

22 原子の線スペクトル

天体から発して宇宙空間を旅し地球に到来する放射には、量子力学的な原因にもとづくいくつかの過程によって、ある特定の波長で放射が強かったり（輝線）、逆に、ある特定の波長で弱かったり（吸収線）する（図17・5）。そのような線スペクトル中でも、原子の形成する線スペクトルは、現代天文学の礎を築いたもっとも重要なスペクトルの一つである。

22.1 原子スペクトル

量子力学的な理由によって、原子核と電子からなる原子にはとびとびのエネルギー状態しか許されない。その状態が変化する際には、その原子特有の波長の光を放出あるいは吸収するので、その結果、ある特定の波長で放射が強かったり弱かったりする線スペクトルが形成される。このような過程で生じるものが原子スペクトル（atomic line spectrum）である。また、特定の波長で光が強い場合を輝線（emission line）、特定の波長で光が弱い場合を吸収線、暗線（absorption line）という。

原子（atom）は、陽子（proton）や中性子（neutron）からなる原子核（nuclei）とその周囲に束縛された電子（electron）からできている（図22・1）。原子を特徴づけるのは、原子核に含まれる陽子の個数（すなわち原子核の電荷数）を表す原子番号 Z （atomic number）と、原子核に含まれる陽子と中性子の総数（原子核の質量に比例する）質量数 A （mass number）である。また陽子の数と電子の数が同じで全体として電荷が中和しているものを中性原子（neutral atom）、陽子より電子が少ないものが電離原子 / イオン（ion）である。

原子に結合している電子は、量子力学的な理由によって、エネルギー準位（energy level）と呼ばれるとびとびのエネルギー状態しか取ることができない。エネルギー準位の中で、もっともエネルギーの低い状態を基底状態（ground state）、それ以外の状態を励起状態（excited state）という。これらのエネルギー状態は、量子数と呼ばれる自然数で番号付けられる。また電子が原子の束縛を離れた状態が電離状態（ionized state）で、原子に束縛されていない電子を自由電子という。

図 22.2 光子の放出と吸収

さらに光を放出したり吸収したりして、さらに、基底状態や励起状態、電離状態の間を移り変わることを遷移（transition）と呼ぶが、遷移する際には、それぞれの状態のエネルギー差に応じた光を、放出あるいは吸収する（図22・2）。たとえば、高いエネルギー準位（エネルギー E_2 ）から低いエネルギー準位（エネルギー E_1 ）に遷移するときは、

図 22.1 水素原子と鉄原子のモデル

(1) エネルギー準位

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (22.1)$$

という振動数 ν の光を放出するし、逆に、振動数 ν の光を吸収して、 E_1 準位から E_2 準位に遷移する。電離状態のエネルギーは任意の値が取れるので、束縛状態間の遷移：束縛 - 束縛遷移 (bound-bound transition) では特定の波長の光子が吸収・放出され、束縛 - 自由遷移 (bound-free transition) や自由 - 自由遷移 (free-free transition) では任意の波長の光子が吸収・放出される。

問 22.1 水素 H、ヘリウム He、鉄 Fe の原子番号 Z および核子数 A はいくらか。

問 22.2 24 個の電子が電離した鉄原子を、ヘリウムの鉄原子という。なぜだろうか？

(2) リュードベリの公式

束縛 - 束縛遷移で吸収あるいは放出される光子の波長 λ (あるいは振動数 ν) は、リュードベリの公式 (Rydberg formula) で与えられる：

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = Z^2 R_y \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad (22.2)$$

ここで Z は原子番号で、また n と n' はエネルギー準位を指定する量子数で $n < n'$ なる自然数である。さらに R_y はリュードベリ定数で、

$$R_y = 1.09737 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad (22.3)$$

という値をもつ。

なお、リュードベリ定数は、量子力学の理論からは、

$$R_y = \frac{1}{1 + m/M} \frac{2\pi^2 m e^4}{c h^3} \quad (22.4)$$

と表される。ただし M と m はそれぞれ原子核および電子の質量 ($= 9.1094 \times 10^{-28} \text{ g}$; m/M は通常無視できる) e は電子の素電荷 ($= 4.8032 \times 10^{-10} \text{ esu}$) c は光速 ($= 2.9979 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$) h はプランク定数 ($= 6.6261 \times$

10^{-27} erg s) である。

図 22.3 水素のスペクトル線

とびとびの波長 (振動数) をもつ線スペクトルの並びは、それぞれの原子特有の規則正しいものになる (図 22.3)。これをスペクトル系列という。スペクトル系列には名前がついていて、 $n = 1$ と $n' (> n)$ の状態間の遷移に対応する線スペクトルをライマン系列 (Lyman series)、 $n = 2$ と $n' (> n)$ の間をバルマー系列 (Balmer series)、 $n = 3$ と $n' (> n)$ の間をパッシェン系列 (Paschen series) 等と呼ぶ。水素原子の場合、ライマン系列は紫外域、バルマー系列は主として可視域、パッシェン系列は赤外域にくる (図 22.4)。そして、波長の長い方から、ライマン系列は $L\alpha$ 、 $L\beta$ 、 $L\gamma$ 、バルマー系列は $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 $H\gamma$ 、そしてパッシェン系列は $P\alpha$ 、 $P\beta$ 、 $P\gamma$ 等と呼ぶ。

図 22.4 水素のスペクトル系列

問 22.3 水素原子 ($M =$ 陽子の質量) ヘリウム原子 ($M =$ 陽子の質量の 4 倍) 重元素 ($m/M = 0$) の場合について、リュードベリ定数を計算せよ。

< スペクトル >

問 22.4 リュードベリの公式を用いて、水素原子のライマン系列、バルマー系列、パッシェン系列の波長を計算せよ。

問 22.5 基底状態の水素原子が電離する際 ($n = 1$, $n' = \infty$) に、吸収される光の波長およびエネルギー (eV で) を計算せよ。このエネルギーを水素の電離エネルギー (ionization energy) という。

問 22.6 鉄原子の特徴的な輝線である、 $K\alpha$ 線 ($n = 1$, $n' = 2$) と蛍光輝線 ($n = 1$, $n' = \infty$) のエネルギーを keV 単位で求めよ。これらの鉄輝線スペクトルは、X線星や活動銀河核でしばしば検出されている。

図 22.5 主系列星のスペクトル (岡山天体物理観測所 & 栗野他『宇宙スペクトル博物館』)

22.2 星のスペクトル分類

人の顔が一人ひとり違うように、星の容貌 - スペクトル - も一つひとつ異なっている。しかし、そのような見かけ上多種多様な星々も、スペクトルにおける共通の特徴によって分類することができる。

星の内部では光の分布はほぼ黒体輻射で近似できるが、外層大気で種々の吸収などを受けるため、最終的に観測されるスペクトルは星によって千差万別なものとなる (図 22.5)。

19世紀の終わり頃から、スペクトルに現れる特徴的な吸収線や輝線に着目して星の分類が試みられ、A型、B型、...など、いわゆるスペクトル型 (spectral type) が決められた。その後、20世紀に入って原子物理学が進展すると共に、恒星大気で起こっている物理現象の解明も進み、スペクトル型と星の表面温度 (有効温度) が密接に関係していることが分かった。その結果、現在では、表面温度の順にスペクトル型を並べて、

O - B - A - F - G - K - M

としている。

表 22.1 星のスペクトル分類

スペクトル型	表面温度 [K]	スペクトル線の特徴
O	50000-30000	電離ヘリウムおよび高階電離の酸素、炭素、窒素の線がある。水素の吸収線は比較的弱い。
B	30000-10000	中性ヘリウムの吸収線がもっとも強い。水素の吸収線も強くなる。
A	9700-7500	水素の吸収線がもっとも強い。電離金属 (鉄やカルシウムなど) の吸収線が現れ始める。
F	7300-6000	電離カルシウムの H、K 線など金属線が強くなる。水素の吸収線は弱まる。
G	6000-5300	電離カルシウムの吸収線が水素の吸収線より強くなる。分子による吸収帯が次第に強くなる。
K	5300-4000	中性金属の吸収線が強く、水素線は比較的弱い。分子の吸収帯がある。
M	4000-3000	中性金属の吸収線が非常に強い。酸化チタンによる吸収帯が強くなる。

