



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	カイパーベルト天体の氷：なぜ結晶質なのか？
Author(s)	高遠, 徳尚
Description	3章 惑星における氷の物理と化学
Citation	低温科学, 66, 107-112
Issue Date	2008-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/34719
Type	departmental bulletin paper
File Information	TAKATOU.pdf





カイパーベルト天体の氷

——なぜ結晶質なのか？——

高遠 徳尚 国立天文台ハワイ観測所

太陽系のはるか彼方を回るカイパーベルト天体の氷は、何故かみな結晶質である。その環境下では紫外線・高エネルギー粒子の照射により、氷は短時間で非晶質化するはずである。結晶質であり続けるためには、絶えず表面が新しくなる必要があり、氷火山の可能性も指摘されている。果たして本当に火性活動が必要なのか、氷の実験データから検証を試みる。

1. はじめに

太陽系内には、 H_2O 氷が表面に存在する天体が多数存在する。木星の衛星エウロパの表面はほとんど氷で覆われており、その厚さは 100 km~200 km に達すると推測されている。土星の衛星エンケラドスでは氷が激しく噴出しているのが、探査機カッシーニで観測されている¹⁾。天王星、海王星の衛星表面でも、氷はごく普通に存在している²⁾。さらに遠方の太陽系外縁を回る天体でも、氷の存在が確認されている。

太陽系天体の材料であった原始太陽系円盤には、氷が大量に含まれていたであろうから、これらの天体に現在氷が観測されるのは、特に不思議ではない。問題なのは観測される氷が全て結晶質なことである³⁾。

衛星や太陽系外縁天体には、常に太陽からの紫外線や高エネルギー粒子が降り注いでいる。これらは結晶質の氷を非晶質に変える作用をすることが実験室で観察されており、その時間スケールは太陽系の年齢より十分に短い^{4)~6)}。そのため、天体表面の結晶質氷は非晶質に変換され、現在観測される表面は非晶質のはずである。ところが、現実には先に述べたように結晶質氷のみが観測されている。もちろん高温 (>80 K) なら太陽系年齢以内に自然と結晶化するが⁷⁾、観測されている太陽系外縁天体の平衡温度は 20~50 K である。自然には結晶化しない温度である。何か忘れているプロセス、あるいは間違っている理解しているものがあるはずである。

本稿では、すばる望遠鏡で観測したカイパーベルト天体の氷と、その解釈のために行った紫外線による氷の非晶質化実験を中心に、この未解決の問題を議論する。

2. カイパーベルト天体 2003 EL 61

太陽系の外縁、冥王星より遠くに、惑星に成長できなかった小天体が多数存在することを、1950 年前後に Edgeworth と Kuiper が独立に理論的に予想した^{8),9)}。1992

年にはじめて実際の天体が発見されて以来、すでに 1000 を超える天体が発見されている。冥王星もカイパーベルト天体の一員として再分類された。

今回観測した 2003 EL61 はカイパーベルト天体の中でも 5 番目に大きい天体で、衛星を 2 つ持つ¹⁰⁾。本体は直径 2000 km~2500 km で、自転周期が 3.9 時間と高速で自転している¹¹⁾。明るい方の衛星はその明るさから直径 400 km~500 km と推定される。すばる望遠鏡で観測した、本体と衛星のうちの明るい天体の近赤外線スペクトルを図 1 に示す。氷の特徴である幅の広い波長 1.6 μm と 2.0 μm 付近の吸収帯が明瞭に見られる。赤実線は温度が 20 K の純粋な結晶質氷で覆われているとしたときのモデルである。本体、衛星とも氷だけでスペクトルがほとんど説明できてしまうのがわかる。

氷が結晶質か非晶質かは、波長 1.65 μm にある幅の狭い吸収線の有無で判別できる。2003 EL61 にはこの吸収線が、本体、衛星ともに明瞭に見られ、どちらの氷も結晶質であることがわかる。もし非晶質の氷が混合されて

