

# Podstawy nauki o meteorach — bolidy i spadki meteorytów

Niniejszy tekst powstał w oparciu o „Handbook for Meteor Observers”, podręcznik wydany w 2008 r. przez International Meteor Organization, będący dość aktualnym i przystępnym wprowadzeniem w świat współczesnej nauki o meteorach. Tym razem kilka słów o bolidach.

## Bolidy

Większość meteorów, które możemy zaobserwować podczas pogodnej nocy, wydaje się być dość słaba. Przyczyną tego jest typowa zależność rozmiaru meteoroidu do jasności powodowanego przez niego zjawiska. Im większe ciało wchodzi do atmosfery, tym okazalszy zobaczymy meteor. Niestety zdecydowana większość meteoroidów, z jakimi przychodzi nam się spotykać, ma rozmiary bardzo małe. Jedynie niewielki odsetek wszystkich meteoroidów jest w stanie wywołać zjawisko o jasności 0 mag lub większej. Nawet w tym wypadku mówimy o obiektach zazwyczaj mniejszych od 1 cm. Według statystyk tylko 1 na 1200 obserwowanych gołym okiem meteorów ma jasność większą niż  $-5$  mag. Jedynie 1 zjawisko na 12000 osiąga jasność  $-8$  mag. Te rzadkie zjawiska nazywamy bolidami. Bolidy to bardzo jasne meteory, według najczęściej spotykanej definicji jaśniejsze od  $-4$  mag. Ta graniczna jasność, od której mówi się o bolidach, jest oczywiście rzeczą dość arbitralną. W literaturze spotyka się wartości od  $-2$  do  $-6$  mag. Szeroko rozpowszechniona jest też jasność graniczna  $-3$  mag uznawana za właściwą przez International Meteor Organization. Warto zauważyć, że w języku polskim występuje jedno określenie dla tego zjawiska, mianowicie bolid. W języku angielskim zaś funkcjonują osobno określenia *fireball* i *bolide*. Pierwsze określenie oznacza bardzo jasny meteor, drugie używane jest do określania zjawisk wyjątkowo jasnych, z rozbłyskami i efektami dźwiękowymi. Wyróżnia się też *superbolidy* — zjawiska jaśniejsze od  $-17$  mag, które mogą być już wykrywane za pomocą systemów satelitarnych, na co dzień przeznaczonych do kontroli prób nuklearnych.

## Częstotliwość występowania bolidów

Aktywność bolidowa wykazuje zmienności podobnie jak aktywność wszystkich innych meteorów. Na występowanie bolidów mają wpływ między innymi duże roje meteorowe. Przykładowo Perseidy są odpowiedzialne za pojawianie się czterokrotnie większej liczby bolidów niż typowo obserwowana dla tła sporadycznego. Samo tło sporadyczne również wykazuje zmienność o cyklu rocznym. Pociąga to za sobą zmienną ilość obserwowanych bolidów sporadycznych, przy czym, co ciekawe, jest to zależność odwrotna niż w przypadku zwykłej aktywności sporadycznego tła. Najwięcej bardzo jasnych bolidów na półkuli północnej obserwuje się w okolicach równonocy wiosennej. Jest to czas najniższej aktywności sporadycznej, natomiast jesienią, gdy osiąga ona najwyższą wartość, obserwujemy najmniej bolidów. Podobnie odwrócone proporcje obserwujemy w przypadku zmienności dobowej. Najwięcej bolidów dostrzegamy około godziny 18.00 czasu lokalnego a najmniej około godziny 6.00. Zdaniem różnych autorów prawdopodobieństwo zaobserwowania bolidu w godzinach wieczornych jest 4 razy większe niż w porannych. Podobne statystyki związane z momentami upadków meteorytów wskazują na proporcje pomiędzy 3:1 i 2:1.

