

年間特集

彗星、その起源と天文教育

大西浩次（長野工業高等専門学校）

1. はじめに

今年、2つの大彗星がやってくる。最初は、パンスターズ彗星（C/2011L4）である。比較的大きな彗星で近日点付近の予報最大等級は-1等前後であるが、軌道と地球の位置関係から観測条件が悪い。南半球では、近日点通過直前まで夕方（西）の低空で見えているが、北半球では、近日点通過後の3月下旬の夕方（西）の低空でかろうじて見ることができる。彗星らしい姿が観察できるのは、4月上旬から中旬にかけての明け方（東空）になるだろう。この時期の明るさは、2等星から4等星とやや暗くなっているが、双眼鏡や望遠鏡を使用すれば、まさに彗星らしい姿に見えるに違いない。

しかし、本命は11月上旬から12月中旬に掛けてのアイソン彗星（C/2012S1）である。この彗星は、近日点距離が太陽に異常に接近するサングレーザーのひとつであり、近日点距離は0.0125AUと太陽の表面の極近くである。近日点（11月28日）前後には、満月より明るくなると言われている。無事、近日点を通過できれば、大彗星として姿を見せてくれるであろう。このアイソン彗星は、昼間でも観測できた「1680年の大彗星」キルヒ彗星（C/1680V1）と軌道がよく似ている。近日点前後は、2007年1月に日中でも見えたマックノート彗星（2006P1）（図1）の経験からも観測できると思われるが、絶対に太陽光を入れない工夫が必要であり、一般向けの観測対象とは言えない。実際の観察となれば、12月上旬から中旬の明け方の空がメインとなるだろう。しかし、社会教育機関では、観望会などが企画しにくい時間帯である。



図1 日中のマックノート彗星(2006P1)
2007年1月14日14hごろの青空の中で撮影(大西浩次@長野市立博物館にて)

ところで、近日点通過前後は、太陽観測衛星SOHOのコロナグラフ[1]の視野に入るので、近日点前後の彗星の様子を観察するキャンペーンを行うことは大変興味深い[2]。

この彗星年に向けて、日本天文協議会主催の「パンスターズ彗星を見つけよう」キャンペーンも始まっている。天文教育の立場として、今回の大彗星を新しい太陽系像を紹介する機会に活用してほしいと考える。ここ20年来の彗星の研究や太陽系形成の研究、さらには、太陽系外惑星の発見などによって、私たちの住んでいる太陽系の描像が大きく変わってきている。その成果の現れの1つは、2006年のIAU総会での「惑星の定義」の確定であり、太陽系を構成する天体の名称の変更である[3,4]。また、これらに反映して、学校での学習内容も大幅に変更されている。今回の彗星は、まさに、これら**新しい教育課程に入って初めての大彗星**である。本原稿が、新しい太陽系像をベースとした天文教育普及活動の企画のきっかけになれば幸いである。

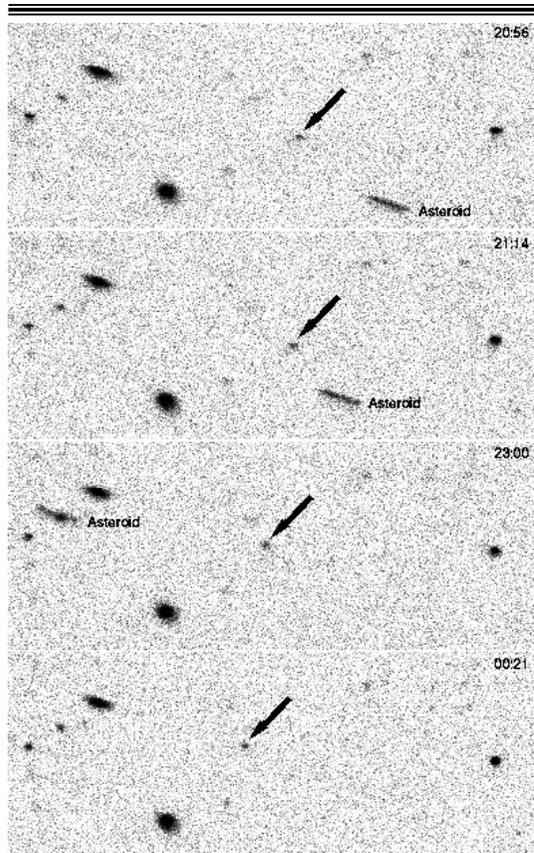


図2 1992QB1 発見時の画像
普通の小惑星より、ゆっくりと移動している
(矢印先)天体が 1992QB1。(提供：Dr. David
Jewitt)

