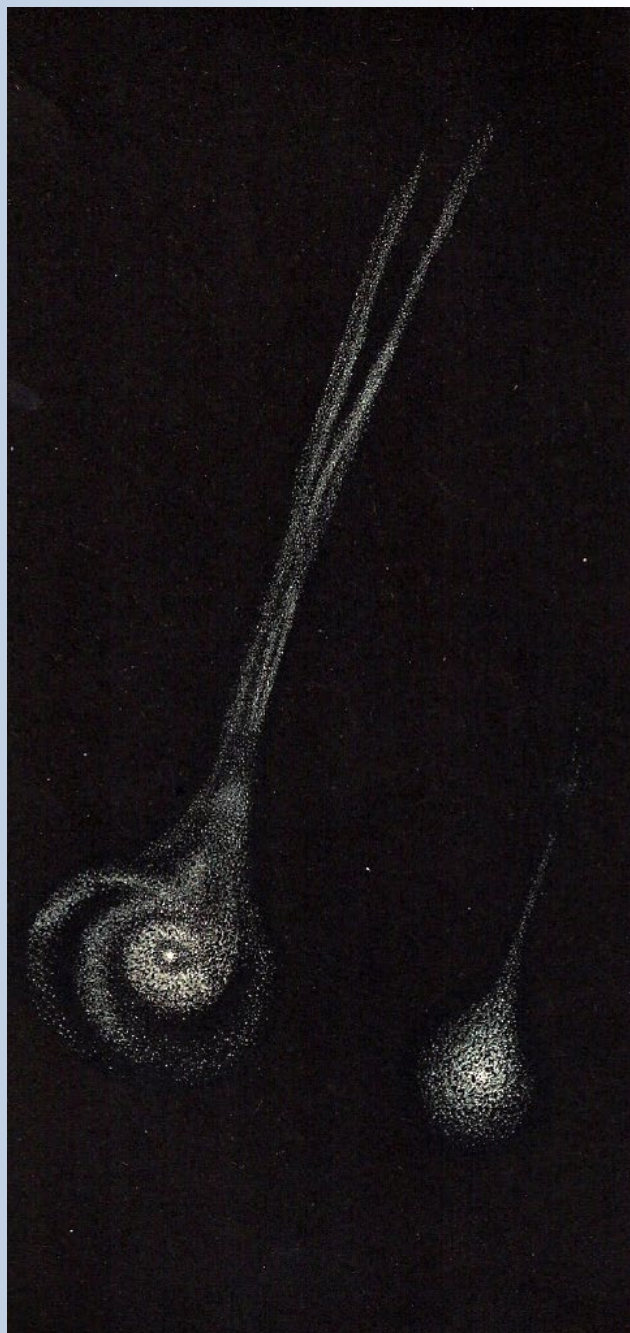


# Podstawy nauki o meteorach

*Niniejszy tekst powstał w oparciu o wydany w 2008 „Handbook for Meteor Observers”, podręcznik wydany przez International Meteor Organization będący aktualnym i przystępnym wprowadzeniem w świat współczesnej nauki o meteorach. W trzecim odcinku zajmiemy się meteoroidami.*

## Meteoroidy

Pierwsze próby porównywania orbit meteoroidów z orbitami ciał Układu Słonecznego podjęte zostały w 1860 r., kiedy wielu autorów opublikowało prace wiążące duże roje meteorowe ze znanymi wówczas kometami. Początkowo były to prace teoretyczne, na spektakularne potwierdzenie trzeba było poczekać do roku 1872.



Rys. 1. Komet Biela w lutym 1846 r. E. Weiss, „Bilderatlas der Sternenwelt, 1888”

