

2015年度内地留学奨学金による成果報告書

佐藤 勲

〈〒998-0018 山形県酒田市泉町 3-33〉

e-mail: satoisao@nifty.com

研究テーマ：6月うしかい座流星群の4次元ダストトレール計算

受入機関：日本大学理工学部宇宙航空工学科

指導教員：阿部新助

研究の概要：1998年6月27日に日本やヨーロッパで突然大出現した6月うしかい座流星群は、ボンス・ビネケ彗星を母天体とする流星群で、ZHR=200以上に達する1927年以来71年ぶりの大出現であった。当時、アッシャーのダストトレール理論によるしし座流星群の出現予報が出始めたなか、この流星群の出現の原因も19世紀に放出されたダストトレールによるものであることがわかってきたが、アッシャーのモデルによる計算では、日本で観測された出現時刻と数時間もの食い違いがあり、僅か数分の精度で的中したしし座流星群の予報と比べて謎の部分が多く残されていた。筆者は、世界で初めて4次元放出速度モデルを使って、実際に地球に降ってくる流星物質がいつどこで放出されたのかを具体的に計算することにより、うしかい座流星群の突発出現の謎を解明することに成功した。その結果、1998年の突発出現の原因となったダストトレールは、1813-1875年の近日点通過の際に形成された12本のダストトレールで、秒速10-50メートルという低速で母彗星から放出され、途中何度も木星に接近して軌道を曲げられ、秒速14キロという流星群のなかでも非常に遅い速度で地球大気圏に突入したものであることが解明され、この結果は、日本からアメリカにかけての半日にもわたる長時間の出現とよく一致することがわかった。この新たな理論を用いて、日本中を大騒ぎさせた挙句に不発に終わった伝説の1972年のジャコビニ流星群についても計算したところ、彗星から放出された流星物質が地球に衝突するのに必要な最低放出速度が速かったため、流星が出現しなかったことがわかった。

1. 突発流星群

1998年6月28日午前0時過ぎ、サッカーのワールドカップを見ていた私の携帯電話が突然鳴った。こんな時間に誰だろうと思って出てみると、

「会津の薄^{うすき}(謙一)です。今、会津天文同好会の仲間と虫を見に行ったら、雲間からたくさん流星が飛んでいるのが見えました。」

この話を聞いてすぐに外へ出てみたが、東京は暑い雲に覆われた梅雨空で、星一つ見えない。こ

んな時期に出現する流星群はないはず、と思って近江八幡の藪保男氏に電話すると、沖縄で流星が出ていたという報告があるほか、電波でもエコーが捉えられているという。そこで八ヶ岳の串田嘉男氏に電話すると、23時すぎから地震予知のFM流星のペンレコーダーに通常の約3倍の流星エコーが捉えられているということであった。これは本当のようだというので、早速電子メールで国内に速報を流すとともに、国際天文電報中央局のマーズデンにも報告した。すると翌朝のIAU

サーキュラーに、うしかい座を輻射点とする突発流星群が日本で観測されたとする記事が掲載された¹⁾。この突発流星群は、チェコ、イタリア、ポルトガル、アメリカでも観測され、実に半日も及ぶ長時間にわたって出現したことが明らかとなった^{2), 3)}。そしてこの流星群は、出現した時期と輻射点の位置から、1916, 1921, 1927年に出現し、その後出現しなくなった6月うしかい座流星群の71年ぶりの大出現であることが判明した。

2. 6月うしかい座流星群とは

6月うしかい座流星群とは、ポンス・ビネケ流星群とも呼ばれ、その名のとおおり、周期5.5年の7P/ポンス・ビネケ (Pons-Winnecke) 彗星を母彗星とする流星群である (図1)。この流星群は、1860年と1861年6月30日に最初の多数の出現の記録があり、1916年6月28日にイギリスやアメリカで、1921年6月28-29日に日本やヨーロッパ、1927年6月24日-7月2日にアメリカやタシケントで多数の出現が捉えられているが、その後は長く顕著な活動が見られなかった。日本では梅雨期に当たっているため、天候に恵まれないことが多

