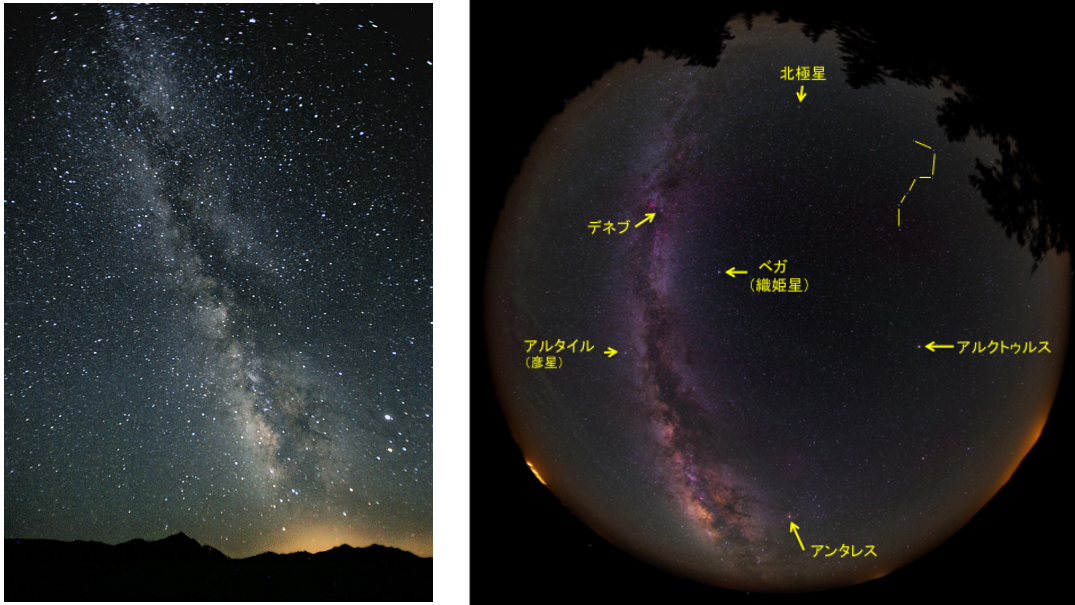


## 5 銀河 (Galaxies)

### 5.1 我々の銀河 (Galaxy, Milky Way Galaxy)



夏 (北半球) の天の川

暗い空に白い雲のように見える天の川は恒星の集まりで、我々が属する銀河 (渦巻銀河) を真横から見た姿である。とくに夏の地平近くの射手座 (Sagittarius) の方向に見える天の川が太くて明るい (上図)。その方向が銀河中心の方向である。

太陽系は、薄い銀河円盤の中に位置するため、銀河円盤に沿った方向を見るとき無数の恒星が天の川として観測される。一方、天の川から外れた方向は、円盤の上下方向を見ており、星がたくさんある層が薄いためあまりたくさんの恒星が見えない。

また、太陽系は銀河中心から約2万6千光年はなれた銀河円盤の端に存在するので、銀河中心の反対方向を見ている冬の天の川 (右図) は薄くて暗い。



冬の夜の天の川

John Chumack

天の川の所々が暗くなっているのは、その方向にダスト (星間塵) の濃い所、つまり星間雲があり、星の可視光が散乱吸収されてしまうため、星間雲の向こう側にある恒星が隠されているためである。天の川として白く見えている部分も、銀河円盤を見通している訳でなく、ダストの存在によって、遠くからの恒星の可視光は隠されており、比較的近くにある恒星からの光しか我々に届かない。

天の川の所々が暗くなっているのは、その方向にダスト (星間塵) の濃い所、つまり星間雲があり、星の可視光が散乱吸収されてしまうため、星間雲の向こう側にある恒星が隠されているためである。天の川として白く見えている部分も、銀河円盤を見通している訳でなく、ダストの存在によって、遠くからの恒星の可視光は隠されており、比較的近くにある恒星からの光しか我々に届かない。

右の図は、可視光、近赤外線 (1~3 ミクロン)、遠赤外線 (10~100 ミクロン) で観測した我々の銀河 (天の川) である。可視光の写真は北半球と南半球で見える天の川をつなぎ合わせたもので、左側が北半球で見ることの出来る天の川である。近赤外の写真は COBE 衛星の観測、遠赤外の写真は IRAS 衛星の観測である。(いずれも、地図のメルカトル図法と同様に経度は  $-180^\circ$  から  $+180^\circ$  まで描かれている。) 可視光ではダストの影響で隠されている部分があるが、近赤外の波長はダストの大きさよりも長いので、ダストの影響を受けることなく、我々の銀河の姿がはっきりと観測できる。遠赤外線での観測では、恒星の光の寄与はなく、低温のダスト ( $\sim 100\text{K}$ ) が放出する黒体放射が観測される。ダスト (固体微粒子) はガス粒子よりも重いので銀河円盤の対称面付近に薄く分布している。

