

**Tadeusz J. Jopek**  
**Obserwatorium Astronomiczne UAM**



## **Astronomia meteorowa**



## Słownik pojęć:

- **meteor** – z gr. μετεωροζ, (l.m. μετεωρα), wysoko położony, wzniesiony w powietrzu, ale potocznie mamy:

- |                              |    |                             |     |
|------------------------------|----|-----------------------------|-----|
| • spadające gwiazdy,         |    | • estrela cadente,          | P   |
| • padající hvězda, létavice, | CZ | • falling (shooting) stars, | GB  |
| • padajúca hviezda,          | SK | • fényjelenség,             | H   |
| • Sternschnuppe,             | D  | • vallende ster,            | NL  |
| • étoile filante,            | F  | • krītošā zvaigzne,         | Lv  |
| • stella cadente,            | IT | • langev täht,              | EST |
| • estrella cadenta,          | ES | • Stjärnfall,               | S   |

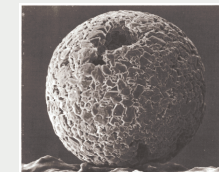
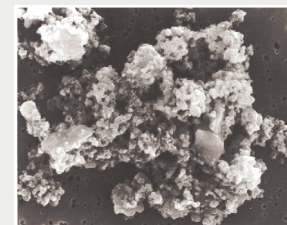
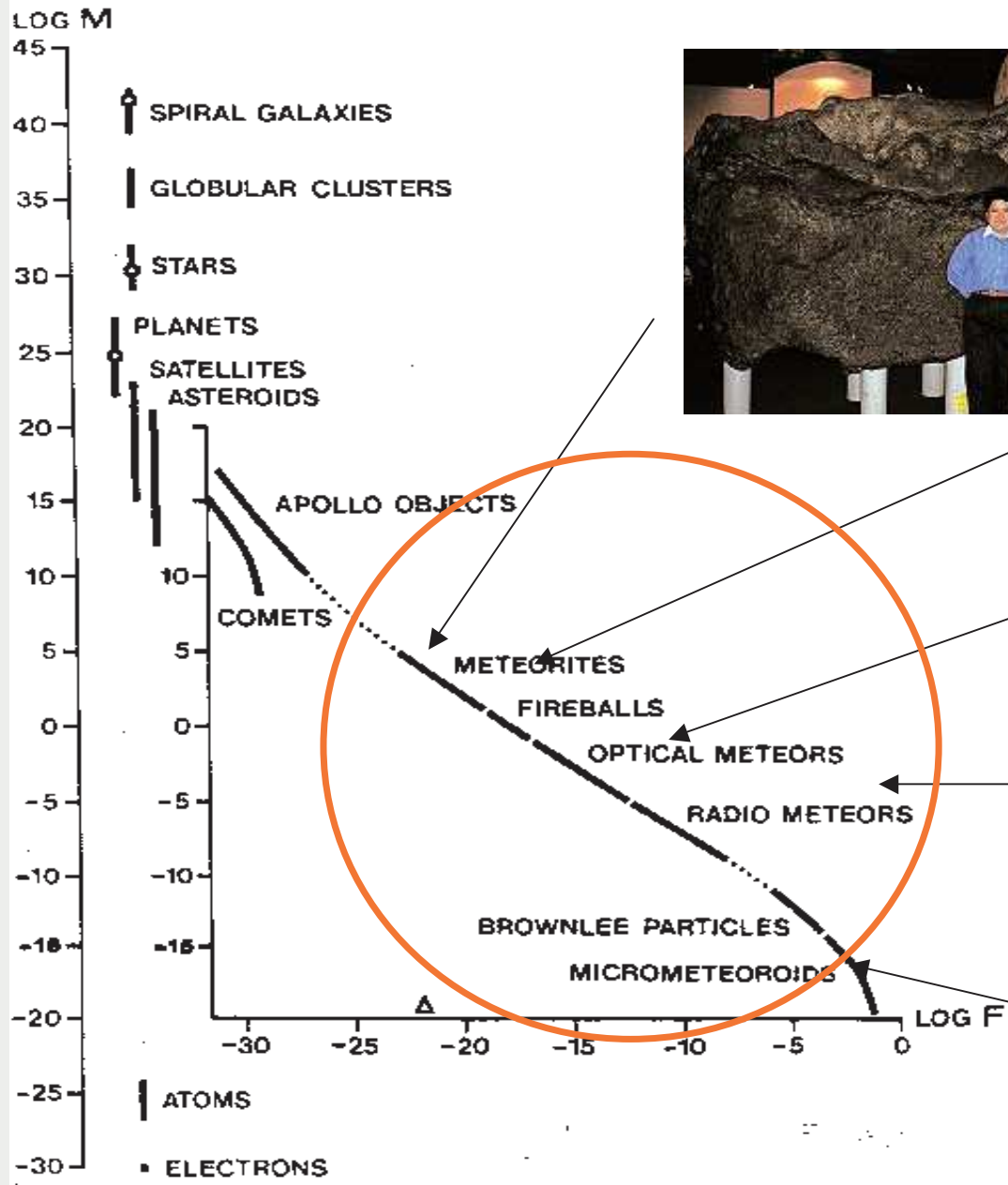
## Słownik pojęć:

- **meteoroid** – bryłka materii poruszająca się w przestrzeni kosmicznej, po wtargnięciu do ziemskiej atmosfery powoduje zjawisko meteoru.
- **bolid** – βολιζ – ładunek, jądro, w łacińskim mamy – **bolis** – kula, meteor o dużej jasności,
- **mikro-meteoroid** – pyłek o rozmiarach mikro-metra, nie wywołuje zjawiska meteoru,
- **meteoryt, mikro-meteoryt** – meteoroid, mikro-meteoroid znalezione na powierzchni ziemi.

**MUA** (IAU):

**Millman, P.: 1961 in Trans. IAU vol. XIA-Reports, Reports on Astronomy, p. 228-230**

definicje niektórych pojęć występujących w obszarze astronomii meteorowej.



## Co roku na powierzchnię Ziemi spada $1.7 \times 10^8$ kg meteoroidów.

(Ceplecha, Z.: 1992, in Proc. Of the Intern. Astron. Symp., Smolenice, Slovakia, July 6-12, 1992, 165-186)



Fot. Pierre Thomas (LST), ENS Lyon



Fot. Policja Muncypalna w Enschede

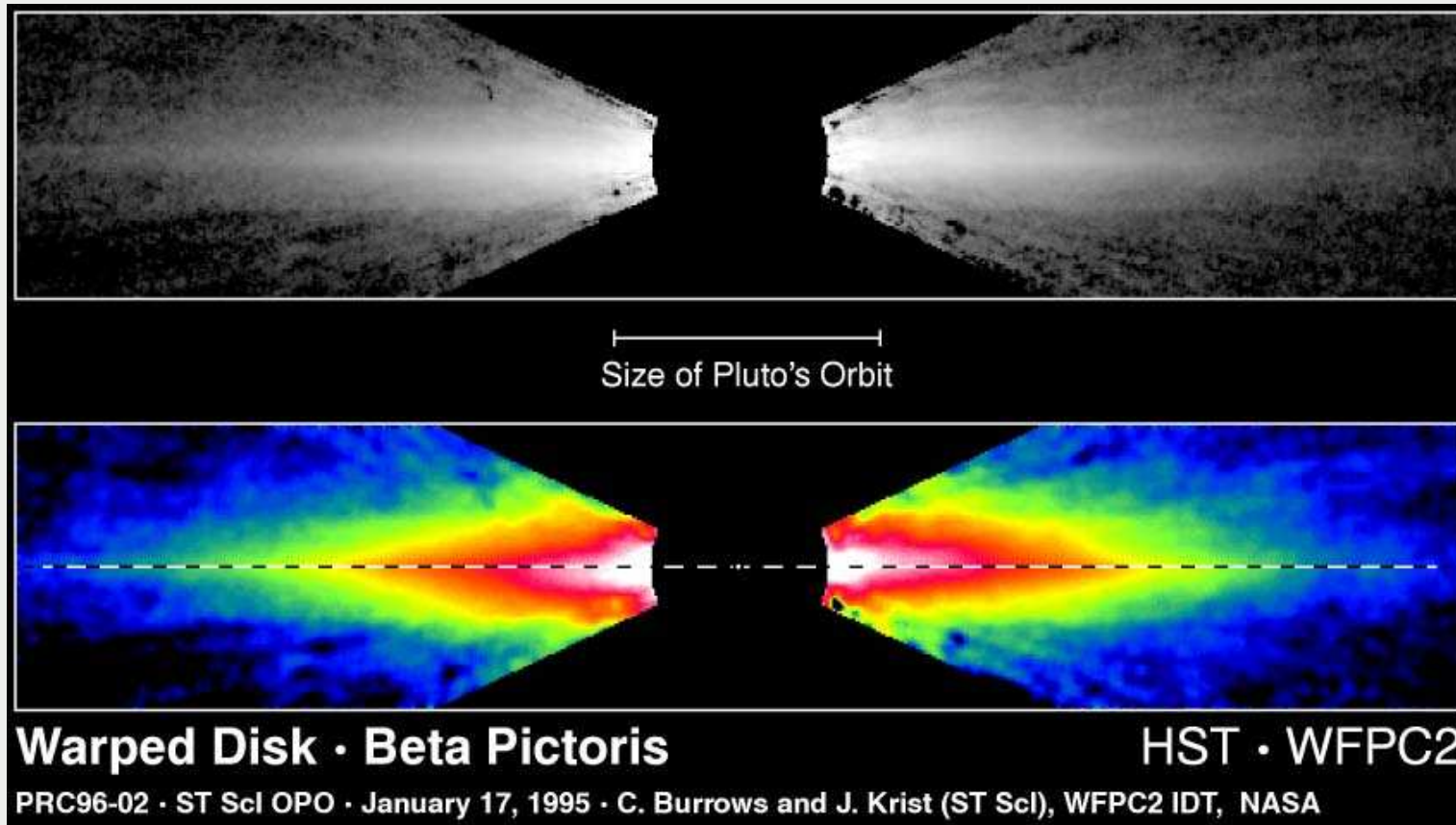
# Rozkład masy w Układzie Słonecznym

• Słońce:	99.85 %
• Planety:	0.135 %
• Komety:	0.01 % ?
• Księżyce:	0.00005 %
• Planetki:	0.0000002 % ?
• Meteoroidy:	0.0000001 % ?
• Materia międzypl.:	0.0000001 % ?



Światło zodiakalne  
f 3.5, 35mm, 1600 ISO  
ekspozycja 14 minut

**Wiele gwiazd posiada drobną składową: pył, ... .**

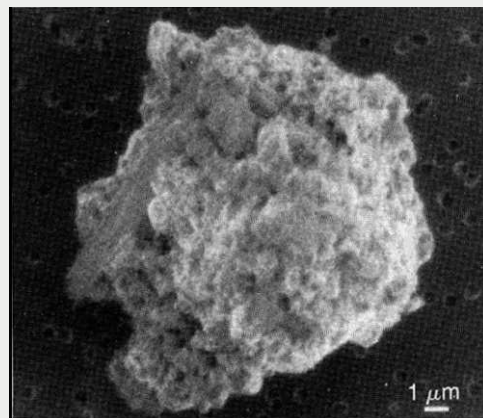




10  $\mu\text{m}$  pyłek  
uwięziony  
w aerożelu

Punkt wtargnięcia  
do aerożelu

© EURECA spacecraft



© Robert M. Walker,  
McDonnell Center for the Space Sciences,



Meteoryt węglisty  
Allende

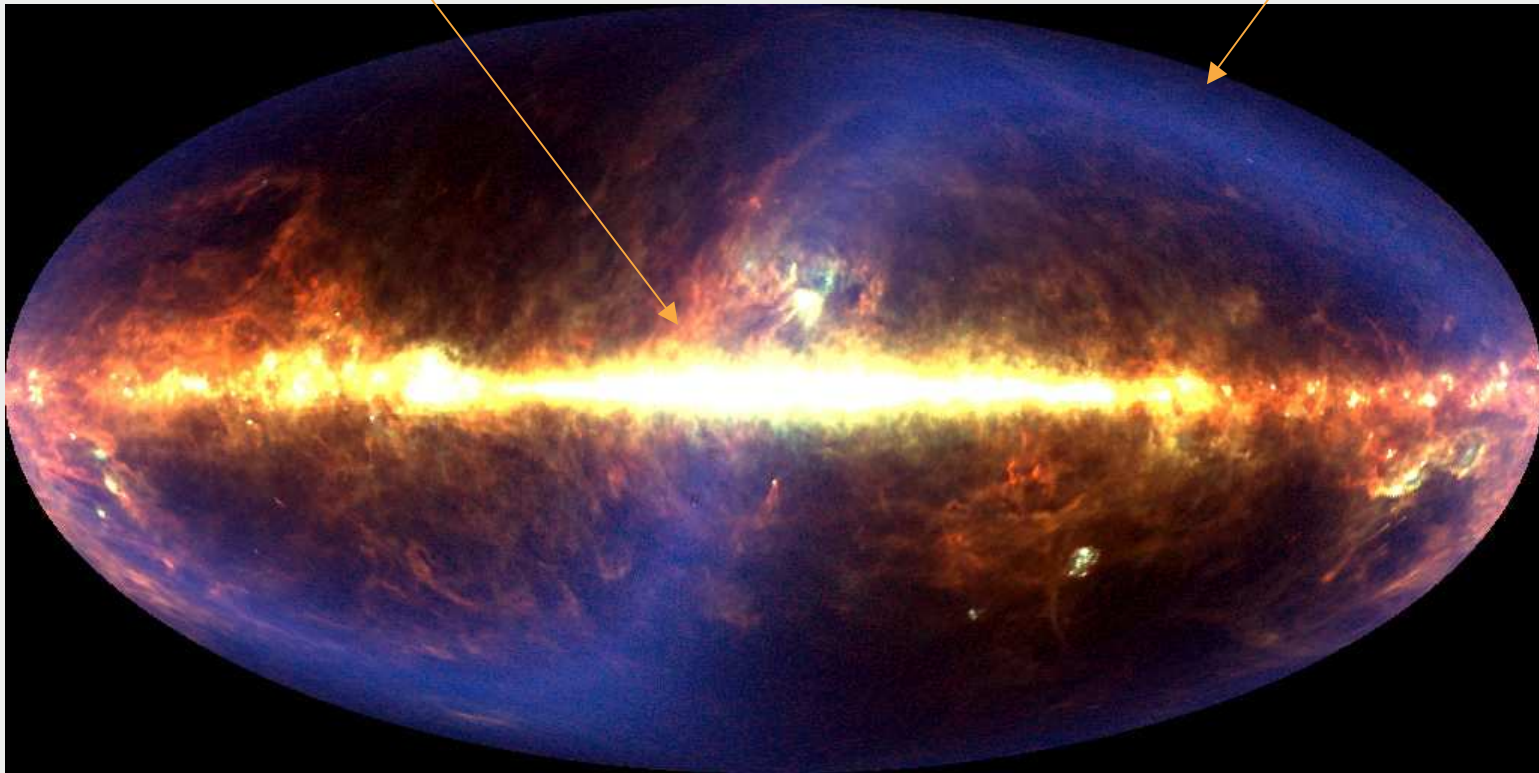


Meteority węgliste oraz pył międzygwiazdowy  
zawierają mikroskopowych rozmiarów  
diamenty, powstałe w trakcie kondensacji  
gwiazd.



Pył międzygwiazdowy w otoczeniu  
płaszczyzny galaktyki

Zodiakalny pył w otoczeniu  
płaszczyzny ekliptyki



COBE/DIRBE - obraz nieba w podczerwieni. .



© WIYN, Inc., 3.5-m WIYN Telescope

Interstellar Dust-Bunnies of NGC 891

Gwiazdy i pył  
w Koronie Południowej



© Loke Kun Tan



## Trochę historii

30-50 tys. lat temu,  
człowiek pierwotny  
układa meteoryt na stosie  
kamieni

...  
itd., itd. ...