このような星のスペクトル分類は、ハーバード大学のグループによって集大成されたので、今日、ハーバード分類として知られている。¹ 上の大分類に加えて、各スペクトル型を 10 段階に分ける細分類も使われる。たとえば、B 型の場合、より高温の O 型に近い B0 型から、A 型に近い B9 型まで細分する。

各スペクトル型の表面温度とスペクトル線の特徴を表に示す。

またふつうの星のスペクトル線はたいてい吸収線だが、星の周辺に広がった星周ガス領域をもっているタイプの星では、吸収線ではなく輝線スペクトルが出ていることがある(図 22・6)。その種の星は高速自転している A 型星や B 型星であることが多く、たとえば B 型星で輝線スペクトルを示す星は B 型輝線星(Be star)と呼ばれる。ここで、Be の e は emission line(輝線)の e である。

図 22.6 B 型輝線星のスペクトル(岡山天体物理観測所&栗野他『宇宙スペクトル博物館』)。ふつうの星では暗い吸収線のところが、白い輝線になっているのが特徴。

22.3 星の運動

天体のスペクトルを調べることによって、天体を構成している物質の組成、温度や密度などの物理状態、そして運動状態など、さまざま

¹ハーバード分類の覚え方として有名なのが、

Oh! Be A Fine Girl, Kiss Me, Right Now, Sweet!

である。字余りだが、昔は、R 型、N 型、S 型などがあったため。

まなことがわかる。たとえば、スペクトル線の偏移からは、星や天体の運動状態がわかる。

図 22.7 星の空間運動

宇宙空間の中で 1 個の星(他の天体でも構わない)が、地球から観測してある方向に運動しているとしよう(図 22・7)。星の運動速度ベクトルと地球(観測者)を含む平面内では、星の運動速度ベクトル v は、視線方向のベクトル v_r と接線方向のベクトル v_t とに分解される。

このうち、接線方向の運動については、十分に時間をかけて観測すれば、原理的には、接線方向に移動した見かけの角度 μ を測定することができる(実際には、天体の距離が遠くなるほど測定は難しくなるが)。この接線方向の運動および移動した見かけの角度 μ を固有運動(proper motion)と呼んでいる。星までの距離を r とすると、接線方向の移動の実距離は μr になるので、移動に要した時間を t と置けば、接線方向の速度 v_t は、

$$v_t = \frac{\mu r}{t} \quad (22.5)$$

となる。

図 22.8 星のスペクトル線の偏移

一方、視線方向の運動については、位置の変化を直接測定することはできないが、ドップラー効果によるスペクトル線の偏移から、視線方向の速度：視線速度 (radial velocity) を導くことができる。すなわち、星のスペクトルを観測して、水素でもヘリウムでもいいが、あるスペクトル線の波長が同定できたとする (図 2 2 ・ 8)。そのスペクトル線の波長が本来は λ_0 であるものが、観測された波長が λ だったとすると、スペクトル線の偏移の大きさを表す量、赤方偏移 (redshift) z は、

$$z \equiv \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (22.6)$$

となる。赤方偏移が正ならば星は遠ざかっており、負ならば星は近づいている。また光のドップラー効果の性質から、視線速度を v_r (遠ざかる向きを正とする)、光速を c とすると、

$$z = \frac{v_r}{c} \quad (22.7)$$

となる。したがって、視線速度 v_r は、

$$v_r = cz = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} c \quad (22.8)$$

となる。

連星の場合も同じような方法で、公転運動などを解析することができる。

問 22.7 こと座 星ヴェガの赤方偏移は-0.00004667である。視線速度はいくらか。

問 22.8 おおいぬ座 星シリウス視線速度は -8km/sである。赤方偏移はいくらか。

22.4 降着円盤の輝線スペクトル

夜空で突然明るく輝き始める新星。X線で見える爆発現象を起こす X線バースター (§ 19)、ブラックホール候補はくちょう座 X - 1 (§ 21)。現在では、これらの活動的な天体は近接連星系 (§ 5, § 15) の一員であり、その活動現象の黒幕は、降着円盤 (accretion disk) と呼ばれる天体であることが解明されている

(§ 13 参照)。降着円盤はまた、電波銀河 (§ 20) やクェーサー (§ 21) などの活動銀河でも中心的な役割を果たしている。

図 22.9 近接連星系における降着円盤の描像

(1) 近接連星系における降着円盤の形成

近接連星系ではお互いの星は強く影響を及ぼし合う (§ 5, § 15)。たとえば白色矮星と主系列星で構成される近接連星系 - 激変星 (cataclysmic variable) の場合、星の質量はあまり違いがないので、それぞれの重力圏 (ロッシュローブ) の大きさは同程度だが、白色矮星の半径は地球くらいしかないので、白色矮星のロッシュローブはほとんど空っぽである。そこで主系列星の方が進化などのため膨張してロッシュローブを満たすと、水素の外層がラグランジュ点 L1 を通って白色矮星のロッシュローブ内に溢れ出す。流れ込んだガスは、連星系の公転運動のために、白色矮星周辺の軌道面内にガスの円盤を形成することになる。ガスは主系列星の外層から次々と供給され、円盤内をほとんど円軌道を描きながらもゆっくりと中心へ向かって落ちていき、最終的に白色矮星の表面に降り積もる。このガスの円盤を降着円盤 (accretion disk) と呼んでいる (図 2 2 ・ 9)。

中性子星またはブラックホールと通常の恒星から構成される近接連星系の場合も、降着円盤の形成については基本的に同じである。ただし、白色矮星の場合に比べて、中性子星や X線星の方が重力が強いため、さまざまな現象は主として X線の領域で X線星 (X-ray

star)として観測される(§19、§21)。

さて、白色矮星や中性子星やブラックホールのまわりに形成される降着円盤は、一般に幾何学的には薄いものであり、また円盤上の各点では、中心の星からの重力と円盤ガスの回転による遠心力がほぼ釣り合っている。ただし円盤ガスは完全な円運動をしているわけではなく、徐々に中心へ落ちていく。そして重力の勾配を少し落下したぶんだけ、ガスの位置エネルギーは熱エネルギーに転化され、最終的には輻射のエネルギーに転換されて円盤表面から放出される。重力の勾配は中心の天体に近いほど大きいので、ガスの熱せられる割合も中心ほど大きく、したがって中心に近いほど円盤の温度は高い。

らが輝線であるという点と、その輝線の幅が広いということ、さらには図でも顕著なように、しばしばピークが2重になっていることである。輝線であるということから、これらは主系列星や白色矮星の大気で生じたものではなく、周辺に存在する希薄で高温のガスから発したものであることが分かる。そしてその幅が広いことから、それらがドップラー効果で生じたものなら、輝線を放射しているガスは大きな速度分散をもっていることも分かる。さらにこの輝線が2重のピークになっている理由は、輝線を出しているガスの回転運動だと考えられる。つまり円盤の手前に回転している部分から発した輝線は青方偏移し、向こう側へ回転している部分からの輝線は赤方偏移するためだ(図22・11)。これらの特徴から、2重ピークの輝線は、白色矮星の周囲に存在する希薄で高温なガスでできた回転円盤、すなわち降着円盤から出ていると考えられるのだ。

図22.10 うみへび座EX星の輝線スペクトル(Cowley et al. 1981)

