは宇宙の果てで起きている大爆発現象です。左の図はガンマ線バーストにおけるガンマ線強度の時間変化を表しています。時刻0でガンマ線バーストが観測され始め、その後激しく変動して、5秒ぐらいで終わっています。ガンマ線バーストとはこのような非常に突発的なガンマ線の爆発現象です。1日1回ぐらいの割合で観測されています。

ガンマ線バーストは 1960 年代に発見されましたが、ガンマ線観測では天球上での位置（方向）を正確に決めることが難しく、90 年代の半ばまでは、これが宇宙の果てで起きているのか、われわれのごく近くで起きているのか、はっきりしていませんでした。最近になってガンマ線バーストに付随する X 線残光と呼ばれる現象が観測されるようになりました。ガンマ線は一瞬なのですが、X 線は 1 日ぐらい輝き続けます。ガンマ線に比べて X 線の方がはるかに高い精度で天球上での位置を決めることができます。X 線残光が見つかったことによって発生方向が正確に決まるようになり、その方向を可視光で精密に観測することによって、例えばその方向に銀河がある、といった新たな情報が得られ、最終的に宇宙の果てで起きていることがはっきりしたのです。

ガンマ線バーストの発生メカニズムについてはまだはっきりしていませんが、宇宙初期に作られた非常に重い星の超新星爆発、あるいは高密度天体（中性子星やブラックホール）同士の衝突ではないかと言われています。これはガンマ線バースト発生 of の想像図ですが、何か大変な現象が起きてそこからジェットが噴き出しており、それをわれわれが見ると、ガンマ線バーストとして観測されると考えられています。宇宙初期の天体や環境を調べるという点からも非常に注目されています。

まとめと将来計画

まとめです。X 線天文学によって明らかになってきた高温、高エネルギー現象をざっと見てきました。X 線天文学が始まる前は宇宙は冷たいというのが一般的な考え方でしたが、今ではあらゆるところで X 線を出す天体が観測されています。そして、われわれがよく知っている普通の物質の半分以上は百万度以上の高温物質であると考えられるようになっています。

宇宙には X 線を放射する天体が多数存在しています。天体としてはいろいろありますが、高温になるメカニズムは主に二つ考えられます。一つは非常に強い、もしくは巨大な重力源に物質がとらえられて、その重力エネルギーによって加熱されるというものです。例えばブラックホールや銀河団が、これに当たります。また、普通の物質の半分以上は同様のメカニズムにより数百万度にまで加熱されていると考えられています。もう一つは、そろった運動をしているガスが、壁にぶつかることによって乱雑な運動に変わり、それによって加熱されるというものです。超新星残骸などがこれに当たります。

宇宙にはこういう高温、高エネルギー現象がたくさんありますが、X 線天文学によって

分かってきたのは、そういう熱いところと冷たいところが実は密接に関係しながら宇宙が進化を遂げてきたということです。それによって今の宇宙があるのです。X線天文学は、ちょっと大げさな言い方かもしれませんが、人間の宇宙に対する認識を大きく変えてきたと言っても過言ではないと思います。以上が今日の話のまとめです。

最後にちょっと宣伝を兼ねて、X線天文衛星の将来計画を二つご紹介します。一つは「NeXT (ネクスト)」衛星計画です。すざくに次ぐわが国6番目のX線天文衛星として、2013年ごろの打ち上げを目指して計画が進められています。銀河団の高温ガスの運動の様子を正確に測定することと、巨大ブラックホールと銀河形成の関係を解明していくことを大きな科学的目標としています。

もう一つはヨーロッパと日本の国際協力による「XEUUS (ゼウス) 計画」で、大口径のX線望遠鏡により、宇宙初期の第一世代の巨大ブラックホールを見つけることを科学的目標としています。言ってみれば「X線のすばる望遠鏡」です。大口径のX線望遠鏡を実現するために望遠鏡と検出器(X線カメラ)を別々の衛星とし、両者を40m程度離して編隊飛行させます。打ち上げ目標は2020年ごろです。2020年打ち上げというわけにはいかないかもしれませんが、今後20~30年のうちには最初の巨大ブラックホールが見えるようになることでしょう。

以上で私の話を終わりにさせていただきます。ありがとうございました。

質疑応答

(質問) 宇宙はどのような速度で膨張しているのですか。

(藤本) 膨張速度(銀河の後退速度)は地球からの距離によって変わります。地球からの距離に比例して後退速度は大きくなります(ハッブルの法則)。遠方に行くほど後退速度が大きくなるので、あるところから先は見えなくなってしまいます。

(質問) この宇宙に人間のような生物は存在するのでしょうか。

(藤本) 今のところ存在するという証拠は見つかっていませんが、宇宙にはそれこそ天文学的な数の星があり、その中には生物が住める環境を持った惑星があって、生物が存在していてもおかしくはないと思います。私は存在する方が自然なのではないかと思います。