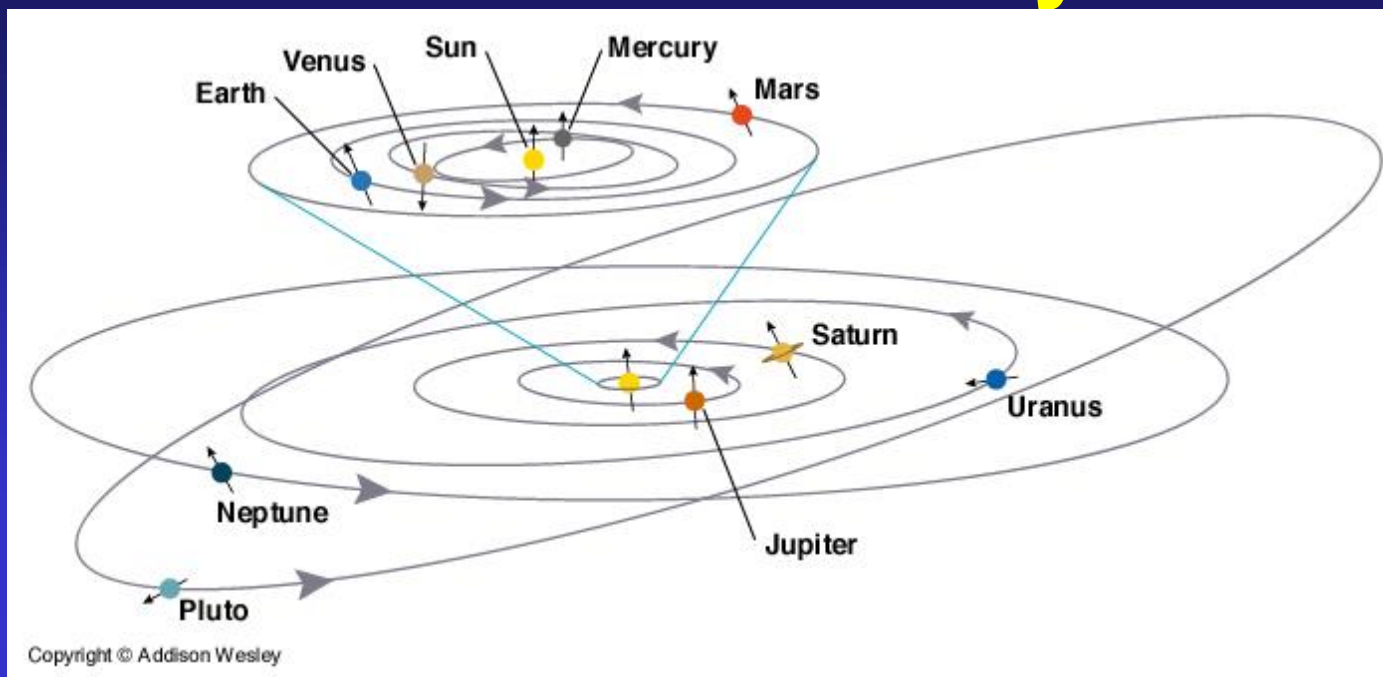


Ewolucja Wszechświata

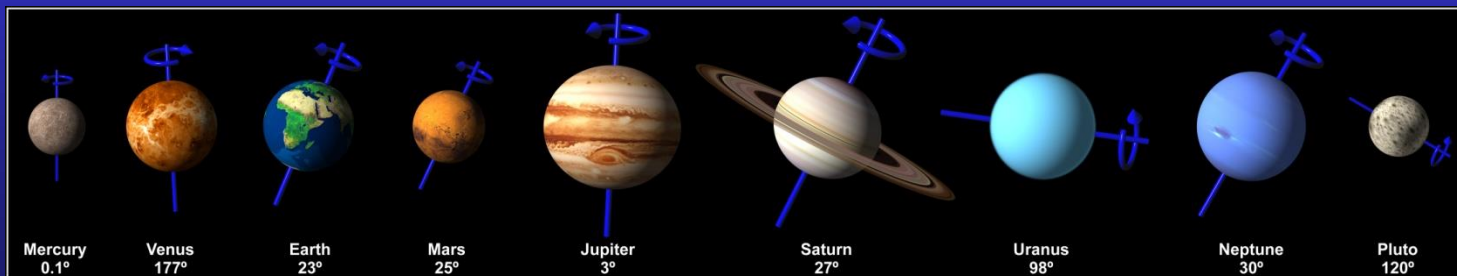
Wykład 14

Ewolucja układu słonecznego Planety pozasłoneczne

Układ słoneczny



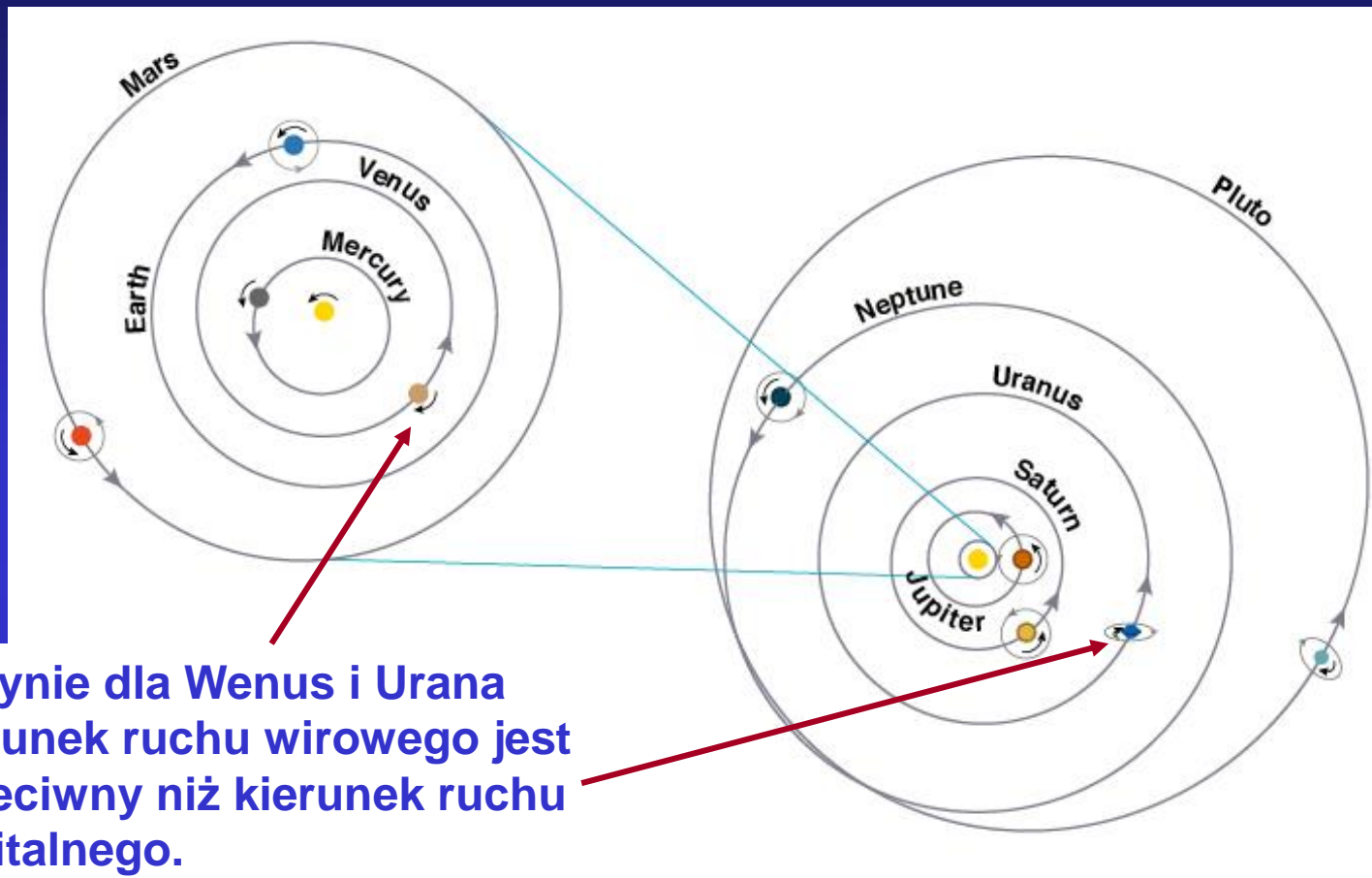
Słońce jest okrążane przez 8 planet, które poruszają po prawie kołowych orbitach położonych mniej więcej w jednej płaszczyźnie, która pokrywa się w zasadzie z płaszczyzną równika słonecznego; wszystkie planety poruszają się w tym samym kierunku, zgodnym z kierunkiem obrotu Słońca.



Obliquity of the Nine Planets

© Copyright 1999 by Calvin J. Hamilton

Układ słoneczny



Jedynie dla Wenus i Urana kierunek ruchu wirowego jest przeciwny niż kierunek ruchu orbitalnego.

Średnie odległości planet od Słońca zawierają się w granicach od około 0,4 j.a. (Merkury) do około 30 j.a. (Neptun)

*j.a. (jednostka astronomiczna)
- średnia odległość Ziemi od Słońca (ok. 150 mln km)*

Model układu słonecznego

Średnica Słońca: 11cm

Planeta	Średnica	Odległość od Słońca
Merkury	0,4 mm	4,5 m
Wenus	0,95 mm	8,5 m
Ziemia	1 mm	11,7 m
Mars	0,53 mm	17,8 m
Jowisz	1,1 cm	60,8 m
Saturn	0,95 cm	111,6 m
Uran	0,4 cm	224 m
Neptun	0,38 cm	351 m

Układ słoneczny

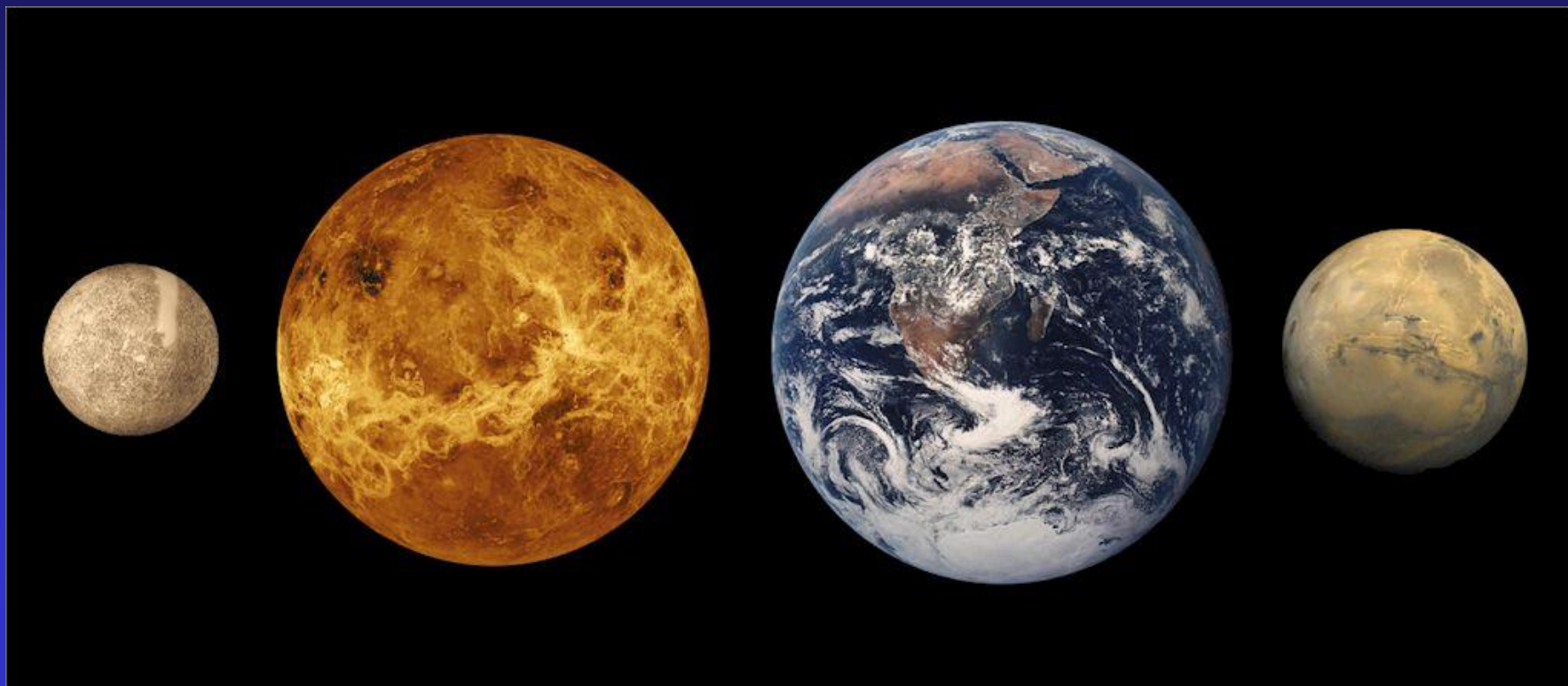


Animacja przedstawia Ziemię i Wenus. Widać różnicę w rozmiarach obu planet oraz odwrotną rotację.



Animacja przedstawia Jowisza widzianego z powierzchni jego księżycy Europy. Widać również kawałki skał wyrzucone z Io i uderzające w powierzchnię Europy.

<http://gallery.astronet.pl/index.cgi?319>



Cztery planety wewnętrzne Układu Słonecznego: Merkury, Wenus, Ziemia i Mars. Mówi się też, że są „typu ziemskiego”, gdyż posiadają zwartą, skalistą powierzchnię podobną do ziemskiej. Na ilustracji zachowano ich względne rozmiary (nie zachowano skali odległości)

Fot. LPI/NASA

Układ słoneczny

Planety typu Ziemi

Merkury, Wenus, Ziemia, Mars

- Średnice od 4,9 tys. km (Merkury) do 12,8 tys. km (Ziemia)
- Zbudowane głównie z gęstej i trudno topliwej materii skalnej (krzemiany i metale)
- średnie gęstości: 4 - 5 g/cm³.
- Zawierają jądro żelazo–niklowe otoczone grubym skalistym płaszczem.

Planety typu Jowisza

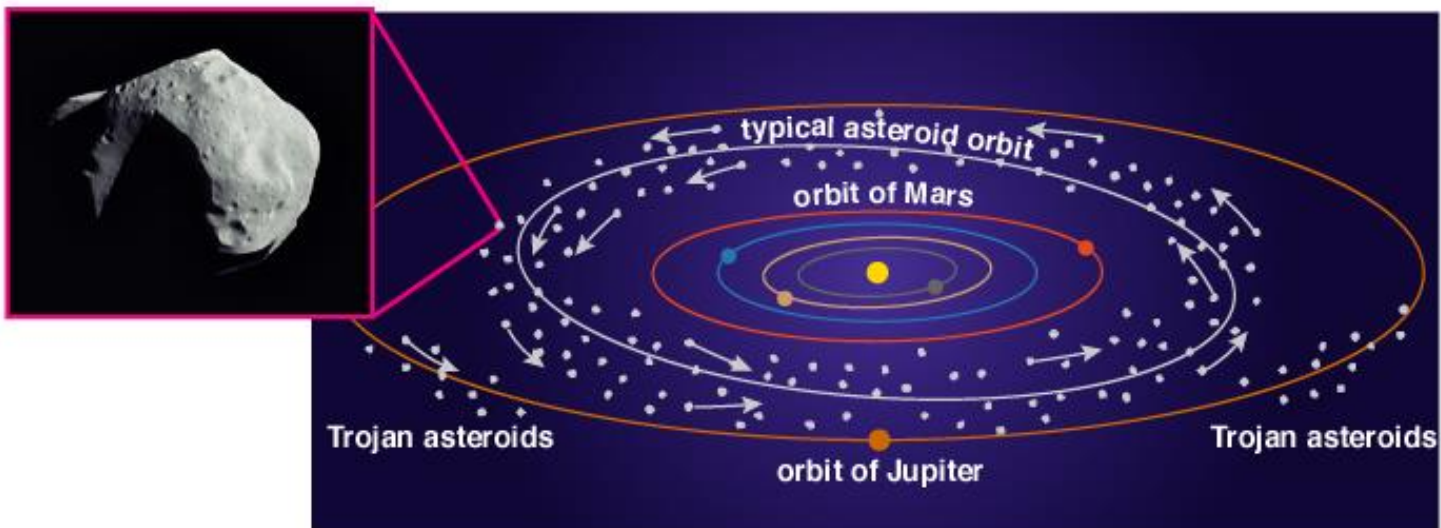
Jowisz, Saturn, Uran, Neptun

- Średnice od 48,6 tys. km (Neptun) do 142,8 tys. km (Jowisz).
- Zbudowane głównie z najlżejszych pierwiastków (wodoru i helu)
- średnie gęstości: 1 - 2 g/cm³.
- Zawierają niewielkie jądro skaliste, dalej gruba warstwa ciekłego wodoru otoczona atmosferą wodorowo-helową (Jowisz i Saturn), lub otoczone przez grubą warstwę lodu wodnego, amoniaku i metanu (Uran i Neptun)



