

*Elementy Astronomii i Astrofizyki*  
*- skrót z wykładu XI*

*Krzysztof Radziszewski*  
*Instytut Astronomiczny UWr*

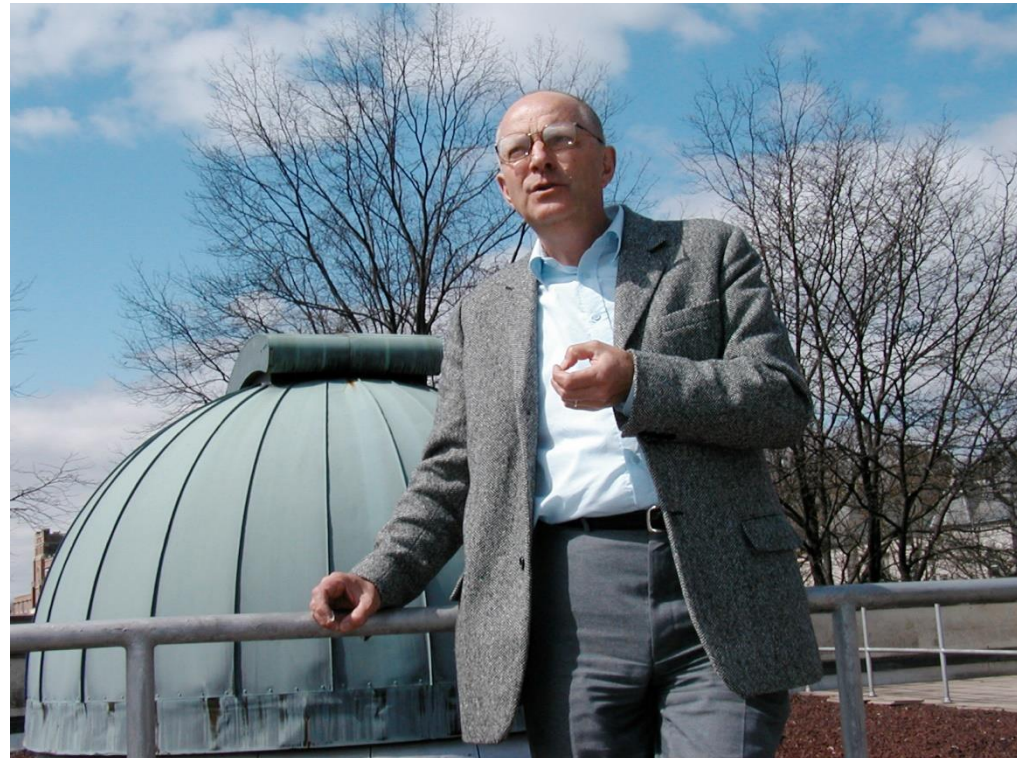
*Wykład XI - Wrocław, 7 maja 2026 r.*

# Galaktyka - ciemna materia

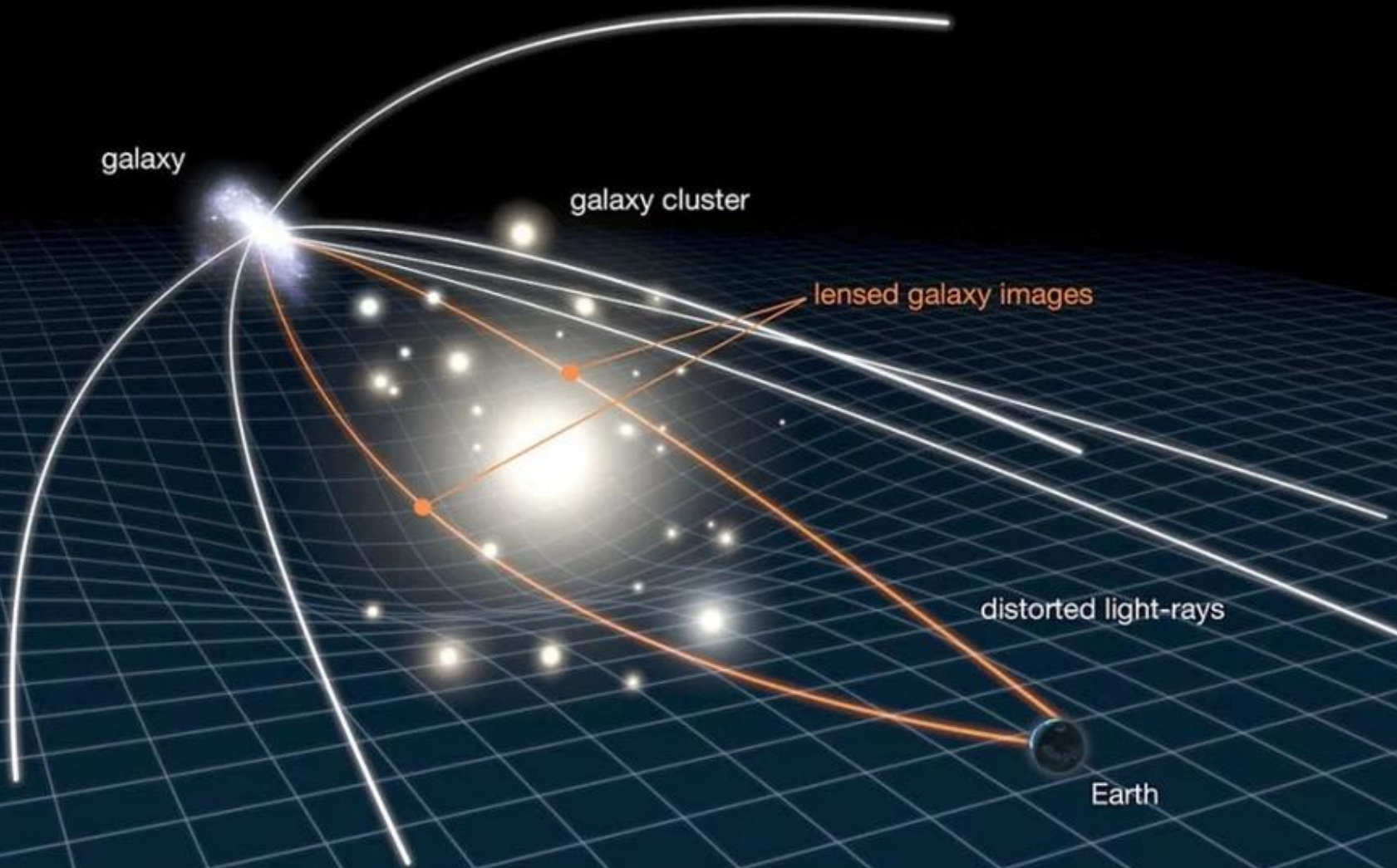
Ważnym aspektem była weryfikacja hipotezy, czy obiekty takie jak słabo świecące gwiazdy lub planety, określane jako MACHO's, mogą wytłumaczyć obserwowaną krzywą rotacji Galaktyki. Warszawski astronom, prof. Bohdan Paczyński, zaproponował wykorzystanie efektu mikrosoczewkowania grawitacyjnego. Zorganizował ambitny projekt obserwacyjny OGLE, który polegał na równoczesnym monitorowaniu zmian jasności dużej liczby gwiazd.