## Bolidy i spadki meteorytów

Tylko niewielki procent wszystkich bolidów może być powiązany ze spadkami meteorytów. Aby materia międzyplanetarna mogła przetrwać spotkanie z ziemską atmosferą, musi zaistnieć szereg niełatwych do spełnienia warunków. Ciało takie musi przetrwać silne hamowanie od bardzo wysokiej prędkości początkowej do prędkości, przy której kończy się ablacja. Tempo ablacji jest silnie uzależnione od prędkości ciała w atmosferze. W przypadku najlepiej przebadanych zjawisk dających spadek udało się wykazać, że dla prędkości mniejszych niż 8 km/s ulega ablacji poniżej 50% pozostałej masy meteoroidu, poniżej prędkości 4 km/s ablacja niemal całkowicie zanika.

Istotnym czynnikiem mającym wpływ na proces spadku meteorytowego jest fragmentacja meteoroidu. Najwyższe ciśnienia dynamiczne, przy jakich obserwowano fragmentacje meteoroidu, były rzędu 1 megapaskala. Co ciekawe, jest to wartość znacznie niższa niż w przypadku pomiarów laboratoryjnych, gdzie materia meteorytowa wytrzymała ciśnienia rzędu 100 megapaskali. Fragmentację obserwuje się u zdecydowanej większości meteoroidów wchodzących do atmosfery. Nasza wiedza o procesach fragmentacji znacząco wzrosła od momentu wprowadzenia do obserwacji technik fotograficznych i wideo, pomimo to wciąż pozostaje wiele znaków zapytania.

Dla najczęściej spotykanych meteoroidów, tych o niewielkich masach uznaje się, że mają one szansę przetrwać spotkanie z atmosferą o ile prędkość początkowa będzie mniejsza niż 23 km/s, a prędkość końcowa będzie niższa niż 8 km/s i nie zostanie zaobserwowany żaden poważny rozpad czy rozbłysk w końcowej fazie lotu. Powyższe liczby prawdziwe są dla najbardziej rozpowszechnionej statystycznie materii chondrytowej i mogą być inne w przypadku meteoroidów o innych własnościach fizycznych. W przypadku wielkich meteoroidów o średnicy wielu metrów hamowanie w atmosferze jest raczej mało wydajne i w skrajnym wypadku może dojść do spadku kraterotwórczego.

Po zaniku ablacji obiekt przestaje być widoczny dla obserwatorów, przestaje świecić. Rozpoczyna się faza ciemnego lotu (tzw. *darkflight*). Obiekt dość szybko i na dość dużej wysokości jest wyhamowywany całkowicie, a kierunek lotu przestaje mieć jakkolwiek związek z pierwotną trajektorią. Ciało opada z typową prędkością nie przekraczającą 100 m/s a kierunek lotu jest silnie uzależniony od kierunku i siły wiatrów wiejących w górnych warstwach atmosfery. W praktyce profil atmosferyczny jest dość złożony, wiatry na różnych wysokościach wieją w bardzo różnych kierunkach i trajektoria opadającego ciała przyjmuje często dość skomplikowany kształt. Nie jest rzadkością sytuacja, w której obiekt o niewielkiej masie niejako zdmuchiwany jest wstecz, pod trajektorię bolidu. Wpływ wiatrów o nie do końca znanej sile i kierunku jest źródłem największych niepewności przy wyznaczaniu miejsca spadku meteorytu.

Możliwość przetrwania ciała w atmosferze jest bardzo uzależniona od jego własności fizycznych. W zauważalny sposób wpływają one na wysokość początkową i końcową, długość zjawiska czy też jasność charakterystyczną dla danej masy czy prędkości. Inaczej mówiąc, bolidy wywołwane przez różnego rodzaju materię mają różne obserwowane własności. Na podstawie obserwacji wyróżniono następujące grupy bolidów:

**Typ I** — charakteryzujące się niewielką wysokością początkową (na ogół poniżej 90 km), zbudowane z materii chondrytowej, typowa gęstość meteoroidu to  $3,7 \text{ g/cm}^3$ . Ten typ jest charakterystyczny dla większości bolidów dających spadki meteorytowe (Pribram, Lost City, Innisfree) i stanowi 29% wszystkich obserwowanych bolidów.

