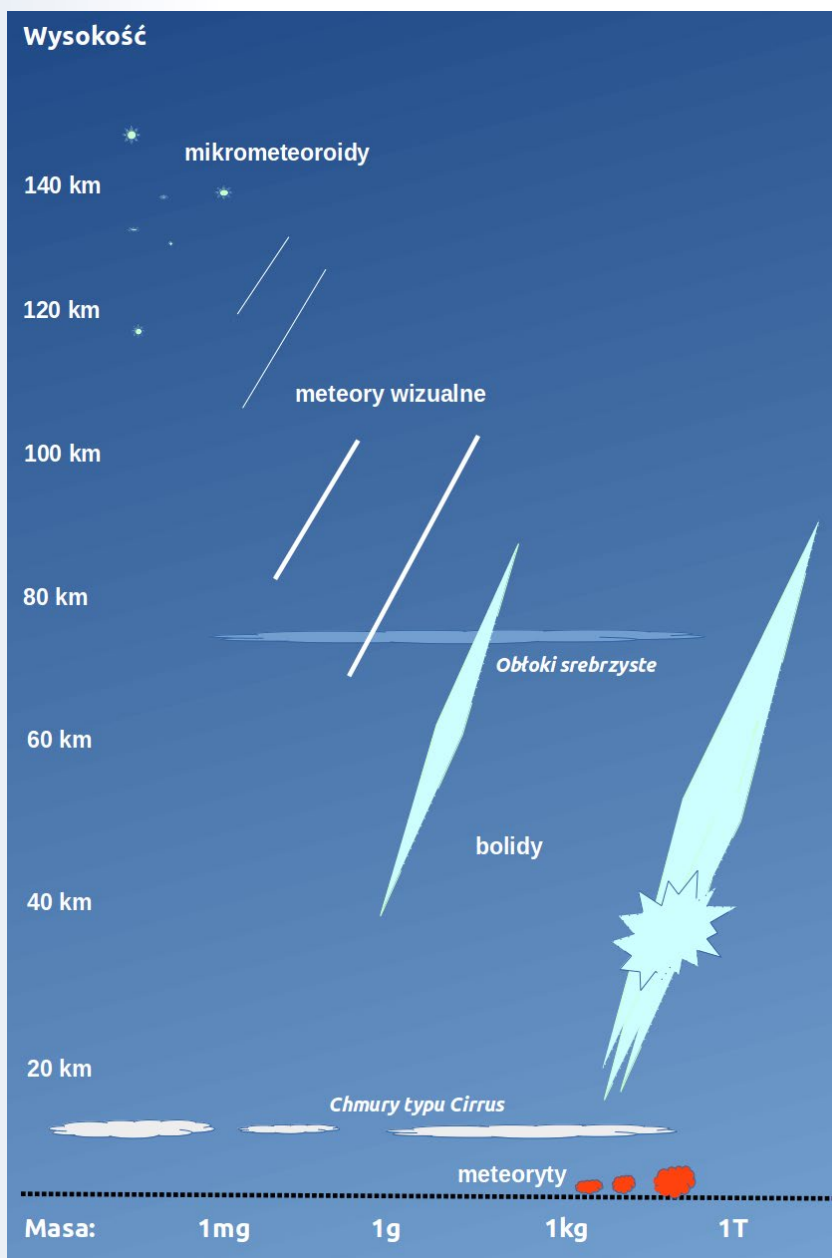


# Podstawy nauki o meteorach

Niniejszy tekst powstał w oparciu o wydany przez International Meteor Organization w 2008 r. „Handbook for Meteor Observers”, podręcznik dość aktualnie i przystępnie wprowadzający w świat współczesnej nauki o meteorach. Poniżej przedstawiam pierwszą część publikacji, będącą opisem podstawowych pojęć i praw rządzących światem tych ulotnych zjawisk.

