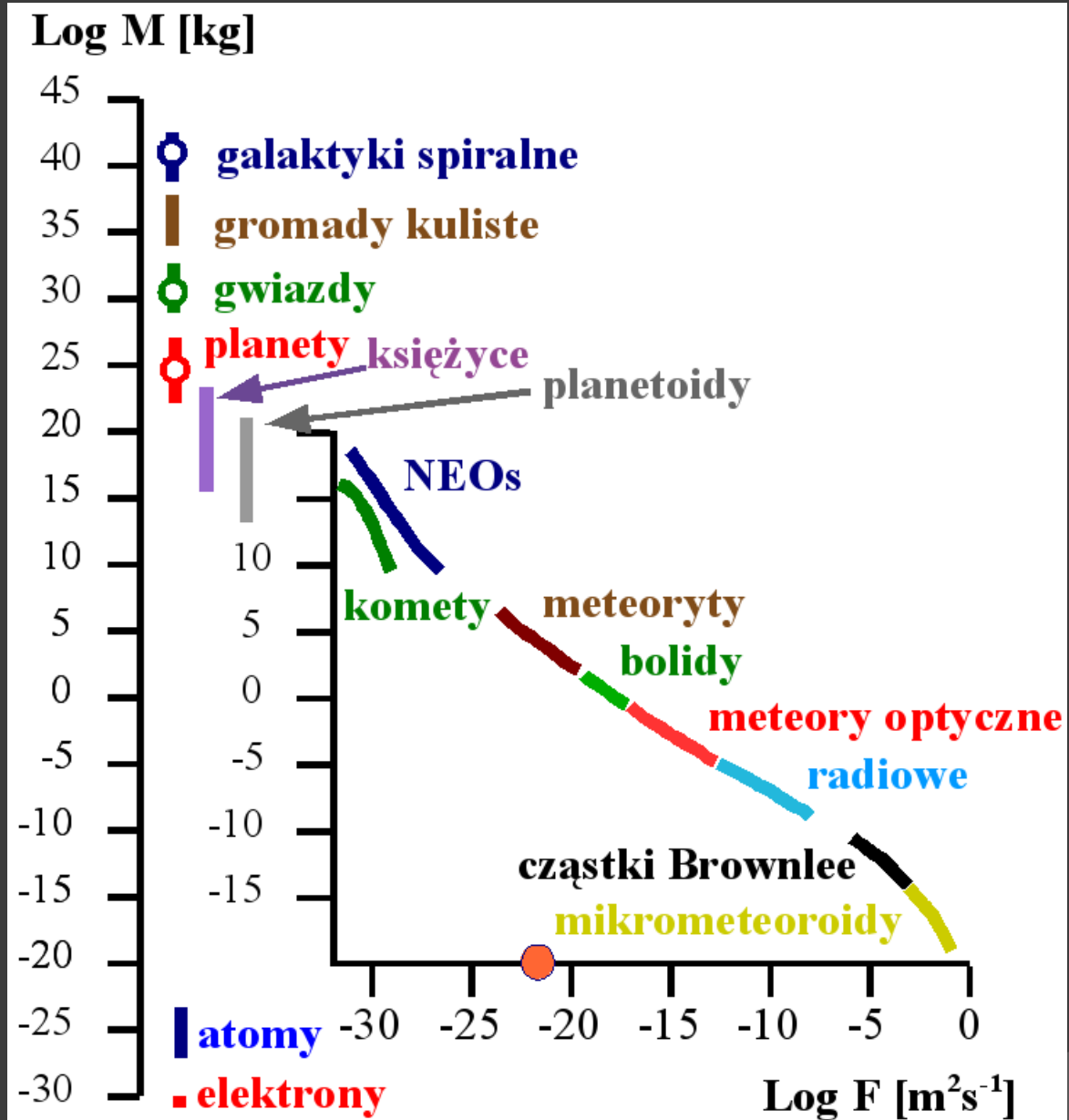


Powstanie, ewolucja, wyszukiwanie strumieni meteoroidowych

Tadeusz J. Jopek
Obserwatorium Astronomiczne
UAM





$$10^?$$



$$10^0=1$$



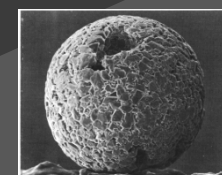
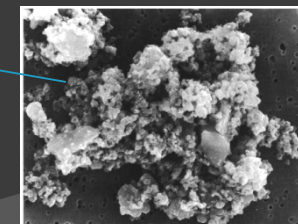
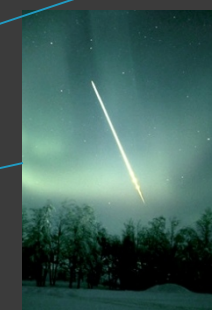
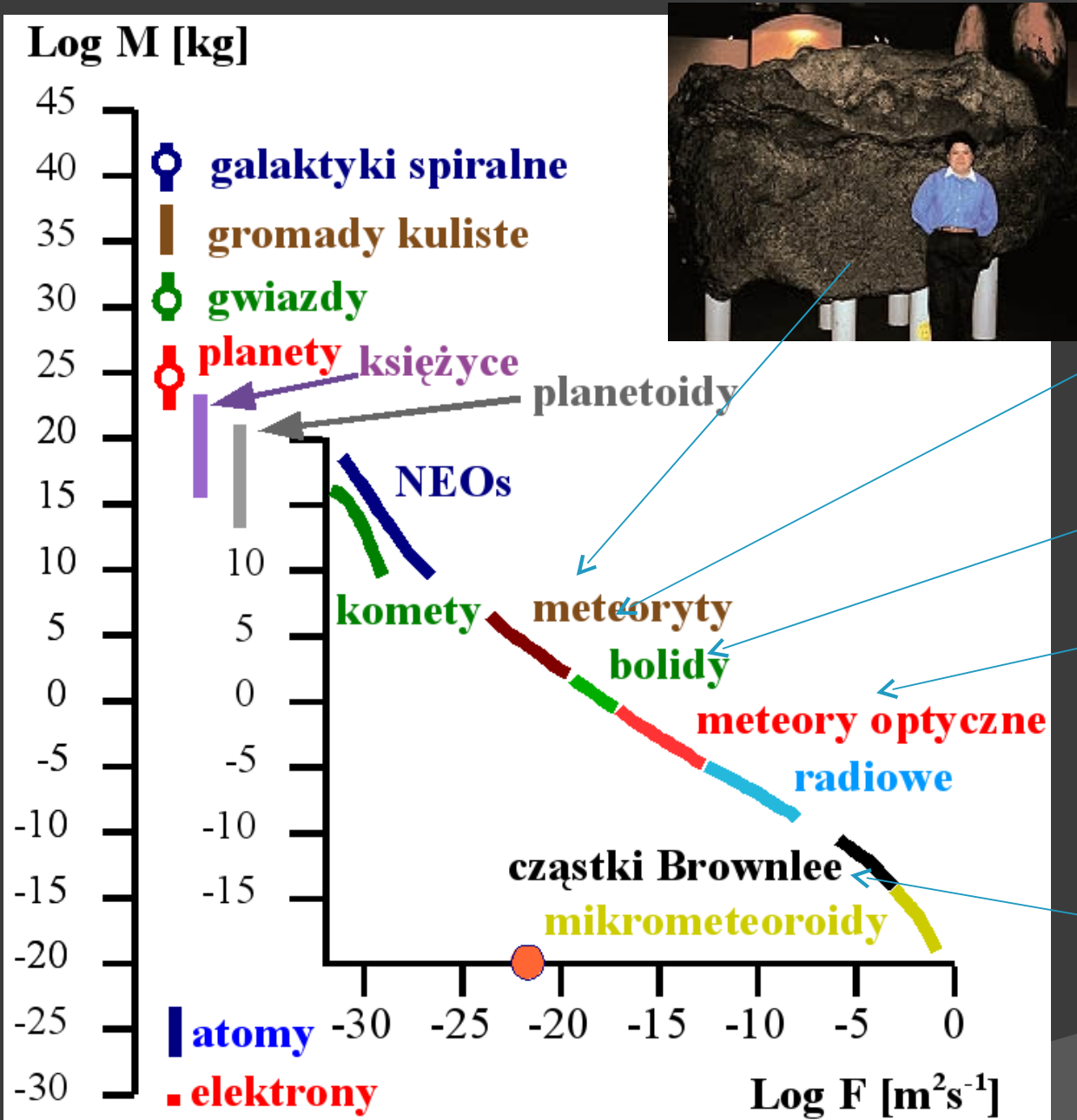
$$10^1=10$$



$$10^2=100$$



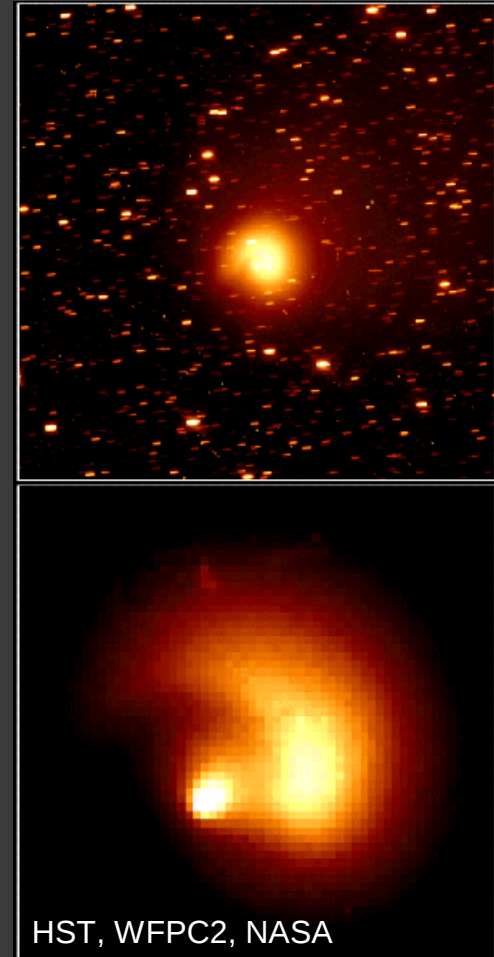
$$\sim 10^3=1000$$



Powstawanie meteoroidów



Wyrzut z powierzchni komety,
częsty i regularny mechanizm.