Odkryte przypadki wyjaśnień spowodowanych przez MACHO's, nie pozwoliły uznać, aby ich łączny wpływ miał istotne znaczenie dla kształtu krzywej rotacji.

Projekt jest nadal realizowany przez zespół prof. Andrzeja Udalskiego i dostarcza bezcenny materiał obserwacyjny do badań nad strukturą Galaktyki, zmiennością gwiazd i poszukiwania egzoplanet.



# Ciemna materia - soczewkowanie grawitacyjne



# OGLE

## Obserwatorium Las Campanas w Chile

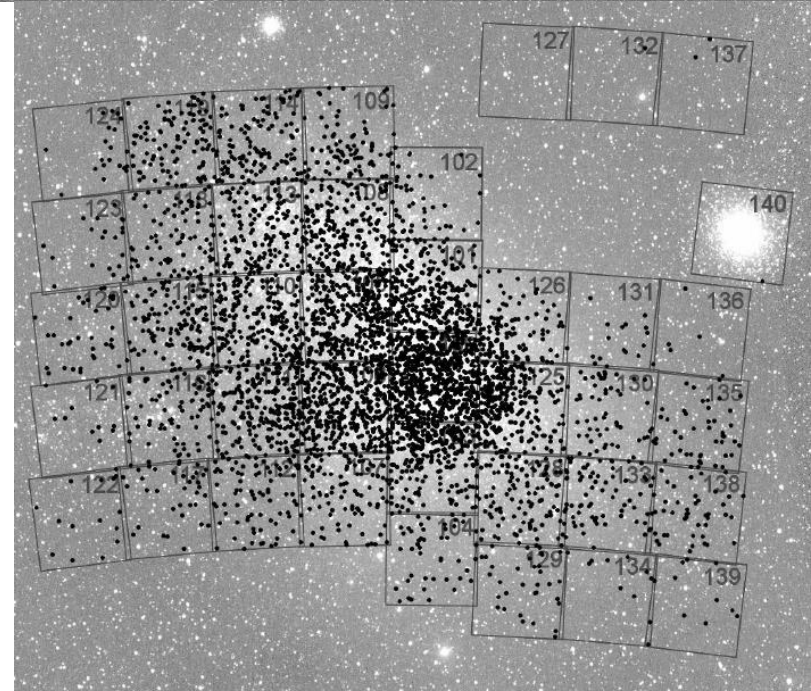
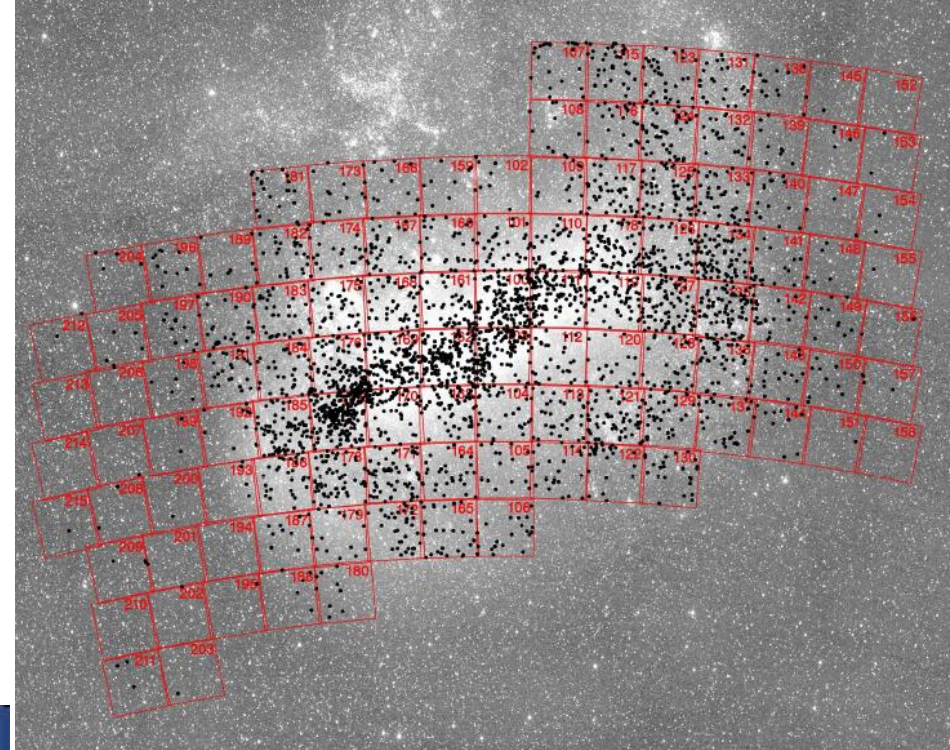
29°00'35"S 70°42'06"W