**M**eteorology pojawiają się na niebie w chwili, gdy niewielka cząstka drobnej materii międzyplanetarnej wchodzi do atmosfery z dużą prędkością, ulegając ablacji. Ablacja, najprościej mówiąc, polega na usuwaniu materii, z jakiej złożony jest ów wpadający do atmosfery obiekt, pod wpływem wysokiej temperatury wytworzonej w poduszce sprężonego powietrza przy czole meteoroidu. Potocznie mówi się tu o spalaniu, jednak ze spalaniem nie ma to nic wspólnego. Świetlisty ślad na niebie zwany jest *meteor*em a przez ludzi niezwiązanych ze światem astronomii — spadającą gwiazdą. Samo słowo meteor pochodzi z języka greckiego i oznacza coś, co znajduje się w powietrzu (w specjalistycznej literaturze z innych dziedzin nauki można spotkać inne „meteory” nie mające z tymi kosmicznymi nic wspólnego). Cząstki materii znajdujące się w przestrzeni kosmicznej, wywołujące zjawisko meteoru, zwane są *meteoroidami*, natomiast te, które były odpowiednio duże i wytrzymałe, aby przetrwać ablację, spadają na powierzchnię Ziemi i nazywane są *meteorytami*. Cząsteczki pyłu, które są mniejsze od pewnej granicznej wielkości, nie ulegają ablacji. Wchodzą one w atmosferę i są przez nią delikatnie hamowane. Powoli opadają na powierzchnię planety jako *mikrometeoryty*.

Meteoroidy wchodzą w ziemską atmosferę z prędkością w zakresie od 11 do 72 km/s. Inaczej mówiąc — od 40 000 do 260 000 km/h. Przy tak wielkiej prędkości dochodzi do licznych kolizji pomiędzy materią meteoroidu i cząsteczkami powietrza. Skutkiem tego jest wzbudzenie atomów a następnie emitowanie przez nie fotonów, co obserwujemy jako świecenie meteoru. Jonizacja materii meteoroidu w niewielkim stopniu zachodzi już na dalekich krańcach atmosfery ziem-



Różne formy interakcji materii meteoroidowej z atmosferą. Na osi pionowej zaznaczono wysokość nad powierzchnią Ziemi, natomiast na osi poziomej masę w skali logarytmicznej

**UWAGA:** Meteor, dla którego jasność przekracza  $-4$  magnitudo, nazywamy bolidem. W polskim nazewnictwie przyjęło się używać tylko nazwy bolid, w artykułach pisanych po angielsku spotyka się częściej słowo *fireball*, natomiast słowo *bolide* używane jest raczej do opisu bardzo dużych zjawisk kończących się rozbłyskami czy też efektami dźwiękowymi.

skiej, jednakże dopiero po pewnym czasie ilość kolizji staje się wystarczająca do wywołania świecenia widocznego dla obserwatora. Większość dostrzeganych z Ziemi meteorów staje się widoczna na wysokości poniżej 110 km. Detekcja zjonizowanych śladów metodami radarowymi pozwala zaobserwować meteory już na wysokości 140 km. W większości przypadków widoczna trajektoria kończy się na wysokości powyżej 80 km. Można zauważyć, że przeciętny meteor jest widoczny z odległości co najmniej 100 km.

Wysokość początkowa meteorów (wysokość, na której meteor zaczyna świecić) jest zależna w zauważalny sposób od ich prędkości początkowej. Dla obiektów wolnych wchodzących do atmosfery z prędkością poniżej 25 km/s jest to zazwyczaj około 80 do 95 km. Dla bardzo szybkich, kometarnych meteoroidów pędzących z prędkością 72 km/s, nie jest niczym niezwykłym wysokość początkowa około 130 km.

Nauce są znane bardzo szybkie meteory i bolidy z wysokością początkową znacznie powyżej 140 km (przykładowo 168 km dla bolidu Myszyńiec zarejestrowanego przez PFN), a dla rekordowych bolidów z roju Leonidów odnotowano wysokość nawet 200 km. Jeśli chodzi o wysokość końcową, to tu zależność jest trudniej zauważalna. Dzieje się tak dlatego, iż w grę wchodzi szereg rozmaitych parametrów, takich jak podatność materiału na ablację, wytrzymałość ciała, kąt wejścia do atmosfery itp. Można jednak powiedzieć, że meteoroidy wolniejsze mają większą szansę, aby dotrzeć w nieco gęstsze, niższe warstwy atmosfery. Szczególną uwagę warto zwrócić na sytuację, w której masywny meteoroid o dużej gęstości wchodzi do atmosfery z prędkością rzędu kilkunastu kilometrów na sekundę. W takim wypadku fragmenty meteoroidu osiągają wysokości rzędu 30–40 km, a przy odpowiednio dużej masie przestają świecić na wysokościach nawet poniżej 20 km. Prawdopodobieństwo upadku meteoroidy przy tego typu zjawiskach jest znaczne.