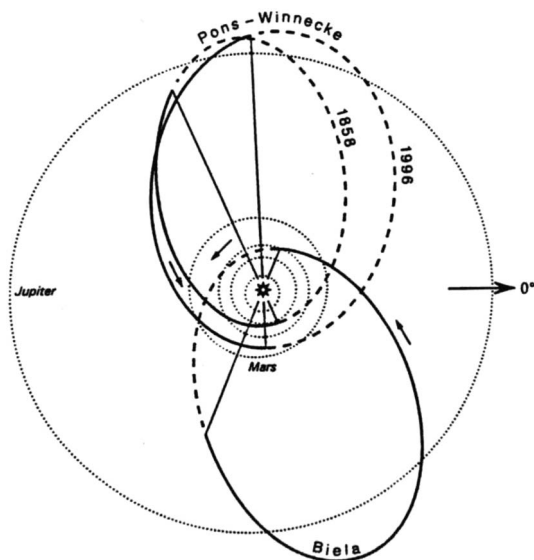


図1 ポンス・ビネケ流星群の軌道.

いが、1998年の出現の時も全国的に悪天候で、晴れたのは沖縄など一部の地域のみであった。

橋本・長田⁴⁾によると、この時の出現は、日本では6月27日の夕方には出現が捉えられ、午後10時ごろにピークを迎えて、明け方まで観測された。また、アールトラ⁵⁾によると、電波観測では眼視観測によるピークを中心に2日間にもわたって出現が捉えられている。

会津天文同好会のレポートによると、この時の流星群は、6月27日午後10時台に火球を含むゆっくり (1秒以上) とした明るいものがHR=60くらい飛んでおり、色はオレンジというよりはむしろ「赤みがかった金色」のものが多かった。輻射点がうしかい座頭部東側付近 ($\alpha=14\text{h}45\text{m}$, $\delta=+50^\circ$) の直径 10° の範囲と容易にわかったので、群流星とそうでないものを容易に判別することができた。有痕率は多くないが、経路の末端で増光するものが目立った。また、輻射点が東に移動していくように思われたという。これ以後は雲に覆われたが流星数は減少し、午前0時以降はHR=30程度であった。また、豆撒き現象と思われる連続した流星の出現が見られた。

薄謙一氏は、このうしかい座流星群の突発出現を迅速に通報した業績により、2002年に第1回日本天文学会天文功労賞を受賞している。1998年には、このうしかい座流星群のほかにも、ジャコビニ流星群としし座流星群も例年以上の出現をしたので、この年を「大三現」と呼んでいる。

3. アッシャー理論敗れたり

1998年6月のうしかい座流星群の5カ月後のしし座流星群の出現について、多くの人が大出現の期待を抱くなか、イギリスのアッシャーは1次元のダストトレール理論を用いて、日本では流星雨になるような大出現はしないと予報を出し、その通りになった。さらに2001年にはアッシャーは日本で大出現すると予報を出し、その通りに大出現して、アッシャーの予報は一躍有名になった。

流星群の予報計算と言えば、日本では「アッシャー理論」という言葉が使われるくらい、アッシャーのオリジナル理論というイメージが強いが、実は最初にダストトレール理論で流星群の予報計算をした人はアッシャーではなく、それから100年も前にストーニーとダウニングが1899年のしし座流星群の予報計算をしていた⁶⁾。

アッシャーのモデルは、彗星の近日点で軌道進行方向にダストを放出する1次元放出速度モデルである。ところが、そのアッシャーの理論によっても、1998年のうしかい座流星群の出現については、解明できない部分があった。それは、予報計算ではダストトレールはヨーロッパの時間に地球に接近するはずであり、それより数時間も早い日本の時間での出現を説明できないということであった。

1次元放出速度モデルによる計算結果を見てみよう。図2によると、1998年の出現は、1808年から1841年にかけての七つのダストトレールの接近によるものであることが推定された。「断定」ではなく「推定」であるのは、1次元放出速度モデルはあくまでも流星群出現の近似理論にすぎないからである。どういうことかという、流星というのは、母天体から適当な時期に適当な速度で放出された流星物質が地球に衝突することによって起こる現象なので、流星として降ってくるかど

うかは、流星物質が実際に地球に衝突する軌道を計算して判断しなければならないのに対して、図2が示しているのは、母天体の近日点で流星物質を軌道進行方向に放出するという特別な軌道を仮定したときに、ダストトレールが地球にどれだけ接近するかという距離を計算しているだけなので、この軌道では流星物質は実際には地球に衝突しないで、地球の傍らを素通りしているだけということになる。だから、どれだけ距離までダストトレールが接近すれば、実際にどんな明るさの流星がどれだけ出るのかは、この理論からだけではわからない。