**Typ II** — charakterystyczny dla chondrytów węglistych o wysokości początkowej nieco większej niż Typ I. Ich gęstość waha się w granicach od  $1,9$  do  $2,1 \text{ g/cm}^3$ . Pochodzą głównie z planetoid, stanowią 33% wszystkich obserwowanych bolidów. Ze względu na znacznie większą podatność na ablację spadki meteorytowe tego typu występują dość rzadko.

**Typ IIIA** — bolidy stanowią materię kometarną o gęstości  $0,6$  do  $0,9 \text{ g/cm}^3$ . Ich ślady rozpoczynają się w większości powyżej 100 km, a wysokości końcowe są duże, nawet w przypadku dużych bolidów powyżej 50 km. Bolidy typu IIIA stanowią 29% wszystkich obserwowanych zjawisk, jednak nie obserwuje się spadków meteorytowych tego typu zjawisk.

**Typ IIIB** — porowata materia kometarna o bardzo małej gęstości w zakresie od  $0,2$  do  $0,34 \text{ g/cm}^3$ . Są charakterystyczne dla niektórych rojów meteorowych pochodzenia kometarnego. Najlepiej znanym przykładem są tu Drakonidy. Również bolid Sumava — jeden z jaśniejszych bolidów w historii badań należał do typu IIIB. Typ obserwowany tylko w 9% przypadków, a spadki meteorytowe praktycznie wykluczone.

W powyższym zestawieniu nie ma meteoroidów żelaznych, gdyż stanowią one niewielki odsetek wszystkich obserwowanych zjawisk. Pod względem charakterystyki możemy zaliczyć je do typu I bolidów.

Mówiąc o charakterystycznych wysokościach, warto pamiętać, że wysokość początkowa w ramach danego typu jest uzależniona od prędkości początkowej. Różnica pomiędzy meteoroidami najwolniejszymi a najszybszymi jest dość znaczna. Dolna granica wysokości początkowej dla bolidów typu I leży poniżej 80 km, górna dla bardzo szybkich bolidów typu III to przeciętnie 120–130 km, przy czym zdarzają się też przypadki skrajne jak zaobserwowany nad Polską bolid Myszyniec, dla którego początek trajektorii zauważono na wysokości 168 km. Wysokości do 200 km były obserwowane dla bolidów z roju Leonidów podczas ostatnich wielkich wybuchów aktywności. Wysokości końcowe są raczej zależne od masy ciała wchodzącego do atmosfery. Dla bolidów typu III często są to wysokości rzędu 80–90 km. Przy dużych rozmiarach meteoroidu punkt końcowy jest obserwowany niżej, przy czym rzadko jest to wysokość mniejsza niż 60 km. Dla bolidów typu I rozpiętość wysokości końcowych jest ogromna (mamy tu na myśli obserwowane wysokości końcowe, nie uwzględniając możliwego ciemnego lotu). Dość często (w skali PFN kilka razy w miesiącu) obserwuje się bolidy tego typu z wysokością końcową poniżej 50 km. Najmniejsza zarejestrowana przez PFN wysokość końcowa to 25,8 km. Aktualnie absolutnym rekordzistą pod względem wysokości końcowej jest bolid Czelabiński, który zakończył się na wysokości 13,8 km. Jest to przypadek nieporównywalny z niczym, co było dotąd zaobserwowane. We wcześniej obserwowanych wielkich bolidach wysokość końcowa oscylowała w okolicach 20 km.

