

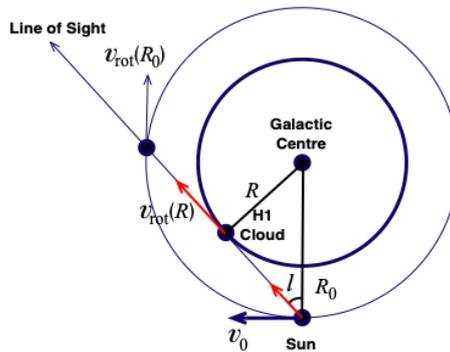
電波望遠鏡で探る銀河ダークマター

この宇宙のいくらかはダークマターで構成されている。天の川銀河のディスク内のガスの回転速度を計測することで、銀河系内のダークマターを発見しよう。天の川銀河のディスク内のガスは中性水素 (HI) を含んでおり、静止系で $f_0 = 1420.40575$ MHz の原子内のスピン遷移に伴った固有周波数を用いることで検出できる。銀河系内のガスの回転速度は、この遷移に伴う周波数のドップラーシフトを用いることで測ることができる。

この問題では、まず、提供される電波望遠鏡を用いて銀河面内のさまざまな銀経方向のガスを 1419.0 MHz から 1421.0 MHz までの周波数帯の電波スペクトルを計測する。さらに、これらのデータを解析することで、天の川銀河の回転曲線を決定する。決定された回転曲線に基づき、さまざまな銀河中心からの距離について、その内側にある質量を推定し、対応する半径内の既知のバリオン質量と比較して、その差をダークマターに帰する。

理論的背景

下図に示すように、銀河内のすべてのガスが (北銀極から見て) 時計回りに、銀河中心からさまざまな距離で円軌道を描いて運動していると仮定せよ。太陽の位置において回転速度 $v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$ で運動するガスを考える。この速度で回転する基準座標系を局所静止基準系 (LSR) と呼ぶ。なお、太陽は LSR に対して運動している点に注意せよ。



銀経 ℓ 方向に沿って観測すると、観測者は銀河中心から異なる距離にあるガスからの放射を観測することになる。半径が増加してもガスの回転速度 $v_{\text{rot}}(R)$ が有意に増加しないと仮定すると、速度ベクトルが視線方向に一致するガスにおいて視線速度の大きさが最大 $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}$ となる。幾何学的に、

$$v_{\text{rot}}(R) = v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell) + v_0 \sin(\ell),$$

が成り立つ。ここで $R = R_0 \sin \ell$ であって、 R_0 は太陽の銀河中心からの距離 (8.5 kpc)、 $v_{\text{rot}}(R)$ は銀河中心から距離 R におけるガスの接線方向の回転速度である。観測された HI 輝線データを用いて $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell)$ を推定する。銀経 $20^\circ < \ell < 90^\circ$ では、これは赤方偏移が最大となる放射に対応する。

太陽と地球はいずれも LSR に対して静止していないため、観測された HI 線の速度には (a) 地球の自転、(b) 地球の太陽に対する公転、(c) 太陽の LSR に対する運動、に関する補正が必要である。これらの運動は視線方向の補正速度 (v_{corr}) に合成され、観測者の位置・視線方向・観測日時に依存する。あなたには v_{corr} を計算するためのツールが与えられ、測定速度 ($v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$) を LSR に対する速度 v_{LSR} に変換できる。その関係は

$$v_{\text{LSR}} = v_{\text{Earth}}^{\text{obs}} + v_{\text{corr}}.$$

で与えられる。量 $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ は、もとの周波数 f_0 から最大に赤方偏移した観測周波数 f_{obs} を用いて

$$v_{\text{Earth}}^{\text{obs}} = c \left[\frac{f_0 - f_{\text{obs}}}{f_0} \right].$$

と求められる。したがって、銀河円盤からの HI 放射の観測により、天の川銀河の回転曲線 $v_{\text{rot}}(R)$ を決定でき、これを用いて銀河中心からさまざまな距離 (R) における、それより内側の質量を推定することができる。