

Astrometric Method

$$\theta'' = \left(\frac{M_p}{M_*} \right) \left(\frac{a}{r} \right) \approx \frac{10^{-3}}{r(pc)} \left[\frac{P(yr)}{M_*(\odot)} \right]^{2/3} M_p(J)$$

$$V_r(m/s) \approx \frac{30}{[P(yr)]^{1/3}} \frac{M_p(J) \sin i}{[M_*(\odot)]^{2/3}}$$

Microensing Method

$$R_E^2 = \frac{4GMD}{c^2}, \quad D = \frac{D_{ds}D_d}{D_s}, \quad t_0 = \frac{R_E}{V_e}$$

$$t_0 = \frac{2D_L \theta_E}{V_L} = \frac{2D_L}{V_L} \sqrt{\frac{4GM(1 - D_d/D_s)}{c^2 D_d}}$$

$$A = \frac{u^2 + 2}{u(u^2 + 4)^{1/2}}, \quad u = \text{impact parameter}$$

$$B \geq \frac{\lambda D}{r} \approx \left(\frac{\lambda}{10 \mu m} \right) \left(\frac{D}{10 pc} \right) \left(\frac{r}{1 AU} \right)^{-1} m$$

Radial Velocity Method

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_* + M_p)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}$$

$$M_p \sin i = \left(\frac{P}{2\pi G} \right)^{1/3} K M_*^{2/3} (1 - e^2)^{1/2}$$

Direct Detection

Effective Temperature

$$T_p = \frac{(1 - A)^{1/4}}{\sqrt{2}} \left(\frac{R_*}{r} \right)^{1/2} T_*$$

$$A_\oplus \sim 0.39, \quad T_* \sim 5770 K, \quad r_\oplus \sim 1 AU$$

$$\Rightarrow T_p \sim 280 K \Rightarrow \text{Greenhouse Effect!}$$

Transit Method

$$\frac{\Delta F}{F} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2, \quad t = \frac{P_p}{\pi} \left(\frac{R_* \cos \delta + R_p}{a_p} \right)$$

$$i_{\min} = \cos^{-1} \left(\frac{R_*}{a_p} \right), \quad \cos i = \frac{R_* \sin \delta}{a_p}$$