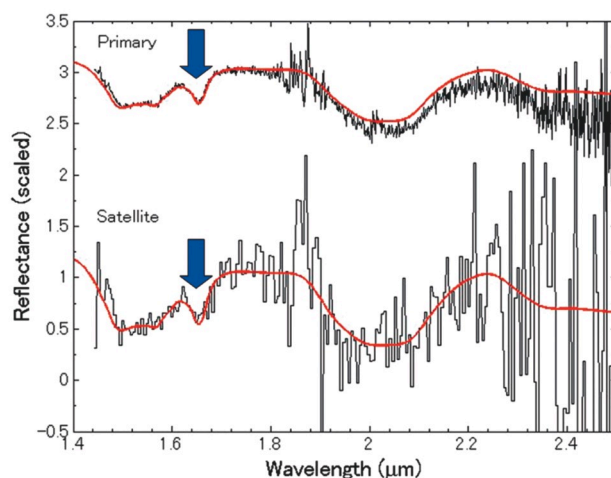


図 1：すばる望遠鏡の観測装置 IRCs で観測した 2003 EL61 の近赤外線スペクトル。上が本体、下が衛星のスペクトル。赤い実線は温度 20 K の結晶質氷のモデル。矢印で示した波長 1.65 μm の吸収が、この氷が結晶質であることを示している。ほとんど結晶質氷だけで、このスペクトルを説明できている。

いると波長 $1.5\ \mu\text{m}\sim 1.7\ \mu\text{m}$ にかけての幅の広い吸収の深さと波長 $1.65\ \mu\text{m}$ の吸収の深さの比が結晶質氷のみの場合に比べて違ってくるが、2003 EL61 の場合は結晶質氷だけで説明できる。

このようにほとんど純粋な氷で覆われた天体は、極めて珍しい存在である。実は 2003 EL61 はかつて別の天体と大衝突を起こしたと推測されている¹²⁾。カイパーベルト天体の中には 2003 EL61 と非常に良く似た軌道を持つものが少なくとも 5 天体あり、時間を遡るとこれらは 1 つの天体であった可能性が高い。このような過去に母天体が分裂してできた一群を「族」と呼んでいる。火星～木星間に存在する小惑星ではこのような「族」が多数見つかっているが、2003 EL61 はカイパーベルト天体で初めて同定された族の最大メンバーである。

表面がほぼ純粋の氷で覆われているのは、この大衝突に関係していると思われる。母天体はケイ酸塩鉱物と氷が混ざっていた天体であったが、衝突によるエネルギーが熱に変換されて昇温し、2003 EL61 本体ではケイ酸塩鉱物と水の分化がおり、軽い水が表面を覆ったと想像される。本体の内部には氷より密度の高い物質が存在することは、2003 EL61 全体の密度が約 $3\times 10^3\text{kgm}^{-3}$ であることからわかっている（質量は衛星の運動から求まる¹¹⁾）。氷が結晶質になったのも、この衝突による昇温が原因と考えられる。

どのようなメカニズムで分化が起ったか興味のあるところだが、氷が液体になったとしたなら、一時的にせよ太陽から遠く離れた辺境の天体に「海」が存在したことになる。氷が液体を経ずに昇華して、その水蒸気がゆっくりと再凍結しても結晶質の氷ができるが⁷⁾、2003 EL61 の衛星のように直径 500 km 程度の小さな天体に十分な厚さの結晶質氷が水蒸気から降り積もったとは考えにくい。

3. なぜ非晶質化しないのか？

3.1 高エネルギー粒子による非晶質化

海王星以遠の太陽系外縁部では、太陽風や太陽系外からの宇宙線が降り注いでいる（主にプロトン）。カイパーベルト天体表面の氷は、この高エネルギー粒子に晒されて非晶質に変化しているはずである。実験室の結果から結晶質 (Ic) の氷が非晶質に変化するには、入射粒子のエネルギー、種類に依らず約 $10\text{ eV molecule}^{-1}$ のエネルギー蓄積が必要だとわかっている¹³⁾。太陽から 40 AU (1 AU は太陽—地球間距離) 離れた場所での高エネルギー粒子のエネルギースペクトルから、 10 eV mole

cule^{-1} のエネルギー蓄積が起こるのに必要な時間が、氷表面からの深さの関数として求められている。

その結果は表面から $0.01\ \mu\text{m}$ までの非常に薄い層は、1000 年程度の短い時間で非晶質化し、深さ $1\ \mu\text{m}\sim 10\text{ mm}$ では深さに依らず約 10^9 年で非晶質化が完了する計算になる^{5),6)} (cf. 太陽系の年齢 $\sim 4.5\times 10^9$ 年)。