Przemysław Żołądek



Bolid z 5 listopada 2015 roku zarejestrowany o 17.11 przez Tomasza Krzyżanowskiego z PFN38 Podgórzyn. Bolid sporadyczny, pochodzenia planetoidalnego. Wysokość końcowa poniżej 40 km, brak spadku meteorytu

# $\epsilon$ -Perseidy wrześniowe – podsumowanie

Wrzesień jest miesiącem, podczas którego można zaobserwować wiele rojów meteorowych, których aktywność utrzymuje się na niskim poziomie. Dostrzegalnych jest wtedy zaledwie kilka zjawisk w ciągu nocy. Wyjątkiem na tle całej reszty są tak zwane  $\epsilon$ -Perseidy wrześniowe. Jest to jednak stosunkowo słabo zbadany rój, do niedawna nawet pomijany w kalendarzach meteorowych. W latach 2007–2013 obserwowano wyraźny wzrost jego aktywności. W 2008 r. intensywność owego strumienia porównywano z dobrze znanym wiosennym rojem Lirydów (ZHR = 25), ponadto obserwatorzy z USA donosili o licznych zjawiskach bolidowych. W 2013 r. SPE po raz kolejny dały popis swoich możliwości, a obserwatorzy ocenili aktywność na poziomie 50 zjawisk na godzinę.

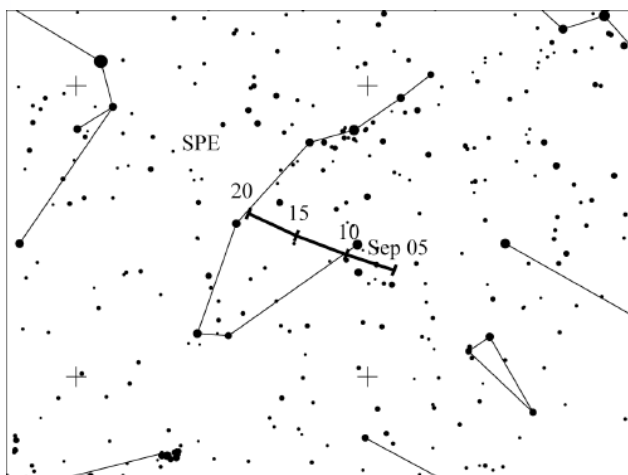
## Prognozy

Według danych International Meteor Organization (IMO)  $\epsilon$ -Perseidy wrześniowe, aktywne między 5 a 21 września, nie są tak spektakularne jak Perseidy obserwowane w sierpniu. W ziemską atmosferę wpadają z prędkością około 64 km/s, ze współczynnikiem masowy  $r = 3,0$  (wartość mówiąca o tym, jak jasne zjawiska pojawiają się w danym roju; współczynnik dla SPE oznacza, że dominują w nim raczej ciemniejsze zjawiska). Radiant znajduje się w gwiazdozbiorze Perseusza.

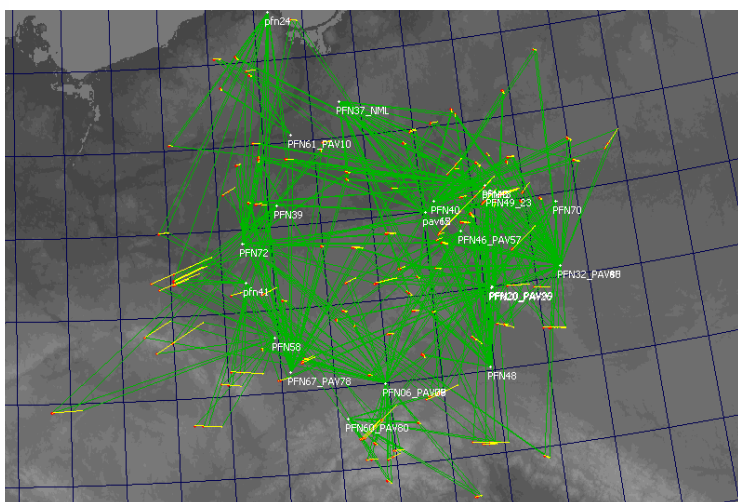
Maksimum było prognozowane na 9 września o godzinie 4.00 UT i wtedy ZHR powinien wynieść 5 zjawisk na godzinę. Dla obserwatorów z Polski niestety nie był to najlepszy czas, gdyż przypadł już po wschodzie Słońca. Jediną metodą śledzenia momentu maksimum były obserwacje radiowe.