Układ słoneczny

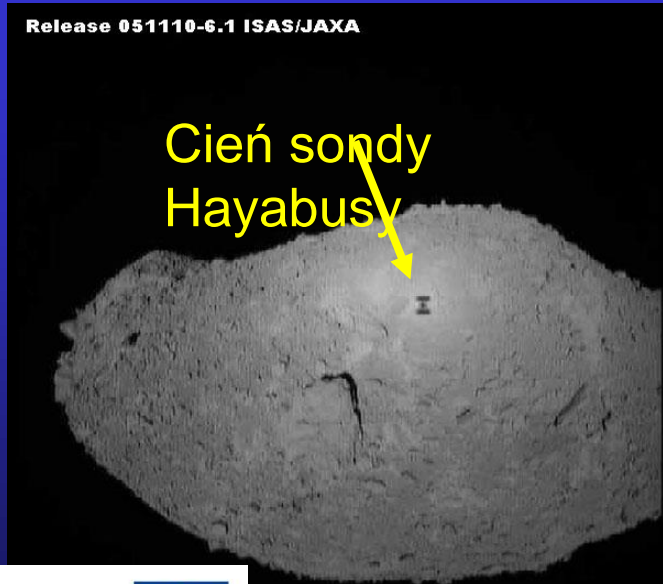
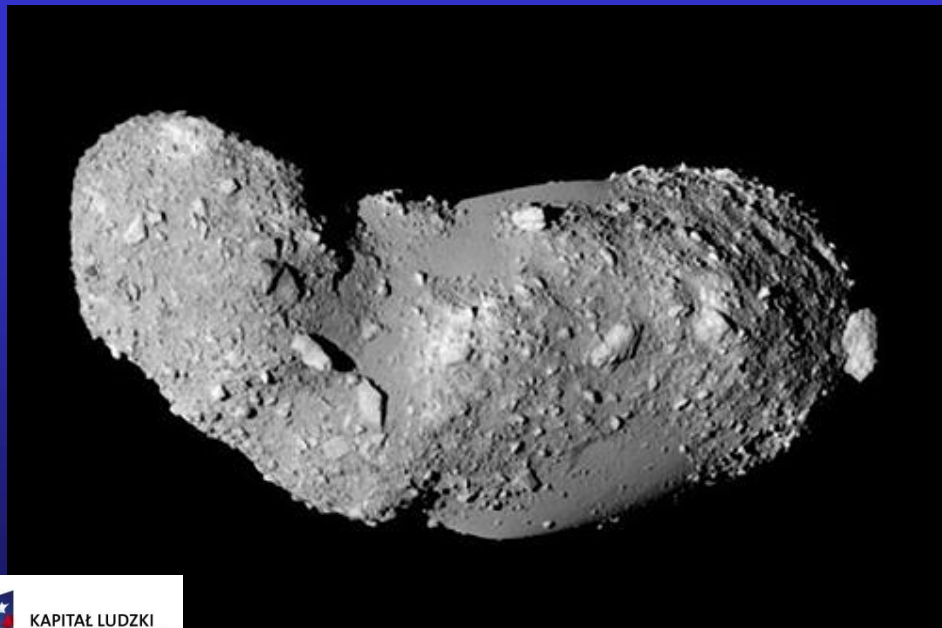
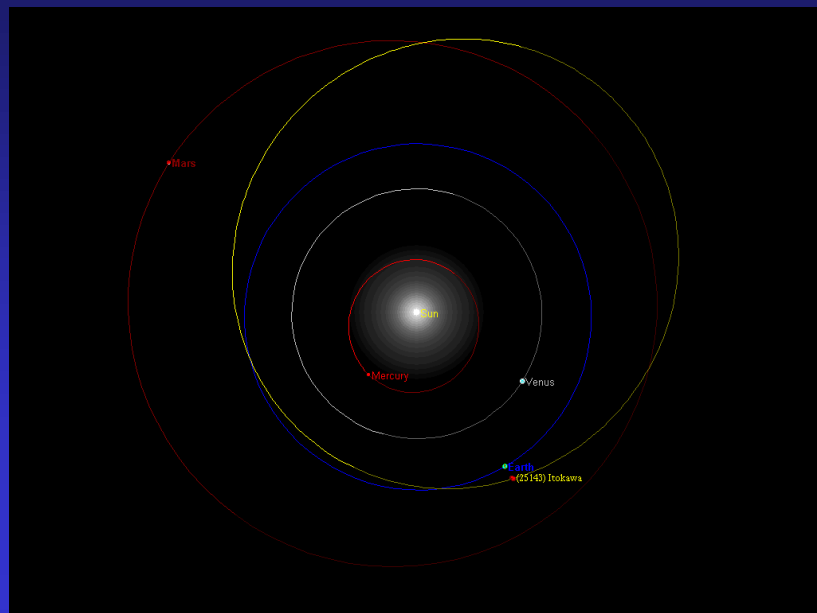
W odległości 2-4 j.a. od Słońca, między orbitami Marsa i Jowisza, krąży bardzo dużo małych ciał, zwanych planetoidami, tworząc pas główny planetoid.



Copyright © Addison Wesley

Planetoida Itokawa

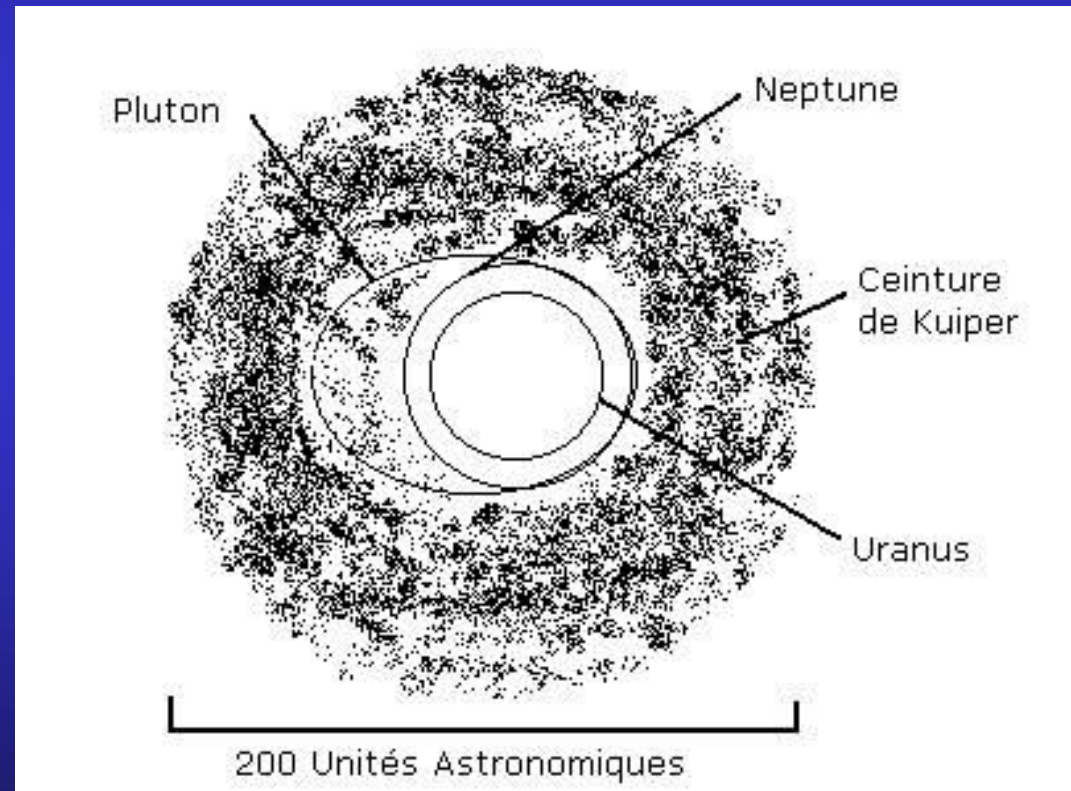
Licząca 300 m szerokości i 700 m długości planetoida należąca do grupy Apollo (grupa planetoid bliskich Ziemi) zbadana w 2005 r. przez japońską sondę Hayabusy.



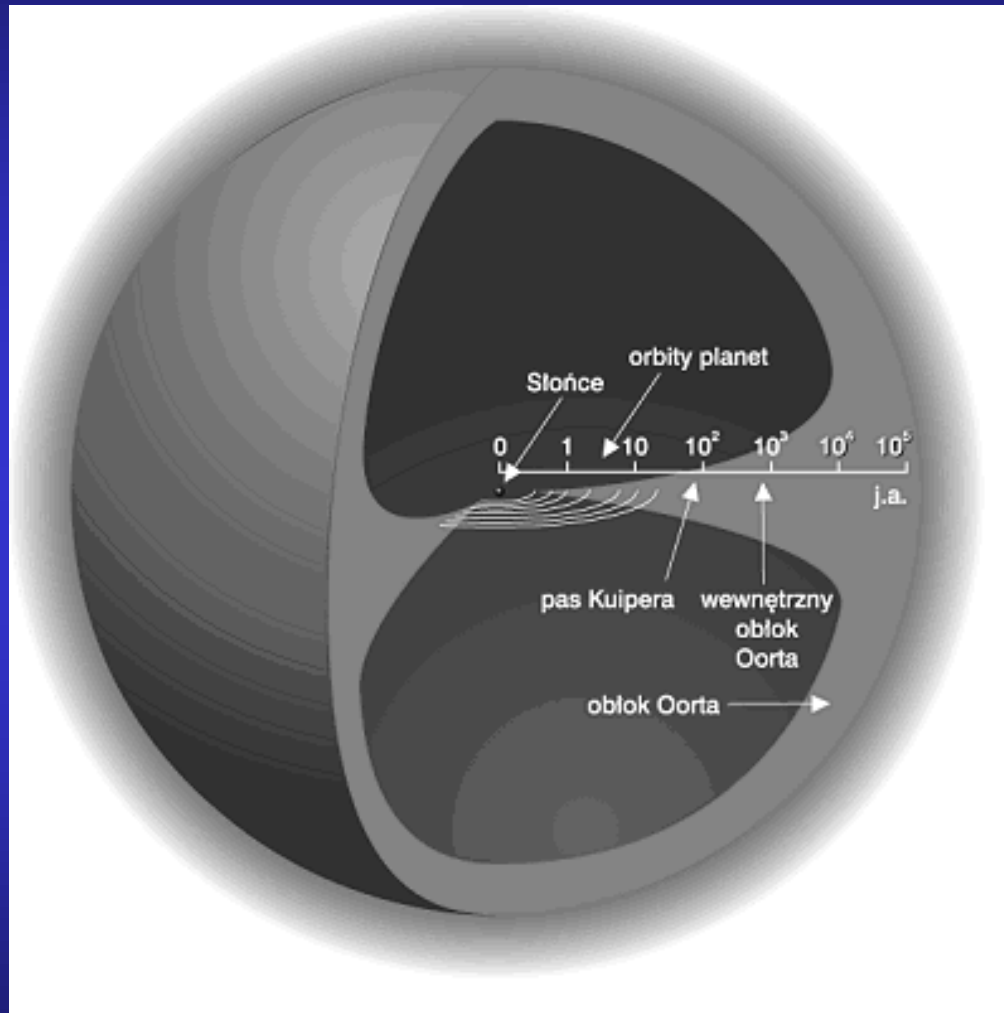
Układ słoneczny

Poza orbitą Neptuna, czyli poczynając od około 35 j.a. od Słońca, rozpościera się tzw. pas Kuipera – największe obiekty: Pluton, Haumea, Makemake.

Odkryto ponad tysiąc ciał o średnicy nie mniejszej niż 100 km poruszających się po prawie kołowych orbitach nachylonych pod małymi kątami do płaszczyzny ekliptyki (płaszczyzny orbity Ziemi).

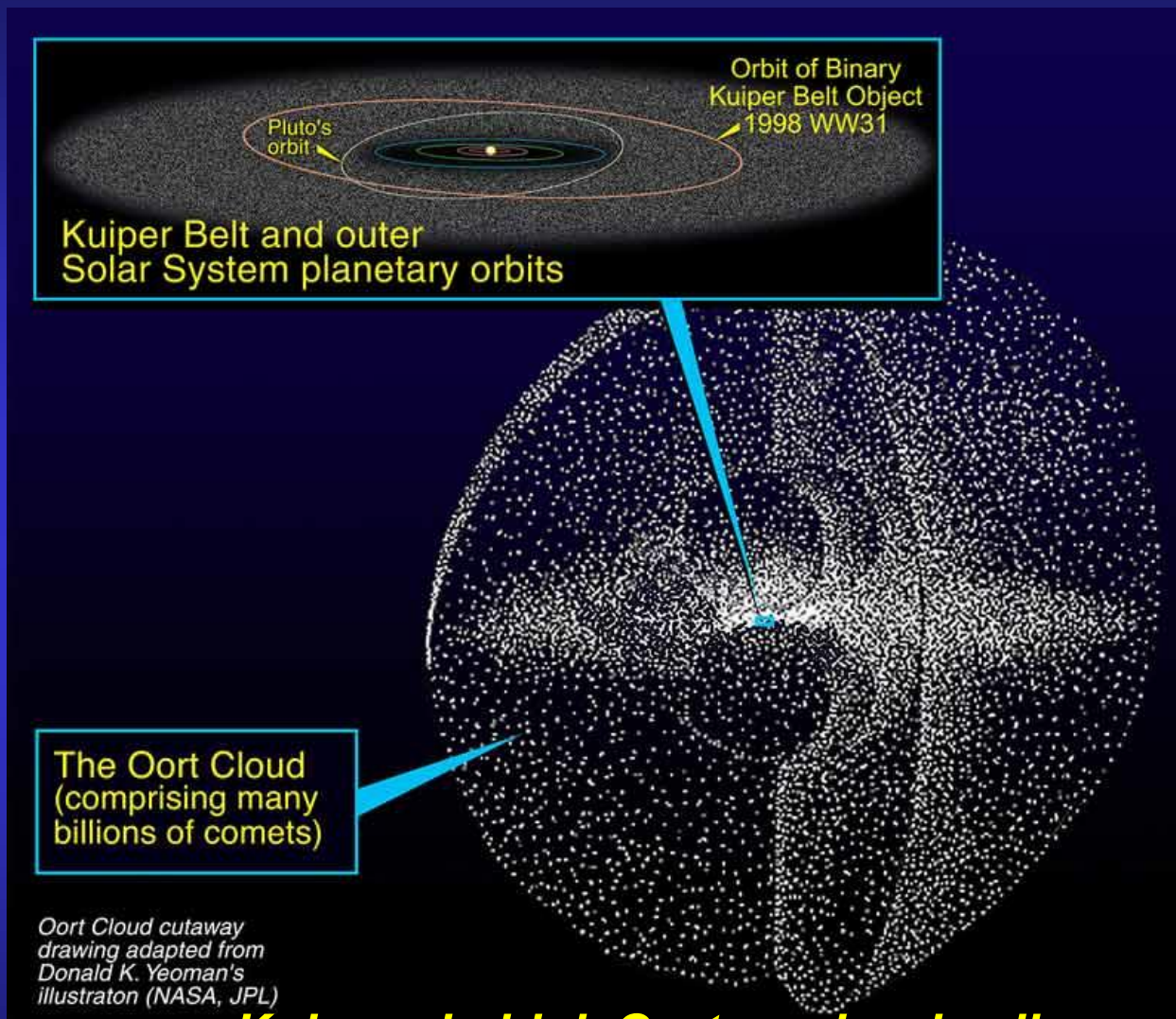


Układ słoneczny



Układ Słoneczny jest przypuszczalnie zanurzony w ogromnym, sferycznym obłoku, zawierającym setki miliardów drobnych ciał o budowie przypominającej jądra komet. Pas Kuipera - dysk utworzony z takich drobnych ciał, krążących mniej więcej w płaszczyźnie orbit planet - przechodzi w wewnętrzną, gęstsza część obłoku Oorta, rozszerzając się stopniowo w sferyczny, rzadszy zewnętrzny obłok Oorta (2 lata świetlne od Słońca).

Obłok Oorta

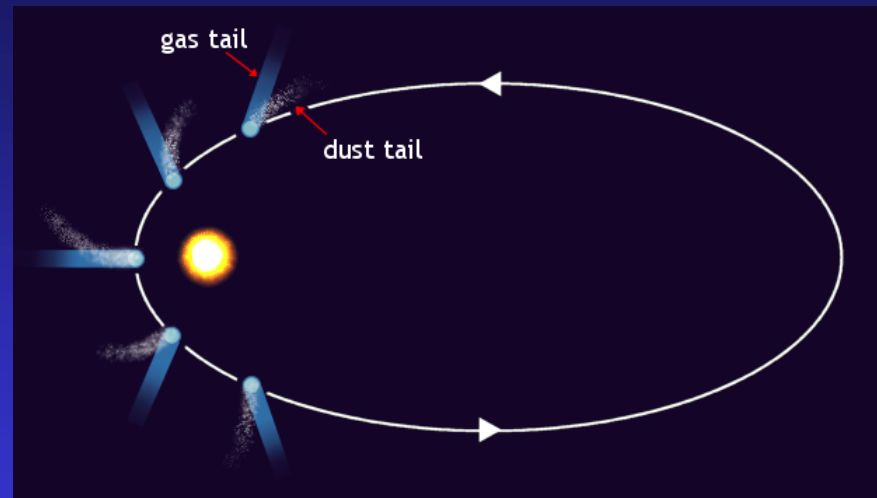


Ciała tworzące pas Kuipera i obłok Oorta są bardzo liczne. Ocenia się, że jest ich kilkaset miliardów.

Układ słoneczny

Komety

Porowate jądro o rozmiarach rzędu kilku km składające się głównie z lodu wodnego oraz z tlenku i dwutlenku węgla, metanu i amoniaku oraz krzemianów i metali.



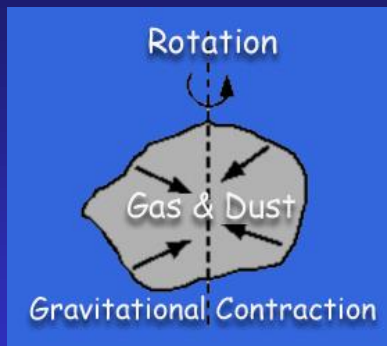
Komety krótkookresowe (okres obiegu < 200 lat) - orbity eliptyczne leżące w płaszczyźnie o małym kącie nachylenia do płaszczyzny ekliptyki.

