Klasyfikacja egzoplanet

w oparciu o statystykę gęstości średnich

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

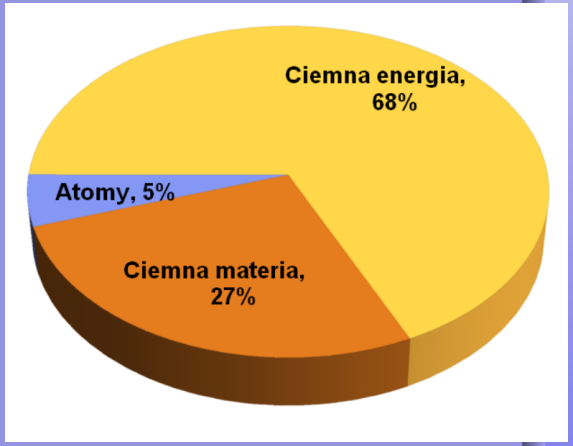
8 grudnia 2016

Motywacja

Motywacja: hipoteza ciemnej materii

Współczesne poglądy na Wszechświat:

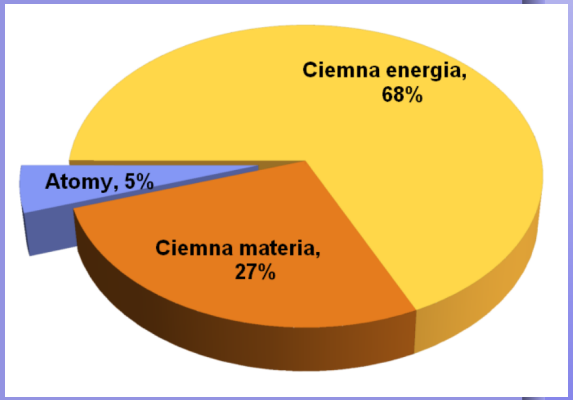
1. znana nam materia, w postaci głównie wodoru i helu, stanowi 5% zawartości Wszechświata
2. skład Wszechświata jest zdominowany przez egzotyczne składniki: ciemna energia ($\sim 2/3$) i ciemna materia ($\sim 1/3$)



Motywacja: hipoteza ciemnej materii

Współczesne poglądy na Wszechświat:

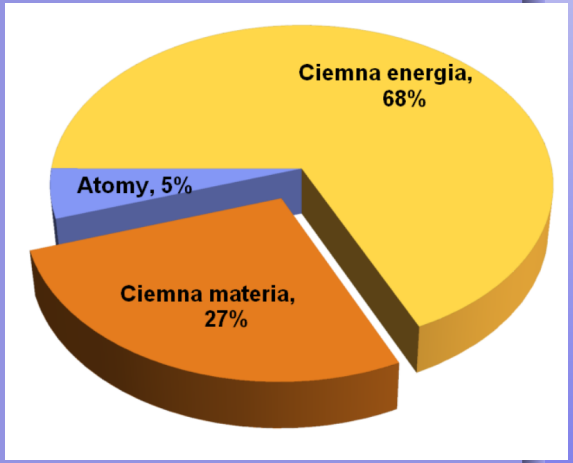
1. znana nam materia, w postaci głównie wodoru i helu, stanowi 5% zawartości Wszechświata
2. skład Wszechświata jest zdominowany przez egzotyczne składniki: ciemna energia ($\sim 2/3$) i ciemna materia ($\sim 1/3$)



Motywacja: hipoteza ciemnej materii

Współczesne poglądy na Wszechświat:

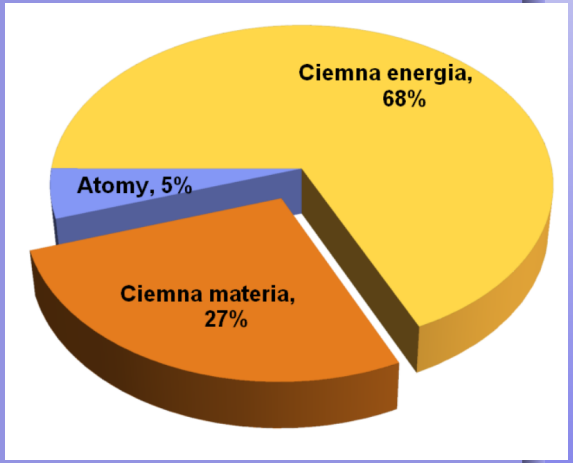
1. znana nam materia, w postaci głównie wodoru i helu, stanowi 5% zawartości Wszechświata
2. skład Wszechświata jest zdominowany przez egzotyczne składniki: ciemna energia ($\sim 2/3$) i ciemna materia ($\sim 1/3$)



Motywacja: hipoteza ciemnej materii

Współczesne poglądy na Wszechświat:

1. znana nam materia, w postaci głównie wodoru i helu, stanowi 5% zawartości Wszechświata
2. skład Wszechświata jest zdominowany przez egzotyczne składniki: ciemna energia ($\sim$2/3) i ciemna materia ($\sim$1/3)



Ciemna materia dominuje, gdzie i jak wobec tego należy jej szukać!?

Halo ciemnej materii

- Standardowe rozumienie rozkładu ciemnej materii to różnych mas halo ciemnej materii, znajdujące się w tych samych miejscach co galaktyki.
- Na ogół zakłada się, iż halo nie posiada żadnej drobnoskalowej substruktury.
- Wyjątkiem są „strumienie” ciemnej materii pozostałe po przeszłych (licznych) zderzeniach i złączeniach galaktyk.

Bullet cluster

Bullet cluster

Fizyczna natura niebarionowej ciemnej materii

Zimna ciemna materia (*ang.* ***CDM***, ***C****old* ***D****ark* ***M****atter*)

Powszechnie uważa się, że ciemna materia ma postać pewnej cząstki elementarnej, która:

1. posiada masę **znacznie** większą niż masa protonu,
2. oddziaływuje grawitacyjnie,
3. być może także przez oddziaływania słabe (*ang. WIMP,* ***W****eakly* ***I****nteracting* ***M****assive* ***P****article*),
4. jest prawdopodobnie trwała,
5. porusza się (obecnie) z prędkościami nierelatywistycznymi

Cząstka typu ciężkiego neutrina lub trwałej wersji bozonu Higgsa.

Liczne, coraz bardziej czułe, eksperymenty mające na celu potwierdzenie istnienia takiej cząstki od lat dają wynik negatywny!

Czy szukamy w miejscu i w sposób zupełnie błędny?

Alternatywne pole poszukiwań ciemnej materii

Materia barionowa ma tendencję do skupiania się na różnych skalach, zależnych od masy i spinu cząstek wytwarzających pole grawitacyjne.

Masa Chandrasekhara 1.44 $M_\odot$

Np: dla cząstki o spinie 1/2 (elektron, neutron) i źródła pola grawitacyjnego w postaci masy nukleonu m_p zachodzi słynny wzór:

$$M < M_{Ch} = \frac{\sqrt{3\pi}}{8}\left(-x_0^2 x_1\right)\ (2Y_e)^2\ \frac{m_{Planck}^3}{m_{proton}^2}$$

$x_0 \simeq 6.896849, x_1 \simeq -0.04242975$ - zero i nachylenie f. Lane-Emdena z $n = 3$.

Powyższy wzór zawiera jedynie stałe matematyczne, masę Plancka, masę cząstki grawitującej i stosunek liczby cząstek o spinie 1/2 (wytwarzających ciśnienie kwantowe) do liczby cząstek „masywnych" (tu: liczba elektronów na barion Y_e, zwykle $Y_e = 1/2$).

Masa Chandrasekhara dla CDM o spinie 1/2

Materia zdegenerowana (spin 1/2) utworzona z cząstek o hipotetycznej masie $m \gg m_p$

- $10m_p$ wypada w zakresie planet-gigantów (Jowisz) i brązowych karłów,
- dla $100m_p$ masa Saturna,
- dla $1000m_p$ masa Ziemi $M_\oplus$,
- dla $10^4 m_p$ masa Księżyca/**KBO** (**K**uiper **B**elt **O**bject),
- dla $10^5 m_p$ masa Ceres,
- itd. aż do komet i asteroid/meteorów

Podobne rozważania można prowadzić dla materii bozonowej.

Pochodzenie drobnoskalowej struktury gęstej „ciemnej materii”

- materia mogła ulec kondensacji na różnych skalach już w momencie powstania, t.j. w Wielkim Wybuchu, tworząc zalążki obecnie istniejących ciał niebieskich (CUDO)
- egzotyczna materia mogła powstać i zostać rozproszona w toku procesów astrofizycznych, np: zderzenia gwiazd neutronowych (strangelett, CFL)
- ciemna materia mogła ulec akrecji na materię barionową

Niektóre stany materii posiadają liczbę barionową, ale nie brały udziału w nukleosyntezie; nie wliczamy ich do materii barionowej w rozumieniu kosmologicznym, Ω_B.

Metodyka

Strategia poszukiwań

- Zakładamy, że materia niebarionowa „siedzi” wewnątrz przynajmniej cześci różnych obiektów astrofizycznych.
- Innymi słowy, materia niebarionowa jest „ubrana” w materię barionową, ale nie tylko postaci galaktycznego halo, ale na różnych (mniejszych!) skalach.
- Nie szukamy tzw. Macho utworzonych wyłącznie z egzotycznej materii, ale raczej ewidencji domieszek rzędu 10% masy „nomalnych” obiektów

Im obiekt mniejszy, tym łatwiejsze zauważenie anomalii gęstości związanych z ultragęstymi obiektami/materią.

W praktyce interesujący zakres mas to 10^{17} kg (asteroidy pasa), poprzez planety karłowate/ksieżyce (10^{21} kg), planety (10^{24} kg) aż do brązowych karłów (10^{29} kg).

Strategia poszukiwań

- Zakładamy, że materia niebarionowa „siedzi” wewnątrz przynajmniej cześci różnych obiektów astrofizycznych.
- Innymi słowy, materia niebarionowa jest „ubrana” w materię barionową, ale nie tylko postaci galaktycznego halo, ale na różnych (mniejszych!) skalach.
- Nie szukamy tzw. Macho utworzonych wyłącznie z egzotycznej materii, ale raczej ewidencji domieszek rzędu 10% masy „nomalnych” obiektów

Im obiekt mniejszy, tym łatwiejsze zauważenie anomalii gęstości związanych z ultragęstymi obiektami/materią.

W praktyce interesujący zakres mas to 10^{17} kg (asteroidy pasa), poprzez planety karłowate/ksieżyce (10^{21} kg), planety (10^{24} kg) aż do brązowych karłów (10^{29} kg).