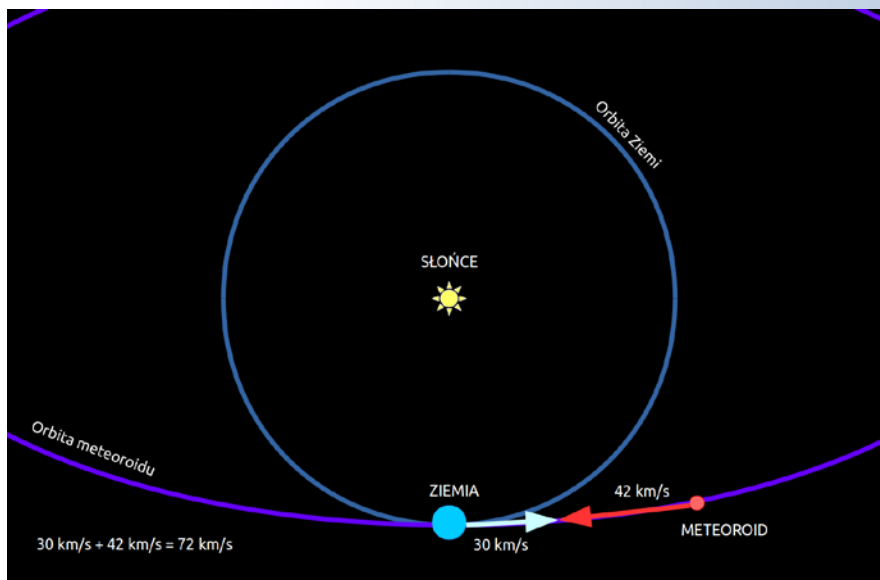
Ci, którzy widzieli w życiu choć kilka meteorów, wiedzą, że zjawiska te nigdy nie wyglądają tak samo. Meteory różnią się wyraźnie prędkością na sferze niebieskiej, różnią się też jasnościami.

Meteor o jasności porównywalnej z gwiazdami widocznymi gołym okiem jest wywołany przez obiekt o wielkości od kilku milimetrów do centymetra. Jasność ta zależy nie tylko od rozmiaru samego meteoroidu, ale też w bardzo dużym stopniu od prędkości początkowej obiektu.

Podczas przelotu meteoru bywają widoczne różnego rodzaju dodatkowe efekty. Niektóre spadające gwiazdy wykazują rozbłyski, zazwyczaj w części końcowej, ale nie jest to regułą. Czasami można zaobserwować widoczne przez dłuższy czas ślady, często też możemy dostrzec rozpad obiektu na fragmenty.

Sporą populację stanowią meteory tak niewielkich rozmiarów, które wywołują zbyt słabe świecenie, aby mogły być dostrzeżone gołym okiem. Nazywamy je meteorami teleskopowymi, które dostrzegalne są przez lornetki lub szerokokątne refraktory i bez problemu rejestrowane też metodami radiowymi.

**W**iedzając mniej więcej, czym są meteory, możemy zająć się pochodzeniem meteoroidów. Zgodnie z prawami mechaniki nieba każde ciało niebieskie należące do Układu Słonecznego porusza się w polu grawitacyjnym naszej Gwiazdy Diennej po orbicie eliptycznej bądź też hiperbolicznej.



Sytuacja podczas spotkania Ziemi i meteoroidu poruszającego się w kierunku przeciwnym z prędkością bliską prędkości ucieczki z Układu Słonecznego. Meteoroid wchodzący do atmosfery w takich warunkach jest obserwowany jako zjawisko o prędkości 72 km/s

Obiekty poruszające się po orbitach otwartych, takich jak hiperbole, mogą nieskończenie oddalać się od Słońca, opuszczając granice Układu Słonecznego. Aby opuścić Układ Słoneczny, ciało musi mieć odpowiednio dużą prędkość. W okolicach Ziemi, która okrąża Słońce z prędkością zbliżoną do 30 km/s, prędkość ucieczki z Układu Słonecznego to około 42 km/s. Określenie przynależności meteoroidu do Układu Słonecznego z punktu widzenia ziemskiego obserwatora polega na sprawdzeniu, czy prędkość heliocentryczna dla takiego ciała w odległości 1 AU jest większa czy też mniejsza od 42 km/s. Współczesne precyzyjne dane pozwalają stwierdzić, że ilość orbit, dla których prędkość ta jest większa, nie przekracza jednego procenta.