# OGLE

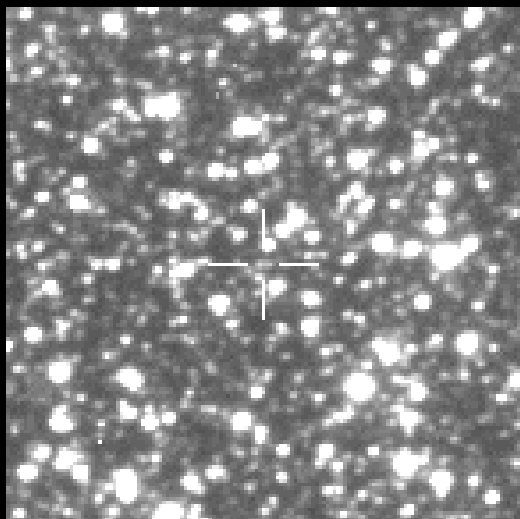
Optical  
Gravitational  
Lensing  
Experiment

OGLE - licząc od początku projektu (od kwietnia 1992) obejmuje ponad 8 tysięcy nocy obserwacyjnych.



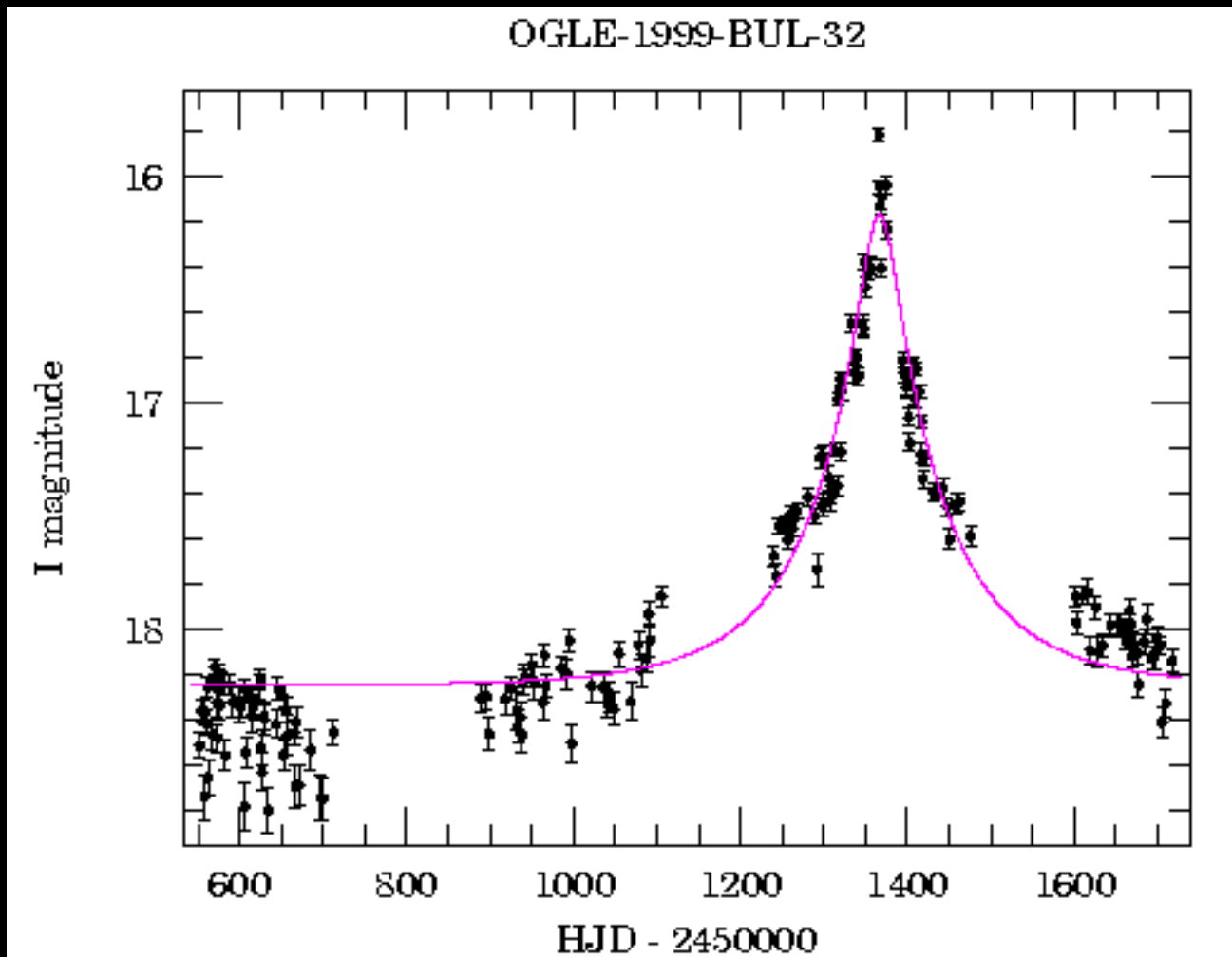
# Ciemna materia - mikrosoczewkowanie grawitacyjne