W 1826 r. kapitan austriackiej armii Wilhelm von Biela odkrył kometę, która otrzymała nazwę 3D/Biela. Okazało się, że jest to ta sama kometę, którą dostrzeżono w 1805 r. oraz wcześniej w roku 1772. Biela i inni badacze przeprowadzili obliczenia, wykazując bardzo krótki okres obiegu komety wynoszący jedynie 6,7 roku. Kometę wróciła ponownie w 1832 r., ale w roku 1839 nie została dostrzeżona z powodu niekorzystnego umiejscowienia względem Słońca. Podczas kolejnego powrotu na przełomie 1845 i 1846 roku dostrzeżono rzecz niezwykłą — kometę rozpadła się na dwie. Obie komety powróciły w okolice Słońca w 1852 r., odległe od siebie o 1,5 mln km. Więcej nie obserwowano już kolejnego powrotu ich w roku 1859 ani w 1865. W 1867 r. Edmund Weiss i Heinrich d'Arrest niezależnie zauważyli, że obserwowany co jakiś czas na początku grudnia rój meteorów ma radiant w gwiazdozbiornie Andromedy i może mieć jakiś związek z kometą Biela. Prace obliczeniowe obu badaczy zdawały się potwierdzać związek komety i roju, co więcej, 27 listopada 1872 r. miało dojść do wielkiego deszczu meteorowego. Ta pierwsza w historii prognoza aktywności okazała się trafna. Faktycznie doszło wówczas do ogromnego wybuchu aktywności. Kolejny deszcz Andromedydów wystąpił w listopadzie 1885 r. Perturbacje pochodzące od wielkich planet zmieniły niestety orbitę strumienia i w kolejnych latach wielkich deszczy Andromedydów już nie obserwowano.

## Ewolucja strumieni meteoroidów

Meteoroidy krążące w przestrzeni ulegają wpływom różnych czynników — są to czynniki grawitacyjne, takie jak perturbacje, i czynniki niegravitacyjne, takie jak na przykład ciśnienie promieniowania. Orbita meteoroidu ewoluuje od momentu jego powstania, a badanie tej ewolucji pozwala przewidywać zachowania rojów meteorowych obserwowanych z Ziemi. Ewolucja orbit meteoroidów nie została jeszcze do końca poznana, wiele czynników rozpatrywanych jest tylko teoretycznie, istnieje też wiele wątpliwości.

W czasie gdy kometę zbliża się do Słońca, jej jądro zaczyna powoli sublimować. Z powierzchni komety uwalniany jest gaz oraz cząstki pyłu uwięzione wcześniej w kometarnym lodzie. Uwalnianie to odbywa się w wyizolowanych aktywnych obszarach jądra obserwowanych bezpośrednio za pomocą sond kosmicznych. Nie jest do końca jasne, jaką prędkość mogą osiągnąć wyrzucane ziarna pyłowe. Zapewne ich część jest wyrzucana z prędkością większą niż prędkość ucieczki z jądra komety, rozpoczynając samodzielną podróż przez Układ Słoneczny, część opada ponownie na powierzchnię jądra, pokrywając je ciemną warstwą pyłową. Prędkości wyrzutu cząstek pyłowych z jądra komety są znaczne. Mieszczą się one w szerokim zakresie, od dziesiątków metrów na sekundę do nawet kilometra na sekundę. W przypadku komety Halleya tworzącej roje Orionidów i Eta Akwarydów, cząsteczki są wyrzucane z prędkościami od 0,5 do 1 km/s. Dla porównania — prędkość ucieczki z jądra komety Halleya to tylko 3 m/s.

Po uwolnieniu z jądra kometarnego każda cząsteczka staje się samodzielnym ciałem niebieskim okrążającym Słońce

ce po obicie eliptycznej. Orbita ta różni się nieznacznie od pierwotnej orbity kometarnej. Różnice te mają dwie podstawowe przyczyny. Po pierwsze, cząsteczka wyrzucona została z komety z pewną prędkością i w pewnym kierunku, którą dodaje się do pierwotnej prędkości i kierunku komety macierzystej. W ten sposób powstaje nowa, nieco inna orbita. Po drugie, na cząstkę działa ciśnienie promieniowania działające w kierunku odslonecznym, które największy wpływ wywiera na cząsteczki z jądra komety podczas ich przejścia przez peryhelium. Wpływ prędkości wyrzutu i kierunku wyrzutu cząsteczek z jądra powoduje powstanie niemal równomiernego rozrzutu elementów orbitalnych, natomiast wpływ ciśnienia promieniowania skutkuje poszerzaniem się pierwotnych orbit. Stopniowa zmiana elementów orbitalnych powoduje powstawanie chmury pyłowej stopniowo rozciągającej się wokół orbity komety macierzystej. Po wielu powrotach komety w okolice Słońca powstaje pierścień pyłowy rozciągający się wzdłuż całej orbity. Czas, w jakim powstaje taki strumień, jest uzależniony od wielu czynników, takich jak rozmiar jądra, odległość peryhelium czy też rozmiar samej orbity.