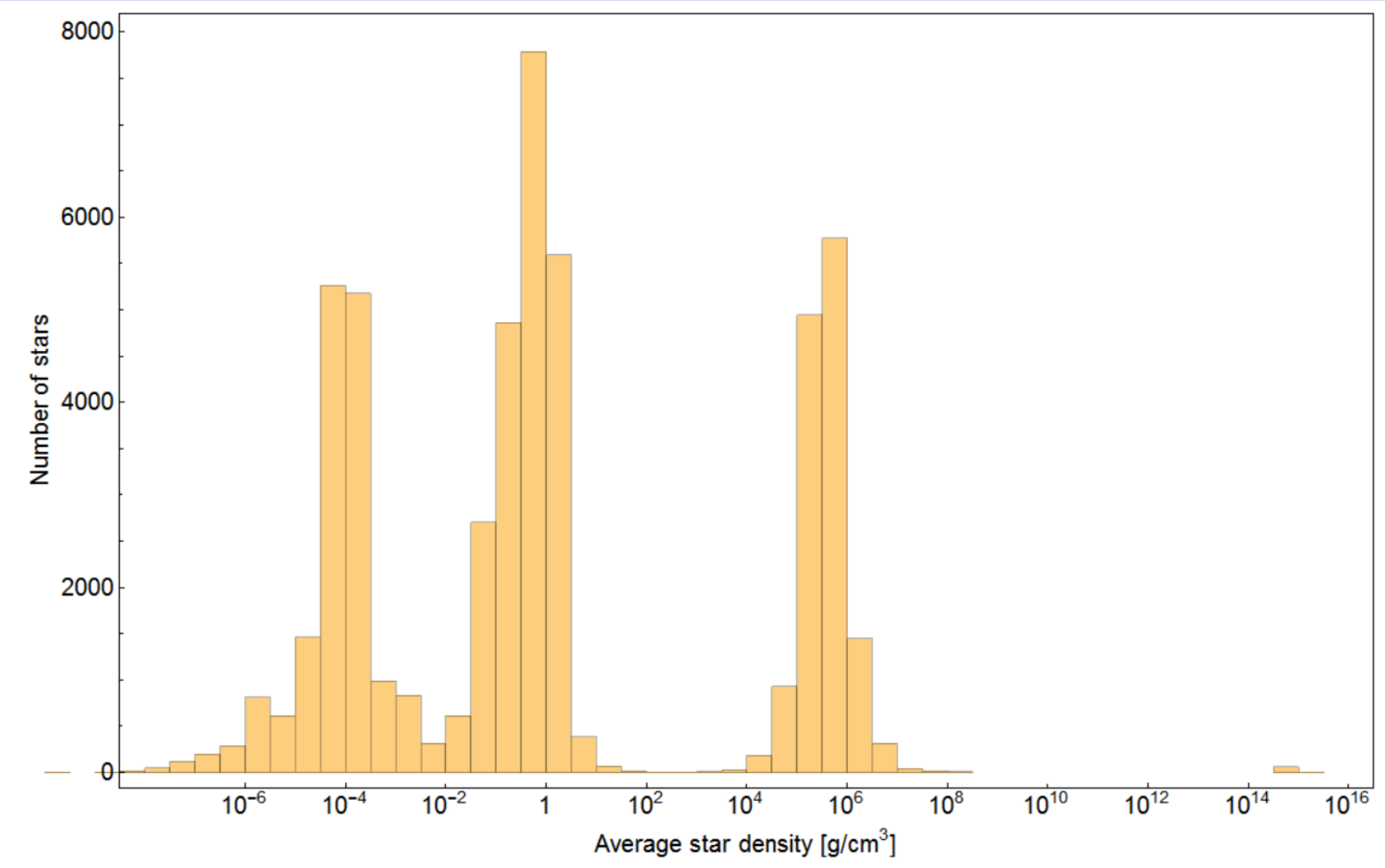
Strategia poszukiwań

- Zakładamy, że materia niebarionowa „siedzi” wewnątrz przynajmniej cześci różnych obiektów astrofizycznych.
- Innymi słowy, materia niebarionowa jest „ubrana” w materię barionową, ale nie tylko postaci galaktycznego halo, ale na różnych (mniejszych!) skalach.
- Nie szukamy tzw. Macho utworzonych wyłącznie z egzotycznej materii, ale raczej ewidencji domieszek rzędu 10% masy „nomalnych” obiektów

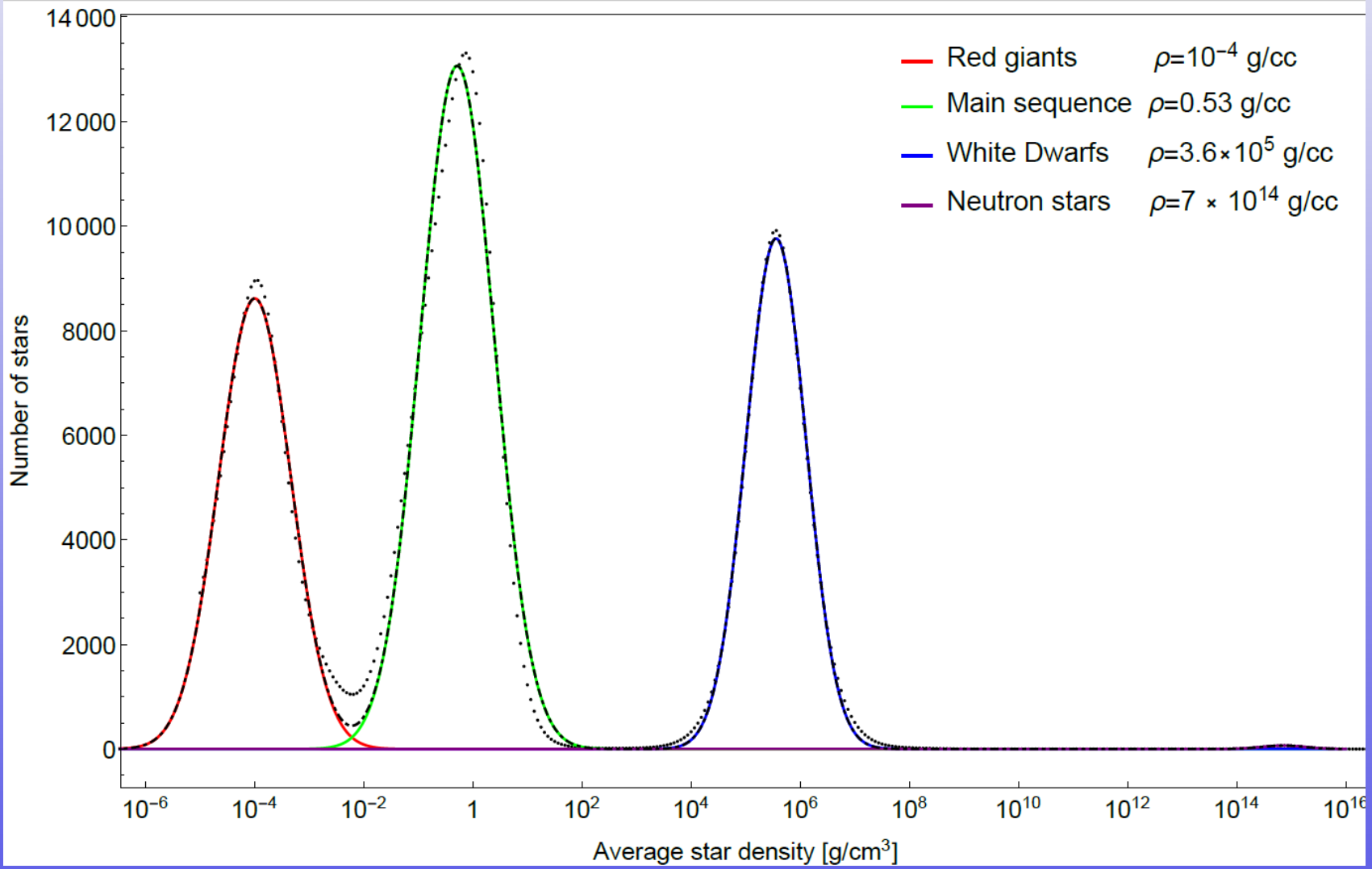
Im obiekt mniejszy, tym łatwiejsze zauważenie anomalii gęstości związanych z ultragęstymi obiektami/materią.

W praktyce interesujący zakres mas to 10^{17} kg (asteroidy pasa), poprzez planety karłowate/ksieżyce (10^{21} kg), planety (10^{24} kg) aż do brązowych karłów (10^{29} kg).

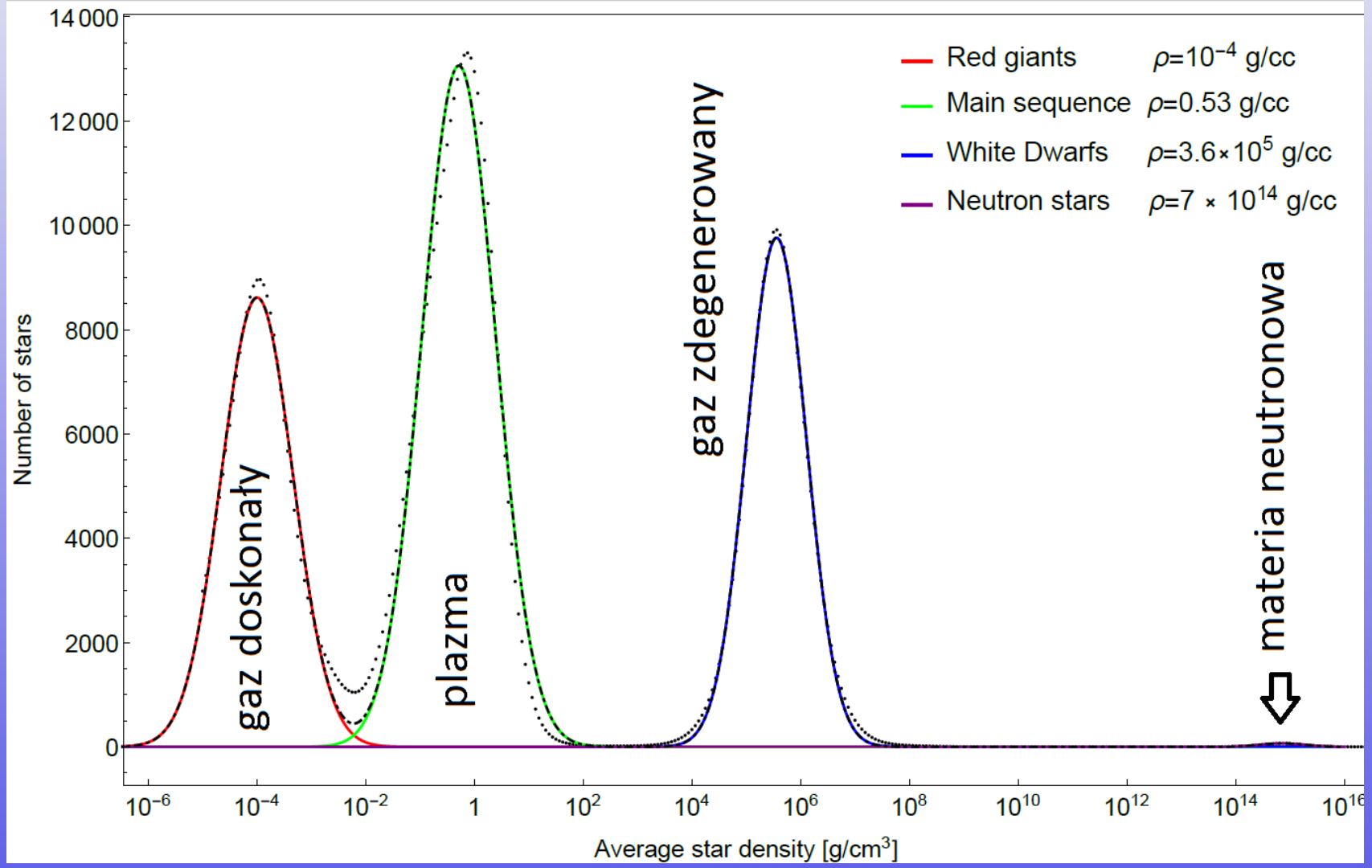
Obserwacja: histogram gęstości średnich $\bar{\rho}$ gwiazd