さらに、この1次元計算の結果で困ったことは、流星の出現のピークと考えられる最接近の時刻が日本時間の6月28日朝となり、ヨーロッパでの出現ピークには対応しているが、日本時間の27日の夕方からすでに流星が出ていて、午後9時台にピークを迎えたとする観測結果をうまく説明できないことである。アッシャー理論では、出現時刻に数時間のずれが生じてしまい、しし座流星群のピーク時刻を僅か数分の精度で的中させた理論にしては、不満の残る結果であった。

4. 流星群の4タイプ

太陽系は、太陽と木星の連星系であると言われるくらい、木星の重力的影響が大きいですが、私は、流星群はその力学的特徴から以下の4タイプに分類できると考えている。

a. 非木星接近型

ダストトレールの軌道が木星に接近せず、長年にわたって安定であるもの。

- ・みずがめ座 η 群、オリオン座群 (1P/ハリー彗星)
- ・ペルセウス座群 (109P/スウィフト・タットル彗星)
- ・しし座群 (55P/テンペル・タットル彗星)
- ・こぐま座群 (8P/タットル彗星)
- ・こと座群 (C/1861G1 サッチャー彗星)

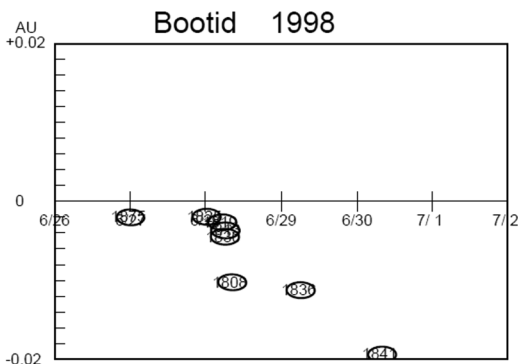


図2 1次元速度モデルによる1998年のうしかい座流星群のダストトレールの接近の様子。

b. 木星接近型

ダストトレールの軌道が繰り返し木星に接近し、不安定で出現したりしなくなったりするもの。

- ・10月りゅう座群 (21P/ジャコビニ・ツィナー彗星)
- ・ほうおう座群 (216P/ブランパン彗星)
- ・しぶんぎ座群 (小惑星2003EH1)
- ・6月うしかい座群 (7P/ポンス・ビネケ彗星)
- ・アンドロメダ座群 (3D/ビーラ彗星)

c. 内惑星型

ダストトレールの軌道が木星より内側の軌道を回り、安定であるもの。

- ・ふたご座群 (小惑星(3200)ファエトン)
- ・おうし座群 (2P/エンケ彗星関連)

d. 放物線・双曲線軌道型

放物線軌道や双曲線軌道の彗星から出現する流星群。一度きりの近日点通過の際に流星が出現する可能性は低いが、軌道進行方向の後ろ側に放出された流星物質は楕円軌道になり、後年、流星群として出現する可能性がある。

5. 4次元放出速度モデル

私はいくつかの流星群の予報計算をしている途中、計算機が出してくる計算結果の数字を見て、ダストトレールが何回も木星や地球に接近するケースがあるのに気がついた。そのため、木星に接近して木星の摂動の影響を強く受ける天体については制限3体問題となり、2体問題近似であるアッシャー理論は破綻する可能性があると考えていた。周期5.5年の木星族彗星であるポンス・ビネケ彗星は、まさにそれに当てはまる天体だった。

谷川・橋本⁷⁾は、制限3体問題のチスランパラメーターを使って、1998年の出現の原因となったダストトレールは、1819と1869年に形成されたダストトレールであると結論したが、予報時刻のズレの原因など、突発出現の謎の完全解明にはほど遠いものであった。そこで私は、1998年の

出現についての予報時刻のずれは、この効果によるものであろうと考え、ダストの放出速度ベクトルを3次元にし、放出時期も近日点通過からずらした4次元のフル計算モデルによる計算が必要であると考え、日本で2001年にしし座流星群の大出現があった数年後には計算コードを開発していた。当時の研究会で、この4次元モデルを「アッシャー理論はもう古い!」というタイトルで発表したところ、「過激なタイトルだ」と言われた。確かに、時代を10年以上先取りした先駆的な研究だった。