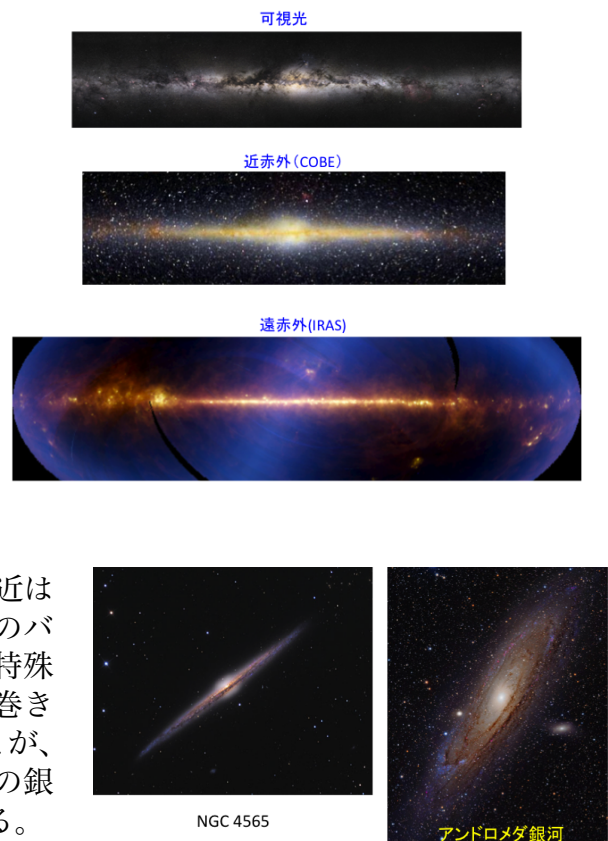
また、近赤外の写真でわかるように、銀河の中心付近は星が盛り上がり分布している。この部分は銀河のバルジといわれる。このような我々の銀河の形態は特殊ではなく、右の図のアンドロメダ銀河のような渦巻き銀河を真横から見たときに見られる形態であることが、ちょうど真横から見ている銀河 NGC 4565 と我々の銀河の形態と非常によく似ていることから推測できる。

我々の銀河は、円盤 (ディスク)、中心部のバルジ、さらに、それらを取り囲むように球形に広く分布するハローの部分から成る。我々の銀河を構成する星の数は、おおよそ 1 千億個とみつけられている。

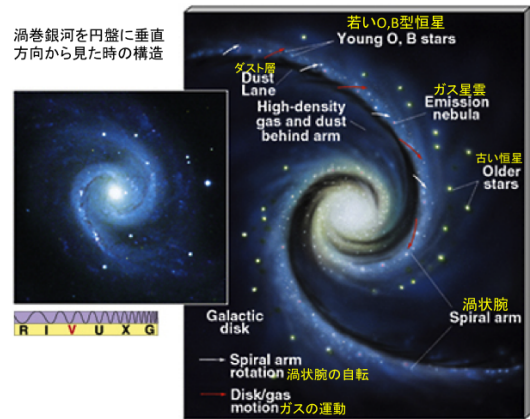
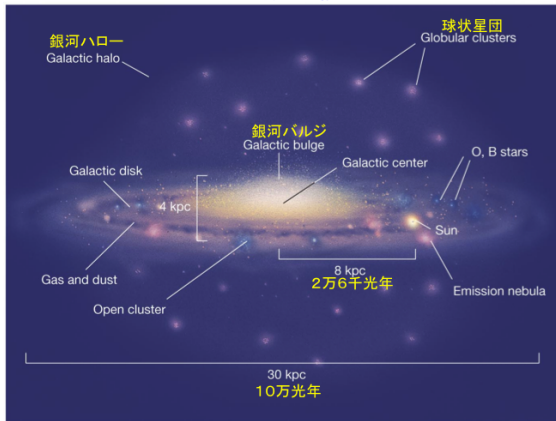
太陽から銀河中心までの距離は約 2 万 6 千光年 (8000 pc) で、銀河円盤の直径は約 10 万光年 (30,000 pc) である。円盤の厚さは 3000 光年程度で、星間物質の存在する領域はさらに薄く、600 光年程度である。

ハローには、ガスがほとんどないためそこでは新しい恒星は形成されず、球状星団に属するような古くて金属含有量の極端に少ない星 (種族 II) が存在する。それらは、我々の銀河の形成時に生成された星たちで、生成された当時は、質量の大きい星も誕生したが、現在残っているのは、寿命の長い小質量星 ( $\lesssim 0.8M_\odot$ ) だけである。我々の銀河の形成時には、ハローの領域で恒星の形成が起こり球状星団が形成され、残ったガスが降り積もって円盤が出来、そこでも恒星の形成が起こり始めたと考えられる。

ハローにある星の金属含有量は太陽の十分の 1 以下であるのに対し、円盤内にある星の金属含有量は太陽の金属含有量の十分の 1 以上である。これは、ハロー形成時に誕生した大質量星が超新星爆発を起こしてヘリウムよりも重い原子核を星間空間に放出し、それらが混ざったガスが円盤をつくり、そのようがすから、円盤での恒星誕生が始まったことを物語っている。その後、円盤内での超新星爆発と星形成の繰り返しにより、太陽の金属含有量まで増加してきた。