(2) 降着円盤の輝線スペクトル

激変星やX線星における降着円盤の存在は、光度曲線、連続スペクトル、線スペクトル、その他、さまざまな観測に現れる。図22・10に示したのはその一例で、矮新星うみへび座EX星の可視光領域のスペクトルである。うみへび座EX星は、約 $0.7M_{\odot}$ の白色矮星と約 $0.16M_{\odot}$ の通常の恒星からなる、公転周期98分の近接連星系である。この天体はX線源としても知られている。

図の横軸は波長、縦軸はスペクトル強度である。激変星のスペクトルには、水素のバルマー輝線やヘリウムやカルシウムなどの輝線が見られるが、その特異な特徴は、まずそれ

図22.11 降着円盤から発した輝線が2重ピークになる理由

で吹き出すガスの噴流だ (図 2 2 ・ 1 3) 。

図 22.13 宇宙ジェットの模式図

図 22.12 降着円盤から発した輝線が
2重ピークになる理由(相対論的な場合)

問 22.9 うみへび座 EX 星の連星間距離はどれくらいになるか？

問 22.10 ピークが 2 重になる理由を、図を描いて説明せよ。

問 22.11 うみへび座 EX 星の場合について、赤方偏移と速度の関係をを用いて、ピークの間隔から速度差がどの程度か見積もってみよ。さらにその速度差と白色矮星の質量から、万有引力の法則を用いて、輝線を放射している領域の典型的な半径を導いてみよ。そしてその半径を、白色矮星の半径や連星間距離と比べてみよ。

22.5 宇宙ジェットと特異星 SS 433

電波天文学や X 線天文学などの発展、観測技術の進歩などによって、宇宙に関する理解が深まるに連れ、さまざまな相対論的天体現象が見つかってきている。その一つが、ブラックホール近傍などから、光速に近いスピード

(1) 宇宙ジェット

中心の天体から、天体をはさんで双方向に吹き出す細く絞られたプラズマの流れを、宇宙ジェット (astrophysical jet) と呼んでいる。

中心の天体は、原始星や中性子星、さらにはブラックホールなどがあるが、その中心天体を取り巻いて降着円盤が存在しており、降着円盤のガスの一部が、ガスの圧力や放射圧や磁場の力などいろいろな原因によって、円盤面と垂直方向に吹き出したものだと考えられている (図 2 2 ・ 1 3) 。

宇宙ジェットは最初、活動銀河 (§20, §22) において発見された。すなわち、クェーサーや電波銀河において、中心核のほんの 1 光年程度の領域から、銀河本体を中心として双方向に、はるか 100 万光年もの長さにわたって銀河間の虚空を貫いて吹き出す電波構造として発見された。また通常の恒星とブラックホールからなる近接連星系においては、ブラックホールの周辺に形成された降着円盤からは、光速の数割もの速度でジェットが吹き出していることが観測されている。星間に広がる分子雲の中で生まれたばかりの原始星周辺からも、双極ジェットと呼ばれる毎秒 10 数 km のガス流が吹き出している (§23) 。

宇宙ジェットや降着円盤は、重力天体の周辺で生じる動的な段階に伴って現れる普遍的

な現象だと思われるようになってきている。

図 22.14 特異星 SS433(大阪教育大学)

(2) 特異星 SS433

天体 SS433 は、わし座の方向、約 3.5kpc の距離にある 14 等級の特異星で、ステフェンソンとサンドリークがわし座の領域を探索して 1977 年に出版した、SS カタログと呼ばれる輝線星のカタログの第 433 番登録天体である(図 22・14)。SS433 と同じ位置には、電波でみると W50 という名の超新星残骸があり、また A1909 + 04 という X 線源でもある。

図 22.15 SS433 のスペクトル(Margon et al. 1979)

1978 年に SS433 の詳しいスペクトルが取られて、その特異性がさらに明らかになった(図 22・15)。図の横軸は光の波長、縦軸は光の強さで、スペクトルには多くの強い輝線と、いくつかの吸収線が見られる。

さて図で $H\alpha$ とか $H\beta$ というラベルを付けた強い輝線は、宇宙では最もありふれた水素原子によって生じたバルマー輝線である。しかし R、B、R'、B' などの波長でこれほど強

い輝線を出すような原子は今まで見つからないのだ! SS433 には未知の輝線を出す新しい宇宙元素が存在するのだろうか? いやもっと自然な考えは、ドップラー偏移で波長がずれたとするものである。

たとえば、輝線 R は、 $H\alpha$ 線を出しているガスがわれわれから遠ざかっているために、放射された時は 656.3nm だったものが、赤方偏移して波長が長くなり、715.4nm で観測されたと考えるわけである。同じく輝線 B は、 $H\alpha$ 線が青方偏移を受けて 643.8nm になったと考えられる。

このようなドップラー偏移による輝線の波長のずれ自体は特に珍しいものではない。ただ SS433 の場合、少しというか物凄く異常だったのは、その偏移の大きさである。宇宙において今だかつてこのような高速の現象は直接観測されたことはなかった。

問 22.12 輝線 R、輝線 B の赤方偏移はそれぞれいくら? 対応する速度はどれくらいか?

図 22.16 スペクトル輝線の時間変化(Margon 1980)

(3) 動くスペクトル線

さらに未知の輝線の波長の時間変化を調べていくと、輝線の移動にきれいな周期性が現れてきた(図 22・16)。図の横軸はユリウス日という過去から通算した日が単位の時間で、また縦軸は輝線の移動量を $H\alpha$ の波長を速度に換算して表したものだ。波長が長くなるほうを正としている。

輝線 R(あるいは輝線 B)に対応する測定点は、きれいなサインカーブに乗っている。二

つの曲線の周期は共に約 164 日であり、しかも輝線 R と輝線 B とは全く対称的に変化している。

問 22.13 時間変化の周期を確認せよ

問 22.14 二つのカーブの対称線に相当する速度は 0 か？0 でないとしたら、何 km になっているか？

図 22.17 SS433 の歳差ジェットモデル

(4) SS433 の運動学的モデル

現在では SS433 は図 2 2 ・ 1 7 のような構造だと信じられている。すなわち中心の天体から反対方向に二つの物質の噴流 - 宇宙ジェット - が噴き出しており、さらにこのジェットの方向は一定ではなく、コマのようにある軸 (歳差軸) の周りに回転しているのだ。観測と合うためには、歳差の軸は地球に対しある角度 ϕ ($\sim 80^\circ$) 傾いており、ジェットはその軸と ψ ($\sim 20^\circ$) 傾いて歳差運動していなければならない。また観測された 164 日の周期はこの歳差運動の周期だと考えられる。さらに大きなドップラー偏移を起こすために、ジェットのガスは毎秒約 78000km、実に光速の 26 % にも及ぶ速度で噴き出していなければならない!