Fizyka wyrzutu materii kometarnej

Bilans energii

$$E_S = E_U$$

$$E_S = E_{\text{Radi}} + E_{\text{Subli}} + E_{\text{Przewo}}$$

Fizyka wyrzutu materii kometarnej

Siły działające na meteoroid

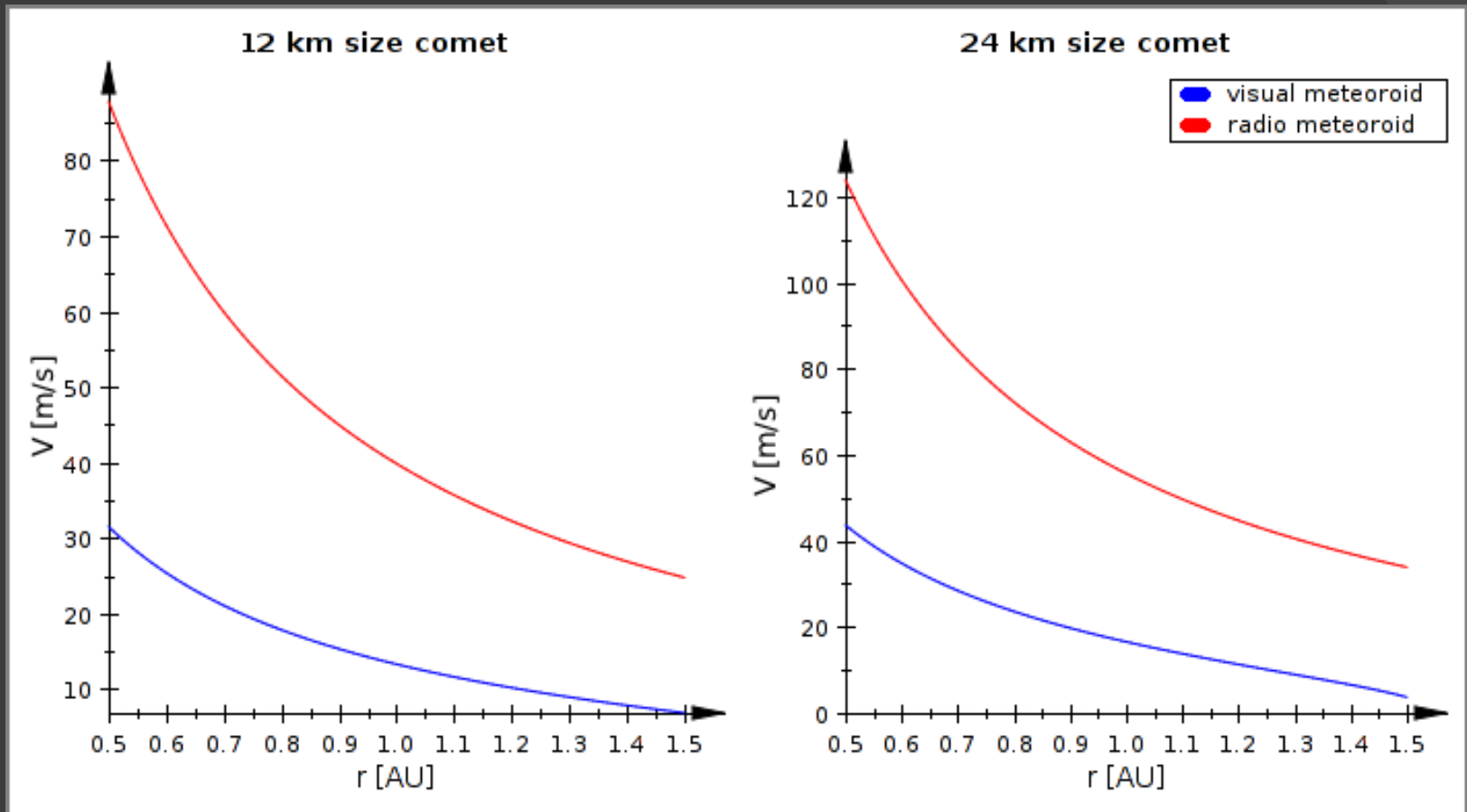
$$\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_{gc} + \mathbf{F}_{sp} + \mathbf{F}_{gs} \dots$$

Fizyka wyrzutu materii kometarnej

Formuła na szybkość wyrzutu meteoroidu, (m/sek)

$$V(R_c, R_m, r) = \sqrt{\frac{F}{r^2} \frac{\pi R_c}{nH} \left(\frac{8kT}{\pi m_0} \right)^{0.5} r^{-0.25} \frac{3\Gamma}{4\pi R_m \rho_m} - \frac{8}{3} \pi G R_c \rho_c}$$

Szybkości wyrzutu meteoroidów



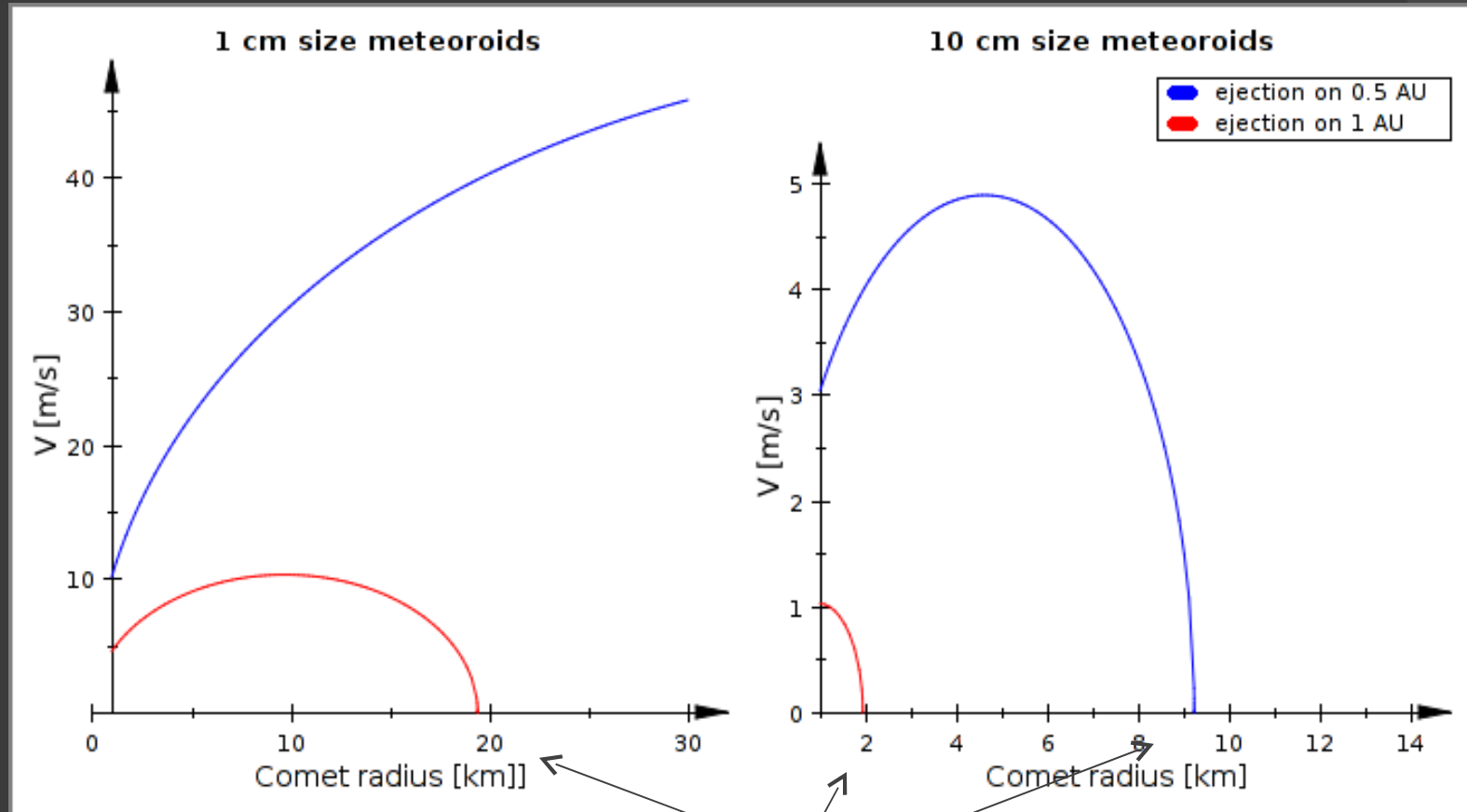
Fizyka wyrzutu materii kometarnej

Meteoroidy o dużych rozmiarach (dużych masach) nie mogą być wyrzucane z powierzchni komet !!

$$F_m = F_p - F_{gc}$$

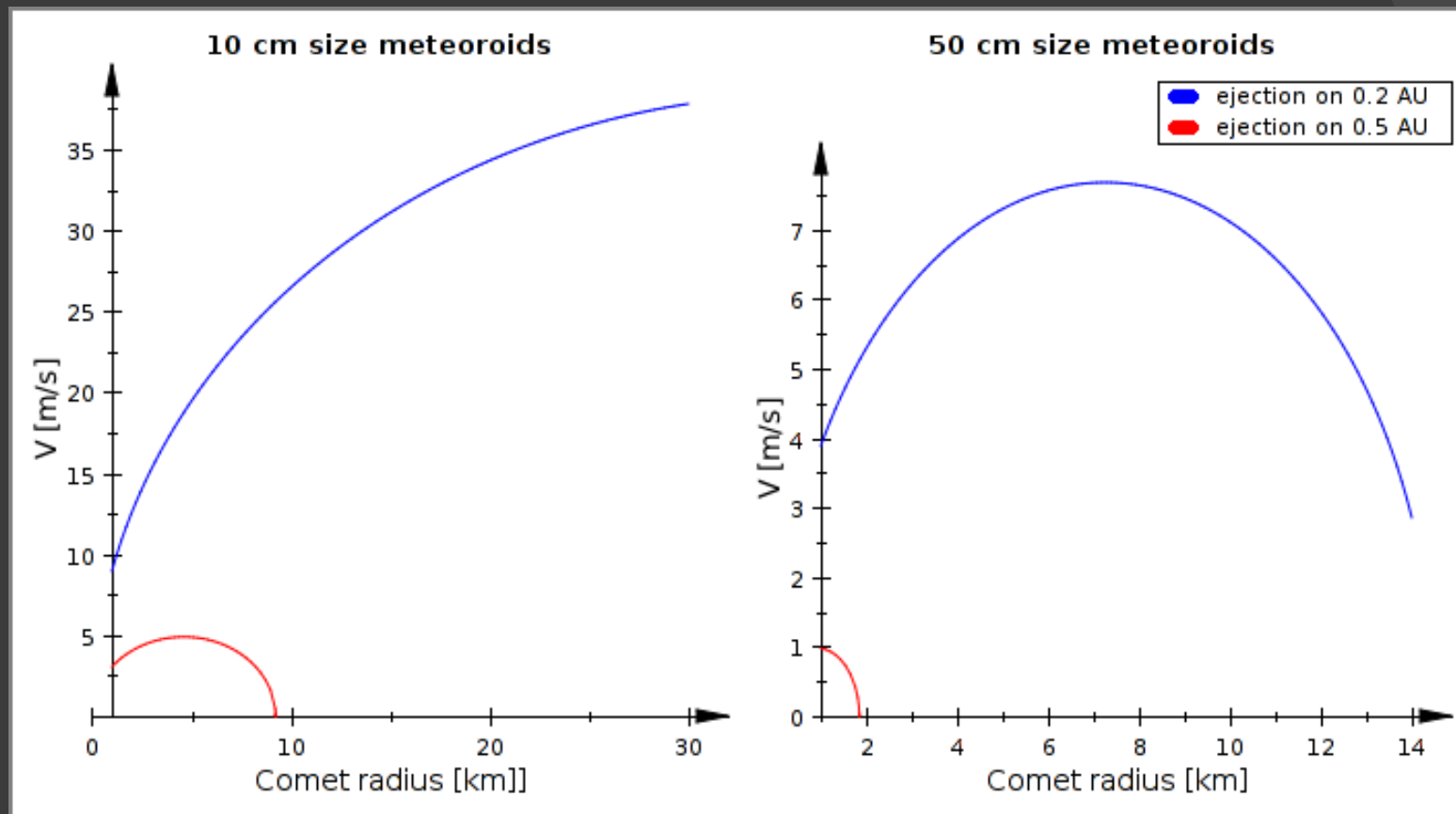
$$V(R_c, R_m, r) = \sqrt{\frac{F}{r^2} \frac{\pi R_c}{nH} \left(\frac{8kT}{\pi m_0} \right)^{0.5} r^{-0.25} \frac{3\Gamma}{4\pi R_m \rho_m} - \frac{8}{3} \pi G R_c \rho_c}$$