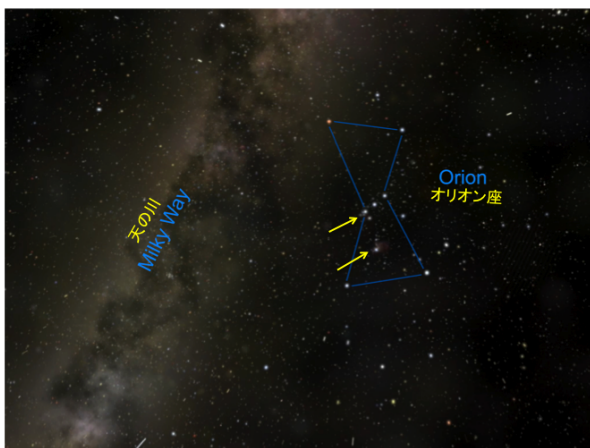
## 我々の銀河の構造



円盤部にはガス、ダストがまだ存在し、現在も星の生成が起こっており、若い恒星も存在する。円盤の中のガス、ダストは銀河中心の周りを公転し、渦状腕に沿って圧縮され、そこで恒星が誕生する。そのため若い恒星は渦状腕に沿って存在する。それに対し、比較的古い中小質量星は、その生涯の間に何度も銀河中心の周りを回るの、円盤内に比較的均等に分布する。

### 5.1.1 星間雲

銀河円盤にあるガス及びダストの星間物質は、銀河中心の周りをほぼ円軌道で公転している。渦状腕にそって重力が強くなっているためそこで星間物質は圧縮され、星間雲が作られる。ここでは、星間物質の密度が濃いため、水素分子  $H_2$ 、一酸化炭素 CO などの分子が形成されるので、それらは分子雲ともいわれる。分子雲内のさらに密度の濃い部分で恒星が誕生する。



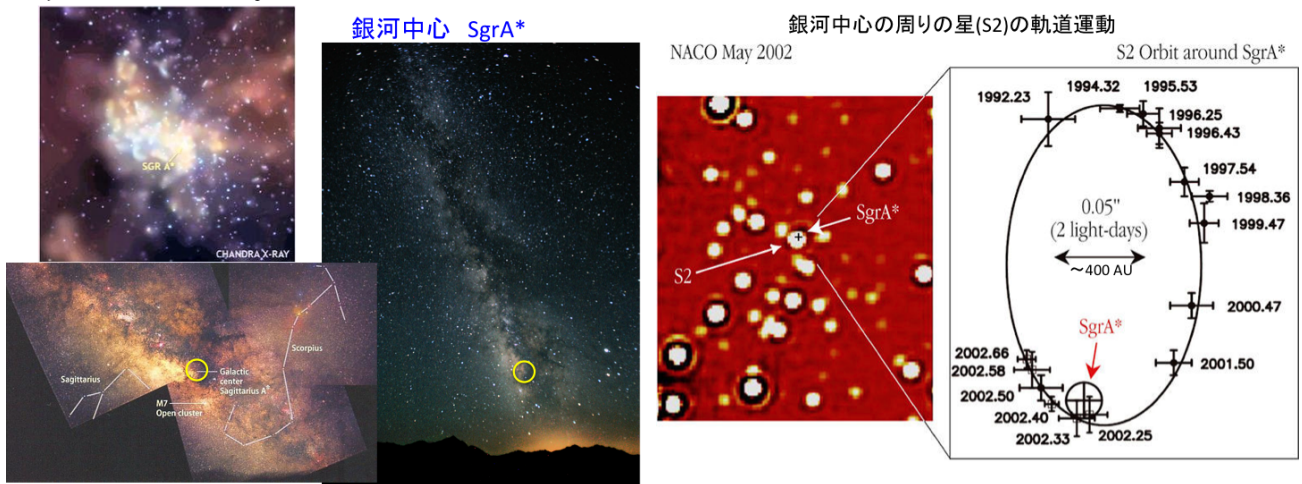
上の図は、オリオン座の中にある分子雲で恒星が誕生している様子を表す。馬頭星雲は密度の大きい部分 (暗黒星雲) が、向こう側にある誕生したばかりの星からの光を遮って馬の頭のような形のシルエットとなっている。また、オリオン大星雲も恒星誕生の現場で、これまでに誕生した恒星の光で照らされてガスが光っている。

渦状腕に沿って星間物質が圧縮され、そこで恒星が誕生する。質量が大きく明るく輝く恒星の寿命は短いので、公転によって渦状腕の外に出る前に生涯を終える。そのため渦状腕にそってだけ明るい恒星が観測される。太陽のように寿命の長い小質量星は、一生の間に何度も公転するので、渦状腕の以外の場所にも存在する。

### 5.1.2 銀河中心

我々の銀河中心は SgrA\* といわれ射手座の端っこにあり、電波、X線の光源となっている。その近傍の星々が12年から数十年で銀河中心の周りを種々の楕円軌道を描いて公転していること

が観測されている。



右上図によると星 S2 は、1996.25 から 2002.25 の 6 年間で楕円軌道を半周しているので、一周するのに 12 年かかる。軌道は、長半径が約 800AU (AU=天文単位=地球太陽間平均距離=  $1.5 \times 10^8$  km) 短半径が約 400AU と読み取れるので、おおよそ 600AU の円軌道と見なして軌道運動の平均速度を出すと、

$$\text{軌道運動平均速度} = \frac{2\pi \times 600\text{AU}}{12\text{yr}} = \frac{2\pi \times 600 \times 1.5 \times 10^8}{12 \times 3.16 \times 10^7} \text{ km/s} \approx 1500 \text{ km/s}$$

の高速度となる。円軌道の加速度は、(軌道速度)<sup>2</sup>/(軌道半径) なので (1 章参照) 星 S2 の質量を  $M_*$ 、中心の物体の質量を  $M_c$  と書くと、加速度と力のニュートンの法則は

