

Astronomia Pozagalaktyczna: Ciemna Materia

Szymon Kozłowski

Uniwersytet Warszawski

2024



Ciemna Materia

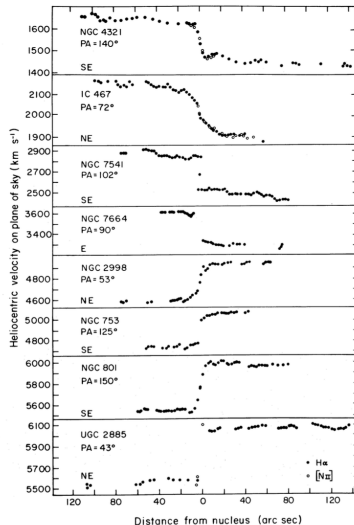
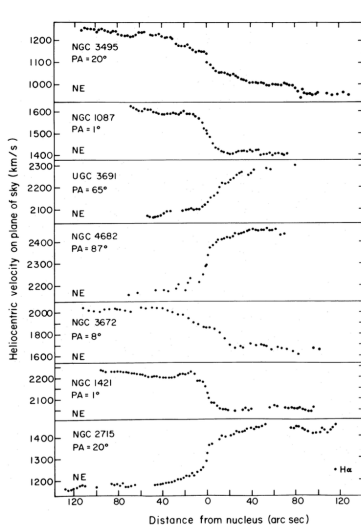
- Oddziałuje z otoczeniem tylko i wyłącznie grawitacyjnie.
- Nie oddziałuje z otoczeniem elektromagnetycznie:
 - Nie absorbuje światła.
 - Nie emituje światła.
- Czym jest? Czy są to obiekty zwarte? Czy są cząstki elementarne? Czy jest to “inna” fizyka?

Dowody obserwacyjne: rotacja galaktyk



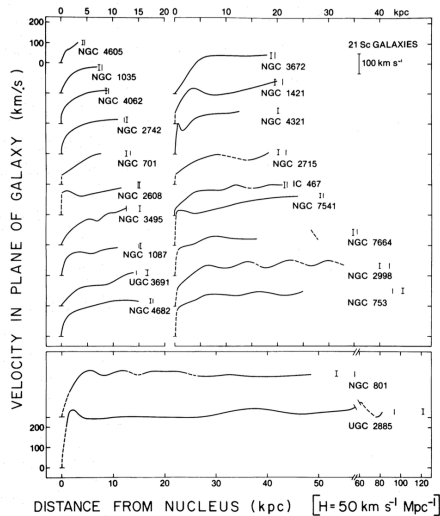
Vera Rubin w Lowell Observatory, Flagstaff, Arizona (1965)

Dowody obserwacyjne: rotacja galaktyk



Vera Rubin i in. (1980)

Dowody obserwacyjne: rotacja galaktyk



Vera Rubin i in. (1980)

Dowody obserwacyjne: rotacja galaktyk

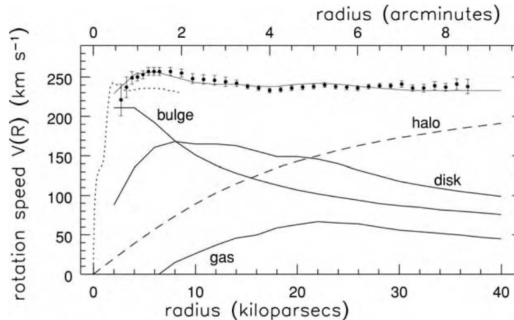
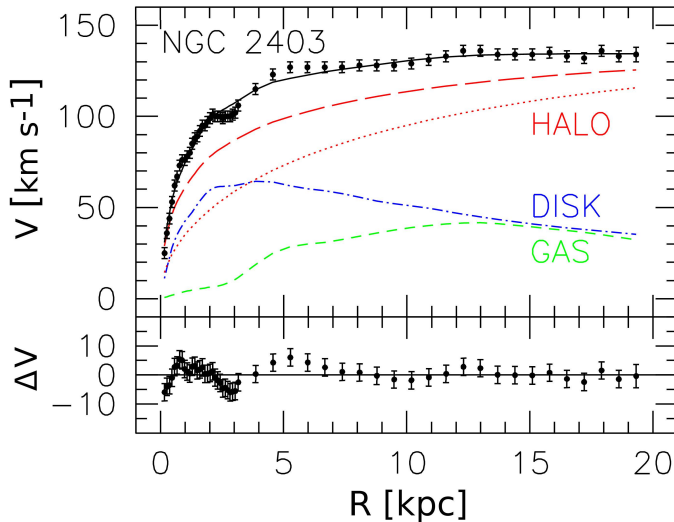
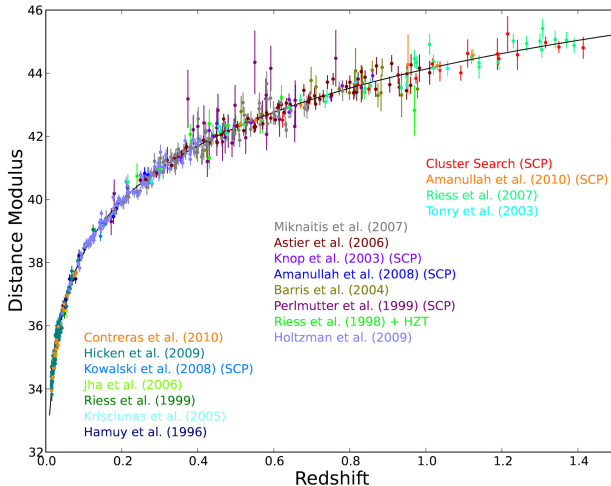