## Dawne i współczesne spadki meteorytów



Imperium Rzymskie, AD 218-219



Środkowy Teksas wiek XIX



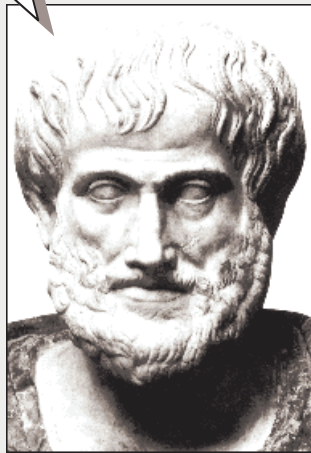
Indie AD 1621



Afryka AD 1992

## Pozaziemskie pochodzenie meteoroidów

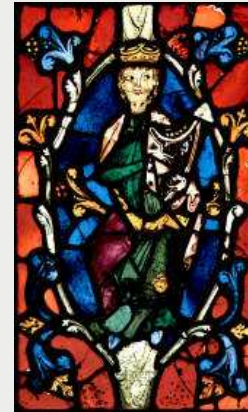
Bzdura!



A może jednak?



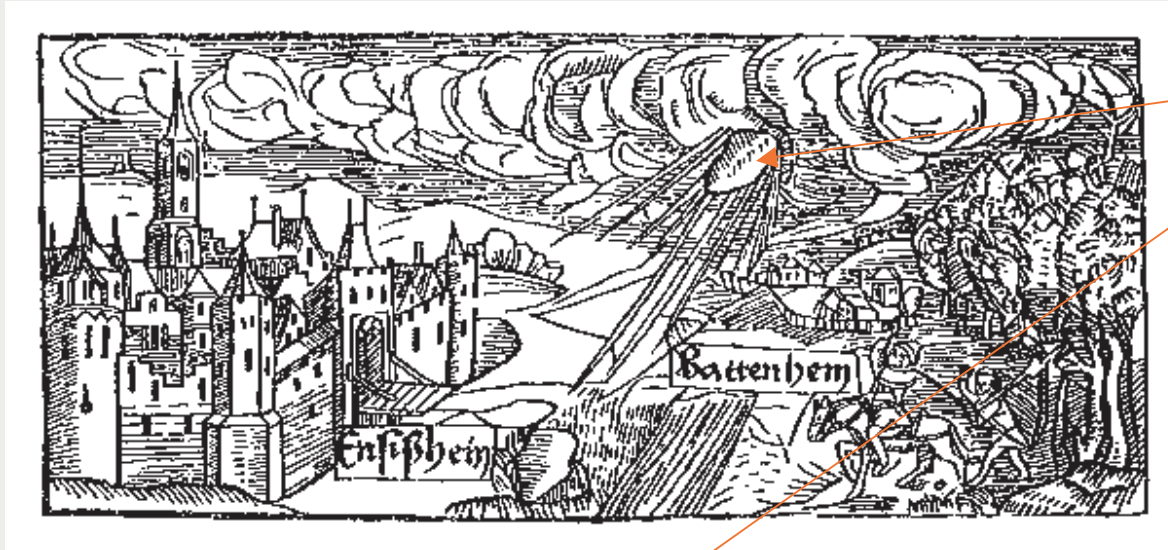
## Europa Średniowiecze



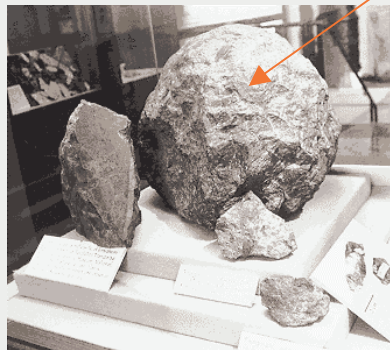
Kroniki Klasztoru Benedyktynów  
w Saint Denis

AD 530 – pierwszy opis przelotu bolidu

## ... Średniowiecze cd.



Chondryt LL6  
m=127 kg



Kopia drzeworytu ilustrującego spadek  
meteorytu w 1492 r. w pobliżu Ensisheim.  
(Alzacja, Francja)

...the interplanetary space has to be free of matter,  
for not to disturb the course of planets and comets ...

## Barok

**Izaak Newton** (1642-1727)





.. a może jednak ?



Moje złotko! Przecież na niebie nie ma kamieni, zatem kamienie nie mogą spadać z nieba!

**Oświecenie !! Tak!Tak!**

**Antoine-Laurent Lavoisier**  
(1743-1794)

## Oświecenie cd.



**Peter Simon Pallas**  
(1741-1811)



## Oświecenie cd.

**AD 1794**

**Ernst Florens Friedrich Chladni**  
(1756-1827)



Ueber den  
**U r s p r u n g**  
der von Pallas gefundenen  
und anderer ihr ähnlicher  
**E i s e n m a s s e n,**  
und über einige damit in Verbindung stehende  
**Naturerscheinungen.**

von

**Ernst Florens Friedrich Chladni,**

in Wittenberg, der Phil. und Rechte Doctor, der Berliner Societät Naturf. Freunde Mitgliede,  
und der königl. Societät der Wissenschaften zu Göttingen Correspondent.

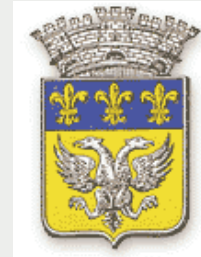
---

N i g a,

bey Johann Friedrich Hartknoch.

1 7 9 4.

# L'Aigle (Orney, Normandie, F)



*Cuisine normande*



## Cuisine normande



### Jarret de porc aux fruits du verger

Une recette originale de  
Michel Bruneau du restaurant La Bourride à Caen

#### Ingrédients pour 4 personnes

2 jarrets de porc	2 poireaux
1 litre de cidre	2 oignons
4 carottes	1 bouquet garni
4 navets	20 cl de Calvados
sel, poivre	

#### Préparation: 20 minutes, temps de cuisson: 2H30, difficulté: très facile

1. Dans votre cocotte, disposer vos jarrets ; entourer de tous vos légumes et arroser du cidre et du Calvados.
2. Porter le tout à ébullition, poivrer et laisser mijoter en n'oubliant pas d'écumer souvent. Ne pas saler. Cuire 1 heure 30.
3. Ôter les légumes et saler à ce moment. Terminer la cuisson à petit feu environ 1 heure.
4. Ajouter les légumes au bouillon pour les réchauffer. Vérifier l'assaisonnement et servir bien chaud.

**L'Aigle 1803, kwiecień 26.  
Deszcz meteorytów.**



**Jean-Baptiste Biot**  
(1774-1862)

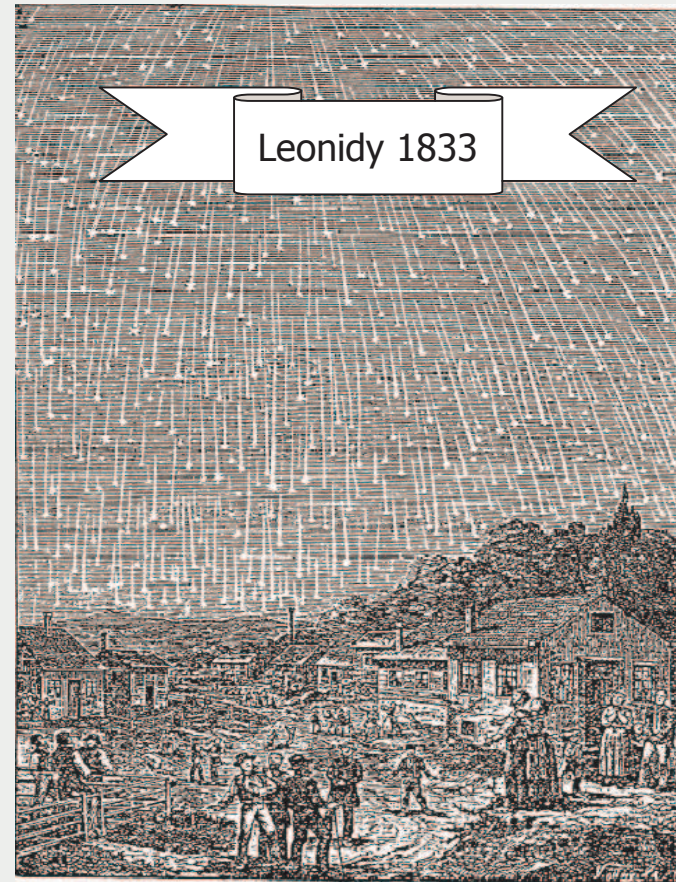
**AD 1807**

**Astronomia meteorowa  
a  
czynniki polityczne**

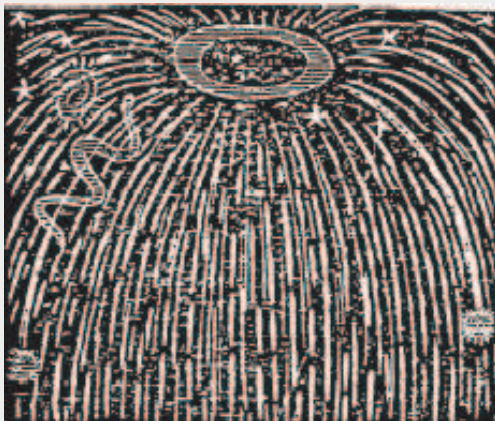


**Thomas Jefferson (1743-1826)**

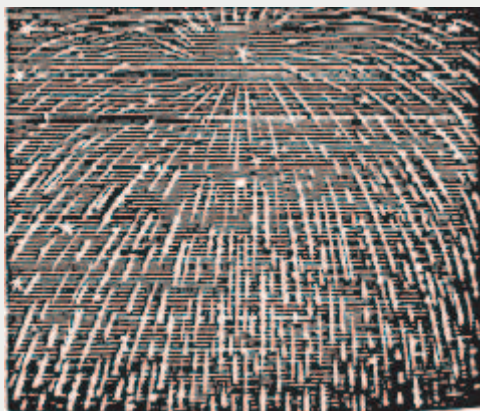
... I would rather believe that two Yankee professors would lie than believe that stones fall from heaven.



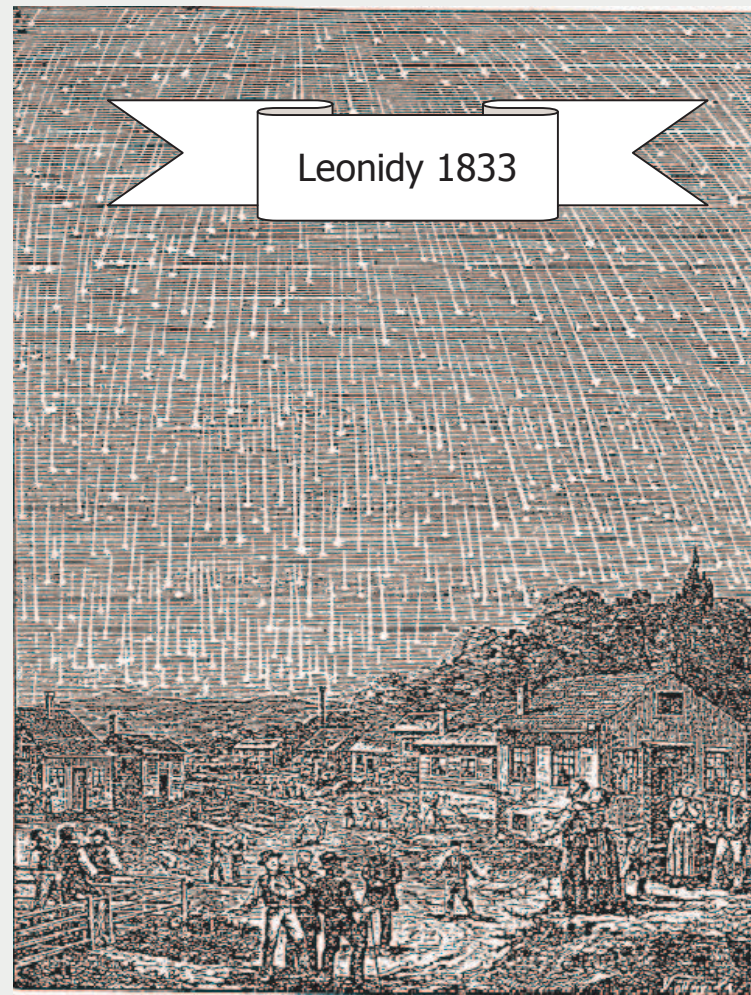
## Leonidy 1833, Listopad 13



Devens, 1876, .... p. 330



Olmsted D.: 1833, November,  
Mechanics Magazine, p 287.



Leonidy 1833

Drzeworyt wykonany ok. 55 lat  
po Leonidach 1833



**Wiek XIX, XX**



Denison Olmsted  
(1791-1851)



Johann Gottfried Galle  
(1812-1910)



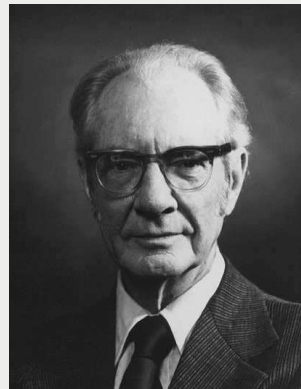
Giovanni Virginio Schiaparelli  
(1835-1910)



William Frederick Denning  
(1848-1931)



Ernst Jujlius Öpik  
(1843-1985)



Fred Lawrence Whipple  
(1906-2004)

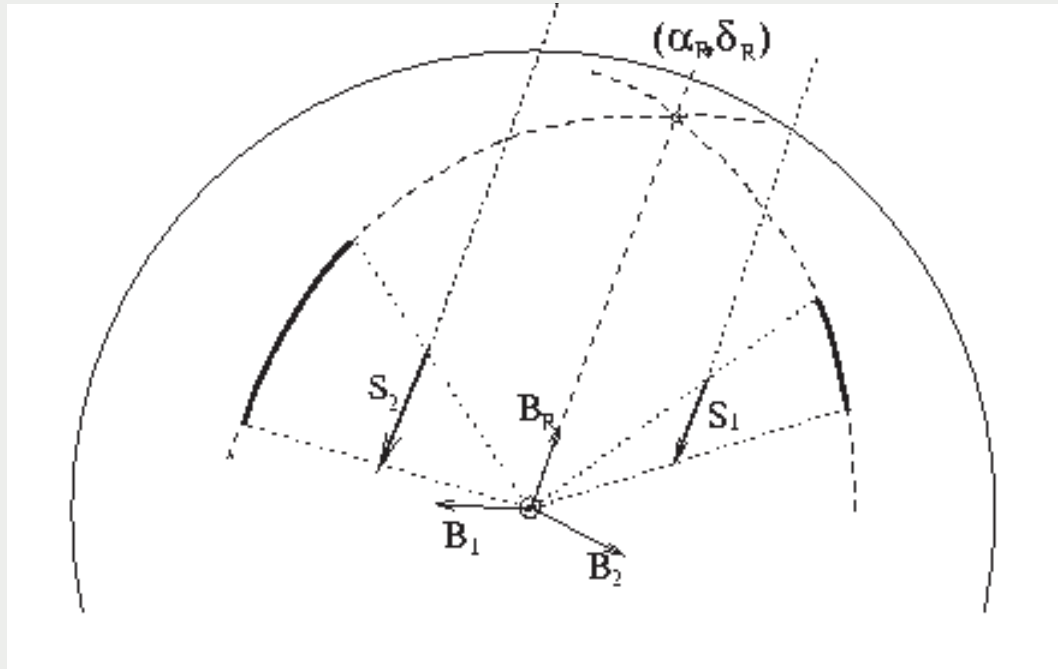


Cuno Hoffmeister  
(1892-1968)



Lubor Kresak  
(1927-1994)