## OGLE-1999-BUL-32

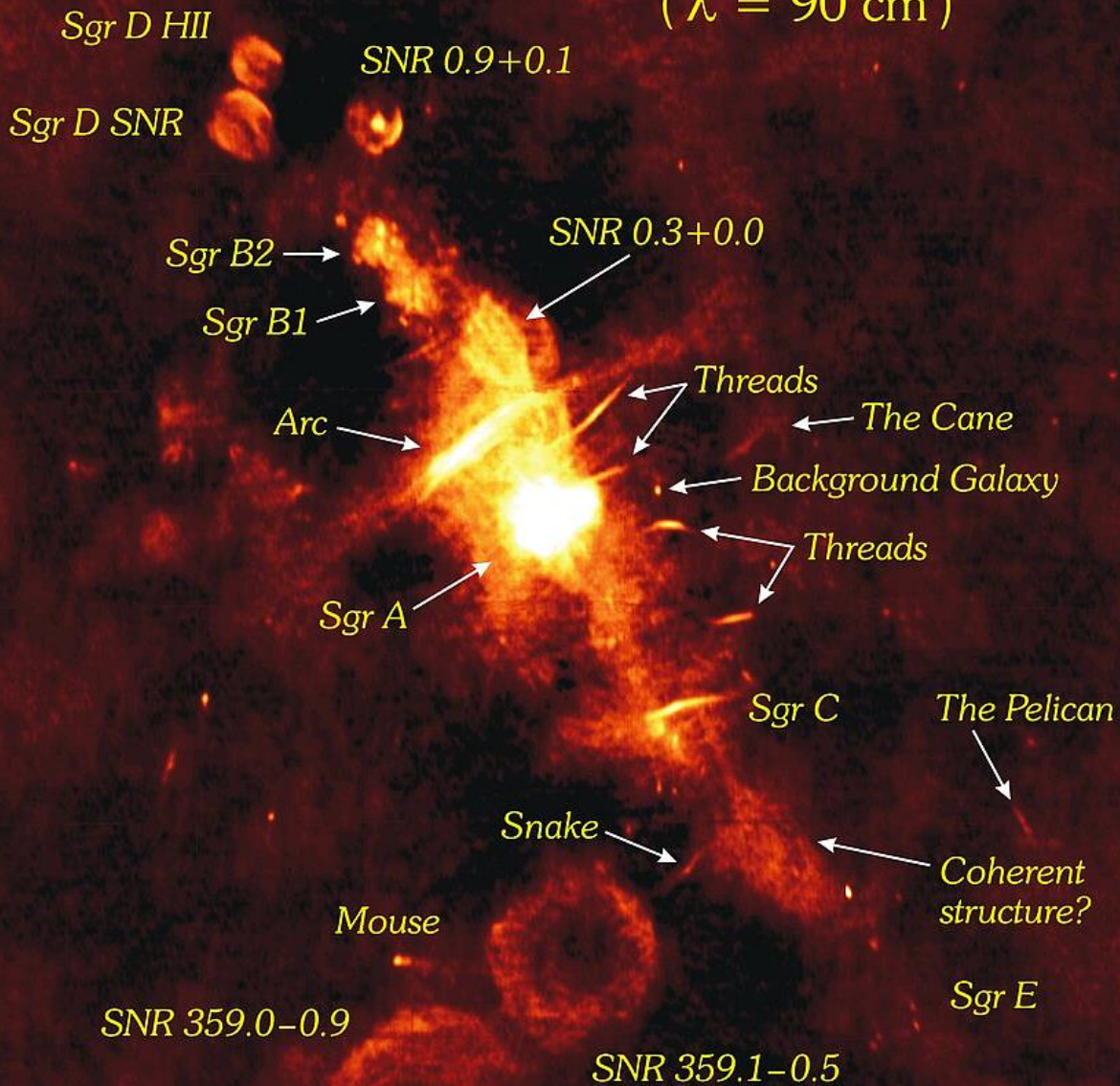


Field: BUL\_SC33  
Star No: 164492  
RA (J2000) 18:05:05.34  
Dec (J2000) -28:34:42.30

MACHO 99-BLG-22



# Wide-Field VLA Radio Image of the Galactic Center ( $\lambda = 90$ cm)



# Galaktyka - centrum Galaktyki

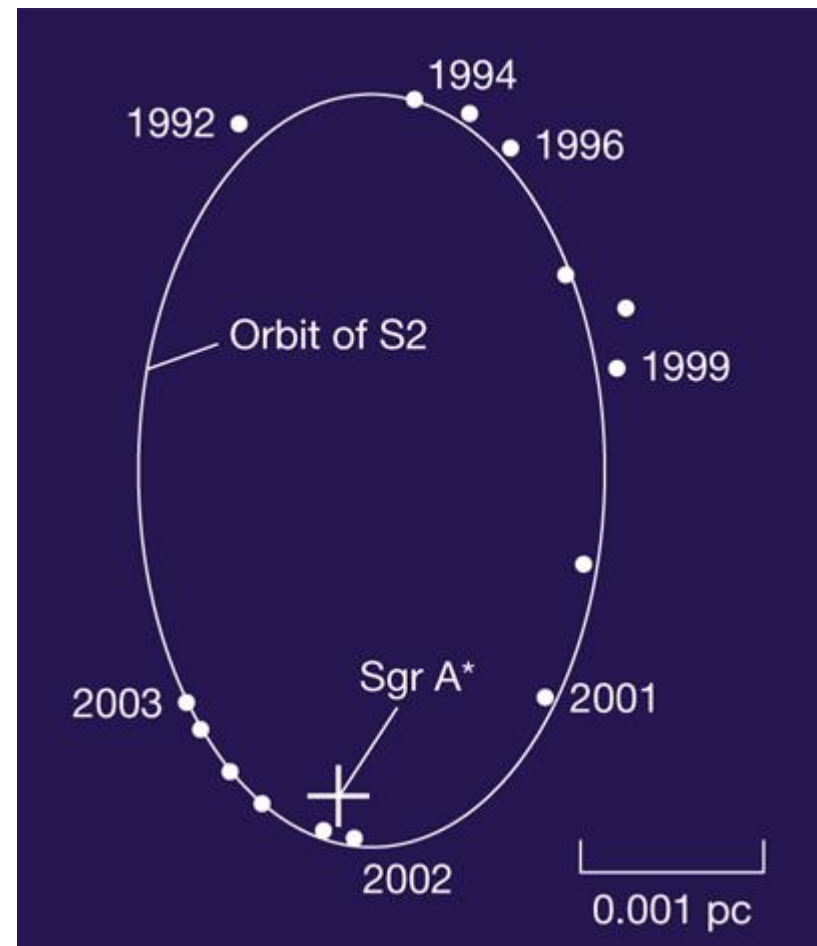
Centrum Galaktyki znajduje się w odległości 8.54 kpc od nas, w gwiazdozbiorze Strzelca na deklinacji  $-29^\circ$ . Oznacza to, że w Polsce jedynie w okresie letnim wznosi się maksymalnie  $10^\circ$  nad horyzontem, co praktycznie uniemożliwia prowadzenie obserwacji w naszym kraju. Dodatkowo, duża koncentracja pyłu na tym kierunku powoduje, że w zakresie widzialnym obserwujemy jedynie fragmenty zgrubienia galaktycznego.