Komety długookresowe (jednopojawieniowe) - orbity w kształcie silnie spłaszczonej elipsy lub hiperboli leżące w płaszczyźnie o dowolnym kącie nachylenia

Komety pochodzą z obłoku Oorta

Powstanie układu słonecznego

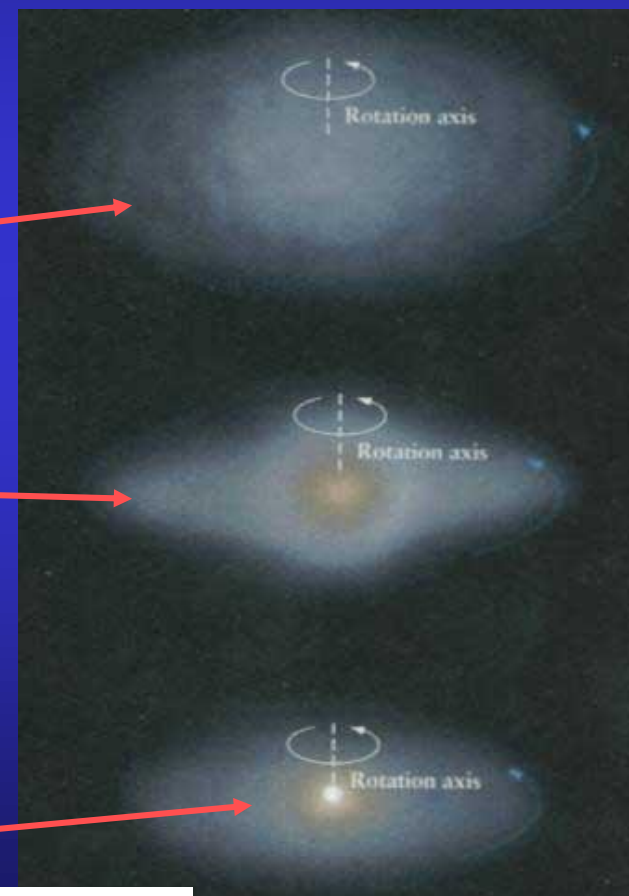
Wiek Układu Słonecznego, przyjęty jako równy wiekowi najstarszych meteorytów, wynosi $(4,569 \pm 0,02)$ mld lat.



W obłoku materii międzygwiazdowej zaczęło się tworzyć zgęszczenie (być może po wybuchu supernowej).

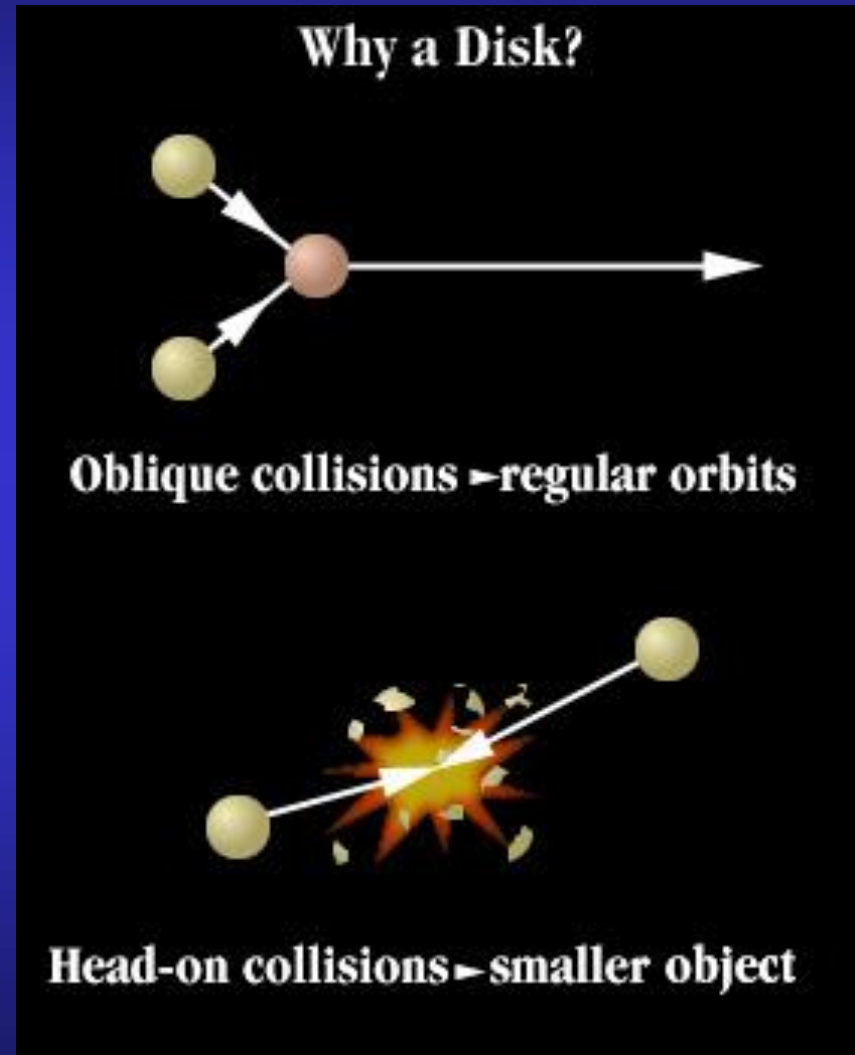
Rosnąca szybkość rotacji spowodowała utworzenie się płaskiego dysku.

Po kilkudziesięciu milionach lat w centrum obłoku utworzyło się Protosłońce skupiające ponad 95% masy obłoku.

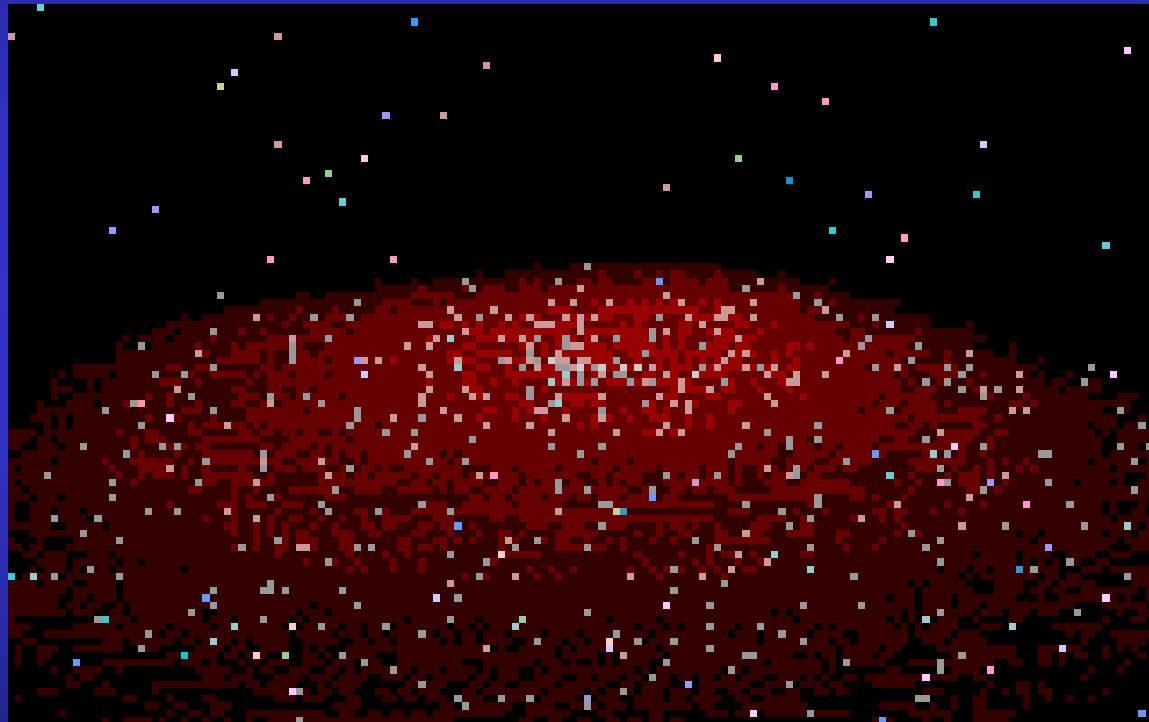


Powstanie układu słonecznego

Zderzenia cząstek wirującego obłoku prowadzą do spłaszczenia dysku.



Powstanie układu słonecznego



Animacja



Dyski protoplanetarne

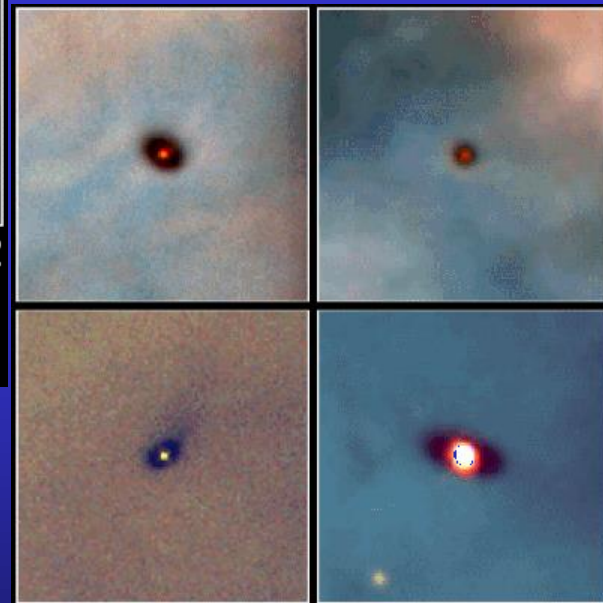


Edge-On Protoplanetary Disk
Orion Nebula

PRC95-45c · ST ScI OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



HST · WFPC2



Protoplanetary Disks
Orion Nebula

HST · WFPC2

PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

Dyski protoplanetarne sfotografowane
przez teleskop Hubble'a

Dyski protoplanetarne

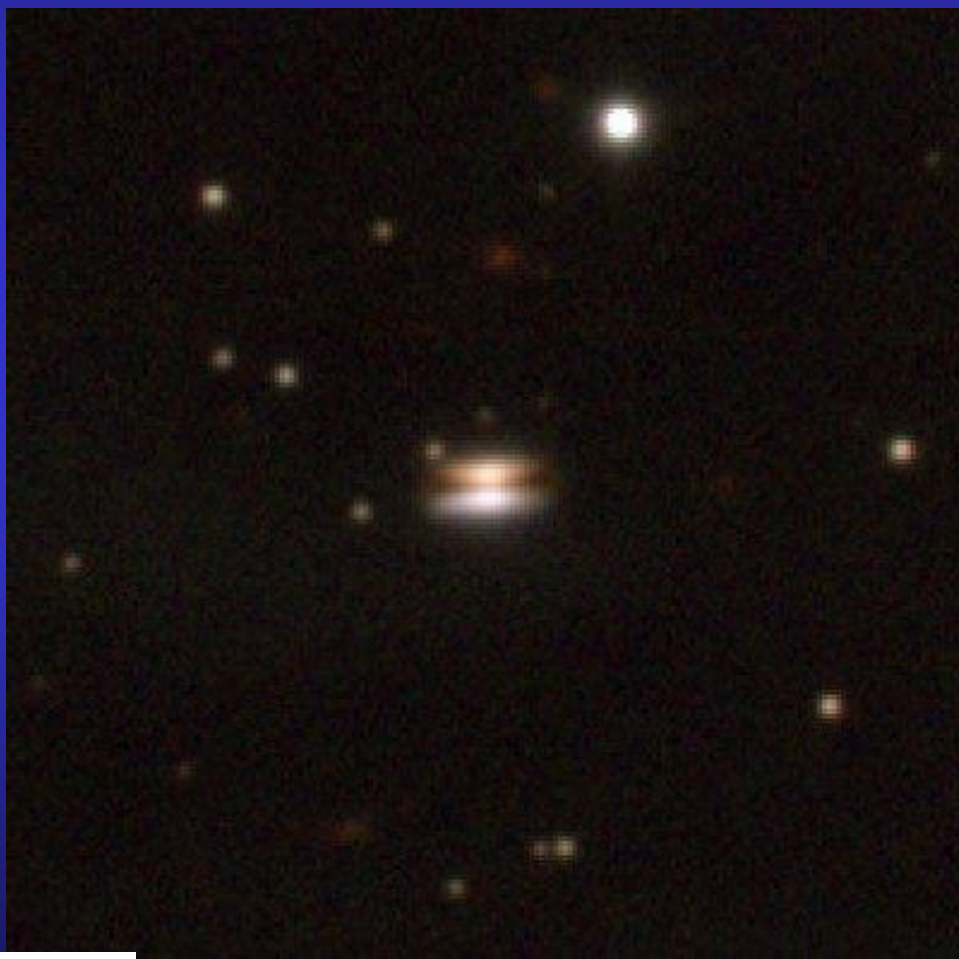


Komputerowa symulacja pokazująca dysk protoplanetarny, z którego zaczynają się tworzyć gazowe olbrzymy.



Dyski protoplanetarne

Latający spodek?

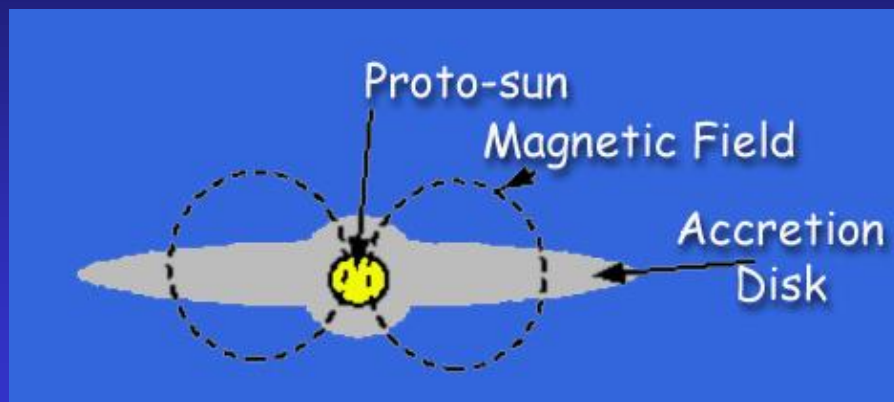


Zdjęcie przedstawia dysk protoplanetarny wokół gwiazdy, znajdującej się w odległości 500 lat świetlnych od Ziemi.

Dysk jest ustawiony do nas krawędzią i całkowicie blokuje światło gwiazdy, przez co widzimy go jako ciemną smugę w poprzek obiektu. Pył ponad i poniżej środka dysku rozprasza światło gwiazdy, tworząc w ten sposób dwie mgławice przed gwiazdą.