Prędkości heliocentryczne nie są oczywiście tożsame z obserwowanymi w atmosferze prędkościami meteoroidów. Przykładowo wyobraźmy sobie meteoroid okrążający Słońce, nadlatujący z graniczną prędkością 42 km/s, nadlatujący w kierunku dokładnie przeciwnym do kierunku ruchu naszej planety. Obserwowana prędkość będzie więc sumą prędkości orbitalnej meteoroidu i prędkości orbitalnej naszej planety:  $42 + 30 = 72$  km/s. Odwrotna sytuacja zachodzi w przypadku, gdy meteoroid i Ziemia poruszają się po równoległych orbitach z nieomal tą samą prędkością. W takim wypadku meteoroid pod wpływem pola grawitacyjnego naszej planety wejdzie w końcu do atmosfery, osiągając prędkość 11,2 km/s (czyli drugą prędkość kosmiczną). Jest to minimalna prędkość wejścia meteoroidu do atmosfery. Oczywiście grawitacja ziemską działa też w pierwszym opisanym przypadku, dla ciała nadlatującego ruchem wstecznym. Korygując odpowiednio wyznaczoną wcześniej prędkość maksymalną, uzyskujemy 72,9 km/s jako górną granicę obserwowanej prędkości początkowej.

Studując tematykę meteorową, dość często spotyka się pojęcie prędkości geocentrycznej. Przypnam, że nawet dla osób zajmujących się tematem od wielu lat różnice między prędkością geocentryczną a obserwowaną wydają się być niezbyt duże. Prędkość obserwowana — oznaczana literą  $V_{\infty}$  — to prędkość uzyskiwana wprost z obserwacji, zawierająca wpływ ziemskiej grawitacji, a co więcej, również niewielki wektor wynikający z ruchu obrotowego Ziemi (zwykle

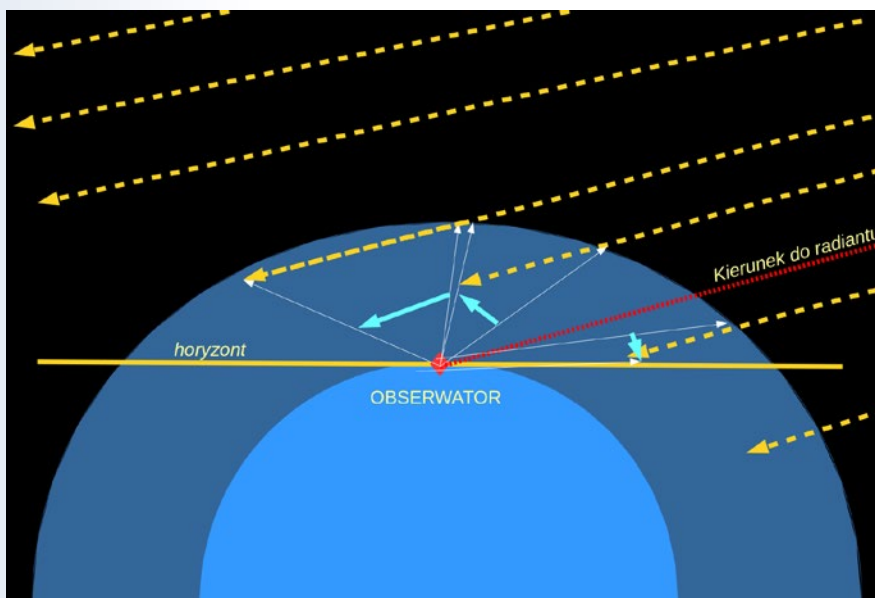
rzędu dziesiątych części kilometra na sekundę). Minimalna prędkość obserwowana to 11,2 km/s, maksymalna to 72,9 km/s. Prędkość geocentryczna oznaczana jako  $V_g$  jest pozbawiona wpływu grawitacji i ruchu obrotowego. Górny limit prędkości geocentrycznej nie różni się znacząco od górnego limitu prędkości obserwowanej i wynosi 72 km/s. Przy mniejszych prędkościach różnica staje się jednak znacząca, a dla najwolniejszych przypadków prędkość geocentryczna osiąga wartość 0. Prędkość geocentryczna jest wygodniejsza przy analizach rojów meteorowych, podczas gdy prędkość obserwowana lepiej sprawdza się przy analizach procesów zachodzących podczas wejścia ciała do atmosfery.