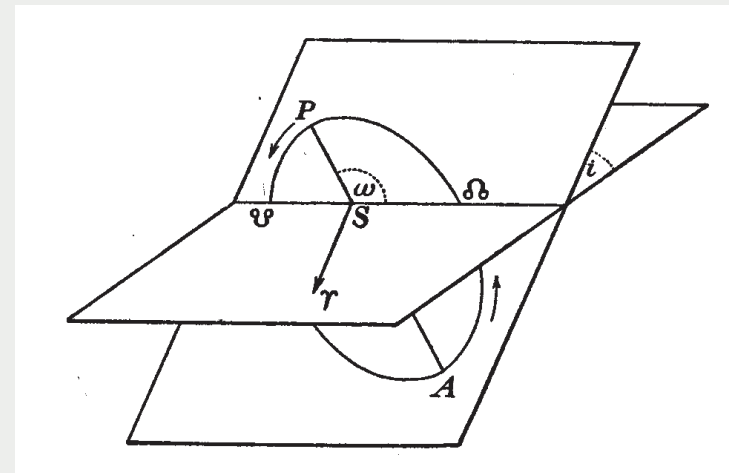
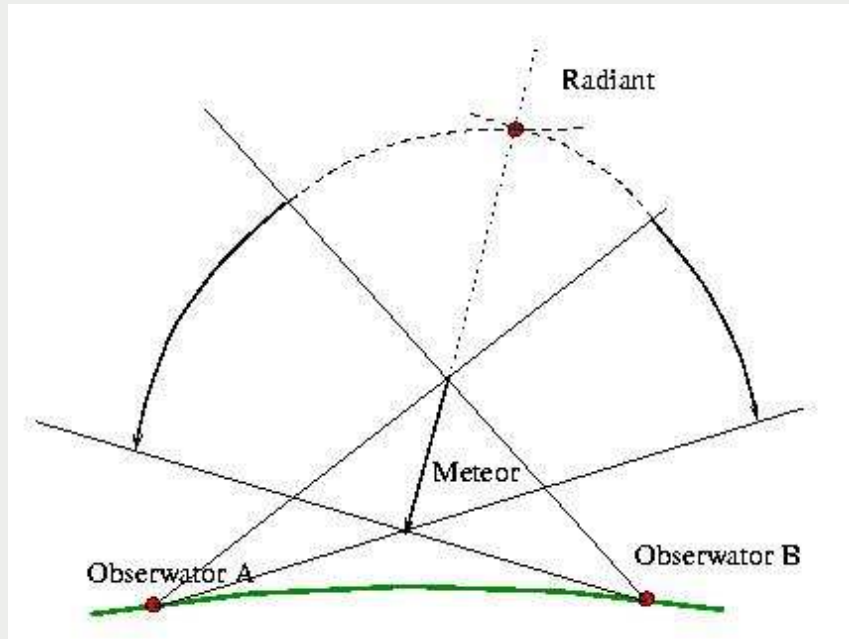
# Koncepcja radiantu



D. Olmsted

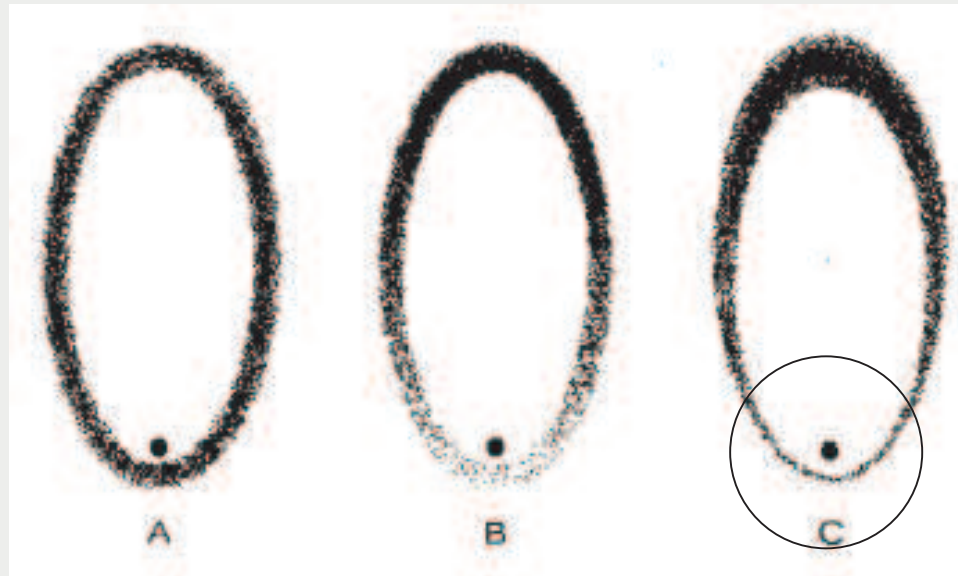
Parametry geocentryczne meteoru:  $\mathbf{V}_{G'}$   $\alpha_{G'}$   $\delta_{G'}$   $\mathbf{T}_{obs}$

## Bazowe obserwacje meteorów



$$\vec{r}, \dot{\vec{r}}, t_{Obs} \Rightarrow e, a, \omega, \Omega, i$$

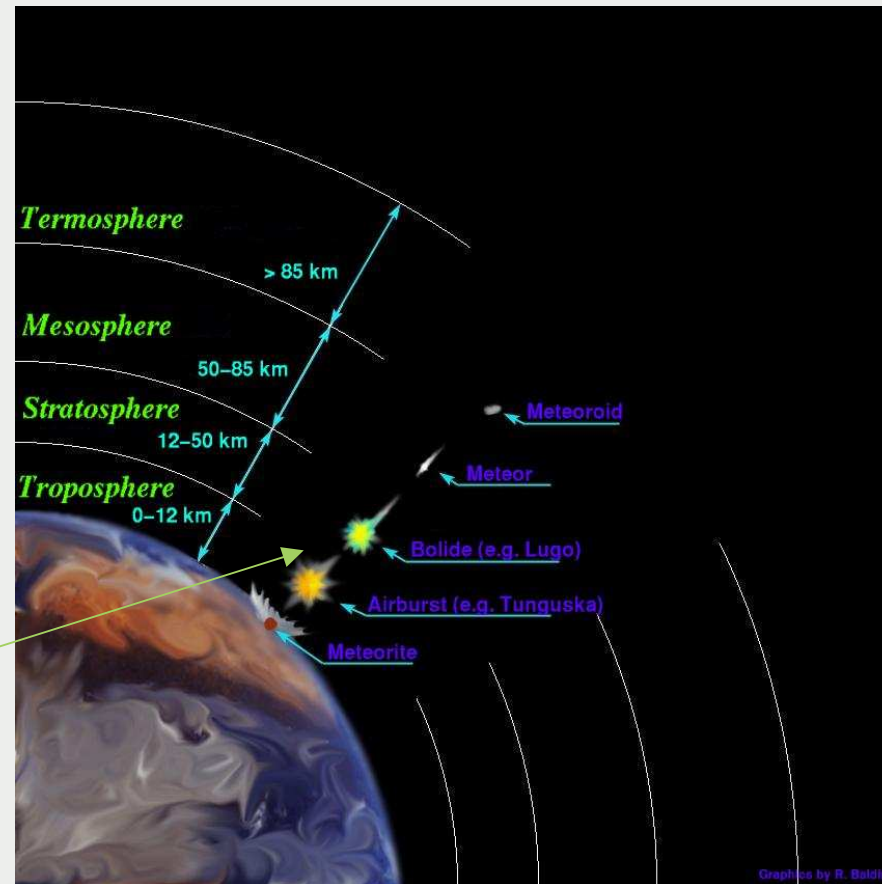
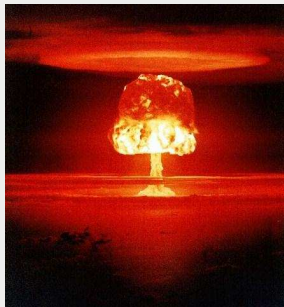
## Konceptcja strumienia meteoroidowego



© Kresak L.: 1974, BAC, 25, 336-344

- A – koncepcja nierealna dynamicznie,
- B – koncepcja dopuszczalna dynamicznie, nierealna ze względu na pochodzenie strumienia,
- C – koncepcja realna dynamicznie i ze względu na pochodzenie.

# Fizyka zjawiska meteoru



Energia kinetyczna super bolidów  $\approx$  energii wybuchów jądrowych

# Fizyka zjawiska meteoru

---

Hamowanie

$$M \cdot \frac{dv}{dt} = -\Gamma S \rho \cdot v^2$$

$\Gamma$  – współczynnik oporu,

$S$  – powierzchnia przekroju meteoroidu czynna w wymianie pędu,

$\rho$  – gęstość powietrza,

$M$  – masa meteoroidu,

$v$  – szybkość meteoroidu.

# Fizyka zjawiska meteoru

---

Utrata masy

$$\frac{dM}{dt} = -\Lambda \frac{S\rho \cdot v^3}{2Q}$$

- Q – ciepło właściwe (podgrzanie, stopienie, odparowanie dM),
- S – powierzchnia przekroju meteoroidu czynna w wymianie energii,
- $\rho$  – gęstość powietrza,
- M – masa meteoroidu,
- v – szybkość meteoroidu.
- $\Lambda$  – współczynnik ablacji,

# Fizyka zjawiska meteoru

---

Emisja promieniowania

$$I = \tau \cdot \left( -\frac{dM}{dt} \right) \frac{v^2}{2}$$

I – strumień energii promienistej,  
 $\tau$  – współczynnik efektywności promieniowania,  
M – masa meteoroidu,  
v – szybkość meteoroidu.



# Fizyka zjawiska meteoru

---

Jonizacja

$$\alpha = -\frac{\beta}{m_{\alpha} v} \cdot \frac{dM}{dt}$$

- $\alpha$  – liniowa gęstość elektronów,
- $\beta$  – współczynnik jonizacji,
- $m_{\alpha}$  – średnia masa meteoroidowego atomu,
- $M$  – masa meteoroidu,
- $v$  – szybkość meteoroidu.

# Fizyka zjawiska meteoru

---

## Co można wyznaczyć z tych równań?

### Potrzebujemy:

$\rho$  - gęstość atmosfery, czerpiemy ją z modeli atmosfery,

$d\mathbf{v}/dt$ ,  $\mathbf{I}$ , oraz  $\alpha$ . – wyznaczamy z obserwacji,

$Q$ ,  $S$ ,  $\Gamma$ ,  $\Lambda$ ,  $\tau$ ,  $\beta$ ,  $m_\alpha$  - znamy lepiej bądź gorzej z teorii, badań laboratoryjnych.

# Fizyka zjawiska meteoru

## Masa meteoroidu

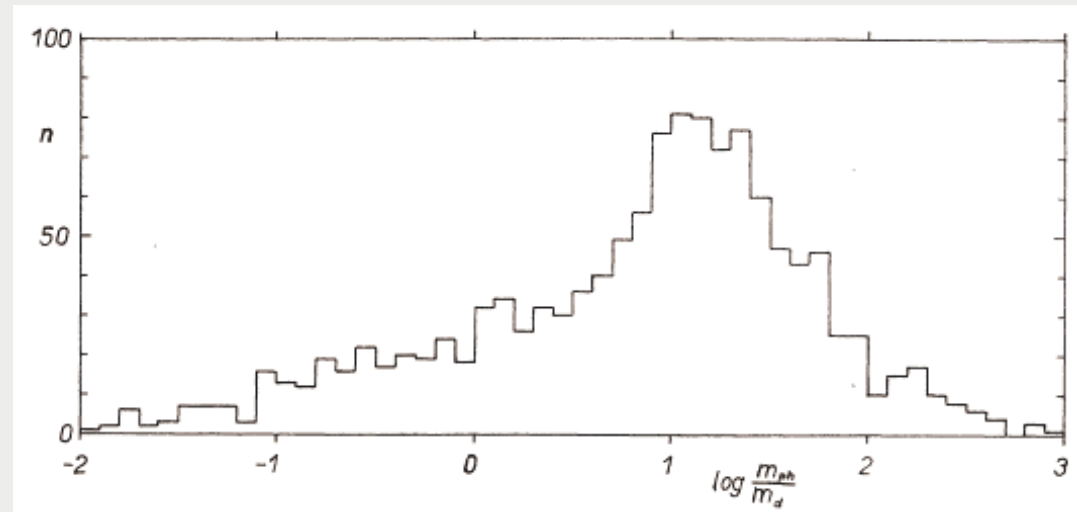
Z równania hamowania mamy:

$$M_D = \frac{\Gamma S \rho v^2}{-\frac{dv}{dt}}$$

**Niestety, najczęściej  
MD < MF**

Z równania świecenia mamy:

$$M_F = \int_{t_k}^{t_p} \frac{I}{\tau v^2} dt$$



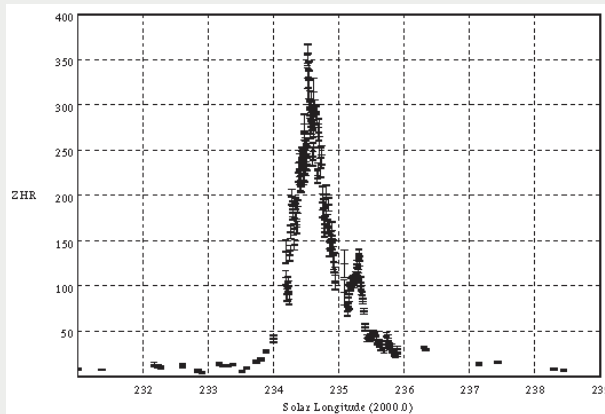
Ceplecha 1966, BAC, **17**, 347-354

## Techniki obserwacji meteorów

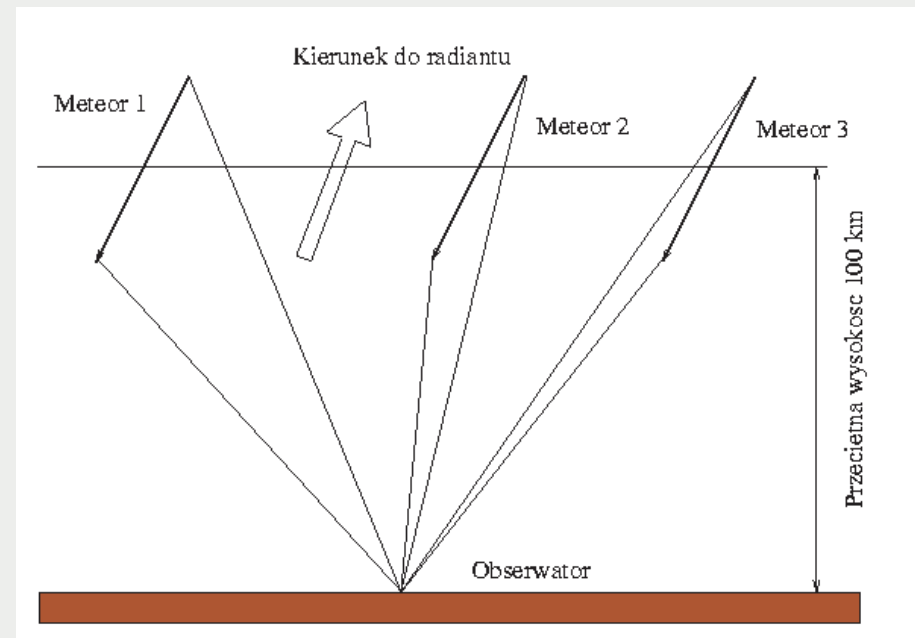


## Obserwacje wizualne

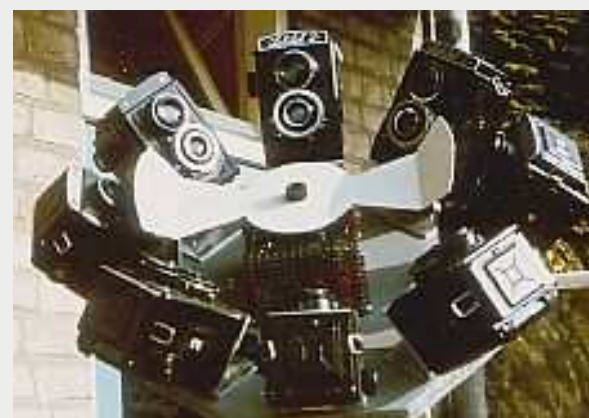
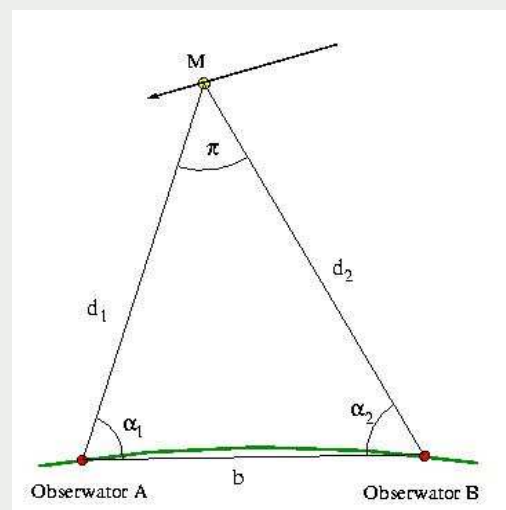
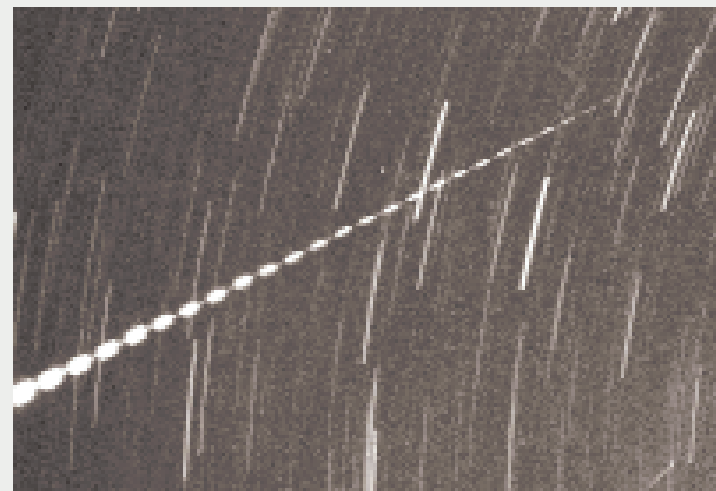
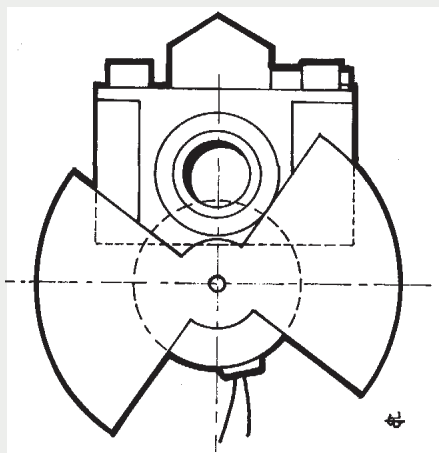
- moment czasu zjawiska,
- liczenie meteorów,
- współrzędne początku i końca śladu,
- oszacowanie jasności
- oszacowanie szybkości kątowej



Obserwacje wizualne, C. Hoffmeister



# Obserwacje fotograficzne



## Pierwsze obserwacje fotograficzne meteorów

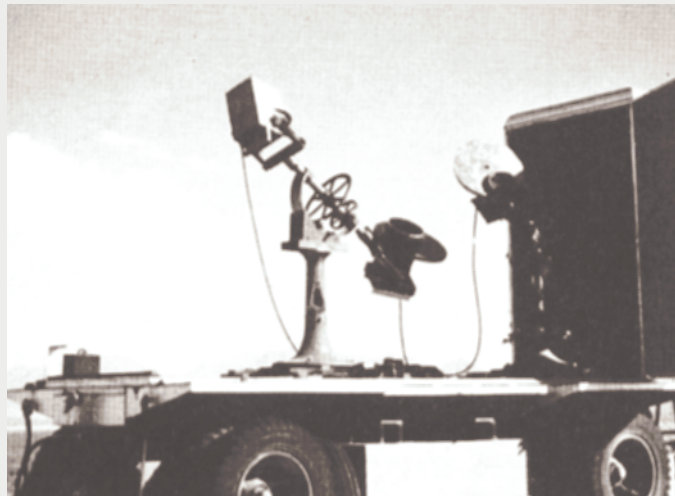


Bateria kamer w Yale 1899



Meteor z 1899.07.31  
(W.L.Elkin. 1899, Ap.J. 12, 4)

## Fotograficzne obserwacje meteorów w Harvardzie



Mobilna stacja  
w Dona Ana w 1949

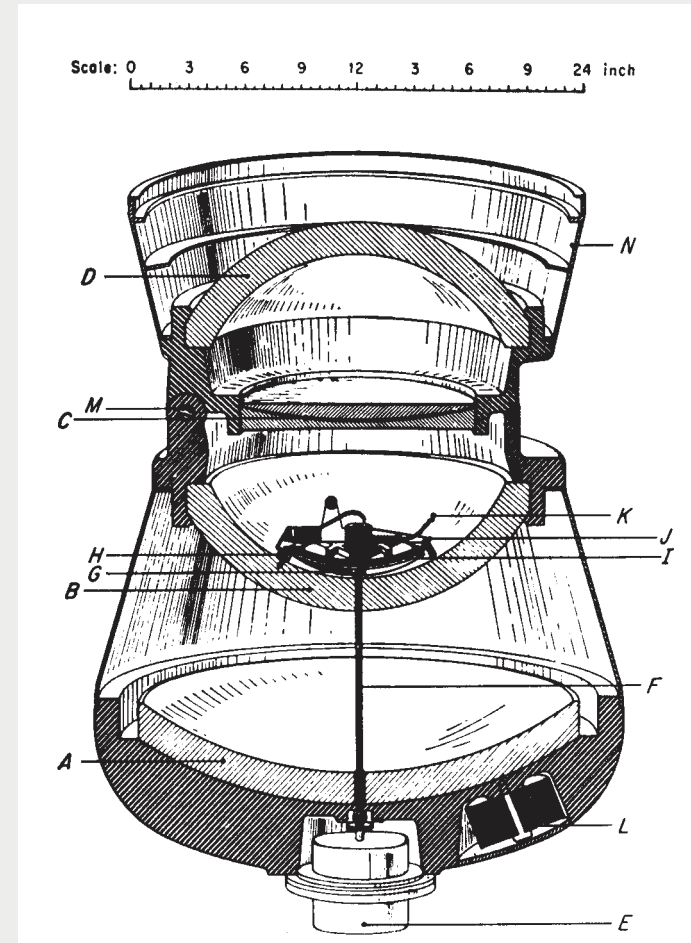
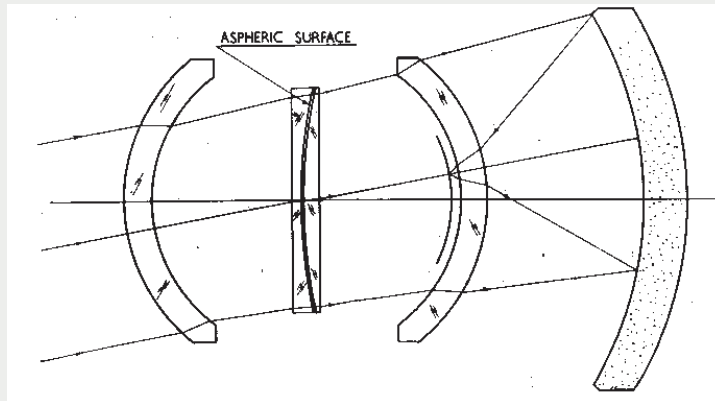
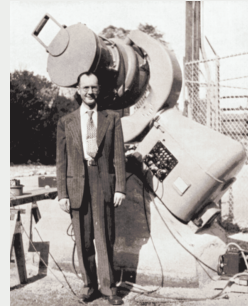
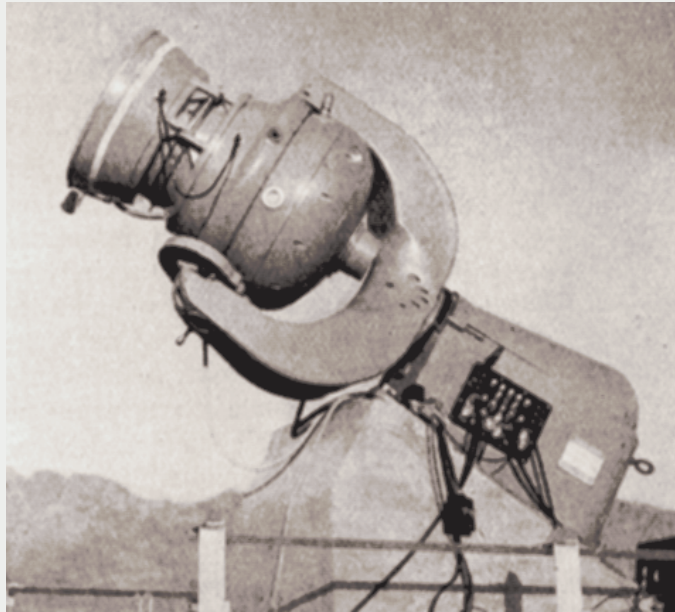


Dona Ana i Soledad w NM





# Kamera Baker-Schmidta

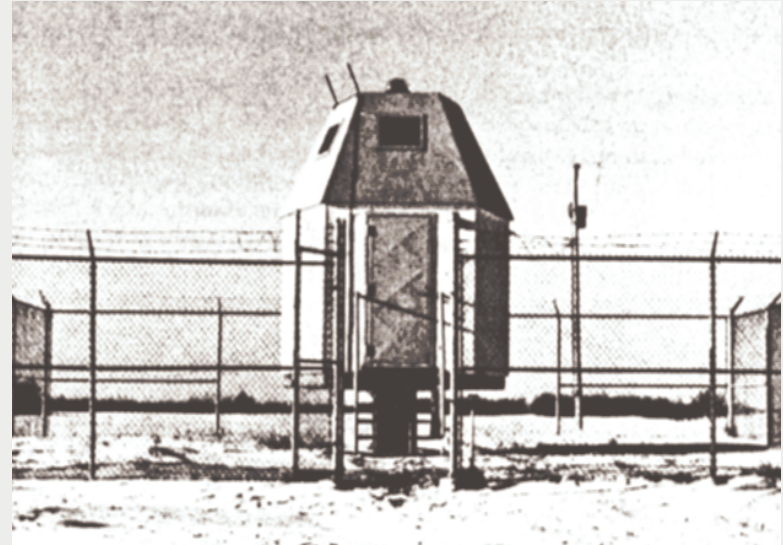


# Kamery bolidowe

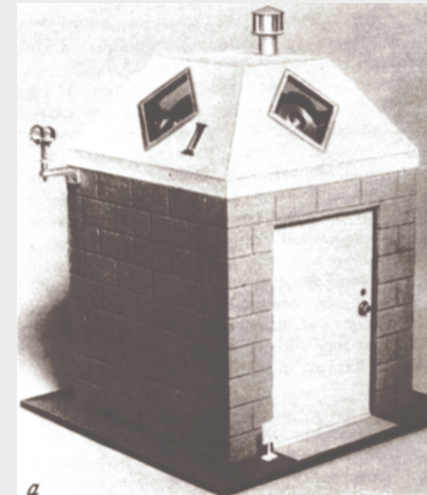
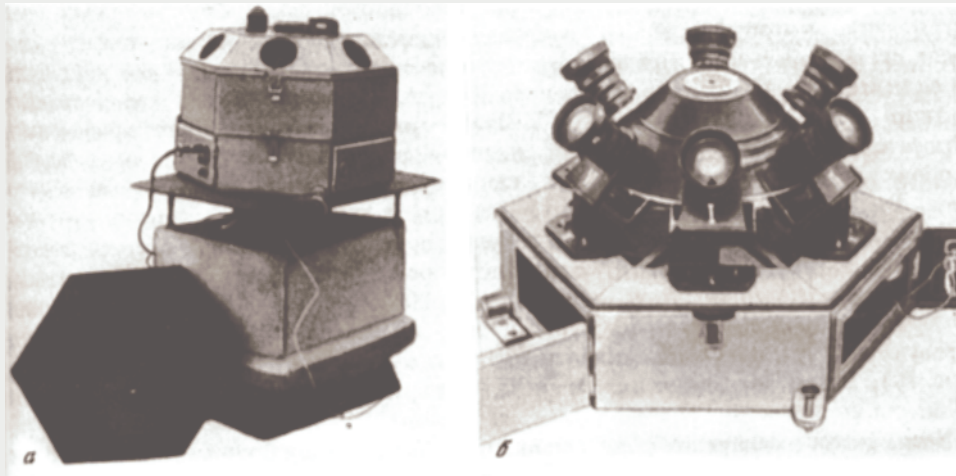