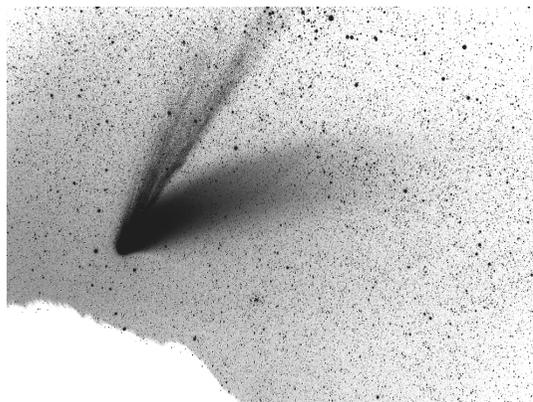


図3 ヘール・ボップ彗星
1997年4月10日、イオンの尾(斜め右上)、ダ
ストの尾(右)本誌表紙の反転画像 85mm(撮影：
大西浩次)

2. 海王星の彼方で

1992年8月、マウナケア山頂のハワイ大学2.2mUH88望遠鏡で観測していたルー(Jane X. Luu)とジューイト(David C. Jewitt)は、普通の小惑星よりはるかにゆっくりと動く小惑星状の天体を発見した[5](図2)。1992QB1と仮符号の付いたその天体は、追観測により軌道長半径が44.4天文単位(1天文単位とは地球と太陽の平均距離=約1.5億km)と海王星より遠方の天体であることが判った[6]。この天体は、彼らが探し求めていた短周期彗星のふるさと(力学的起源)にある天体であった。この発見の後、このような今日では太陽系外縁天体と呼ばれる海王星より遠い天体は、現在まで1000個以上発見されている[7]。

3. 彗星とは

彗星は「汚れた雪だるま」と言われている。彗星の本体は、核と呼ばれる大きさは数km程度の小さな天体である。核の80%は、水の氷で、残り20%くらいが一酸化炭素や二酸化炭素の氷(ドライアイス)とわずかなメタンやアンモニアなどの氷、さらに、微量のダスト(塵)と呼ばれる微粒子からなる。彗星は、太陽系形成期の組成物質の化学進化や形成温度などの情報を保持していると考えられている。

この核が太陽に近づくと、熱によって表面から氷が溶け出し、ぼんやりと薄い中性分子ガスの大気をつくる。これを「コマ」と呼んでいる。これらのガス分子の一部が太陽光の紫外線などでイオン化し、太陽風に引きずられてゆく。太陽風の流れは、秒速数百kmもあり、彗星からでたイオンはどんどん吹き流されて、太陽と反対方向に細長い尾を作る。これが「イオンの尾」である。一方、これらのガスと一緒に飛び出したダストは太陽光の光圧を受けて、同様に反太陽方向にたなびく。この速度は「イオンの尾」よりずっと遅く、その結果、彗星から大きく広がった尾を作る。

これを「ダストの尾」と呼ぶ（尾についてのより詳しい説明は[8]を参照）。

彗星は、その公転周期により、200年以下の短周期彗星とそれ以上の長周期彗星に分けられる。短周期彗星は軌道傾斜角が小さく、ほぼ、太陽系の惑星たちと同じ公転面（黄道面）を公転している。特に木星や土星の引力に強く影響を受けている一群の彗星は、周期がそれぞれ約6年、約14年である。一方、長周期彗星は、太陽黄道面に対していろんな角度の軌道を持っており、惑星の公転方向と逆行する彗星もある。彗星は、惑星の引力の影響を強く受ける。このため、彗星の軌道は、長期的には不安定である。惑星との接近などによる軌道の変化（散乱）で、太陽系内部に落ちたり、太陽系外部に放り出されたりすることもある。

4. 彗星のふるさと

彗星は、太陽に近づくにつれ、彗星核の表面が昇華してコマや尾を作る。1回の公転で、千分の1程度小さくなってゆく。すなわち、数千回の公転で彗星は消滅するか、あるいは彗星核表面にダストマントルが発達し、活動を止めた「枯れた彗星」になると考えられる。