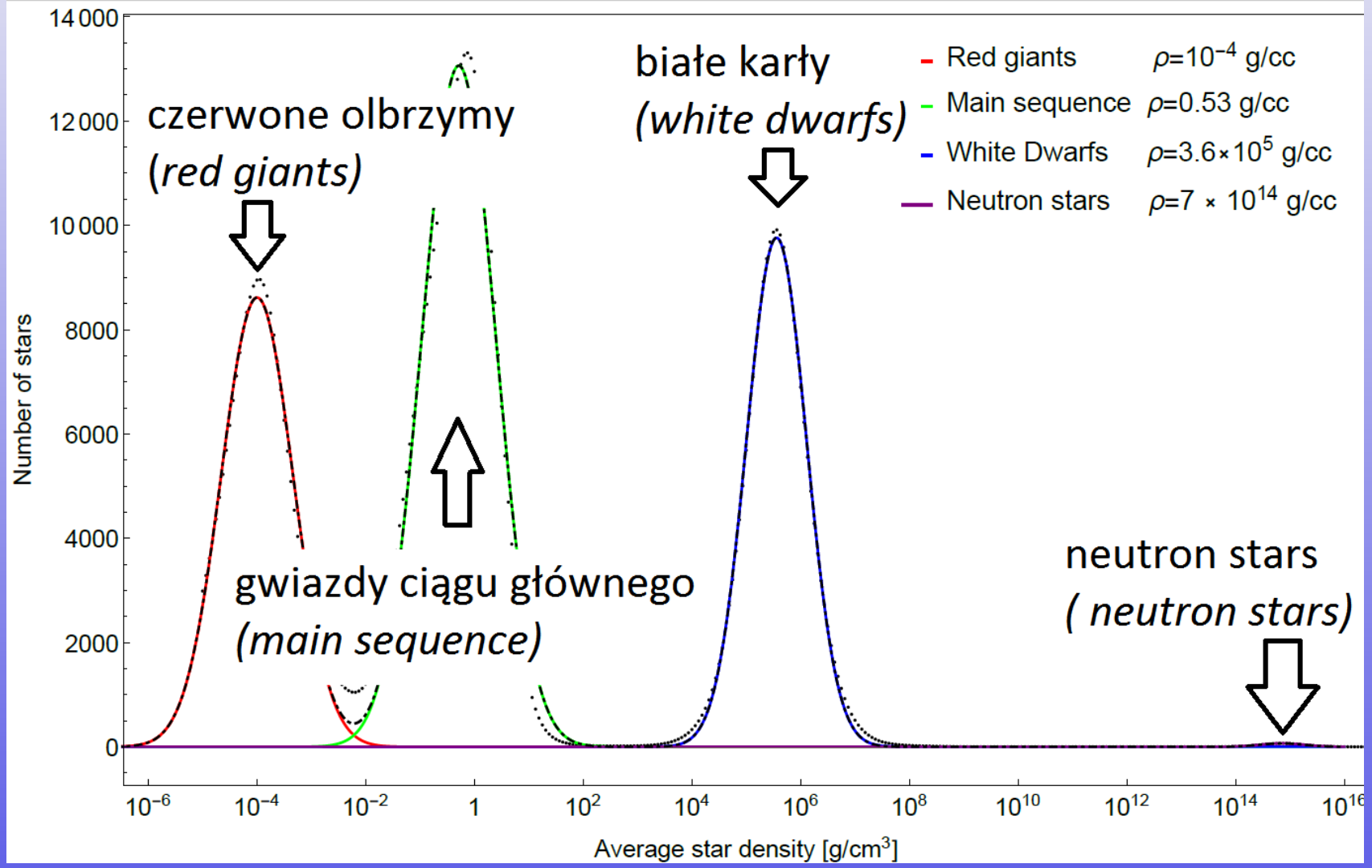
Obserwacja: histogram gęstości średnich $\bar{\rho}$ gwiazd



Obserwacja: histogram gęstości średnich $\bar{\rho}$ gwiazd



Obserwacja: histogram gęstości średnich $\bar{\rho}$ gwiazd



Rozkład (histogram) gęstości średnich gwiazd: wnioski

1. rozkład w $\lg \bar{\rho}$ ma postać dobrze odseparowanych pików
2. każdy z nich w dobrym przybliżeniu opisuje rozkład Gaussa; rozkład w $\bar{\rho}$ jest log-normalny
3. poszczególne piki odpowiadają różnym stanom materi
4. każdy z nich stanowi odpowiednik astrofizycznej jednostki „taksonomicznej" wysokiego poziomu

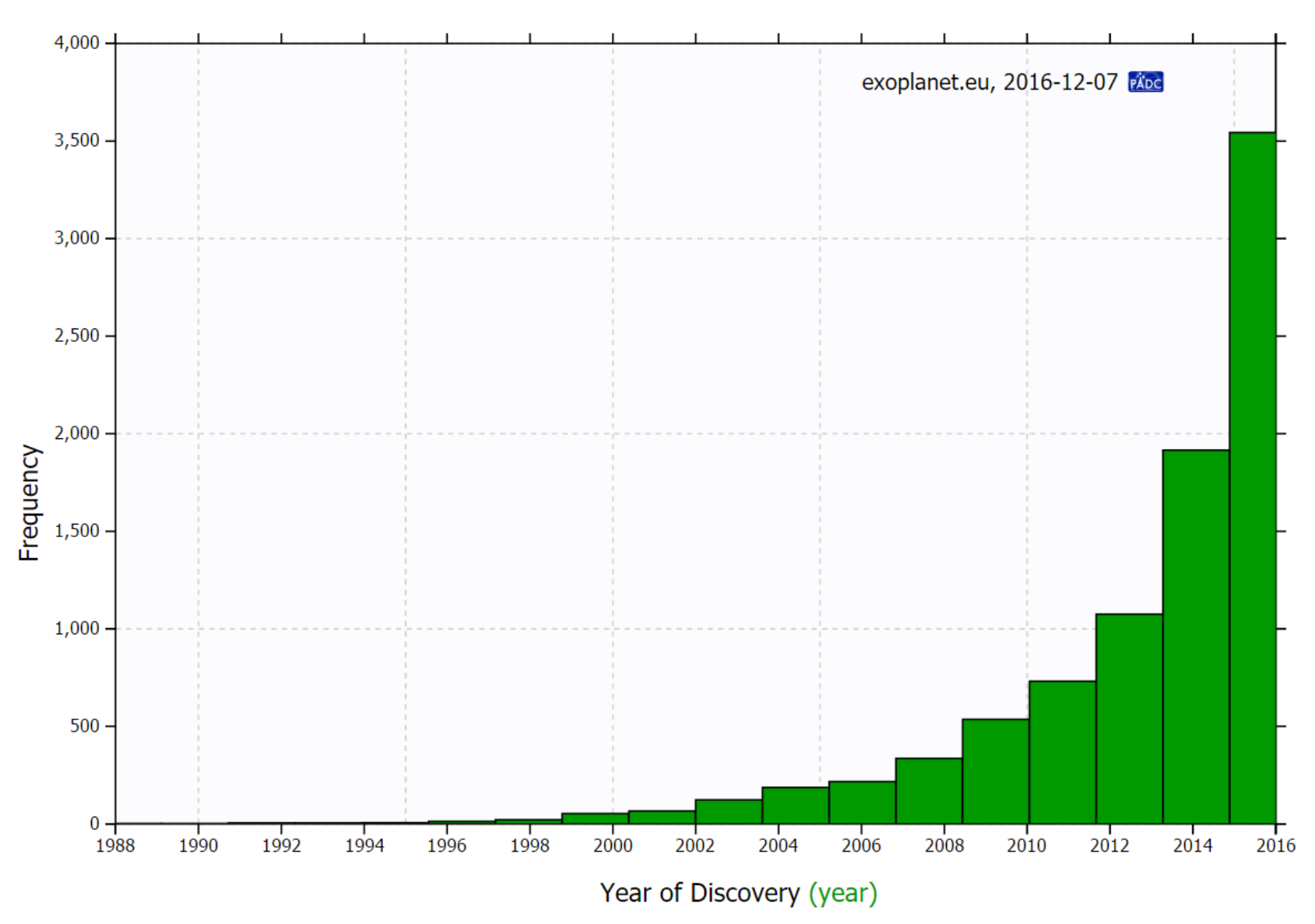
Idea analizy w dalszej części referatu polega na zastosowaniu powyższej obserwacji do znacznie skromniejszych (ilościowo i jakościowo) danych dotyczących innych niż gwiazdy ciał niebieskich.

Jak wygląda analogiczny rozkład prawdopodobieństwa dla obiektów w skali planetarnej?

Odpowiedź jest trudniejsza, gdyż:

1. ilość danych jest o rzędy wielkości mniejsza (kilkaset obiektów o znanym R i M)
2. jakość pomiarów jest niezadowalająca
3. dyscyplina jest nowa, w fazie szybkiego rozwwoju (szczególnie dotyczy egzoplanet)
4. powszechna jest praktyka odrzucania wszystkich pomiarów niezgodnych z obowiązującymi teoriami
5. klasyfikacja (egzo-)planet nie jest ani zakończona ani powszechnie akceptowana (przypadek Plutona, brązowe karły, księżyce)
6. nadal pokutują setki lat teorii opartej wyłącznie na podstawie struktury Układu Słonecznego (planety wewnętrzne, pas asteroid, planety zewnętrzne, pas Kuipera, obok Oorta)
7. obserwacyjny BIAS wynikający z metod badawczych (tranzyty/zaćmienia, prędkość radialna)

Egzoplanety (planety pozasłoneczne)


exoplanet.eu, 2016-12-07
PADC
Frequency
4,000
3,500
3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
500
0
1988
1990
1992
1994
1996
1998
2000
2002
2004
2006
2008
2010
2012
2014
2016
Year of Discovery (year)

Planety pozasłoneczne: źródło danych

Bazy danych

	Total	Podane M i R	$\bar{\rho}$
exoplanets.eu	3545	585	—
NASA exoplanet archive	3431	530	408
exoplanets.org	5454	323	—
OpenExoplanetCatalogue	3426	435	

Ze względu na spore rozbieżności, do analizy połączono 2 pierwsze bazy i podzielono na:

1. GOLD, 424 planety o znanej gęstości, potwierdzone w obu bazach
2. SILVER, 146, pojawiajace się jednokrotnie
3. BRONZE, ok. 100 limitów górnych na masę

Dalsza analiza używa wyłącznie GOLD, stan na 22 października 2016.