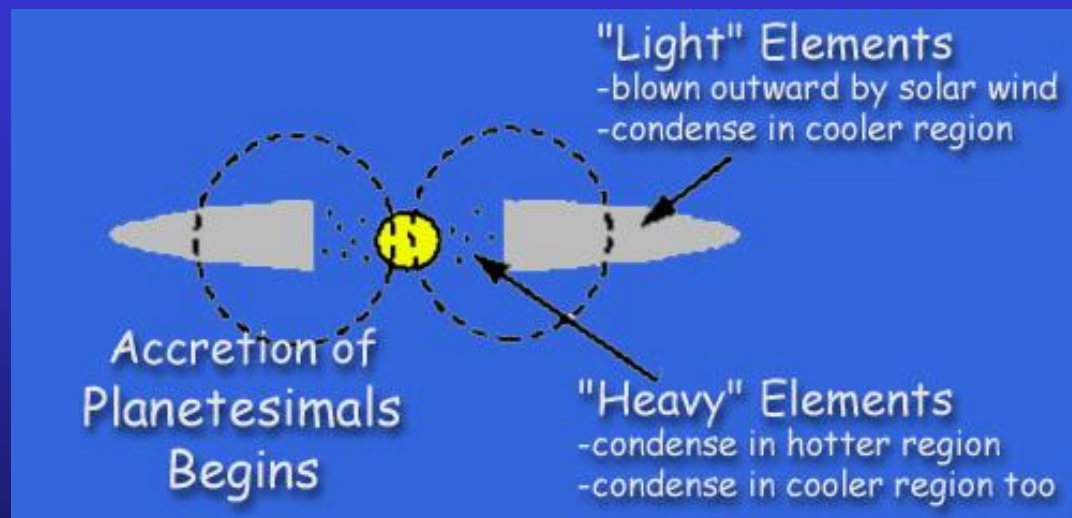


Powstanie układu słonecznego

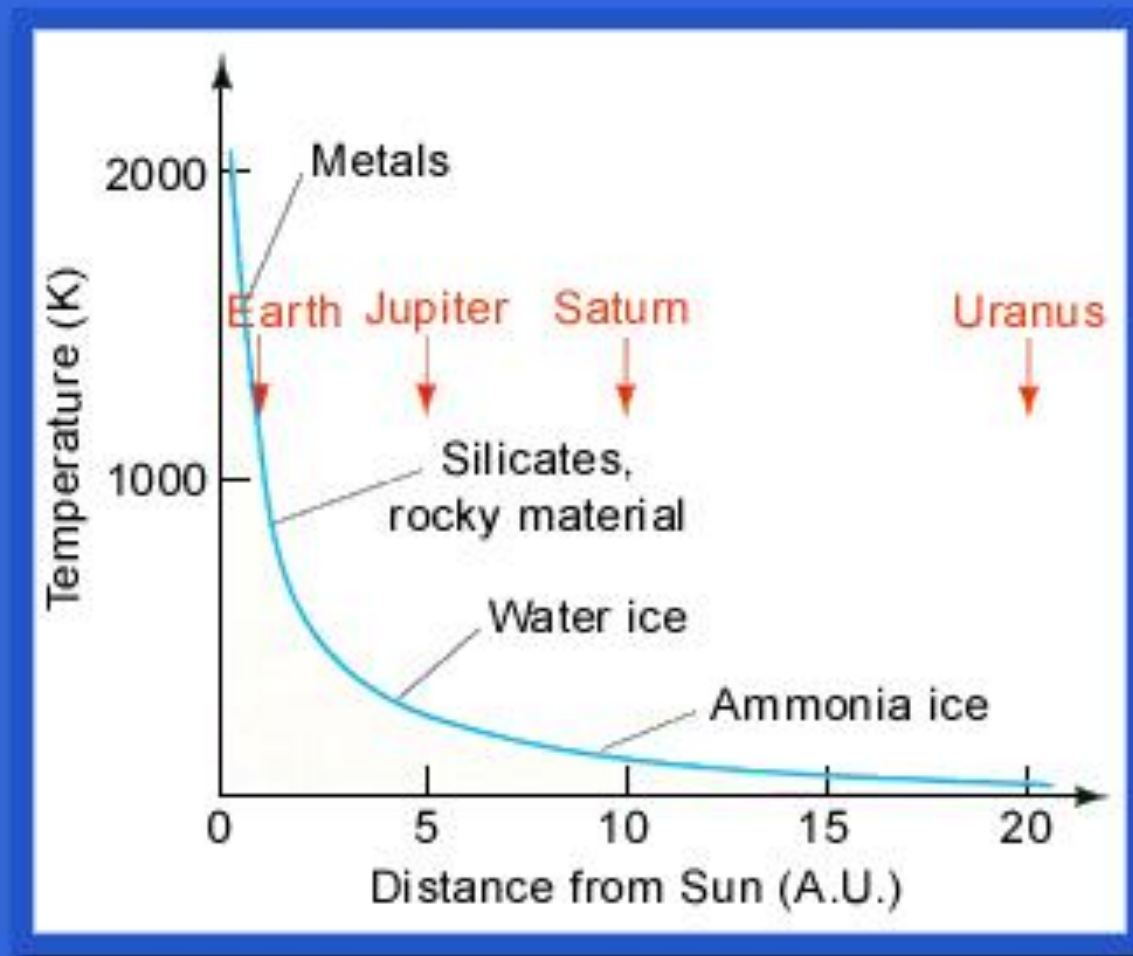


**Silny wiatr słoneczny
wywiał lżejsze pierwiastki
w oddalone, zimniejsze
rejonny.**

**Cięższe pierwiastki
występują zarówno w
gorących, jak i w zimnych
rejonach.**



Powstanie układu słonecznego

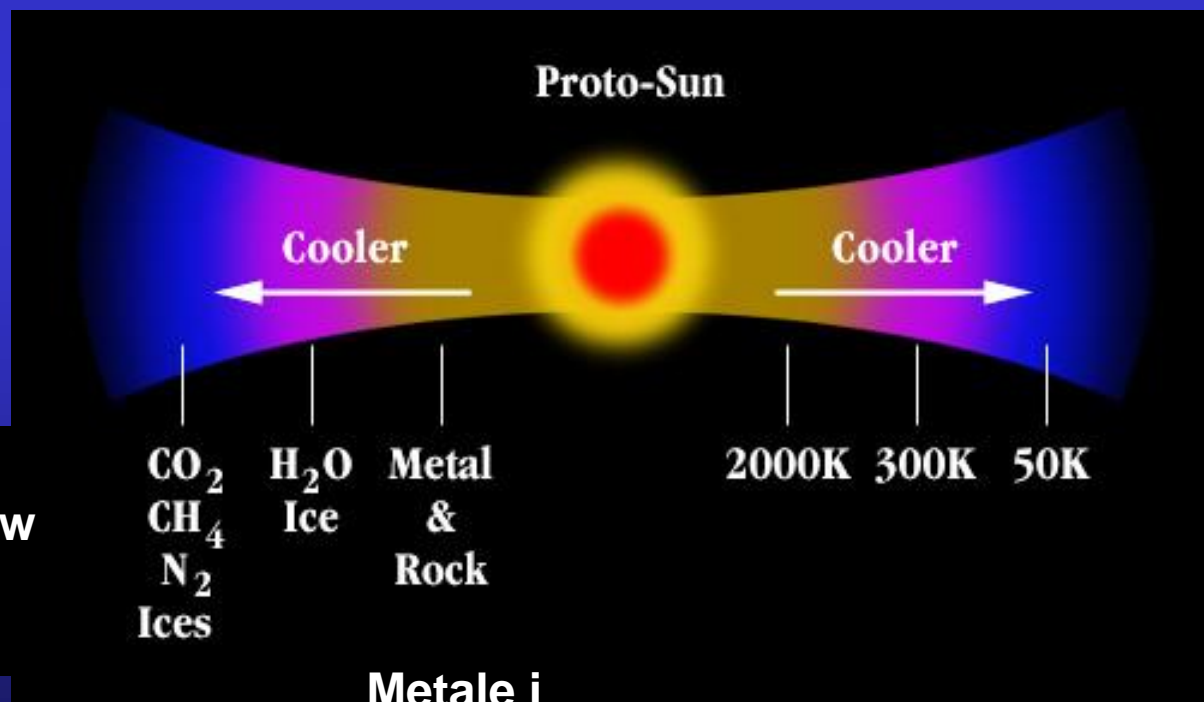


A. U. – jednostka astronomiczna

Powstanie układu słonecznego

Skupianie się ziaren pyłu w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu, powodowało coraz częstsze zderzenia między nimi, które przez oddziaływania elektrostatyczne prowadziły do zlepiania się poszczególnych drobin w większe bryłki o rozmiarach rzędu milimetrów.

Ich skład chemiczny zależał od miejsca powstania.



Metan,
amoniak w
stanie
stałym

CO₂
CH₄
N₂
Ices

H₂O
Ice

Metal
&
Rock

Metale i
krzemiany

2000K 300K 50K

Powstanie planet

Grudki materii - rozmieszczone w cienkiej, płaskiej warstwie, pokrywającej się z główną płaszczyzną dysku - były zanurzone w gazie złożonym przede wszystkim z wodoru oraz, w znacznie mniejszych ilościach, z helu, a także cięższych pierwiastków.

Siły grawitacji powodowały dalsze sklejanie się grudek – po kilkuset tysiącach lat powstało wiele krążących wokół Słońca ciał o średnicach rzędu kilometra lub mniejszych – planetozymali.



Ich rozmiar wzrastał w tempie 15 centymetrów na rok

Po paru milionach lat wykrystalizowało się kilka wyraźnie gęstszych centrów, wychytujących z otoczenia coraz więcej materii - protoplanety.

Powstanie planet

Budowa planet zależy od ich odległości od Słońca.

- **Merkury** - kondensacja rozpoczynała się w temperaturze około 1400 K - duże jądro, złożone głównie z żelaza (80% masy) w stanie metalicznym z domieszkami niklu.
- **Wenus** - kondensacja w temperaturze około 900 K (kondensacja magnezu i krzemu) - mniejszy od Merkurego stosunek żelaza metalicznego do krzemianów, a tym samym - mniejsza gęstość.
- **Ziemia** - kondensacja w temperaturze około 600 K (kondensacja tlenków żelaza) – gęstość jednak większa niż Merkurego z powodu dużej masy i ściśniętego grawitacyjnie jądra.
- **Mars** - kondensacja w temperaturze około 450 K (żelazo tylko w postaci siarczków i krzemianów) – brak rdzenia z metalicznego żelaza - mniejsza gęstość niż pozostałych 3 planet.

Powstanie planet

• **Jowisz i Saturn – znacznie niższe temperatury umożliwiały kondensację lodu wodnego, a także lodów dwutlenku węgla, metanu i amoniaku.**



Skład chemiczny i gęstość podobne jak dla Słońca – w 80% składają się z wodoru i helu

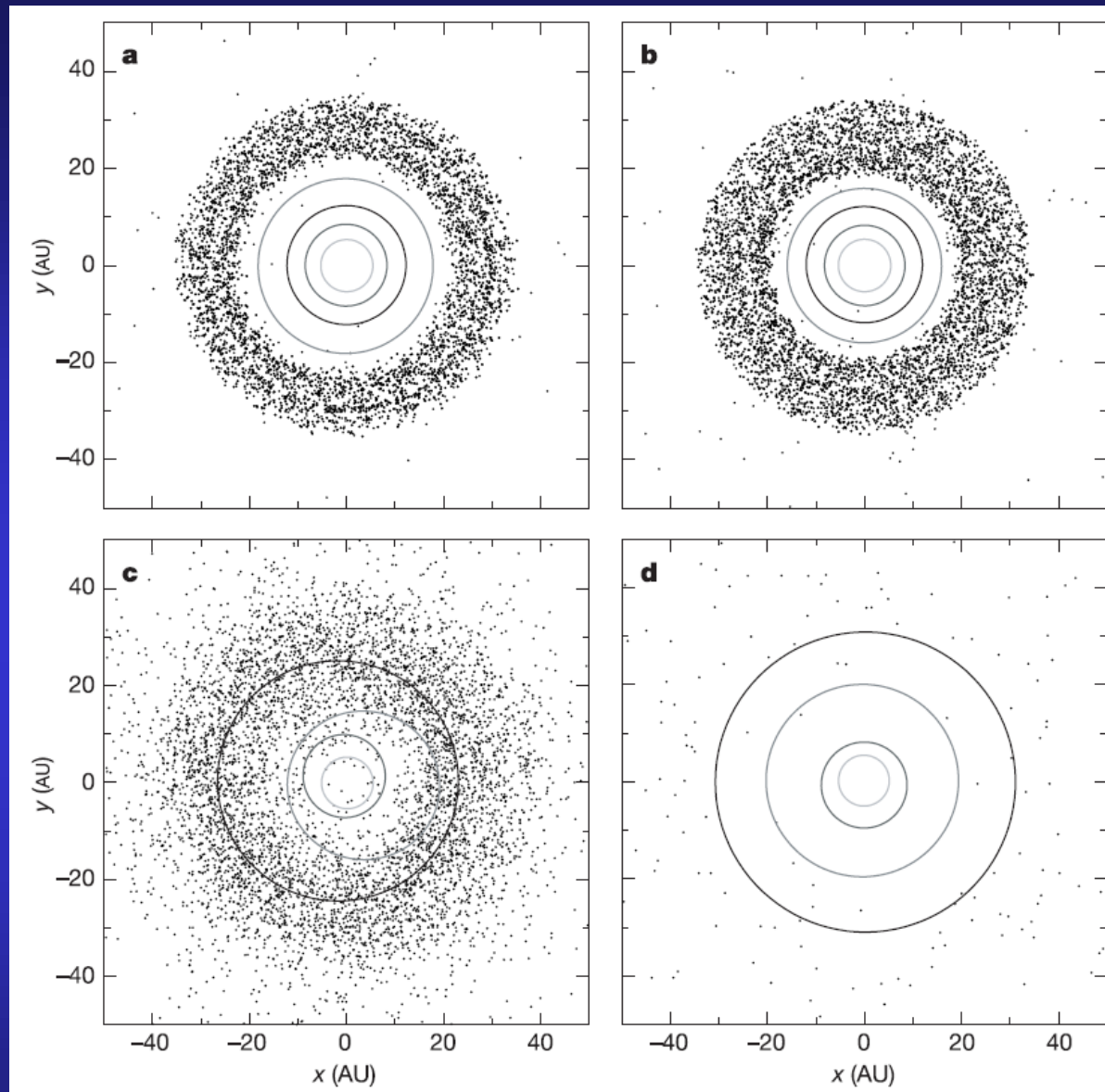


Obfitość pierwiastków lekkich zwiększyła wydajność akrecji planetarnej – wielkie masy planet.

100 mln lat po powstaniu Układu Słonecznego Jowisz, Saturn, Neptun i Uran znajdują się w odległościach 5,5, 8,2, 11,5 i 14,2 j.a.

Pas Kuipera rozciąga się od 15,5 do 34 j.a.

- a) 100 mln lat - Jowisz i Saturn wpadają w rezonans 2:1, co zwiększa mimośrodory orbit planet zewnętrznych i destabilizuje pas Kuipera
- b) 879 mln lat – rozpoczyna się okres Wielkiego Bombardowania
- c) 882 mln lat - Wielkie Bombardowanie w toku
- d) 1 mld lat – planety zewnętrzne osiągnęły orbity zbliżone do współczesnych, z dysku zostaje 3% początkowej masy

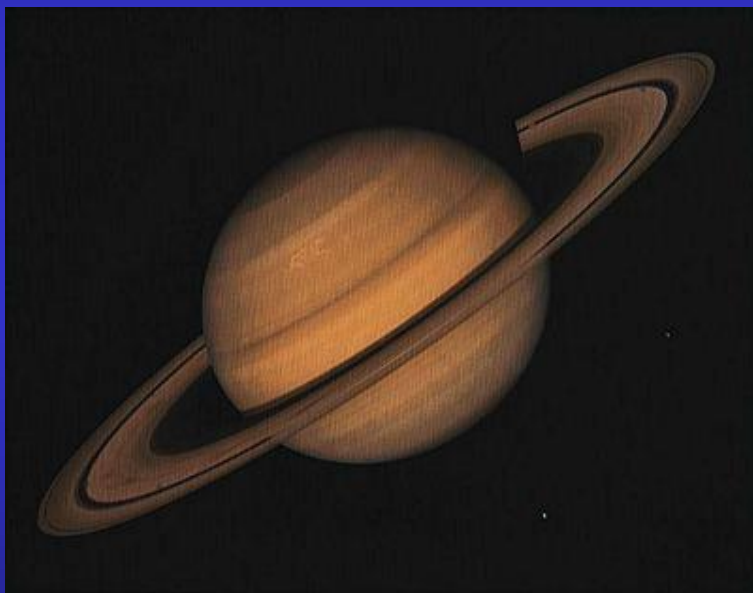


R. Gomes, H. F. Levison, K. Tsiganis, A. Morbidelli. *Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets.* „Nature”, s. 466, 2005

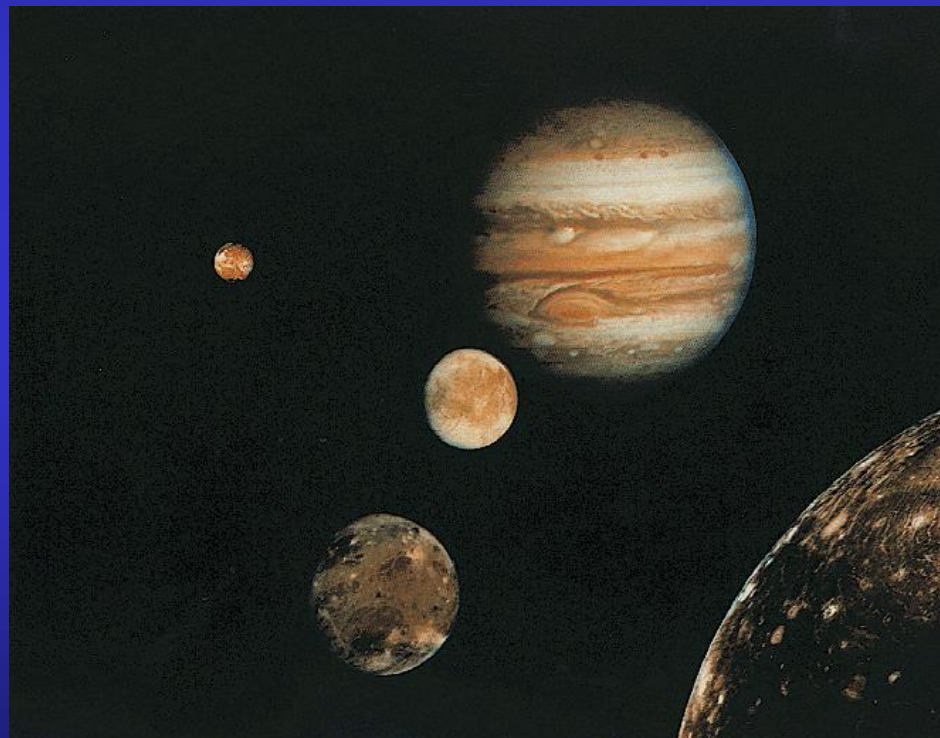
Powstanie planet

Grawitacja planet typu Jowisza (ogromne masy) przewyższyła w swoim otoczeniu grawitację Słońca. →

Utworzyły się wokół nich dyski, które dały początek licznym księżycom i pierścieniom.



Saturn



Jowisz z czterema księżycami

Powstanie układu słonecznego

„Wielkie porządkowanie”

Silny wiatr słoneczny w ciągu kilkuset tysięcy lat wywiewa cząsteczki materii na peryferie układu.

Oddziaływanie Jowisza i Saturna wyrzuca pozostałe planetozymale daleko poza orbity planet.

Oddziaływanie Jowisza odpowiedzialne za uwięzienie planetozymali, z których nie powstała planeta, między orbitami Marsa i Jowisza.

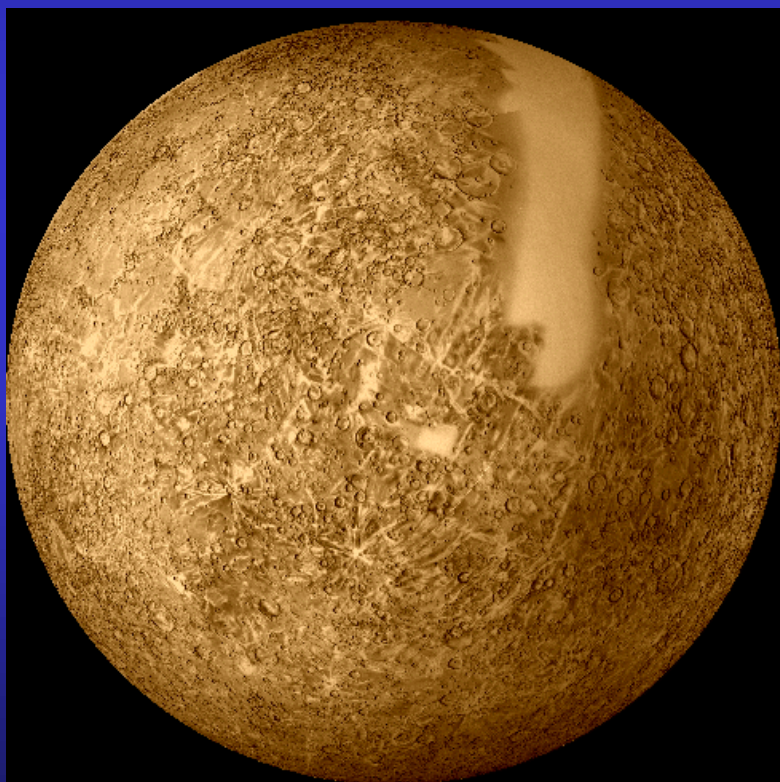
Powstaje Pas Kuipera i Obłok Oorta – komety składające się z „brudnego lodu” - pozostałość po formacji planet typu Jowisza.