カイパーベルト天体の氷が結晶質であることが判明した最初の例は、(50000) Quaoar である³⁾。論文の著者である Jewitt と Luu はこのことから、天体表面は新鮮で何らかの原因で表面が更新されていなければならないと結論している。彼らはその原因として、火山活動 (!) や小天体の衝突の可能性を議論している。

ここで注意しなければならないのは、天体表面からの深さまで我々は見ているかである。氷が結晶質か非晶質かの判別は、先に述べた波長 $1.65\ \mu\text{m}$ の細い吸収線の有無である。この波長の光は氷の中では約 0.2 mm 進むうちに吸収されてしまう。従って、我々が議論しているのは氷の表層から約 0.2 mm の薄い層の平均の性質である。上でのべたように、この深さの領域が非晶質化するには、約 10 億年必要である。

天体表面を更新するプロセスとして、火山活動のような（魅力的ではあるが）エキゾチックな原因の他に、紫外線や高エネルギー粒子によるスパッタリングが、この時間スケールでは効いてくる (図 2)。Ly α 光による氷のスパッタリングは、50 K 以下では $3\times 10^{-3}\text{H}_2\text{O photon}^{-1}$ と実験室で求まっているので¹⁴⁾、この結果から太陽から 40 AU の天体が太陽 Ly α によってスパッタされる量を計算すると、約 $10^{-5}\ \mu\text{m year}^{-1}$ の速さで表面が剥ぎ取られていることになる。高エネルギー粒子自体でもスパッタリングが起こるが、実験室の結果では Ly α 光による作用より 1 桁近く遅い^{15),16)}。

高エネルギー粒子による非晶質化に掛かる時間は 10^9 年であったが、この間に Ly α スパッタリングによって 1 cm もの厚さの表面が剥ぎ取られる。非常に大雑把な計

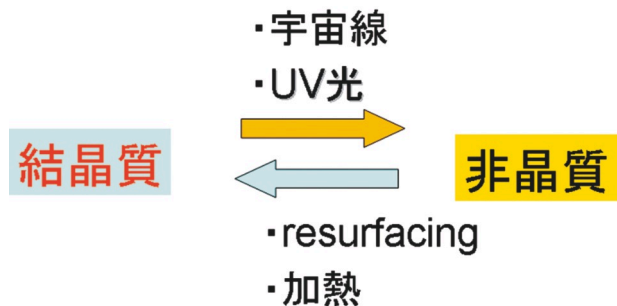


図 2：結晶質氷は紫外線や宇宙線によって表面が非晶質化する。非晶質氷は加熱によって結晶質化する。また表面が削られることにより、結晶質氷が露出する。

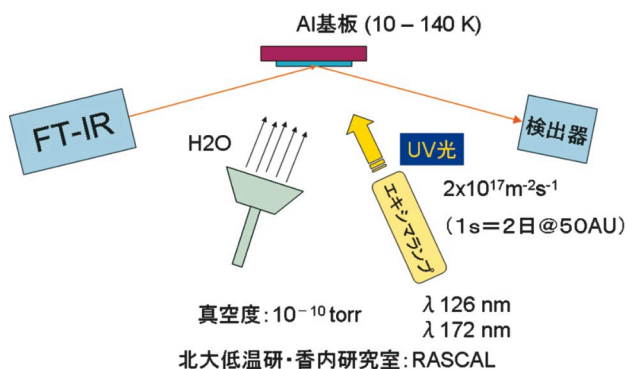


図3：紫外線非晶質化の実験に用いた装置の構成。

算ではあるが、非晶質化される氷の厚さと同程度がスパッタリングで消失する勘定となり、天体表面の結晶質氷の存在を説明できる可能性がある。

3.2 紫外線による非晶質化実験

結晶質氷に紫外線を照射しても非晶質化を起こすことが、香内と黒田によって報告されている⁴⁾。しかし非晶質化の効率や温度依存性が不明であったので、北大低温研・香内研究室にてこれらを求める実験を行った。