## $\epsilon$ -Perseidy wrześniowe w danych PFN

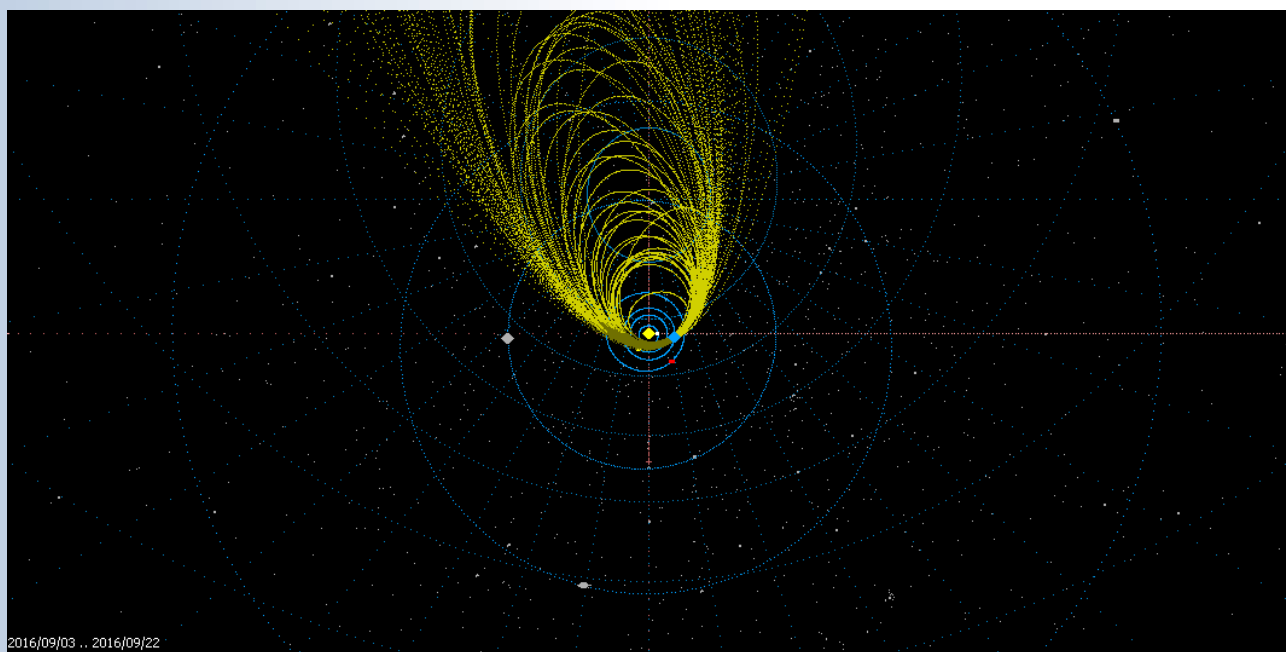
Na czas aktywności pogoda w Polsce była zadowalająca, a Księżyc nie utrudniał obserwacji, gdyż zaczął się pojawiać dopiero po maksimum. Kamery Polskiej Sieci Bolidowej (PFN) zarejestrowały w tym czasie tysiące meteorów, a wśród nich wyraźnie dało się wyróżnić Perseidy wrześniowe.