Szybkości wyrzutu meteoroidów



$$F_m = F_p - F_{gc}$$

Szybkości wyrzutu meteoroidów



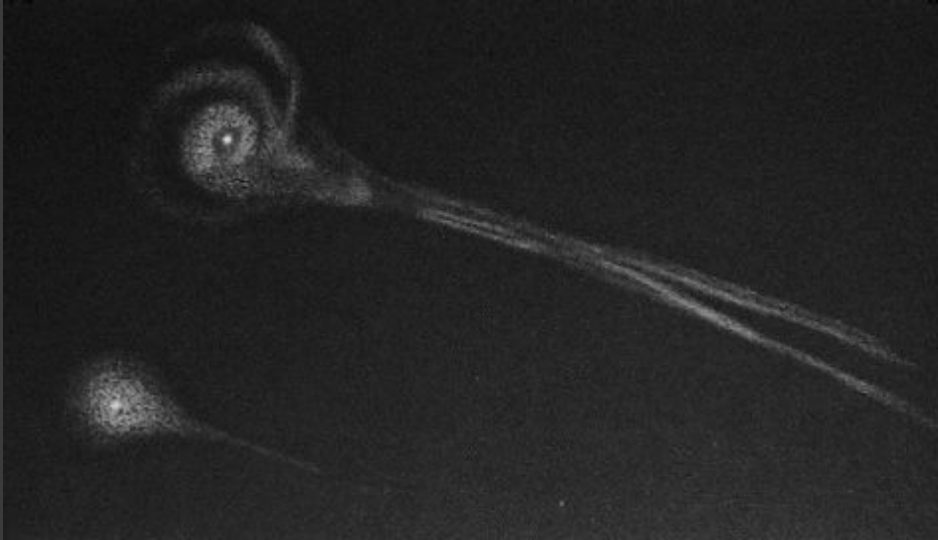
$$F_m = F_p - F_{gc}$$

Fizyka wyrzutu materii kometarnej

Formuła na szybkość wyrzutu meteoroidu, (m/sek)

$$V(R_c, R_m, r) = \sqrt{\frac{F}{r^2} \frac{\pi R_c}{nH} \left(\frac{8kT}{\pi m_0} \right)^{0.5} r^{-0.25} \frac{3\Gamma}{4\pi R_m \rho_m} - \frac{8}{3} \pi G R_c \rho_c}$$

Powstawanie meteoroidów



Rozpad komety 3D/Biela

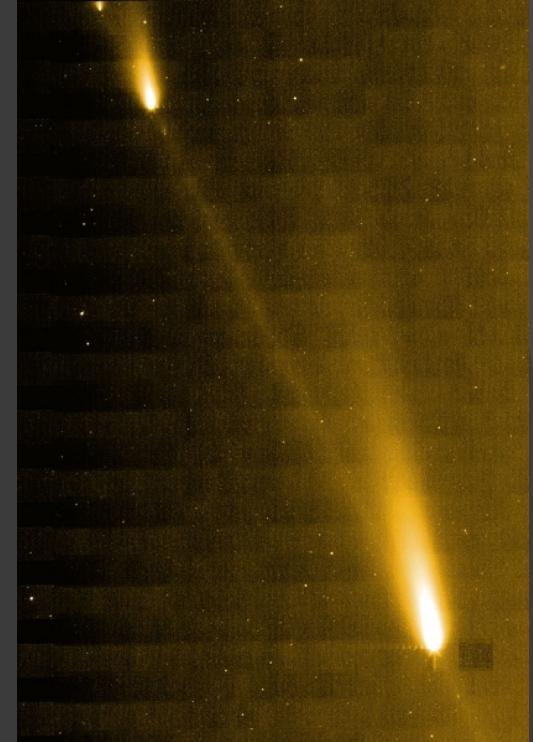
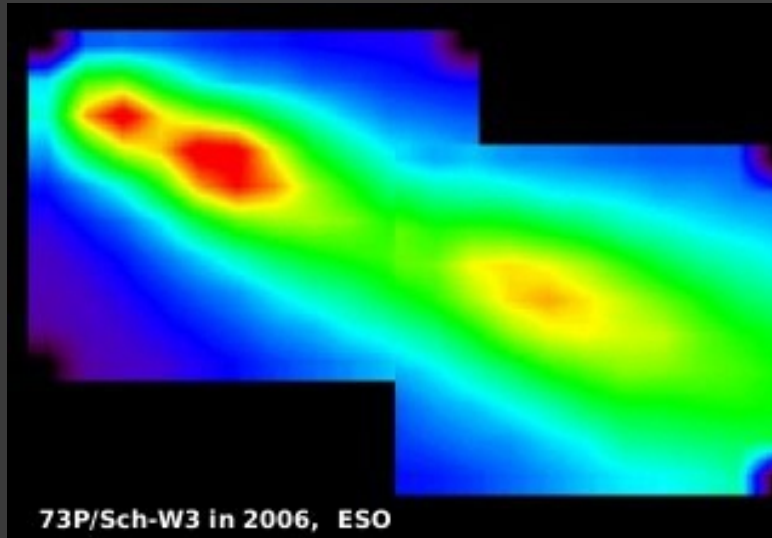


Powstawanie meteoroidów

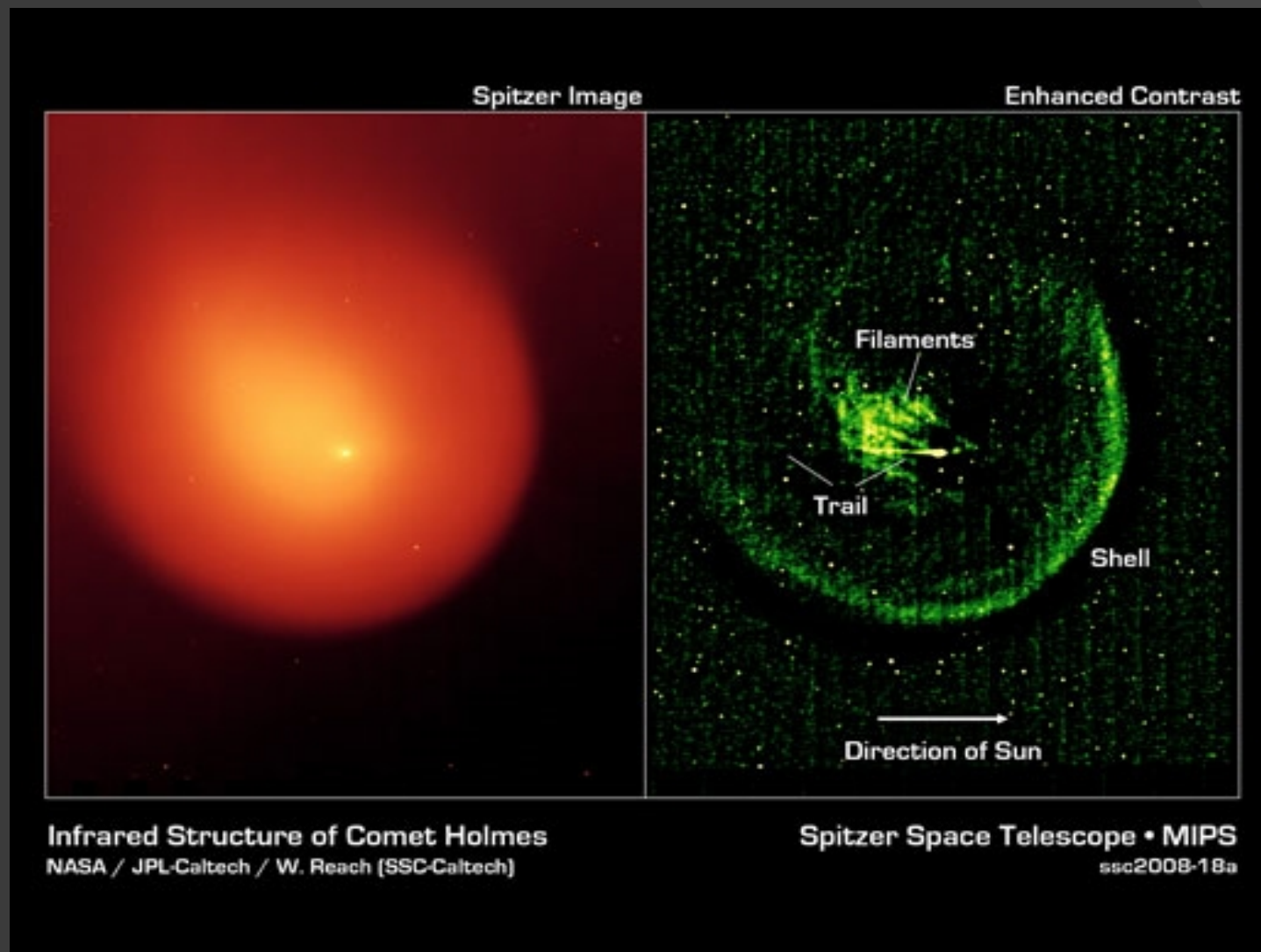


Wybuch komety
C/1999 S4

Powstawanie meteoroidów

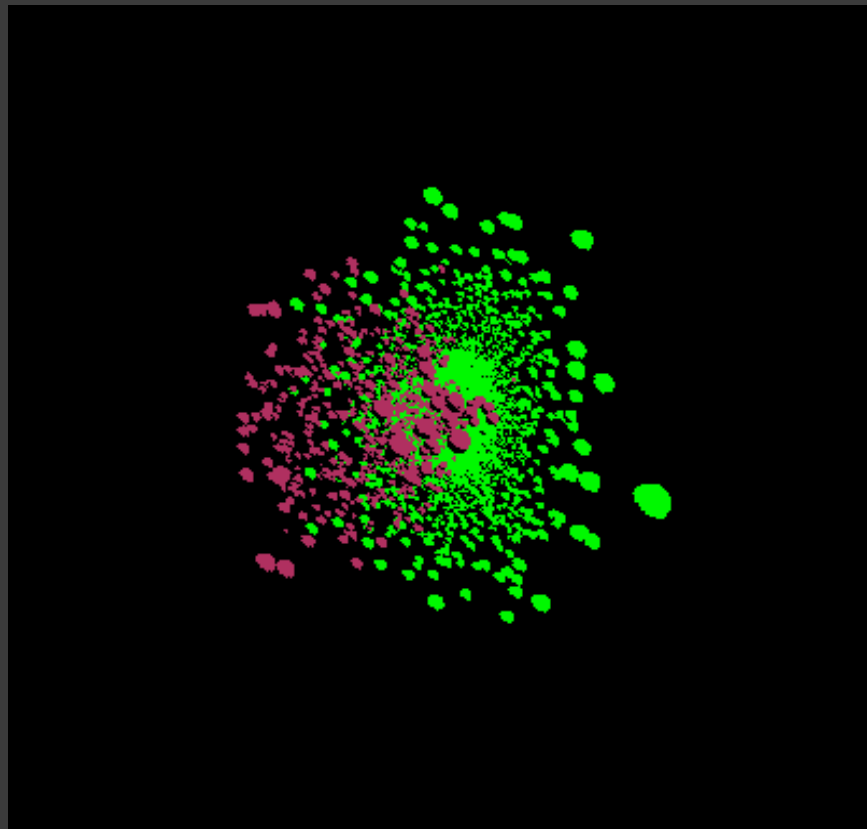


Rozpad komety
73P/Schwassman-Wachmann
roku 2006



Kometa 17P/Holmes obserwowana krótko po silnym wybuchu
w roku 2007

Powstawanie meteoroidów



Science P. Michel, P. Tanga

Katastroficzne zderzenia małych planet, komet, symulacja.