6. 流星物質の放出速度を決めるもの

2014年に起こった御嶽山の噴火では、水蒸気爆発に伴って時速300キロもの速度で放出された噴石によって多数の死傷者が出た。「汚れた雪だるま」とも言われる彗星核は、大部分が水の氷であり、ここから流星物質が放出されるメカニズムは、基本的に御嶽山の噴火と同じH₂Oの噴出である。その噴出速度の上限は、温度と分子の種類によって決まり、圧力差にはよらずに、H₂Oの場合は80 m/s程度である。太陽から遠くなるにつれ、彗星核の表面温度が下がるために噴出速度の上限が下がり、大きなダスト(マクロダスト)は放出されなくなる。そして、小惑星帯より外側では、H₂Oが昇華しなくなり、代わりにCOやCO₂の噴出によるダスト放出がメインになるが、その量は少ない。

ダスト放出のメカニズムにはもう一つあって、それは分子のブラウン運動に伴う微粒子の放出である。その速度はマクスウェル分布の速度で決まり、上述の噴出速度より約10倍高速で800 m/s程度である。しかし、このメカニズムで放出されるダストはミクロンサイズであり、太陽光圧の影響を受けて、シンクロン曲線、シンダイン曲線などの曲線を描き、レーダー観測でしか捉えられないような微光流星となる。

以上のことから、流星群の大出現を考えるうえ

では、3次元放出速度がH₂Oの噴出速度以下になる領域を考えればいいことがわかる。

7. うしかい座流星群大出現をもたらしたダストトレールは何か

図3には、うしかい座流星群出現の原因と考えられる1813-1875年の12本のダストトレールが地球に衝突するための最低の3次元速度を、ダストが放出された時期（近日点通過からの日数）とその日心距離（天文単位）に対してプロットしたものである。ダストトレールは公転の途中で何回も木星や地球に接近するたびに枝分かれして、地球に衝突する軌道はユニークではなくなるので、解に複数の分枝があったり、解を収束させる際に不安定性があるため、グラフにジグザグが見られ

るものがある。ここに示したのは、メインの解のダストトレールである。

どのダストトレールも、大きなダストが放出されるH₂Oの噴出速度（70-100 m/s）より低速であるが、その速度の極小はいずれも近日点ではなく、近日点から数十日離れたところ、つまり地球から火星軌道のあたりにあり、この付近で放出されたダストが最も大きな流星物質として地球に降ってくるのがわかる。最も遅い放出速度は、1825と1830年のダストトレールの約10 m/sである。逆に近日点で放出されたダストは、地球に衝突する軌道に入るのに大きな放出速度を必要とし、近日点で放出されたダストは、実際にはあまり地球に降ってこない。近日点でダストが放出されたと仮定するアッシャー理論は、実は大きな