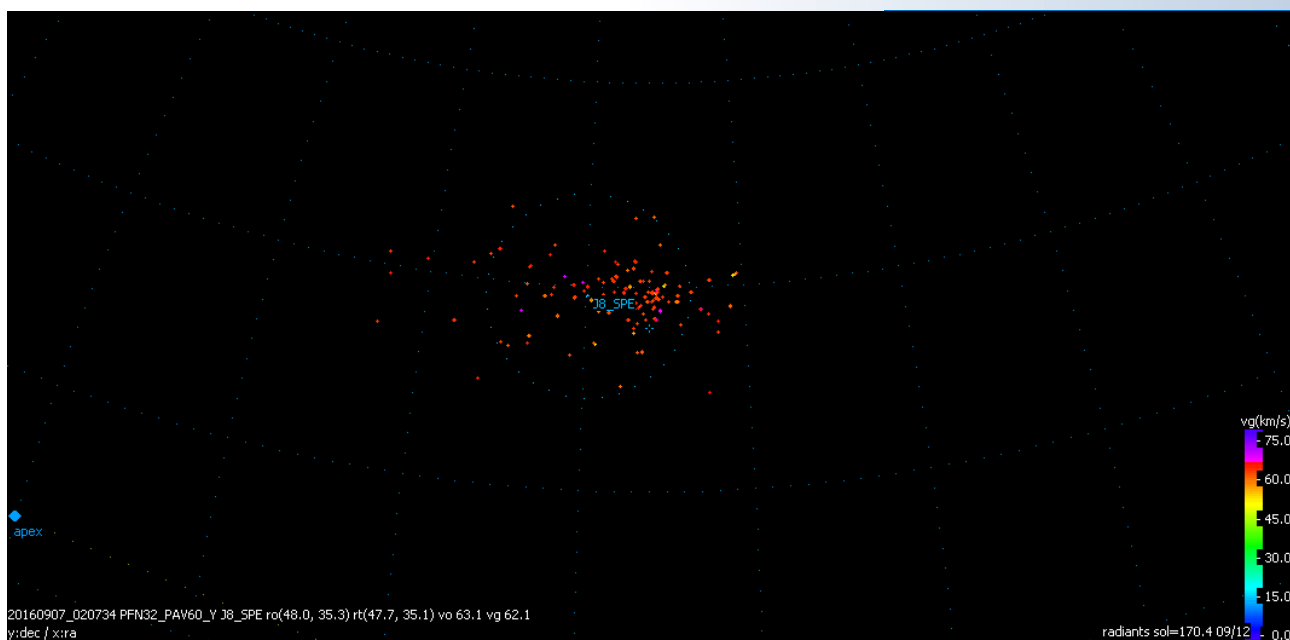
Fot 2. Radiant roju  $\epsilon$ -Perseidów. [www.imo.net](http://www.imo.net)



Fot 3. Trajektorie meteorów należących do roju  $\epsilon$ -Perseidów naniesionych na mapę Europy Centralnej. Dane PFN



Fot. 1. Orbity meteorów należących do roju  $\epsilon$ -Perseidów zarejestrowanych przez kamery PFN. Dane PFN



Fot. 4. Radiant roju  $\epsilon$ -Perseidów, wyznaczony na podstawie danych PFN – kropki. Na rycinie zaznaczono radiant podany w literaturze w formie okręgu

Według danych uzyskanych z naszych kamer  $\epsilon$ -Perseidy były aktywne od 3 do 22 września. W sumie w tym okresie kamery PFN złapały prawie 8 tysięcy meteorów, z czego po sparowaniu ze sobą tych samych zjawisk otrzymaliśmy ponad 1200 orbit, z czego:

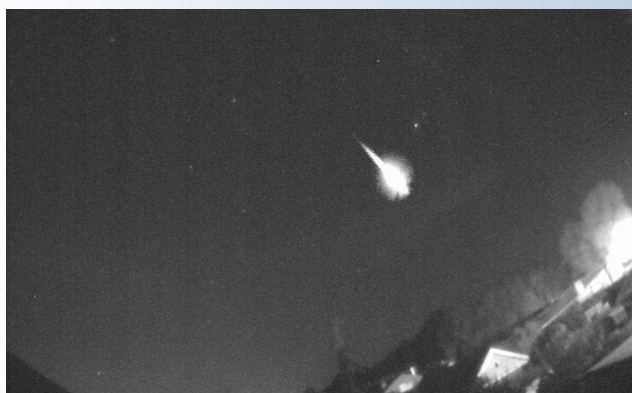
- 661 orbity meteorów sporadycznych
- **116 — orbity Perseidów wrześniowych**
- 468 — orbity innych 55 małych rojów aktywnych między 3 a 22 września.