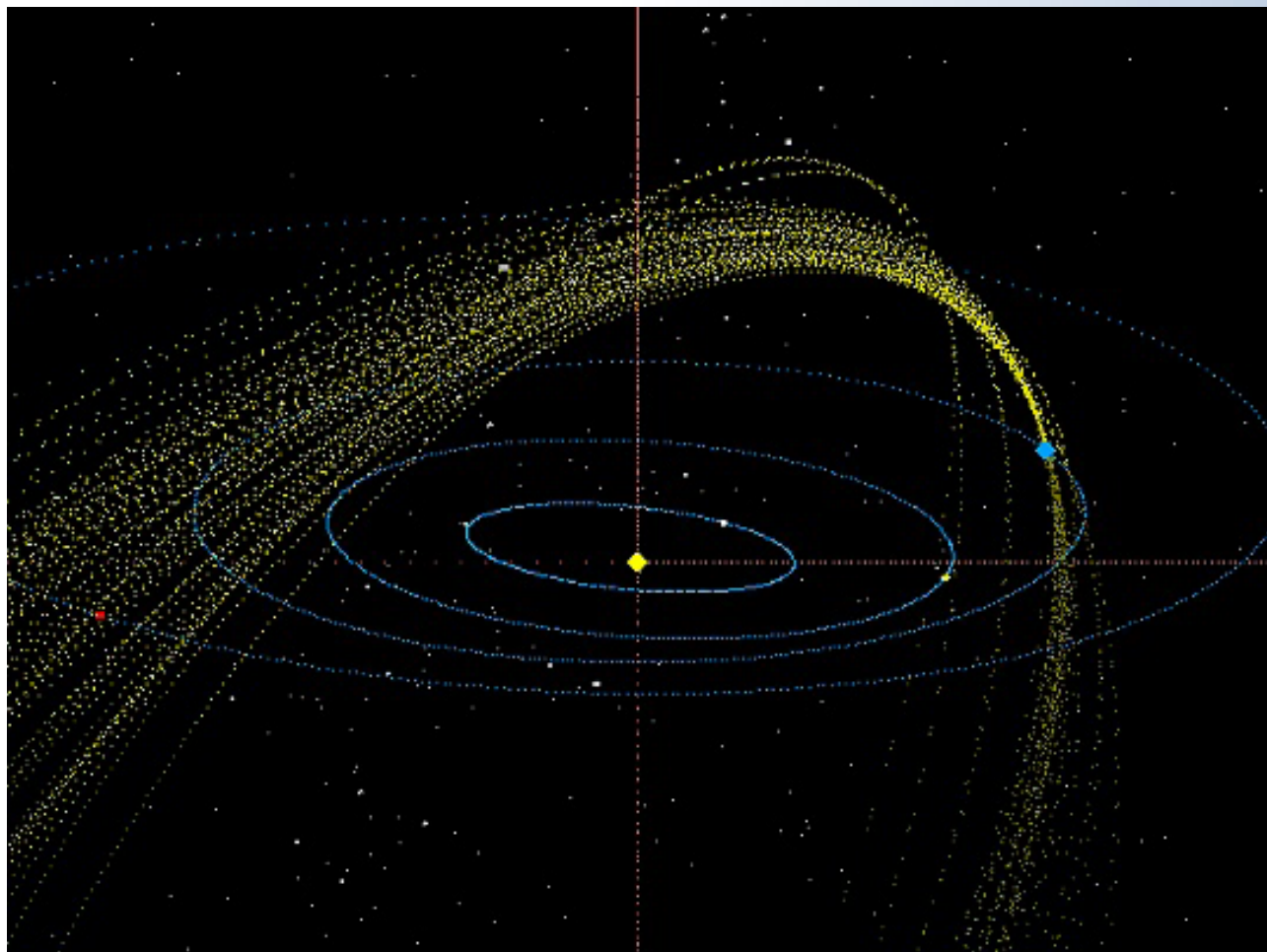
Na podstawie różnych modeli otrzymano dość znacznie różniące się czasy formowania strumienia. Generalnie cząsteczki mniejsze (przykładowo o wadze 2 mg), znacznie bardziej podatne na wpływy niegrawitacyjne, jako pierwsze tworzą strumień wzdłuż orbity. Ewolucja cząstek większych (przykładowo o wadze 0,5 g), wywołujących meteory obserwowane wizualnie jest wolniejsza i czas, w jakim tworzą one pełny pierścień, jest kilka razy dłuższy. Przykładowo dla Geminidów czas powstawania strumienia z drobnych cząstek