実験の装置の概略を図3に示す。試料となる氷は高真空槽 (10^{-10} torr) 内に設置した 140 K にアルミの基盤に水蒸気を吹きつけて作成する。氷の厚さは約 30 分子層相当 (約 10 nm) である。この温度では立方晶系 (Ic) の結晶質氷が形成される。こうして作成した試料を所定の温度 (10, 20, 30, 40, 50 K) まで冷却し、それぞれの温度で波長 126 nm (半値幅 10 nm, 照射強度 2×10^{13} photon $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) の紫外線を照射した。この照射強度は実験室の 1 秒が、太陽から 50 AU の距離の天体での 2 日に相当する。

氷の相変化は、FT-IR によって氷の赤外線吸収スペク

トルを照射中に観察して調べた。また非晶質化速度の波長依存性を調べるため、波長 172 nm の紫外線を照射する実験も行った。図4は波長 126 nm の紫外線を照射中の氷の吸収スペクトル (波数 3400 cm^{-1} 付近の O-H 伸縮モード) の時間変化を、基板温度 10 K と 50 K の場合について示したものである。

基板温度 10 K の場合は、Ic 氷で明瞭に見られた 3 つの吸収ピーク (3400 cm^{-1} : O-H 対称伸縮モード, 3300 cm^{-1} : O-H 非対称伸縮 (longitudinal) モード, 3150 cm^{-1} : O-H 非対称伸縮 (transversal) モード)¹⁷⁾ が、紫外線を照射すると時間と共に不明瞭となり、吸収帯全体が高波数側に移動することがわかる。一方基板温度 50 K では、紫外線照射開始直後は 10 K の場合と同様の変化を示すが、その後は変化が止まってしまう。

吸収スペクトルの変化量と紫外線照射時間との関係を、さまざまな基板温度に対して表したのが図5である。この図の縦軸は、紫外線照射前のスペクトルと照射後のスペクトルの差の大きさを表している。図を見てわかるとおり、初めの数分間は 10 K から 50 K のどの基板温度でもスペクトルが素早く変化するが、その後は基板温度が 30 K より低温の場合は非晶質化が進み、40 K 以上では変化が止まる。初めの数分間は試料のごく表面の変化を見ているのかも知れない。

基板温度 20 K 以下では、約 100 分間の紫外線照射で非晶質化がほぼ完了している。これは約 10 eV molecule⁻¹ の蓄積照射量に相当している。この値は高エネルギー粒子照射の場合と同程度である。

波長 172 nm の紫外線照射では、基板温度に依らず非晶質化は起こらないことがわかった。H₂O 分子を解離するには波長 165 nm 以下の光が必要であるので、この結果は非晶質化に H₂O 分子の解離が関係していることを

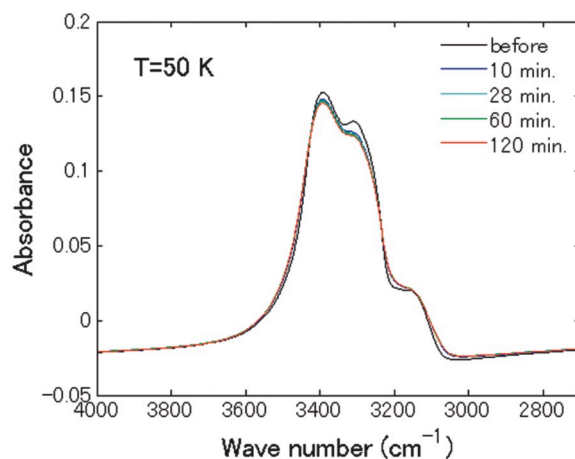
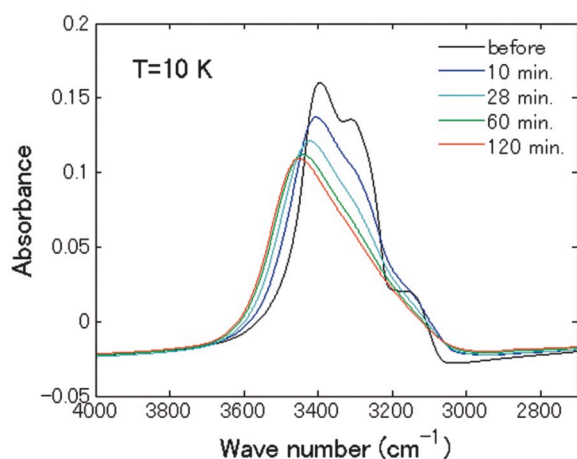