Diagram M-R dla egzoplanet

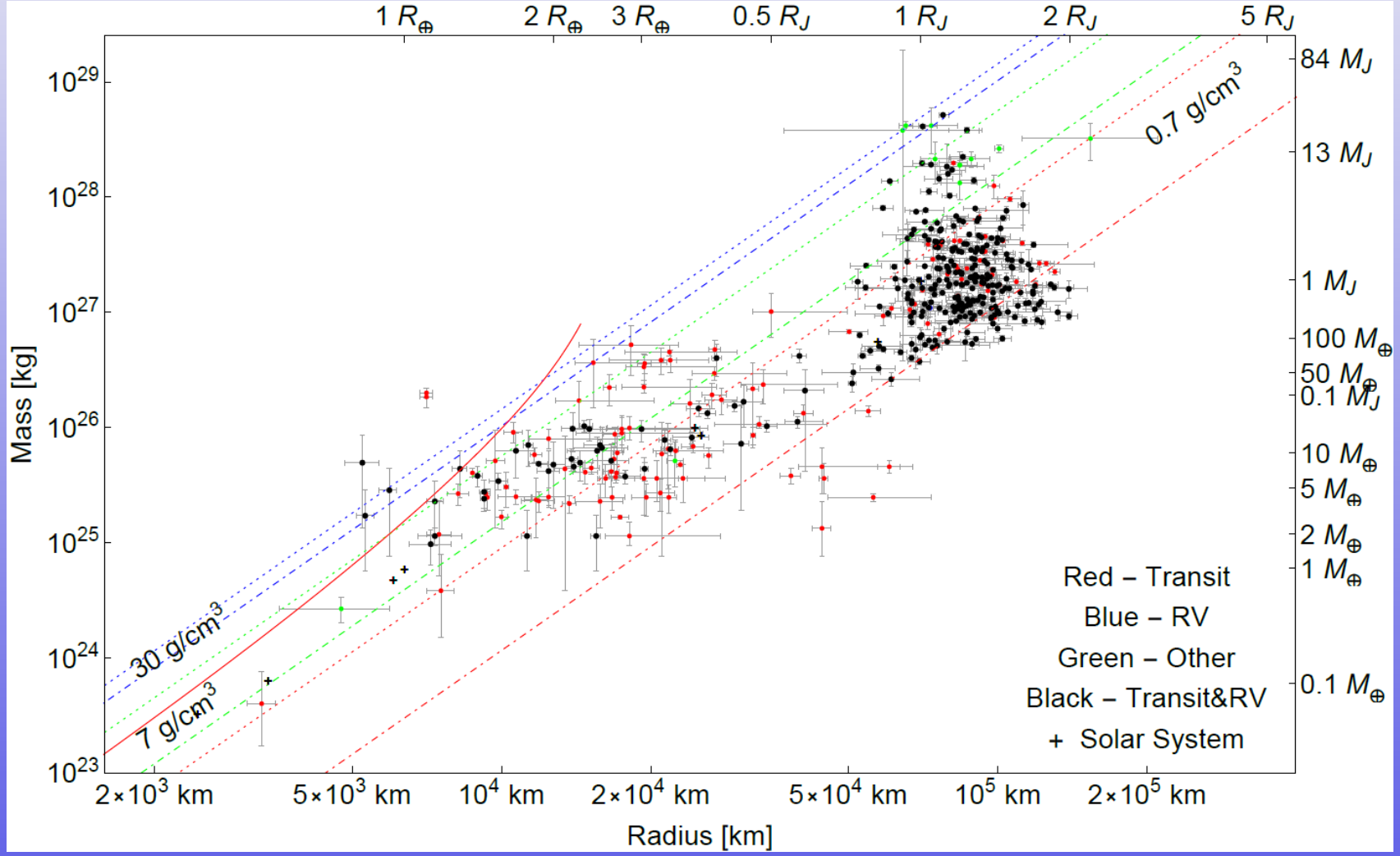
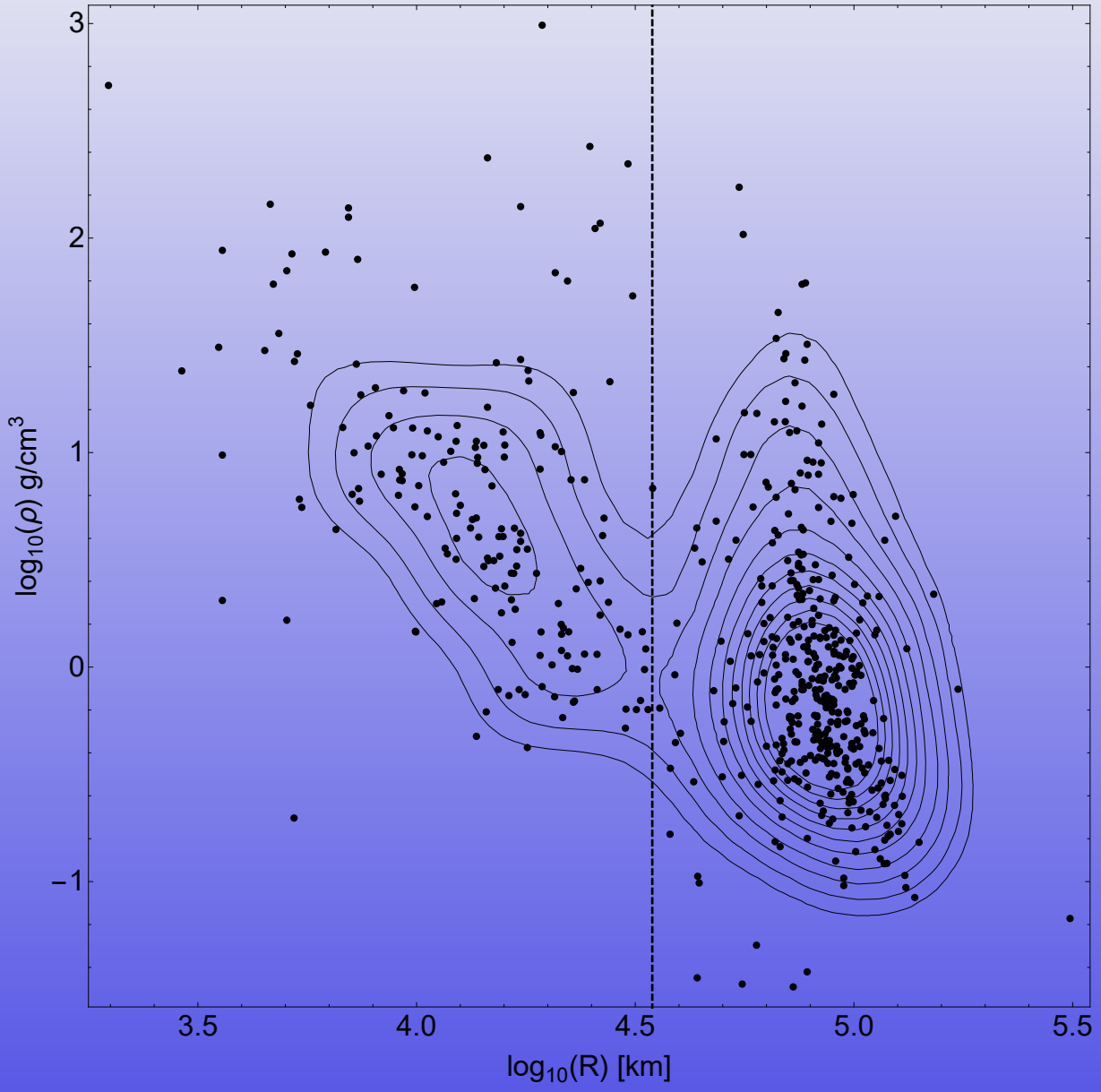
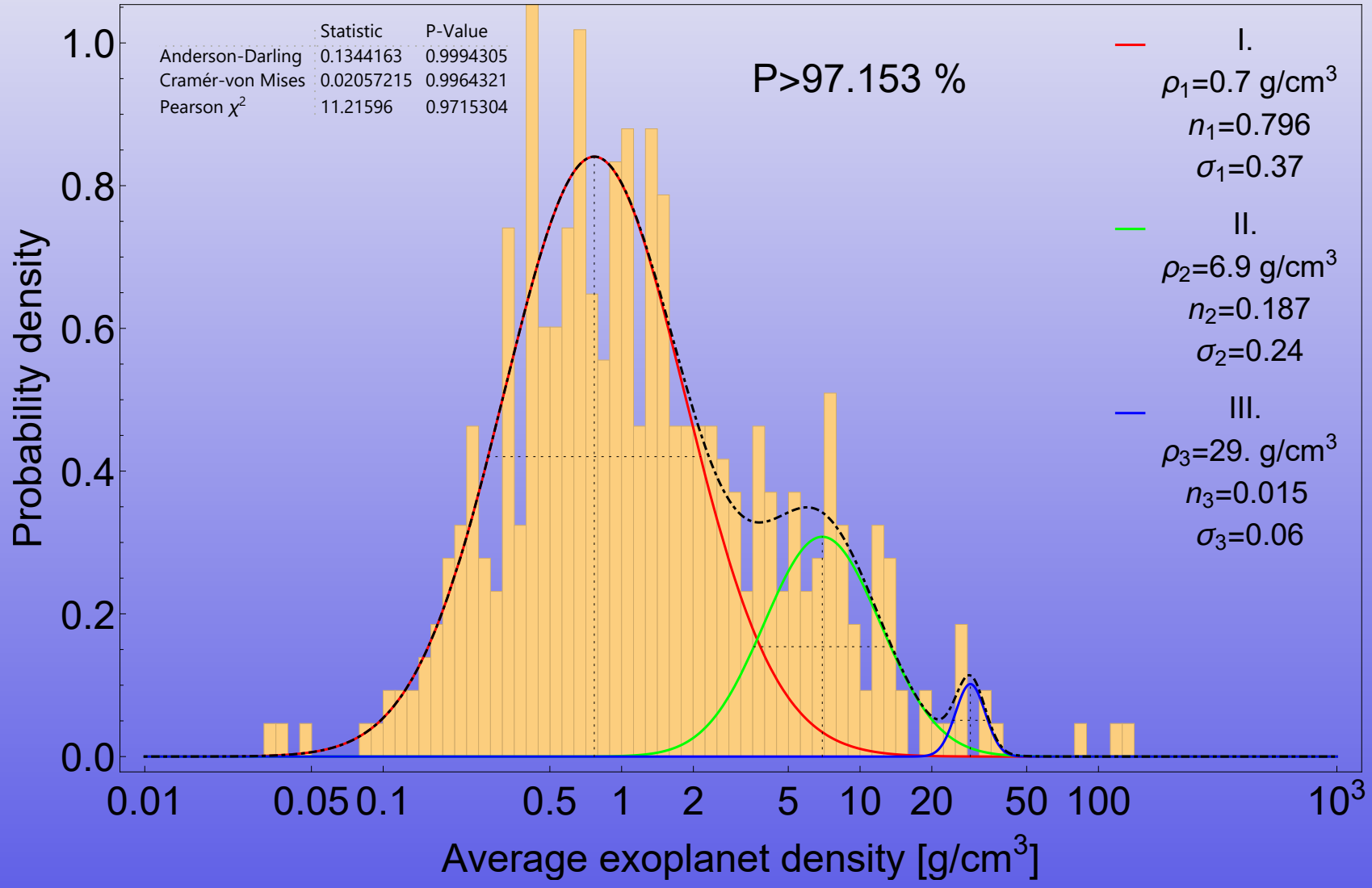