to około 16 lat, czas powstawania strumienia wizualnego to 40 lat. Warto pamiętać, że Geminidy poruszają się po orbicie o bardzo krótkim okresie obiegu. Dla odmiany czasy te dla Kwadrantydów są wielokrotnie dłuższe, tutaj czas formowania się strumienia sięga 800 lat. Uogólniając wyniki symulacji, można powiedzieć, że przeciętnie formowanie strumienia odbywa się w czasie kilkudziesięciu obiegów komety.

Po uformowaniu strumienia mamy do czynienia z typowym rozkładem orbit i cząsteczek wokół orbity komety macierzystej. Przykład takiego rozkładu dla strumienia Perseidów przedstawiono na rysunku.

Jeśli chodzi o rozkład położenia cząsteczek, to tylko niewielka ich część znajduje się w pobliżu peryhelium, a to z prostej przyczyny — na eliptycznych orbitach ciała spędzają większość czasu, przemieszczając się gdzieś daleko, w okolicach aphelium. Pomijając ten oczywisty fakt, możemy spodziewać się większego zagęszczenia świeżo wyrzucanych cząstek w sąsiedztwie komety macierzystej. Tak też w istocie jest. W latach w których kometa macierzysta roju przechodzi przez peryhelium, obserwuje się często wzmożoną aktywność roju. Świetnym przykładem jest tu rój Leonidów. Bardzo wysoką aktywność obserwowano w latach poprzedzających lub następujących po przejściu komety Tempel-Tuttle przez peryhelium, w latach odległych od momentu peryhelium obserwowana aktywność jest znacznie słabsza i wynika z obecności starych cząstek rozciągniętych wzdłuż całej orbity.

Z biegiem czasu kometa macierzysta traci swoją aktywność. Jednocześnie różnego rodzaju siły, takie jak perturba-



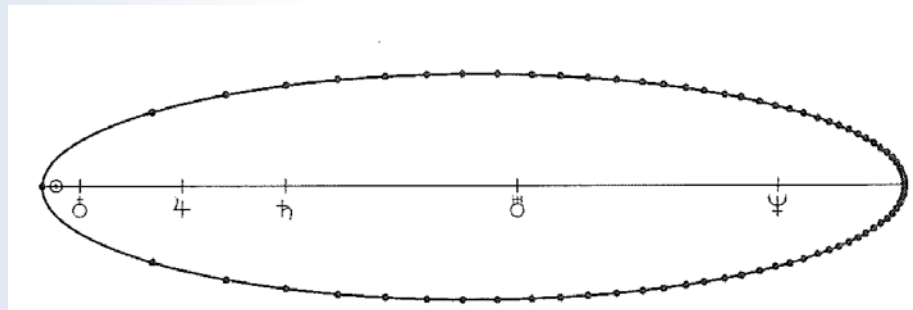
Rys. 2. Orbity Perseidów, fragment strumienia w pobliżu Peryhelium. Widoczne przecięcie strumienia z orbitą Ziemi

cje czy ciśnienie promieniowania wciąż działają na cząsteczki strumienia. Strumień, który początkowo znajdował się wzdłuż orbity kometarnej, stopniowo zaczyna się rozpraszać. Różnice elementów orbitalnych są coraz większe i stopniowo cząsteczki opuszczają strumień. Słabnąca aktywność komety nie zapewnia już odpowiedniej ilości nowych cząstek. Obserwujemy rozpraszanie strumienia, które dla nas, obserwatorów na Ziemi jest widoczne w dość charakterystyczny sposób. O ile młode strumienie wykazują krótkotrwałość, ale dość znaczną aktywność, o tyle te rozproszone mają dość niskie i płaskie maksima, ich aktywność nie robi na nikim wrażenia, natomiast meteory należące do strumienia można obserwować całymi tygodniami. W skrajnym wypadku aktywność roju może rozciągać się nawet na miesiąc lub dwa z niewielkim tylko wzrostem aktywności w pobliżu maksimum.