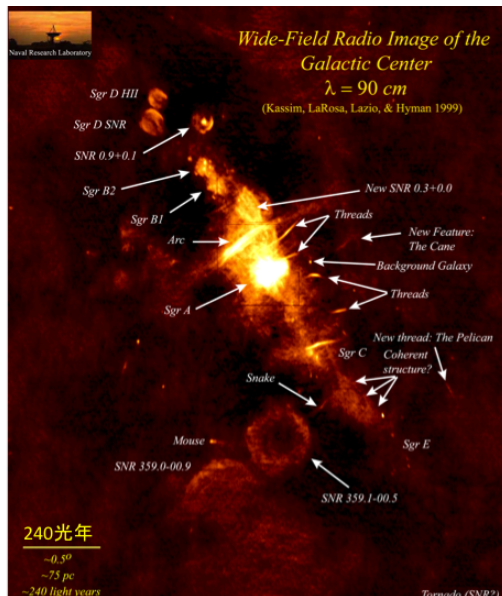
$$M_* \frac{(\text{軌道速度})^2}{(\text{軌道半径})} = \frac{GM_c M_*}{(\text{軌道半径})^2}$$

のように表される。ここに、 $G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg s}^2) = 6.7 \times 10^{-20} (\text{km})^3/(\text{kg s}^2)$  は万有引力定数を表す。この式から、中心の物体の質量  $M_c$  は

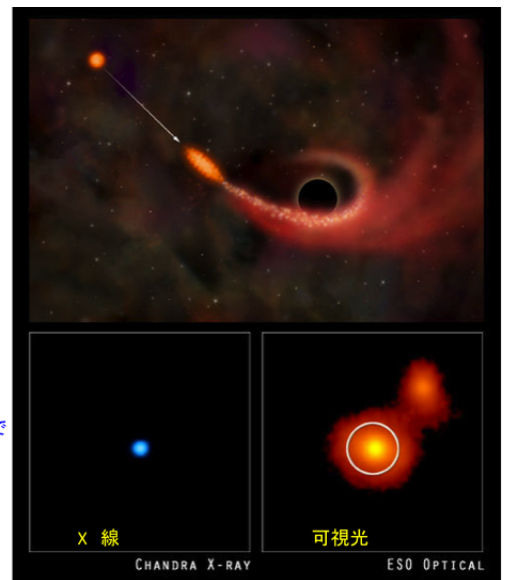
$$M_c = \frac{(\text{軌道速度})^2 \times (\text{軌道半径})}{G} = \frac{(1500)^2 \times 600 \times 1.5 \times 10^8}{6.7 \times 10^{-20}} \text{ kg} = 3.0 \times 10^{36} \text{ kg} = 1.5 \times 10^6 M_\odot$$

(より正確な軌道半径と周期を使うと  $3 \times 10^6 M_\odot$ ) が得られる。このように太陽の数百万倍の質量を持つ物体が我々の銀河の中心に存在する。太陽系の大きさよりも小さい領域 (数 AU 以下) に太陽の数百万倍の質量が強い光を発しないで存在できるのはブラックホールでしかあり得ないので、我々の銀河の中心には太陽の数百万倍の質量を持つブラックホールが存在すると考えられる。このような、非常に大きな質量を持つブラックホールの存在は、我々の銀河特有の性質ではなく、一般に大きな銀河の中心には非常に大きな質量のブラックホールが存在することが知られている。

波長90cm  
の電波で  
観測された  
銀河中心  
近傍



星が  
ブラックホール  
の重力によって  
こわされて  
飲み込まれる  
状況の想像図

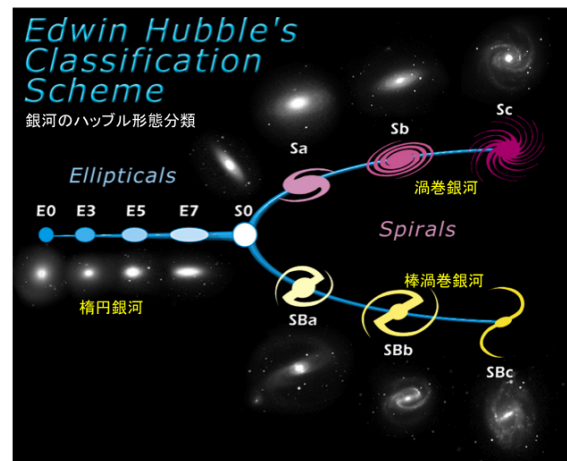


他の銀河の中心  
のブラックホール  
が星を飲み込んで  
光っていると  
考えられる現象

銀河の中心の大質量ブラックホールがいつの段階に形成されたかはまだ明らかではないが、銀河中心近くを回る恒星は、しだいに角運動量を失いついにはブラックホールに吸い込まれてしまう(上右図)。電波による詳細な観測(上左図)では、銀河中心は強い電波源になっており、その周囲には、まだよく理解されていない電波強度の複雑な構造がみられる。

## 5.2 種々の銀河

銀河は大きく、楕円銀河 (Elliptical galaxies)、渦巻銀河 (Spiral galaxies)、不規則銀河 (Irregular galaxies) に分類される。楕円銀河はその扁平の程度によって、E0, E1, ..., E7 と細分される。また、渦巻銀河で、中心部 (バルジ) に棒状構造が見られる場合を棒渦巻銀河 (SB) という。いずれの場合も渦状腕の巻き付きの強さによって、Sa, Sb, Sc (棒渦巻銀河の場合は SBa, SBb, SBc) のように細分される。我々の銀河のバルジ部はラグビーボール上の形をしており、また、渦状腕の巻き付きも強くないので、SBc に分類される。S0 は渦状腕を持たず、バルジと円盤とからなる。