輝線 R は図 2 2 ・ 1 7 のモデルの上側のジェットから放出され、輝線 B は下側のジェットから出てくる。そして図の位置の場合、上方のジェットからの輝線 B は最も青方偏移しており、図 2 2 ・ 1 6 では輝線 B の極小に対応する。また輝線 R は最も赤方偏移していて、図 2 2 ・ 1 6 では輝線 R の極大になる。一方、

図の位置と反対側では、上側のジェットは少し観測者から遠ざかるようになるのでやや赤方偏移となり、下側のジェットは観測者に近付くので僅かに青方偏移となる。

最後に図 2 2 ・ 1 6 で輝線 R と輝線 B が交わる場所ではドップラー偏移が等しい。このときジェットの位置は上側のジェットも下側のジェットもその方向が観測者に対して直角になっている。ところでジェットの方向が観測者に対して直角方向なら、ドップラー偏移は示さないのではないだろうか？しかし輝線 R と輝線 B が交わる場所では、毎秒約 12000km もの速度に対応する偏移がある。これは実は横ドップラー偏移と呼ばれるもので純粋に特殊相対論的な現象なのだ。宇宙の天体で SS433 のように光速に近い速度が観測されたのも初めてだが、横ドップラー偏移が見つかったのも初めてである。

この歳差ジェットモデルは観測事実を非常によく説明できるので、まず疑いの余地はないのだが、このモデルは単に SS433 の状況を説明しただけなので、運動学的モデルと呼ばれている。

いかにして光速の 26 % もの速度が可能なのか？どうして反対方向に噴き出しているのか？そもそもなぜこのようなジェットが形成されたのか？また歳差を起こしているのは何か？SS433 の本体は何か？これらの謎についても少しずつ答えられるようになってきているが、一つの謎が解明されれば新たな謎が生まれる、というのは科学の通例であり、SS433 は今後も多くの謎を生んでいくだろう。

22.6 活動銀河とクェーサー

クェーサーをはじめとする銀河の活動現象の発見は、20 世紀後半の天文学の最大の成果の一つだろう。活動銀河の中心には、太陽の数億倍もの巨大なブラックホールと光り輝く回転ガス円盤が存在すると考えられている (図 2 2 ・ 1 8)。活動銀河の研究には、スペクト

ル線の詳細な解析が重要な役割を果たした。

円盤のサイズは数光年程度で、中心近傍の温度は 10 万度程度だと見積られている。

問 22.15 太陽の 1 億倍の質量をもつ超大質量ブラックホールの半径はどれくらいか？

図 22.18 活動銀河中心核の描像

(1) 活動銀河

数千億個の星の集合体である普通の銀河は、星の明るさを合わせた程度の明るさで光っているが、強い電波や X 線は出しておらず明るさが急激に変化したりすることもない。このような通常銀河 (normal galaxy) に対して、中心核がきわめて特異な活動を示している一群の銀河を、活動銀河 (active galaxy) と総称している (図 22・19)。活動銀河の一般的な特徴は、まず (1) 通常銀河に比べてその中心核が 100 倍から 1 万倍も明るい。また (2) 電波や X 線領域で“ 非 ”星起源の放射を出している。さらに (3) 数十日から数百日のタイムスケールで急激に変光する。そして (4) ジェットなどしばしば特異な形状をしている。最後に (5) 超光速現象などときとして相対論的な現象を示す。などだ。

活動銀河の観測事実、とくに膨大な放出エネルギーは、重力エネルギーの解放によって説明されている (図 22・18)。すなわち活動銀河の中心には超大質量ブラックホール (supermassive black hole) が存在していて、その周辺に降着円盤 (§ 13) が形成されると信じられている。降着円盤中をガスが回転しながら落下していく間に、ガスの重力エネルギーが熱エネルギーに変わり、最終的には光のエネルギーとして放射されるのである。超大質量ブラックホールの質量は典型的には太陽の数億倍で数天文単位の大きさで、降着

図 22.19 ケーサー 3C273 (大阪教育大学)

(2) 活動銀河の種類

一口に活動銀河と言っても、現象論的には、いくつかの種類に分類される。

セイファート銀河 (Seyfert galaxy) は、1943 年にカール・K・セイファートが初めて分類したタイプの銀河だが、コンパクトで明るい中心核をもち、しかも幅の広い輝線スペクトルを示す (後の図)。輝線スペクトルの特徴から、1 型セイファートと 2 型セイファートに亜分類される。銀河本体は渦状銀河であることが多い。

電波銀河 (radio galaxy) は、第 2 次世界大戦後、電波天文学の発展に伴って発見されてきたものだが、通常銀河に比べて非常に強い電波を放射している銀河である (§ 20)。スペクトル的には、1 型セイファートに似た広輝線電波銀河と 2 型セイファートに似た狭輝線電波銀河に分かれる。銀河本体は楕円銀河で

< スペクトル >

あることが多い。

めてみると、活動銀河の連続スペクトルは大ざっぱにはべき乗型をしている。このべき乗型スペクトルはシンクロトロン放射あるいは逆コンプトン過程で形成されていると考えられている（§20、§21）。

また連続スペクトルにはしばしば紫外線の領域に膨らみがあるが、この膨らみ部分は黒体輻射的であり、降着円盤からの放射によって説明されている。

図 22.20 ケーサー 3C273 のスペクトル

ケーサー (quasar) は、1963 年にマーチン・シュミットが最初に同定した天体だが、光で観るとまるで星のような点状の天体として観測されるのに、しばしば数日とか数十日のタイムスケールで変光する天体である（図 22・19）。しかもスペクトルには、幅の広い輝線スペクトルが存在し、それらのスペクトル線が大きく赤方偏移している（図 22・20）。ケーサーの実体は、きわめて遠方の活動銀河の明るい中心核である。発見当初は星のような見かけから準恒星状天体と呼ばれたこともあるが、その星とは似ても似つかぬ実体から、ケーサーという名前が新造された。

なおケーサーに似てきわめて明るく、変光および偏光しているが、強い輝線を持たない BLLac 銀河 (BL Lac object) と呼ばれる天体もある。またケーサーの中でも変光・偏光の強いものと BLLac 銀河を合わせて、最近では激光銀河ブレイザー (blazar) と称することも多い。ケーサーやブレイザーの一部は電波銀河でもある。

問 22.16 電波銀河ケンタウルス座 A (NGC5128) の電波の広がり、角度にして約 10° もある。満月がいくつくらい並ぶか？ また赤方偏移は $z = 0.0009$ である。広がりの実距離は何 pc ぐらいか？

(3) 活動銀河の連続スペクトル

電波から X 線にかけてスペクトル全体を眺

図 22.21 セイファート銀河のスペクトル (Blandford et al. 1990)

(4) 活動銀河の輝線スペクトル

活動銀河のスペクトルにはしばしば強い輝線が存在する（図 22・21）。輝線には、水素のバルマー輝線 ($H\beta$, $H\gamma$) やヘリウム輝線 (HeI) のような再結合線と、2 回電離酸素 [OIII] のような禁制線がある。図 22・21 の上は典型的な 1 型セイファートのスペクトルで、下は 2 型セイファートのスペクトルである。1 型セイファートのスペクトルでは再結合線の幅が広く ($\sim 10000\text{km/s}$ の速度に相当する幅をもつ)、禁制線の幅は比較的狭い ($\sim 500\text{km/s}$ の速度に相当する幅をもつ)。一方、2 型セイファートのスペクトルでは、再結合線も禁制線も共に 500km/s 程度の幅しかない。

これらの輝線の生じる機構であるが、まず幅の広い再結合線は、活動銀河の中心から 0.1 光年ぐらいの領域に分布した比較的密度の高い数多くのガス雲から放射されていると考えられている。ガス雲中の原子は中心からの紫

外線放射などによって電離され(光電離)電子が再び結合するときに再結合線が生じる。またガス雲は中心の巨大ブラックホールの周りを激しく運動しており、そのため輝線に広いドップラー幅ができる。この幅の広い再結合線を放出している領域を広輝線領域 BLR (broad line region) と呼ぶ。それに対し、幅の狭い再結合線や禁制線は、もっと広い領域(数十~数百光年)に広がった希薄なガス雲から生じている。中心から離れているためにガスの運動はそれほど激しくなく、輝線のドップラー幅も比較的狭い。この幅の狭い輝線を放出している領域を狭輝線領域 NLR (narrow line region) と呼ぶ。

問 22.17 図の輝線の幅 $\delta\lambda$ をものさしで測って、対応するドップラー速度幅を求めよ。

(5) X線領域のスペクトル線

活動銀河の X 線観測で、X 線領域のスペクトルにも輝線が発見されている。輝線の波長(振動数)は、エネルギーで表すと、 $h\nu \sim 7\text{keV}$ 付近であり、中心波長 6.39keV の鉄輝線だと考えられている。この輝線の発生機構は鉄の蛍光輝線 (fluorescence line) らしい。