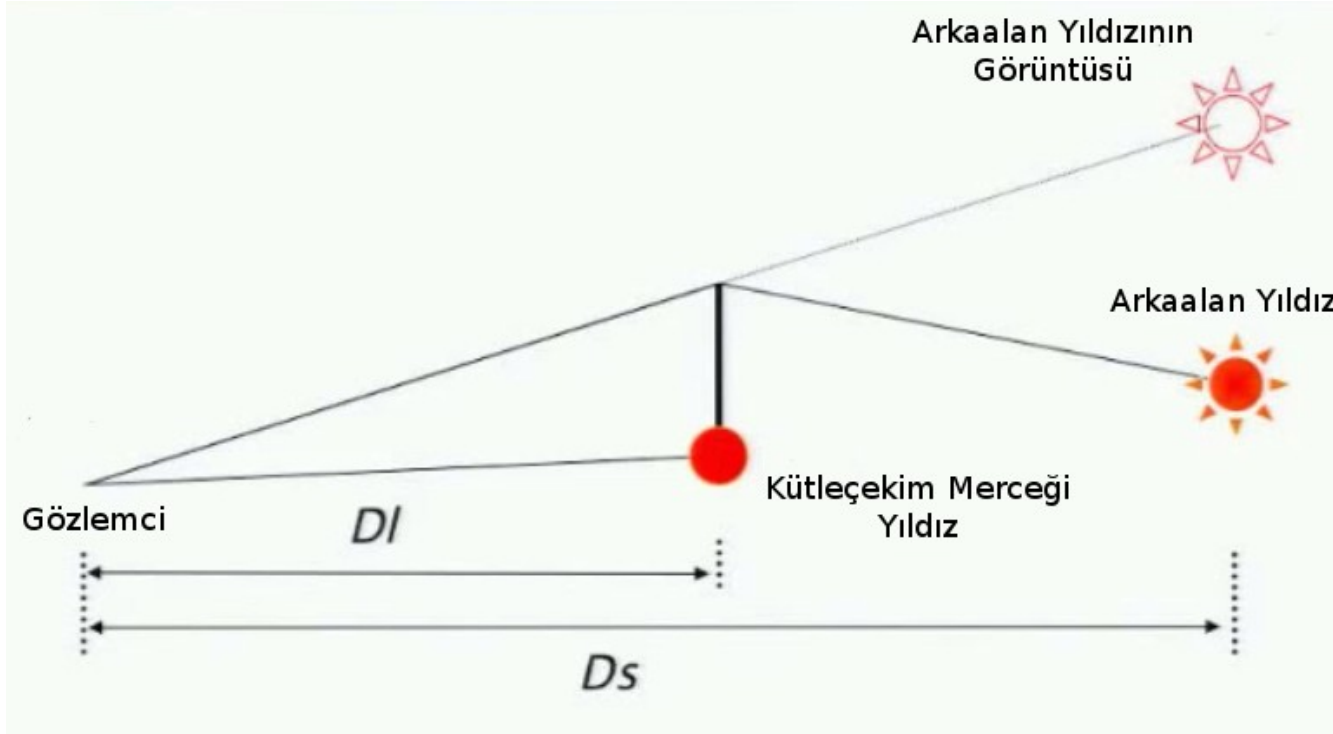
AST418 Gezegen Sistemleri ve Oluşumu

Ders 7a : Diğer Keşif Yöntemleri Kütleçekimsel Mercek Yöntemi

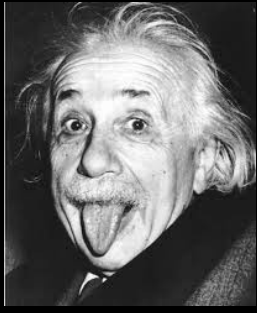
Kütleçekimsel Mercek Yöntemi



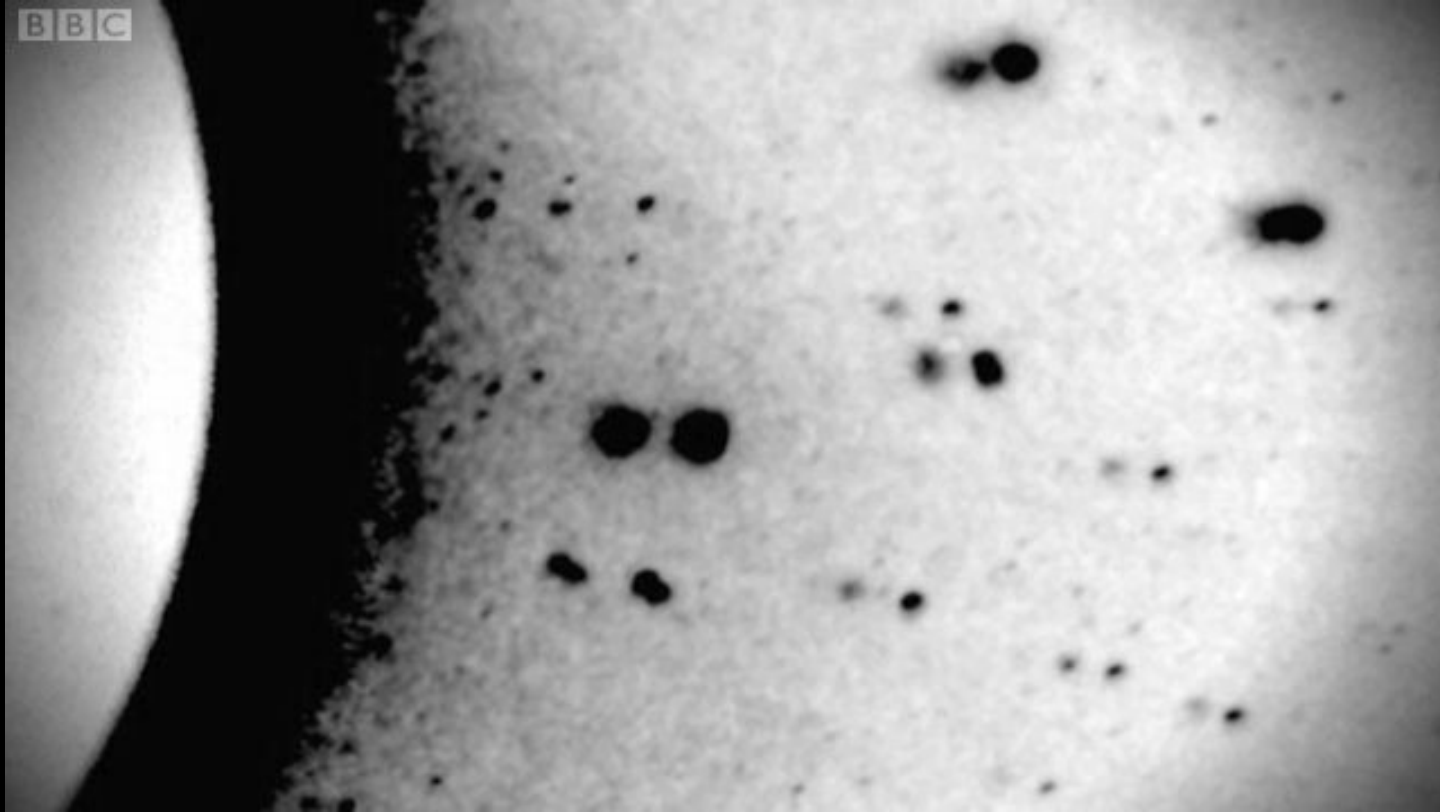
Kütleçekimsel (Mikro)Mercek



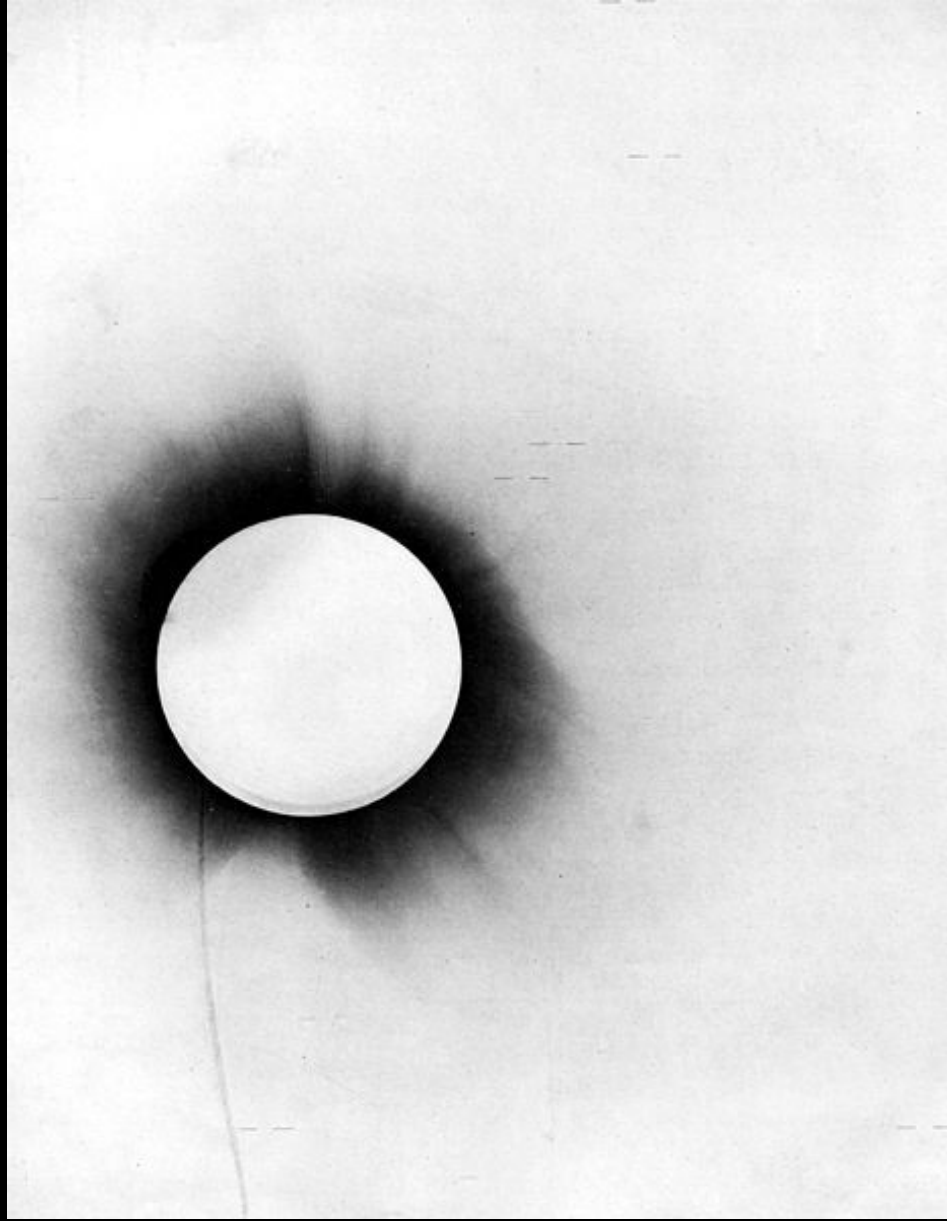
Bizden uzak parlak bir yıldız düşünelim. Her ne kadar yıldızlar bize çok uzak oldukları için gökyüzümüzdeki hareketleri çok küçük olsa da onların birer uzay hızları olduğunu biliyoruz. Bu uzay hareketi nedeniyle bize daha yakın bir yıldızın gözlemciyle bir arkaalan yıldızının arasından geçmesi mümkündür. Öndeki yıldız kütleçekim etkisi nedeniyle çevresindeki uzayın geometrisini değiştirdiğinden arkaalan yıldızından gelen ışığı “bükecek” ve normalde başka bir yönde ilerleyecek fotonları bize doğru yönlendirebilecektir. Kütleçekim etkisi nedeniyle tıpkı bir mercek gibi davranan bu yıldıza bu nedenle “**kütleçekimsel mikromercek**” adı verilir. Bu sayede arka plandaki yıldızı gökyüzümüzdeki olması gereken noktadan başka bir noktada ve “daha parlak” görürüz!