Do dyspozycji mamy podczerwień, zakres radiowy oraz twarde promieniowanie rentgenowskie. Zdjęcie wykonane w zakresie radiowym przedstawia wiele ciekawych struktur, z których największą emisję wykazuje źródło SaggitariusA. Jego najbardziej zwarta część, oznaczana jako SgrA\*, utożsamiana jest z supermasywną czarną dziurą.

Analiza ruchu 28 gwiazd wokół centrum Galaktyki pozwoliła na wyznaczenie masy „naszej” supermasywnej czarnej dziury ( $4.3 \cdot 10^6 M_\odot$ ).

## Galaktyka - centrum Galaktyki

- Obserwacje gwiazdy S2 (właściwie S0-2, typu widmowego B1V) wykonane np. przy użyciu VLT, pozwoliły potwierdzić ogólną teorię względności Einsteina, badając precesję orbity w silnym polu grawitacyjnym (tzw. precesja Schwarzschilda).
- Obserwacje orbity gwiazdy S2 pozwoliły również na wyznaczenie masy supermasywnej czarnej dziury w centrum naszej Galaktyki.



$$P = 15.2 \text{ lat}$$

$$e = 0.87$$

$$s_{\text{per}} = 17 \text{ g. św.}$$

$$\text{BH} = 4.3 \cdot 10^6 M_{\odot}$$

$$1 \text{ godz. św.} \sim 10^9 \text{ km}$$

## Błyski gamma - debata a.d. 1995

Pomimo bardzo mocnych przesłanek za kosmologicznym pochodzeniem błysków, wciąż liczna była grupa zwolenników modeli lokalnych. W związku z gorącymi polemikami, jakie wybuchwały na konferencjach i na łamach czasopism, postanowiono rozstrzygnąć sprawę w formie otwartej debaty.



Odbyła się ona w kwietniu 1995 roku w Smithsonian Institution w Waszyngtonie, a jako główni oponenti zasiedli do niej wspomniany już polski astrofizyk Bohdan Paczyński, zwolennik hipotezy kosmologicznej, oraz Don Lamb, przedstawiciel hipotezy lokalnej.

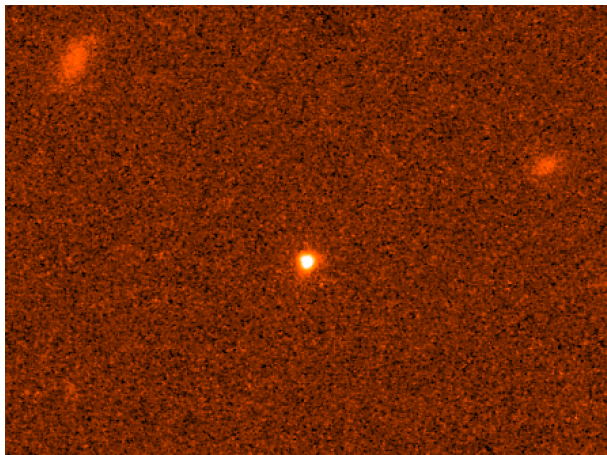
Odbyło się to w 75. rocznicę historycznej debaty stoczonej pomiędzy H. Curtisem a H. Shapleyem, która dotyczyła natury mgławic spiralnych, o których dzisiaj wiemy, że są odległymi galaktykami. Debata owa została rozstrzygnięta definitywnie dopiero trzy lata później, przez odkrycie ekspansji Wszechświata przez Edwina Hubble'a.

Podobnie w wypadku błysków gamma, po samej debacie problem wydawał się nadal nierozstrzygnięty: publiczność podzieliła się głosami równo po połowie. I podobnie jak wówczas, rozstrzygnięcie przyniosły obserwacje następnych lat.

# Błyski gamma - debata a.d. 1995

W maju 1997 roku została po raz pierwszy dostrzeżona (dla błysku GRB 970508) poświata optyczna, która pozwoliła na zmierzenie przesunięcia ku czerwieni, wskazującego na kosmologiczną odległość obiektu.

Zadało to definitywny cios hipotezie lokalnej. Kosmologiczne odległości uczyniły z błysków gamma jedne z najjaśniejszych obserwowanych obiektów we Wszechświecie.



Poświata zarejestrowana 30 dni po błysku GRB 970508.