鉄の原子数は 26 であり、中性の鉄原子の場合、原子核のまわりには 26 個もの電子をもっている。ガスの温度が上昇したりして鉄原子が電離する際には、通常、外側の電子から剥がれていって電離していく。鉄を含むガスの温度が低ければ鉄原子の電離は起こらない。しかし鉄原子を含む比較的低温のガス中に、外側から高エネルギーの X 線光子が飛び込んでくると、外側の軌道の電子は残したまま、最も内側の軌道の電子を弾き飛ばしてしまう場合がある。その結果、鉄の電子軌道の低エネルギー準位に穴があき、そこへ外側の軌道から電子が遷移してきて、エネルギー差に応じた特性 X 線を放射する。この機構で出てくる X 線を蛍光 X 線と呼んでいる。

このような蛍光 X 線輝線が生じるためには、X 線光子を放射するようなきわめて強い放射源と共に、その近傍に比較的低温のガスが存

在していなければならない。

問 22.18 リュードベグの公式を用いて、鉄原子 ($Z = 26$) について、第 1 励起状態から基底状態に遷移する際に放射される輝線の振動数を、 eV ($1.6 \times 10^{-12} \text{ erg s}^{-1}$) を単位として求めよ。

図 22.22 活動銀河の統一モデル

(6) 活動銀河の統一モデル

活動銀河には多くの種類や亜種があるが、それらを統一的に理解する試みが進んでいる(図 22.22)。

まずセイファート銀河に関して、1 型セイファートは BLR も NLR ももつが、2 型セイファートには NLR しかない、というのが従来の考え方だった。ところが偏光観測などから 2 型セイファートにも BLR が存在することが分かってきた。どうやらセイファート銀河では、中心から 10 光年ぐらいのところに輝線を吸収するガストラスが存在しているらしい。そしてトラスの軸の方からのぞき込んだ格好で BLR も NLR も見えるのが 1 型で、トラスの赤道面方向から見た格好で中心付近の BLR がトラスに隠されたのが 2 型というのが現在の描像である。このように見る方向によって 1 型と 2 型に分かれて見えるというのを、セイファート銀河の統一モデルという。

さらに活動銀河では中心から銀河間の空間に細長いプラズマの噴流 - ジェット - が吹き出ているが、ジェットからも幅広いスペクトルの電磁波が放射されている。重要な点は、ジェットからの光は相対論的効果のために、ジェット

の進行方向に集中している（相対論的ビーミングと呼ばれる）ことだ。そしてクェーサーなどではこのジェットからの光が卓越しており、またプレーザーにいたっては相対論的ジェットを真正面から見ているのではないかと想像されている。このように活動銀河全体を統合するのが活動銀河の大統一モデルである。

22.7 銀河の赤方偏移と宇宙膨張

遠方の銀河のスペクトルを調べると、宇宙全体の構造に関する情報も得られる（図 22・23）。すなわち、遠方の銀河ほど速い速度で遠ざかっているのだ。この銀河の後退運動に関する性質 - ハッブルの法則 - と、宇宙最初期の火の玉の名残である 3K 宇宙背景放射（§18）などが、現在のビッグバン宇宙論を強力に支持する観測的証拠なのだ。

のになる（図 22・24）。すなわち、水素のバルマー線などの位置にしばしば吸収線が見られる。

ところがスペクトル線の観測ではしばしば起こるように、銀河のスペクトルのバルマー線も実験室の波長とはずれた位置で観測されることが少なくない。それも系統的にずれていて、遠方の銀河ほど大きな赤方偏移を示すのである。

図 22.24 いろいろな銀河のスペクトル

図 22.23 遠方の銀河（HST）

（1）遠方の銀河のスペクトル

銀河は数千億の星や大量のガスや塵などが集まった巨大集合体で、見える物質以外にも大量の暗黒物質も存在している（§7）。ただし、光って見えているもの自体は、あくまでも銀河を構成している星の光であり、あるいは希薄な高温ガスから発する光だ。通常の銀河の場合、銀河の光は星の光を足し合わせたものなので、銀河のスペクトルは、銀河を構成している典型的な星のスペクトルに似たも

（2）ハッブルの法則

すでに述べたように（§9）、銀河が暗いほど（すなわち銀河が遠いほど）、赤方偏移が大きい（すなわちより高速で遠ざかっている）、という観測事実は、今日、ハッブルの法則（Hubble's law）と呼ばれている。

再度まとめておくと、銀河の後退速度（recession velocity）を v 、銀河までの距離を r とすると、ハッブルの法則は、

$$v = Hr \tag{22.9}$$

のように表せる。ただし、ここで“比例定数” H は、ハッブル定数（Hubble constant）と呼ばれる定数で、宇宙の膨張の程度を表している。すなわち、ハッブル定数は、1Mpc 彼方での銀河の後退速度 [km/s] の目安になっている。現在では、ハッブル宇宙望遠鏡による遠方銀河の探査や Ia 型超新星の観測などから、

ハッブル定数の値は、

コラム :

$$H = 71 \pm 4 \text{ km/s/Mpc} \quad (22.10)$$

程度だと推測されている。

なお、後退速度 v と赤方偏移 z の間には、 z が 0.1 以下ぐらいで、

$$v = cz \quad (22.11)$$

という近似式が使える、赤方偏移が大きくなると、

$$\frac{v}{c} = \frac{2z + z^2}{2 + 2z + z^2} \quad (22.12)$$

という相対論的な関係式を使わなければならない。

また、普通は上記のように、宇宙膨張を銀河の後退“運動”に置換して捉えることが多いが、実を言えば、銀河は宇宙膨張に乗っているだけであり、局所的な固有運動を除いて、個々の銀河は宇宙に対して“静止”している。だから、ハッブルの法則で考える赤方偏移 z は宇宙論的なものであり、本来は、宇宙の構造を表す式で定義されるものである。

問 22.19 相対論的な場合、後退速度 v と赤方偏移 z の間には、

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} \quad (22.13)$$

という関係が成り立つ。この関係式を逆に解いて、(22.12) 式になることを確かめよ。さらに z が小さい近似で、 $v = cz$ となることを確かめよ。また赤方偏移が 5 の銀河の“後退速度”を求めよ。

23 分子の線スペクトル

いくつかの原子が結合した分子には内部構造があるので、それに応じたエネルギー状態がある。そして内部構造のエネルギー状態が量子力学的に変化するときに、やはり線スペクトルを放出・吸収する。

23.1 分子スペクトル

複数の原子が結合してできた分子は、結合軸のまわりに振動したり回転したりすることができる。量子力学的な理由によって、振動状態や回転状態はとびとびの値しか取れないので、振動状態や回転状態が量子力学的に変化するときに、そのエネルギーの差に応じて線スペクトルを放出・吸収する(図23・1)。これが分子スペクトル線(molecular line)である。あるいは星間の分子が出すときは、星間分子線(interstellar molecular line)とも呼ばれる。

図 23.1 分子のさまざまな状態変化

たとえば、代表的な2原子分子である一酸化炭素COは、炭素原子と酸素原子が結合している。このような一酸化炭素COは、結合軸方向に振動できるが、高振動状態が低振動状

態に遷移するとき、結合軸に垂直な方向に電磁波を放射する。これを振動遷移という。また一酸化炭素は、結合軸に垂直な方向を軸として回転できるが、高速回転状態が低速回転状態に遷移するとき、回転軸と垂直な方向に電磁波を放射する。これを回転遷移という。