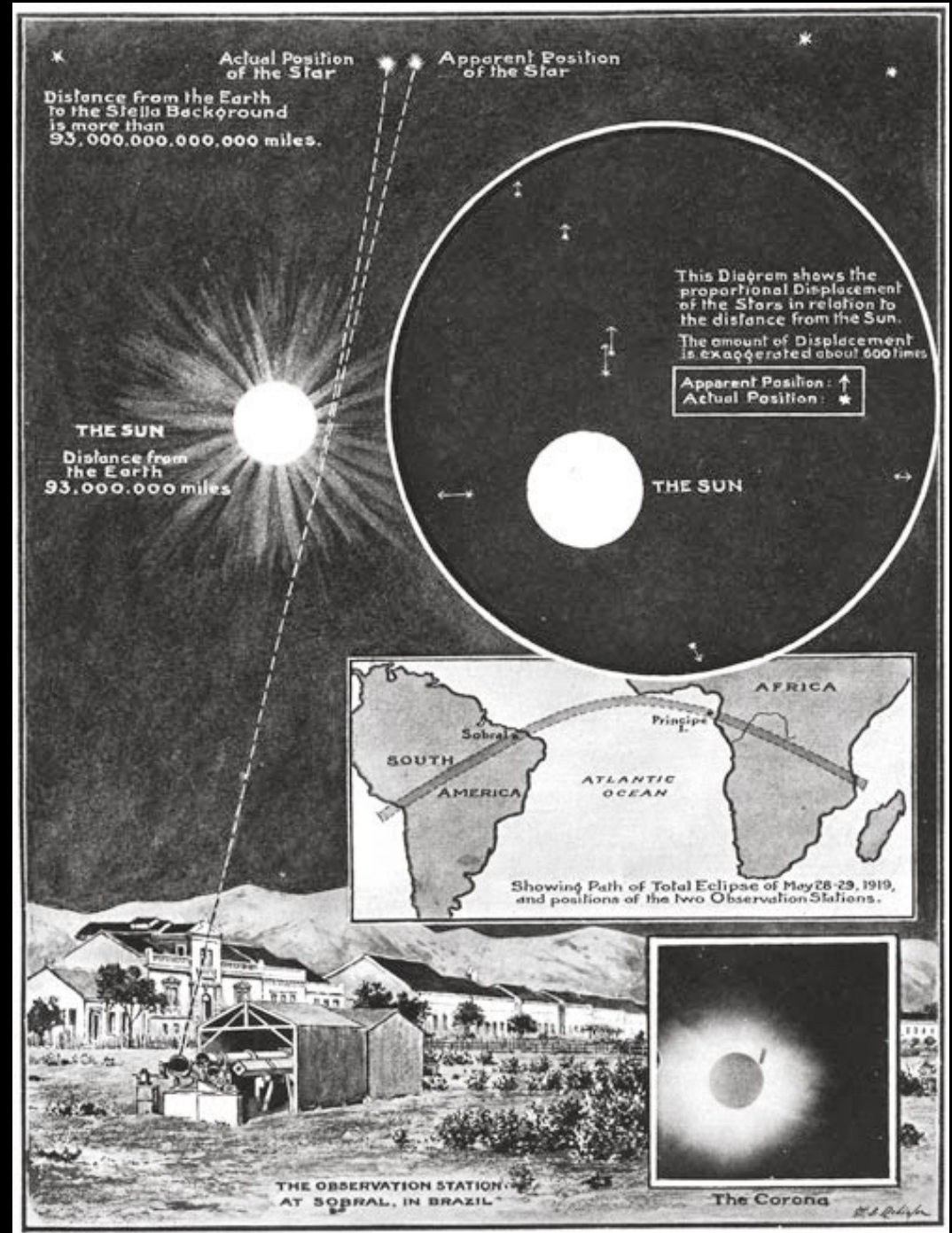
1919 Güneş Tutulması



Einstein, Newton Yasalarıyla uyumlu olmayan bir şekilde uzayın kendisinin kütle tarafından büküldüğünü düşünüyordu. Bu düşüncesini ispatlayan ilk gözlemsel olgu Sir Arthur Eddington tarafından gerçekleştirilen 1919 Güneş Tutulması gözlemleridir. 1919 Tutulması'ndan 6 ay önce, gökyüzünde tutulmanın gerçekleşeceği alanda Hyadaes yıldızlarının gece gözlemlerini gerçekleştirdi ve bu yıldızların konumlarını hassas olarak ölçtü. 6 ay sonra 29 Mayıs 1919'da Afrika'nın batısındaki São Tomé ve Príncipe adası ile Sobral, Ceará, Brezilya'da eş zamanlı olarak gözlenen tutulma sırasında; Hyades yıldızları Güneş'in kütleçekimsel etkisinden dolayı ışığın yönünü saptırması nedeniyle, tam da Einstein'ın öngördüğü kadar farklı noktalarda gözlemlendi.

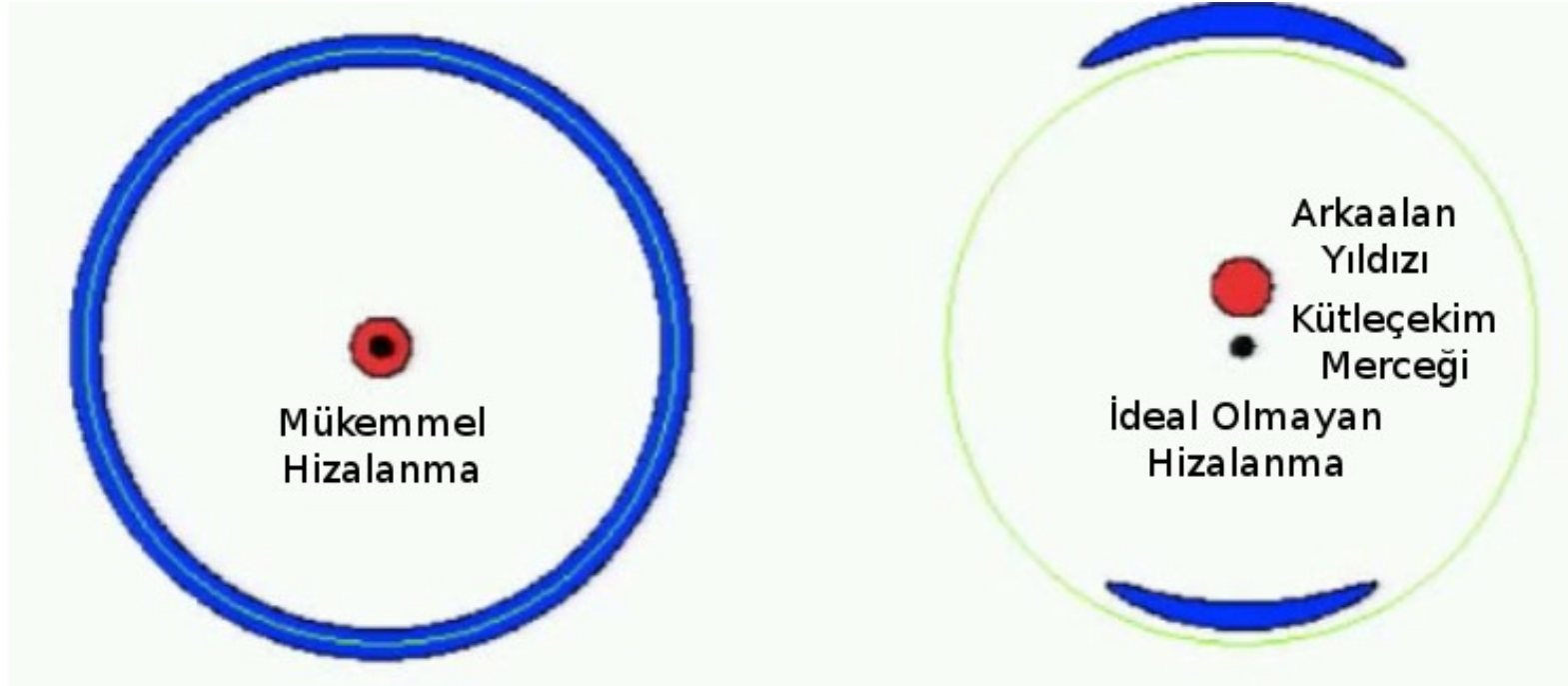


Eddington'ın 1920'de yayınladığı tutulma fotoğrafı



London News Gazetesi'nde yayınlanan 1919 Tutulması Haberi

Einstein Diski



İdeal olmayan hizalanma durumunda oluşan iki görüntü arasındaki uzaklık $2\theta_e$ kadardır.

$$\text{Büyütme} = (\text{Görüntü Alanı}) / (\text{Kaynağın Alanı})$$

Her ne kadar büyütme (ing. magnification) terimi kullanılıyorsa da söz konusu olan galaksiler gibi geniş kaynaklar değil de nokta kaynaktan gelen yıldız ışığı olduğunda, ışığı daha geniş alana yaydığımız için hizalanmanın olduğu süre boyunca arkaalan yıldızını daha parlak görürüz!