All-sky EN

MORP  
Kanada

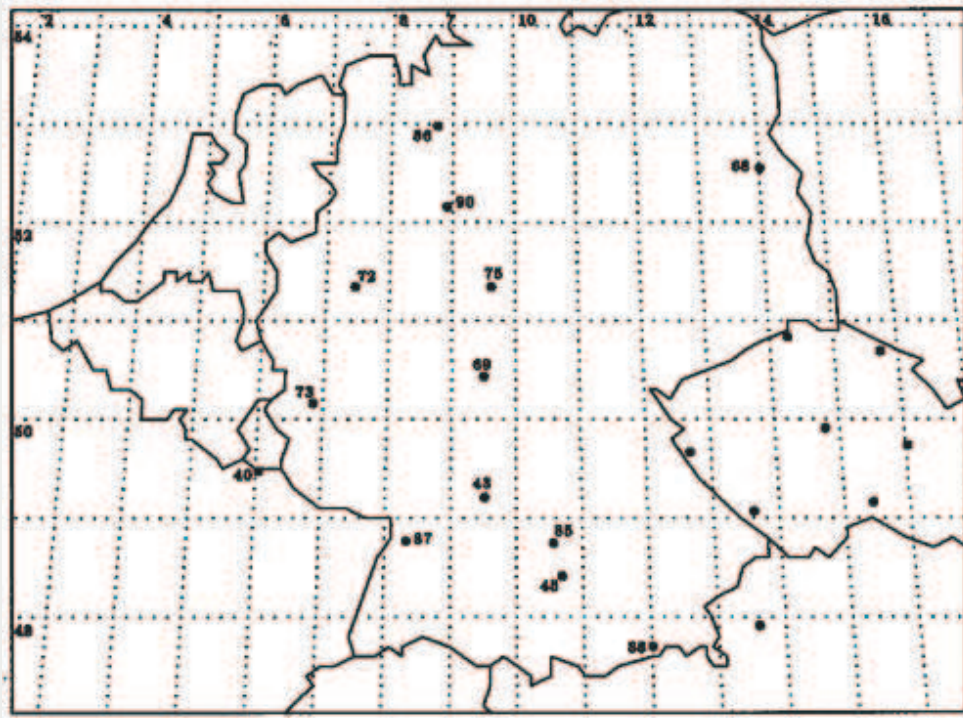


ZSRR

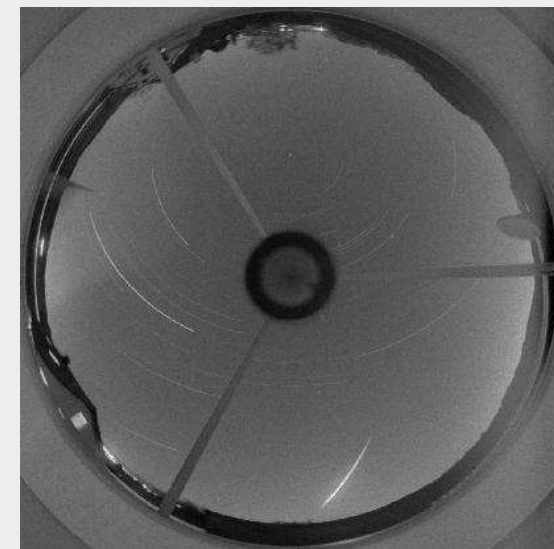


PN  
USA

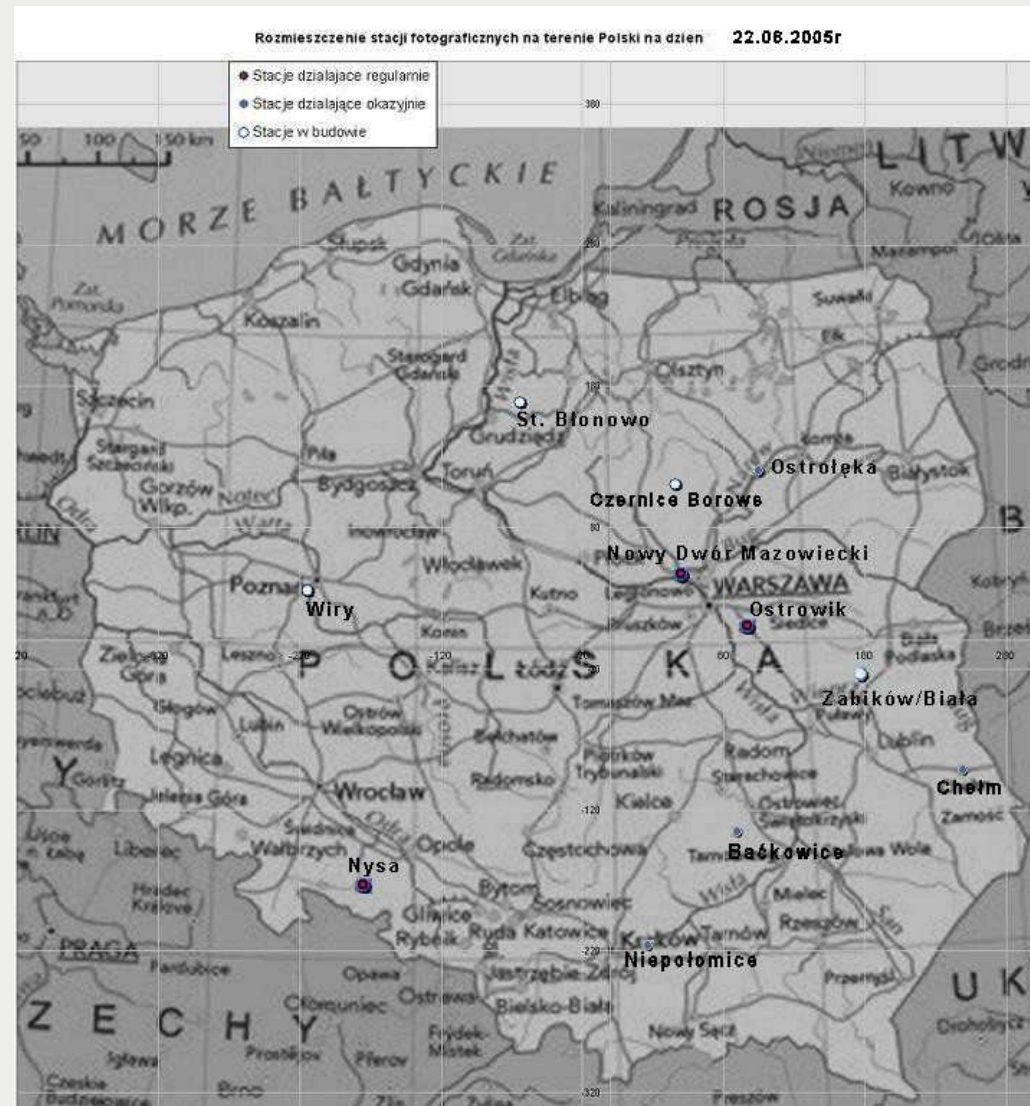
## Fotograficzna Europejska Sieć Bolidowa



© [http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-623/1043\\_read-1425/](http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-623/1043_read-1425/)

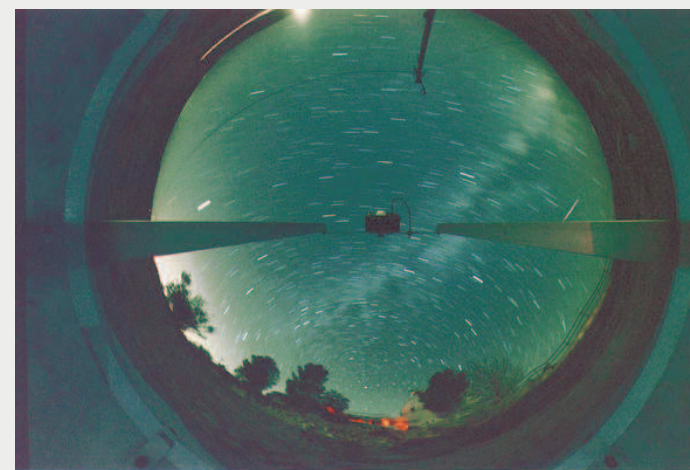
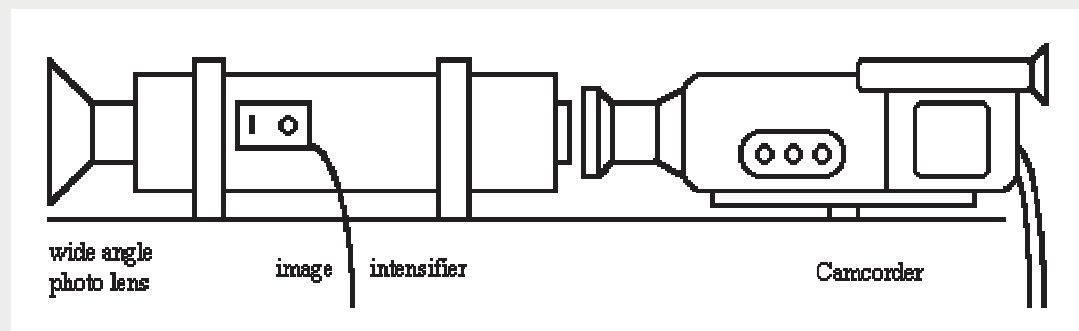


**Polska Sieć Bolidowa**  
**Sekcji Fotograficznej**  
**Pracowni Komet i Meteorów**

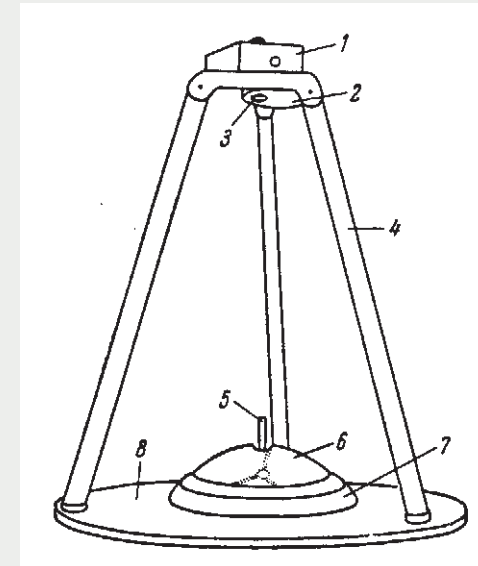


© <http://foto.pkim.org/>

# Obserwacje TV meteorów



## Sieci obserwacyjne bolidów



Kamery bolidowe w sieci europejskiej

## Automatyczna Kamera Bolidowa (Ondrejov)



Fot. P. Spurny



# Automatyczna Kamera Bolidowa (Ondrejov)

Fot. P. Spurny

Detektor: dźwięku, zachmurzenia, pojaśnienia,  
opadów atmosferycznych

3.5/30 mm Zeiss Distagon

Pentium II, Linux,  
RAM 128 MB, HD 40 GB,  
Modem,  
Karta sieciowa,  
video grabber,  
Karty A/D i D/A ,  
S/W sterujący, kontrolny.

Odbiornik DCF 77, GPS  
UPS

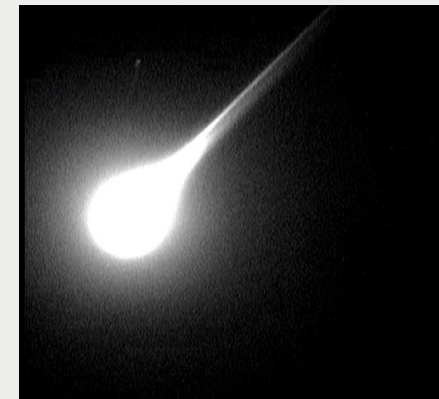
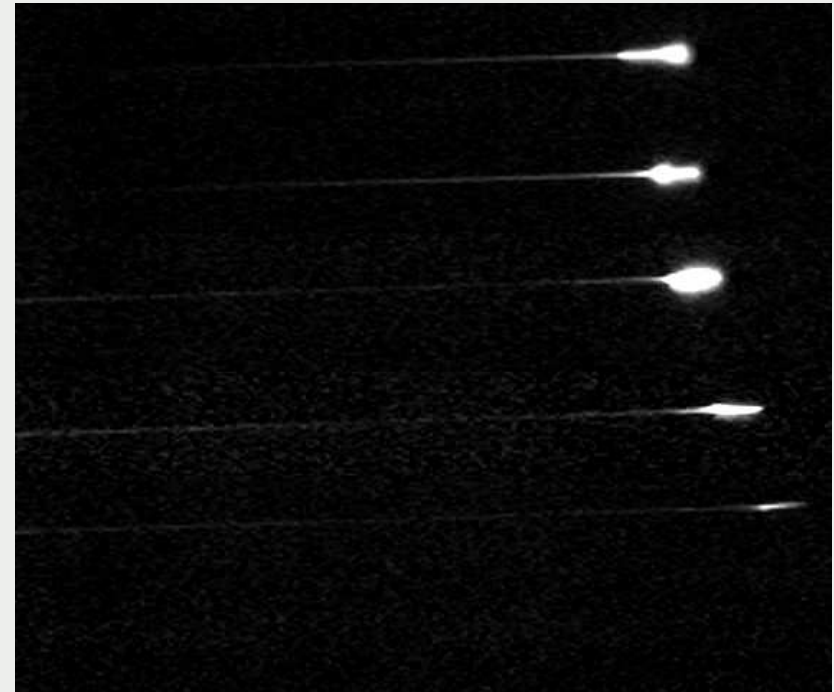
Pojemnik na 32 błony płaskie,  
automatyka do wymiany błon,  
podciśnieniowy system utrzymywania  
błony w płaszczyźnie ogniskowej,  
migawka – wirujący sektor tuż przed błoną  
z regulowaną szybkością kątową.



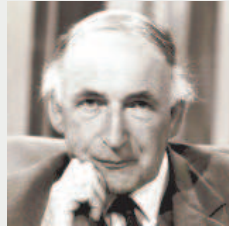


## Ultra szybkie obserwacje meteorów

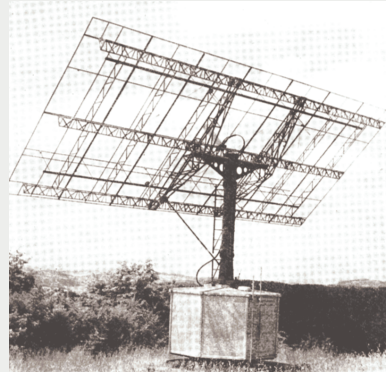
Results of the AIM-IT Meteor Tracking System  
P. S. Gural, P. Jenniskens, G. Varros



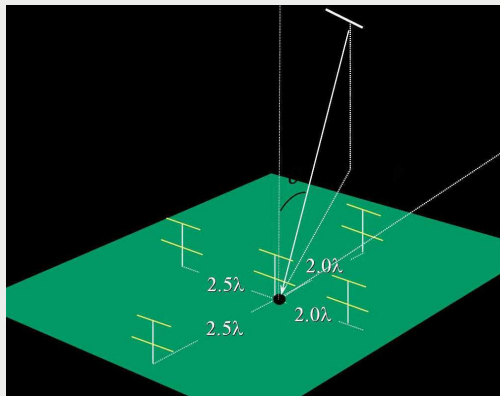
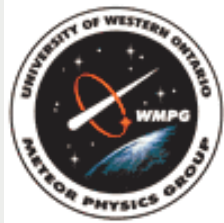
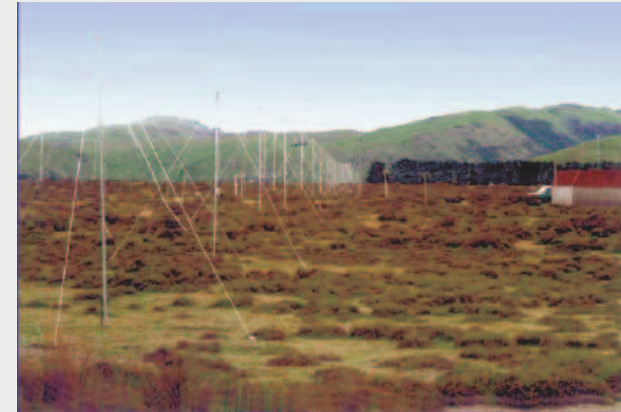
# Obserwatoria radio meteorowe