Fig. 5.20. Points give the rotation curve of NGC 7331, as found from the HI map of Figure 5.13; vertical bars show uncertainty. CO gas (dotted), observed with a finer spatial resolution, traces a faster rise. The lower solid curves show contributions to $V(R)$ from the gas disk, the bulge, and the stellar disk. A dark halo (dashes) must be added before the combined rotation speed (uppermost curve) matches the measured velocities – K. Begeman and Y. Sofue.

Dowody obserwacyjne: rotacja galaktyk



Dowody obserwacyjne: SNe Ia na Diagramie Hubble'a



The Supernova Cosmology Project
(katalog: Union2.1 – 580 SNe Ia).

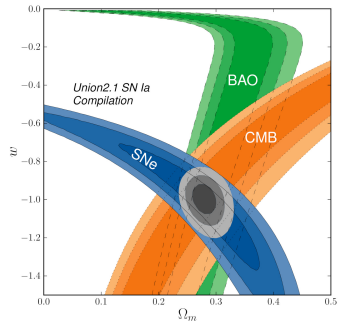
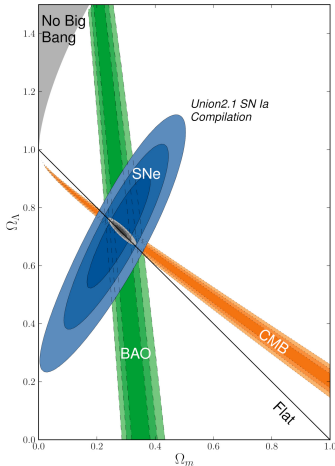
Dopasowujemy model kosmologiczny

$$\mu = m - M = 5 \log(D_L(z)) - 5 \quad (1)$$

$$D_L(z) = (1+z) \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{E(z')} \quad (2)$$

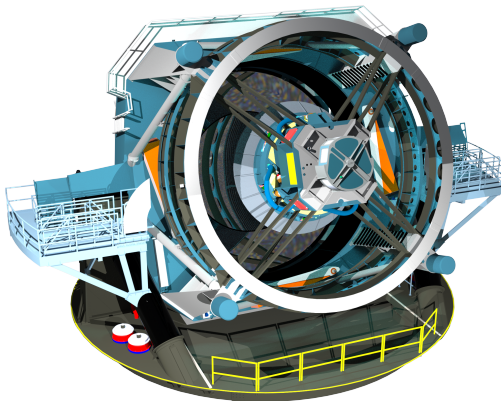
$$E(z) = \sqrt{\Omega_R(1+z)^4 + \Omega_M(1+z)^3 + \Omega_K(1+z)^2 + \Omega_\Lambda} \quad (3)$$

Dowody obserwacyjne: SNe Ia na Diagramie Hubble'a



The Supernova Cosmology Project
(katalog: Union2.1 – 580 SNe Ia).

Dowody obserwacyjne: BAO



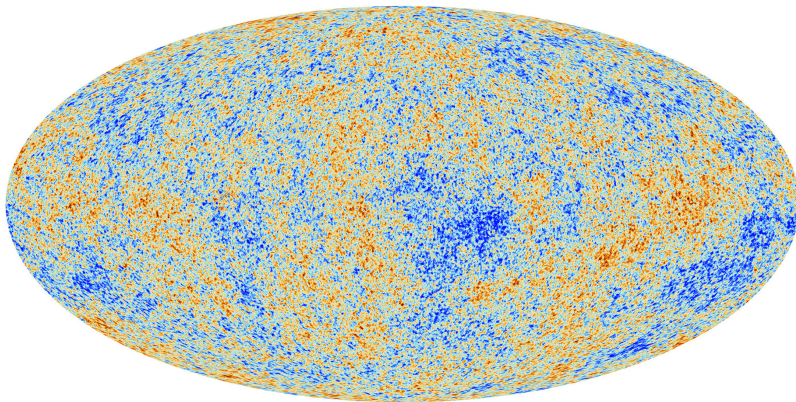
Vera C. Rubin Observatory – Large Synoptic Survey Telescope (LSST)

Nowe obserwatorium w Chile wyposażone w teleskop o średni 8 m.