Işığın Mercekleme Nedeniyle Sapınç Miktarı

Boyutsuz (nokta) kütleler için bir arkaplan cisminden alınan ışığın mükemmel hizalandığı kütleçekimsel mercek olarak davranan cismin r uzaklığından geçerken mercekleme etkisi nedeniyle uğradığı sapıncın miktarı radyan biriminde aşağıdaki ifadeyle verilir.

$$\theta = \frac{4GM}{rc^2}$$



Örnek 1. Güneş'in ($M = 2 \times 10^{30}$ kg) yüzeyini sıyrarak geçen ($r = 7 \times 10^8$ m) ışık

$$\theta = (4 * 6.67 \times 10^{-11} * 2 \times 10^{30}) / (7 \times 10^8 * (3 \times 10^8)^2)$$
$$\theta = 1''.747$$

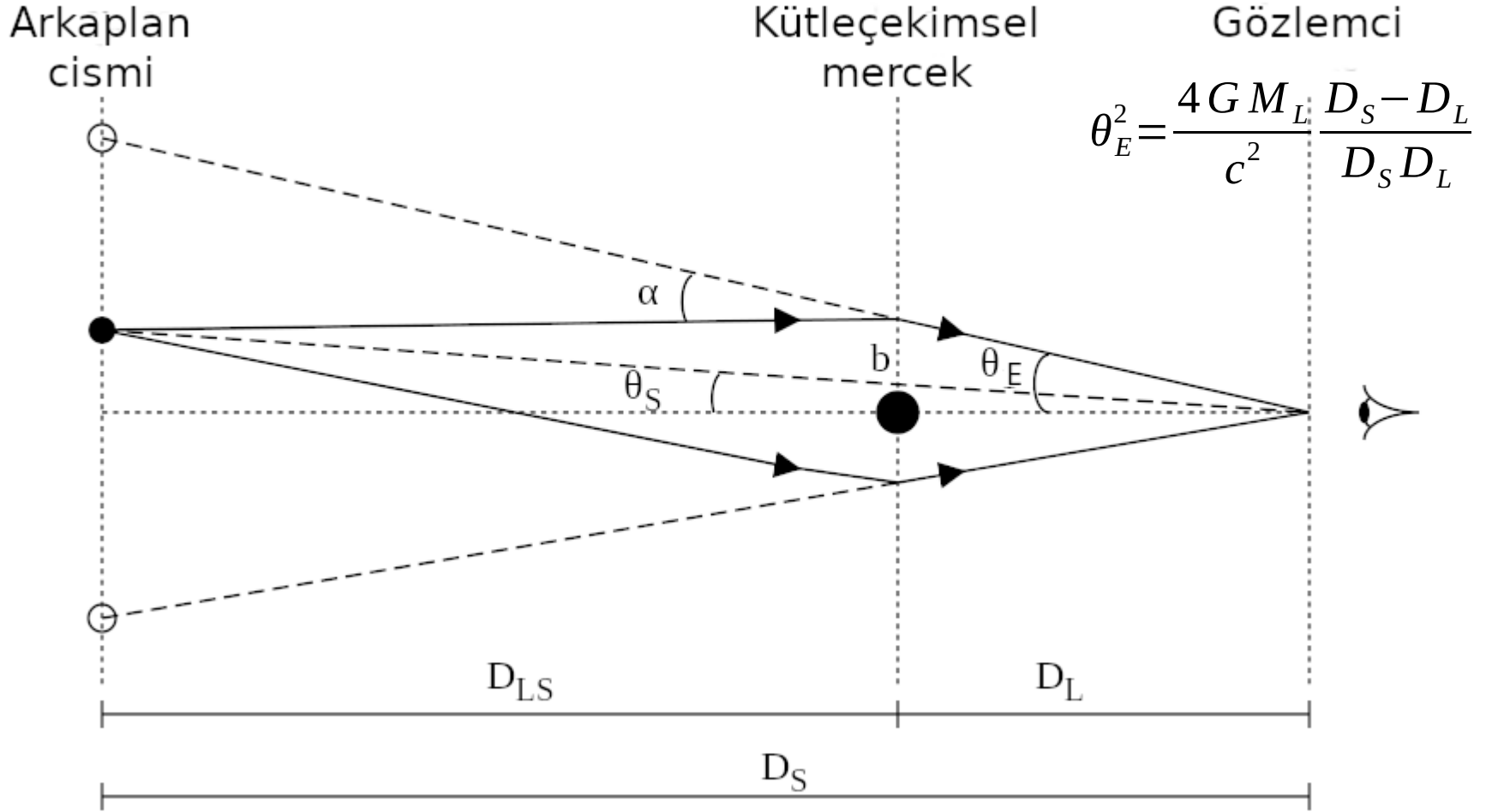
kadar yolundan sapar.

Örnek 2. 100 kg kütleye sahip bir insanın kütle merkezinin 10 cm uzağından geçen ışık