B. Lovell  
Jordel Bank



Radar w Ondrzejowie k. Pragi

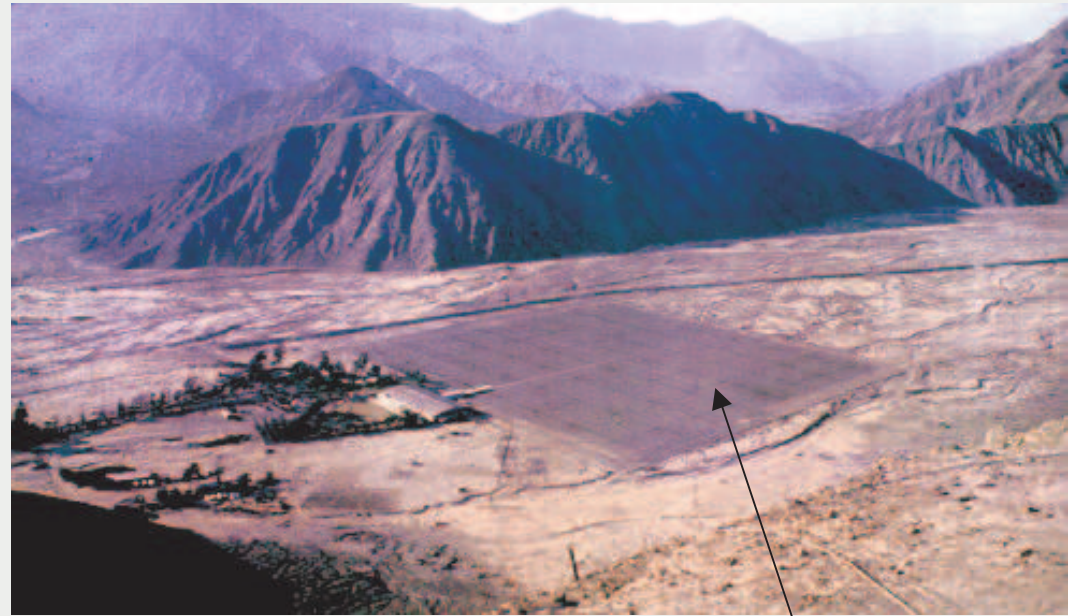


Stacja radarowa  
na Biegunie Południowym

# Obserwacje radiometeorów: radary dużej mocy i apertury



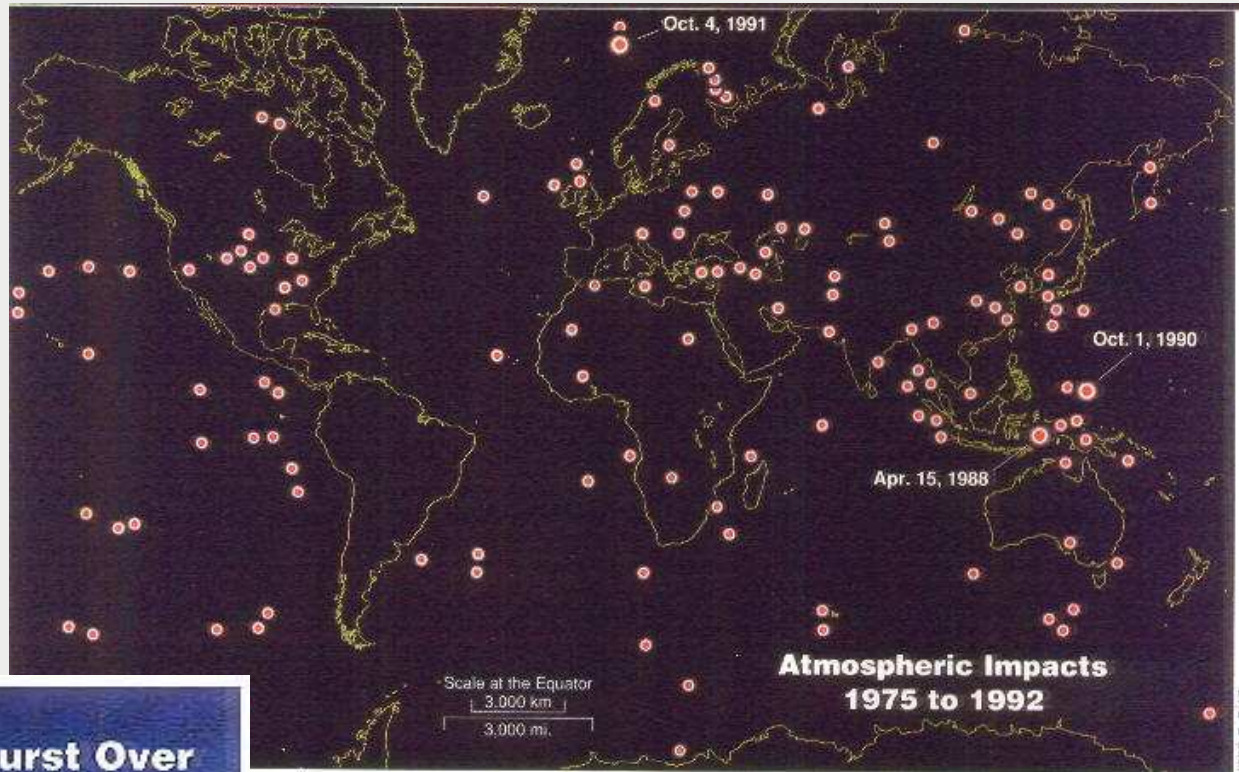
ISR Charków



Radio-observatorium Jicamarca

UHF Eiscat

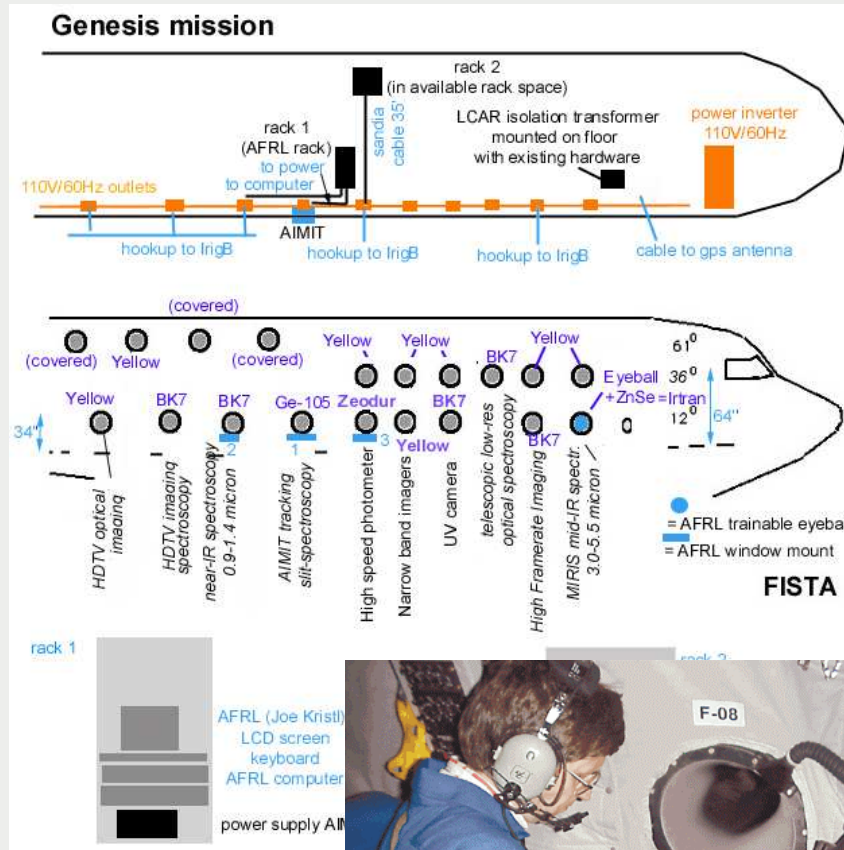




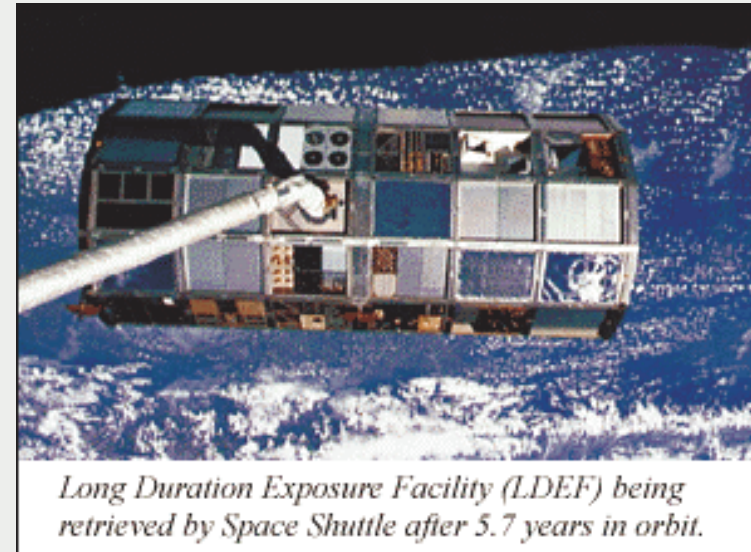
## Obserwacje satelitarne bolidów

# The Future of Meteor Detections (INVITED REVIEW)

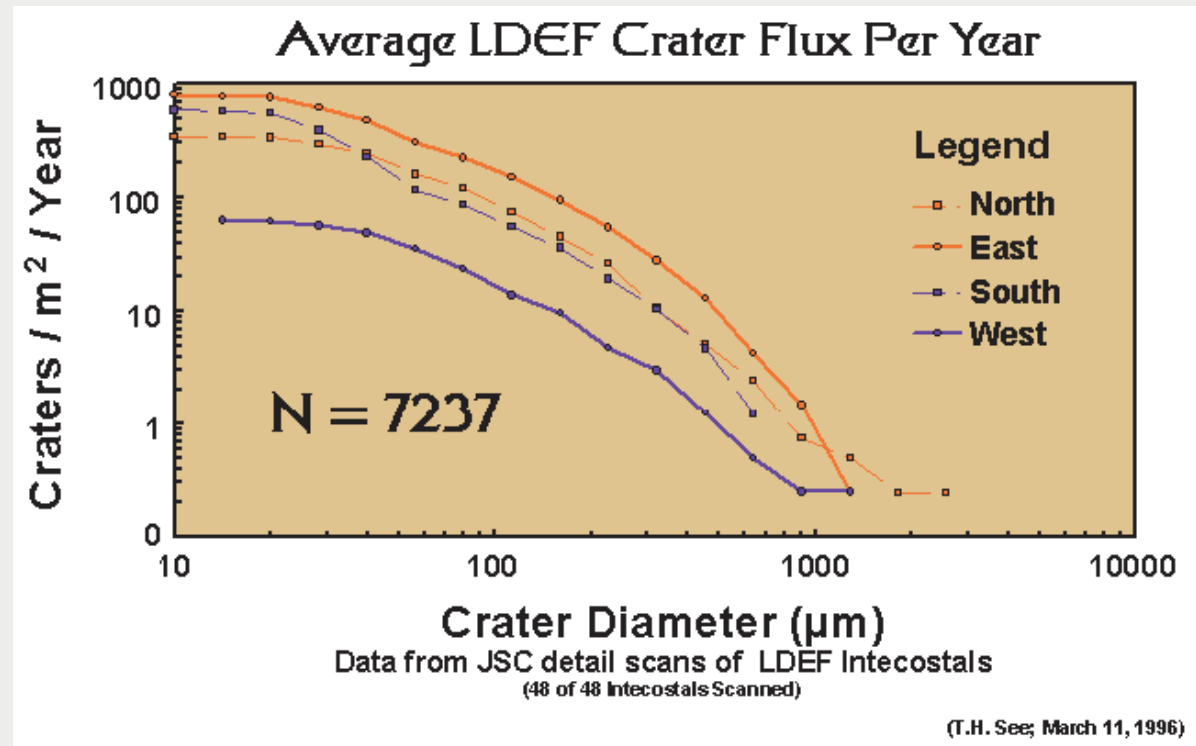
P.Jenniskens



# Śmieci w przestrzeni kosmicznej



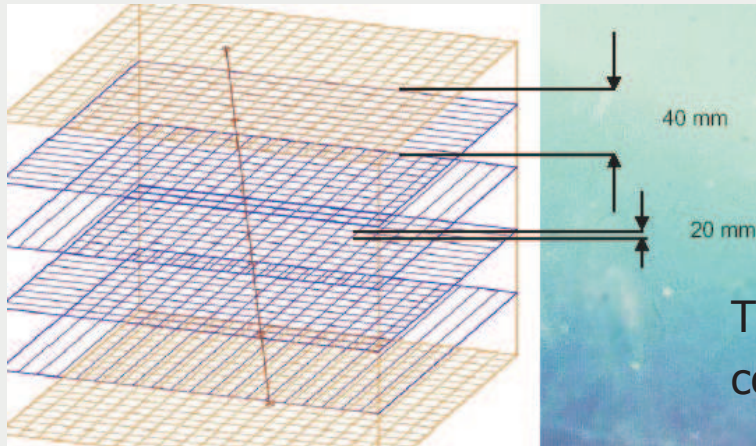
*Long Duration Exposure Facility (LDEF) being retrieved by Space Shuttle after 5.7 years in orbit.*



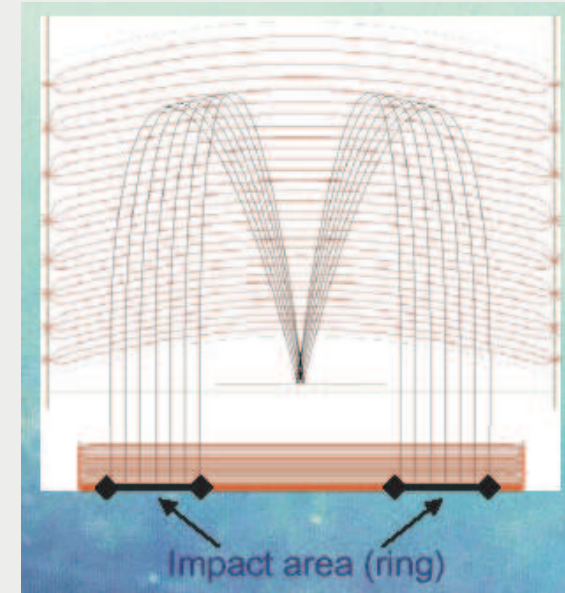
**E. Gruen**, R. Srama, M. Rachev, A. Srowig, D. Harris,  
T. Conlon, S. Auer



**Dust Telescope**  
Combination of a **Dust Trajectory Sensor** and a  
**Chemical Composition Analyzer.**



Trajectory sensor  
configuration



Impact mass analyzer

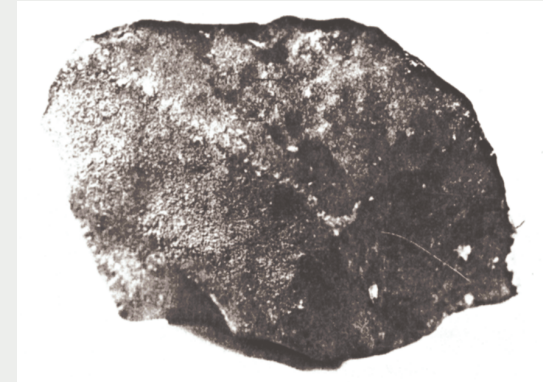
**Obserwowane bazowo (fot. wideo) spadki meteorytów:**



**Pribram H4 (1959)**



**Lost City H5 (1970)**



**Innisfree L4-L5 (1977)**



**Peekskill H6 (1994)**



**Moravka H5-H6 (2000)**



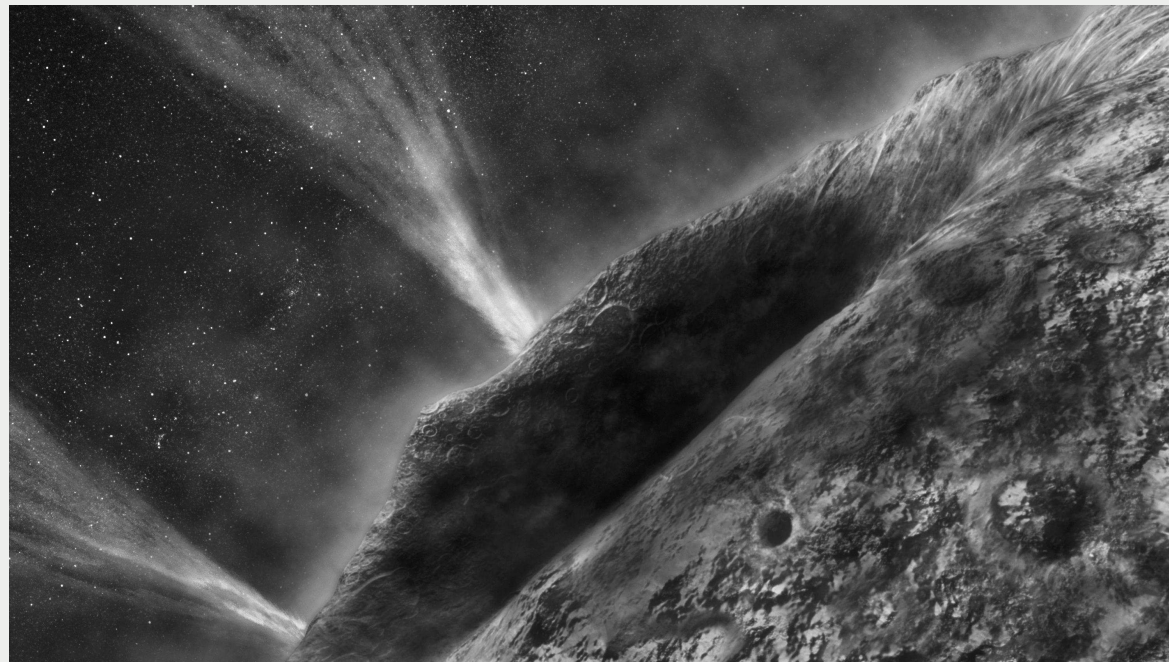
**Neuschwanstein EL6 (2002)**



## IAU Meteor Data Center, Lund-Bratislava

Rodzaj tech. obserwacji	Liczba orbit
M. radiowe	65 000
M. fotograficzne	5000
M. TV	2000