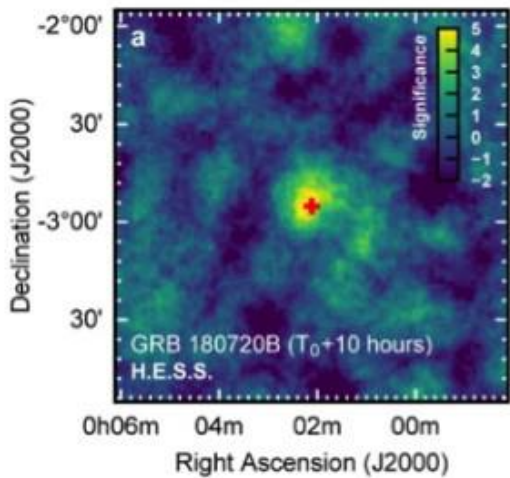
(BeppoSAX - X-ray)

GRB 970508 - błysk gamma trwający ~15 sekund. Zarejestrowany również w zakresie fal dłuższych niż gamma (rentgenowskie, ultrafioletowe, optyczne, podczerwone, radiowe). Przesunięcie ku czerwieni:  $0.835 < z < 2.3$ .

Błysk/poświata zaobserwowany był również przez Teleskop kosmiczny Comptona i sondę kosmiczną Ulysses.

Odległość do błysku - przynajmniej 6 mld lat świetlnych. Pierwszy przypadek, kiedy udało się w przybliżeniu określić odległość błysku gamma.

# Błyski gamma - debata a.d. 1995



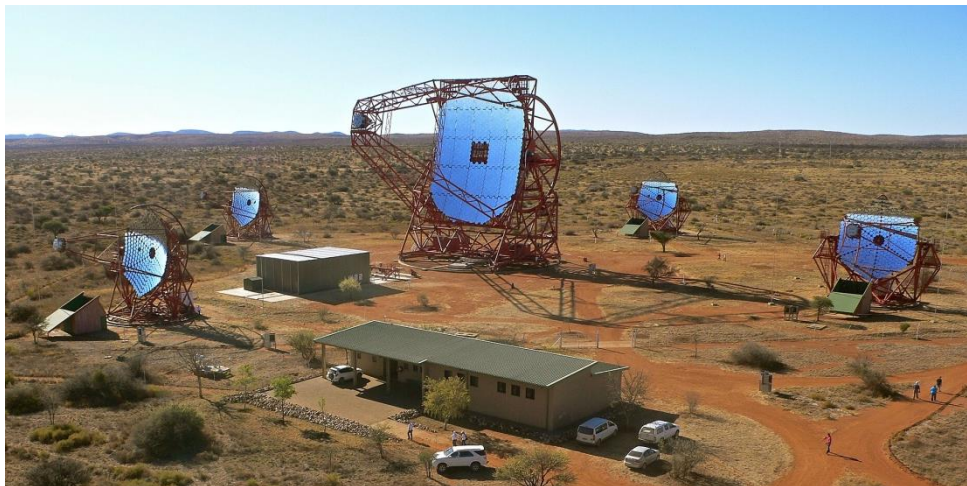
GRB 180720B w zakresie bardzo wysokich energii. Czerwony krzyż to lokalizacja źródła optycznego. (źródło: H.E.S.S.)

- krótkie GRB  $< 2$  s ( $\sim 30\%$ )
- długie GRB  $> 2$  s ( $\sim 70\%$ )
- bardzo długie GRB  $> 10\,000$  s



Przez długi czas po błysku gamma obserwuje się poświatę w zakresie rentgenowskim, optycznym i radiowym. Krótki błysk gamma to fotony  $\sim 10^6$  razy bardziej energetyczne niż fotony św. widzialnego. Zakres VHE (b. wys. energii) to fotony o energii  $\sim 10^{11}$  razy większej.

20 lipca 2018 roku obserwatorium satelitarne Fermi, a parę sekund później obserwatorium satelitarne Swift, zarejestrowały błysk gamma trwający pięćdziesiąt sekund, (GRB 180720B). Teleskopy H.E.S.S. zarejestrowały poświatę 10 godzin później.



Zakres energii fotonów rejestrowanych przez *High Energy Stereoscopic System* (H.E.S.S.): 0.03 - 100 TeV. (Namibia)

# Układ Słoneczny

Elementy składowe Układu Słonecznego:

- Słońce
- planety
- planety karłowate
- księżyce (satelity planet, planet karłowatych, planetoid)
- planetoidy / asteroidy
- komety
- meteoroidy
- pył i gaz międzyplanetarny
  
- Pas Kuipera (30-100 AU)
- Obłok Oorta (300-100 000 AU) - *twór hipotetyczny*

Do Pasa Kuipera należą np. planety karłowate: Pluton, Eris, Haumea, Makemake.

Wśród planet wyróżniamy:

- planety skaliste (grupy ziemskiej)
- gazowe olbrzymy

# Układ Słoneczny

Planety okrążają gwiazdę. Nie zachodzą w nich reakcje syntezy termojądrowej. Są kulistego kształtu. Świecą światłem odbitym (gwiazdy centralnej). „Czyszczą” grawitacyjnie sąsiedztwo swojej orbity.

Planeta karłowata nie może być satelitą planety. Posiada kulisty kształt, ale w odróżnieniu od planety nie oczyściła sąsiedztwa swojej orbity z innych obiektów o porównywalnych rozmiarach.

Planetoidy i kometry to obiekty o rozmiarach do kilkuset kilometrów (średnicy), o stałej powierzchni i (często) nieregularnym kształcie.

Własnością komet jest duża zawartość lodu - zarówno wodnego, jak i będącego zamrożonymi innymi gazami.

Meteoroidy - drobne ciała (do kilkunastu metrów średnicy) poruszające się w polu grawitacyjnym Słońca. Pozostałości po przelotach (blisko Słońca) komet lub zderzeń - na przykład planetoid.