図4：紫外線照射による氷の非晶質化過程の吸収スペクトル。(a) 基板温度 10 K, (b) 基板温度 50 K。基板温度が 50 K ではほとんど非晶質化しないことがわかる。

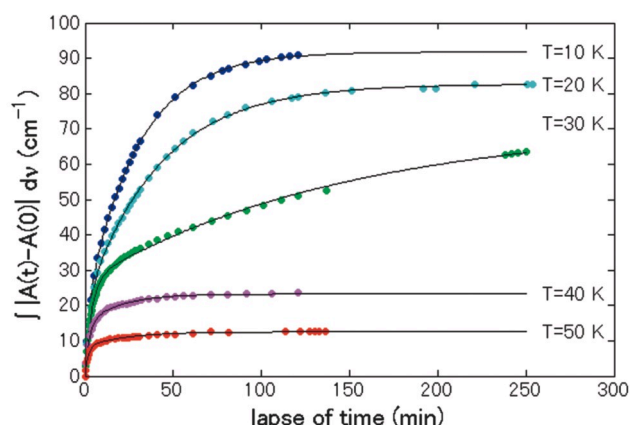


図5：非晶質化にともなうスペクトル変化量の時間変化。縦軸は紫外線照射前のスペクトルからの吸収量の変化の大きさを表す。基板温度 20 K 以下では 100 分程度で非晶質化が完了する。これは約 10 eV ($\text{H}_2\text{O molecule}$) $^{-1}$ の効率に相当する。

示唆している。

3.3 カイパーベルト天体での紫外線非晶質化

これらの結果を用いると、太陽紫外線（主に $\text{Ly}\alpha$ ）は 40 AU の距離にある氷天体を、100 日～1000 日で深さ $0.1 \mu\text{m}$ まで非晶質化できる計算になる。この非晶質化は非常に早いプロセスであり、スパッタリングと比べて 4 桁も早い。しかし、非晶質化を起こす紫外線は深さ $0.1 \mu\text{m}$ 程度までしか氷に進入できないため、これ以上長時間紫外線が照射されても、非晶質化は進まない。

非晶質化される層が薄いので、そのままでは波長 $1.65 \mu\text{m}$ の吸収としては観測されない。しかし星間塵などによる微小隕石衝突が頻繁に起こると、表面がかき混ぜられ表面に出た結晶質氷は紫外線で素早く非晶質に変わり、再び深いところに混ぜ込まれるという過程を繰り返し、結局微小隕石でかき混ぜられる深さまでは非晶質に変わってしまうであろう（微小隕石衝突により宇宙空間に放出される氷の量は、スパッタリングで失われる量に比べて無視できる）。

この場合、微小隕石で攪拌される深さと微小隕石の衝突頻度が、重要なパラメーターである。残念なことにカイパーベルト領域で微小隕石となる惑星間塵の性質はほとんどわかっていない。仮に探査機ユリシーズによって得られた典型的な星間塵（質量 $\sim 10^{-15} \text{kg}$ 、速度 $\sim 26 \text{ km s}^{-1}$ 、flux $\sim 10^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）¹⁸⁾ をカイパーベルト領域の惑星間塵として採用すると、微小隕石によって作られる微小クレーターは直径（～深さ） $\sim 0.5 \text{ mm}$ であり、約 1000 年で天体表面を覆いつくす。そして太陽 $\text{Ly}\alpha$ 光によって、およそ 10^9 年かかって微小隕石衝突で混合される深さ 0.5 mm まで非晶質化が進む計算になる。

