2015/01/23
ソラふく

流星体の質量及び半径

UFOAnalyzer と UFOOrbit の分析結果を用いて、群流星と、速度の求められている散在流星（＝2 地点同時観測流星）の、流星体の質量及び半径を算出した。

計算に当たり、以下を仮定とした。
・流星体は球形である。
・流星体の密度は 0.8 (g/cm^3)である。*1
・流星体は、上空 95 km で発光したものとする。*2
・流星体の発光に使われるエネルギーは、流星体がもっていた運動エネルギーの 0.2 % とする。*3

＊1 流星体の密度は正確にはわかっていないが、入手可能なデータは典型的に 800 (kg/m^3) を示す（Martin Beech (2009). 長谷川一郎・十三塾（訳）天体観測の教科書 流星観測編 誠文堂新光社)。

＊2 流星は上空 80～120 km の熱圏で発光する。昨年の卒業研究では発光高度を 90 km として計算を進めていたが、今年度観測できた 3 つの 2 地点同時観測流星は上空約 95 km で発光していたことがわかったため、今年度は流星の発光高度を 95km として計算する。

＊3 流星の発光効率が 0.2 %という仮定は、1999 年のしし座流星群の流星体が、月面に衝突した際の発光効率を基にしている。(L. R. Bellot Rubio, J. L. Ortiz & P. V. Sada (2000). *Luminous efficiency in hypervelocity impacts from the 1999 lunar leonids*)。

こと座流星群の流星体である 20140422_210702 を例に、質量と半径を算出する。ここで、質量と半径を算出する流星体と、今回、比較星として設定したベガの諸物理量を以下に示す。

表 6.1　流星体及び比較星（ベガ）の諸物理量（国立天文台 (2012). 理科年表）

流星体 20140422_210702 の諸物理量		ベガの諸物理量	
・見かけの等級m_2	3.0 (等)	・見かけの等級m_1	0.0 (等)
・観測速度v_i	48.7 (km/s)	・有効温度T	9500 (K)
・発光継続時間t	0.234 (s)	・半径r	1.81×10^9 (m)
		・地球からの距離	25 (光年)

明るさの比と等級差の関係は、以下のポグソンの式で表すことができる。

$$m_2 - m_1 = 2.5 \cdot \log \frac{l_1}{l_2} \qquad (6.1)$$

m_1　＝　比較星の見かけの等級（等）
m_2　＝　流星の見かけの等級（等）
l_1　＝　比較星の光度（W）
l_2　＝　流星の光度（W）

ベガの光度l_1を求めるには、まずシュテファン・ボルツマンの式で求められる比較星の放射エネルギーIを算出する。

$$I = \sigma T^4 \qquad (6.2)$$

式(5.2)に、表のベガの有効温度 T:9500 (K)、シュテファン・ボルツマン定数σ:5.67×10^{-8} (W・m^{-2}・K^{-4})を代入する。

$$I = \sigma T^4$$

$$I = 5.67 \times 10^{-8} \left(\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{K}^{-4}\right) \times 9500\ (\mathrm{K})^4$$

$$I = 4.62 \times 10^8\ (\mathrm{W/m^2})$$

次に、放射エネルギーIに、ベガの表面積をかけ、ベガ全体が放出しているエネルギーEを求める。ベガの半径r:1.81×10^9 (m)より、

$$\mathrm{E} = \mathrm{I} \times 4\pi r^2$$

$$= 4.62 \times 10^8\ (\mathrm{W/m^2}) \times 4 \times 3.14 \times \{1.81 \times 10^9\ (\mathrm{m})\}^2$$

$$= 1.9 \times 10^{28}\ (\mathrm{W})$$

また、流星の発光高度:95 km を 1 とすると、地球－ベガ間の距離（xとおく）は、以下のように求められる。

$$1 : x = 95\ (\mathrm{km}) : 25\ \left(\text{光年}\right) \times 9.46 \times 10^{12}\ \left(\mathrm{km}/\text{光年}\right)$$

$$\therefore x = \frac{2.37 \times 10^{14}}{95} = 2.5 \times 10^{12}$$

光量は、光源からの距離がx倍になるとx^{-2}倍になるので、ベガの光度l_1は、

$$l_1 = E \times \frac{1}{x^2} = 1.9 \times 10^{28}\ (\mathrm{W}) \times \frac{1}{(2.5 \times 10^{12})^2}$$