代表的な3原子分子である水分子H₂Oも、振動遷移や回転遷移によって電波を放出する。

さらにアンモニア分子NH₃のような立体的な分子の場合は、その構造が反転することによって電磁波(電波)を放射する。これを反転遷移という。

図 23.2 2原子分子の振動エネルギー準位と回転エネルギー準位の模式図

さて、分子を構成している原子自体にも、電子軌道のエネルギー準位があり、エネルギー準位間の遷移によって特定の波長の光が放出・吸収された。したがって、一般的に分子の場合、軌道のエネルギー準位に加えて、振動や回転のエネルギー準位がある(図23・2)。そして軌道の状態の遷移では(原子と同じく)主として可視光から紫外線の波長の光を放出し、振動状態の遷移では主に赤外線的光を放出し、さらに回転状態の遷移では電波を放出することが多い。

たとえば、星間の分子雲(暗黒星雲)は大部分が水素からなっているが、絶対温度で10 Kから50 K程度しかなく非常に低温のため、水素(H)はほとんど水素分子(H₂)になっている。このような温度の低い分子ガス中では、電子軌道の励起よりはむしろ、分子の軸の周りの回転状態の変化に伴う遷移が主になる。まず低温の分子間の衝突によって、分子の回

転状態が変化し、高いエネルギー状態に励起される。そしてその高いエネルギーの回転状態が低いエネルギーの回転状態に遷移するときに光子（電波光子）が放出されるのだ。これが星間分子線である。こうして分子線スペクトルはミリ波を含む電波の観測によって得られるのである（図 23・3）。

分検出できるのである。そして分子スペクトル線を調べることによって、その背後に隠されているさらに膨大な水素ガスの振舞いを知ることができるのだ。

図 23.3 分子スペクトル線

ただしどんな分子でも回転遷移に伴う分子線を出すわけではない。たとえばもっとも多量に存在する水素分子はこの方法では検出できない。水素分子は、2個の水素、すなわち2個の同じ原子からできているため、左右対称な分子である。このような対称性のよい分子では、回転遷移が非常に起こりにくい。が、分子雲中には、一酸化炭素分子（CO）、一硫化炭素分子（CS）、 HCO^+ 、HCN などなど、水素分子以外の分子もいろいろ含まれている。これらの分子は、どれも非対称な分子であるため、回転遷移を起こしやすい。とくに一酸化炭素分子は、分子雲中での分子間の衝突によって、すぐに回転順位の第1励起状態にたたき上げられる。そして回転順位の第1励起状態から基底状態へ落ちるときに、波長が 2.6 mm の光子、ミリ波の電波光子を放出するのである。

分子雲中で、一酸化炭素分子は水素分子の1万分の1程度しか存在しない。氷山の一角よりもさらにわずかである。しかし分子雲自体が、地球の尺度からすれば巨大なものであるため、分子雲全体からみれば取るに足りない一酸化炭素でも、量的には膨大なものになる。その結果、それらの一酸化炭素から放射される波長 2.6 mm の分子スペクトル線は十

図 23.4 アルコール分子

23.2 星間分子

1968年のアンモニア分子の発見を皮切りに、1970年代には、星間空間や暗黒星雲中で、数多くの星間分子（interstellar molecule）が発見された。星間分子の中には、水やアンモニアやアルコールのように、身のまわりの世界でもありふれた分子もある（図 23・4）。一方、 HC_{11} のように長い鎖状になっていて地上ではすぐに壊れてしまう分子や、OHラジカルのように他の原子分子と結びついてしまうため、地上ではほとんど存在しない分子も見つかっている。さらには、 C_{60} フラーレン（ C_{60} -fullerene）のように、理論的に予言され1995年に地上の実験室ではじめて作られた後、星間空間でも発見された分子もある。それら電波で発見された星間分子の一部を主な観測周波数と共に表に示す。

表 23.1 星間分子

分子式	分子名	周波数 [GHz]
H ₂ O	水蒸気	22.235
CO	一酸化炭素	115.271
CS	一硫化炭素	48.991
SiO	一酸化ケイ素	86.243
SiS	一硫化ケイ素	90.772
HNO	ニトロキシル	81.447
H ₂ S	硫化水素	168.763
OCS	硫化カルボニル	97.301
SO ₂	二酸化硫黄	104.029
NH ₃	アンモニア	23.694
HCN	シアン化水素	88.632
HNC	イソシアン化水素	90.664
CCCO	一酸化三炭素	48.108
HNCO	イソシアン酸	87.925
HNCS	イソチオシアン酸	129.013
HCCCN	シアノアセチレン	81.881
CH ₃ CN	シアン化メチル	110.381
CH ₃ CCH	メチルアセチレン	102.548
CH ₂ CHCN	シアン化ビニル	1.374
CH ₃ CCCN	メチルシアノアセチレン	105.469
CH ₃ CH ₂ CN	シアン化エチル	23.964
HC ₅ N	シアノジアセチレン	24.816
HC ₇ N	シアノトリアセチレン	14.526
HC ₉ N	シアノテトラアセチレン	23.698
HC ₁₁ N	シアノペンタアセチレン	4.830
H ₂ CO	ホルムアルデヒド	104.617
H ₂ CS	チオホルムアルデヒド	5.290
CH ₂ NH	メチレンイミン	80.505
NH ₂ CN	シアナミド	36.169
CH ₃ OH	メチルアルコール	1.539
NH ₂ CHO	ホルムアミド	101.139
CH ₃ SH	メチルメルカプタン	73.044
CH ₃ NH ₂	メチルアミン	79.150
CH ₃ CHO	アセトアルデヒド	100.482
HCOOCH ₃	蟻酸メチル	90.118
CH ₃ CH ₂ OH	エチルアルコール	86.224
CH ₃ OCH ₃	ジメチルエーテル	
C ₃ H ₂		
HCO ⁺	ホルミルイオン	89.189
HN ₂ ⁺	ジアジニルイオン	93.174
HCS ⁺	チオホルミルイオン	128.021
CH	メチリジン	3.335
CN	シアンラジカル	113.491
NO	一酸化窒素	150.547
NS	硫化窒素	215.571
OH	ヒドロキシラジカル	1.667
SO	一酸化硫黄	86.094
CCH	エチニルラジカル	87.317
HCO	ホルミルラジカル	86.671
CCCH	プロピニルラジカル	
CCCN	シアノエチニルラジカル	98.940
C ₄ H	ブタジニルラジカル	28.532

23.3 双極ジェット

暗黒星雲の中では、今でも星が生まれている。星間物質から星が生まれることは、すでに1930年代からわかっていた。しかし一口に星間物質といっても、実はいくつかの相がある(§19)。これら星間物質のいくつかの相のうち、暗黒星雲こそが星の母体であるという明確な認識が得られたのは、1970年代から1980年代にかけてである。とくにミリ波領域での星間分子スペクトルの観測や赤外線観測によって、生まれたばかりの原始星がその姿を次々と現してきたことが大きい。星の誕生の解明と共に明らかにされてきたことが、星の誕生にまつわる劇的な現象 - 双極ジェット (bipolar jet) である。生まれたばかりの星は、星の一生からすれば非常に短い期間ではあるが、きわめて激しく質量を放出しているのがある。そして放出されたガスは、正反対の方向に噴出しているのである。この原始星からの双極ジェットは、活動銀河のジェットや SS433 ジェット (§20, §21) と並んで、宇宙ジェット現象として大きな注目を浴びてきている。

図 23.5 暗黒星雲 L1551

図 23・5 は、電波で見た暗黒星雲 L1551 の CO 分子スペクトル線写真である。中心の原始星 (+ 印) から図の左上と右下双方向に、CO 分子線を出しているガスが写っている。中心の原始星は、赤外線で見えられたことから、IRS5 (赤外線源 5) と呼ばれているが、おそらく太陽の 30 倍くらい明るく輝いている生まれたばかりの星である。また図の左上の部分は、スペクトル線のうち赤方偏移側の成分すなわち遠ざかっている成分のみで見ても