Powyższy schemat jest pewnym uproszczeniem, a rzeczywistość bardziej skomplikowana i niepewna. Meteoroidy nie są w rzeczywistości równomiernie rozmieszczone wzdłuż orbity komety macierzystej. Strumienie są strukturą złożoną z indywidualnie ewoluujących pasm pyłowych pochodzących z różnych przejść przez peryhelium, z różnych okresów aktywności komety. Często w przypadku dużych rojów obserwujemy pewne nieregularności, lokalne maksima aktywności czy też złożone wielokrotne maksima. Jest to efekt obecności filamentów — młodych, nierozproszonych jeszcze podstrumieni.

Starzenie się roju meteorowego i jego rozpraszanie są bardzo silnie uzależnione od rodzaju orbity, po jakiej krążą cząsteczki wchodzące w jego skład. Strumienie krążące w płaszczyźnie ekliptyki po orbitach krótkookresowych są rozpraszane błyskawicznie. Dla odmiany strumienie krążące po rozciągniętych i silnie nachylonych orbitach eliptycznych zachowują się dość stabilnie i mogą istnieć w niewiele zmiennej postaci przez tysiące lat. Przykładem takiego stabilnego roju są Lirydy obserwowane co najmniej od 687 r. p.n.e. Ciekawą cechą strumieni krążących w płaszczyźnie ekliptyki jest ich podział na części północne i południowe. Najbardziej znanym przykładem są Taurydy podzielone na część północną i południową. Cząsteczki strumienia ulegają silniejszym perturbacjom podczas przejścia w pobliżu planet Układu Słonecznego. Zazwyczaj mamy tu na myśli planety olbrzymy. Szczególnie duży wpływ na materię krążącą w Układzie Słonecznym ma Jowisz. Nie możemy też zapominać o wpływie grawitacyjnym naszej Ziemi — jest on bardzo mały w porównaniu z jowiszowym, ale dotyczy akurat tych meteoroidów, które wywołują zjawiska widoczne z Ziemi. Ogromna część tej materii nie wpada do atmosfery i krąży dalej, ale po bliskim przejściu w pobliżu Ziemi krąży po delikatnie innej orbicie.

Typowym efektem obserwowanym przy ewolucji orbitalnej rojów jest ruch węzłów orbitalnych, czyli ruch miejsca, w którym strumień przecina płaszczyznę ekliptyki. W przypadku gdy nachylenie orbity strumienia jest mniejsze od  $90^\circ$ , ruch jest wsteczny. Efekt ten wpływa na stopniowe przesuwanie się momentu maksimum. Dla orbit o nachyleniu poniżej  $90^\circ$  maksimum ma miejsce coraz wcześniej, dla strumieni poruszających się ruchem wstecznym maksimum przypada



Rys. 3. Rozmieszczenie cząstek w równomiernie rozproszonym strumieniu meteoroidowym. W danym momencie tylko nieliczne cząstki przechodzą przez peryhelium. Obrazek przedstawia orbitę Perseidów, zaznaczono orbity planet Układu Słonecznego (Hughes, 1993)

coraz później. Efekty te są zauważalne na przestrzeni setek lat. Jednocześnie wskutek perturbacji może zmienić się nachylenie orbity i jej rozmiar. Wszystkie te efekty są w stanie zmienić odległość pomiędzy orbitą strumienia a orbitą ziemską i mogą mieć wyraźny wpływ na obserwowaną z Ziemi aktywność roju. Wyrazistym przykładem jest rój Kwadrantydów. Ten duży strumień nie był obserwowany przed 1830 r. Wskutek perturbacji jego orbita znalazła się odpowiednio blisko orbity ziemskiej i od XIX w. jest to jeden z najbardziej aktywnych rojów naszego nieba. Również rój Geminidów powoli zmienia swoje położenie i za kilkaset lat przestanie być widoczny.

Zmiana średnich elementów orbitalnych strumienia w długiej skali czasowej to wypadkowa perturbacji wielu jego cząstek w różnym czasie. Oczywiście jest, że w krótkim czasie perturbacje różnie działają na różne części strumienia. Wyobraźmy sobie sytuację, w której Jowisz zbliża się do orbity strumienia. Cząsteczki, które akurat znalazły się w pobliżu ekliptyki i w pobliżu Jowisza, są zaburzane bardzo silnie, natomiast cząsteczki znajdujące się w dalekich częściach strumienia praktycznie nie zostają zaburzone. W takich sytuacjach zmieniona (niekiedy znacznie) zostaje część strumienia, a skutki tej zmiany mogą być dość niespodziewane.