うしかい座流星群 1998

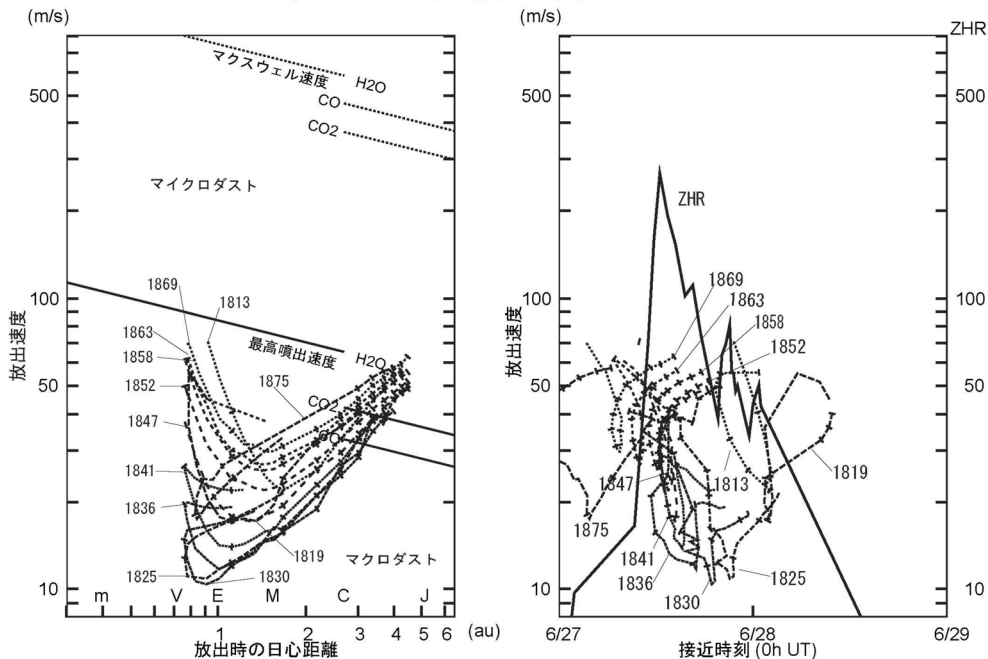


図3 (左), 4 (右) 1998年のうしかい座流星群出現の原因となったダストトレールが地球に衝突するのに必要な最小放出速度。図中のm, V, E, M, C, Jは、それぞれ水星, 金星, 地球, 火星, ケレス, 木星の軌道半径を表す。水の最高噴出速度以下ならば、肉眼流星となるマクロダストが地球に衝突する軌道がある。1825, 1830年に放出されたダストトレールが最も低速で衝突してくるが、日本で出現ピークをもたらしたのは、1836-1858年の複数のダストトレールの同時接近であったことがわかる。

ジャコビニ流星群 1972

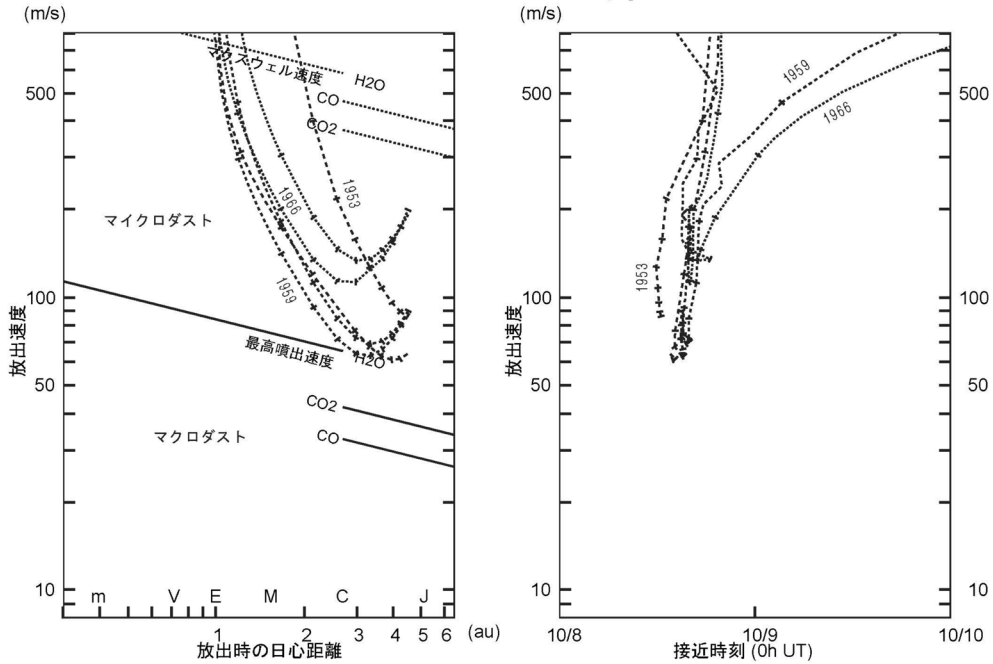


図5 (左), 6 (右) 1972年のジャコビニ流星群出現の原因となったダストトレールが地球に衝突するのに必要な最小放出速度. 1953-1966年に放出されたダストトレールの放出速度は、最低でも水の最高噴出速度以下にならなかったため、肉眼流星となるマクロダストは地球に衝突しなかった。

“ウソ”をついていたことになる。

次に図4を見てみよう。これは観測された時刻と流星数(天頂出現数ZHR)に対して、各ダストトレールの接近時刻とその最低放出速度をプロットしたものである。日本時間の6月27日21時台(世界時12時台)にZHR=200を超える出現ピークを記録しているが、この時刻には、1836-1858年の複数のダストトレールから30 m/s以下の低速で放出されたダストが衝突してきていることがわかる。これより前の日本時間の同日夕方から出現していたとする観測に対しては、1863, 1869年のダストトレールが原因と考えられる。一方、ヨーロッパでの出現をもたらしたのは、これらよりも古い1813-1836年のダストトレールであると考えられる。