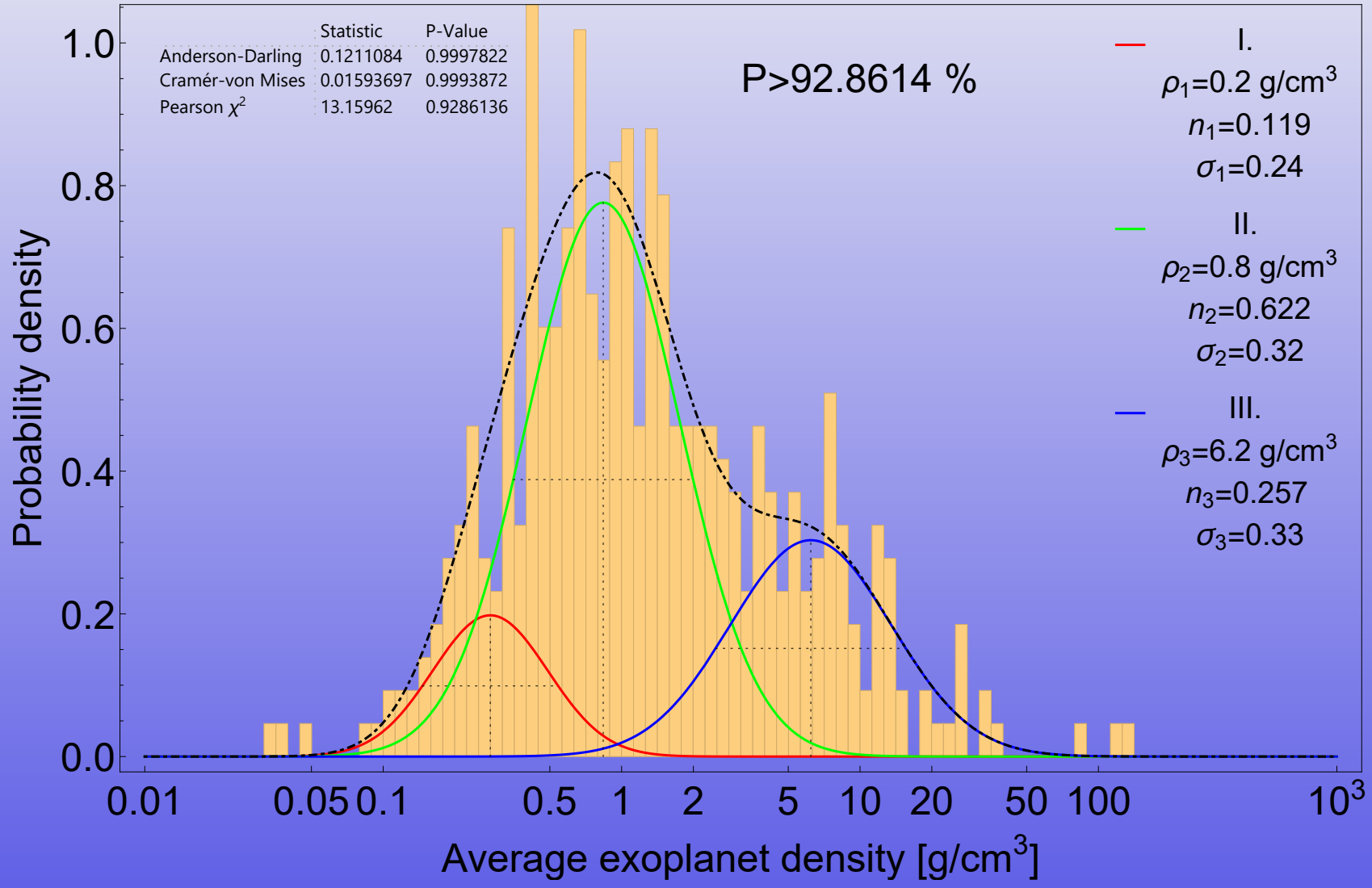
Diagram R-$\bar{\rho}$ dla egzoplanet



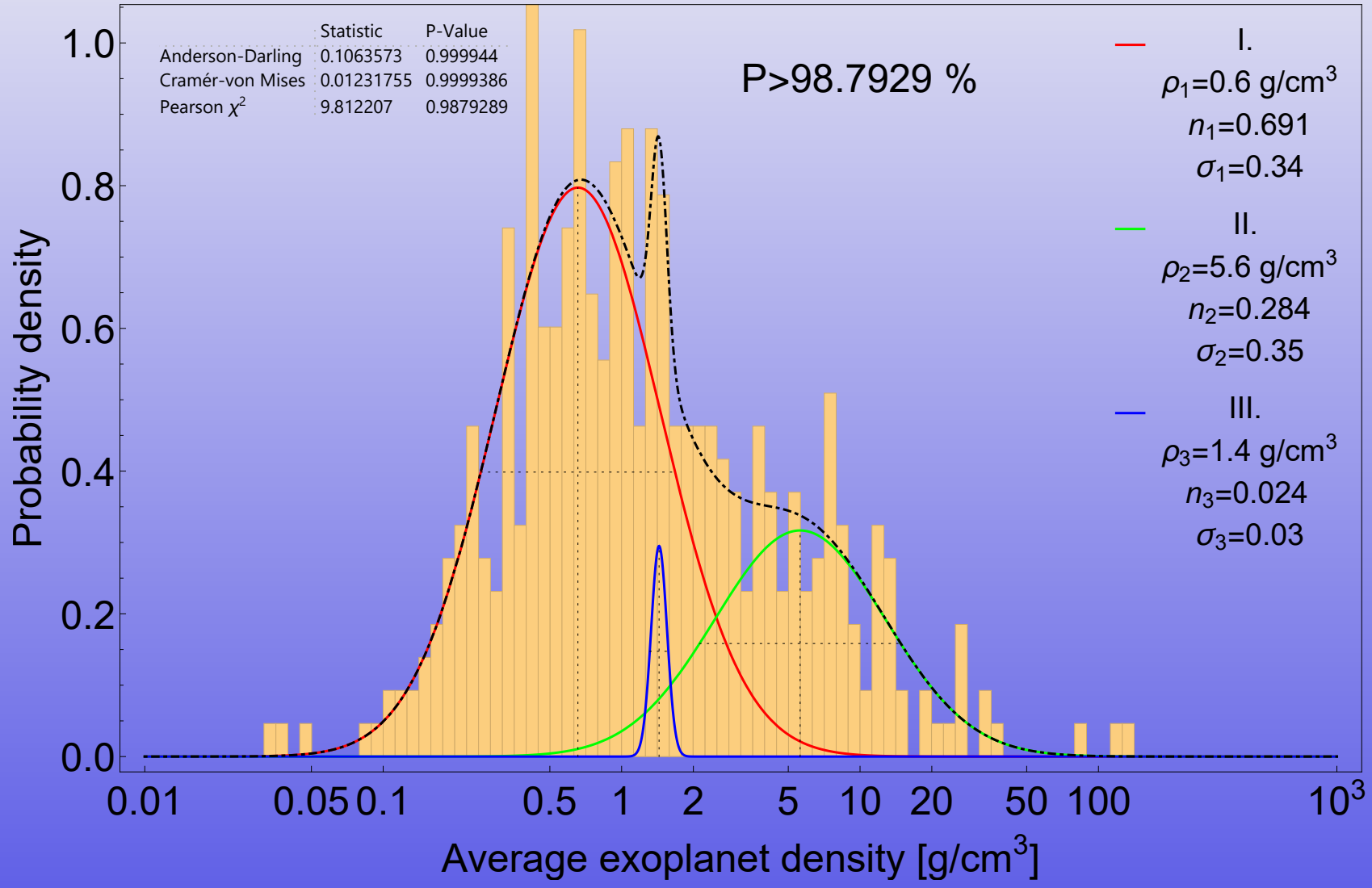
Histogram gęstości średnich egzoplanet



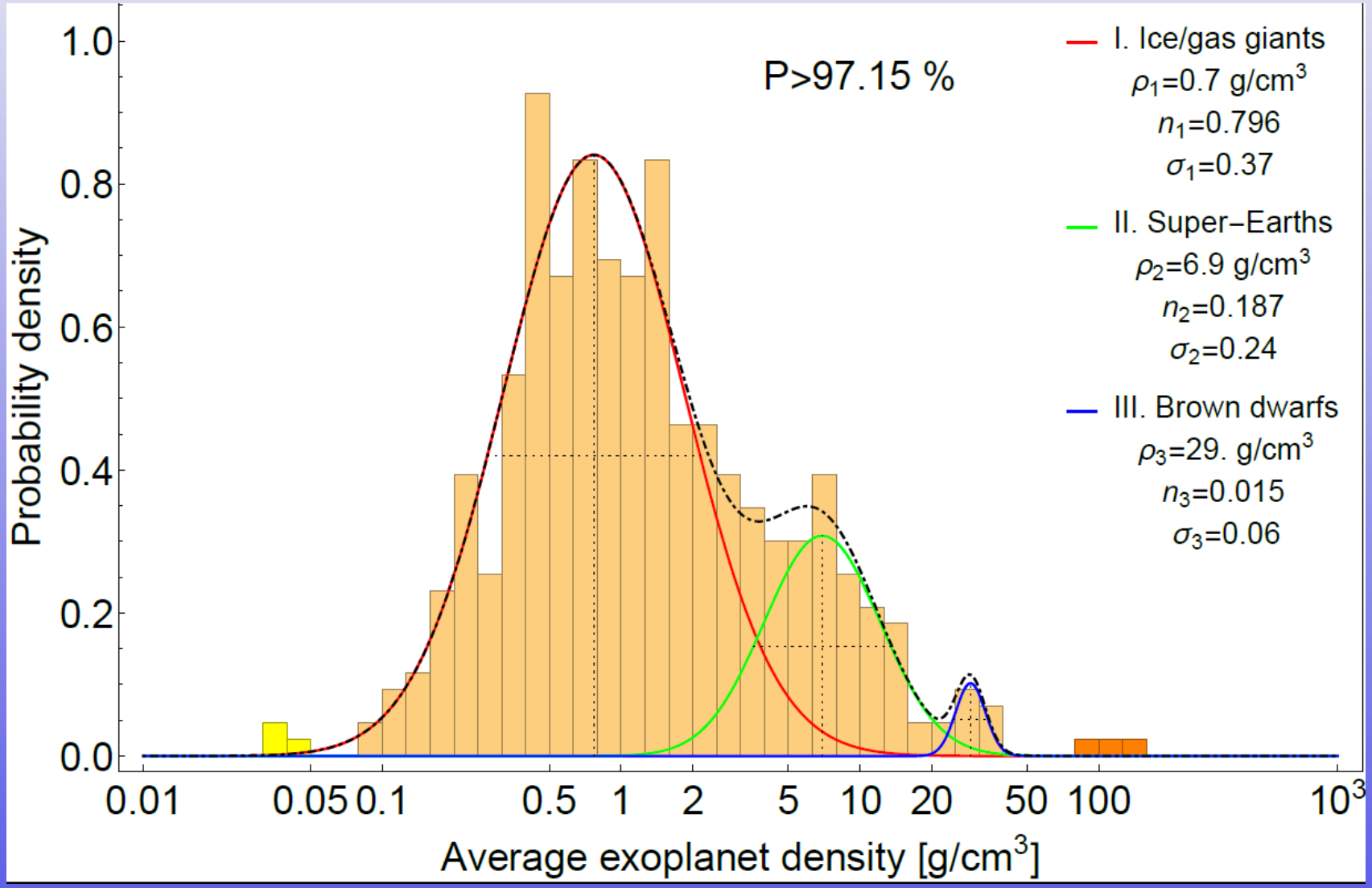
Histogram gęstości średnich egzoplanet



Histogram gęstości średnich egzoplanet



Klasyfikacja egzoplanet



Klasyfikacja egzoplanet

	$\bar{\rho}_{\min}$ [g/cc]	$\bar{\rho}$ [g/cc]	$\bar{\rho}_{\max}$ [g/cc]	Mass $[M_\oplus]$	Radius $[R_\oplus]$	P-Ice class	P-Iron class	P-Ultradense class
Kepler-128 c	112.0	135.1	162.0	33.3	1.108	0.00005	0.02	0.978
Kepler-128 b	91.95	124.8	163.4	30.7	1.108	0.00007	0.02	0.971
Kepler-131 c	17.46	81.73	181.6	8.26	0.822	0.00044	0.12	0.878
Kepler-68 c	7.784	32.39	57.39	4.76	0.932	0.00878	0.75	0.241
Kepler-406 c	8.069	27.18	51.13	2.86	0.833	0.01278	0.83	0.154
Kepler-282 d	3.540	24.24	49.80	61.0	2.403	0.01610	0.87	0.113
Kepler-277 b	5.703	20.51	62.49	87.4	2.864	0.02227	0.90	0.071
Mercury		5.427		0.055	0.38	0.288	0.70	1.6×10^{-3}
Venus		5.243		0.814	0.94	0.306	0.69	1.4×10^{-3}
Earth		5.515		1.000	1.00	0.280	0.71	1.7×10^{-3}
Mars		3.934		0.107	0.53	0.480	0.51	5.5×10^{-4}