ところで、私たちの太陽系は、約46億年前に誕生した。上記のように、彗星は、比較的短時間で消滅してしまうにも関わらず、今もなお、多くの彗星が観測できる。これは、なぜだろうか。その理由として、「どこかに彗星のふるさと（起源）があり、ときどき太陽系内部に落ちてくる」に違いないと考えた人達がいる。

その一人、オールトは、1950年、19個の長周期彗星の原初軌道（惑星の影響を受ける前の軌道）の遠日点の分布から、長周期彗星は、太陽から約5万AUはなれた領域よりやってくると提案した[9]。一方、エッジワース

やカイパーは、ほぼ同時期に、短周期彗星の起源が太陽系黄道面内の海王星より遠方の領域からやってくると提案した[10,11]。今日では、前者を「オールトの雲」、後者を「エッジワース・カイパー・ベルト」、あるいは、「カイパー・ベルト」と呼んでいる。

ところで、当初、後者のアイデアはあまり注目されなかった。なぜなら、短周期彗星は「オールトの雲からやってきた彗星が、偶然、木星や土星の引力によって軌道を変えられたため」として説明できると考えていたからだ。しかし、その後、コンピューター・シミュレーションなどの進展によって、短周期彗星の起源が、「オールトの雲」では説明できない事が次第に明らかになってきた。

さらに、1977年、特異小惑星キロン(2060: Chiron)が発見された。これは、軌道が天王星と土星の間にある初めての小惑星であった。研究者の中で、この特異小惑星が、「エッジワース・カイパー・ベルト」天体から短周期彗星に変わっていく途上の天体ではないかと推測する人々がいた。そして、事実、10年後の1987年、この小惑星が彗星に変身したのだ。

このような状況が、ジュイットたちを「エッジワース・カイパー・ベルト」天体の搜索へと駆り立てた。そして、2節に紹介したルーとジュイットによる1992QB1の発見に到った[6]。これによって、ついに「短周期彗星」・「特異小惑星キロン」・「カイパー・ベルト天体」の関係が繋がった。すなわち、1992QB1のような海王星より遠方の天体はエッジワースやカイパーにより考えられた短周期彗星のふるさとの天体であり、キロンは、「エッジワース・カイパー・ベルト」天体から短周期彗星へと軌道が力学的進化してゆく途上の天体だと考えられるようになった[12]。現在では、「エッジワース・カイパー・ベルト」の天体を太陽系外縁天体と呼ぶ。

5. 太陽系の形成と彗星

オールトは、はじめ「オールトの雲」に属する彗星の形成場所が、火星と木星の軌道の間にある小惑星帯だと考えていた。しかし、「氷」である彗星が岩石である小惑星と同じ場所で生まれたとは考えにくい。また、小惑星帯付近は、太陽の引力も強く、木星などの引力で彗星を太陽系遠方に放り出す（散乱）ことはなかなか難しい事が判っていた。

一方、1970年代に入り、太陽系起源の研究が進み、太陽系起源の観点から彗星の形成場所が次第に判ってきた。ここでは、京都大学、林忠四郎グループのシナリオ（京都モデル）に沿って説明しよう。

宇宙空間には、ガスや固体微粒子（ダスト）が集まった分子雲がある。このガスは主に水素やヘリウムである。ダストは、恒星の中で作られた重い元素からなる微小な金属や岩石などの固体微粒子であり、星の死とともに宇宙空間に放出されたものである。分子雲が星の誕生の場であり、例えばオリオン大星雲のように大質量星が次々生まれるような場所やおうし座の分子雲のように、太陽程度の質量の星がゆっくり生まれるようなところがある。

この様な分子雲コア（密度の高いところ）のひとつが、今から47億年前、自己重力で収縮しはじめ、その中心部に原始太陽が誕生した。この原始星の周りには数十から数百AUもの円盤ができる。この構造を原始惑星系円盤と呼ぶ。オリオン座大星雲の中に、このような原始惑星系円盤の姿を見ることが出来る（図4）。

この原始太陽系円盤（われわれ太陽系の原始惑星系円盤）の中でダストが円盤の赤道面に沈殿し、その厚さが数百kmになると、ダストの層の内部で重力不安定性が発生し、ダストの層が分裂し、微惑星と呼ばれる直径がkmサイズの小天体が一気に大量に出来る。