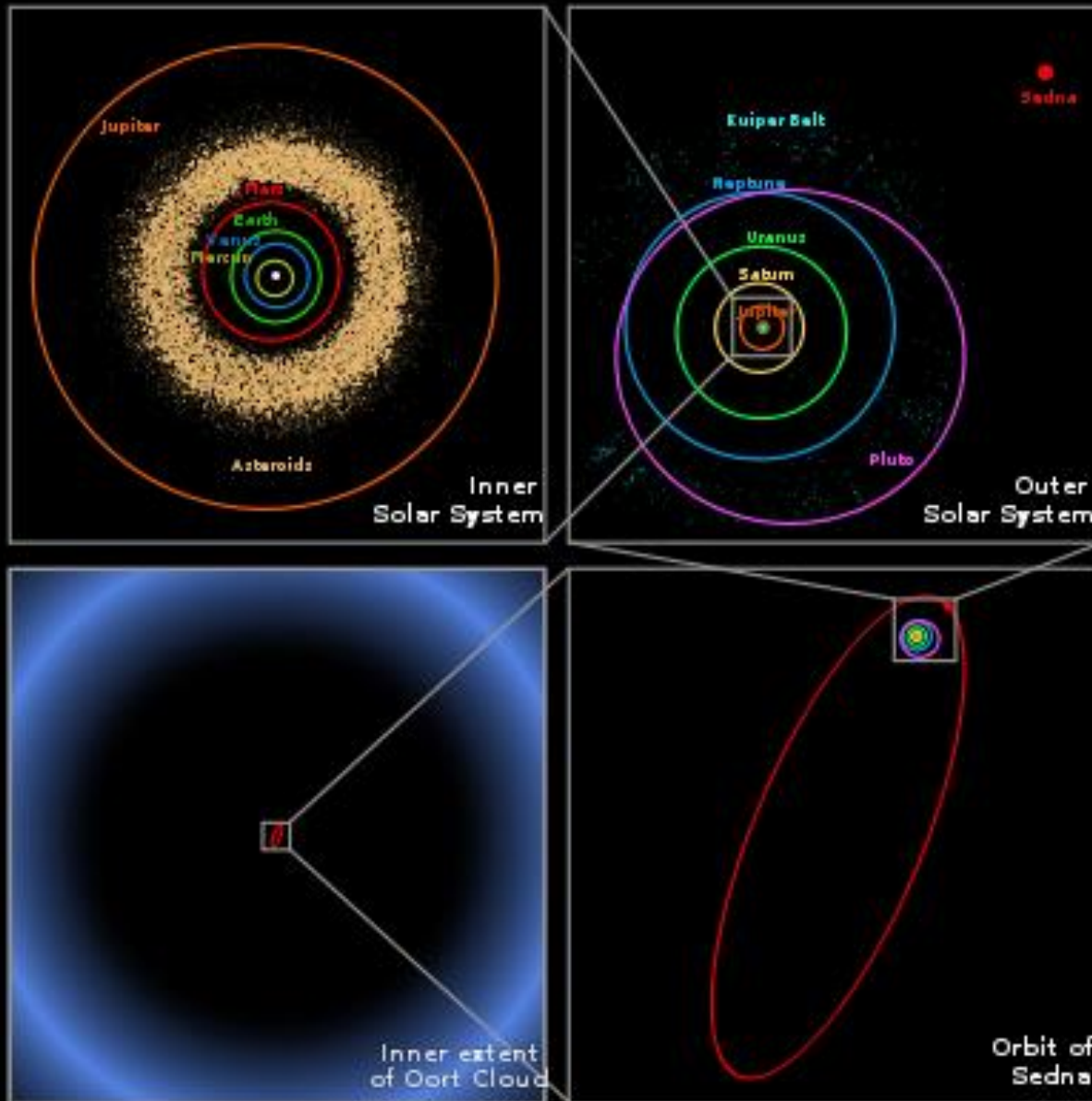
# Układ Słoneczny

Płaszczyzny orbit wszystkich planet Układu Słonecznego zawierają się w kącie o rozwarości kilku stopni. Inaczej mówiąc, są „prawie” w jednej płaszczyźnie.

W 2006 roku Pluton został „zdetronizowany” (przez Międzynarodową Unię Astronomiczną) z miana planety i obecnie jest zaliczany do grupy planet karłowatych.

Przyczyną tej „detronizacji” było odkrycie w podobnej odległości od Słońca innych obiektów o porównywalnych rozmiarach i orbitach, tworzących Pas Kuipera.