$$\therefore l_1 = 3.04 \times 10^3\ (\mathrm{W})$$

式(5.1)に、今求めたl_1と、表 5.1 に示す値を代入し、流星体の光度l_2を算出する。

$$3.0 - 0.0 = 2.5 \cdot \log \frac{3.04 \times 10^3 (\mathrm{W})}{l_2}$$

$$l_2 = 10^{\log\left(3.04 \times 10^3\ (\mathrm{W})\right) - \frac{3.0}{2.5}}$$

$$\therefore l_2 = 1.92 \times 10^2\ (\mathrm{W})$$

流星体が発光する際に放出するエネルギーを$E_{\text{光}}$とすると、

$$E_{\text{光}} = l_2 \times t = 1.92 \times 10^2\ (\mathrm{W}) \times 0.234\ (\mathrm{s}) = 4.49 \times 10\ (\mathrm{J})$$

流星体のもつ全エネルギーの 0.2 %が発光に使用されると仮定しているため、流星体のも

つ全エネルギーE_{all}は、

$$E_{\mathrm{all}} = \frac{E_{光}}{0.002} = \frac{4.49 \times 10\ (\mathrm{J})}{0.002} = 2.25 \times 10^{4}\ (\mathrm{J})$$

となる。

このE$_{\mathrm{all}}$は、流星体のもつ運動エネルギーであり、

$$E_{\mathrm{all}} = \frac{1}{2} M v^{2}$$

と表すことができる。この式に、流星体の速度を代入して、流星体の質量Mを算出するのだが、ここで一つ気をつけなければならないことがある。それは、上式中の速度は観測速度ではなく、地心速度である点である。観測速度とは、観測者が実際に観測した流星体の速度のことである。これは、流星体がもともともっていた速度ではなく、地球の引力で加速されたり、大気の空気抵抗によって減速されたりしているし、また、自転や公転による光行差も加味されているのである。そのため、流星群の傾向を知るためには、流星がもともともっていた速度、すなわち 地心速度を用いなければならないのである。

地心速度は通常、2 地点観測からでなければ得られないが、流星体の経路がわかっている群流星では、以下の式を用いることにより、観測速度v_{i}から地心速度v_{g}を求めることができる（SonotaCo.JP SonotaCo Network Japan Forum〈http://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=140〉）。

$$v_{\mathrm{g}} = \sqrt{{v_{\mathrm{i}}}^{2} + 123.2}$$

このことより、20140422_210702 の地心速度は、

$$v_{\mathrm{g}} = \sqrt{(48.7\ (\mathrm{km/s}))^{2} + 123.2} = 49.9\ (\mathrm{km/s})$$

である。これを、単位を(m/s)に変換して運動エネルギーの式に代入すると、

$$M = \frac{2\ \cdot E_{\mathrm{all}}}{v^{2}} = \frac{2 \times 2.25 \times 10^{4}\ \left(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{2}/s^{2}\right)}{\left(49.9 \times 10^{3}\ (\mathrm{m/s})\right)^{2}}$$

$$= 1.74 \times 10^{-5}\ (\mathrm{kg})$$

したがって、流星 20140422_210702 の流星体の質量は、1.74×10^{-2} (g)であることがわかった。

次に、この流星体の半径 R を求める。そのために、まず流星体の体積 V を求めるが、流星体の密度が800 (kg/m^3)の球形であると仮定しているため、

$$\mathrm{V} = \frac{1.74 \times 10^{-5}\ (\mathrm{kg})}{800\ (\mathrm{kg/m^3})} = 2.18 \times 10^{-8} (\mathrm{m^3})$$

球の体積と半径の関係は、$\mathrm{V} = \frac{4}{3}\pi r^3$ で表せるので、ここに上式の結果を代入し、流星体の半径 R を算出する。

$$\mathrm{R} = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \times 2.18 \times 10^{-8}\ (\mathrm{m^3})}{4\pi}} = 1.73 \times 10^{-3}\ (\mathrm{m})$$

したがって、流星 20140422_210702 の流星体の半径は、1.73 (mm)であることがわかった。