のである。一方、図の右下の部分は、青方偏移側の成分すなわち近づいている成分のみで見たものだ。これらから、L1551では、分子線を放射しているガス雲は、中心の原始星から飛び出す方向に運動していることがわかった。さらに、このL1551双極ジェットの様子は約3光年であり、原始星に対する流れの速度は秒速約15 km、流れに含まれるガスの総質量は約0.3太陽質量と見積られている。

このような双極ジェットは、すでに何十例も観測されている。それらの観測例から、双極ジェットに関して、以下のような共通した特徴が浮かび上がってきた。

まず双極ジェットの中心には、必ず赤外線星があって、そこから反対方向に分子ガスが2つの超音速流の形で流れだしている。双極ジェットの長さは、0.1光年ないし数光年程度で、L1551などでは細長くきれいに伸びた流れになっている。双極ジェットの速度は、遅いものでは秒速数kmから、速いものでは秒速100 kmにまでなるが、典型的には、秒速10 kmから数十kmほどである。CO分子スペクトル線やその他の分子スペクトル線の観測から、双極ジェットで吹き出ている分子ガスの質量は、太陽質量の0.1倍から100倍程度であると見積られている。すなわち生まれる星と同じかそれ以上の質量が、双極分子流として吹き飛ばされているのである。温度は絶対温度で10 Kから50 Kくらいである。また双極ジェットの長さをジェットの速度で割れば、双極ジェットの年齢が大ざっぱに求められる。そうして求めた双極ジェットの年齢(寿命)は、大体、1000年から10万年、典型的には1万年程度である。

最後に、双極ジェットは、原始星をとりまくガス降着円盤から垂直方向に吹き出してい

る(図22・6)。

図 23.6 双極ジェットの模式図

< スペクトル >

コラム：メガメーザー

++++

原子あるいは分子を、何らかの方法によって、エネルギーの高い状態に大量に押し上げておくことができれば、適当な電磁波の刺激によって、エネルギーの高い状態から低い状態に雪崩的な遷移が起こり、きわめて強い電磁波の放出を起こすことができます。このプロセスは、マイクロ波領域では、誘導放射のマイクロ波増幅 (microwave amplification by stimulated emission of radiation) の頭文字を取って、メーザー (maser) と呼ばれます。天体からは、水 H₂O、水酸基 OH、メタノール CH₃OH、一酸化ケイ素 SiO などを起源とするメーザーが発見されており、赤色巨星、星形成領域、ブラックホール周辺の降着円盤で発生していると考えられています。

有名な例は、Sbc 型の渦状銀河 NGC4258 (M106) で、水メーザーの観測から、中心に太陽質量の 4000 万倍くらいの巨大ブラックホールが存在していることもわかっている。また 2 型セイファートで LINER でもある銀河 NGC3079 などでも水メーザーが観測されていて、2003 年 2 月現在では 30 天体ぐらいで水メーザーの観測が受かっている。これらの水メーザー放射はかなり大きなものなのでメガメーザー (megamaser) などと呼ばれることもある。

++++

24 中性水素の 21cm 線スペクトル

中性水素は、軌道エネルギー準位の遷移によるスペクトル線以外に、スピン状態の遷移によって、21 cm の波長の電波を放出する。

24.1 中性水素 21cm 超微細構造線

水素原子は、1 個の陽子とそのまわりを回る 1 個の電子からできている。陽子や電子のような物質を構成する基本単位を素粒子というが、それらはそれぞれ、決まった質量とか電荷をもっている。そして、それ以外に、スピン (spin) という性質ももっている。この素粒子のスピンというものは量子力学の世界に特有のもので、身の回りの世界には似たものがないのだが (素粒子が自転しているわけではない) 2 つの状態があり、それぞれ、上向きのスピンとか下向きのスピンとかいう。

図 24.1 中性水素の超微細構造遷移

さて水素原子の場合は、そういうミクロの状態で見れば、上向きのスピンをもった陽子のまわりを“上向き”のスピンをもった電子が回っている水素原子と、上向きのスピンをもった陽子のまわりを“下向き”のスピンをもった電子が回っている水素原子がある。そしてときたま、上向き陽子 + 上向き電子の状態にある水素原子が、上向き陽子 + 下向き電

子の状態に変化することがある。これを超微細構造遷移と呼ぶ(図24・1)(上向き+上向き)状態と(上向き+下向き)状態では前者の方がエネルギーがわずかに大きいため、この超微細構造遷移が起こると、余剰のエネルギーを電波の形で放射する。この余剰のエネルギーの大きさは決まっており、放出される電波の波長は、

$$\text{波長 } \lambda = 21.106114 \text{ cm}$$

あるいは

$$\text{振動数 } \nu = 1420.40575 \text{ MHz}$$

という特定の波長/振動数になる。これを中性水素 21 cm 超微細構造線、あるいは短く中性水素 21 cm 線と呼ぶ。

一個一個の水素原子で見れば、このような変化の起こる確率は非常に小さいのだが、宇宙に存在する水素ガスの場合は、たいていきわめて多量にあるために、全体としては、放射される 21 cm 電波の強さは地球でも受信できるくらいの結構なものになるのである。

24.2 われわれの銀河系

中性水素原子の出す 21 cm 電波を調べることによって、たとえば銀河系の中に存在する水素ガスの分布がわかる(図24・2)。われわれの銀河系内の中性水素ガスは、おおむね渦巻状に分布しているように見えるが、細かく見るとかなり複雑な分布になっていることがわかる。

図 24.2 銀河系における中性水素ガスの分布

24.3 アンドロメダ銀河 M31

系外銀河についても、中性水素ガスの分布や運動状態(回転曲線)がわかる。たとえば、近傍のアンドロメダ銀河 M31 について、中性水素ガスの分布と速度場を示す(図24・3、図24・4)。

アンドロメダ銀河 M31 の中性水素ガスは、リング状の領域に分布しており、中心部では減少しているように見える(図24・3)。これは、中心部では大部分の星間ガスは星になってしまっており、星間ガス自体が減少していることを意味している。一方、水素ガスの豊富なリング状の領域では、現在でも星が活発に形成されている。

図 24.3 アンドロメダ銀河 M31 における中性水素ガスの分布

図 24.4 アンドロメダ銀河 M31 における中性水素ガスの速度分布

また銀河の回転の様子も中性水素ガスの観測からわかる(図24・4)。扁平な円盤状の渦状銀河は、中心のまわりをゆっくりと回転している(太陽は銀河系中心のまわりを約2億年で一周している)。このような渦状銀河や円盤銀

< スペクトル >

河の回転を銀河回転 (galactic rotation) と呼び、銀河の中心からの距離の関数として銀河回転の速度を表したものを回転曲線 (rotation curve) と呼んだ (§7)。

たとえば、観測者に対して銀河が反時計回りに回転していると、左側半分は近づいてくるように動いているのでスペクトル線は青方偏移し、右側半分は遠ざかるように動いているのでスペクトル線は赤方偏移する。観測者に対する視線速度は場所によって異なるが、視線速度が等しい場所をつないでできる曲線を等速度曲線とか等速度コントア (iso-velocity contour) という。図 24・4 に示したものは、アンドロメダ銀河 M31 の中性水素の等速度曲線である。

一方、図 24・5 に示したのは、中心部で半径に比例し周辺部で一定になる、典型的な回転曲線をもった渦状銀河の等速度曲線だ。アンドロメダ銀河 M31 に似ていることがわかる。このように、観測といろいろなモデル計算を比較することによって、銀河に含まれる中性水素ガスの運動状態を詳しく調べることができるのである。

コラム :

図 24.5 等速度曲線 (モデル計算例)

25 電子・陽電子の対消滅線スペクトル

非常に高いエネルギーの天体現象では、電子の反粒子である陽電子が生成されることがある。そのような陽電子が電子と対消滅するときには、ガンマ線光子に変換するが、これはしばしばガンマ線領域で線スペクトルとなる。