ところが、高エネルギー粒子によって非晶質化した層

が紫外線スパッタリングによって失われるように、この紫外線によって非晶質化した層もスパッタリングにより失われる。非晶質化にかかる 10^9 年の間に、スパッタリングにより 1 cm の層が消失し、これは非晶質化した層の厚さ 0.5 mm に比べずっと大きい。

したがって、もしカイパーベルト領域の惑星間塵がここで仮定したとおりなら、紫外線による非晶質化は観測されないことになり、実際の観測結果と矛盾しない。

3.4 天体表面を新しくするその他の要因

今まで述べてきたように、カイパーベルト天体の表面を更新する原因として、紫外線あるいは高エネルギー粒子によるスパッタリングが重要であることがわかった。しかし既に述べたように、小天体の衝突や火山活動も表面更新の原因として考えられる。

カイパーベルト領域では、半径 100 km 程度の小天体との衝突は 10^7 – 10^8 年に一回の頻度で起こっているという計算もあり¹⁹⁾、小天体衝突による表面更新が可能である。ところが衝突天体にはケイ酸塩鉱物を多く含んでいるはずで、衝突によってそれが撒き散らされ表面が汚染されてしまう。2003 EL61 の場合、先に示したスペクトルや可視光でのアルベドが 0.6 – 0.7 とエウロパと同程度であることから¹¹⁾、表面はほとんど氷のみで覆われていると考えられる。小天体衝突による表面の更新は、少なくとも 2003 EL61 に対しては当てはまらないと考えるのが自然である。

もう一つの可能性は火山活動（cryovolcanism）である。現在活動が確認されている氷天体は、冒頭で述べた土星の衛星エンケラドス（直径 500 km ）から水蒸気と氷の結晶が噴出している現象（図 6）¹⁾ と、天王星の衛星トリトン（直径 2700 km ）からの噴煙²⁰⁾ である。トリトン



図6：土星の衛星エンケラドスから激しく噴出する水蒸気と氷（NASA/JPL/Space Science Institute）。

の直径は 2003 EL61 と同程度であり、エンケラドスの直径は 2003 EL61 の衛星と同程度であるので、何らかの加熱機構が働けばこれらの天体にも氷火山活動が起こってもおかしくはない。

しかしトリトン、エンケラドス共に加熱の原因は惑星からの潮汐力と考えられている。2003 EL61 の質量で十分な潮汐加熱ができるかは疑問である。さらに (50000) Quaoar には衛星は見つかっていないので、潮汐に加熱の原因を求めることはできない。放射性元素によって内部が加熱され、それによって氷火山活動（テクトニクスを含む）が起こっている可能性は否定できない²¹⁾。

4. まとめ

カイパーベルト天体表面の氷が、形成されてから長時間経っているにもかかわらず非晶質化せず結晶質として観測される原因を見てきた。スパッタリング（特に紫外線による）が重要な役割を果たしている可能性が高いことがわかったが、この推測は実験室での結果に大きく依存している。さまざまな条件下で実験を繰り返し、信頼性の高い基礎データを取得することが必要である。

実験室と実際の宇宙環境をつなぐためには、現象のメカニズムを理論的に解明しなければならない。特に重要なのは、実験結果が高エネルギー粒子や紫外線の単位時間当たりの照射量にどう依存するかである。例えば紫外線スパッタリングの実験で使用された $\text{Ly}\alpha$ 光は、40 AU の距離にある天体が受ける太陽 $\text{Ly}\alpha$ より 10^6 倍も明るい。また高エネルギー粒子による非晶質化実験では、 10^5 – 10^{10} 倍も強い線源が使用されている。1 光子あるいは 1 粒子で氷との反応が完結していれば実験結果の外挿は容易であるが、これだけ桁違いに照射密度が違うと、別の物理過程が関与している可能性がある。

2006 年 1 月に NASA から冥王星探査機 New Horizons が打ち上げられ、2015 年の冥王星到着を予定している²²⁾。無事到着するとカイパーベルト天体の一つである冥王星とその衛星カロンの詳細なデータが得られ、カイパーベルト天体の理解が大きく進むと期待される。特にカロン表面は結晶質氷で覆われているため、本稿のテーマから見ても大変興味深い。この探査機にはダストカウンターも搭載されており、カイパーベルト領域の衝突環境の情報も得られるはずである。到着まであと 7 年、どんな想像もしなかった世界があるのか、今から楽しみである。

謝辞

氷の紫外線非晶質化実験を行わせて頂いた、北大・低温科学研究所の香内研究室の皆様感謝いたします。

参考文献

- 1) <http://saturn.jpl.nasa.gov/multimedia/images/image-details.cfm?imageID=2779>
- 2) W. M. Grundy, M. W. Buie, J. A. Stansberry, J. R. Spencer, *Icarus* **142** (1999) p.536.
- 3) D. C. Jewitt, J. Luu, *Nature* **432** (2004) p.731.
- 4) A. Kouchi, T. Kuroda, *Nature* **344** (1990) p.134.
- 5) J. F. Cooper, E. R. Christian, J. D. Richardson, C. Wang, *Earth, Moon and Planets* **92** (2003) p.261.
- 6) G. Strazzulla, J. F. Cooper, E. R. Christian, R. E. Johnson, *C. R. Physique* **4** (2003) p.791.
- 7) A. Kouchi, T. Yamamoto, T. Kozasa, T. Kuroda, J. M. Greenberg, *Astron. Astrophys.* **290** (1994) p. 1009.
- 8) K. E. Edgeworth, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **109** (1949) p.600.
- 9) G. P. Kuiper, in *Proceedings of a topical symposium, commemorating the 50th anniversary of the Yerkes Observatory and half a century of progress in astrophysics*, McGraw-Hill, (1951), J. A. Hynek (ed.) p.357.
- 10) M. E. Brown *et al.*, *Astrophys. J.* **632** (2005) L45.
- 11) D. L. Rabinowitz, K. Barkume, M. E. Brown, H. Roe, M. Schwartz, S. Tourtellotte, C. Trujillo, *Astrophys. J.* **639** (2006) p.1238.
- 12) M. E. Brown, K. M. Barkume, D. Ragozzine, E. L. Schaller, *Nature* **446** (2007) p.294.
- 13) G. Leto, G. A. Baratta, *Astron. Astrophys.* **397** (2003) p.7.
- 14) M. S. Westley, R. A. Baragiola, R. E. Johnson, G. A. Baratta, *Nature* **373** (1995) p.405.
- 15) M. Shi, R. A. Baragiola, D. E. Grosjean, R. E. Johnson, S. Jurac, J. Schou, *J. Geophys. Res.* **100** (1995) p. 26387.
- 16) R. E. Johnson, *Rev. Modern Phys.* **68** (1996) p.305.
- 17) W. Hagen *et al.*, *Chem. Phys.* **56** (1981) p.367.
- 18) E. Grun *et al.*, *Nature* **362** (1993) p.428.
- 19) D. D. Durda, S. A. Stern, *Icarus* **145** (2000) p.220.
- 20) D. P. Cruikshank (ed.), *Neptune and Triton*, (1996) Univ. Arizona Press.

21) D. Jewitt, L. Chizmadia, R. Rimm, D. Prialnik, in
Protostars and Planets V, B. Reipurth, D. Jewitt, K.
Keil (eds.), University of Arizona Press (2007) p.863.

22) http://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/main/index.html

(2007 年 12 月 4 日 改訂受付)

Water ice on Trans-Neptunian Objects

— Why are they still crystalline? —

Naruhisa Takato
Subaru Telescope, 650 North A`ohoku Pl., Hilo, Hawaii
96720, USA.

abstract:

Many tran-Neptunian objects (TNOs) are covered with crystalline water-ice. However, they must quickly be changed to the amorphous phase by the high-energy particles and ultra-violet irradiation. Thus the existence of the crystalline water-ice means that the surface of the TNO is fresh and has been refreshed by some reason, which may include cryo-volcanisms. I will review the surface renewal process by using laboratory data of ice irradiation by ultra-violet photons and the high-energy particles.

高遠徳尚

国立天文台ハワイ観測所

Phone: +1-808-934-5925 FAX : +1-808-934-5984

e-mail: takato@naoj.org