Jupiter		1.326		317.8	10.9	0.957	0.04	4.9×10^{-6}
Saturn		0.687		95.16	8.99	0.995	0.00	1.8×10^{-7}
Uranus		1.270		14.53	3.96	0.963	0.03	4.0×10^{-6}
Neptune		1.638		17.14	3.85	0.920	0.07	1.4×10^{-6}

Obiekty ultragęste: interpretacja

Analizując bazy danych egzoplanet natrafiamy na przynajmniej kilkanaście obiektów o gęstościach średnich $\bar{\rho} \gg 10$ g/cm^3.

- w przypadku brązowych karłów ($13M_J < M < 84M_J \simeq 0.08M_\odot$) gęstości rzędu 100 g/cm^3 są normalne (elektronowy gaz zdegenerowany, skompresowany wodór)
- dla obiektów poniżej masy Jowisza duże gęstości tłumaczy zawartość żelaza; obiekt masy Saturna (100 $M_\oplus$) zawierający 100% Fe posiada $\bar{\rho} \simeq 50$ g/cm^3 (przykład ekstremalny)
- dla obiektów typu Super-Ziemia $\bar{\rho} > 10$ g/cm^3 jest „niedopuszczalna"

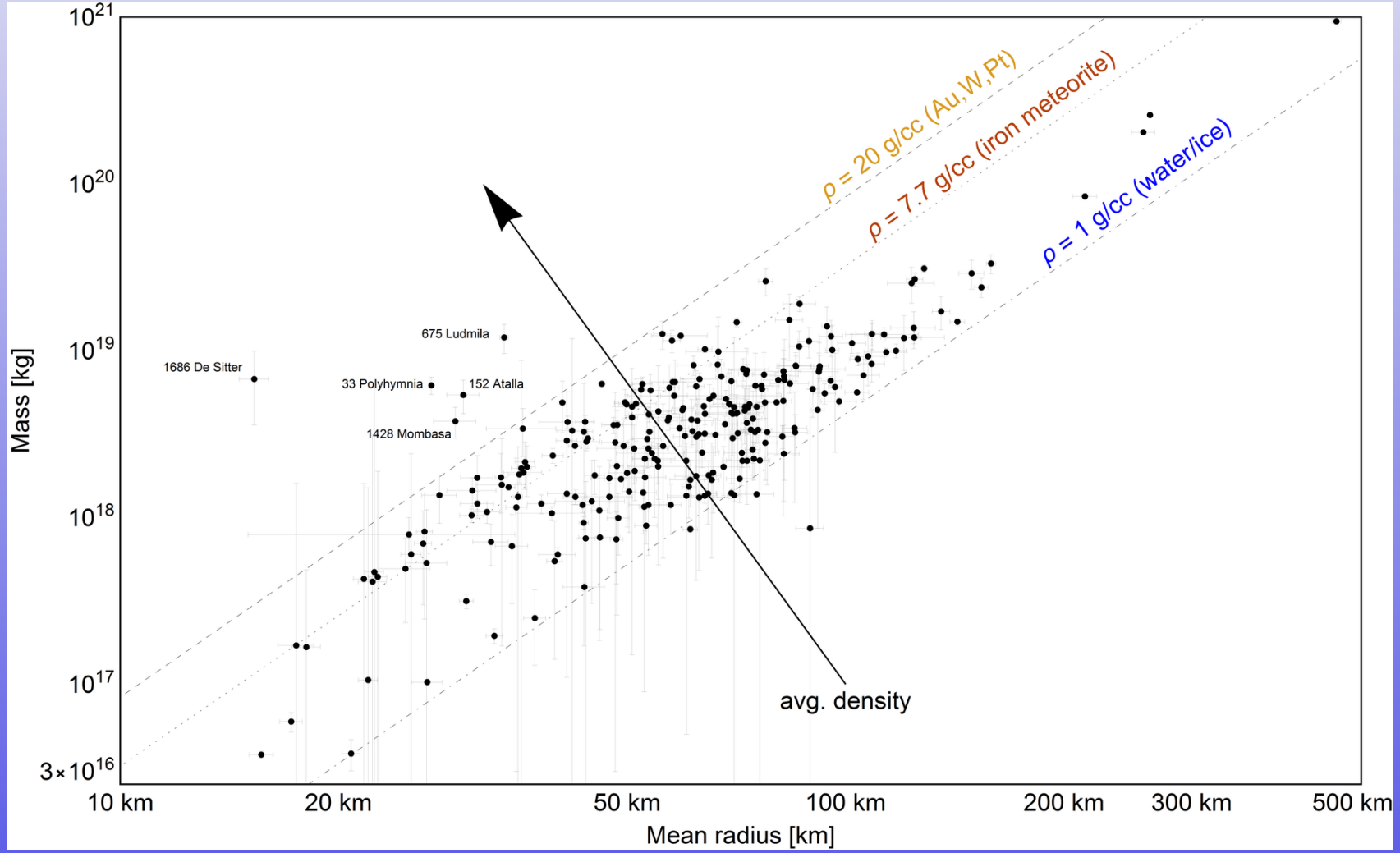
Możliwe wyjaśnienia anomalii:

1. błędy/degeneracja pomiarów (np: masa-ekscentryczność orbity dla TTV (ang. Transit Time Variation)
2. niestandardowa nuklosynteza („złote planety" ?)
3. domieszka egzotycznej materii?

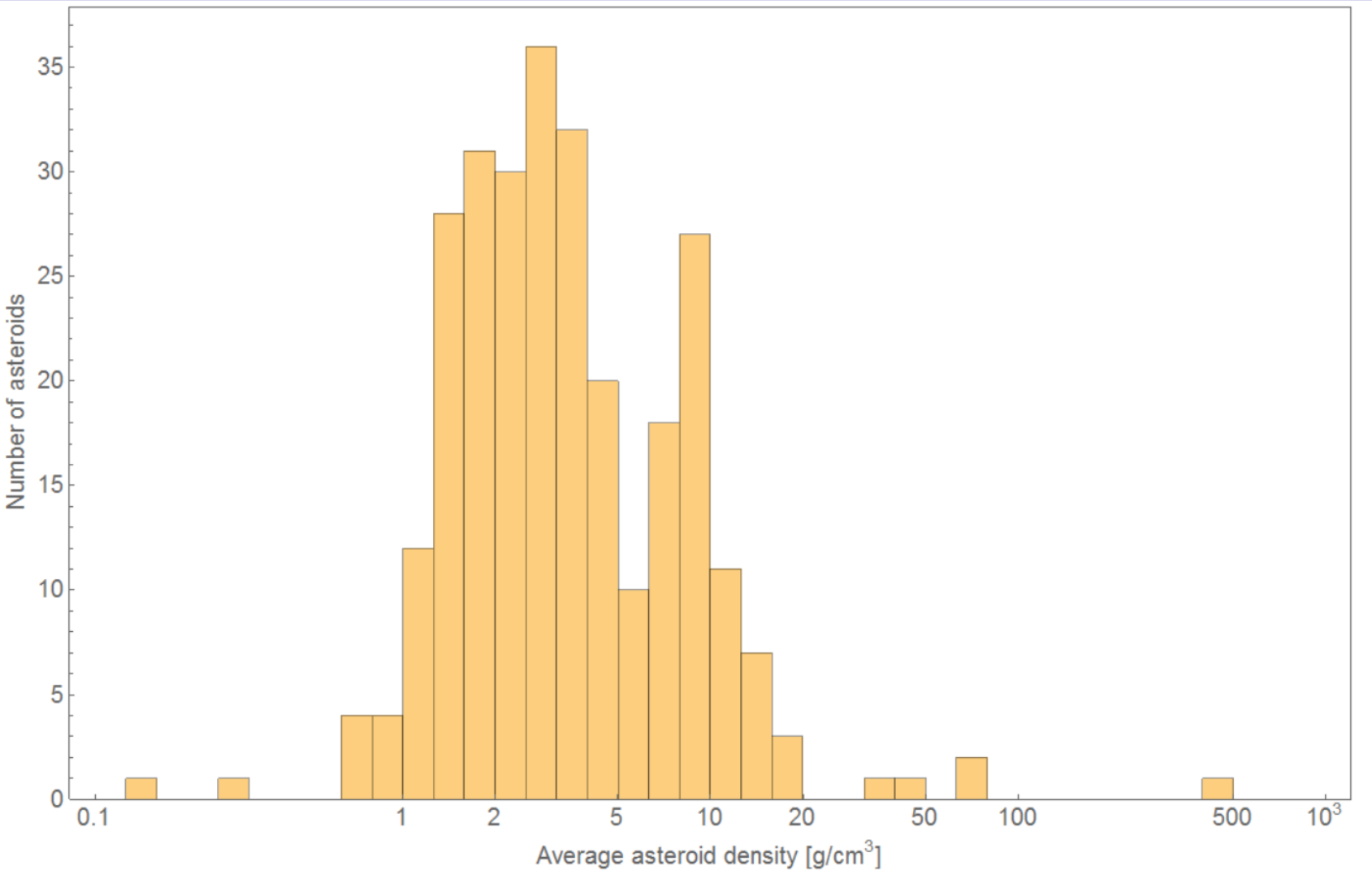
Planetoidy (pas asteroid)