Filtry ugriz, 10deg^2 ; kadencja 1/30 dni/filtr; jasność graniczna < 27 mag.

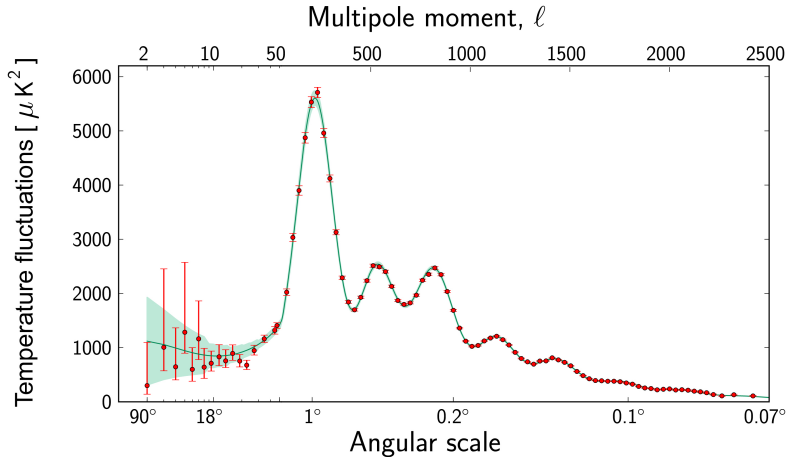
Jednym z zadań jest badanie ciemnej materii i ciemnej energii.

Dowody obserwacyjne: kosmiczne promieniowanie tła (CMB)



Obraz Wszechświata dla $z \approx 1090$.

Dowody obserwacyjne: kosmiczne promieniowanie tła (CMB)



$$\Omega_M = 0,315 \pm 0,007$$

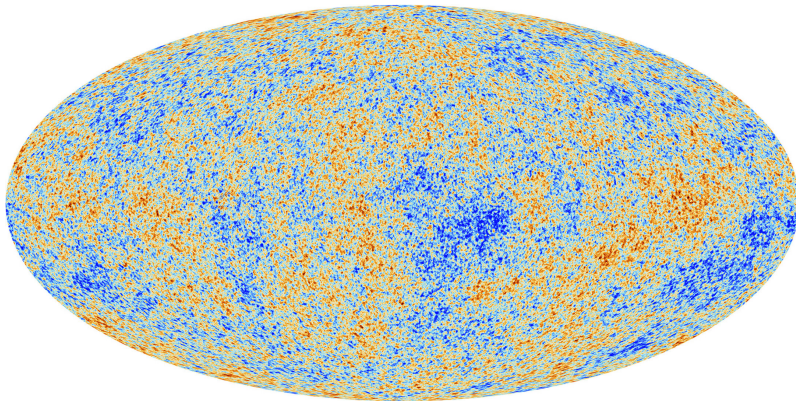
$$\Omega_M = \Omega_{DM} + \Omega_B = 0,266 + 0,049$$

$$\Omega_B / (\Omega_{DM} + \Omega_B) = 15,6\%$$

$$\Omega_{DM} / (\Omega_{DM} + \Omega_B) = 84,4\%$$

Planck i in. (2018)

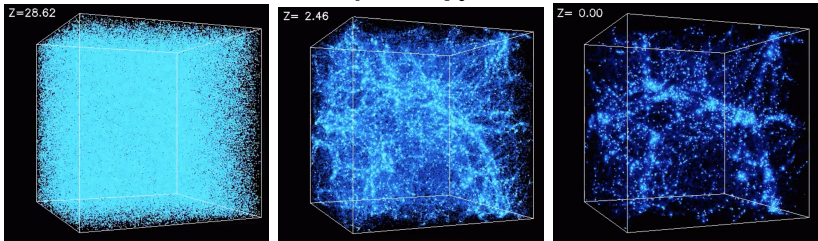
Dowody obserwacyjne: kosmiczne promieniowanie tła (CMB)