Powstawanie meteoroidów



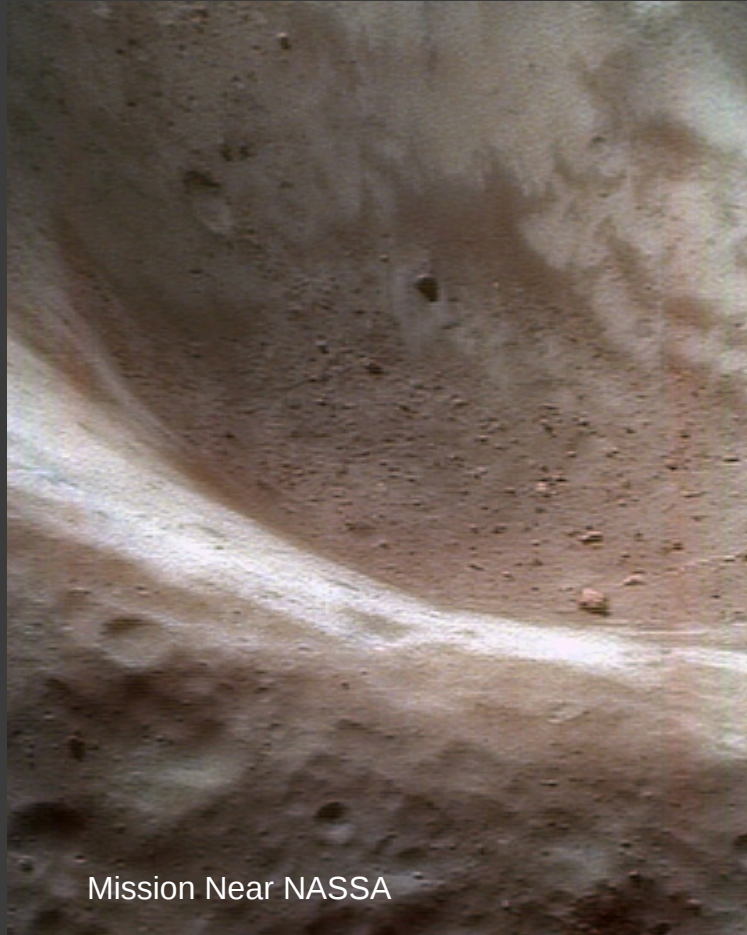
81P/Tempel (Stardust NASSA)



951 Gaspra (c Galileo NASSA)

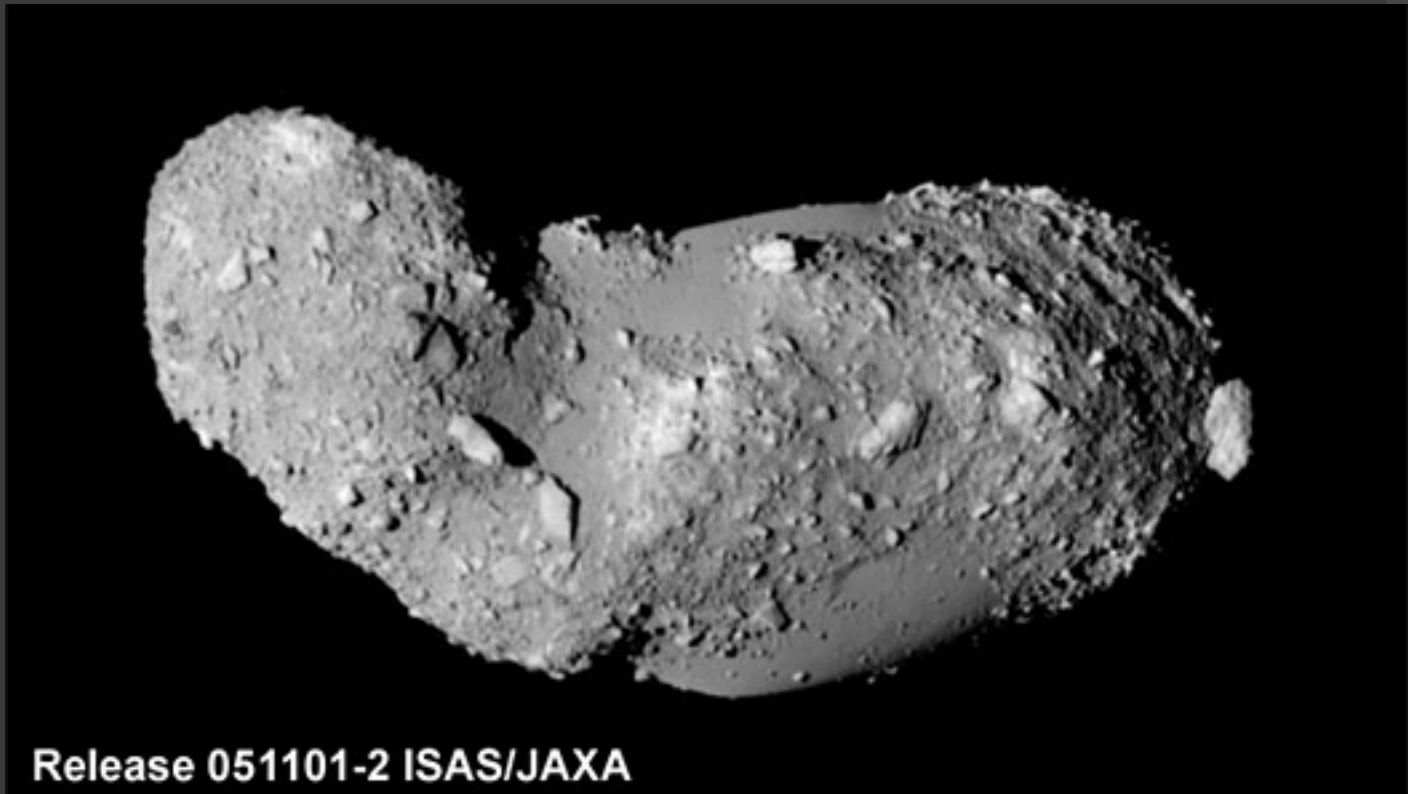
Kraterzy uderzeniowe na powierzchniach małych planet i komet

Ciasne zbliżenia komet, planetek z planetami



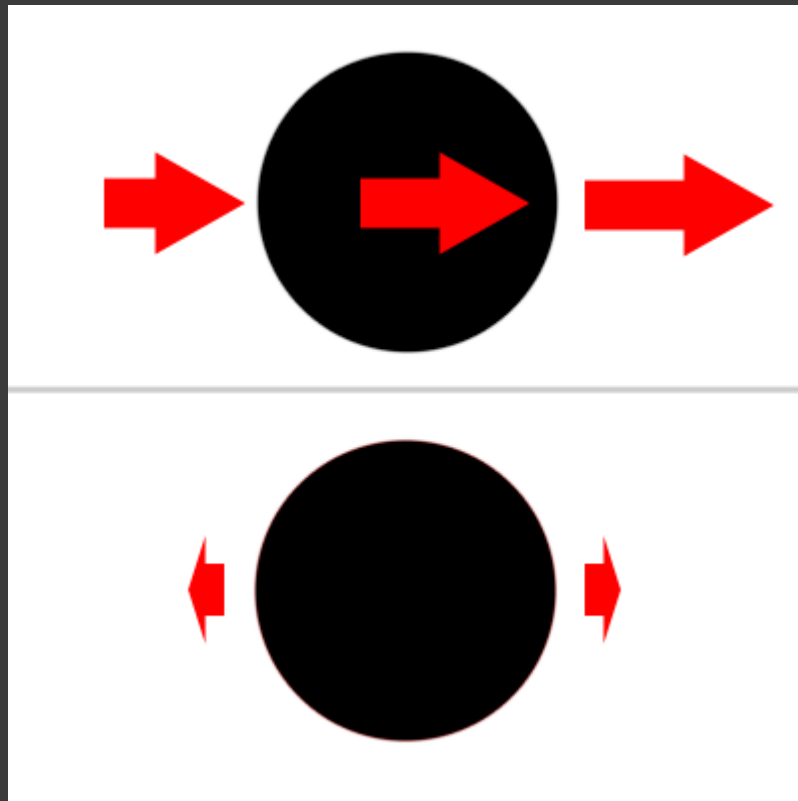
Regolit na powierzchni planetki
433 Eros

Ciasne zbliżenia komet, planetek z planetami



Powierzchnia planetki
25143 Itokawa

Fizyka ciasnego zbliżenia, efekt pływowy



Ciasne zbliżenia komet, planetek z planetami



Rozpad i zderzenia komety
Shoemaker Levi
z Jowiszem

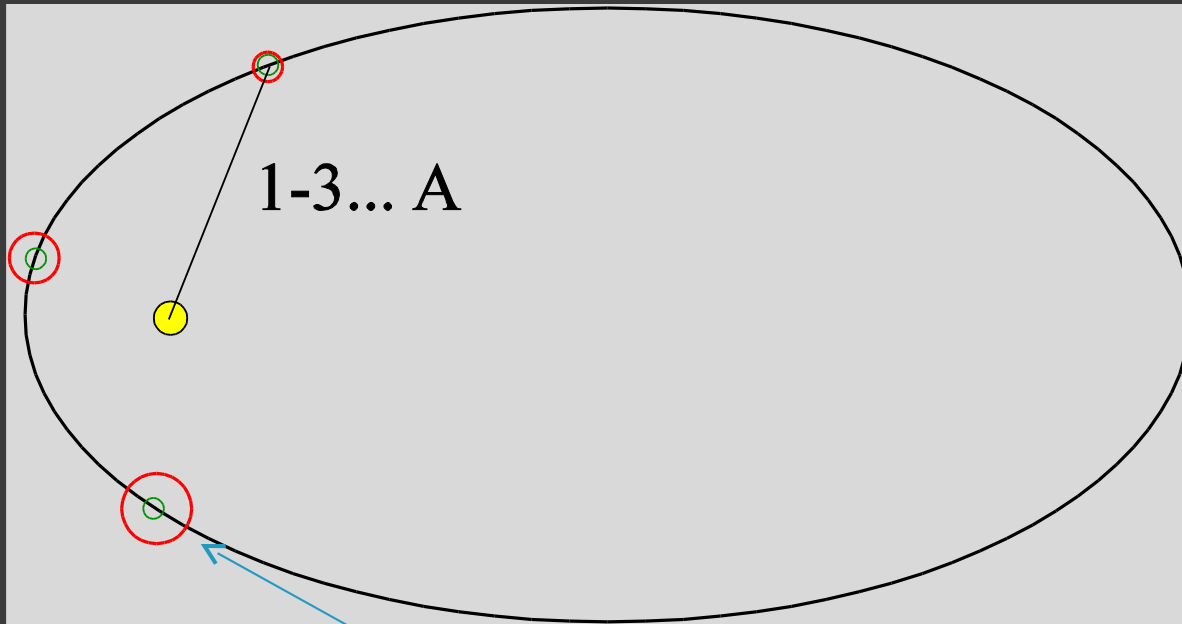
1994.06.16-22

Definicja strumienia meteoroidów

Strumień meteoroidów składa się z materiału:

- wyrzuconego z powierzchni komety,
- pozostałego po wybuchu, rozpadzie komety,
- uwolnionego w efekcie zderzeń komet i planetek (katastroficznych, kratero –twórczych),
- oddzielonego od ciała macierzystego po ciasnym zbliżeniu z planetami, (efekty pływowe).

