

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19740095

研究課題名（和文）彗星塵の光散乱についての研究

研究課題名（英文）Study of light scattering by cometary dust

研究代表者 イェヴゲン ズブコ (Yevgen Zubko)

東北大学・大学院理学研究科・特別教育研究教員

研究者番号：10435977

研究成果の概要：氷の昇華、小さな構成グレイン上への粒子の破壊、吸収、複素屈折率、そして光の波長程度のサイズを持つ不規則形状粒子による光散乱における充填密度の影響に関して研究を行なった。ダストを形成している彗星ジェットと circumnuclear haloes の物理パラメータを明らかにする事を目的に得られた結果を彗星へ適用した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	0	1,800,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	390,000	3,490,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・宇宙物理

キーワード：光散乱、偏光観測、彗星、塵粒子、氷昇華、離散的な双極子近似、不規則形状粒子

1. 研究開始当初の背景

彗星の研究から太陽系形成に関するユニークな知見を得ることができる。彗星は、原始太陽系内で 46 億年前に作られた、太陽系最古の物質を保存している化石であると考えられている。彗星の研究は物理学的に重要なばかりでなく、一般的な惑星系の形成過程のより良い理解の為になくてはならないものである。

2. 研究の目的

本研究においては、現実的な粒子の形を考慮した光散乱の知見を基に、彗星のイメージング測光観測と偏向観測の解釈を行なう。

活発な彗星は、以下の構造を持つと考えられている。彗星の核は氷の昇華によって作ら

れたダストとガスに覆われている。また、ジェットと呼ばれる高速の物質の流れは、核の表面下の層から噴出したダストとガスで構成されている。彗星の偏光観測から、ジェットが核の周りのハロ、すなわち核の周りで輝く明るい部分と比べて正の偏光を持つことが分かる。その違いは、後方散乱に近い小さな位相角の部分の散乱特性に起因する。ジェットは正の偏光を作るのに対して、核の周りのハロは強い負の偏光を作る。そのような違いの要因はまだ良く解明されていない。

良く知られている解釈の中の1つは、次のようなものである。すなわち、ジェットの中のダストは、空隙率の高い、非球形粒子であるのに対して、核の周りのハロの中のダストにはそのような構造はなく、空隙率の低いコ

コンパクトな構造をしていると考えられる。すなわち、この考えでは2種類の粒子を仮定する必要がある。

これに対して、我々は1種類の粒子による説明を考えてみる。そうすると、彗星のジェットとハロの偏光特性の違いは、物質の生成、維持過程の違いによることになる。実際のところ、ジェットを作っているダストは、ハロの中のダストより高速で運動している。たとえば、前者の場合、その速さはおよそ400m/sであるのに対して、後者の場合、それはわずか1-10m/sである。その結果、ジェットを観測するときには、我々は氷を含んだ生成後間もない新しい粒子を見ているのかもしれない。同時に、ハロにおいては、生成後長時間が経過しているので、氷が昇華した後の古い粒子を見ていることになる。その考えは、ジェットにおける偏光状態の変化から説明することができる。すなわち、ジェットの粒子がコマの内側から外側に移動するにつれて直線偏光が減少する。このことは、ハロで観察される偏光とより類似しているようになっている。

3. 研究の方法

任意の形と内部構造を持った粒子による光散乱の数値シミュレーションを、離散的な双極子近似 (discrete dipole approximation; DDA) 法を主に用いて行なった。DDA 法は非球形の不均質な粒子に対する散乱特性を計算する手法で、近年計算機の進歩とともに注目を浴びるようになった。この手法は 1973 年に Purcell と Pennypacker によって、星間空間に存在するダストの非球形性を考慮した散乱特性を調べるために考案されたものである。1988 年には Draine がやはり星間ダストの吸収と散乱特性を計算するために DDA 法を改良し、より大きなサイズに適用可能なように、双極子の分極率を決める式 Clausius-Mosotti の理論式に、電子の反跳の効果を取り入れた。さらに 1993 年には、Draine と Goodman が分極率の式を改良し、Lattice dispersion relation を導いて、DDA 法と組み合わせた。このような理論的な DDA 法の改良は現在も続いている。また、DDA 法の適用限界については、Draine によって球形粒子について、DDA 法と Mie 理論を比較することから確立され、 $mkd < 0.5$ 以下となる場合、DDA は粒子の散乱計算に用いることができるということが知られている。ここで k は波数、 d は双極子の間隔である。さらに Okamoto 2002 は、六角柱形状の粒子に関して散乱適用性を調べ、光の入射方向として一方向のみを考えると散乱断面積は、収束しない場合があること、しかし、配向を考慮して、入射方向をランダムに多数とって平均化できる場合、DDA 法の適用限界は上述の Draine のものと同