# Pochodzenie meteoroidów



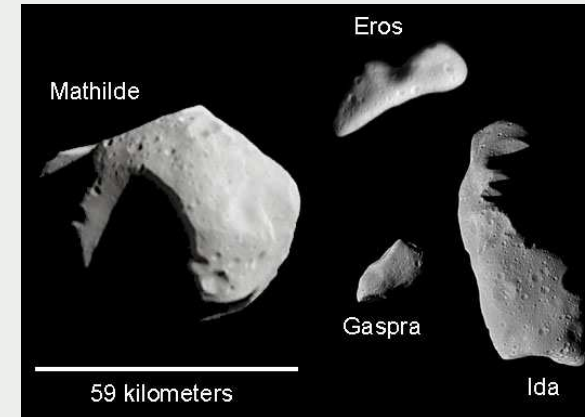
# Pochodzenie meteoroidów



P Halley



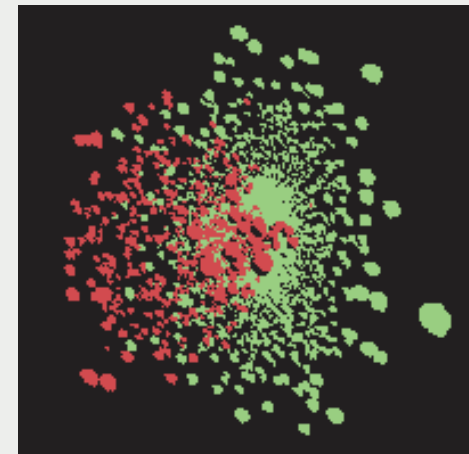
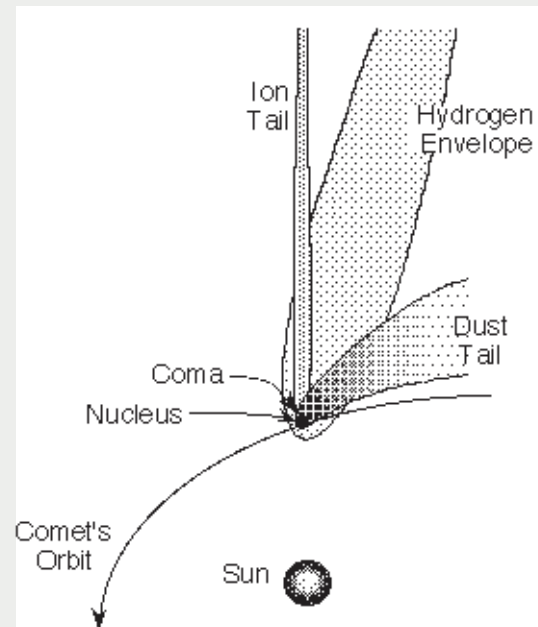
Rozpad komety Linear C/1999 S4  
 $\Delta V = [0-50 \text{ m/sek}]$



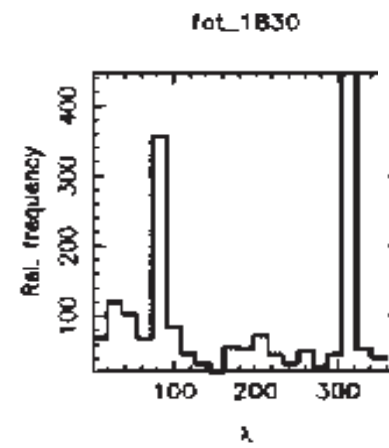
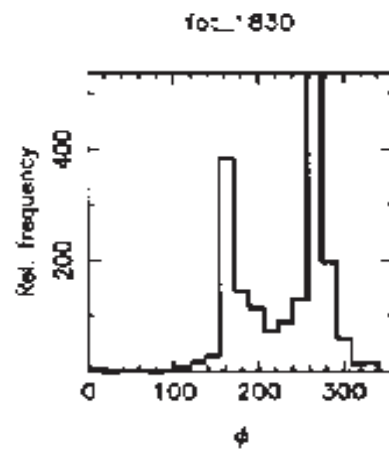
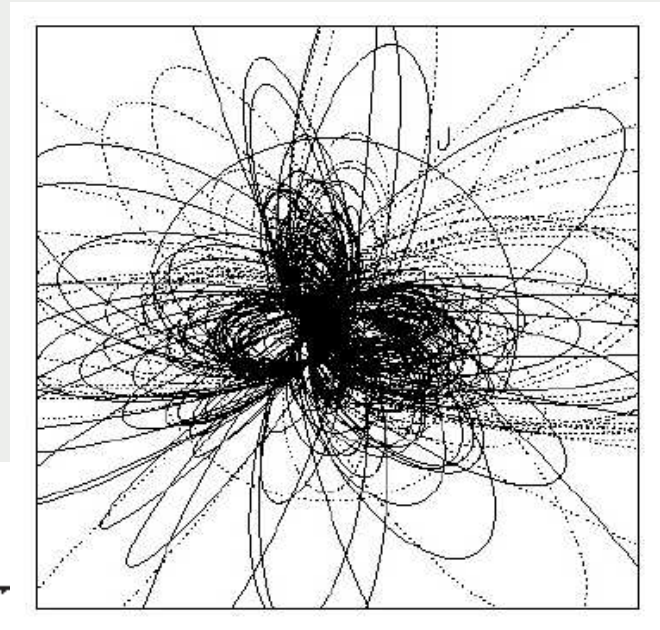
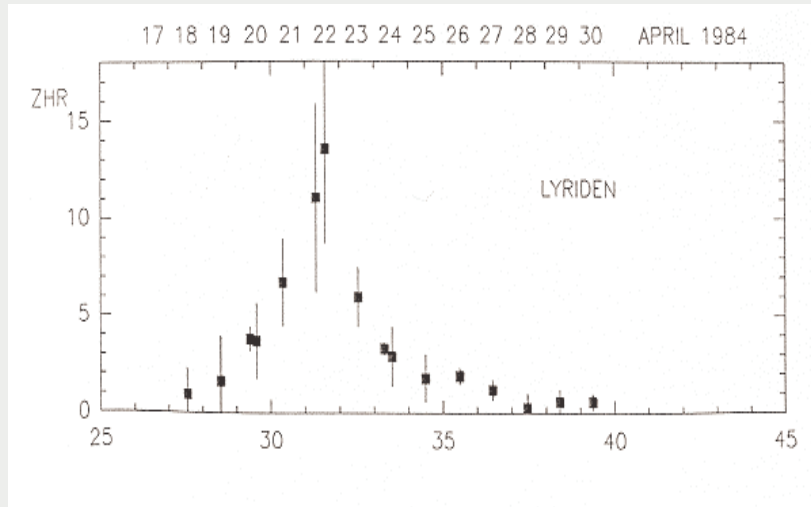
Ilustracja kolizji 2 planetkek  
 $\Delta V = [0-200 \text{ m/sek}]$



P Wild 2



## Meteory sporadyczne i strumieniowe



## Wyszukiwanie strumieni meteoroidowych

- Oszacowanie podobieństwa parametrów dynamicznych meteoroidów

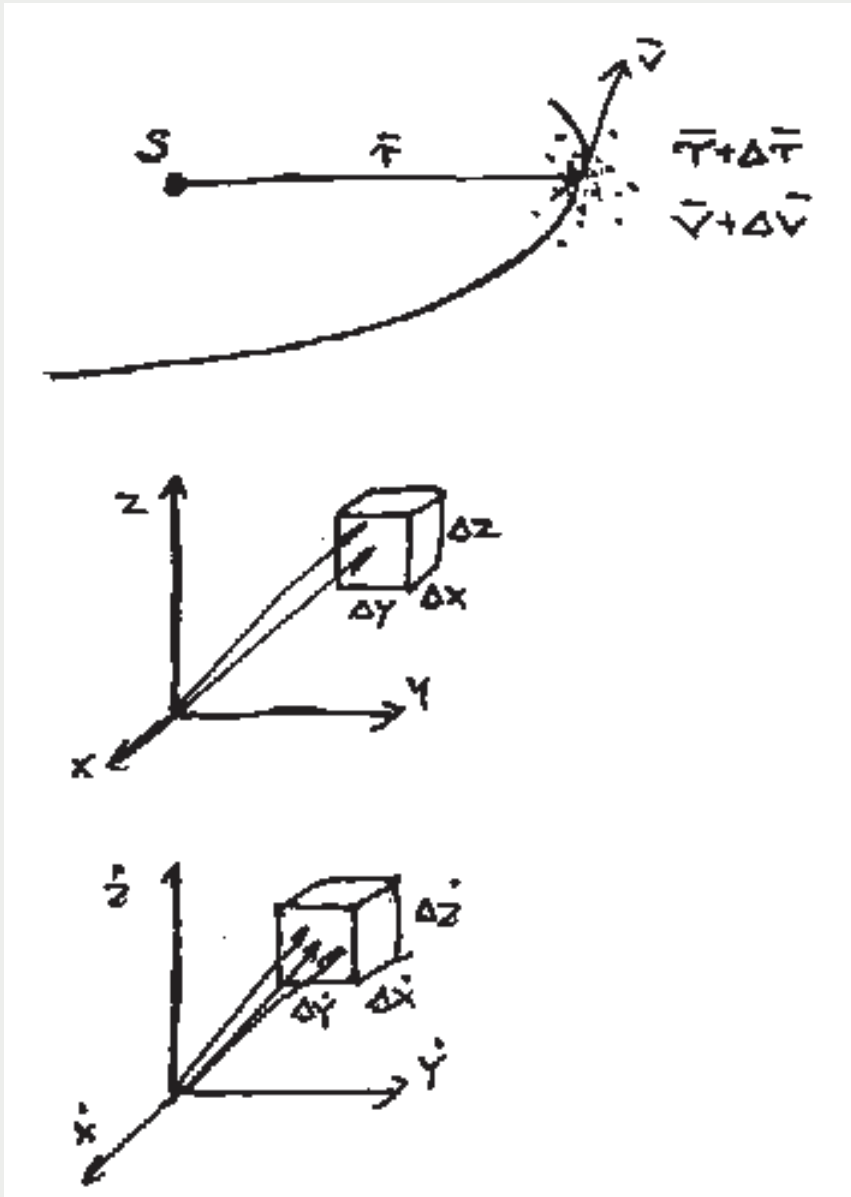
$$M_i = \{p_1, p_2, \dots\}$$

$$D_{12} = F(M_1, M_2)$$

- Ustalenie wartości progowej podobieństwa  $D_k$

$$D_{12} < D_k$$

- Analiza skupień – wyszukanie grup meteoroidów, strumieni



## Powstanie strumienia meteoroidów

Faza I, rój meteoroidów



$$M_i = \{ \vec{r}_i, \vec{v}_i \}$$

$$D_{12} = F(M_1, M_2)$$

## Powstanie strumienia meteoroidów cd.

$$\Delta V = 10 \text{ [m/s]}$$

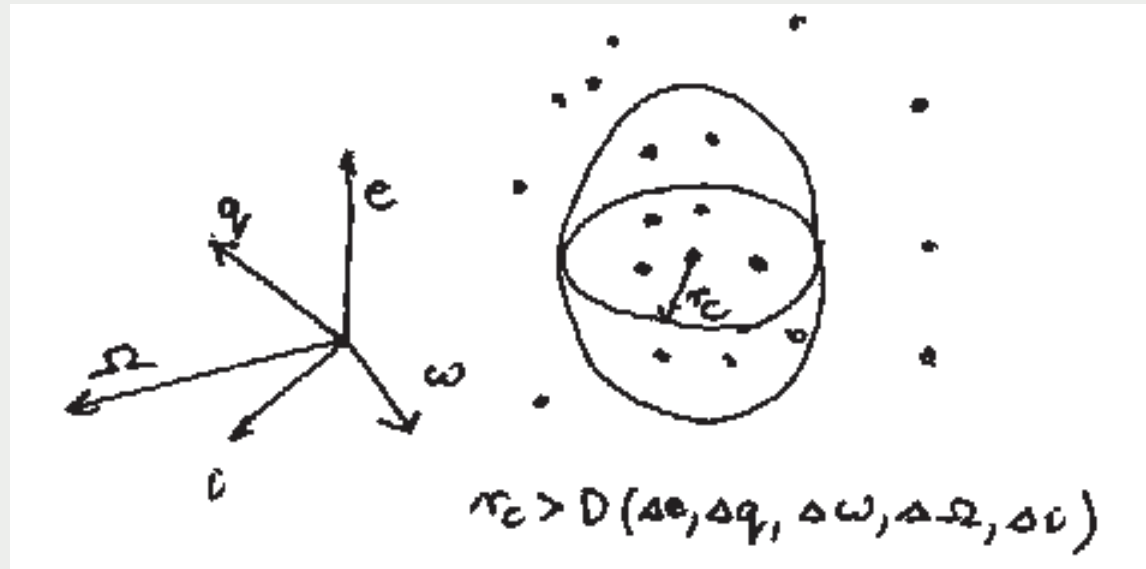
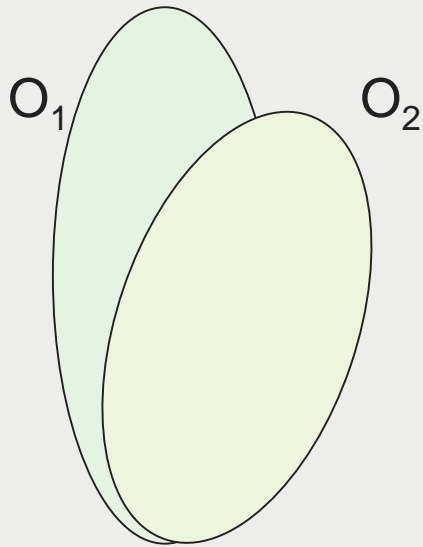
$$\Delta P \approx 0.5P$$

Faza II, strumień

Strumień	a [AU]	q [AU]	L. obiegów
Geminidy	1.4	0.14	96
Drakonidy	3.5	1.00	108
Leonidy	10.3	0.99	35
Orionidy	18	0.59	15
Lirydy	56	0.92	6
Aurygidy	153	0.68	2