これらのダストトレールの接近時刻は、1次元計算による接近時刻に比べて数時間から2-3日もず

れているものがある。1次元計算では、1808-1830年の5本のダストトレールが6月28日0-8 h (UT)に集中して接近しており、ヨーロッパでの出現時刻に当たっている。しかし、それより後に形成されたダストトレール、例えば、日本の出現ピークの原因となった1841年のダストトレールは、1次元計算では6月30日8時UTに接近してくるが、実際にはこれより18時間も早く接近してきた。これは、ダストトレールが公転の途中で木星の摂動を受けて広がったためである。ダストトレールの典型的な幅は、月の軌道半径ほどであるが、何回も公転して摂動を受けるたびに拡散していき、木星接近型の流星群では10倍以上になることもある。

8. 2004年も予報どおりに出現

ダストトレール理論によって1998年の大出現

の原因が解明された後、6年後の2004年にも再び出現することが計算された。しかもこの年は、例年より1週間も早い6月23日の夕方で、日本を含む東アジアで見られることが予報された。筆者は梅雨の日本を避けて、台湾の鹿林天文台で観測し、予報どおりにクッキーがボロボロと崩れるような非常に遅い流星群が出現したのを捉えることができた。

9. 伝説の1972年ジャコビニ流星群の謎

50歳以上の方ならば、1972年10月9日に大出現すると予報され、日本中を大騒ぎさせたのに不発に終わってしまったジャコビニ流星群のことを覚えているかもしれない。松任谷由実の「ジャコビニ彗星の日」にも唄われているように、新聞やテレビでも「世紀の宇宙ショー」などと宣伝されたにもかかわらず、期待外れに終わり、東京天文台には多くの問い合わせや抗議の電話が殺到したのであった。

当時は、母彗星が通過してから何日以内に地球が横切ると流星群が大出現する、という経験則に基づいて予報がされていたが、この時の状況を新理論で計算してみると、母彗星から放出された流星物質が地球に衝突するのに必要な最低速度は約60 m/sであり、これは水の最高噴出速度を上回っていた(図5)。このため、肉眼流星となるマクロダストは地球に衝突する軌道に乗ることができず、この日、流星群は出現しなかったのである(図6)。

10. 今後の課題

流星群の4次元予報計算は、計算に時間がかかる。特に6月うしかい座群のように何度も木星に接近する流星群では、ダストトレールが何本にも分枝し、収束も遅くてかなり困難である。しかし、そのような流星群に対してこそ、4次元予報計算は有意義なのである。

今回、最も計算が難しい流星群の一つである

6月うしかい座群の1998年の出現の謎を見事に解明できたことにより、この理論の有効性を示すことができた。今後は、ほかの流星群に対しても適用することにより、すべての流星群の出現のメカニズムを完全に解明することが究極の目標である。

謝 辞

本研究は、平成27年度日本天文学会内地留学費の助成を受け、日本大学理工学部航空宇宙学科の阿部新助准教授の指導の下に行われました。両者に対して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Sato I., 1998, IAUC 6954
- 2) Brown P., Hocking W. K., 1998, IAUC 6966
- 3) Spurny P., Borovicka J., 1998, IAUC 6973
- 4) Hashimoto T., Osada K., 1998, JIMO 26, 263
- 5) Arlt R., et al., 1999, MNRAS 308, 887
- 6) 長沢工, 1997, 流星と流星群—流星とは何かがどうして光るのか, (地人書館)
- 7) Tanigawa T., Hashimoto T., 2000, Earth, Moon, and Planet 88, 27

4-D Calculations of 1998 June Bootid Outburst and 1972 Giacobinid

Isao SATO

3-33 Izumi-cho, Sakata, Yamagata 998-0018, Japan

Abstract: Result of 4-D calculations of Bootid outburst on 1998 June 28 and Giacobinid on 1972 October 9 are presented. 1998 June Bootid outburst was caused by several dust trails in 19th century whose ejection velocities are under the eruption velocity of water. However, the ejection velocities of the dust trails of the 1972 Giacobinid are over the eruption velocity of water. It is the cause of the absence of meteors.