Powstaje pas planetoid o budowie skalistej – pozostałość po formacji planet typu Ziemi.

Powstanie układu słonecznego


Obfitość planetozymali we wczesnym układzie słonecznym – epoka *wielkiego bombardowania*.

Planetozymale często uderzały w powierzchnie planet i ich księżyców pozostawiając kratery.

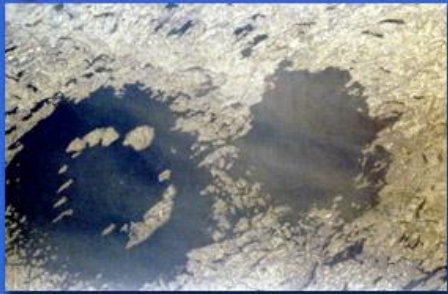


Powierzchnia Merkurego


Barringer Meteorite Crater, Arizona
50,000 years bp



Wolfe Creek Meteorite Crater,
Western Australia, 300,000 years bp



Clearwater Meteorite Crater
Quebec, Canada
290,000,000 +/- 20my bp



WORLD CRATER INVENTORY
<http://www.unb.ca/passc/>

Kratery na Ziemi

Krystyna Wosińska, WF PW



Powstanie Księżyca

Zderzeniami można wyjaśnić niektóre anomalie, jak odwrócenie kierunku wirowania Urana, czy powstanie dużego Księżyca ziemskiego.



<http://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/kb/nice.html>

Okolo 4,5 mld lat temu zderzenie ciała o rozmiarach Marsa z Ziemią spowodowało powstanie Księżyca. Ogromna energia zderzenia spowodowała stopienie wyrzuconych części płaszczu Ziemi

Powstanie Księżyca

Problemy:

- Astronomowie nie znaleźli żadnego chemicznego śladu impaktora.
- Pomiary stosunków izotopów różnych pierwiastków – takich, jak trzy izotopy tlenu: ^{16}O , ^{17}O i ^{18}O – pokazują, że Księżyc i Ziemia są wykonane z dokładnie tego samego materiału.
- Na księżycu mniej gazów niż na Ziemi

Modele komputerowe pokazujące, że jednym z możliwych rezultatów zderzeń obiektów planetarnych jest utworzenie synestii, masy wyparowanego kamienia i metalu, który przybrał kształt torusa z bogatym w metale wybrzuszeniem centralnym. Wybrzuszenie jest ocalałym jądrem planety i jest połączone z zewnętrznym torusem zbudowanym głównie ze skał krzemianowych, które szybko rotują i rozszerzają się poza orbitę księżycową.

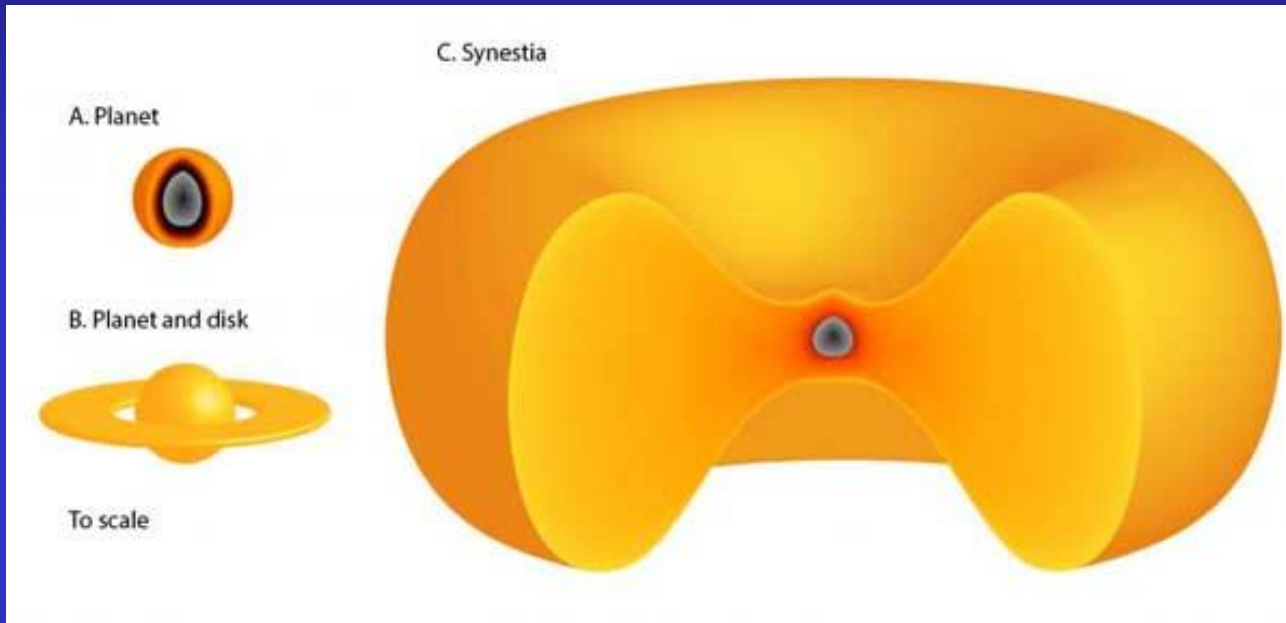
The Origin of the Moon Within a Terrestrial Synestia

[Simon J. Lock](#), [Sarah T. Stewart](#), [Michail I. Petaev](#), [Zoë Leinhardt](#), [Mia T. Mace](#), [Stein B. Jacobsen](#), [Matija Cuk](#)

First published: 28 February 2018

<https://doi.org/10.1002/2017JE005333>

Powstanie Księżyca



Planeta, planeta z dyskiem i synestia o jednakowych masach
(*Simon Lock and Sarah Stewart*)

Planety pozasłoneczne

Historia poszukiwań planet

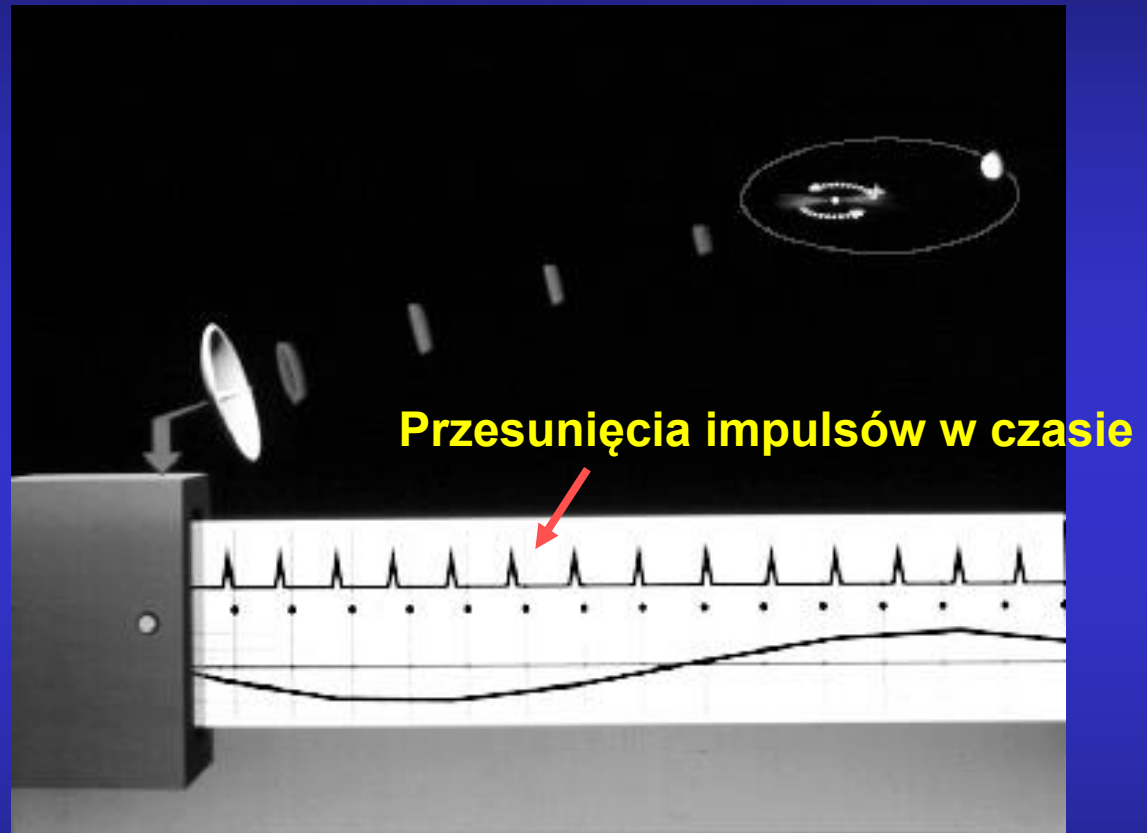
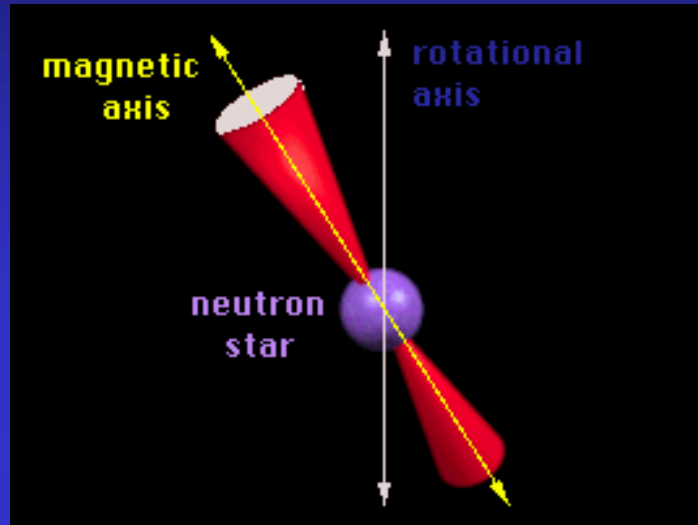
- **Kilkudziesięcioletnie bezskuteczne próby astrometryczne, spektroskopowe, radiowe.**
- **1992 r. Wolszczan & Frail: planety wokół pulsara PSR1257+12.**
- **1995 r. Mayor & Queloz: pierwsza planeta wokół gwiazdy normalnej.**
- **1999 r. Odkrycie pierwszego tranzytu planetarnego.**
- **2002 r. OGLE: Pierwsza planeta odkryta metodą tranzytów.**
- **2004 r. OGLE: Pierwsza planeta odkryta metodą mikrosoczewkowania.**

Prof. Andrzej Udalski, Konwersatorium W.F. U.W., 10.04.06

Metody Odkrywania Planet Pozasłonecznych

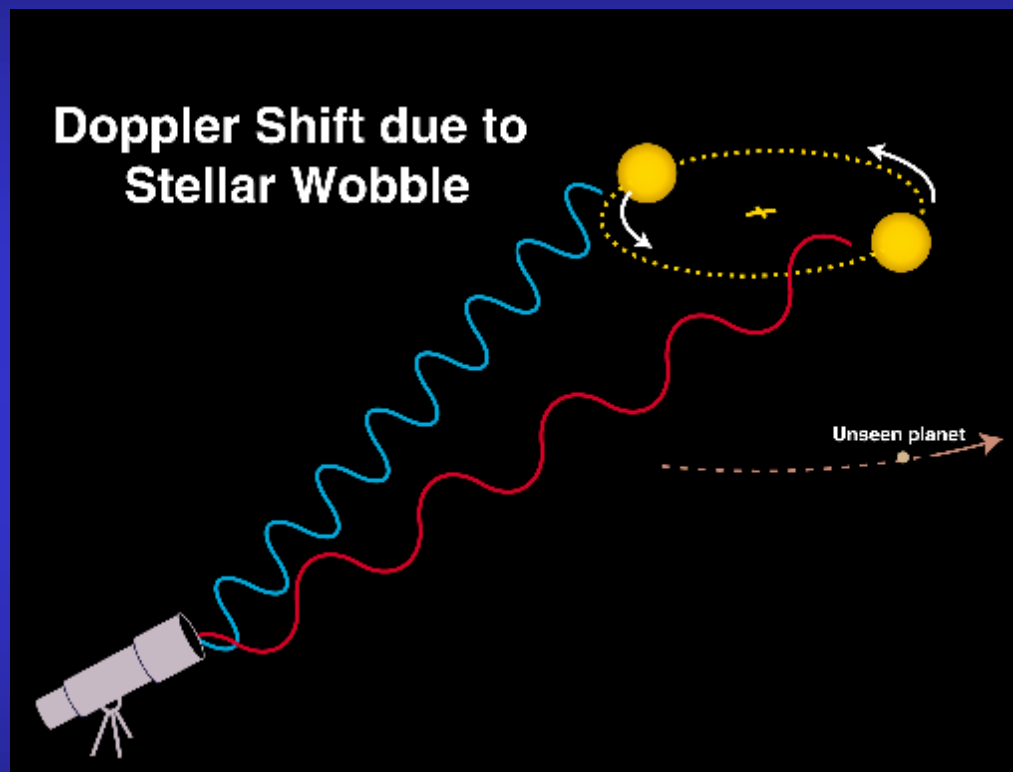
- Techniki radiowe: Obserwacje pulsarów.
- Spektroskopia – efekt Dopplera: Bliskie (<500 l. św.) planety podobne do Jowisza.
- Metoda tranzytów – fotometria.
- Mikrosoczewkowanie – fotometria.
- Pomiar położenia gwiazd – astrometria.
- Bezpośrednie obrazowanie.

Metody Radiowe: Pulsary



Metoda Spektroskopowa

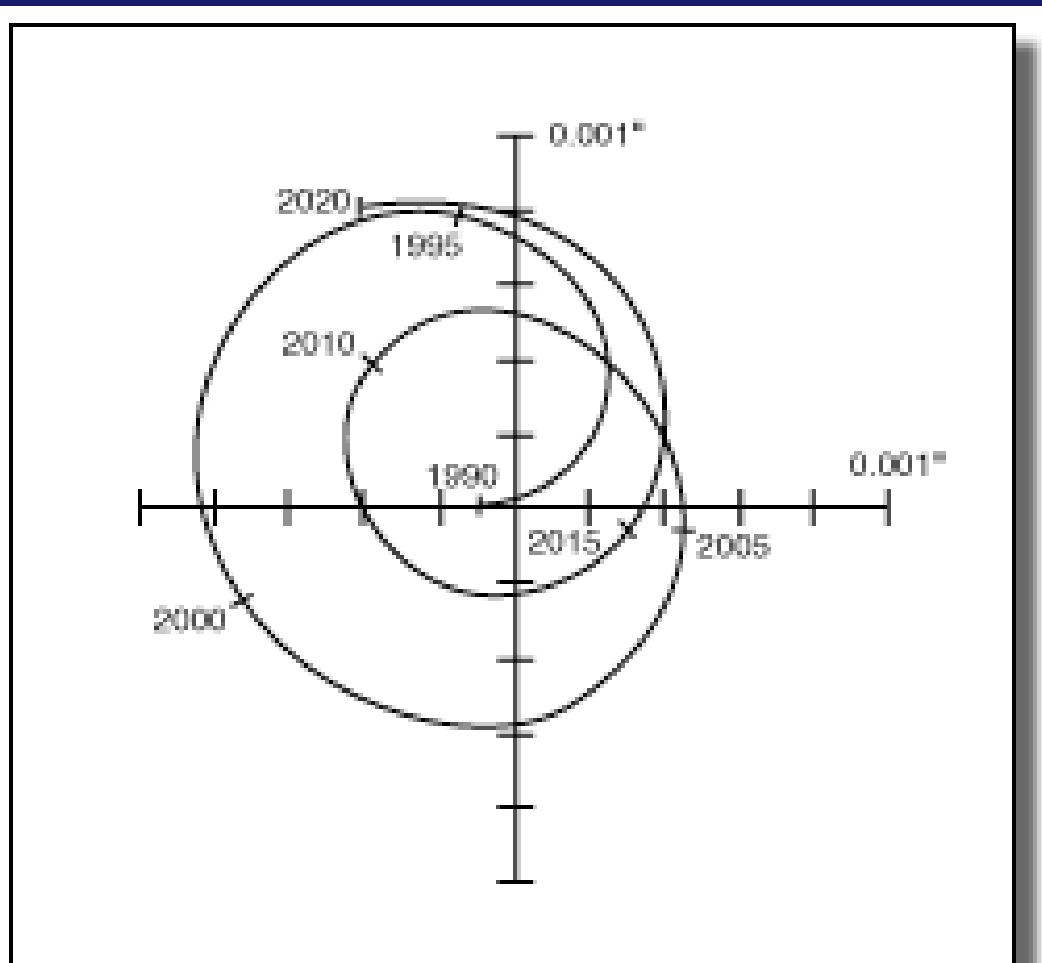
- **Wielkość obserwowana:** składowa radialna prędkości gwiazdy w jej ruchu orbitalnym wokół środka masy układu podwójnego gwiazda - planeta



Metoda Spektroskopowa

- Wymagana ogromna precyzja pomiarów: zmiany prędkości $<$ kilkaset m/s.
- Współczesne techniki pozwalają na pomiary z dokładnością 1 m/s.
- Wyznaczana jest tylko minimalna masa planety, bo nie znamy nachylenia orbity
- Największa czułość na masywne planety blisko gwiazdy („gorące Jowisze”).