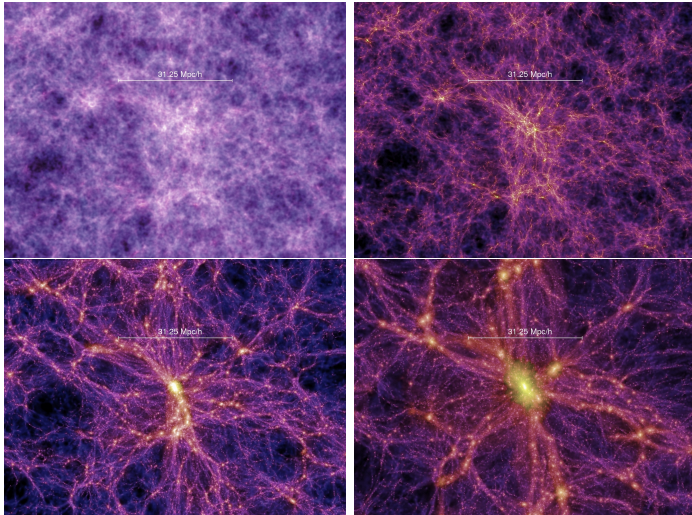
Obraz Wszechświata dla $z \approx 1090$.

Dowody obserwacyjne: Large Scale Structure (LSS)

Można zrobić symulację Wszechświata.



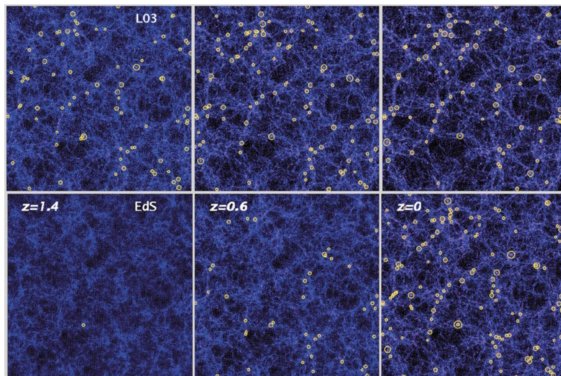
Dowody obserwacyjne: The Millennium Simulation



$z = 18.3, z = 5.7, z = 1.4$ i $z = 0$

Dowody obserwacyjne: Large Scale Structure (LSS)

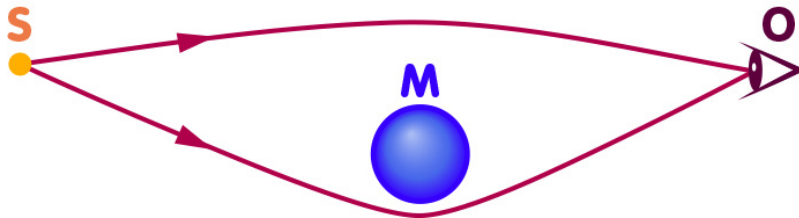
Flat Universe
 $\Lambda=0.7$



Flat Universe
 $\Lambda=0$

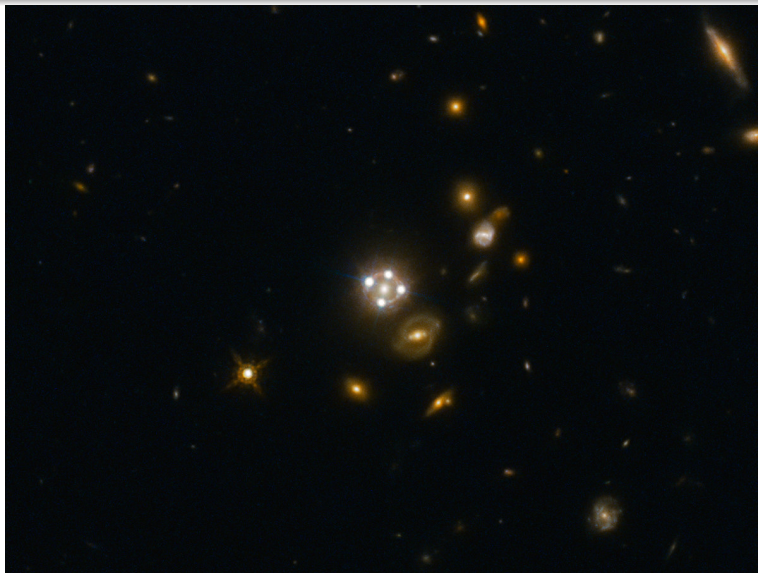
kółka – gromady (najdalsza znana gromada $z = 2.51$)