Pomiary gęstości średnich planetoid

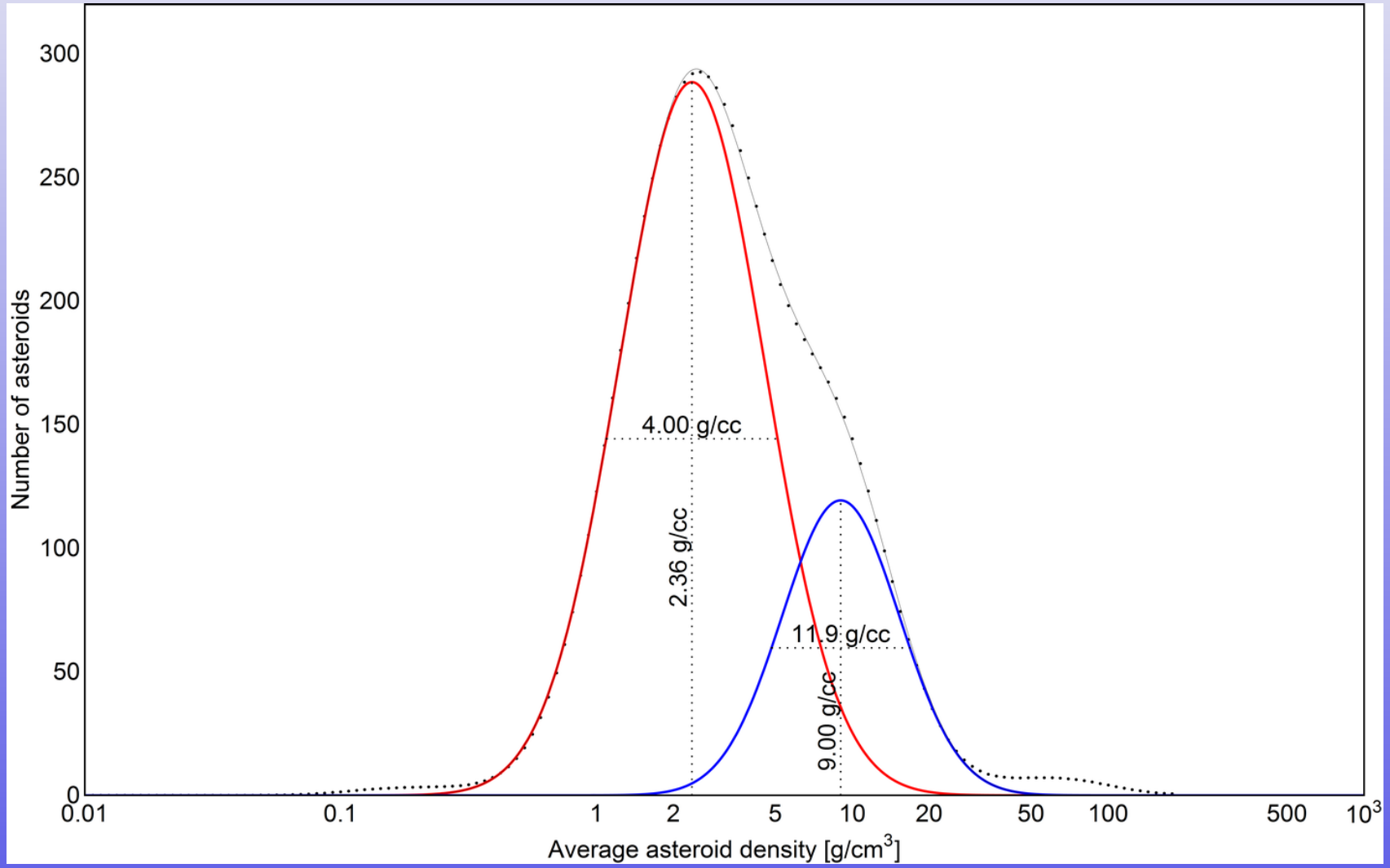
Dane: B. Carry, 320 gęstości, w tym 40 KBO's i komet



Histogram gęstości średnich planetoid



Fit Gaussowski

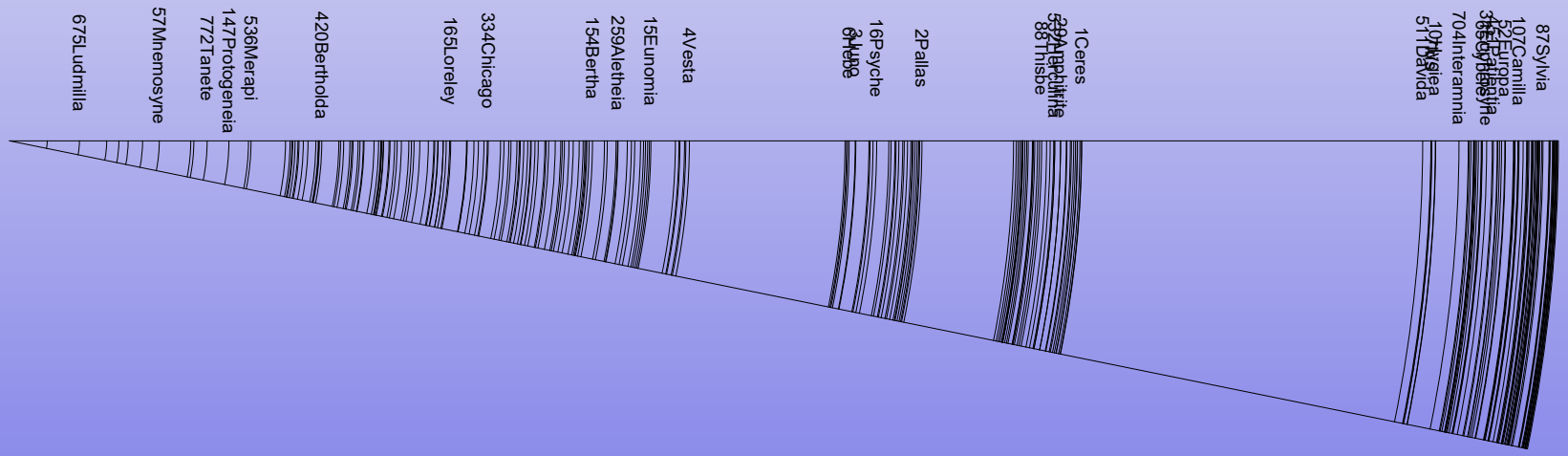


Interpretacja

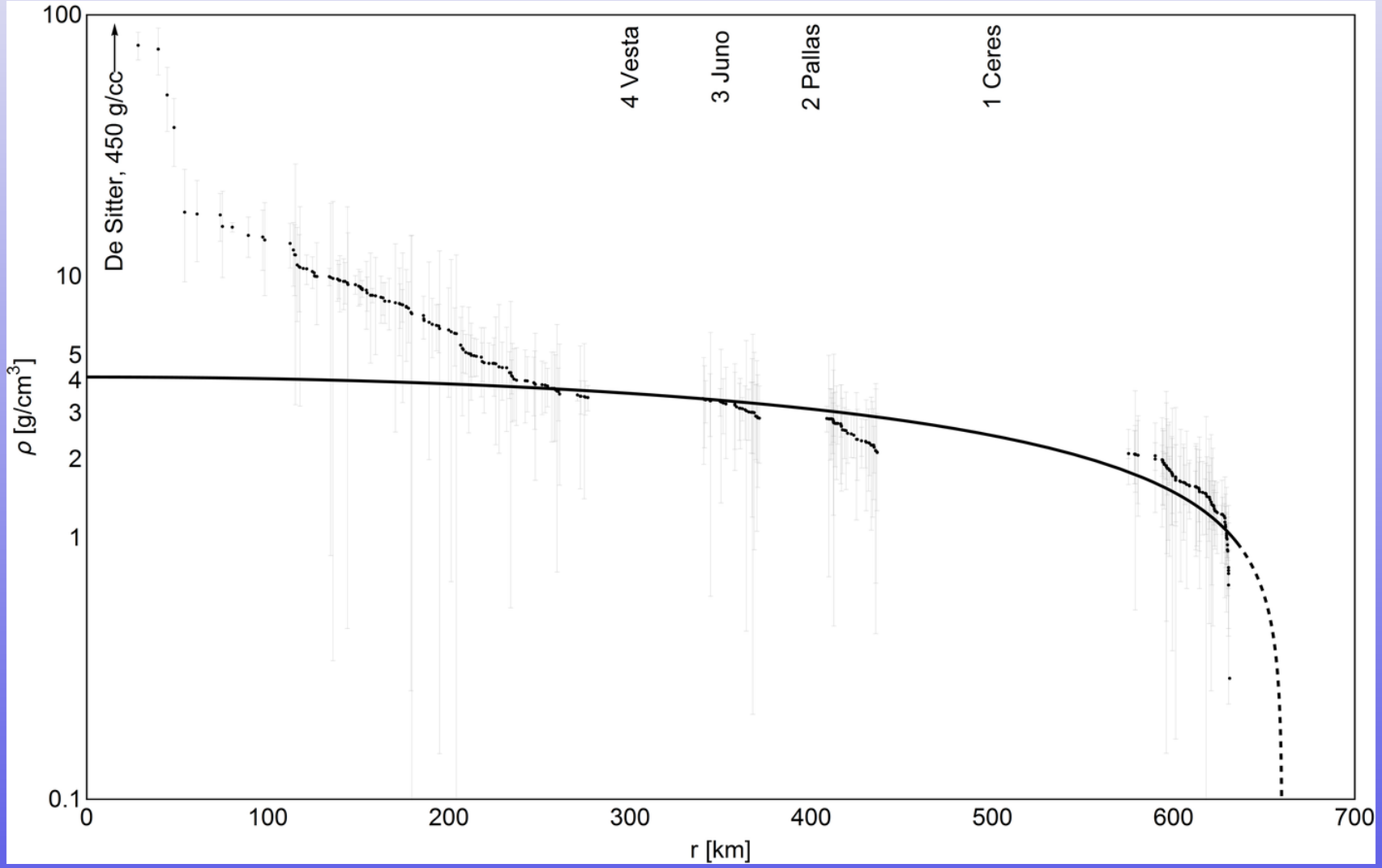
Obecność 2 pików w rozkładzie gęstości średniej obiektów pasa asteroid oznacza, iż materia uległa dyferencjacji (płaszcz + jądro Fe).
Problematyczne jest wyjaśnienie szerokości rozkładu „żelaznego" składnika, a jeszcze trudniejsze jest wyjasnienie jego położenia ($\bar{\rho} \simeq 9.0$ g/cm^3).