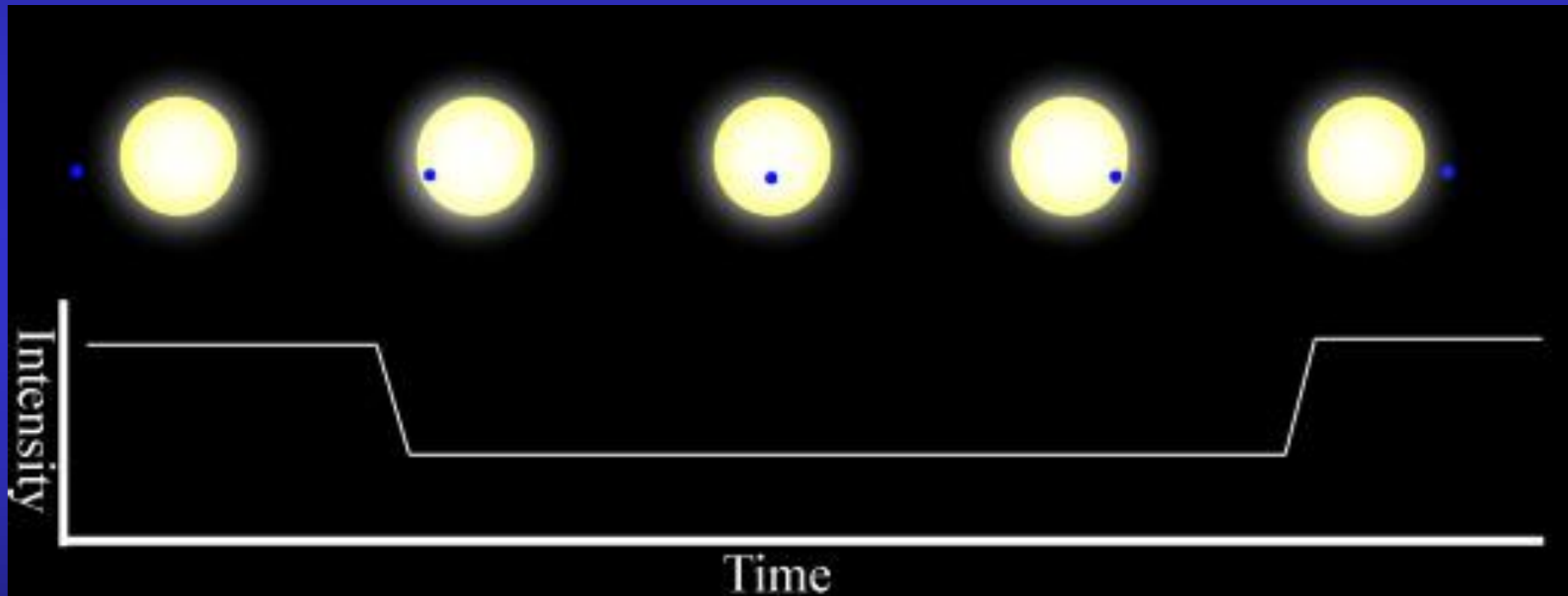
Astrometria



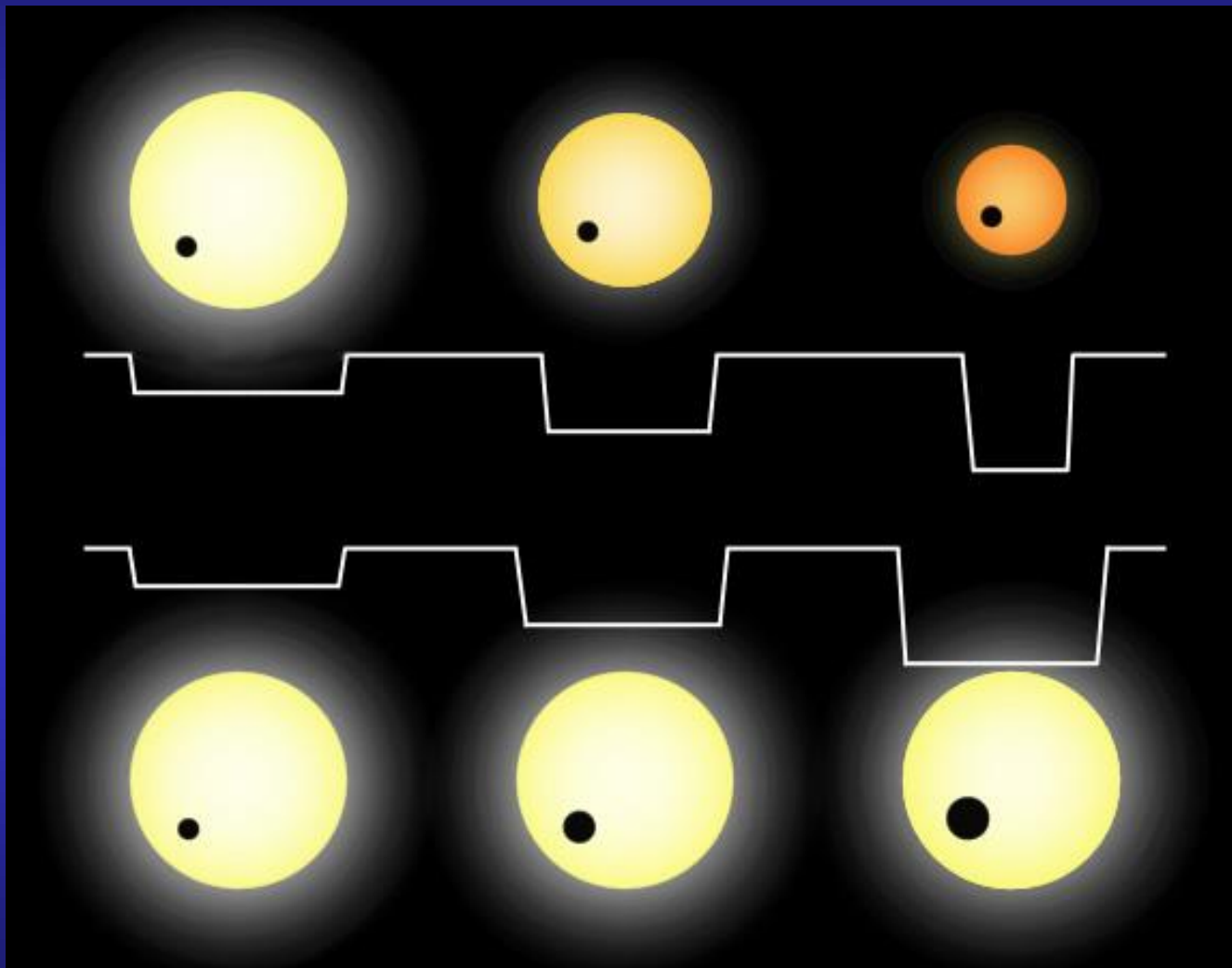
Astrometric displacement of the Sun due to Jupiter
as seen from 10 parsecs.

Wielkość obserwowana: ruch gwiazdy w płaszczyźnie nieba.

Metoda Tranzytów



Metoda Tranzytów



Metoda Tranzytów

Zalety:

- **Pomiary fotometryczne wielu obiektów umożliwiają identyfikację kandydatów.**
- **Pomiary kształtu tranzytów umożliwiają wyznaczenie rozmiaru planety.**
- **Dodatkowe obserwacje spektroskopowe umożliwiają wyznaczenie dokładnej masy i wszystkie podstawowe parametry planety są znane. (Jedynie przypadki !!!).**
- **Dzięki orbicie wyznaczonej z fotometrii (okres, faza) wystarczy zaledwie kilka obserwacji spektroskopowych do wyznaczenia masy.**

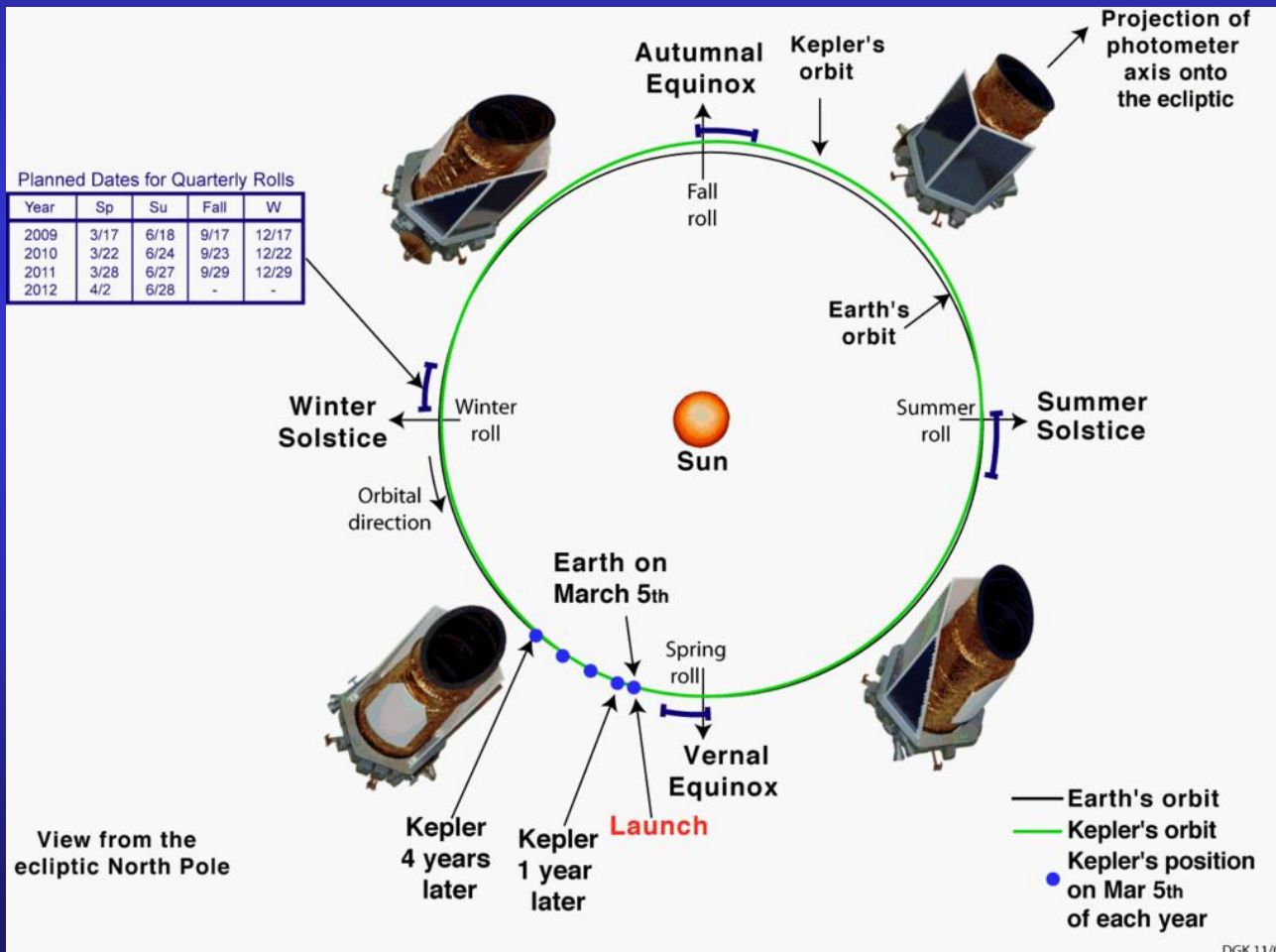
Metoda Tranzytów

Problemy:

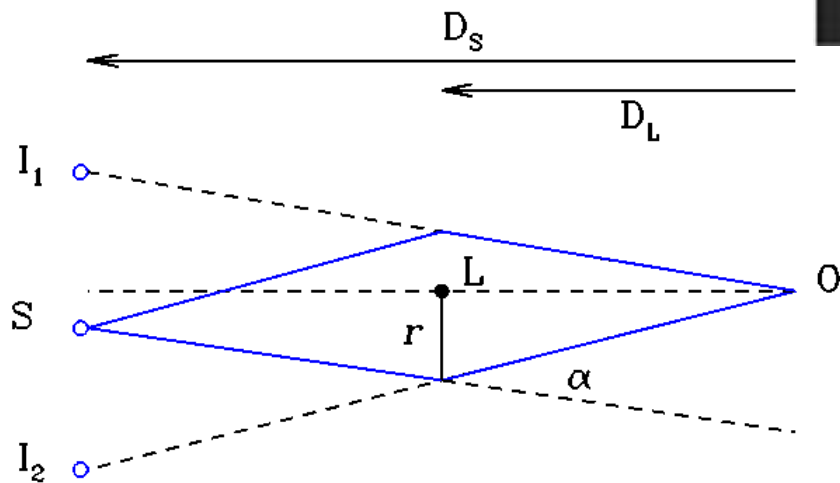
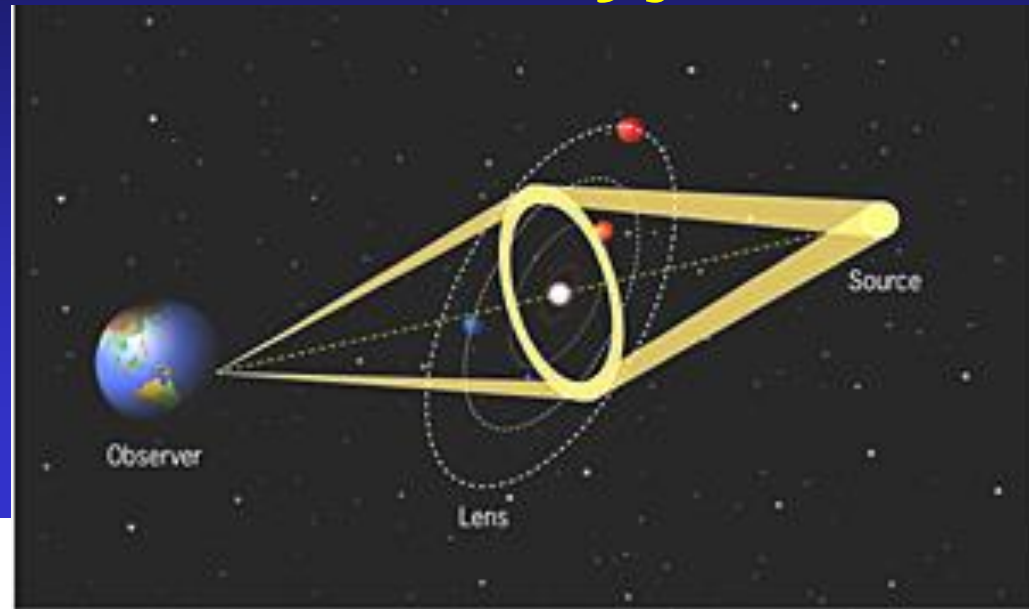
- Wysoka dokładność obserwacji fotometrycznych jest kluczowa do detekcji tranzytów planetarnych (~0.5%).
- Trzeba zarejestrować kilka indywidualnych tranzytów, aby uniknąć przypadkowych detekcji.
- Inne obiekty astronomiczne, jak brązowe karły czy najmniejsze gwiazdy (typu M) mogą mieć podobne rozmiary do planet i wywoływać tranzyty. Konieczna dyskryminacja na podstawie masy (spektroskopia).

Teleskop kosmiczny Kepler

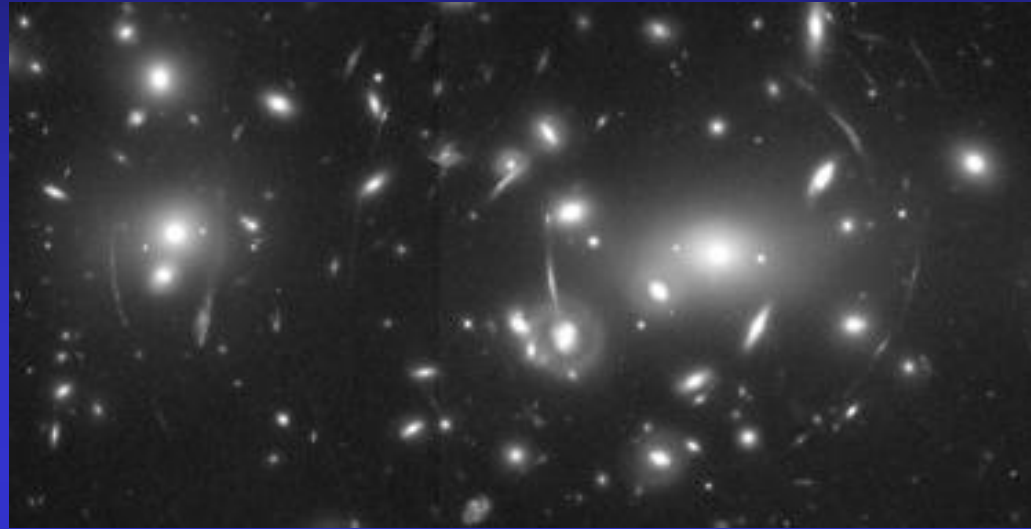
Od 2009 do 2016 r. odkrył metodą trazytów ponad 1200 planet