Dowody obserwacyjne: galaktyki aktywne - soczewkowanie grawitacyjne

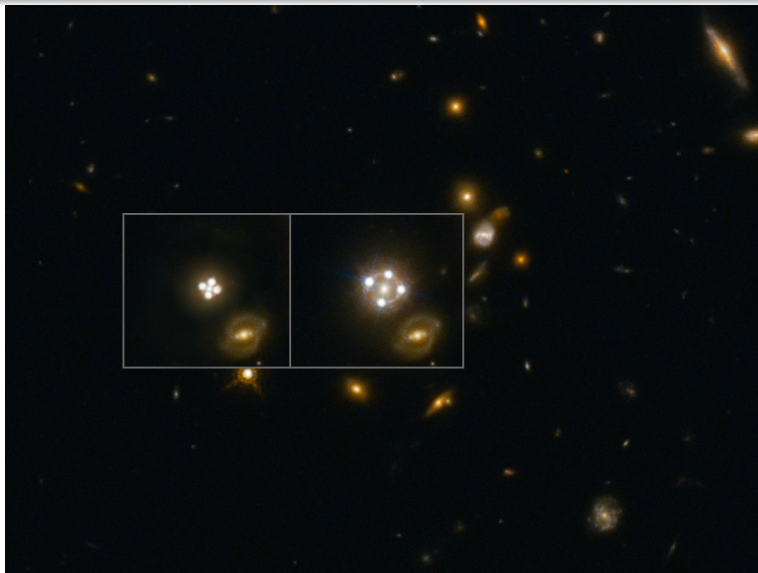


$$\Delta t_{\text{SIS}} = \frac{1}{2} \frac{D_d D_s}{c D_{ds}} \left(\theta_A^2 - \theta_B^2 \right) \quad (4)$$

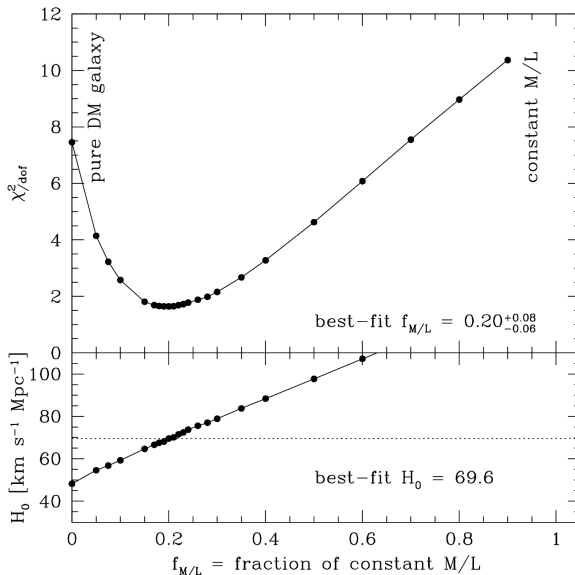
Dowody obserwacyjne: galaktyki aktywne - soczewkowanie grawitacyjne



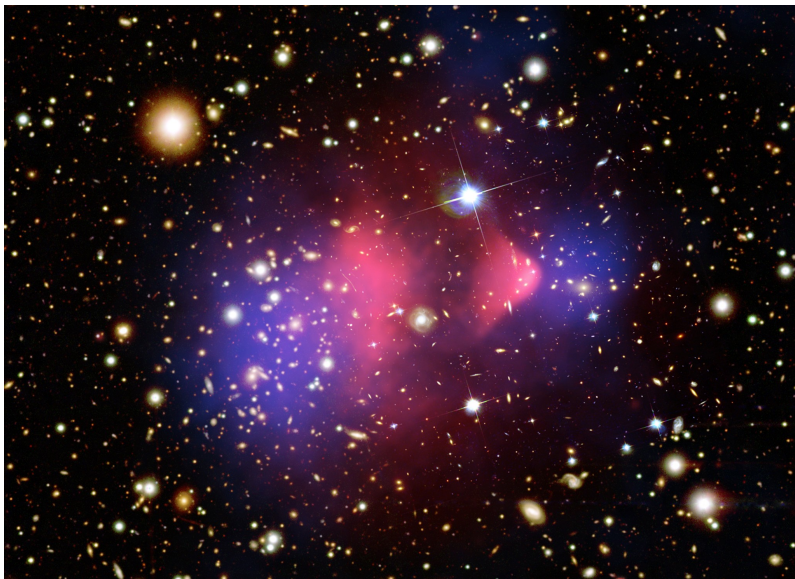
Dowody obserwacyjne: galaktyki aktywne - soczewkowanie grawitacyjne



Dowody obserwacyjne: galaktyki aktywne - soczewkowanie grawitacyjne



Gromada Pocisk – Bullet Cluster



Ciemna materia (dark matter)

Czym może być ciemna materia?