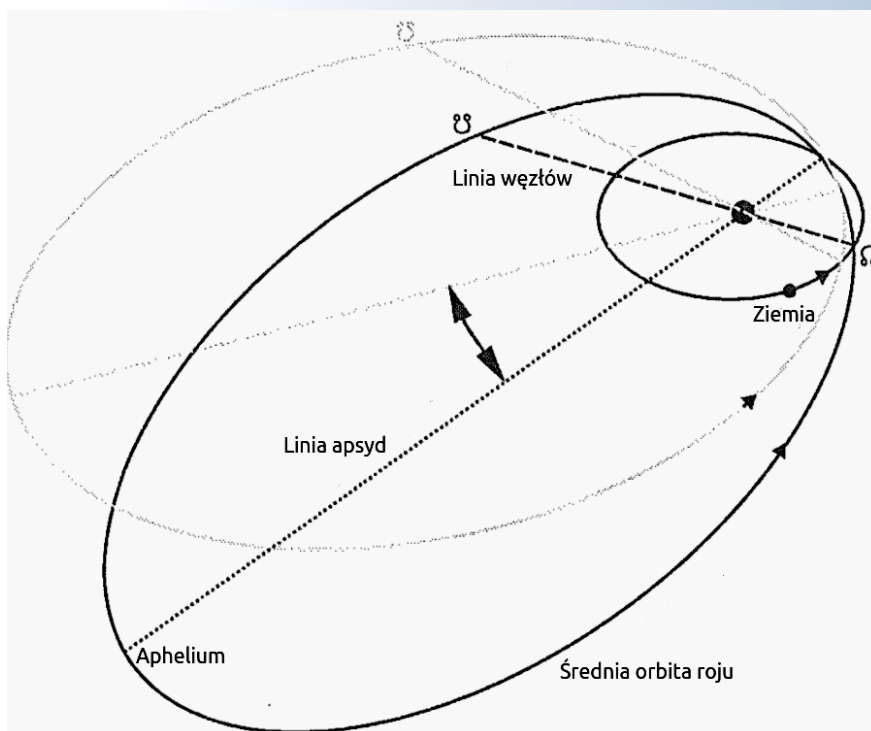
Niewiele dotąd wspominaliśmy o ciśnieniu promieniowania. Jest to jeden z efektów niegrawitacyjnych, mających znaczący wpływ na ewolucję orbitalną strumieni. Fotony uderzające w drobne meteoroidy powodują powstawanie siły skierowanej odsłonecznie. Im mniejszy meteoroid, tym większy wpływ ciśnienia promieniowania — im mniejszy meteoroid, tym większy stosunek powierzchni do masy; dla drobnego pyłu o rozmiarach mikrometrowych wpływ promieniowania na orbitę jest ogromny. Tak małe cząstki są dość szybko usuwane z Układu Słonecznego.

Dwa inne efekty brane pod uwagę przy modelowaniu strumieni to efekt Poyntinga-Robertsona oraz efekt Jarkowskiego. Mogą one zarówno przyspieszać, jak i hamować ciało w ruchu orbitalnym. Cząsteczka krążąca po orbicie jest oświetlana promieniowaniem słonecznym, absorbując je, nagrzewa się. Następnie w postaci promieniowania podczerwonego następuje reemisja w różnych kierunkach. Wskutek efektu Dopplera promieniowanie emitowane w kierunku ruchu jest nieznacznie przesunięte w kierunku krótszych długości fal, promieniowanie w kierunku przeciwnym do ruchu jest przesunięte ku falom dłuższym. Minimalna różnica w energii emitowanych fotonów wywołuje minimalne hamowanie ciała w ruchu orbitalnym. W długim okresie czasowym ten delikatny efekt ma wyraźny wpływ na rozmiar orbity i sam w sobie prowadzi do stopniowego opadania ciała po spiralnej trajektorii w kierunku Słońca. Efekt Jarkowskiego ma wpływ

na nieco większe, szybko obracające się cząsteczki nie będące w stanie równowagi termicznej. Cząstki takie, rotując, wypromieniowują ciepło w różnych kierunkach, tracąc lub zyskując moment pędu w zależności od sposobu rotacji. Wszystkie te efekty działają jednocześnie w mniejszym lub większym stopniu na ciało krążące wokół Słońca. To, który z efektów dominuje, zależy od rozmiaru ciała i od odległości od Słońca. Rzeczywista ewolucja orbitalna jest złożona i zwykłe modelowanie grawitacyjne nie do końca pozwala przewidzieć dalsze losy strumienia.