25.1 電子・陽電子対消滅

電子 (e^-) とその反粒子である陽電子 (e^+) が衝突すると、対消滅 (pair annihilate) してエネルギーに変わる (図 25・1)。衝突前と衝突後で運動量が保存されるため、対消滅によって必ず 2 個の光子 (γ) ができるので、光子 1 個のエネルギーは、電子の静止質量エネルギーに相当する 511 keV になる (γ 線)。したがって多量の電子と陽電子が対消滅すると、511 keV にピークを持つスペクトル線が生じる。この特徴的なスペクトル線を電子・陽電子対消滅線 (pair annihilation line) と呼んでいる。

図 25.1 電子・陽電子の対消滅

このような対消滅線は、太陽フレアから星間空間、かにパルサー、Cyg X-1、 γ 線バースト、銀河系の中心、そして活動銀河中心核にいたるまで、宇宙のあちこちで検出されている。

もちろん対消滅が起こるためには、最初に大量の電子と陽電子が存在しなければならない。電子は通常の物質に含まれているが、陽

電子は存在しない。したがって対消滅に先だって陽電子を生成する機構が必要になる。

具体的には、たとえば、物質反物質の対消滅によって生まれる π^+ 中間子の崩壊や、核反応でできた放射性原子核の崩壊によっても陽電子は生成される。しかしこれらの過程は、一般に効率があまりよくない。

一方、温度が $T = m_e c^2 / k$ (~ 60 億度) という閾値程度になった高温のプラズマ中では、高エネルギーの陽子 (p) や電子 (e^-)、光子 (γ) 間の衝突によって、容易に電子・陽電子対 (e^+e^- pair) が形成される。具体的な素過程は表に示す。

表 25.1 電子・陽電子対の生成

粒子粒子衝突	pe	pee ⁺ e ⁻
	ee	eee ⁺ e ⁻
粒子光子衝突	p γ	pe ⁺ e ⁻
	e γ	ee ⁺ e ⁻
光子光子衝突	$\gamma\gamma$	e ⁺ e ⁻

e は e⁺ でも e⁻ でもよい

表 25.2 光子の生成

熱制動放射	pe	pe γ
	ee	ee γ
	e ⁺ e ⁻	e ⁺ e ⁻ γ
コンプトン過程	e γ	e γ
二重コンプトン	e γ	e $\gamma\gamma$
対消滅	e ⁺ e ⁻	$\gamma\gamma$
3光子対消滅	e ⁺ e ⁻	$\gamma\gamma\gamma$
放射性対生成	$\gamma\gamma$	e ⁺ e ⁻ γ
シンクロトロン放射		

e は e⁺ でも e⁻ でもよい

中性子星やブラックホールのまわりでは、電子・陽電子対生成が起こるほどの高温のプラズマが存在していると考えられている。

25.2 銀河系中心の対消滅源 1E 1740.7-2942

(1) 銀河系中心の X 線・ γ 線観測

銀河系中心方向を X 線で観測すると、銀河系中心の Sgr A* の近傍にはいくつか強い X 線源が存在するが、Sgr A* 自体からはあまり X 線が出ていないらしいことがわかってきた (§ 21)。アインシュタイン衛星によって発見され

た、Sgr A* 近傍の X 線源の一つが、1E 1740.7-2942 である。

銀河系の中心で、電子と陽電子の対消滅が起こっていることは、実は 1970 年代から知られていたことである。すなわち気球に搭載された γ 線検出器で銀河系中心方向を観測した結果、511 keV の特徴的な対消滅線が検出されたのだ。 γ 線の強度は $10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 程度であり、銀河系中心までの距離から見積ると、毎秒 100 億トン (10^{43} 個) もの陽電子が消滅していることになる。この γ 線強度は 1 年以下のタイムスケールで大きく変化しており、そのことから対消滅源の大きさは 1 光年以下と推測されていた。ただし当時は検出器の分解能が悪く、正確な位置がわからなかった。が、その後の詳しい観測により、銀河系中心の対消滅源が、X 線源 1E 1740.7-2942 に一致することがわかった。銀河系中心には、Sgr A* 以外にも、とんでもないモンスターがひそんでいたようだ。

(2) 対消滅源 1E 1740.7-2942

対消滅源 1E 1740.7-2942 は、アインシュタイン衛星による銀河面サーベイで発見された X 線源である。名前の示すように、赤経 17 時 41 分、赤緯 $-29^{\circ}42'$ に位置する。銀河系の力学的中心 Sgr A* とは約 48 分角ほど離れている。

図 25.2 GRANAT 衛星で観測した X 線源 1E 1740.7-2942

X 線・ γ 線望遠鏡で撮影された銀河系中心近傍の X 線像を図 25・2 に示す。図の左のものは、3-15 keV の X 線像である。図の横軸・縦軸は銀経・銀緯で (斜めの線は赤経線と赤緯

線) 視野は $2^{\circ}.3 \times 2^{\circ}.3$ である。銀河系中心近傍にはいくつも X 線源があるが、Sgr A* 自身は強い X 線を出していないことがわかる。また問題の 1E 1740.7-2942 は図の右上にある。一方、図の右のものは、35-120 keV の硬 X 線像である。やはり図の横軸・縦軸は銀経・銀緯で、また視野は $8^{\circ}.2 \times 8^{\circ}.2$ である。低エネルギー領域の X 線を出している天体は結構たくさんあったが、硬 X 線を出している天体は、1E 1740.7-2942 と GRS 1758-258 の 2 つしかない。

図 25.3 X 線源 1E 1740.7-2942 のスペクトル

さらに、X 線源 1E 1740.7-2942 のエネルギースペクトル図を図 25・3 に示す。図の横軸は keV 単位で測った X 線 (γ 線) のエネルギーで、縦軸は X 線の強度である。() 印は 1990 年 3 月から 4 月にかけて得られたデータで、(+) 印は 1990 年 10 月のデータである。後者のデータ (+) では、511 keV 近傍に電子・陽電子対消滅によって生じるピークが明瞭に見て取れる。前者のデータ () には対消滅線がないことから、短期間に対プラズマの発生があったこと、そして対消滅線の幅があまり広くないことから、対消滅が比較的低温のガス中で起こったことなどが推定されている。ともあれ、X 線源 1E 1740.7-2942 が対

消滅線の発生源だったのである。

コラム：マイクロクェーサー

コラム：ガンマ線バースト

図 25.4 VLA で観測した X 線源 1E 1740.7-2942

電波望遠鏡 VLA で X 線源 1E 1740.7-2942 を観測すると、中心から双方向に向けて伸びる電波ジェットが発見された(図 25・4)。図は 6 cm の波長で得られた電波像で、横軸が赤経、縦軸が赤緯である。ジェットの長さはおよそ 1 分角、実長にして 2 pc かそこらである。そして中心の天体とジェットのシステム全体は、3 pc ぐらいの大きさで $5 \times 10^4 M_{\odot}$ 程度の質量を持つ分子雲に埋まっているようだ。

いろいろな観測事実をまとめた結果、以下のような描像が考えられている。まず対消滅源 1E 1740.7-2942 の本体は、太陽の 10 倍から 100 倍程度の並のブラックホールらしい(X 線スペクトルが Cyg X-1 など他のブラックホール天体のスペクトルに類似している)。このブラックホールには、(おそらく周囲の分子雲から)ガスが降り注いできて、ときどき爆発的に電子・陽電子が生成される。そして生成された高エネルギーの電子と陽電子は、ジェットの形で分子雲内に打ち込まれる(ただし発見された電波ジェットが電子と陽電子からできているという直接の証拠はない)。これらの電子および陽電子はシンクロトロン放射によって電波を放射する(電波放射がシンクロトロンであることは、スペクトル観測から支持されている)。電子と陽電子は、ほとんど光速で 3 年間ぐらい走った後で減速され、高密度で低温の星間ガス中で対消滅するのである(対消滅線の幅が狭いことから示唆される)。