- obiekty duże (zwarte) - massive halo compact objects (MACHOs)
- obiekty małe (cząstki) - weakly interacting massive particles (WIMPs)

GRAVITATIONAL MICROLENSING BY THE GALACTIC HALO

BOHDAN PACZYŃSKI¹

Princeton University Observatory

Received 1985 August 1; accepted 1985 October 23

ABSTRACT

The massive halo of our Galaxy has an optical depth to gravitational microlensing $\tau \approx 10^{-6}$. If the halo is made of objects more massive than $\sim 10^{-8} M_{\odot}$, then any star in a nearby galaxy has a probability of 10^{-6} to be strongly microlensed at any time. The lensing events last ~ 2 hr if a typical “dark halo” object has a mass of $10^{-6} M_{\odot}$, and they last ~ 2 yr for objects of $100 M_{\odot}$. Monitoring the brightness of a few million stars in the Magellanic Clouds over a time scale between 2 hr and 2 yr may lead to a discovery of “dark halo” objects in the mass range 10^{-6} – $10^2 M_{\odot}$ or it may put strong upper limits on the number of such objects.

Subject headings: galaxies: Magellanic Clouds — gravitation — stars: variables

1. INTRODUCTION

The possibility of gravitational microlensing by stars in distant galaxies has been suggested and studied by many authors (Liebes 1964; Refsdal 1964; Chang and Refsdal 1979, 1984; Gott 1981, Young 1981; Vietri and Ostriker 1983; Nityananda and Ostriker 1984; Subramanian, Chitre, and Narasimaha 1985; Paczyński 1985). Unfortunately, in most cases the time scale of intensity changes of a distant quasar subject to microlensing by a solar mass star located at a cosmological distance is very long, and therefore it is not likely to be observed unless many lensed quasars are monitored for many years. If we want to make the time scale much shorter, we have to consider stars which are much closer to us, such as those in

written in the deflector’s plane as

$$r^2 - r_0 r - R_0^2 = 0, \quad (1)$$

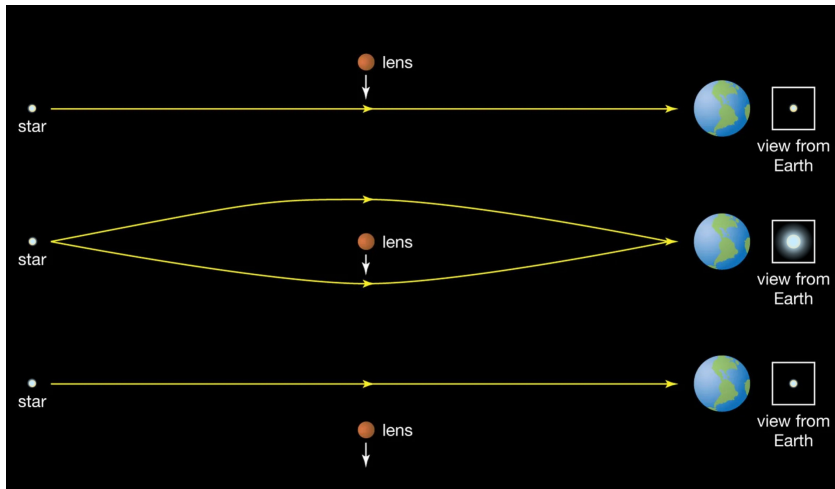
where the coordinate system is centered on the lensing point mass, the source is at r_0 , the image is at r , and

$$R_0^2 = \frac{4GMD}{c^2}, \quad D = \frac{D_d D_{ds}}{D_s}, \quad (2)$$

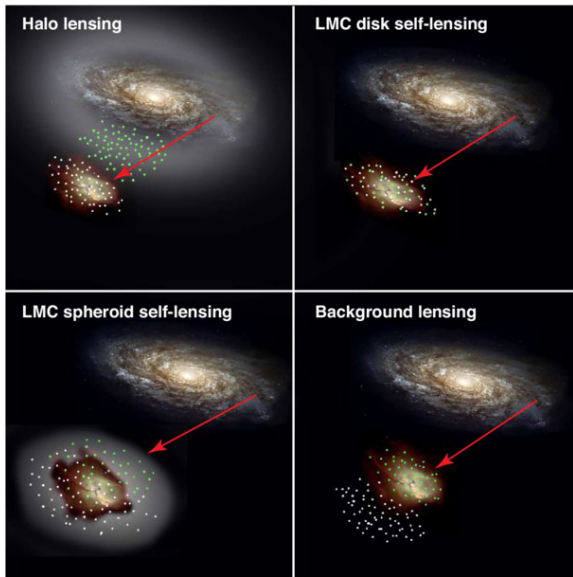
and all symbols have their usual meaning. The quantity R_0 is the radius of the annular image that is formed when the source and the point mass are perfectly aligned.