Wydaje się, że działanie wszystkich wymienionych efektów rozprasza strumienie meteoroidów w czasie rzędu 10 tys. lat. To bardzo niewiele, zważywszy na czas istnienia naszego Układu Słonecznego. Daje to też pewne pojęcie o pochodzeniu meteoroidów sporadycznych. Bardzo duża ich część wchodziła niegdyś w skład dużych i nieznanych nam rojów. Pierwsi ludzie zamieszkujący jaskinie podziwiali zupełnie inne deszcze „spadających gwiazd”, być może znacznie bardziej okazałe niż obecnie.

Przemysław Żołądek



Rys 4. Zmiana położenia średniej orbity strumienia w dłuższym okresie czasu wskutek działania perturbacji grawitacyjnych. Kolorem szarym zaznaczono orbitę pierwotną, kolorem czarnym orbite zmienioną

## Nowe meteoryty odnalezione na podstawie danych Europejskiej Sieci Bolidowej

**J**ak informuje Instytut Astronomii Czeskiej Akademii Nauk w Ondrejovie wieczorem, w niedzielę 6 marca 2016 r. doszło do upadku meteorytu w okolicach miasta Stubenberg na pograniczu niemiecko-austriackim. Jednocześnie w stacjach Europejskiej Sieci Bolidowej zaobserwowano bolid EN060316 o jasności  $-15,5$  magnitudo. Bolid zaobserwowany został dokładnie o godzinie 21:36:51 UT przez stacje Churanov, Kocelovice, Kunzak, Ondrejov, Ruzova i Svratoch. Uzyskano fotograficzne obrazy bolidu, krzywe blasku z czujników pojaśnienia tła nieba oraz widmo fotograficzne zawierające około 60 linii. Meteoroid wchodząc do atmosfery



Bolid z 6 marca 2016 r. zarejestrowany przez automatyczną kamerę Czeskiej Sieci Bolidowej na stacji w Kocelovicach. Fot. Astronomický ústav AV ČR

ważył około 600 kg i miał około 70 cm średnicy. Pojawił się na wysokości 86 km w pobliżu miasta Mattighofen w Austrii. Poruszał się po bardzo stromej trajektorii nachylonej pod kątem 70 stopni. Przelot bolidu trwał 5,5 sekundy a zjawisko przestało być widoczne na wysokości zaledwie 17 km z końcówką położoną w pobliżu miasta Braunau am Inn. Wysokość końcowa bolidu jest wyjątkowa, jak podkreślają czescy badacze w kilkudziesięcioletniej historii badań obserwowano tak małą wysokość końcową tylko w wyjątkowych przypadkach. Zebrane dane pozwoliły stwierdzić, że bez wątpienia doszło tu do upadku wielu meteorytów. Na podstawie analizy krzywej zmian blasku stwierdzono, iż na powierzchnię Ziemi spadły liczne odłamki o szerokim spektrum mas — od fragmentów o masie kilku gramów do meteorytów o masie około jednego kilograma.

Obszar spadku leży w większości na terytorium Niemiec, na północ od rzeki Inn. Od zachodu obszar ograniczony jest przez miasto Stubenberg, od wschodu przez miasto Ering przy czym meteoryty o największej masie znajdują się w pobliżu miasta Stubenberg. O zjawisku poinformowano 17 marca 2016 r. Pomiędzy momentem zjawiska a momentem ogłoszenia wyników zorganizowano ekspedycję do obszaru spadku. Już 12 marca odnaleziono pierwszy, 45-gramowy fragment meteorytu. Dość szybko przekazano do badań fragment o wadze 1,6 g a z przeprowadzonych analiz wynika że mamy tu do czynienia z chondrytem typu LL6. Aktualnie w obszarze spadku trwają szeroko zakrojone poszukiwania. Na dzień 8 kwietnia wiadomo było o odnalezieniu 5 meteorytów.

Przemysław Żołądek (www.pkim.org)