## Roje meteorów

Meteory poruszają się na niebie w rozmaitych kierunkach. W tym pozornym chaosie można jednak odnaleźć pewne ziarno uporządkowania. Wystarczy znaleźć przypadkowe zdjęcie, na którym zarejestrowano wiele meteorów i przedłużyć ich ślady wstecz. Możliwe, że tak narysowane przedłużenia będą przecinać się na dość ograniczonym obszarze. Uznaje się, że meteory pozornie rozchodzące się od pewnego wspólnego obszaru nieba tworzą rój meteorów. Miejsce, w którym przecinają się przedłużenia śladów meteorowych, nazywamy radiantem roju. Efekt rozchodzenia się śladów od radiantu jest wywołany prostym zjawiskiem perspektywy. Wszystkie meteory należące do jednego roju wchodzą do atmosfery równolegle. Obserwując meteory nadlatujące z przestrzeni kosmicznej, ulegamy złudzeniu podobnemu jak w przypadku, gdy stojąc na prostych torach kolejowych dostrzegamy, że wszystkie one zdają się zbiegać gdzieś na horyzoncie we wspólnym punkcie. Meteoroidy wywołujące rój meteorów krążą w przestrzeni po bardzo zbliżonych orbitach. Taki uporządkowany zbiór ciał na bardzo zbliżonych orbitach nazywamy strumieniem meteoroidów. Strumień meteoroidów na ogół ma pochodzenie kometarne, niemniej prawidłowa identyfikacja ciała macierzystego na ogół nie jest prostym zadaniem.

Przez większą część roku ilość widocznych na niebie meteorów jest niewielka. Niektóre noce obfitują jednak w aktywność znacząco większą. Tak wysoką aktywność można zaobserwować przykładowo pomiędzy 10 i 14 sierpnia, jak też pomiędzy 12 i 14 grudnia, kiedy to są obserwowane maksima dużych rojów meteorowych. Radianty tych rojów znajdują się w gwiazdozbiorach Perseusza i Bliźniąt, stąd też roje biorą swoje nazwy — odpowiednio są to Perseidy i Geminidy (Gemini — łacińska nazwa gwiazdozbioru Bliźniąt). Meteoroidy należące do jednego roju w okolicach Ziemi poruszają się po orbitach prawie równoległych. Położenie radiantu na niebie jest wypadkową wektorów związanych z ruchem meteoroidów i wektorów związanych z ruchem orbitalnym Ziemi.

Dobrym przykładem może być jazda samochodem przy padającym śniegu. Możemy dostrzec, że płatki śniegu zdają się wybiegać z jednego punktu. Zmieniając prędkość



Rzeczywiste i pozorne trajektorie meteoroidów w atmosferze. Żółte strzałki na rysunku oznaczają rzeczywiste trajektorie nadlatujących meteoroidów. Do atmosfery weszły trzy meteoroidy, a obserwator widzi trzy meteory w sposób oznaczony przez niebieskie strzałki. Kierunek na radiant reprezentowany jest przez czerwoną przerywaną linię

jazdy, możemy dostrzec zmianę położenia tego śnieżnego radiantu. Warto o tym pamiętać, w istocie bowiem meteoroidy z roju Perseidów nie nadlatują z kierunku wskazywanego przez gwiazdozbiór Perseusza, tylko z zupełnie innego rejonu nieba. Ten nieco inny kierunek nazywamy radiantem heliocentrycznym. Gdyby na moment zatrzymać Ziemię w miejscu, Perseidy miałyby radiant zupełnie gdzie indziej, a przy okazji straciłyby sporo ze swojej obserwowanej prędkości.