The equation (1) has two solutions corresponding to the

Ciemna materia - mikrosoczewkowanie



Ciemna materia (dark matter)



Ciemna materia – OGLE



Ciemna materia – OGLE



Ciemna materia – OGLE

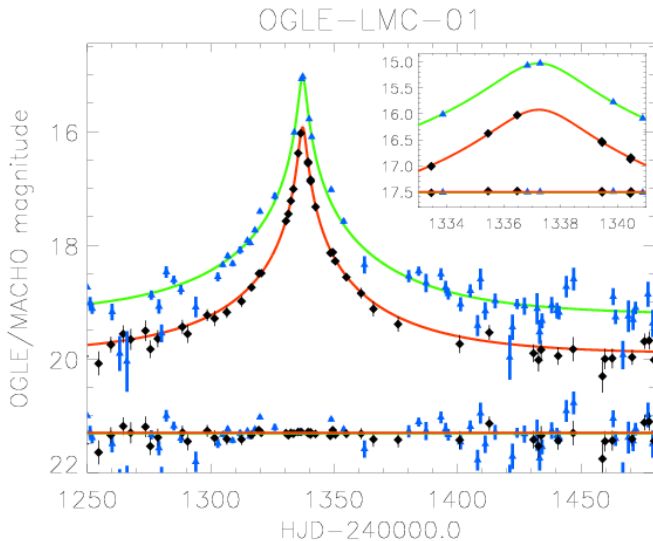


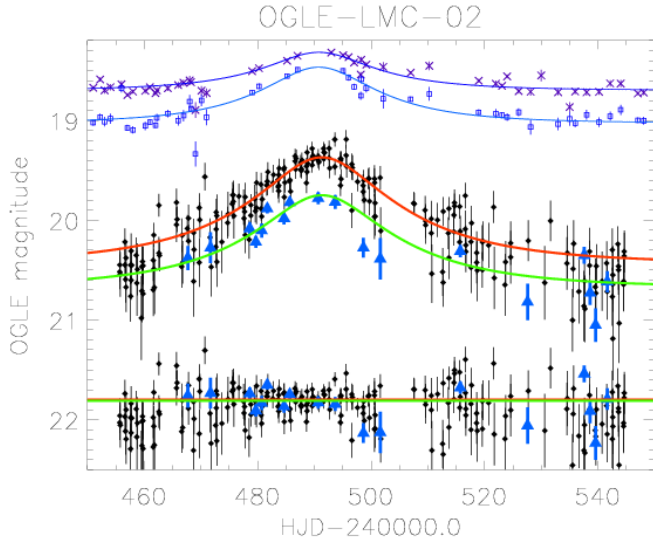
Ciemna materia – OGLE



Szymon Kozłowski

Astronomia Pozagalaktyczna





[Show highlights](#)[Show abstracts](#)[Hide Sidebars](#)[Go To Bottom](#)

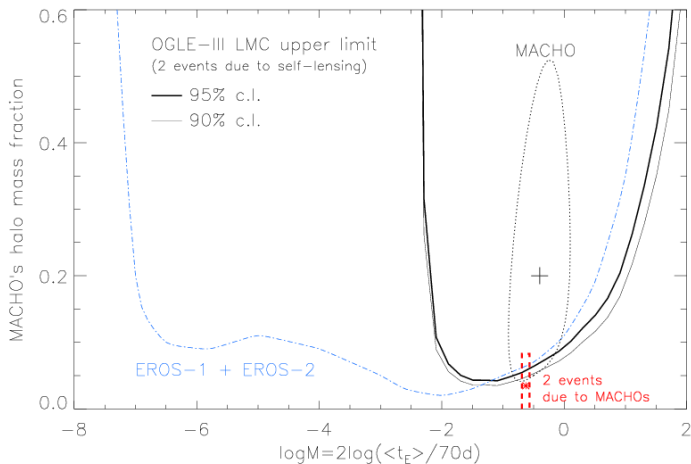
-
- 1 ☐ 2011MNRAS.416.2949W 2011/10 cited: 146   
The OGLE view of microlensing towards the Magellanic Clouds - IV. OGLE-III SMC data and final conclusions on MACHOs
Wyrzykowski, Ł.; Skowron, J.; Kozłowski, S. [and 9 more](#)

 - 2 ☐ 2009MNRAS.397.1228W 2009/08 cited: 81   
The OGLE view of microlensing towards the Magellanic Clouds - I. A trickle of events in the OGLE-II LMC data
Wyrzykowski, Ł.; Kozłowski, S.; Skowron, J. [and 9 more](#)