ところで、原始太陽系円盤内の温度は、太

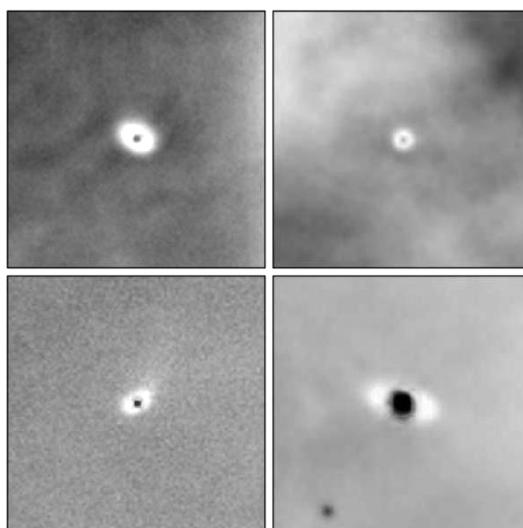


図4 オリオン大星雲内の原始惑星系円盤（反転画像）（撮影：NASA ハッブル宇宙望遠鏡 WFPC2 にて）

原始星の周りの原始惑星系円盤は、99%がガスで1%がダストで出来ている。このダストが背景のオリオン大星雲を隠し、シルエットとして見えている。中心部の天体が原始星でその年齢はわずかに100万年ほどである。この原始惑星系円盤の中で惑星系形成が起こっている。（画像提供：NASA）

陽からの放射エネルギーと円盤表面からの赤外線放射冷却の釣り合いで決まる。太陽の近くは高温で、火星と木星の間的小惑星帯辺りで160K、木星軌道付近で100Kとなる。

水やメタン、アンモニアなどの揮発性物質は、気体か固体の境の「アイスライン」より内側ではガス、外側では固体（氷）になっている。水のアイスラインは、現在のほぼ小惑星帯の位置に当たる。このため、小惑星帯より外側の領域は、内側に比べて氷（固体）成分が多くなっている。この違いが岩石質の多い微惑星と、氷成分の多い氷微惑星を作り、それらが地球型惑星と木星型惑星を作った。

小惑星帯より内側の微惑星は、ほとんどが

石質と金属質が混合した天体である。これらは、衝突合体を繰り返し微惑星が原始惑星サイズ（火星サイズ）まで成長してゆく。この頃には地球型惑星の領域内には数十個の原始惑星が作られている。その後、大きく成長した原始惑星間の引力により周りの原始惑星の軌道が変わり、次々と巨大衝突を引き起こし、金星や地球のような大きなサイズに成長したと考えられる。

一方、アイスラインより遠方の微惑星は水やメタン、アンモニアなどの揮発性物質が氷として存在していたため、地球型惑星領域の微惑星より大きく、氷と石質と金属質が混じった氷微惑星＝「汚れた雪だるま」天体になる。このため原始惑星も地球質量の10倍程度の大きさまで成長することができ、この大きな原始惑星の重力で周りの星雲ガスを集積して木星型惑星（巨大ガス惑星）へと成長する。しかし、天王星や海王星の領域は、公転速度が小さいために、衝突合体による原始惑星の集積は木星より時間かかり、氷や岩石を主体とするやや大きな原始惑星にごくわずかな星雲ガスを取り込んだ状態で成長が止まってしまう。このため、天王星や海王星は、太陽系形成論的にも、そして実際の内部構造からも木星型惑星（巨大ガス惑星）とは分類できず、最近では、巨大氷惑星と呼ばれている。

このような巨大惑星の成長の途上で、土星から海王星付近の氷微惑星の一部は、これら原始惑星の引力の影響で、太陽から遠方へと至る軌道に散乱される。このような太陽系外縁部まで散乱された氷微惑星は、太陽近傍の恒星や分子雲などからの重力の影響を受けて、更に軌道が進化する。こうして、太陽を中心とした半径約1万から10万天文単位の球殻状の氷微惑星分布が形成されたと考えられている。これが、太陽系を取り囲む「オールトの雲」である。