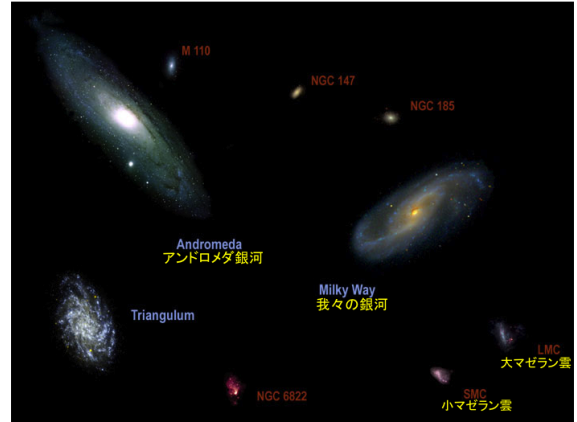
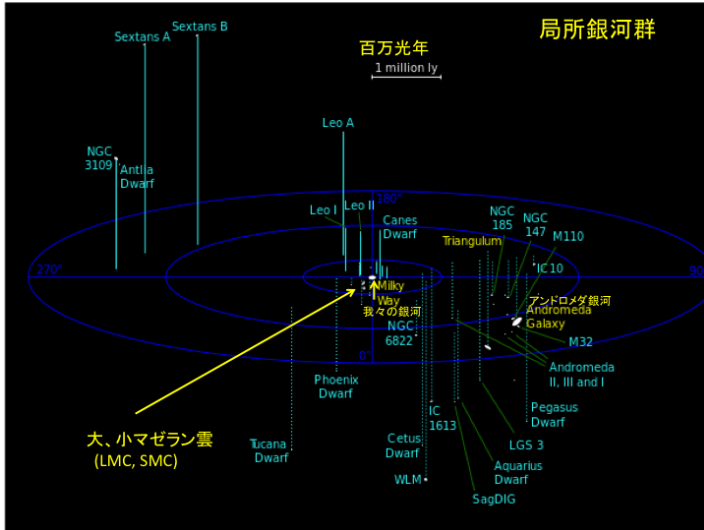
楕円銀河にはガスがほとんど含まれず、新しい恒星の誕生は起こっていないので、古い星の集まりである。楕円銀河は全体としては回転せず、内部で星々はいろいろな軌道面を回っている。楕円銀河の大きさは様々で、矮小楕円銀河といわれる銀河は、我々の銀河のハローにある球状星団を一回り大きくした程度で、含まれる星の数は1千万個程度で暗い。一方、銀河の集団 (銀河団) の中心に位置する巨大楕円銀河は数兆個 (我々の銀河の数十倍) の恒星数を持つ。このような、巨大楕円銀河は多くの銀河との合体によって形成されたと考えられている。

それに対し、渦巻銀河、不規則銀河にはガスがあり、恒星の誕生が起こっている。とくに不規則銀河は、恒星に対するガスの量が多く、まだ星形成が十分に起こってない銀河で、現在盛んに恒星の誕生が起こっている。また、銀河どうしの近接遭遇によって形がゆがめられた銀河も多く存在する。不規則銀河のうちで最も我々に近いものは、大小マゼラン雲である。大マゼラン雲までの距離は約16万光年、小マゼラン雲までの距離は約20万光年で、我々の銀河の周りを楕円軌道でまわっている。現在の位置と速度をもとにした数値計算によると、それらは数億年前に我々の銀河に非常に近くなった。その際我々の銀河からの潮汐作用によって形が歪め

られ、ガスが圧縮されたため、現在も活発に星形成が起こっている。

### 5.3 局所銀河群

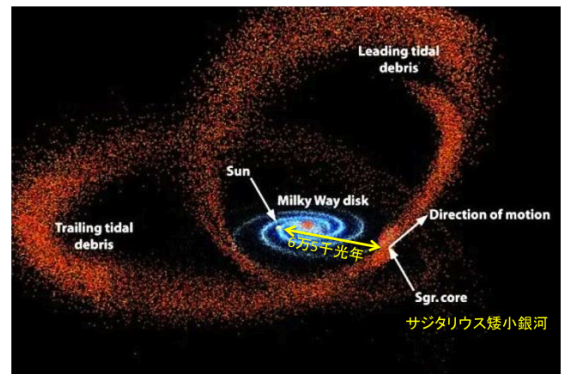
局所銀河群は、我々の銀河およびアンドロメダ銀河を含む数十の銀河が直径およそ1千万光年の領域に集まった銀河群である。そのなかでアンドロメダ銀河が最も大きく、次に大きい我々の銀河の倍程度の大きさを持つ。



それらの銀河は静止しているのではなく、近くの銀河の周りを公転しその遠心力が、相手の銀河から受ける引力と釣り合っている。矮小銀河の中心では遠心力と釣り合っているが、双方の銀河には大きさがあるので、銀河の端では釣り合っておらず、形が歪められたり引き延ばされたりする。この作用は潮汐作用といわれる。(地球の海の潮汐は、地球が有限の大きさを持っているため、地球の公転による遠心力と太陽からの引力が地球表面で釣り合っていないために起こる。) 大きな銀河の周りにはある矮小銀河は、大きな銀河からの潮汐作用によって引き延ばされ、最終的には大きな銀河に飲み込まれてしまう。