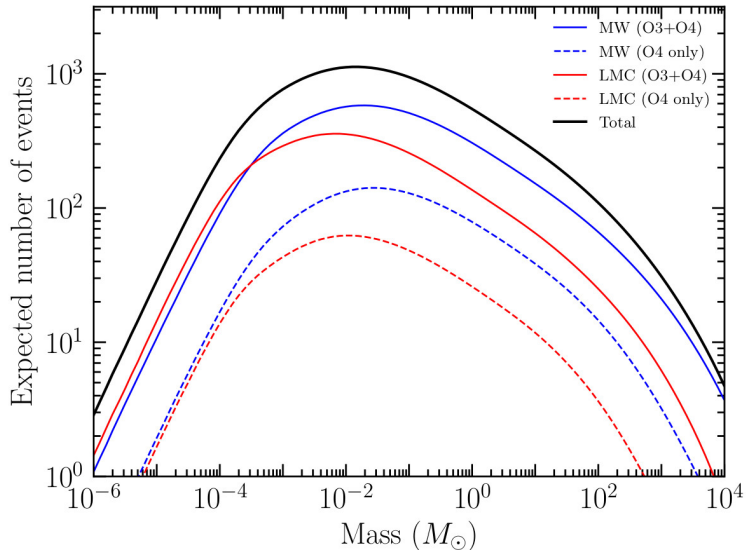
 - 3 ☐ 2011MNRAS.413..493W 2011/05 cited: 69   
The OGLE view of microlensing towards the Magellanic Clouds - III. Ruling out subsolar MACHOs with the OGLE-III LMC data
Wyrzykowski, Ł.; Kozłowski, S.; Skowron, J. [and 8 more](#)

 - 4 ☐ 2010MNRAS.407..189W 2010/09 cited: 26   
The OGLE view of microlensing towards the Magellanic Clouds - II. OGLE-II Small Magellanic Cloud data
Wyrzykowski, Ł.; Kozłowski, S.; Skowron, J. [and 8 more](#)

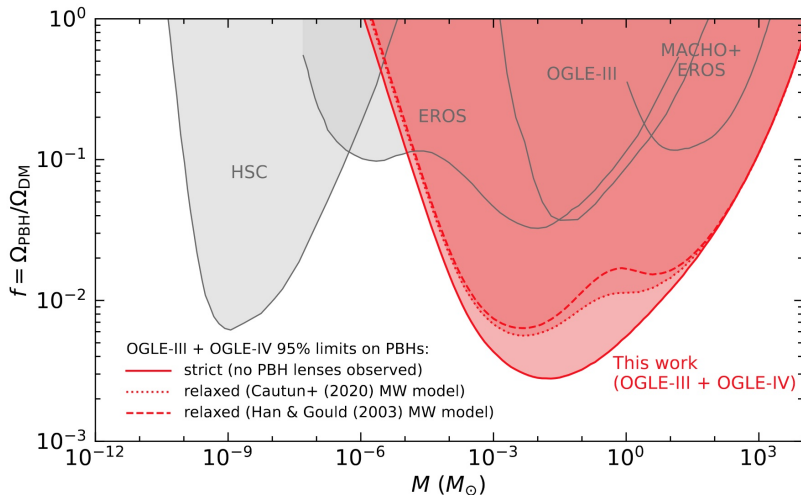
Ciemna materia – OGLE-III



Ciemna materia – OGLE-IV (Mróz i in. 2024)



Ciemna materia – OGLE-IV (Mróz i in. 2024)



Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)

- Oddziałują z otoczeniem tylko i wyłącznie grawitacyjnie.
- Nie oddziałują z otoczeniem elektromagnetycznie:
 - Nie absorbują światła.
 - Nie emitują światła.

Gorąca i zimna ciemna materia

- Hot/warm dark matter – cząstki relatywistyczne ($v \lesssim c$)
- Cold/cool dark matter (CDM) – cząstki nierelatywistyczne ($v \ll c$)

Zmodyfikowana dynamika newtonowska

- Standardowa siła Newtona: $F = ma$
- Praca w ApJ 1983, Milgrom: należy zmodyfikować przyspieszenie a
- Ogólna postać: $F = ma\mu(\frac{a}{a_0})$
 - $\mu(\frac{a}{a_0}) = 1$ dla $\frac{a}{a_0} \gg 1$
 - $\mu(\frac{a}{a_0}) = \frac{a}{a_0}$ dla $\frac{a}{a_0} \ll 1$
- Dla bardzo małych przyspieszeń ($a \ll a_0$): $F = m\frac{a^2}{a_0^2}$
- $a_0 \approx 10^{-10}m/s^2$