じで良いことを示した。ただし、ここでは、複素屈折率はあくまで誘電体であること、つまり複素屈折率の虚数部は小さいことが条件であった。今回、DDA 法自体の理論的解析を幅広い複素屈折率の条件で実施し、適用範囲も調査した。ここでは特に、ジェットとハロに含まれる彗星ダストの物理特性を解明することとジェットで観測される偏光の変化を理解することに焦点を当てることにする。

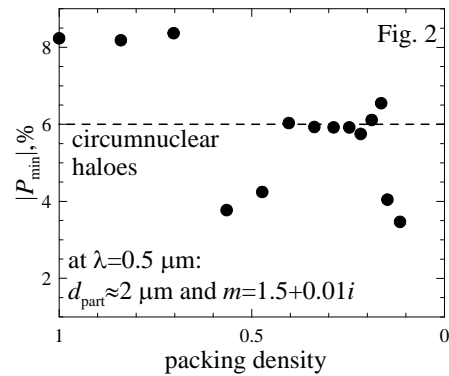


図2 DDA法によって計算された充填密度 (1-空隙率) と偏光度の最小値Pminの関係。波長は0.5μm, 粒子サイズを2μm, 複素屈折率を1.5+0.01iとした。

4. 研究成果

本研究で得られた成果は次のとおりである。

(1) 氷の昇華によって光の波長と同程度の大きさの粒子にダストが分裂することにより、直線偏光が減少する。それは彗星のジェットに関して観測された直線偏光の変化を説明することができる。彗星の偏光観測は、ジェットの中に存在する5-10ミクロン以上のダスト粒子によるものと定量的に一致する。

(2) 後方散乱における大きな負の偏光

(Pminは、約-6%) は、ダストのコンパクト構造を必ずしも意味していない。図2から分かるように、多孔性粒子も大きな負の偏光を作り出すことができる。多孔性の信頼できる評価は、負の偏光ブランチの大きさ |Pmin| と適度な位相角における正の偏光の大きさの比によって行なうことができる。核の周りのハロの偏光観測によると、その比は大きく、それは、ダストのコンパクトな構造を示唆している。

(3) 直線偏光の散乱角特性は、物質による光の吸収特性に強く依存する。後方散乱付

近の負の偏光ブランチは、吸収によって大きく減少する。

たとえば、複素屈折率の実数部が $\text{Re}(m) = 1.5$ の場合、負の偏光ブランチは虚数部の範囲が $\text{Im}(m) = 0-0.1$ の場合に存在する。これに基づいて、我々はハロの部分の吸収物質の複素屈折率の虚数部の上限を <0.02 と推定した。この値は、我々が知っているいくつかのハロを形成している物質を矛盾しない。彗星のジェット粒子に関しては、最終的な結論を得るに至らなかった。なぜなら、小さな位相角では、粒径の増加と吸収の増加が同じような偏光特性をもたらすからである。この問題は、大きな位相角(すなわち、 $80-100^\circ$)の下で、彗星ジェットの偏光観察を行なうことにより解決することが可能かもしれない。実際、直線偏光の最大値の位置が複素屈折率の虚数部の値に依存すると示された。すなわち、吸収の増加は、直線偏光の最大値の位相角をより大きな方へ移動させる。この特徴は、ジェットとハロの中のダストの物質の類似性または違いを推定するために用いることができる。