**W**racając do nazewnictwa rojów — wielkie roje meteorowe są nazywane zwykle od łacińskiej nazwy gwiazdozbioru, w którym znajduje się radiant roju. W ten oto sposób meteory, które w listopadzie zdają się wylatywać z gwiazdozbioru Lwa, są nazywane Leonidami (Leo — z łac. Lew). Wyjątkiem od tej prostej reguły zdaje się być rój Kwadrantydów. Trudno dziś bowiem doszukać się konstelacji o podobnej nazwie łacińskiej. Rój ten jednak znany jest dość długo, bo od ponad 150 lat. W tych czasach na niebie figurował jeszcze gwiazdozbiór Kwadrantu Ściennego (Quadrans Muralis), który zajmował północną część obecnie istniejącego gwiazdozbioru Wolarza oraz fragmenty gwiazdozbioru Smoka i Herkulesa.

W przypadku małych rojów, których obecnie znamy setki, konieczne stało się wprowadzenie pewnych dodatkowych reguł. Tak oto roje leżące w jednym gwiazdozbiorze są wyróżniane dodatkowo greckim symbolem gwiazdy najbliższej położonej względem radiantu. Niekiedy spotyka się roje, których nazwy zamiast liter greckich zawierają numery katalogowe gwiazd. Duża część rojów jest rozróżniana według miesiąca, w którym występuje maksimum. Tak oto mamy Orionidy Listopadowe (November Orionids, NOO) obok zwykłych dobrze znanych Orionidów (Orionids, ORI).

Znaczna część rojów jest aktywna co roku w pewnym określonym czasie. Niektóre roje bywają aktywne tylko czasami, raz na wiele lat, co utrudnia ich wykrycie. Niekiedy roje wykazują śladową aktywność przez dziesięciolecia, podczas gdy w niektórych latach dochodzi do znaczących

wybuchów aktywności. Przykładem tak nieregularnego roju są słynne Leonidy odpowiedzialne za wielkie deszcze meteorów powtarzające się z grubszą co 33 lata. W historii zapisały się deszcze Leonidów z roku 1799, 1833, 1866 i 1966. Wielka i niespotykana zazwyczaj aktywność miała też miejsce na przełomie wieku XX i XXI (kolejne 33 lata po roku 1966). Terminem *deszcz meteorów* określa się zjawisko roju meteorowego, dla którego obserwator wizualny nie jest już w stanie prawidłowo rejestrować wszystkich pojawiających się meteorów. Zwykle odpowiada to aktywności powyżej 1000 meteorów w ciągu godziny. Zapewne jeszcze za naszego życia zobaczymy jakieś deszcz Leonidów, a tymczasem rój prezentuje aktywność dość słabo zauważalną.

Na taką dość nieregularną aktywność meteorową roju ma między innymi wpływ to, w jaki sposób przecinają się orbity roju Leonidów z orbitą ziemską. Spotkanie to zachodzi przy znacznie mniejszym dystansie od środka strumienia niż w przypadku Perseidów. Jednocześnie obserwujemy materię krążącą po orbitach o około 33-letnim okresie obiegu uwolnioną z komety stosunkowo niedawno, co sprawia, że nie jest ona równomiernie rozmieszczona wzdłuż całej swojej orbity. Wszystko to sprawia, że co jakiś czas mamy szansę trafić w szczególnie gęstą część strumienia, obserwując wielkie deszcze meteorów.