Ewolucja strumienia meteoroidowego

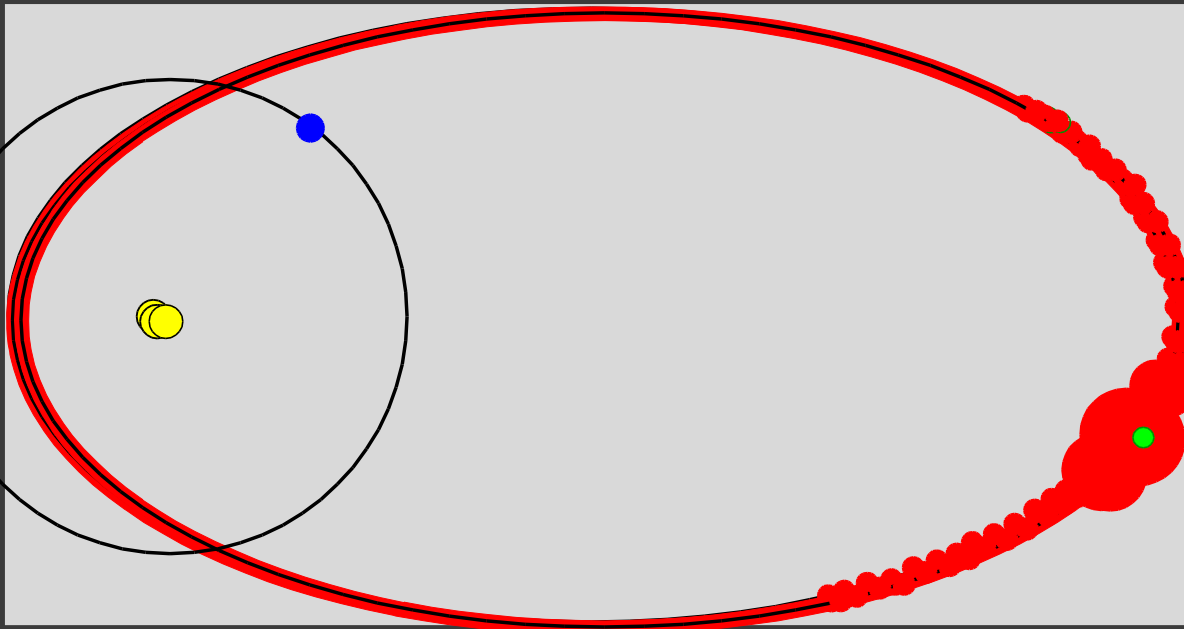


Faza I.
Rój meteoroidów

$$\mathbf{r}_m \approx \mathbf{r}_c; \quad \dot{\mathbf{r}}_m \approx \dot{\mathbf{r}}_c$$

Ewolucja strumienia meteoroidowego

Faza II.
Strumień **meteoroidów**



$$\mathbf{r}_m \neq \mathbf{r}_c; \quad \dot{\mathbf{r}}_m \neq \dot{\mathbf{r}}_c$$

Ewolucja strumienia meteoroidowego

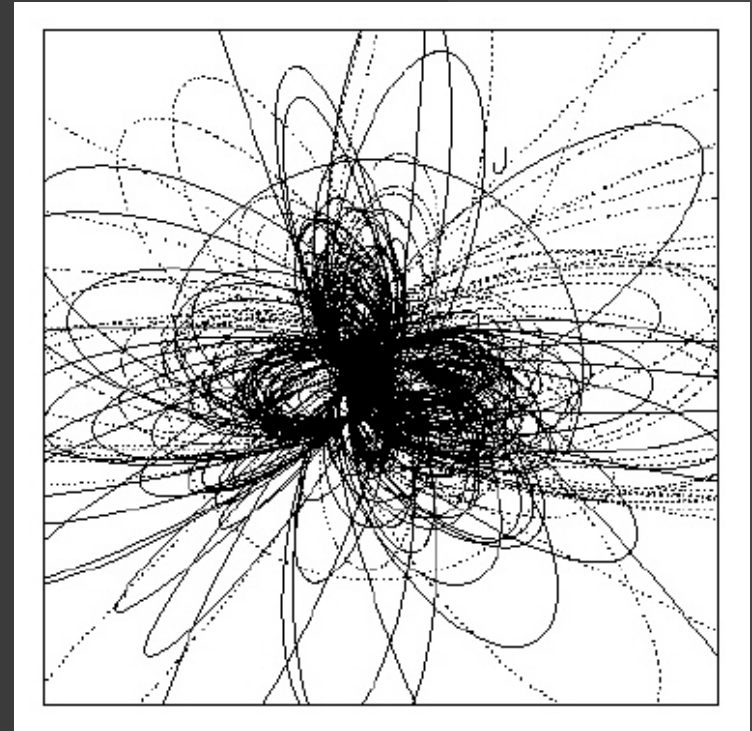
Faza II. Strumień **meteoroidów**. (Plavec 1954).

Strumień	a [AU]	q [AU]	P [y]	L.obrotów
Geminids	1.4	0.14	1.66	96
Draconids	3.5	1.0	6.55	108
Leonids	10.3	0.99	33.1	35
Orionids	18	0.59	76.4	15
Lyrids	56	0.92	419	6
Aurigids	153	0.68	1983	2

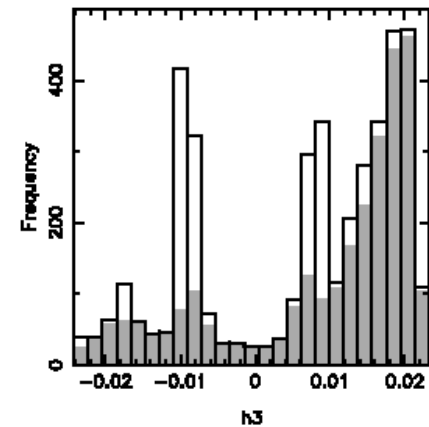
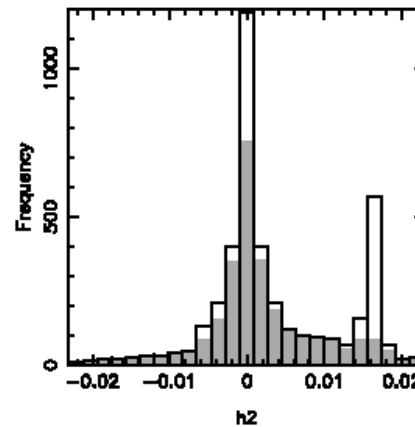
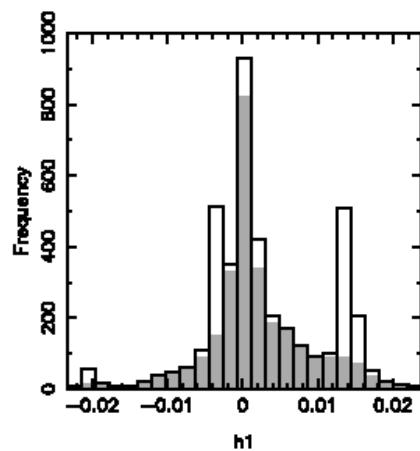
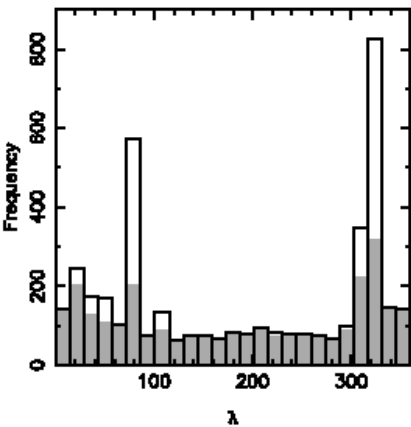
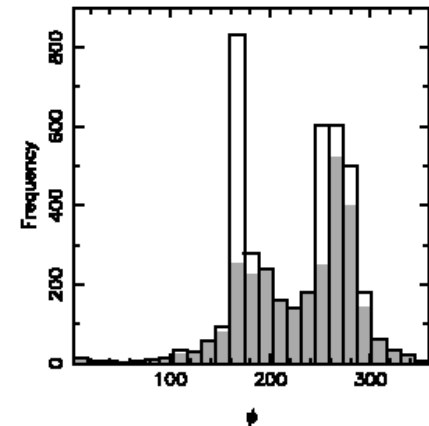
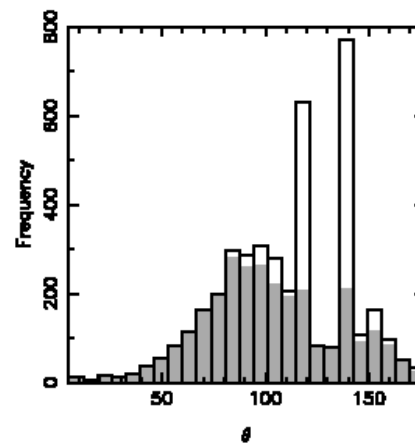
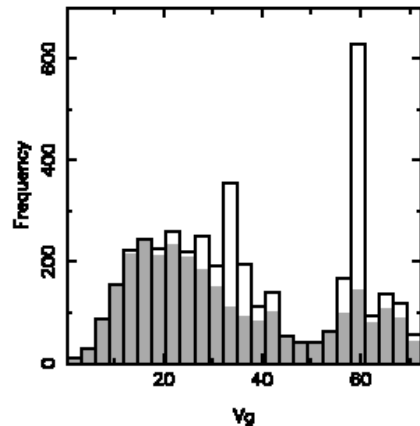
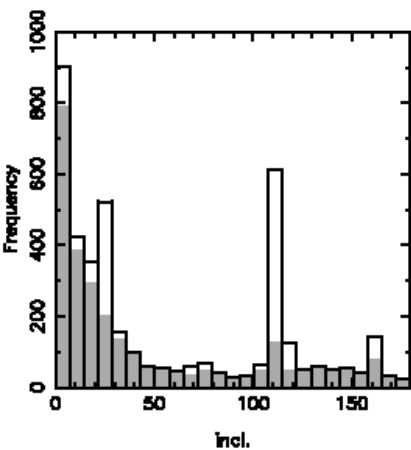
Wyszukiwanie strumieni meteoroidowych

Postawienie problemu:

- o dysponujemy zbiorem ~ 4000 orbit meteoroidowych.
- o zbiór zawiera zarówno orbity meteoroidów sporadycznych jak i należących do kilku strumieni.
- o w tym zbiorze należy wyszukać członków strumieni, w taki sposób, by prawdopodobieństwo zidentyfikowania strumieni o liczebnościach $M=2, 3, 4, \dots$, na zasadzie przypadku wynosiło 5 %.