(4) 彗星の物質は、もともと結晶性であったか、もしくは彗星の核から放出された直後にアモルファスから結晶に変わったものかもしれない。そこで、我々は光散乱に対する非球形粒子による複屈折の影響を研究した。非球形粒子でも、光の入射方向について平均化すれば、粒子の形状による複屈折の影響は大きくないといえる。後方散乱の近くでは、それは、負の偏光ブランチの振幅の減少という形で現れる。

(5) 我々は、DDAの適用性を電気伝導性の粒子に広げた。屈折率の絶対値があまり大きくないならば、すなわち $|m| < 2$ の条件を満たすなら、DDA法は、伝導性粒子にも、誘電体粒子と同様に適用することができることが判明した。これは、従来は、複素屈折率が大きくなると、不規則形状の粒子のもっとも外側におかれた双極子の双極子モーメントの大きさが、過大評価されてしまい、それが影響して、粒子の全体の散乱特性を正確に計算することが困難である、とされていた。これは、定性的には、粒子を有限個の双極子の集まりで記述するDDA法では、粒子と真空との境界面の表現が粗いために、起こるとされてきたのである。今回詳細な理論的解析を実施した。その結果、実際に双極子の大きさを粒子の境界面において過大評価することは確認された。しかしそれは粒子の境界の表現が粗いためであることがわかった。これは散乱断面積と吸収断面積の和は、独立に求められた消散断面積と

比較した結果、より良い一致を示すところから、DDA法の双極子近似に起因する本質的な理論的困難さから来るものではない、ということが初めて確認されたことである。また境界面の取り扱いを工夫することで、以前に比べて、2-3倍大きなサイズの伝導性粒子(カーボンなど)を理論的に取り扱うことが可能であることを示唆されたことになる。これによって様々なサイズの範囲を同じ理論計算によってカバーすることが可能になり、彗星塵の偏光特性や吸収特性に対する複素屈折率、粒子形状、粒子サイズの詳細な理論的解析が可能になると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

全て査読有り

1. Satoru Yamamoto, Hiroshi Kimura, Evgenij Zubko, Hiroshi Kobayashi, Koji Wada, Masateru Ishiguro, and Takafumi Matsui, Comet 9P/Tempel 1: Interpretation with the Deep Impact Results, *Astrophysical Journal Letters*, 673, L199-L202, 2008
2. Evgenij Zubko, Hiroshi Kimura, Tetsuo Yamamoto, Hiroshi Kobayashi, Differences in polarimetric properties of cometary jets and circumnucleus halos, *Proceedings of 10-th Conference on Electromagnetic and Light Scattering by Nonspherical particles*, 257-260, 2008
3. ZUBKO Evgenij, SHKURATOV Yuriy, MISHCHENKO Michael, VIDEEN Gorden, Light scattering in a finite multi-particle system, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 109, 2195-2206, 2008
4. Zubko, E.; Kimura, H.; Shkuratov, Y.; Muinonen, K.; Yamamoto, T.; Videen, G.: Light scattering by agglomerated debris particles composed of highly absorbing material. 11th Electromagnetic and Light Scattering Conference, Extended Abstracts, 213-216, 2008
5. Zubko, E.; Petrov, D.; Shkuratov, Y.; Okamoto, H.; Muinonen, K.; Kimura, H.; Yamamoto, T.; Videen, G.: Applicability of

discrete-dipole approximation to
conductive particles. 11th
Electromagnetic and Light Scattering
Conference, Extended Abstracts, 117-120,
2008

[学会発表] (計 2 件)

1, E. Zubko, Linear polarization of fluffy
particles, Annual meeting of Asia Oceania
Geoscience Society, 2008/6/17, Busan,
Republic Korea

2, E. Zubko, Differences in polarimetric
properties of cometary jets and
circumnucleus halos, , Proceedings of
10-th Conference on Electromagnetic and
Light Scattering by Nonspherical
particles, 2007/6/17, Bodrum, Turkey

[その他]

ホームページ等

<http://caos-a.geophys.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

イェヴゲン ズブコ (Yevgen Zubko)

東北大学・大学院理学研究科・特別教育研究
教員

研究者番号 : 10435977

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :