

Study on Formation Condition of Cometary Ice on the Basis of Ortho-to-Para Ratio of Ammonia

Comets are thought to be relics of our solar system, which have kept the information on solar system formation. The solar system formed from a collapsing molecular cloud. Many planetesimals formed first in the protoplanetary disk around proto-Sun (called "solar nebula"). Typical dimensions of the planetesimals were between a few hundreds meters and a few kilometers. They accreted into planets and satellites, while some of them remained as fragments of collisions which are asteroids, and the remnants of icy planetesimals survived in outer solar system as comets or small icy bodies. Therefore, studies on physical conditions of the solar nebula from a viewpoint of comets are important for investigating the formation process or circumstance of the solar system.

There are some primordial properties in comets, e. g, a chemical abundance, isotopic ratios for various elements, and ortho-to-para ratios (OPRs) of cometary materials. The OPR is an important character of cometary molecules which have hydrogen atoms at symmetrical positions. A spin temperature derived from OPR could reflect the conditions (especially, a temperature) where the molecule formed. The spin temperature is thought to indicate a temperature of grains in the solar nebula because the molecules formed in the icy mantles on grains.

Among cometary species there are no reliable reports except water molecules, of which the spin temperature has been derived as about 30 K for several comets. This temperature is consistent with the temperature range investigated from deuterium-to-hydrogen (D/H) ratios of water and hydrogen cyanide, and from abundances of argon and neon in comets. In this thesis, a new method to investigate OPR of ammonia in comets, along with first applications of this method to two Oort cloud comets, comet C/1999S4 (LINEAR) and comet C/2001A2 (LINEAR), is presented. Ammonia is important as a product of nitrogen related chemical reactions in the solar nebula, and as a reservoir of nitrogen atoms in comets. However, there are only a few reports on the detection of cometary ammonia for bright comets by radio observations, and no reports on OPR of cometary ammonia.

In this thesis, it is shown that the OPR of cometary ammonia can be also determined from OPR of NH_2 , which is observable in the optical wavelength region. NH_2 is thought to be a photodissociation product of cometary ammonia, which is confirmed by the spatial distribution of NH_2 in the coma of comet C/1996B2 (Hyakutake). In order to derive the OPR of NH_2 from observed emission lines, the fluorescence excitation model is established. As an application of this model to the high-dispersion optical spectra taken by the high dispersion spectrograph (HDS) and the Subaru telescope, the OPRs of NH_2 are derived as 3.32 ± 0.09 in comet C/1999S4 (LINEAR) and as 3.43 ± 0.09 in comet C/2001A2 (LINEAR), respectively. These values indicate OPRs of ammonia to be 1.16 ± 0.05 and 1.22 ± 0.05 for comet C/1999S4 (LINEAR) and comet C/2001A2 (LINEAR), respectively.

Derived spin temperatures of ammonia, $28(+3, -2)\text{K}$ for comet C/1999S4 (LINEAR) and $26(+2, -1)\text{K}$ for comet C/2001A2 (LINEAR), are consistent with temperature ranges investigated for the Oort cloud comets in the previous studies. These results are indicative of grain

processing for the formation of cometary ammonia. The derived spin temperatures may indicate the formation region between the orbit of Saturn to that of Uranus in the solar nebula. These comets are thought to originate from Oort cloud concerning their orbits. Based on statistical studies on orbital evolutions of comets in the solar nebula, it is thought that Oort cloud comets formed between the orbits of Jupiter and Neptune and then they were scattered by giant planets into outer edge of the solar system. The result obtained in this study is consistent with the statistical studies on orbital evolution of the Oort cloud comets.

Further observations of OPR of cometary ammonia are required, especially, a comparison between Oort cloud comets and Kuiper belt comets (which are thought to form further than the orbit of Neptune in the solar nebula) is important for investigating origin of comets.

論文の審査結果の要旨

彗星は太陽系形成時の微惑星に最も近い天体とされ、太陽系の起源や物理化学的進化を考える上で、さらには星間物質・星間塵との相関等に至る研究に通じる上で、非常に重要であると考えられてきた。しかしながら、彗星核に含まれる物質の特定は本質的な特殊性、すなわち太陽熱にあぶられて蒸発するガスがどんどん太陽の紫外線や高エネルギー粒子との反応により解離を繰り返していくという状況の特殊性のため、なかなか困難である。また、これらの物質がどのような物理状態で彗星核へ取り込まれたかを探るのは一層困難である。これまで彗星が形成された温度環境については、彗星核に含まれている組成比からの推定、同位体比からの推定、また水分子に含まれる水素原子のスピン核運動量の向きによって生じるオルソ状態とパラ状態の比率による推定などが試されてきた。特にオルソ、パラ状態は、宇宙空間では簡単に互いに移り変わることはなく、あたかも別種の分子であるかのように振舞い、これらの比が氷となる環境の温度によって決まると考えられている。彗星からの蒸発時の温度を反映している可能性も残されてはいるが、一般に彗星形成時の氷結温度の重要な手がかりになると考えられている。しかしながら、これまでオルソ・パラ比が決定できた分子は彗星では水分子だけであり、また地球大気の水分子による吸収のために観測が困難であることから、これまでに航空機観測および人工衛星の観測から結果が得られたのは3例に過ぎず、この側面からの彗星の研究は滞っていた。

申請者は、水分子以外で彗星に含まれる物質の中で、オルソ・パラ比の決定が可能なアンモニアに着目した。アンモニアそのものは電波観測で捉えることが可能であるものの、非常に明るい彗星での検出例しかないこと、存在領域は彗星核近くの光学的に厚い領域であり、単純な蛍光散乱モデルが構築しにくいことから、アンモニアそのものからの直接決定ではなく、アンモニアが光解離して生成され、かつ地上観測で比較的容易に検出できるNH₂を用いて間接的にアンモニアのオルソ・パラ比を決定する独自の方法を開発・適用することで、下記のような重要な結果を得た。

1. NH₂の空間分布および生成量を観測することによって、NH₂のほとんどがアンモニアからの光解離によって形成されていることを定量的に確かめた。さらにNH₃から光解離によりNH₂とHが生成する反応系全体に、置換群論を適用し、NH₂のオルソ・パラ比からアンモニアのオルソ・パラ比を導出できることを確認した。

2. NH₂は可視光領域で数多くの輝線を発するが、これらの輝線強度をオルソ状態とパラ状態の比率をパラメータにして定量的に再現するモデルを構築した。

3. このモデルを、すばる望遠鏡の高分散分光器(HDS)によって観測された2つの彗星に適用し、NH₂のオルソ・パラ比を求め、最終的にアンモニアのオルソ・パラ比を決定し、スピントル度を約28ケルビン (C/1999S4 LINEAR)、約26ケルビン (C/2001A2 LINEAR)、と導き出した。これらの温度が太陽系内で彗星ができた場所の温度を反映しているとすれば、原始太陽系星雲のモデルに依存するものの、その場所が土星と天王星の軌道の間の領域となると推定した。

申請者の研究成果は、彗星におけるNH₂分子のオルソ・パラ比の決定を世界で初めて行ったものであり、その手法の確立だけでなく、実際の適用例から、その有効性をも示したものである。ここで着目したNH₂が地上からの可視分光で比較的容易に観測可能であるこ

とから、今後数多くの彗星のサンプルについての観測の可能性を拓いたといえる。

以上のように、これまで停滞していたオルソ・パラ比からみた彗星の形成環境の解明に大きな一歩を踏み出した独自の研究ということができ、この分野で新しい地平を切り開いたものとして、非常に高く評価できる。