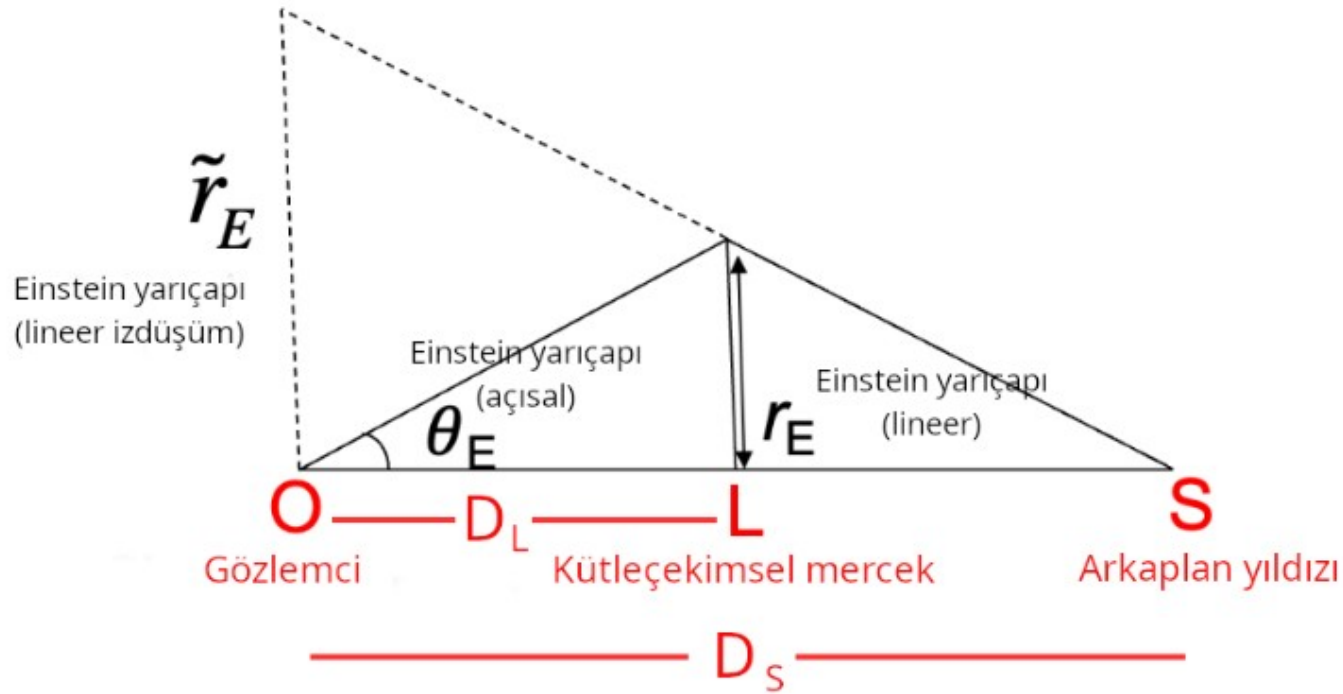
$$\theta = (4 * 6.67 \times 10^{-11} * 100) / (0.1 * (3 \times 10^8)^2)$$
$$\theta = 6''.11 \times 10^{-19}$$

kadar yolundan sapar.

Einstein Yarıçapı



Kütleçekimsel mercek olarak davranan cisimle mükemmel hizalanan bir arkaplan cisiminden alınan ışığın merceklenme etkisi nedeniyle oluşturduğu çemberin yarıçapı **Einstein yarıçapı** olarak adlandırılır. Boyutu açı birimlerinde (radyan) olup, büyüklüğü mercek cisminin kütlesiyle (M) gözlemciye (D_L) ve arkaplan cismine (D_{LS}) uzaklığına bağlıdır.



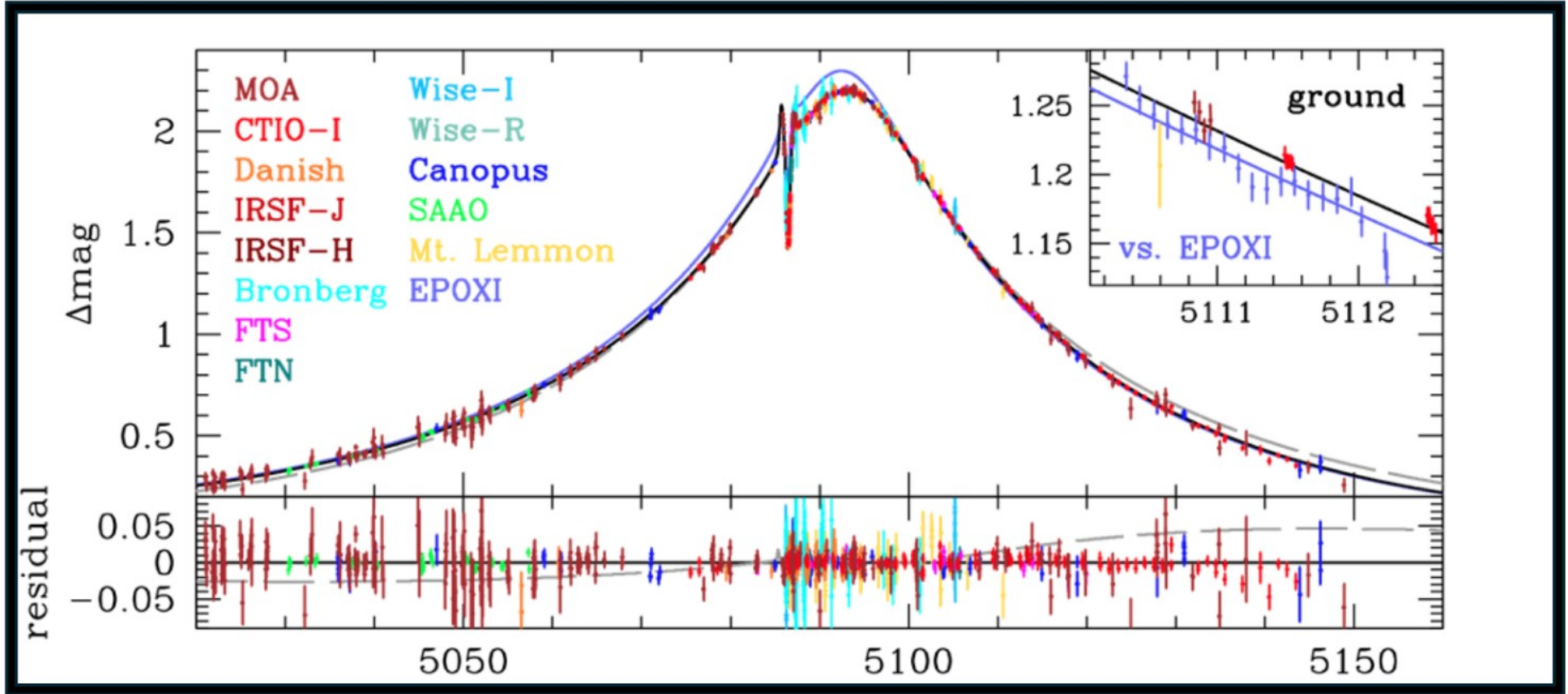
Mercek cismin kütlesi

$$M_L = \frac{c^2}{4G} \theta_E^2 \frac{D_S D_L}{D_S - D_L} \quad \text{veya} \quad M_L = \frac{c^2}{4G} r_E^2 \frac{D_S - D_L}{D_S D_L} \Rightarrow M_L = \frac{c^2}{4G} \tilde{r}_E \theta_E$$