右図は我々の銀河の近傍のサジタリウス矮小銀河 (Sagittarius Dwarf spheroidal Galaxy) が、我々の銀河の周りを数億年の周期で公転する間に、潮汐作用によって引き延ばされ矮小銀河の星の一部が帯状の星流となっている様子を表している。数十億年のうちにサジタリウス矮小銀河は我々の銀河に飲み込まれてしまうことが予想されている。

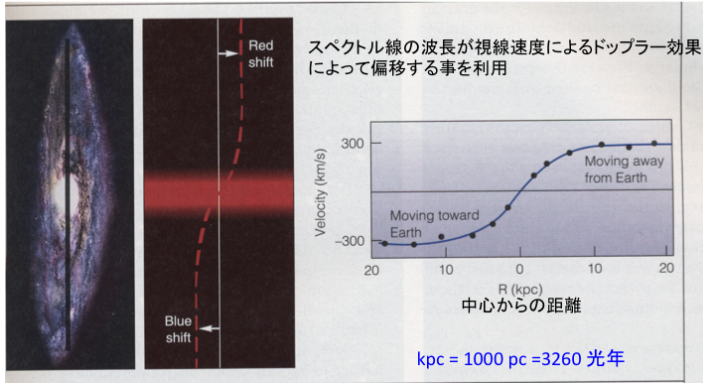
サジタリウス星流



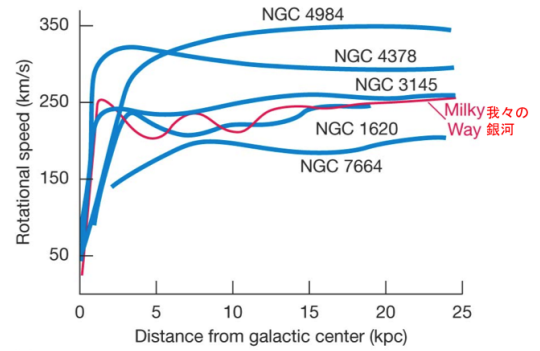
### 5.4 渦巻銀河の回転曲線とダークマター

渦巻銀河円盤内で恒星や星間物質はほぼ円軌道で銀河中心のまわりを公転し、遠心力と中心方向への重力とが釣り合っている。渦巻銀河の円盤内の恒星や星間物質の運動を計測するには、恒星スペクトル中の吸収線の波長、または、中性水素ガスの出す波長 21cm の電波の波長が、ドップラー効果によって偏移する事を利用する。渦巻銀河円盤内の回転速度を中心からの距離に対して表した曲線を回転曲線 (rotation curve) とよぶ。一般に、渦巻銀河の回転曲線は、中心付近で距離に比例して速度が増加し、ある程度以上中心からはなれた場所では回転速度がほぼ一定となることを示している。

### ドップラー効果による渦巻銀河の回転速度の測定



### 種々の渦巻銀河の回転曲線



2008 Pearson Education

ある渦巻銀河の中心から  $R$  だけ離れた場所での回転速度を  $V(R)$  とすると、

$$\text{円運動の加速度} = \frac{V(R)^2}{R}$$

である事は以前学んだ(1章)。銀河中心から半径  $R$  の球内に含まれる質量を  $M(R)$  と書くと、銀河中心から距離  $R$  離れた所で、

$$\text{単位質量の物体が感じる重力} = \frac{GM(R)}{R^2}$$

である。(  $G$  は万有引力定数) ニュートンの運動と力の関係は、

$$\text{加速度} \times \text{質量} = \text{力}$$

なので、銀河中心から距離  $R$  の場所にある単位質量に対して、

$$\frac{V(R)^2}{R} = \frac{GM(R)}{R^2} \quad \longrightarrow \quad V(R)^2 = \frac{GM(R)}{R}$$

という関係がなりたつ。銀河円盤の密度は中心からはなれるにつれて急激に減少するので、 $M(R)$  は  $R$  が十分大きくなると銀河全体の質量  $M_G$  に近づくはずなので、

$$V(R) \quad \longrightarrow \quad \sqrt{\frac{GM_G}{R}}$$

となるはずで、回転速度は中心から十分遠方では中心からはなれるにつれて減少するはずである。

しかし、計測された種々の回転曲線は、どの渦巻銀河でも回転速度が中心から十分離れた場所でも一定となることをしめしている。このことは、

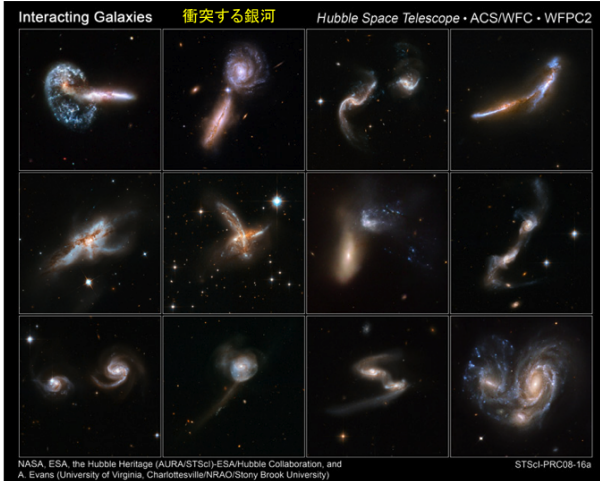
$$M(R) = \frac{V(R)^2 R}{G} \quad \longrightarrow \quad = \frac{(\text{一定速度})^2 R}{G}$$