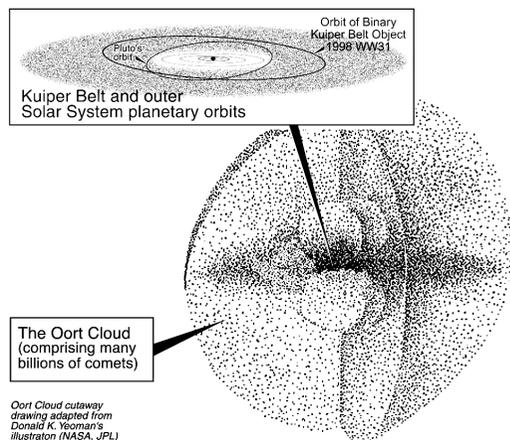


図4 エッジワース・カイパー・ベルト天体とオールトの雲（提供：NASA/JPL）

ところで、太陽系の海王星より遠方では、公転速度が遅いため、原始惑星に成長には非常に長い時間が必要である。一方、原始太陽が成長までの短時間の間に、原始太陽系円盤内のガスが散逸してゆく。その結果、太陽系外縁部で形成された氷微惑星は、惑星に成長できずに残ってしまったと考えられる。これらが、海王星より遠方の「エッジワース・カイパー・ベルト」天体＝太陽系外縁天体であると考えられる。冥王星は、この太陽系外縁天体内での最大級の天体の1つである。

すなわち、彗星は、これら太陽系形成期の氷微惑星の名残だと考えられる。「オールトの雲」から太陽系内部に落ちてきた氷微惑星（「オールトの雲」起源の彗星）が長周期彗星として観測される。これらは、土星から海王星付近で形成された氷微惑星である。一方、「エッジワース・カイパー・ベルト」から太陽系内部に落ちてきた氷微惑星（「エッジワース・カイパー・ベルト」起源の彗星）が短周期彗星として観測される。これらは、海王星より遠方で形成された氷微惑星が、原始惑星への途上で成長が止まってしまった天体＝太陽系外縁天体である。

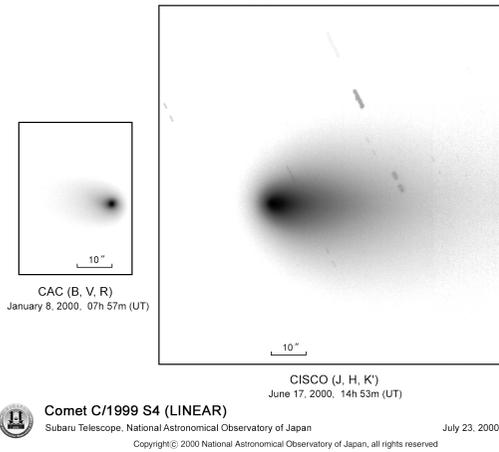


図 5 すばる望遠鏡近赤外線カメラ CISCO によるリニア彗星(C/1999 S4)の画像 (提供 : 国立天文台)

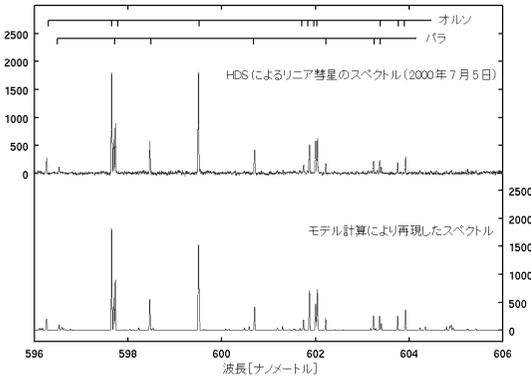


図 6 すばる望遠鏡高分散分光器(HDS)で測定したリニア彗星(C/1999 S4) 彗星核のアンモニアが壊れた NH₂ 分子のオルト・パラ状態のスペクトル(上図)とモデル計算結果(下図)。これより、氷の温度が 28K (-245°C) であることが判った[14]。