Mikromercek yöntemiyle gezegen keşfinde arkaplan kaynağı genellikle Galaksi merkezi civarında (~ 8 kpc) ve uzaklığı bilinen bir cisimdir. Eğer açısal Einstein yarıçapı (θ_E) gözlemlerle belirlenebilir, aşağıdaki şekilde tanımlanan kütleçekimsel mercek paralaksı (π_E) da ışık eğrilerinden ölçülebilirse yukarıdaki denklemleri çözmek ve mercek cismin kütlesi (M_L) ile uzaklığını (D_L) hesaplamak mümkün olur. Işık eğrisindeki ikincil parlamanın birincil parlamaya oranından kütle oranı (q) belirlenebildiğinden $M_g = M_L \times q$ ile gezegenin kütlesi belirlenebilir.

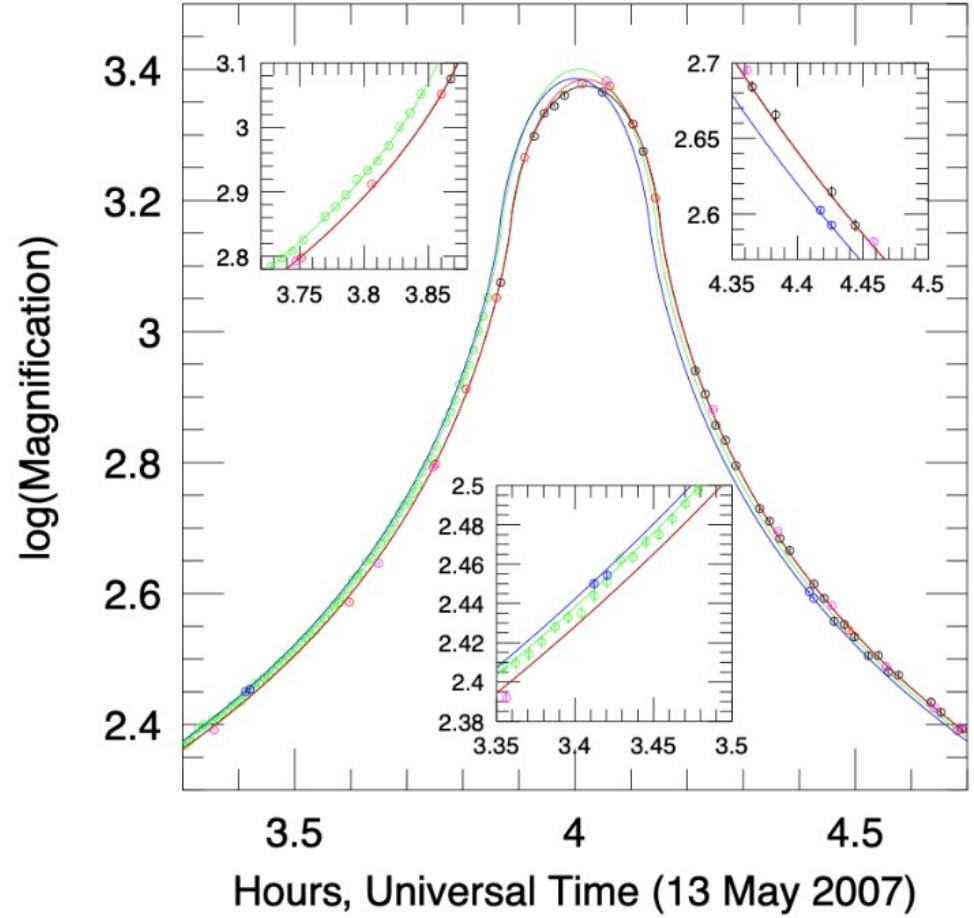
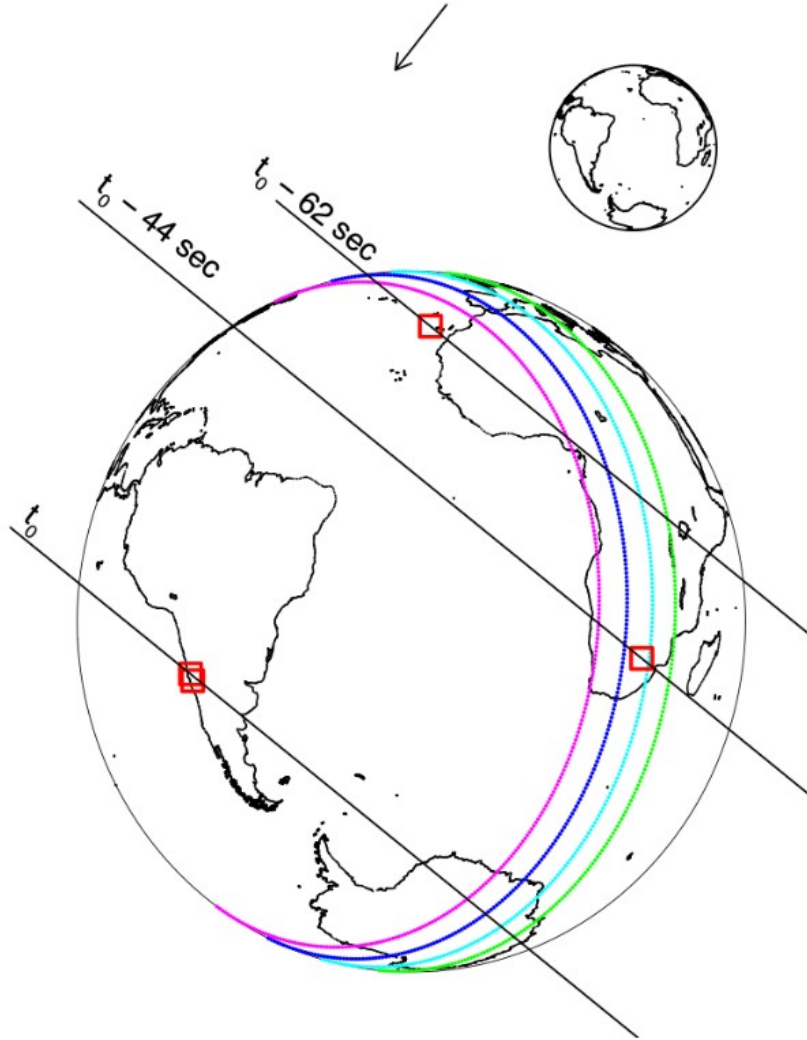
Kütleçekimsel mercek paralaksı: $\pi_E = \frac{1}{\tilde{r}_E}$