Największa aktywność roju przypadła na noc 7/8 i 8/9 września. Wtedy to z zebranych danych otrzymaliśmy kolejno 32 i 20 orbit. Najwięcej zjawisk przypada na 8 września między godziną 00.00 UT a 02.40 UT, czyli trochę ponad dobę przed prognozowanym maksimum. Kolejne noce były już mniej obfite w meteory z tego roju, ale nadal wyraźnie odznaczały się na tle innych zjawisk.

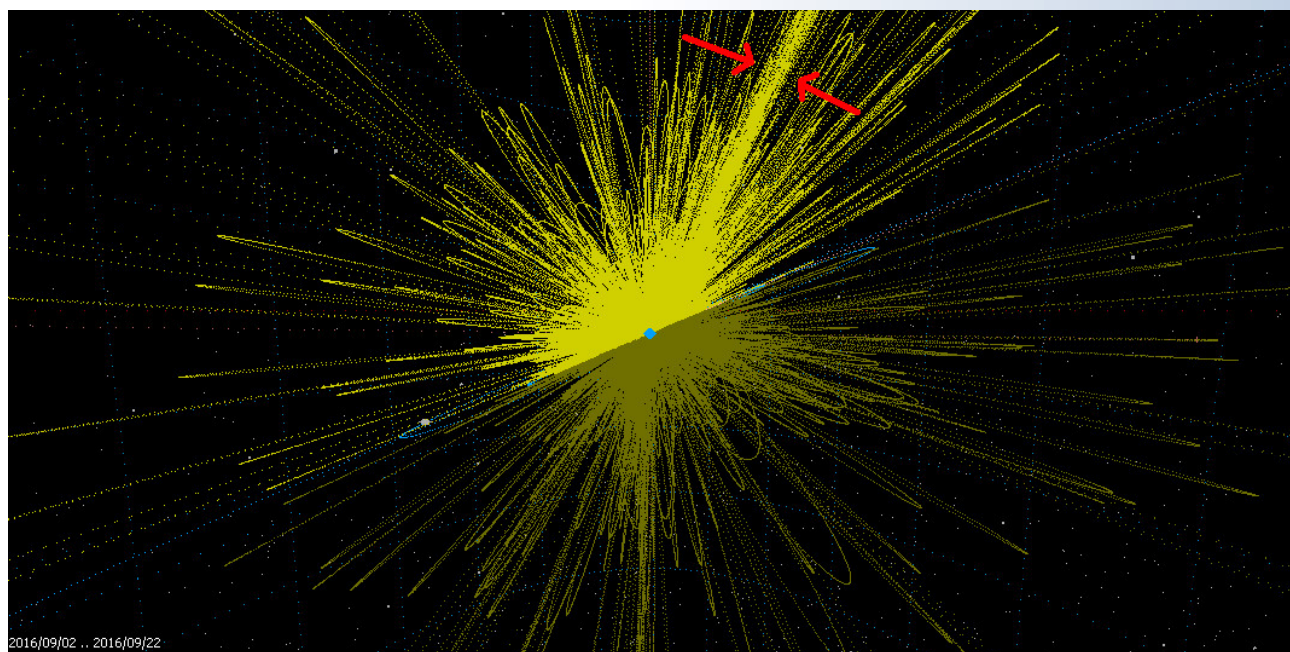
Meteory wpadały w ziemską atmosferę z prędkością około 65 km/s. Zaczynały świecić na wysokościach od 100 do 130 km. Żaden materiał nie wszedł w atmosferę poniżej 80 kilometrów.

Najjaśniejsze zjawisko zostało zarejestrowane 6 września o godzinie 22.39 UT. Jego trajektoria znajduje się nad południową Polską, a jasność wyniosła ok.  $-5$ mag.

Maciej Myszkievicz



Fot. 5. Najjaśniejszy bolid roju  $\epsilon$ -Perseidów z 6 września 2016 r. o godz. 22.39 UT



Fot. 6. SPE na tle innych orbit. Dane PFN