のように、銀河中心からはなれば離れるほど、中心からそこまでを半径とする球の中に含まれる質量が、何も光で観測されない遠方まで行っても、中心からの距離に比例して大きくなっている事を示している。この現象を説明するためには、光(電磁波)を出さない物質が、光で見える銀河の領域よりもずっと広い領域を満たしていることが必要である。この、電磁波を発しない仮想的な物質を**ダークマター**という。ダークマターが何であるかは、まだ解っていない。

## 5.5 銀河の近接遭遇

恒星の場合は、典型的な半径が  $10^6$  km であるのに対し、近傍の恒星までの典型的な距離は～4光年  $\approx 4 \times 10^{13}$  km で、その比は直径 5 cm のボールが 2000 km 離れている状態に対応し、別々に生まれた二つの恒星が近接遭遇する可能性は(球状星団中の恒星を除けば)ゼロに近い。それに対して銀河の場合、我々の銀河の円盤の半径が約5万光年に対して、隣のアンドロメダ銀河までの距離は250万光年なので、近接遭遇するのはまれではない。実際、衝突による潮汐作用によって形の歪んだ銀河が数多く観測されており、また、40億年後には我々の銀河とアンドロメダ銀河が衝突する事が予想されている。

銀河同士が衝突しても、恒星同士は衝突することはないが、星間物質が圧縮されて恒星の誕生が活発になる。

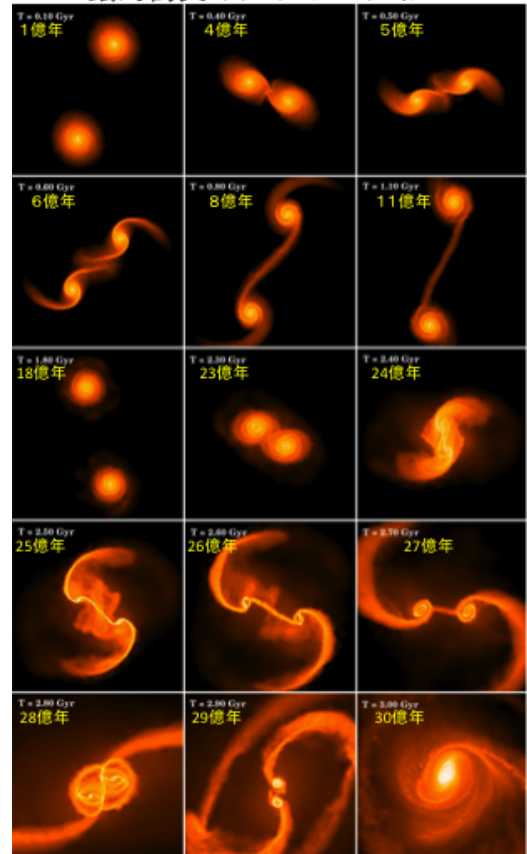


銀河の衝突  
(アンテナ)

星間物質が  
圧縮され  
恒星の誕生  
が活発化



銀河衝突のシミュレーション



銀河の衝突は、コンピュータ シミュレーションがなされ、種々の状況(衝突する二つの銀河の大きさの比、衝突角度)のもとで、どのような現象が起こるかが検証されている。二つの銀河が衝突すると、最終的にはその二つの銀河は合体する。質量の大きく異なる二つの銀河が衝突する場合は、小さい方の銀河が大きな銀河に飲み込まれ、大きな銀河には大きな変化がない。我々の銀河も、これまでに、近くの矮小銀河を飲み込んだ事が知られている。

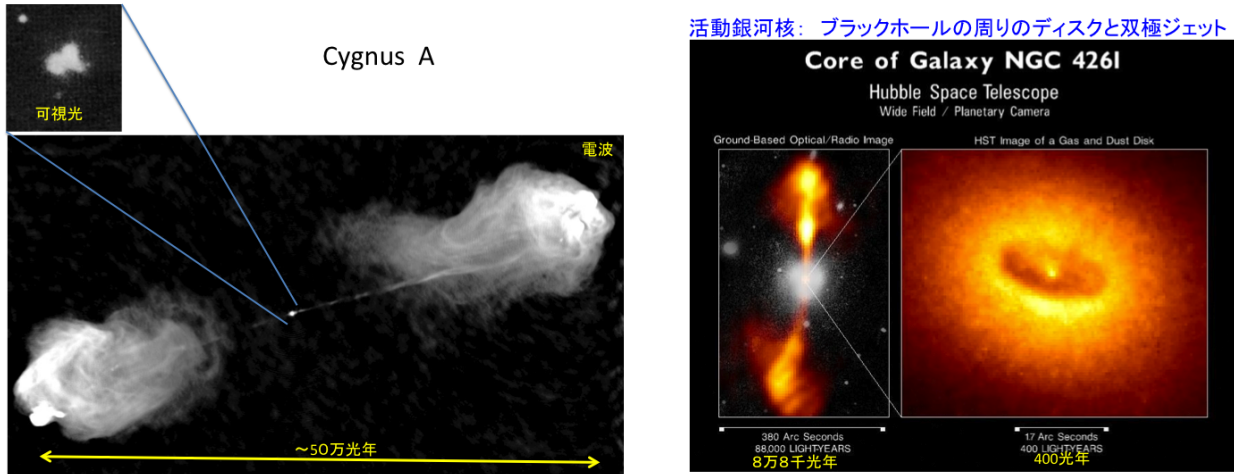
二つの同程度の質量の渦巻銀河が衝突する場合、最終的には合体して、不規則銀河や楕円銀河となる。