Soczewkowanie Grawitacyjne



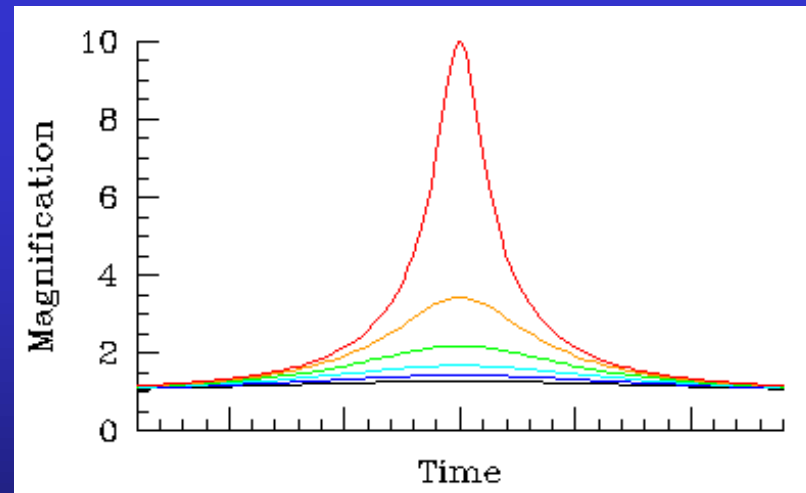
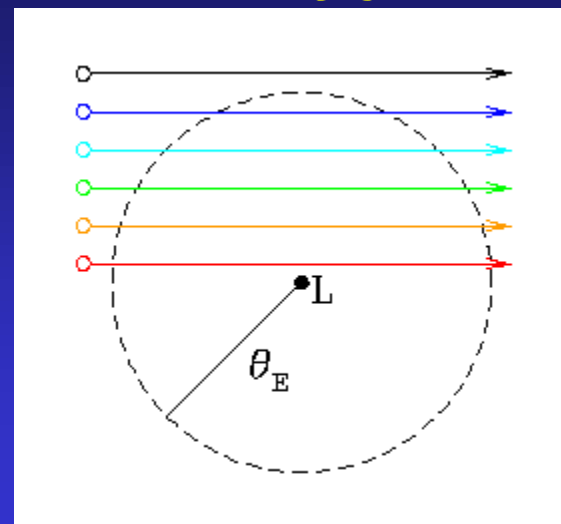
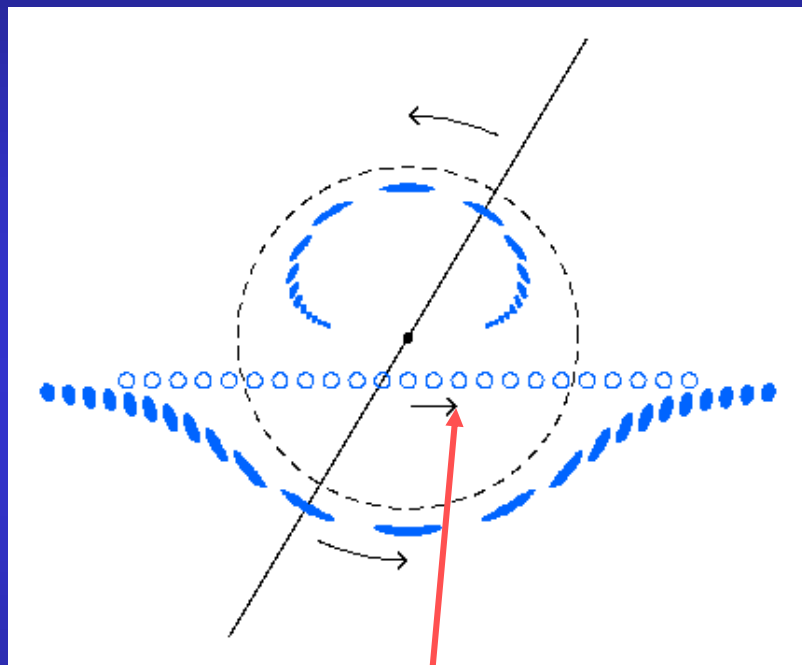
Soczewkowanie Grawitacyjne



Ziemia



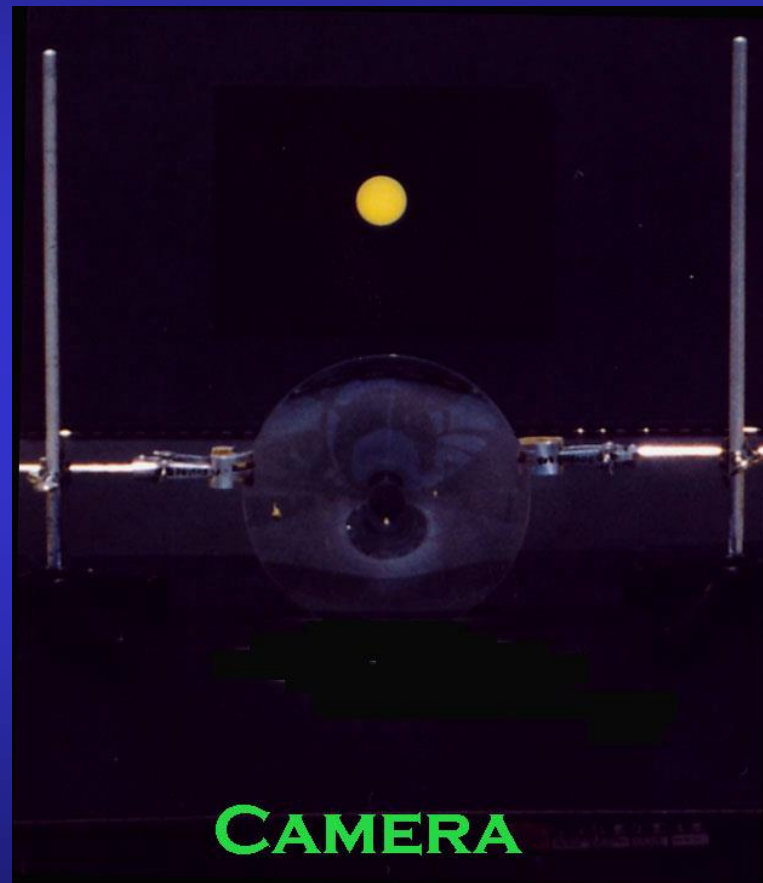
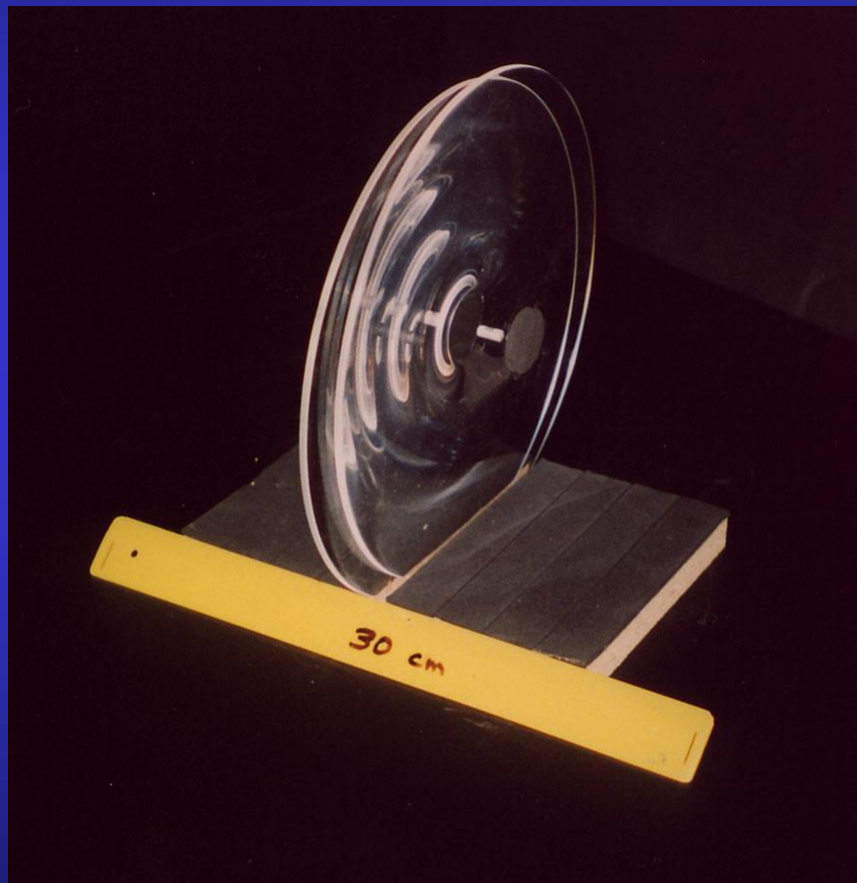
Mikrosoczewkowanie Grawitacyjne



Źródło przesuwają się poniżej soczewki

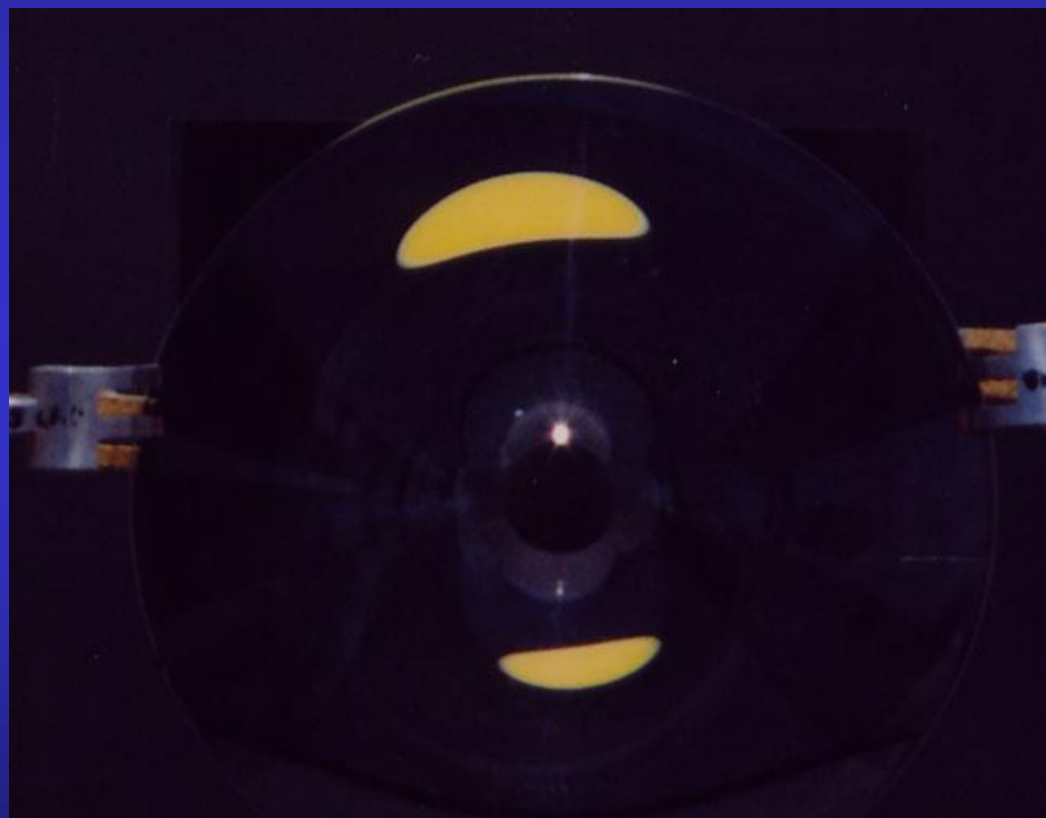
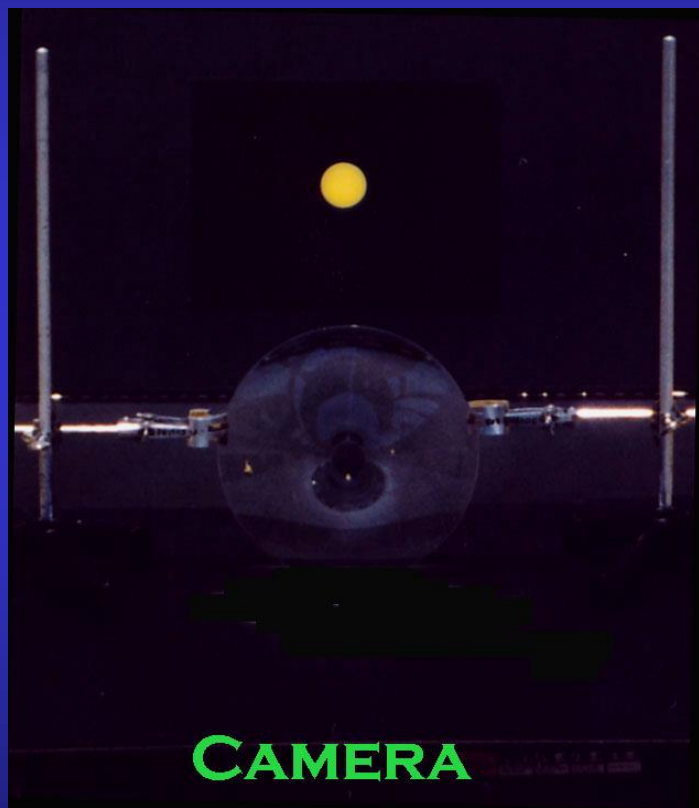
Różne położenia wzajemne źródła i soczewki dają różne przebiegi zmian jasności

Modele Mikrosoczewkowania



Prof. Andrzej Udalski, Konwersatorium W.F. U.W., 10.04.06

Modele Mikrosoczewkowania

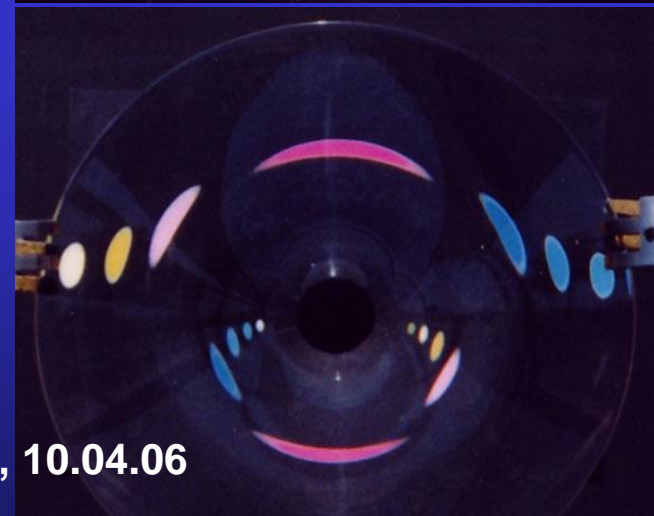
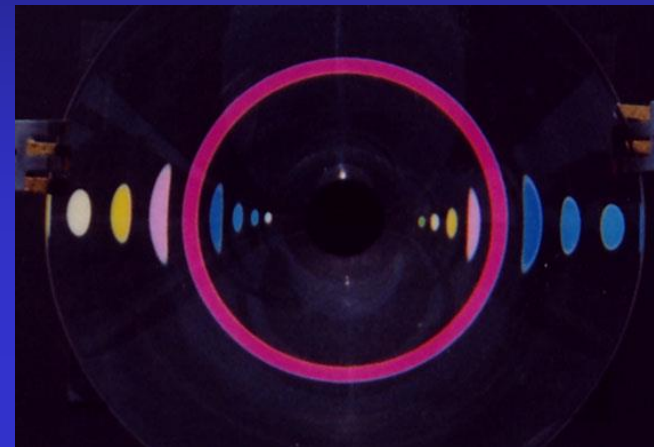


Prof. Andrzej Udalski, Konwersatorium W.F. U.W., 10.04.06

Modele Mikrosoczewkowania

...i odpowiadające im obrazy.

Różne położenia wzajemne
źródła i soczewki...



Prof. Andrzej Udalski, Konwersatorium W.F. U.W., 10.04.06

Mikrosoczewkowanie – animacja



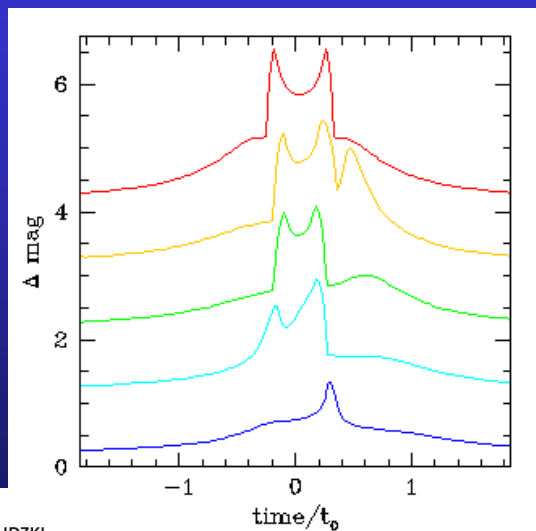
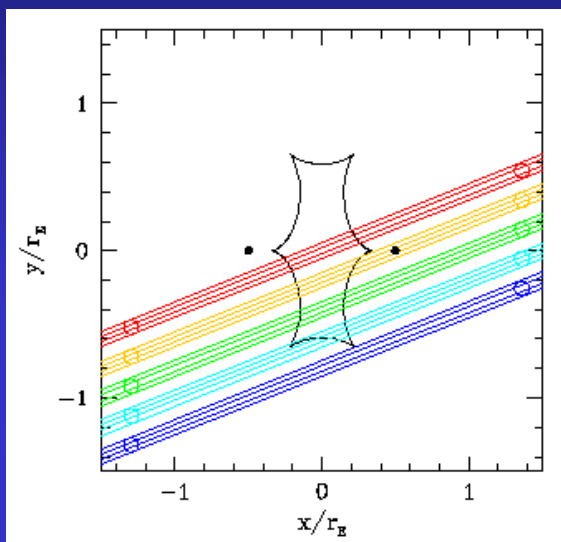
kliknij
←