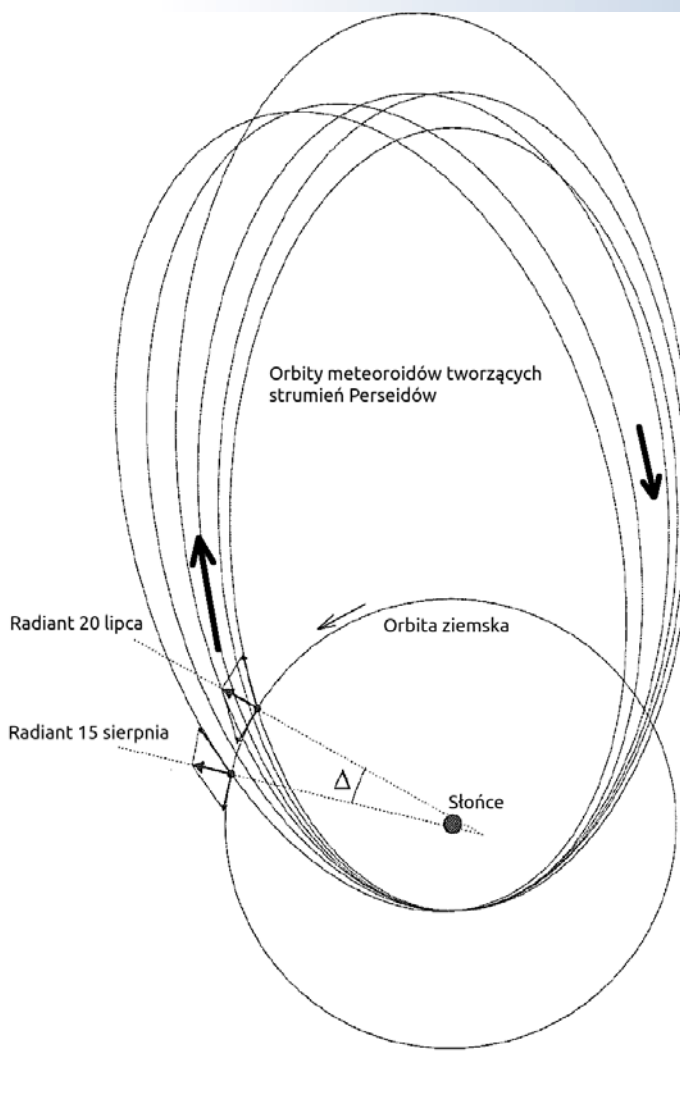
Podobnie do Leonidów zachowuje się październikowy rój Drakonidów związany z kometa 21P/Giacobini-Zinner. W tym wypadku zwiększona aktywność pojawia się mniej więcej co dwa obiegi komety, czyli co 13 lat. Ostatni wybuch aktywności zaobserwowano w roku 2011, kiedy to w bardzo krótkim wybuchu aktywność roju wzrosła do około 600 zjawisk w ciągu godziny. Co ciekawe, podwyższoną aktywność obserwowano też w roku 2012.

**D**ługość okresu aktywności jest różna dla różnych rojów i zależy od szerokości krążącego w przestrzeni strumienia, geometrii przecięcia. Rozmieszczenie cząsteczek strumienia wzdłuż orbity jest uzależnione od licznych czynników, takich jak perturbacje grawitacyjne, efekty niegravitacyjne i inne. Przykładem szerokiego strumienia jest strumień Perseidów. Pierwsze Perseidy widzimy na niebie już około 20 lipca, ostatnie po 25 sierpnia, natomiast maksimum występuje zwykle 12 lub 13 sierpnia. Dla odmiany strumień Kwadrantydów ma znacznie mniejszą szerokość, generując zauważalną aktywność przez pierwsze kilka dni stycznia z krótkim kilkugodzinnym maksimum. Innym przypadkiem

są Taurydy, które pozostają aktywne przez ponad 2 miesiące, dla których trudno wskazać jakieś wyraźne maksimum. Wbrew pozorom strumień Taurydów jest znacznie większy od strumienia Perseidów.

Radiant roju nie jest punktem w matematycznym rozumieniu. Rój meteorów powstaje z meteoroidów wyrzucenych w różnych latach i w różnych warunkach. Meteoroidy krążą po podobnych, ale delikatnie różniących się orbitach, a co za tym idzie, generują na niebie radiant o pewnym rozmiarze. Im młodszy rój, tym bardziej zwarta struktura radiantu. Starsze strumienie ulegają rozpraszaniu, głównie wskutek działania perturbacji wielkich planet Układu Słonecznego.

*Dalszy ciąg podręcznika znajdą Państwo w kolejnym numerze „Uranii”.*



Położenie radiantu roju Perseidów dla nocy 20/21 lipca oraz dla nocy 15/16 sierpnia. Kierunek wskazany przez złożenie wektorów ruchu meteoroidów z roju Perseidów i ruchu Ziemi jest kierunkiem obserwowanego na niebie radiantu. Położenie radiantu pomiędzy wskazanymi pozycjami zmienia się o kąt zaznaczony grecką literą delta. Zmiana ta mieści się w granicach około jednego stopnia na dobę i nosi nazwę dryftu radiantu. Radiant przesuwają się równoległe do ekliptyki; w przedstawionym przypadku dla nocy 20/21 lipca znajduje się na pograniczu gwiazdozbiorów Kasjopei i Andromedy, dla nocy 15/16 sierpnia radiant znajduje się w północnej części gwiazdozbioru Perseusza