## Faza II: strumień meteoroidów



Podobieństwo  
orbitalne

$$O_1 = \{ e, q, \omega, \Omega, i \}_1$$

$$O_2 = \{ e, q, \omega, \Omega, i \}_2$$

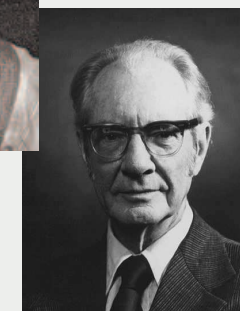
$$D_{12} = F(O_1, O_2)$$

$$D_{12} \leq D_p$$



## Parametry wybranych strumieni meteoroidowych i ich ciał macierzystych

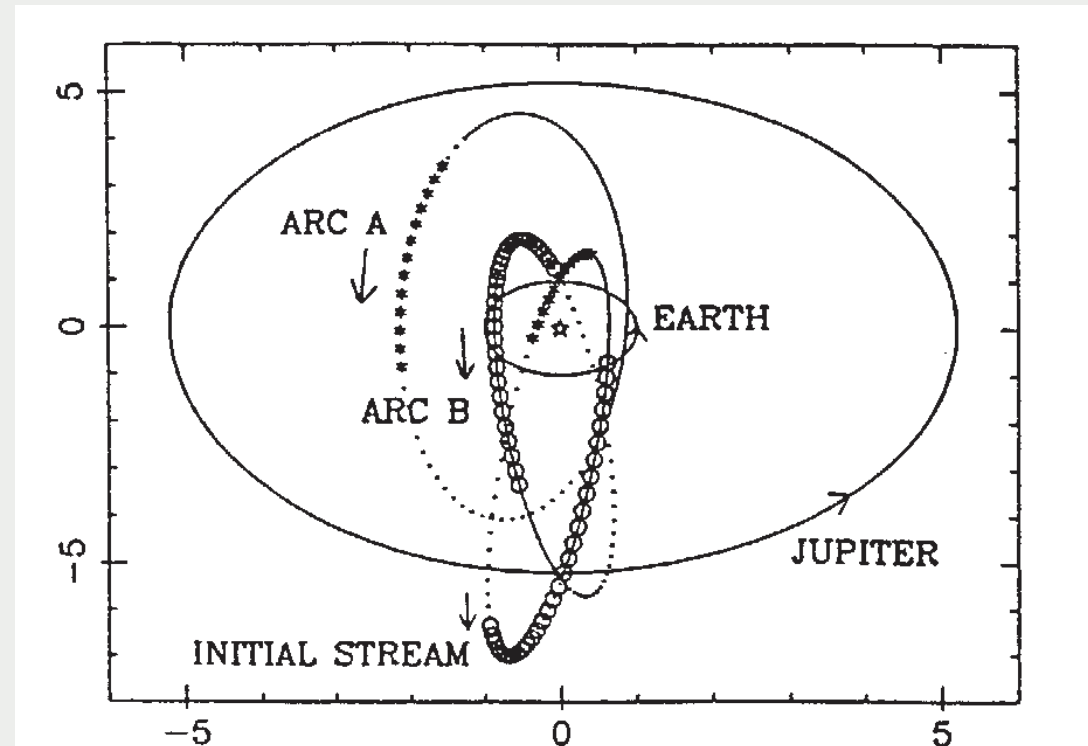
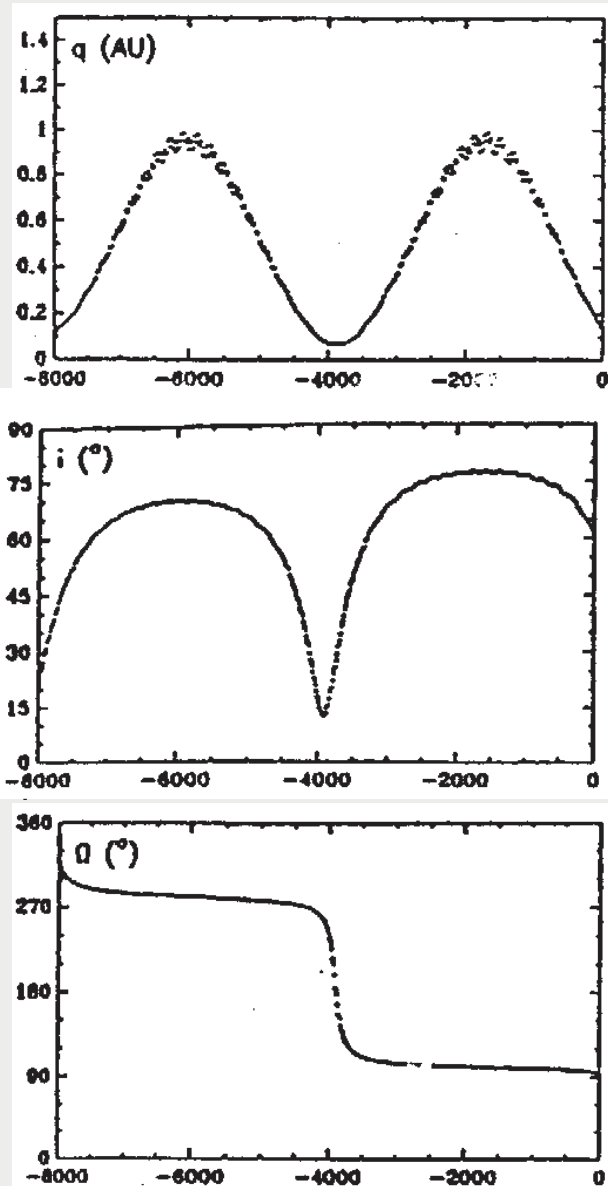
Lp	Nazwa	M D	e	q	$\omega$	$\Omega$	i
1	Perseidy	8-11	0.973	0.948	151	138	113
	P/Swift-Tuttle		0.960	0.963	153	139	114
2	Orionidy	10-22	0.987	0.582	81	28	164
	1P/Halley		0.967	0.587	93	35	164
3	Leonidy	11-17	0.928	0.985	173	235	163
	P/Tempell-Tuttle		0.904	0.982	173	234	163
4	Lirydy	4-22	1.003	0.921	214	32	80
	Thatcher		0.983	0.921	213	3	80
5	Drakonidy	9-29	0.743	.991	188	185	23
	P/Giacobini-Zinner		0.717	0.94	172	96	31
6	Pd Taurydy	10-21	0.821	0.328	19	28	6
	Pn Taurydy	11-4	0.849	0.33	297	221	3
	2P/Encke		0.846	0.341	186	335	12
7	Geminidy	12-13	0.887	0.140	324	261	24
	Pheathon 1983 TB		0.890	0.139	322	265	22



## Lista najbardziej aktywnych strumieni meteorowych

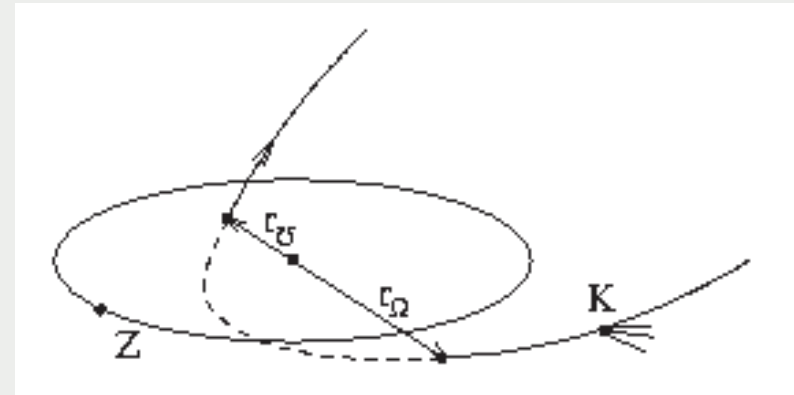
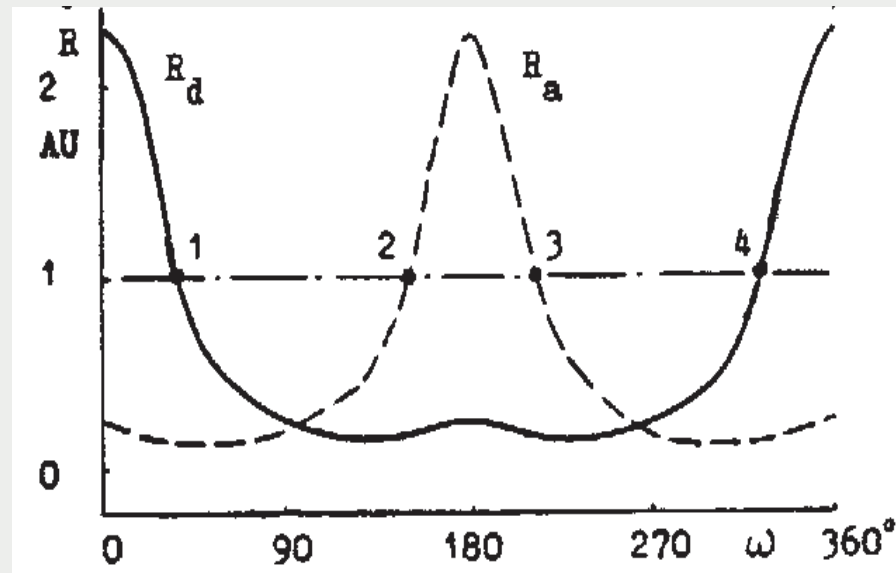
Nazwa	Aktywność	Radiant	V km/s	ZHR	Pochodzenie
Kwadrantydy	Sty. 01 - 05	230 +49	41	120	?
Liridy	Kwi. 16 - 25	271 +34	49	15	C/Tatcher
η-Akwarydy	Kwi. 19 – Maj 28	338 -01	66	50	1P/Halley
Pd-δ Akwarydy	Lip. 12 – Sie. 19	339 -16	41	20	?
Pn- δ Akwarydy	Lip. 15 – Sie. 25	335 -05	42	4	?
Perseidy	Lip. 17 – Sie. 24	46 +58	59	140	109P/Swift-Tuttle
Orionidy	Paź. 02 – Lis. 07	95 +16	66	20	1P/Halley
Leonidy	Lis. 14 - 21	153 +22	71	100	55P/Tempel-Tuttle
Geminidy	Gru. 07 - 17	112 +33	35	120	3200 Pheathon

## Ewolucja orbit małych ciał na długich interwałach czasu



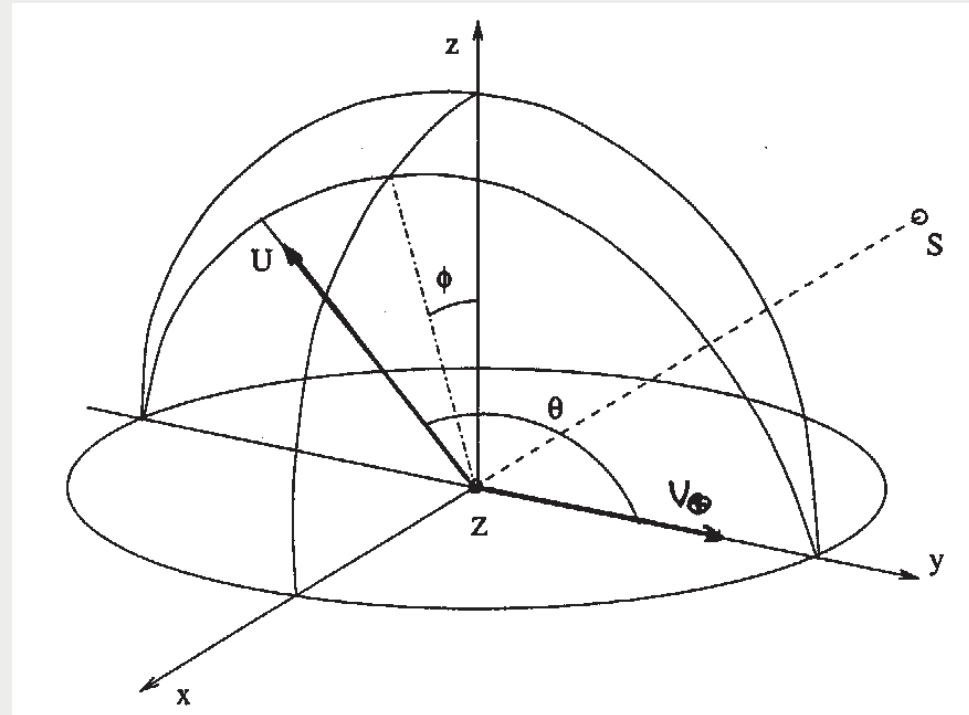
© Scholl, Froeschle

## Zmiany długości i odległości węzła orbit małych ciał



© Babadżanow, Obruchow

## Podobieństwo meteoroidów, zmienne geocentryczne



$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \cdot \sin \theta \sin \phi \\ U \cdot \cos \theta \\ U \cdot \sin \theta \cos \phi \end{bmatrix} = r(\lambda) \cdot p(\epsilon) \cdot \frac{V_G}{29.7} \cdot \begin{bmatrix} -\cos \delta_G \cos \alpha_G \\ -\cos \delta_G \sin \alpha_G \\ -\sin \delta_G \end{bmatrix}$$

$U, \theta$  quasi-niezmienniki dynamiczne

$$a = \text{const}$$

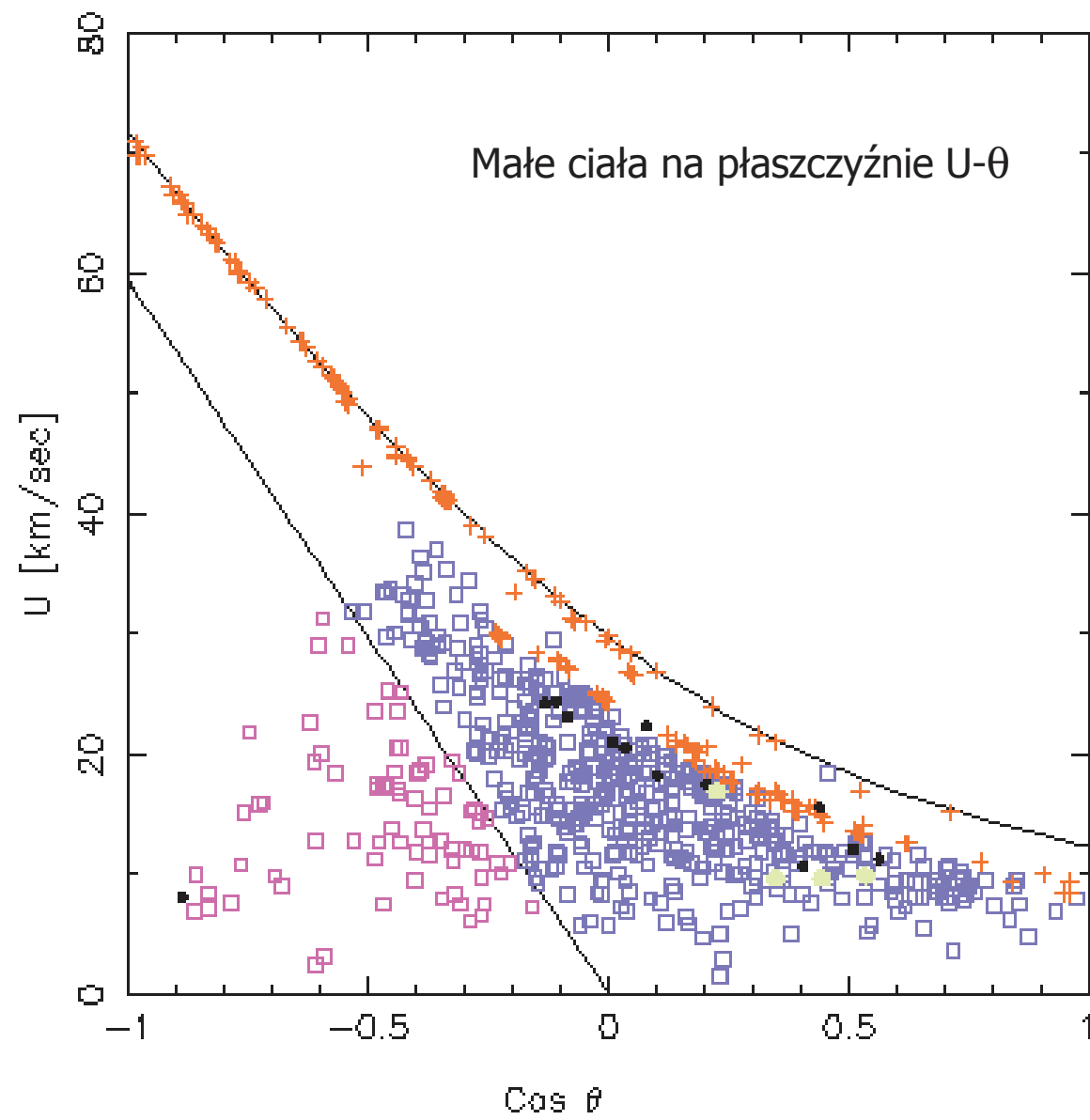
$$L_z = \sqrt{a(1-e)^2} \cos i = \text{const}$$

$$T = \frac{1}{a} + 2L_z$$

$$U = \sqrt{3 - T}$$

$$\cos \theta = \frac{1 - U^2 - a^{-1}}{2U}$$

T – stała Tisseranda,  
a – półosć wielka,  
e – mimośród,  
i – nachylenie orbity



## Lista najbardziej aktywnych strumieni meteorowych

Nazwa	Aktywność	Radiant	V km/s	ZHR	Pochodzenie
<b>Kwadrantydy</b>	Sty. 01 - 05	230 +49	41	120	<b>P/Machholtz</b>
Liridy	Kwi. 16 - 25	271 +34	49	15	C/Tatcher
η-Akwarydy	Kwi. 19 – Maj 28	338 -01	66	50	1P/Halley
<b>Pδ Akwarydy</b>	Lip. 12 – Sie. 19	339 -16	41	20	<b>P/Machholtz</b>
<b>Pn-δ Akwarydy</b>	Lip. 15 – Sie. 25	335 -05	42	4	<b>P/Machholtz</b>
Perseidy	Lip. 17 – Sie. 24	46 +58	59	140	109P/Swift-Tuttle
Orionidy	Paź. 02 – Lis. 07	95 +16	66	20	1P/Halley
Leonidy	Lis. 14 - 21	153 +22	71	100	55P/Tempel-Tuttle
Geminidy	Gru. 07 - 17	112 +33	35	120	3200 Pheathon



# Rodzina strumieni meteorowych

Kwadrantydy oraz Pn. i Pd.  $\delta$  Akwarydy