Własności statystyczne zbioru ~4000 orbit.



Wyszukiwanie strumieni meteoroidowych

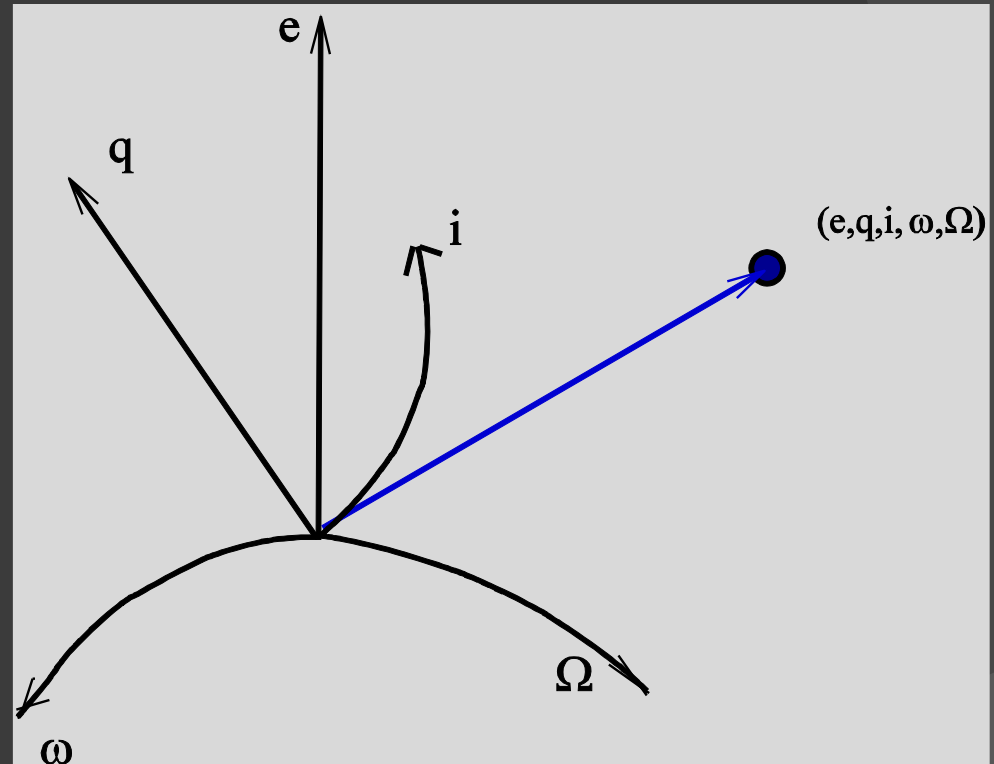
~~$$\mathbf{M} = (\mathbf{r}_m, \dot{\mathbf{r}}_m)$$~~

$$\mathbf{M} = (e, q, \omega, \Omega, i)^T$$

$$\mathbf{M} = (\mathbf{h}, \mathbf{e}, E)^T$$

$$\mathbf{M} = (U, \theta, \varphi, \lambda)^T$$

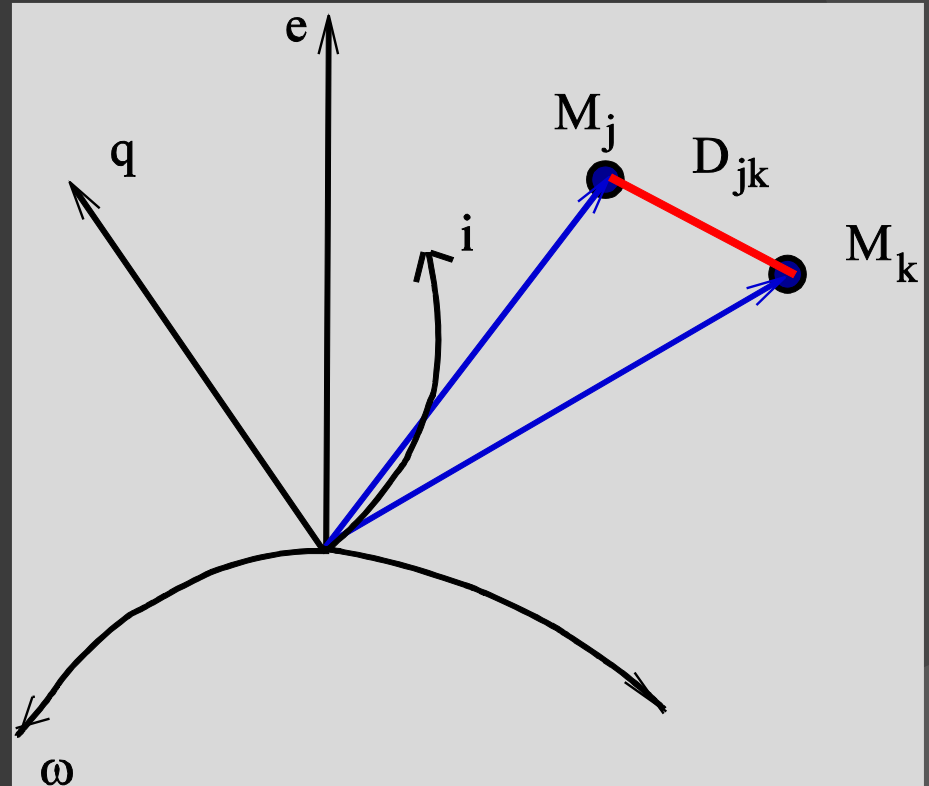
$$\mathbf{M} = (C_1, C_2, C_3)^T$$



Wyszukiwanie strumieni meteoroidowych

Odległości między
meteoroidami $\mathbf{M}_j$ i $\mathbf{M}_k$

$$D_{jk} = F(\mathbf{M}_j, \mathbf{M}_k)$$



Wyszukiwanie strumieni meteoroidowych

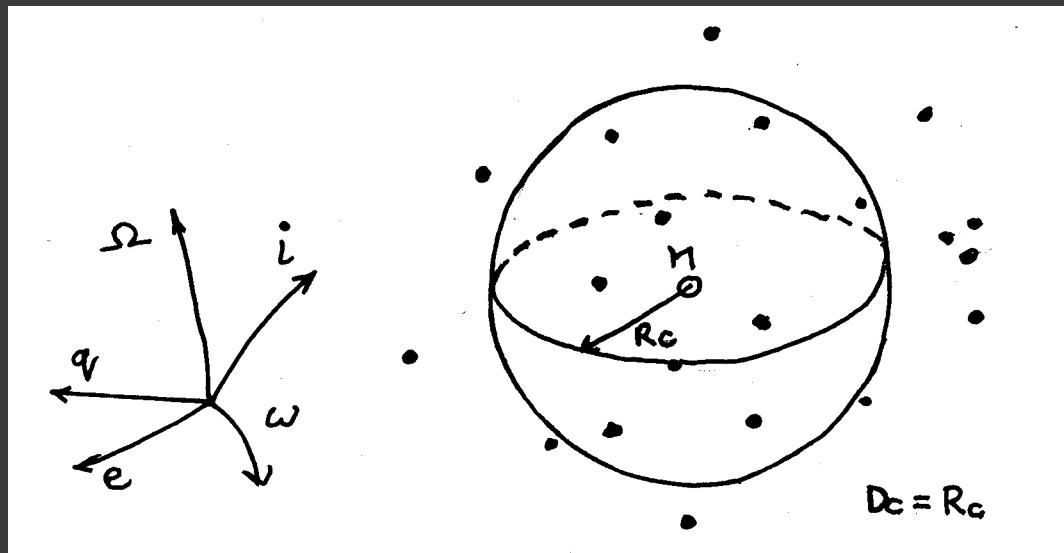
Kryterium przynależności meteoroidów M_j i M_k do danego strumienia.

Kryterium podobieństwa między M_j i M_k

$$D_{jk} \leq D_P$$

Wyszukiwanie strumieni meteoroidowych

Analiza skupień



$$D_{jk} = F(\mathbf{M}_j, \mathbf{M}_k)$$

Wyszukiwanie strumieni meteoroidowych

Jak wyznaczyć D_p ?

- o biorąc magiczną wartość, np. 0.2, ...
- o wykorzystując formułę

$$D_p = 0.2 \cdot \left(\frac{N}{360} \right)^{0.25}$$

- o stosując podejście statystyczne

Dobór D_p — podejście statystyczne

Szukamy wartości progowej D_p w oparciu o własności rozkładu geometrycznego

Rozkład geometryczny dotyczy np. takiego eksperymentu:

- ustalam wartość $D_p = 0.11$,

5. ze zbioru ~4000 orbit, wybieram dwie
i sprawdzam czy ma miejsce zdarzenie (sukces)

$$D_{jk} < D_p$$

10. jeśli nie, powtarzam krok 2, aż do wystąpienia sukcesu,

12. Odnotowuję za którym razem, X , wystąpił sukces.

Rozkład geometryczny

Liczby X pojawiają się z prawdopodobieństwem danym za pomocą rozkładu geometrycznego