1. Żaden ze znalezionych meteorytów nie miał gęstości powyżej 7.7 g/cm^3.
2. Gęstość Fe 7.9 g/cm^3, Ni 8.9 g/cm^3.
3. spodziewany rozkład gęstości to „delta Diraca" dla ok. 7.5 g/cm^3
4. losowy wpływ nieobserwowanych obiektów zwykle używany do wytłumaczenia błędu systematycznego masy powoduje raczej poszerzenie niż przesunięcie piku w stronę dodatnią
5. obiekty zbudowane z czystego Ni lub „złota" ?

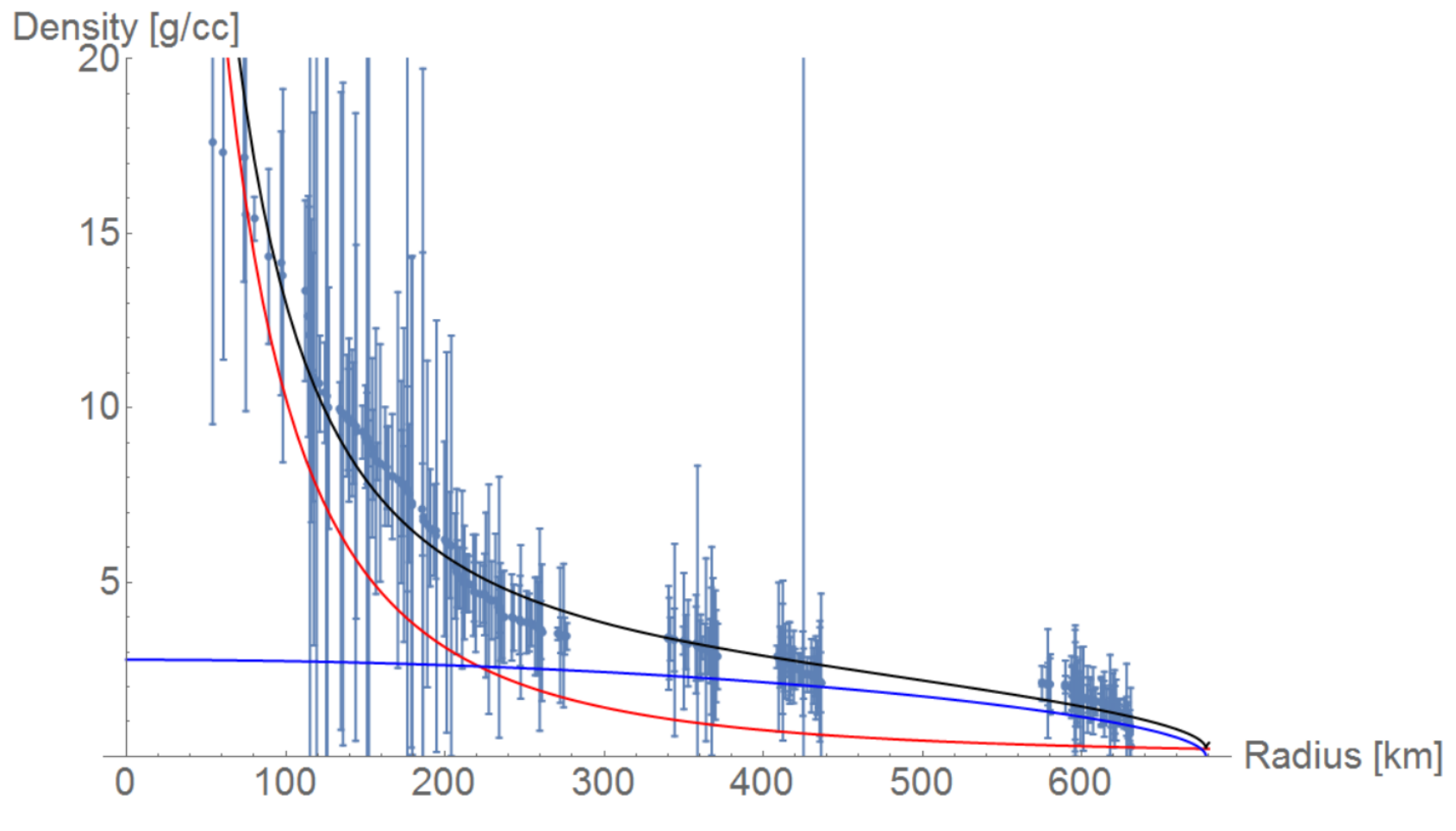
Rekonstrukcja



Rekonstrukcja



Rekonstrukcja



Wnioski końcowe

1. rozkład prawopodobieństwa gęstości średnich znanych obiektów astrofizycznych na wszystkich skalach ma postać zbliżoną do sumy rozkładów log-normalnych (Gaussian w $\lg \rho$)
2. powyższe pozostaje niewytłumaczone (mechanizm formowania?, wyróżniony stosunek gęstości?, powstawanie parami?, tw. graniczne?)
3. liczne przypadki anomalnie wysokich gęstości planetoid i egzoplanet są obecnie składane na karb błędów pomiarowych lub ignorowane
4. większa statystyka lub/i dokładniejsze pomiary mogą ujawnić nieznane klasy ciał niebieskich
5. zaprezentowane wyniki można interpretować jako wskazówkę obecności ciemnej materii w układach planetarnych
6. prosta misja kosmiczna do kilku „anomalnych" obiektów jest w stanie rozwikłać sytuację

Wnioski końcowe

1. rozkład prawopodobieństwa gęstości średnich znanych obiektów astrofizycznych na wszystkich skalach ma postać zbliżoną do sumy rozkładów log-normalnych (Gaussian w $\lg \rho$)
2. powyższe pozostaje niewytłumaczone (mechanizm formowania?, wyróżniony stosunek gęstości?, powstawanie parami?, tw. graniczne?)
3. liczne przypadki anomalnie wysokich gęstości planetoid i egzoplanet są obecnie składane na karb błędów pomiarowych lub ignorowane
4. większa statystyka lub/i dokładniejsze pomiary mogą ujawnić nieznane klasy ciał niebieskich
5. zaprezentowane wyniki można interpretować jako wskazówkę obecności ciemnej materii w układach planetarnych
6. prosta misja kosmiczna do kilku „anomalnych" obiektów jest w stanie rozwikłać sytuację

Wnioski końcowe

1. rozkład prawopodobieństwa gęstości średnich znanych obiektów astrofizycznych na wszystkich skalach ma postać zbliżoną do sumy rozkładów log-normalnych (Gaussian w $\lg \rho$)
2. powyższe pozostaje niewytłumaczone (mechanizm formowania?, wyróżniony stosunek gęstości?, powstawanie parami?, tw. graniczne?)
3. liczne przypadki anomalnie wysokich gęstości planetoid i egzoplanet są obecnie składane na karb błędów pomiarowych lub ignorowane
4. większa statystyka lub/i dokładniejsze pomiary mogą ujawnić nieznane klasy ciał niebieskich
5. zaprezentowane wyniki można interpretować jako wskazówkę obecności ciemnej materii w układach planetarnych
6. prosta misja kosmiczna do kilku „anomalnych" obiektów jest w stanie rozwikłać sytuację

Wnioski końcowe

1. rozkład prawopodobieństwa gęstości średnich znanych obiektów astrofizycznych na wszystkich skalach ma postać zbliżoną do sumy rozkładów log-normalnych (Gaussian w $\lg \rho$)
2. powyższe pozostaje niewytłumaczone (mechanizm formowania?, wyróżniony stosunek gęstości?, powstawanie parami?, tw. graniczne?)
3. liczne przypadki anomalnie wysokich gęstości planetoid i egzoplanet są obecnie składane na karb błędów pomiarowych lub ignorowane
4. większa statystyka lub/i dokładniejsze pomiary mogą ujawnić nieznane klasy ciał niebieskich
5. zaprezentowane wyniki można interpretować jako wskazówkę obecności ciemnej materii w układach planetarnych
6. prosta misja kosmiczna do kilku „anomalnych" obiektów jest w stanie rozwikłać sytuację

Wnioski końcowe

1. rozkład prawopodobieństwa gęstości średnich znanych obiektów astrofizycznych na wszystkich skalach ma postać zbliżoną do sumy rozkładów log-normalnych (Gaussian w $\lg \rho$)
2. powyższe pozostaje niewytłumaczone (mechanizm formowania?, wyróżniony stosunek gęstości?, powstawanie parami?, tw. graniczne?)
3. liczne przypadki anomalnie wysokich gęstości planetoid i egzoplanet są obecnie składane na karb błędów pomiarowych lub ignorowane
4. większa statystyka lub/i dokładniejsze pomiary mogą ujawnić nieznane klasy ciał niebieskich
5. zaprezentowane wyniki można interpretować jako wskazówkę obecności ciemnej materii w układach planetarnych
6. prosta misja kosmiczna do kilku „anomalnych" obiektów jest w stanie rozwikłać sytuację

Wnioski końcowe

1. rozkład prawopodobieństwa gęstości średnich znanych obiektów astrofizycznych na wszystkich skalach ma postać zbliżoną do sumy rozkładów log-normalnych (Gaussian w $\lg \rho$)
2. powyższe pozostaje niewytłumaczone (mechanizm formowania?, wyróżniony stosunek gęstości?, powstawanie parami?, tw. graniczne?)
3. liczne przypadki anomalnie wysokich gęstości planetoid i egzoplanet są obecnie składane na karb błędów pomiarowych lub ignorowane
4. większa statystyka lub/i dokładniejsze pomiary mogą ujawnić nieznane klasy ciał niebieskich
5. zaprezentowane wyniki można interpretować jako wskazówkę obecności ciemnej materii w układach planetarnych
6. prosta misja kosmiczna do kilku „anomalnych” obiektów jest w stanie rozwikłać sytuację

Slajdy dodatkowe

4 sposoby rekonstrukcji rozkładu prawdopodobieństwa

1. Maksymalizacja log-likelihood:

$$\mathcal{L}(\bar{\rho}_0, \sigma) = \sum_{i=1}^{N} \ln P_i, \qquad P_i = P(\bar{\rho}_i; \bar{\rho}_0, \sigma)$$

2. Gaussian kernel density estimate:

$$\sum_{k=1}^{N} \frac{\exp\left(-\frac{(\lg\rho - \lg\bar{\rho}_k)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sqrt{2\pi\sigma^2}},$$

3. Error distribution stacking

$$\sum_{k=1}^{N} \frac{\exp\left(-\frac{(\lg\rho - \lg\bar{\rho}_k)^2}{2\sigma_k^2}\right)}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2}},$$

4. Histogram fitting