6. 核スピン温度と太陽系の起源

彗星と「カイパー・ベルト」、「オールの雲」の力学的な関連が明らかになるにつれ、両者の物理的・化学的違いが探し始められた。

河北秀世(京都産業大学理学部)と渡部潤一(国立天文台)らのグループは、彗星の氷の「核

スピン温度」に注目し、氷の形成された温度を測定する手法を開発した[13,14]。彼らは彗星の NH₂ 分子の発する輝線に注目した。NH₂ やアンモニアのような水素原子を 2 個または 3 個含む分子は、水素原子の原子核がもつ核スピンの向きの組み合わせにより、オルト状態(核スピンの向きが同一向き)とパラ状態(核スピンの向きが反対)がある。この 2 つの状態の存在比は、氷結時の周囲の温度に依存する。そこで、もし、オルトとパラの分子比が測定できれば、分子の氷結時の温度が求まる。しかし、オルトとパラの状態による輝線スペクトルの差は極めて小さい。そこで、彼らは、完成直後のすばる望遠鏡と高分散分光器 HDS を使い、リニア彗星(C/1999 S4)の分光観測を行った。その結果、リニア彗星の核を構成する氷の氷結温度は絶対温度で 28K 程度であることを決定した[14]。この彗星は「オールの雲」から来た彗星であり、原始太陽系円盤の土星から天王星あたりで形成されたと推定された。

しかし、短周期彗星であり、ディープインパクト衝突実験のターゲットになったテンペル第 1 彗星の氷結温度は、リニア彗星とほぼ同じ絶対温度で 30K 程度であった[14]。この短周期彗星は、カイパー・ベルト起源のはずであり、氷結温度は、さらに低い温度になるはずであった。このことは、テンペル第 1 彗星の起源が、非常に特殊なものであるか、あるいは、彗星「氷」の起源が、彗星の力学的な起源(微惑星形成領域)と異なっているのかも知れない。たとえば、彗星「氷」の氷結場所が、太陽系形成時の原始太陽系円盤の中ではなく、太陽系形成前の分子雲の中であった可能性である。

ただし、もし、彗星「氷」の起源が分子雲の中であったとすると、われわれの太陽系の起源に大きな問題が生じる。というのも、これまで、われわれ太陽系は、「ゆっくりと星が

できる」おうし座分子雲のような低温領域で誕生したと考えられていたからだ。このような状態での氷結温度は 10K 程度のはずであるしかし、分子雲内での氷結温度が 30K 程度であるとすれば、オリオン座の分子雲のような大質量星形成領域で誕生した事になる。

最近、隕石の中の短寿命放射性核種（消滅核種）の研究から、太陽系を作った分子雲の成分には、大質量星の超新星爆発による短寿命放射性核種が多く含まれる事が判ってきた [16]。このことは、われわれ太陽系を作った分子雲は、大質量星形成領域内に在った可能性を示唆する。しかし、彗星のスピンの温度に関しては、まだ、彗星のサンプルが少なく、短周期彗星の温度が予測より高い理由を結論できる状況ではないだろう。また、隕石による太陽系形成期の研究もまだ、確定している状況とは言いがたい [17]。いずれにしても、今後の研究が楽しみだ。

7. おわりに

パンスターズ彗星 (C/2011L4) もアイソン彗星 (C/2012 S1) も、共に、「オールトの雲」起源の彗星である。「オールトの雲」起源で、かつ、始めて太陽に落ちてきた彗星は、発見当初の等級から予報される最大等級より、実際に観測される最大等級が暗くなる傾向がある。例えば、オースチン彗星 (C/1989 X1) や、リニア彗星 (C/2002 T7)、ニート彗星 (C/2001 Q4) などである。一方、アイソン彗星は、サングレーザーであり、近日点通過後に生き残っていると、予報より非常に明るくなる可能性もある。いずれにしても、広報的には、過度の期待を持たせる謳い文句は危険であり、また、実際に明るい近日点通過前後は、一般の人々にとっては、観測困難な事から、「満月程度の明るさになる」という事だけが一人歩きすることは、非常に危険だと考える [18]。

一方、天文教育・天文普及的には、彗星の「光度予報が当たらない」ことを逆手にとって、いくつかの予報パターンを、みんなで当ててみようなどという企画が思いつく。ここで、一般の方が彗星の等級を測定することは難しいだろうと考えられる。しかし、今回の大彗星は、**デジタルカメラが普及して、初めての大彗星**でもある。例えば、カメラで撮影して彗星の明るさを測定するという作業が、これまでより手軽にできるだろうし、マカリのような解析ソフトも充実している。今回の彗星に対して、(やや敷居は高いが) デジタルカメラによる撮影で、(1) 等級の変化を追跡する、(2) イオンの尾を多くの人々でモニター観測する、などが考えられる。