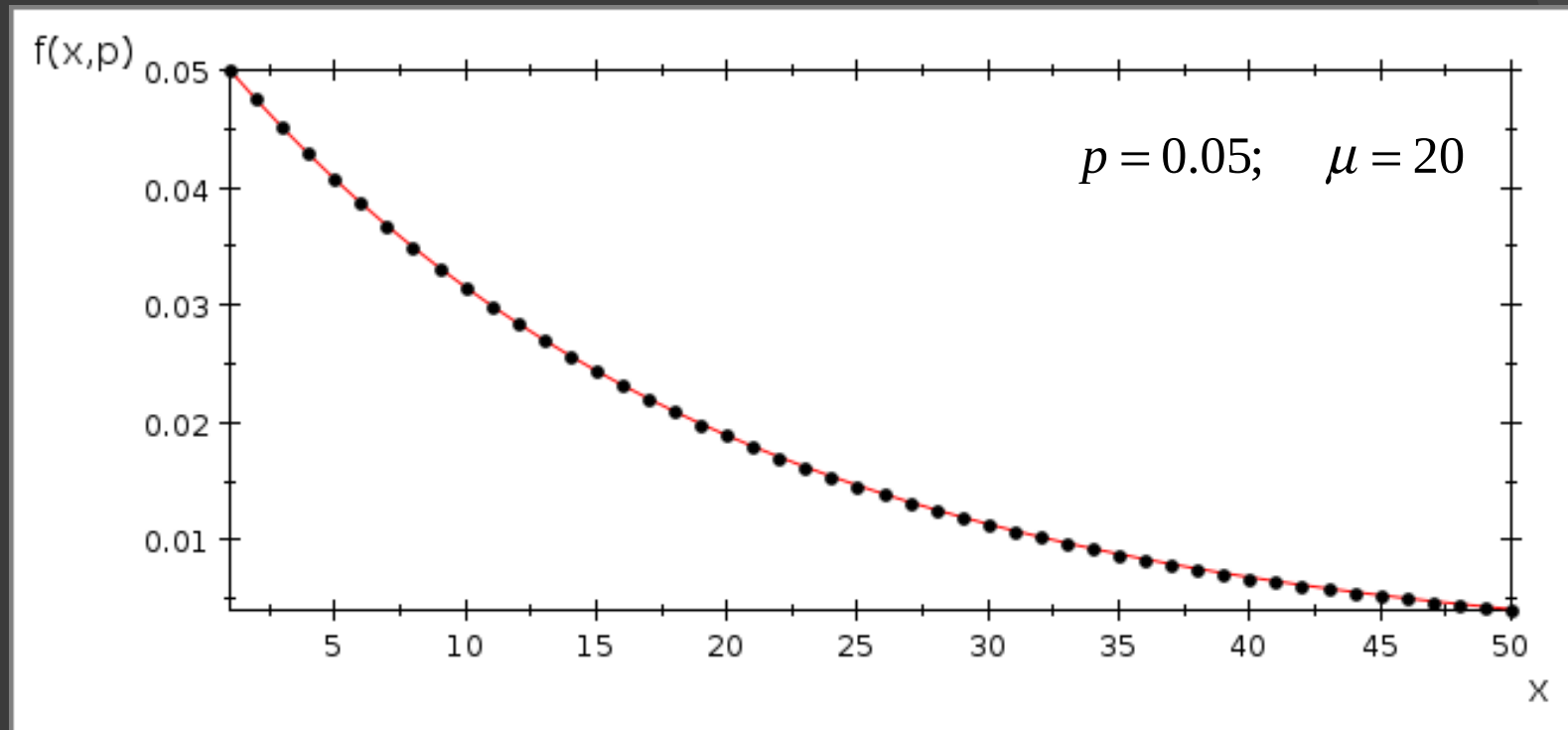
$$f(X, p) = p \cdot (1 - p)^{X-1}; \quad \text{dla } X = 1, 2, \dots$$

p - prawdopodobieństwo wystąpienia sukcesu

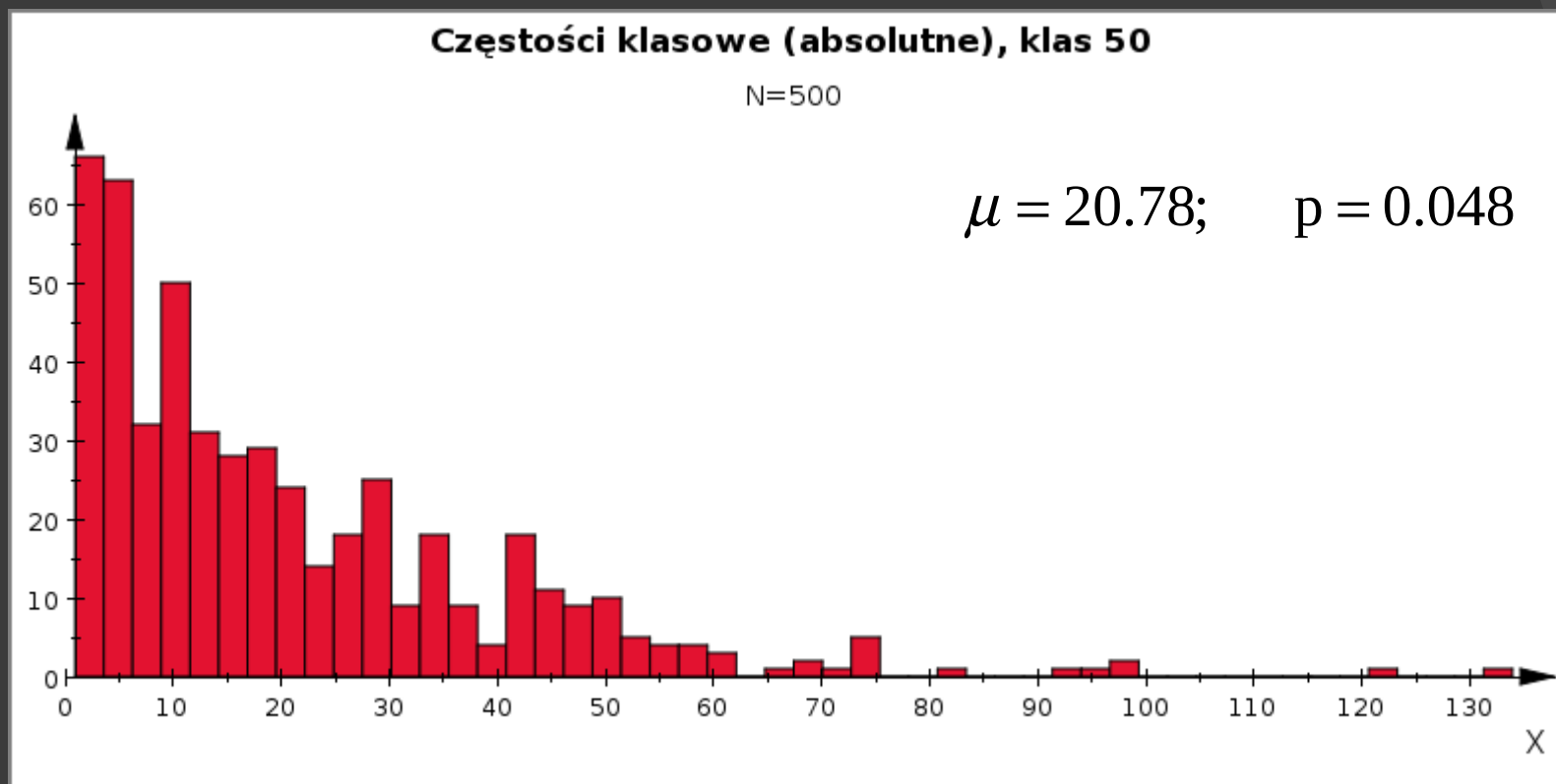
Parametr tego rozkładu, wartość średnia μ wynosi

$$\mu = \frac{1}{p}$$

Rozkład geometryczny, teoria



Rozkład geometryczny, symulacja



Dobór D_p — podejście statystyczne

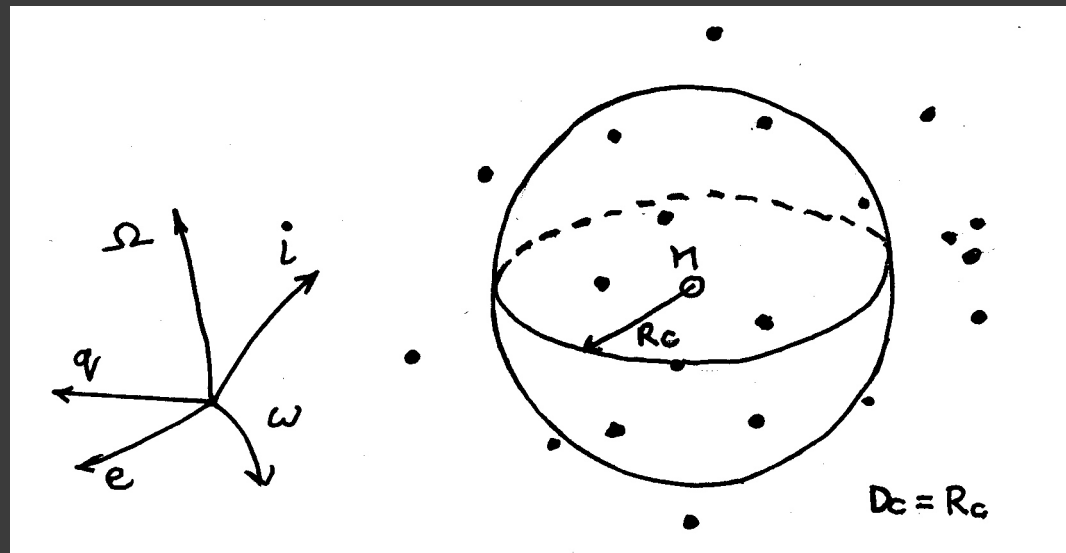
- Ustalamy początkowe $D_p = 0.12$,
- Sukcesem jest identyfikacji strumienia o liczności $M=2$
- Generujemy losowo 4000 orbit , $X=1$
- Sprawdzamy czy wystąpiło $D_{jk} < D_p$,
- Nie! - $>$ $X=X+1$, skok do kroku 4,
- Tak! - odnotuj fakt wystąpienia wartości X , np. $W[X]++$,
- Skok do kroku 3, jeśli liczba takich eksperymentów jest mniejsza od np. 500.
- Oblicz wartość średnią μ oraz prawdopodobieństwo **p**

Analiza skupień

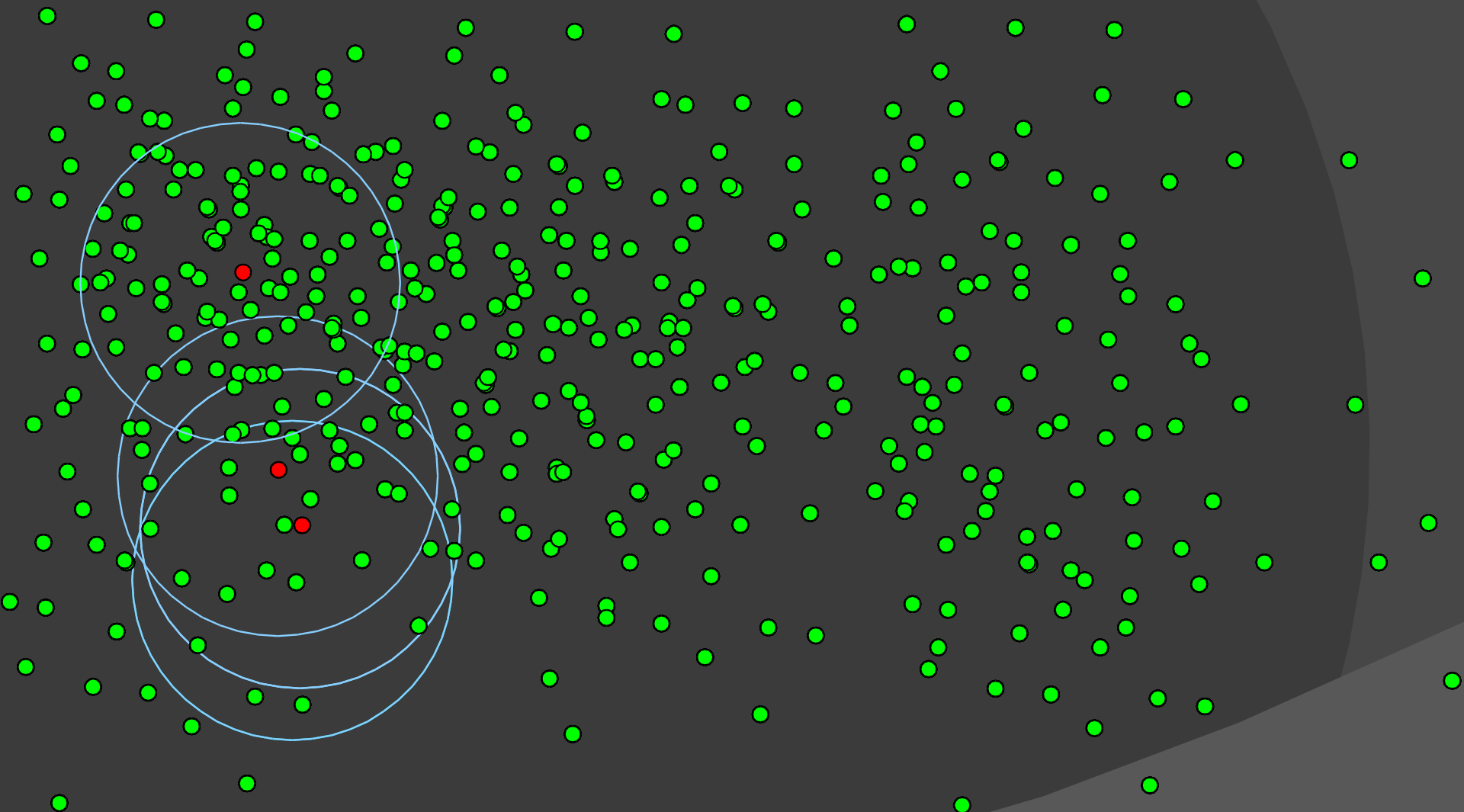
Definition 1. (Mean meteoroid method)