## 5.6 活動銀河核

大きな銀河の中心には、少なくとも1個の大質量ブラックホールが存在する事が知られている。そのなかで非常に大きなエネルギーを発生している銀河中心部を活動銀河核という。何らかの原因で中心の大質量ブラックホールにガスが供給されるため、大きなエネルギーが発せられる。ガスがブラックホールに落ち込む際に、ブラックホールの重力が非常に強いために、ガスの大きな位置エネルギーが熱エネルギーに変えられて放出される。

ガスは、角運動量を持っているので、直接ブラックホールに飲み込まれるのではなく、ブラックホールのまわりに円盤(アクリーションディスク)が形成され、円盤中を何度も回転して角運動量を失って、ブラックホールに落下してゆく。その際に放出されるエネルギーによって、一部のガスは、アクリーションディスクの回転軸の方向(双極方向)に強く外側に加速され光速に近い速度で運動し、双極のジェットが形成される。



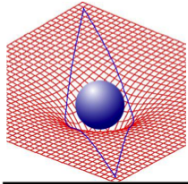
遠方にあるため、銀河本体は観測されず、明るい活動銀河核だけが観測される天体はクェーサー(QSO)とよばれ、可視光では点光源として観測される。

活動銀河核は種々のタイムスケールの変光を示す。その変光を起こす領域の大きさは、(最も短い変光時間) $\times$ (光速)よりも小さいはずである。なぜなら、それよりも大きい領域で変光していたとすると、異なる場所から来る光の到達時間の差が変光時間よりも長いので、変光がならされてしまうはずだからである。クェーサーで観測される変光時間の最も短いものは1000秒程度なので、その領域の上限値は(1000秒) $\times$ (光速) $\approx$ 2AU(天文単位)程度となる。この小さな領域からも、活動銀河核のエネルギー源がブラックホールから来ていることがうかがわれる。

## 5.7 重力レンズ

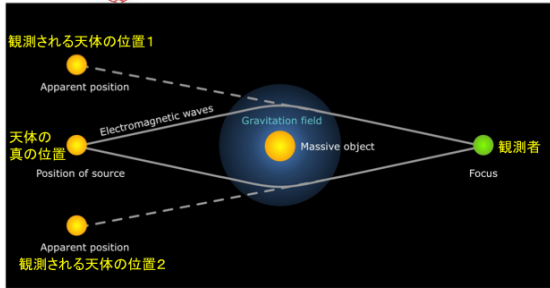
アインシュタインの一般相対性原理では、全て質量のある物体間にはたらく万有引力を、質量のある物体の周りの空間がその質量の大きさに応じてくぼみ、周りの物体を引き寄せる現象であると理解する。その空間の歪みによって、質量のない光の経路も影響を受け、大きな質量を持つ物体のすぐ近くを通過する際、真空中であっても屈折する。これは、凸レンズと同じ方向の屈折で、集光および像の引き延ばしなどの現象を起こす。このことを重力レンズという。

下の左の図は重力レンズの原理の説明図で、ある天体と我々を結ぶ直線上または非常に近くに質量を持つ天体が存在する(間にある天体の質量が大きいほど影響が大きい)と重力レンズの影響で、点光源の場合は複数の像が見えたり、増光した像が観測され、銀河のような大きさのある天体の場合は増光すると同時に形が歪んだ像が観測される。右の図は、巨大楕円銀河による重力レンズ効果により、さらに遠方にある銀河が歪んで観測されている例(左)と、あるクェーサー(QSO)と我々との間にある銀河によってクェーサーの5つの像が観測される例である。



### 重力レンズの原理

質量を持つ天体の周りの空間は  
その質量に応じて歪む  
→ 光も曲がる

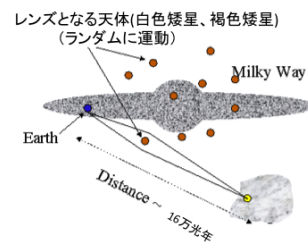


### 手前にある銀河、銀河団による重力レンズ



アインシュタイン Cross  
遠方のひとつのQSOが  
手前の銀河による  
重力レンズで4つの像に

重力レンズは、恒星間でも起こり、それらは重力マイクロレンズといわれる。恒星一つの質量は銀河に比べて非常に小さいので、ある恒星と我々との間の視線上に別の恒星が存在する(その二つの恒星間の距離が十分離れていて、互いの位置からは点光源となっている)ときに重力レンズ効果が発生し、増光して観測される。恒星は常に運動しているので、レンズの役割をした天体はそのうち視線からずれて、重力レンズを起こさなくなる。右の図は、暗いけれども数多くある事が予想される、質量の小さい褐色矮星または白色矮星による重力レンズ効果によって、大マゼラン雲の中の恒星がある期間明るく観測される現象を探す OGLE プロジェクトによって見つげられた現象の一つである。



### 重力マイクロレンズ

我々の銀河のハローにある  
天体が、大マゼラン雲中  
のある星の前にきて重力レンズ  
となり、その星を見かけ上  
増光させる