Prof. Andrzej Udalski, Konwersatorium W.F. U.W., 10.04.06

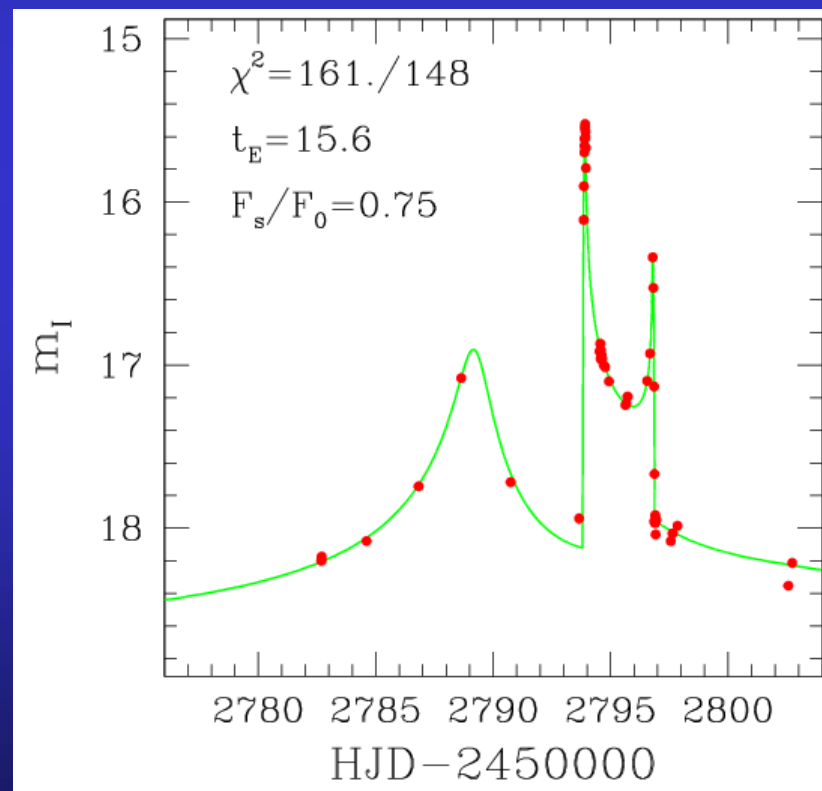
Mapa Wzmocnienia



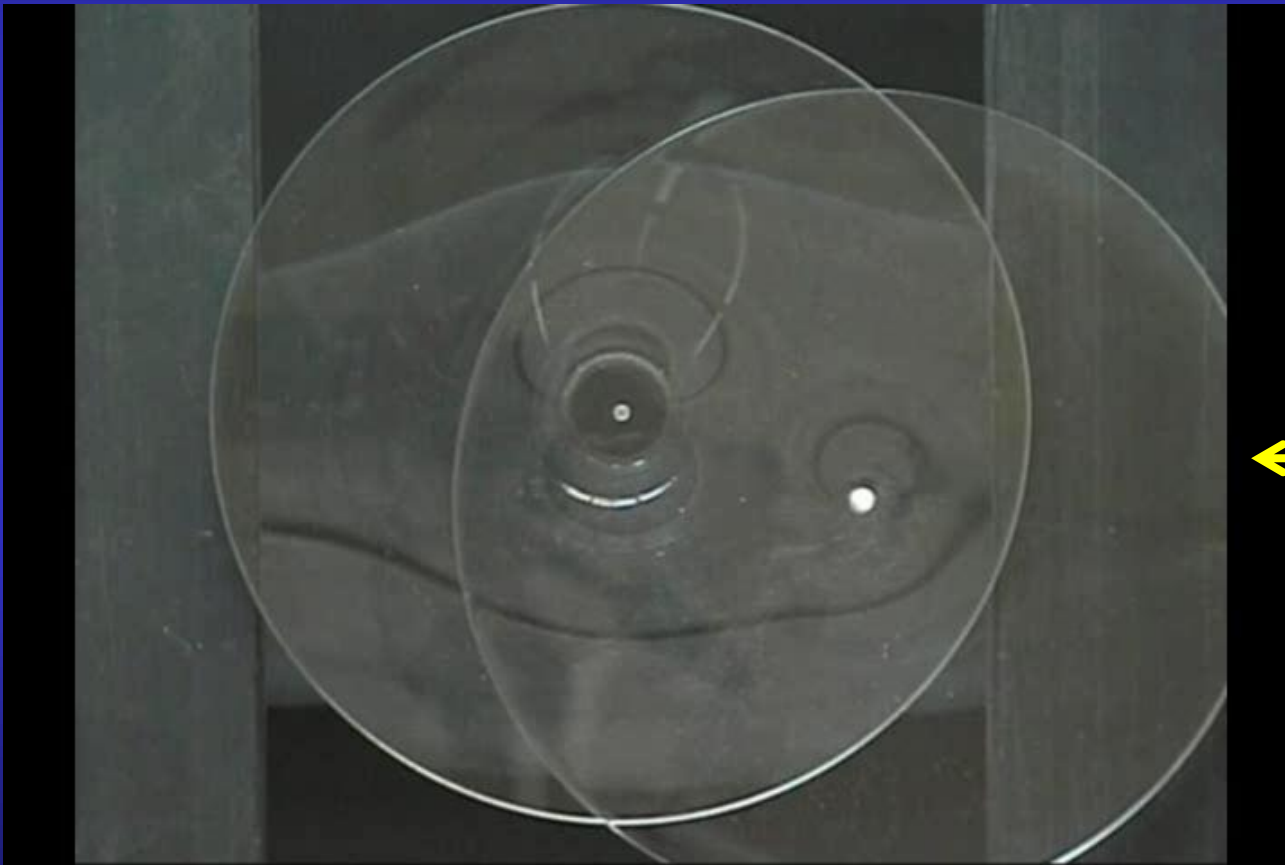
Mikrosoczewkowanie przez układy podwójne gwiazd



OGLE-2003-BLG-170

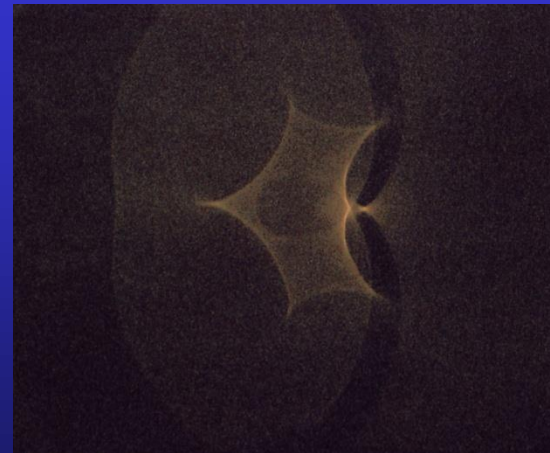
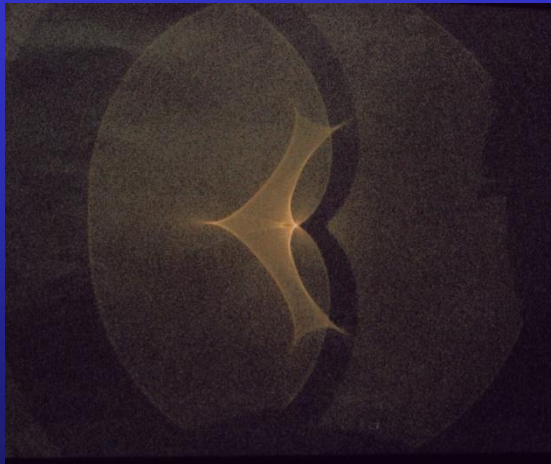
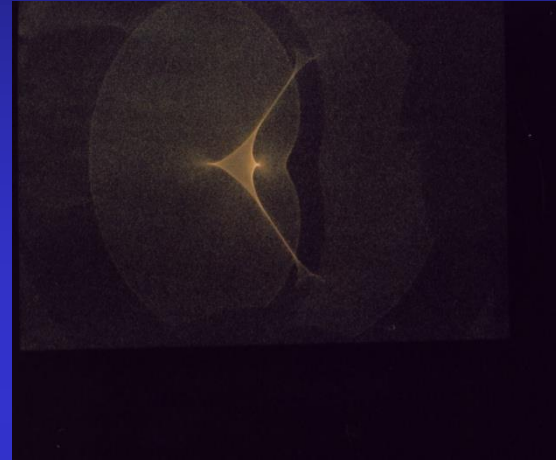


Mikrosoczewkowanie Podwójne – animacja

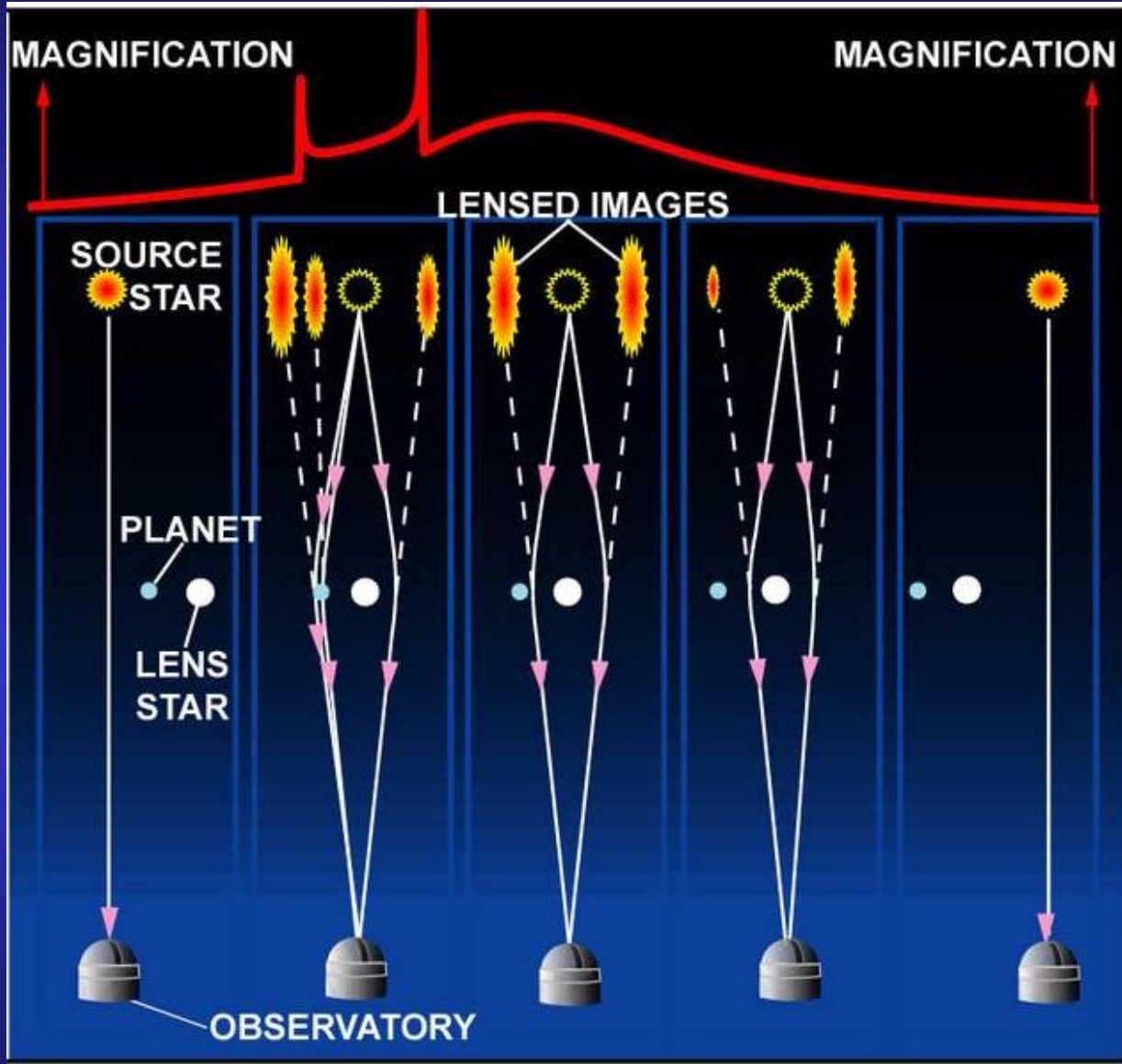


kliknij
←

Mapy Wzmocnienia



Mikrosoczewkowanie Planetarne



Mikrosoczewkowanie Planetarne

- **Krótkotrwała anomalia na krzywej mikrosoczewki pojedynczej masy (gwiazdy centralnej układu). Czas trwania anomalii zależy od masy planety – od kilku godzin w przypadku planety o masie Ziemi do 4—5 dni w przypadku planety jowiszopodobnej.**
- **Z analizy krzywej zmienności blasku wyznacza się stosunek masy planeta/gwiazda. W szczególnych przypadkach można wyznaczyć masę.**
- **Duża czułość na planety mało masywne - metoda pozwalająca odkryć planety o masie Ziemi a nawet lżejsze.**
- **Metoda jest najbardziej czuła na układy planetarne w dużej odległości od Ziemi (10—20 tys. lat świetlnych).**
- **Bardzo małe prawdopodobieństwo zajścia mikrosoczewkowania planetarnego**
- **Zjawiska mikrosoczewkowania są niepowtarzalne – konieczność ciągłych obserwacji zjawiska. (Duże kolaboracje; bardzo wiarygodne dane obserwacyjne).**

Projekt OGLE: The Optical Gravitational Lensing Experiment (1992 -)

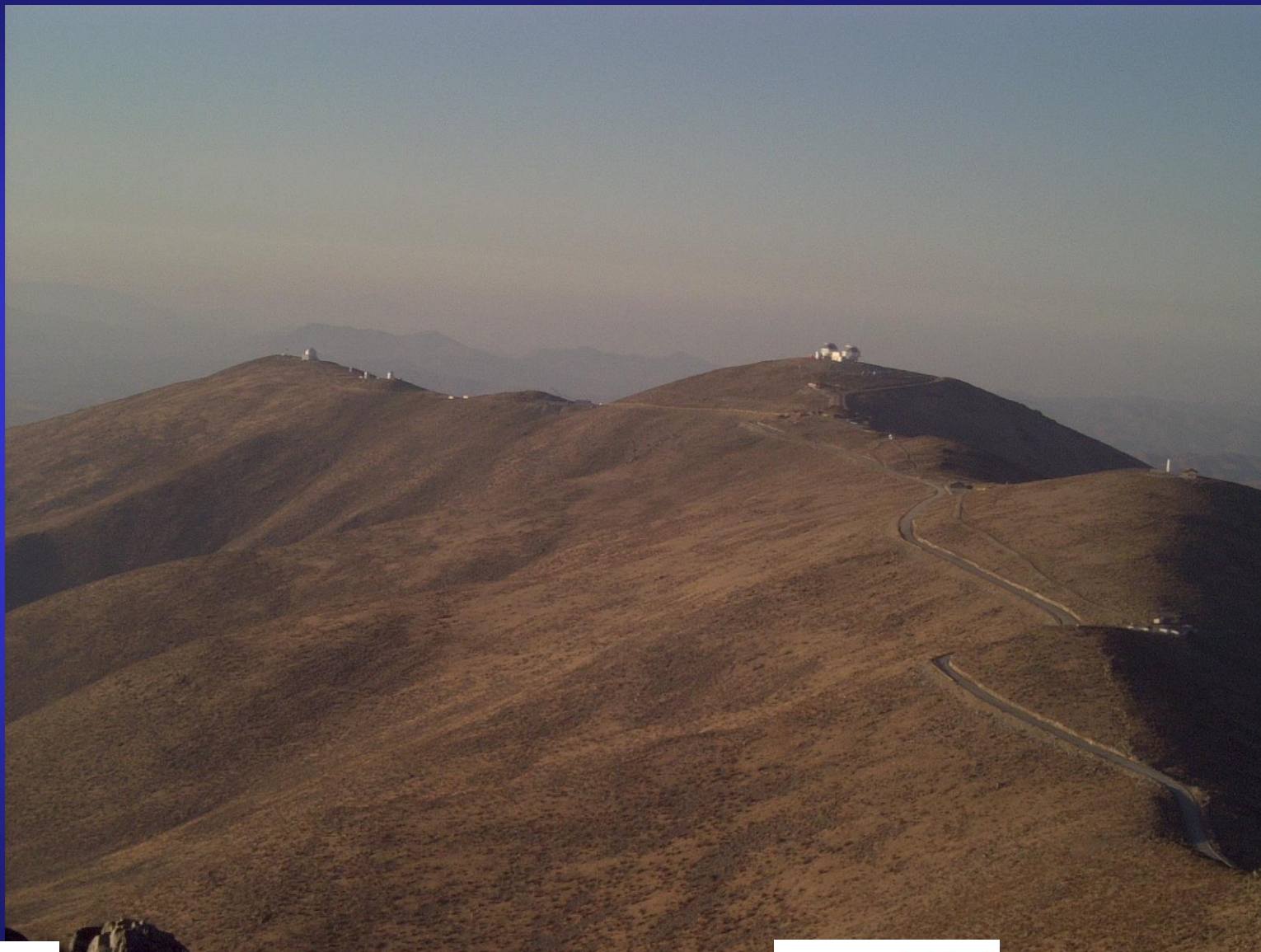
- Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Warszawskiego (prof. Andrzej Udalski)
- Princeton University Observatory (prof. Bohdan Paczyński)
- Carnegie Institution of Washington
– Las Campanas Observatory, Chile

WWW pages:

<http://ogle.astrouw.edu.pl>

<http://bulge.princeton.edu/~ogle>

Las Campanas Observatory, Chile



Las Campanas Observatory, teleskop warszawski 1.3 m



Rekordy Planetarne OGLE

Do roku 2006

- Trzy „Bardzo Gorące Jowisze” – planety krążące najbliżej swych macierzystych gwiazd: **OGLE-TR-56** $P=1.2$ dnia, $a=0.0225$ AU.
- Najdalsze znane planety pozasłoneczne: **OGLE-2005-BLG-071** (17 tys. l. św.), **OGLE-2005-BLG-390** (20 tys. l. św.).
- Najmniej masywne planety: „super-Earths”: **OGLE-2005-BLG-390** (6 mas Ziemi), **OGLE-2005-BLG-169** (13 mas Ziemi).

Egzoplanety

Podczas fazy OGLE-III w sumie zarejestrowano ponad 4 tys. zjawisk mikrosoczewkowania grawitacyjnego. Analiza statystyczna pokazała, że planety wokół gwiazd nie są rzadkością: co najmniej jedna planeta powinna krążyć wokół każdej gwiazdy w naszej Galaktyce.

W fazie OGLE-IV tylko każdego roku rejestruje się 1500-2000 zjawisk mikrosoczewkowania. Około 2% z tych zjawisk wywoływana jest przez pojedyncze obiekty o masach planetarnych.

Do 1.01.2019 roku odkryto 3946 egzoplanet.

<http://exoplanet.eu/catalog/>

Planety swobodne w centrum Galaktyki

Nature Volume: 473, Pages: 349–352 Date published: (19 May 2011)

W centralnym skupieniu galaktycznym odkryto swobodne planety typu Jowisza, których jest około 2 razy więcej niż gwiazd na ciągu głównym.