Let $M_k, k = 1, \dots, N$ be a set of N meteor orbits. Let M_m be a mean orbit of a stream, known a priori, let D_{km} be the distance between M_k and M_m .
A meteor stream S is defined as a subset of orbits for which:

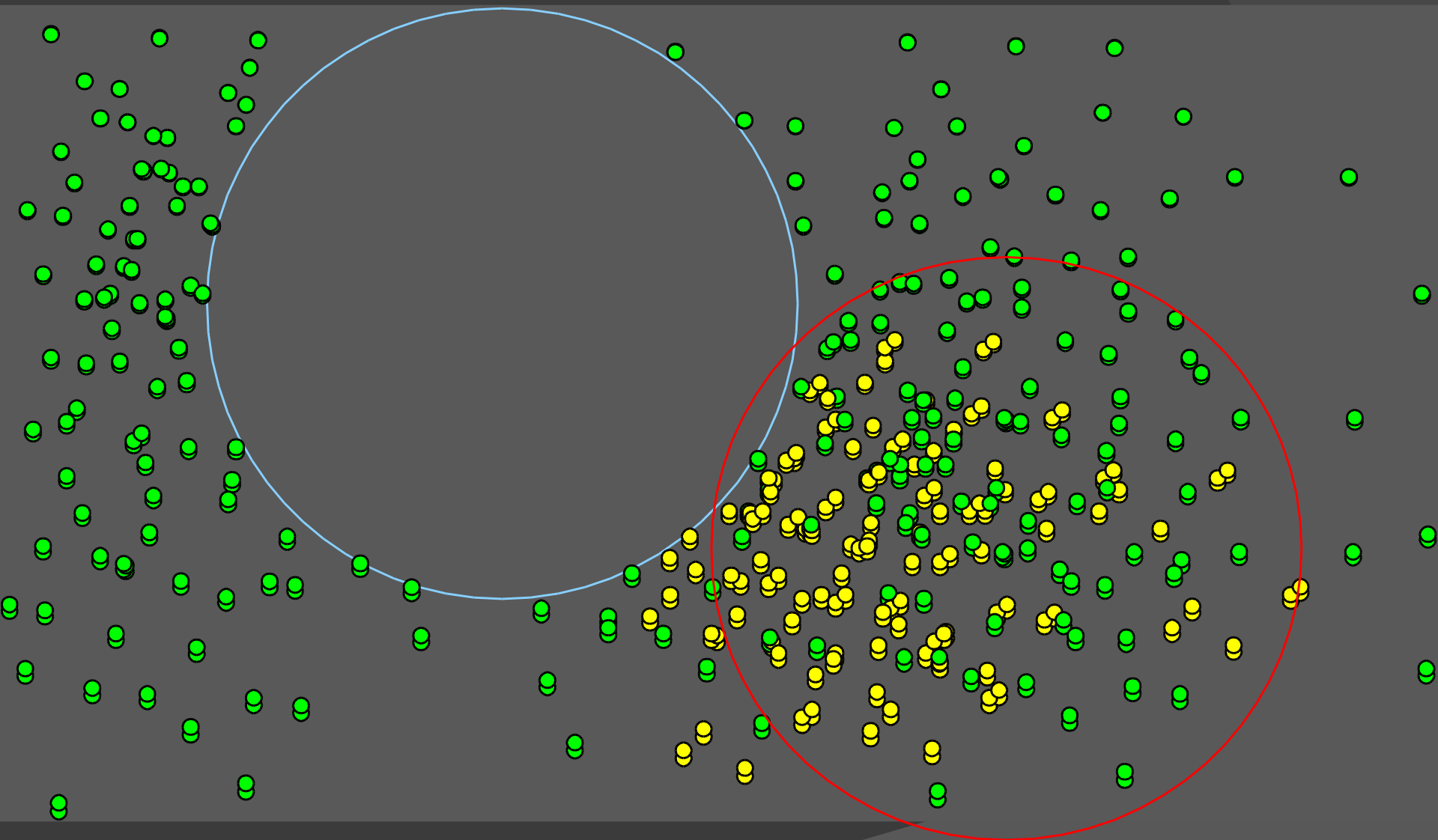
$$S = \left\{ M_k, k = 1, \dots, n : \forall_{k \leq n} D_{km} < D_c \right\}$$



Analiza skupień, metoda orbity średniej



Analiza skupień, metoda orbity średniej



Analiza skupień, metoda pojedynczego linkowania

Definition 2. (Hierarchical, single linkage method)

Let $M_k, k = 1, \dots, N$ be a set of N meteor orbits, and D_{kl} be the distance between M_k and M_l , then a meteor stream S is defined as:

$$S = \{M_k, k = 1, \dots, n :$$

$$\forall k \leq n \left[\exists k_1 \leq n, k_1 \neq k \quad D_{k_1 k} < D_c \right.$$

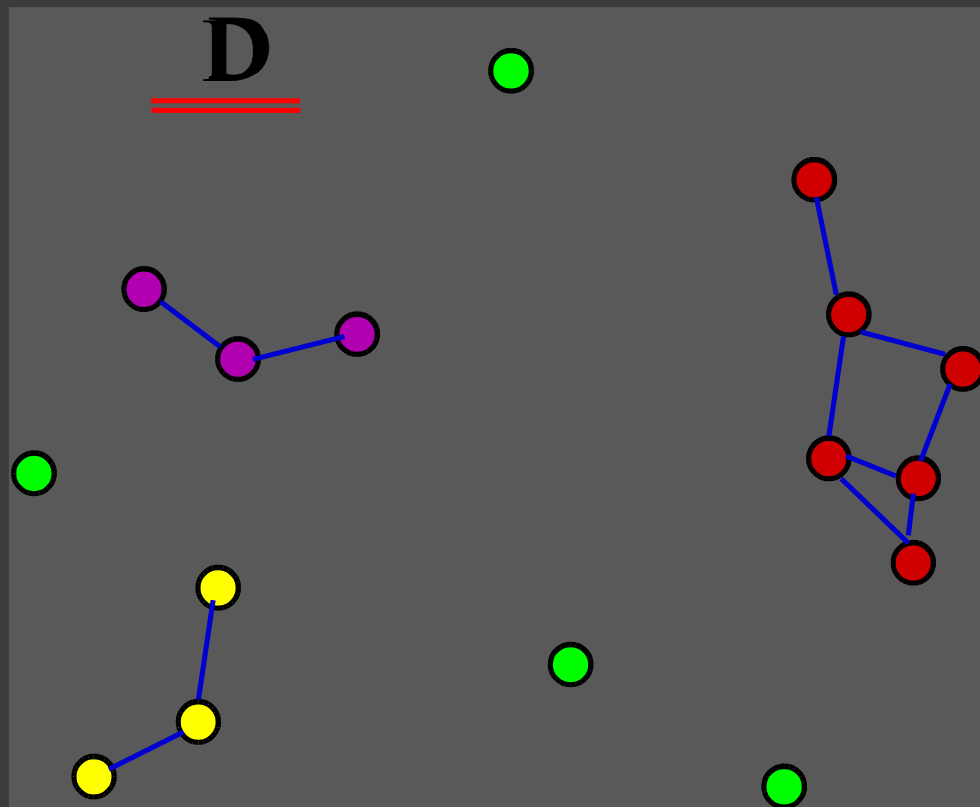
$$\wedge \quad \exists k_2 \leq n, k_2 \neq k_1 \quad (D_{k_2 k} < D_c) \vee (D_{k_2 k_1} < D_c)$$

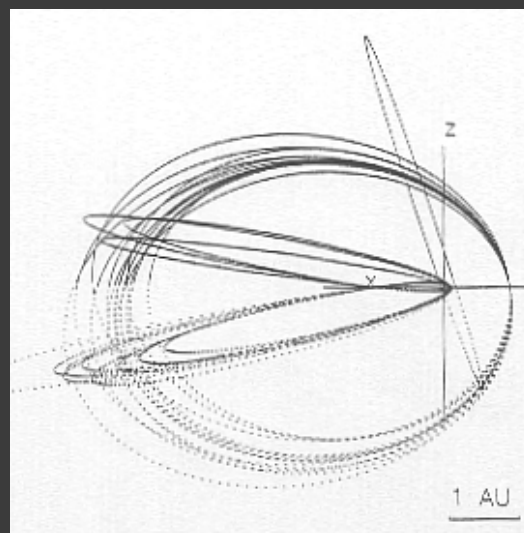
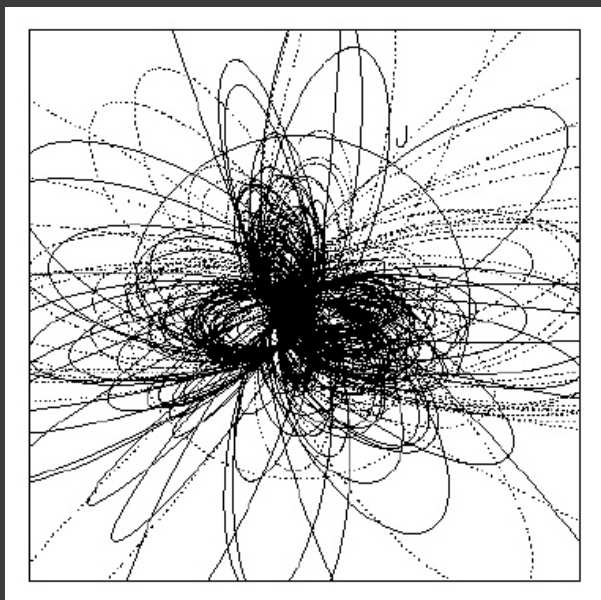
...

$$\wedge \quad \exists k_n \leq n, k_n \neq k_{n-1} \quad (D_{k_n k} < D_c) \vee (D_{k_n k_1} < D_c) \vee \dots$$

$$\dots \vee (D_{k_n k_{n-1}} < D_c)] \}$$

Analiza skupień, metoda pojedynczego linkowania





Kwadrantydy

Dziękuję za uwagę