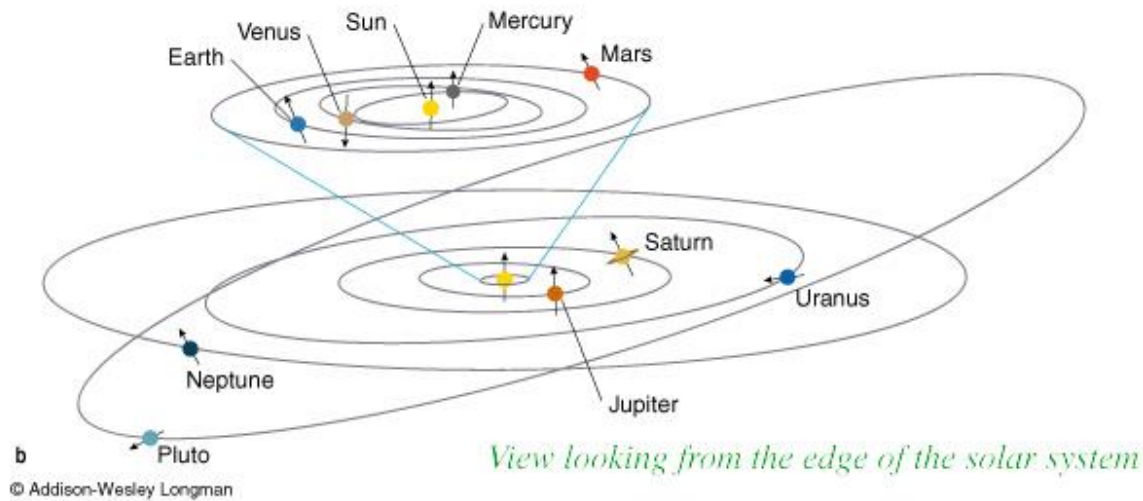
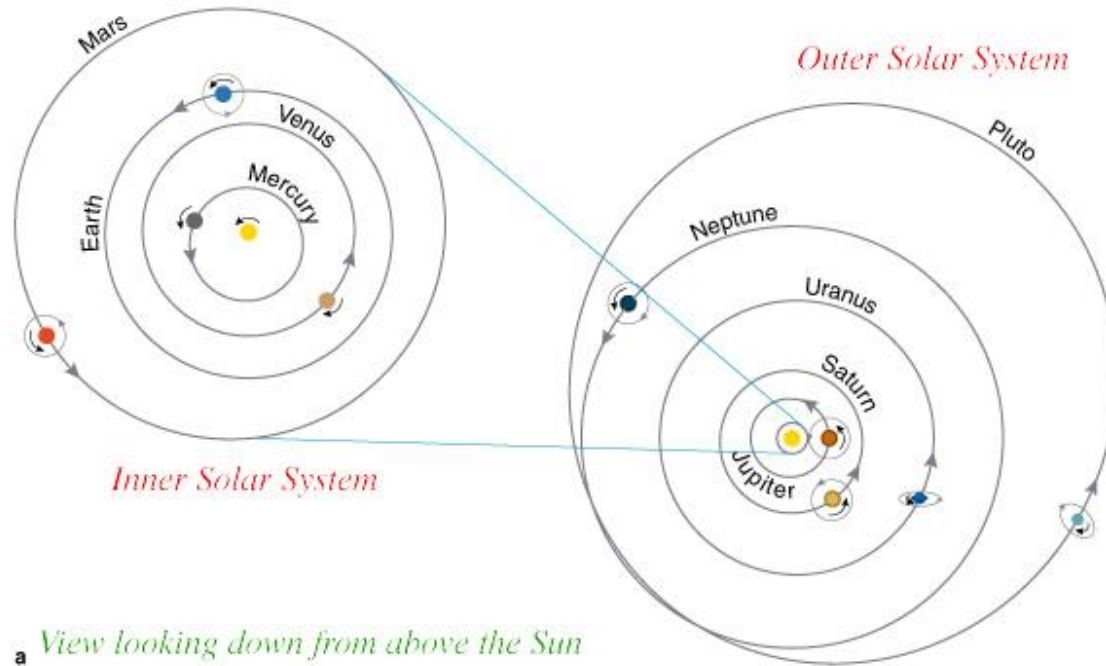
# Układ Słoneczny - orbity planet i planet karłowatych



Sedna - duża planetoida transneptunowa, poruszająca się po bardzo wydłużonej orbicie.

- półoś wielka = 552 AU
- aphelium 1027 AU
- peryhelium 76 AU

# Układ Słoneczny - orbity



# Układ Słoneczny - planety

	Mercury	Venus	Earth	Mars	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Equatorial diam. (km)	4879	12,104	12,756	6792	142,984	120,536	51,118	49,528
Rotation period (equat.)	58 d 15 h 30m	243 d 0 h 36m (R)	23 h 56m	24 h 37m	9 h 50m	10 h 14m	17 h 14m (R)	16 h 7m
Density (water = 1)	5.43	5.24	5.52	3.91	1.33	0.69	1.29	1.64
Mass (Earth = 1)	0.055	0.814	1	0.11	317.8	95.2	14.53	17.14
Surface gravity (Earth = 1)	0.378	0.903	1	0.38	2.69	1.07	0.91	1.14
Equatorial inclination (deg)	0.1	177.3	23.5	25.2	3.1	26.7	97.8	28.3
Orbital period	87.97d	224.7 d	365.25d	687 d	11.86y	29.46y	84.01y	164.79y
Av. distance from Sun (million km)	57.9	108.2	149.6	227.9	778.3	1427	2871	4497.1
Orbital eccentricity	0.2	0.007	0.0167	0.093	0.048	0.056	0.046	0.0097
Av. orbital velocity (km/s)	47.88	35.02	29.8	24.1	13.06	9.65	6.81	5.43
Average temp. (°C)	350 (day), -170 (nt)	467	7	-63	-148	-178	-218	-220
Atmosphere	Potassium, sodium	Carbon dioxide	Nitrogen, oxygen	Carbon dioxide	Hydrogen, helium	Hydrogen, helium	Hydrogen, helium	Hydrogen, helium
Satellites	0	0	1	2	<del>65</del>	<del>62</del>	<del>27</del>	<del>13</del>

R = retrograde; d = days; h = hours; m = minutes

95-101

146-292 28

16

# Układ Słoneczny - planety

Planety - ze względu na podobieństwa - możemy podzielić na grupę planet skalistych (typu ziemskiego) i grupę gazowych olbrzymów (planet typu jowiszowego).

Część tych podobieństw wynika bezpośrednio z orbit (odległości od Słońca). Merkury, Wenus, Ziemia i Mars znajdują się bliżej, więc ich okresy obiegu są krótsze, a prędkości orbitalne większe niż w przypadku Jowisza, Saturna, Urana i Neptuna. Ze względu na silniejsze oddziaływanie grawitacyjne Słońca, okresy obrotu planet grupy ziemskiej są dłuższe.

Oprócz tego, planety typu ziemskiego (skaliste), w porównaniu do planet olbrzymów (typu jowiszowego), są mniejsze i charakteryzują się mniejszą masą, za to ich średnia gęstość jest większa.

Gazowe olbrzymy mają dużo więcej satelitów niż planety skaliste (silniejsza grawitacja), charakteryzują się również obecnością pierścieni (planety skaliste nie posiadają pierścieni).