一人一人のデータは、カメラや撮影技量の差によって、集まるデータの質の幅も大きくなるが、全国のいろんな天候の元で観測されるので、大量にデータが集まると、非常に正確な等級変化や尾の連続変化による太陽磁気圏との相互作用などを調べる貴重なデータになるかもしれない。このように、多くの人々が参加することで、一人一人の誤差はたとえ大きくとも、大規模データにより初めて出来る「サイエンス」を「大規模観察によるサイエンス」と呼ぼう。この大彗星をきっかけとして、「多くの人々」が、デジタルカメラを使って観測するという教育実験をおこなうことで、「大規模観察によるサイエンス」ができる可能性がある [19]。

2013 年の 2 大彗星は、新しい太陽系像の普及途上での最初の大彗星、デジタルカメラ普及時代での最初の大彗星、多くの新しい教育的活動が試される良い機会になるだろう。

参照・文献

[1] SOHO コロナグラフ

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html>

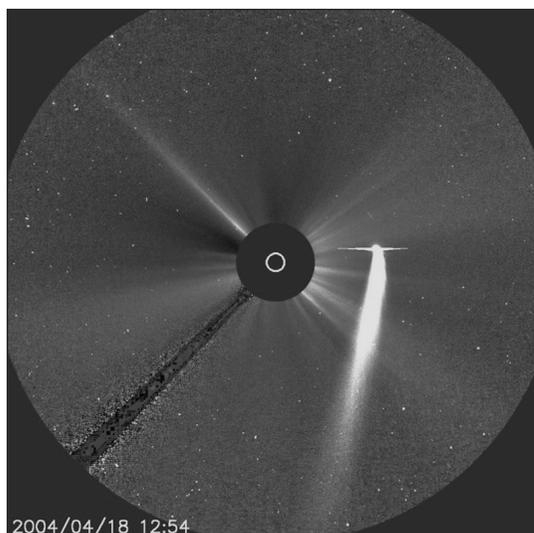


図7 SOHO LASCO C3 コロナグラフ視野
ブラッドフィールド彗星 (C/2004 F4)
(提供 : NASA/ESA)

[2]. SOHO コロナグラフを横切っていく様子は、多くの人々に今興味を持ってもらえる現象と同時に、彗星の軌道が放物線であること(ケプラーの第1法則)や面積速度が一定である(第2法則)ことを、リアルタイムで提示する貴重な機会になる。

[3]<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-t35-1.pdf>

[4]<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-t39-3.pdf>

[5] Jewitt, D.; Luu, J.; Marsden, B IAU Circ., 5611, 1 (1992)

[6] Jewitt, D.; Luu, J. Nature, 362, p. 730-732 (1993)

[7] 1258 個 List Of Transneptunian Objects
<http://www.minorplanetcenter.org/iau/lists/TN-Os.html>

[8] 森谷友由希(2012) 天文教育 2011 年 1 月号 (Vol.23 No.1, 本号) 4-9

[9] Oort, J. H., 1950 Bull. Astron. Inst. Neth., 11, 91

[10] Edgeworth, K. E., 1949 Mon. Not. R.

Astron. Soc., 109, 600

[11] Kuiper, P., Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 37, pp. 1-14

[12] ケンタウルス族と呼ばれる。

<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/Centaurs.html>

[13] 河北秀世 2005, 日本惑星科学会誌「遊星人」, 14, 183

[14] Kawakita, H., Watanabe, J., et al.: 2001, Science, 294, 1089

[15] Kawakita, H., et al. 2007, Icarus, 187, 272

[16] 橘 省吾 2007, 日本惑星科学会誌「遊星人」, 16, 94

[17] Tang, H Dauphas, N., <http://arxiv.org/abs/1212.1490>

[18] http://www.nationalgeographic.co.jp/news/news_article.php?file_id=20120928003

[19] 著者は、多くの一般市民による「大規模観察」で、「教育」や「サイエンス」を行う可能性を検討している。2012年の金環日食の際、「限界線研究会」で行われた「日食メガネ」による金環日食帯の北限界線の決定観測では、数万人の児童/生徒のデータを集めると、数百mの精度で決定できた。この精度は、太陽直径に直すと100-300kmの精度であり、人工衛星による観測と同程度の精度である。著者は、このことに非常に強い感銘を受けるとともに、「大規模観察」での「サイエンス」の可能性を検討したいと考えている所である。

大西 浩次