Kütleçekimsel Merceğ n Paralaks 



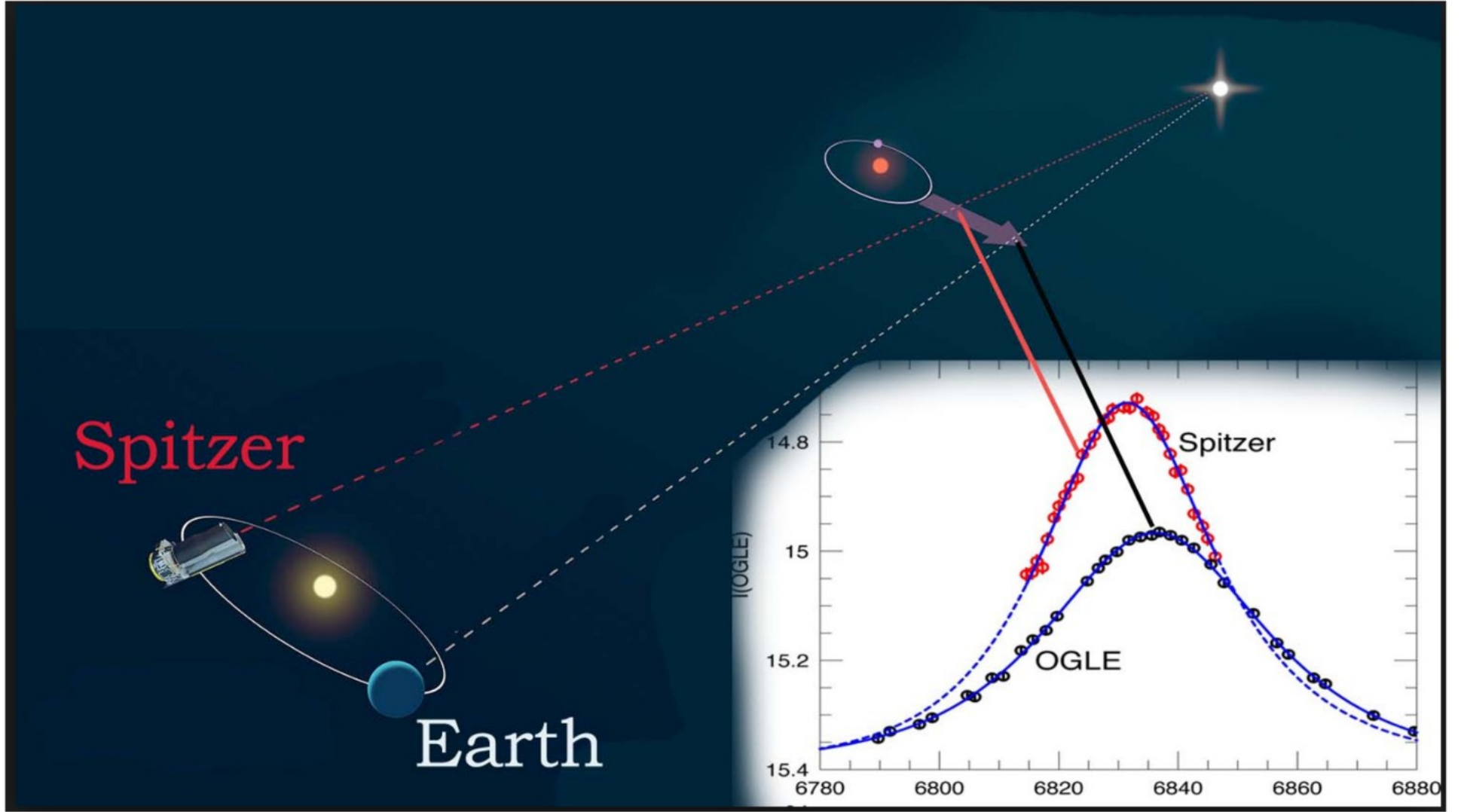
Mikromercekleme olay  Yer'in merceğ  göre anlamlı bir hareketinin olabileceğ  sürede gerçekleşiyorsa, bu durumda Yer kaynaklı paralaktik kaymayı dikkate almayan  lık eğrisi (gri kesikli eğri) ile gerçek model arasında bir fark olacaktır. Bu farktan hareketle mercek cismin paralaks , dolayısıyla da uzaklığı (D_L) bulunabilir (Muraki vd. 2011)

Kütleçekimsel Merceğin Paralaksı



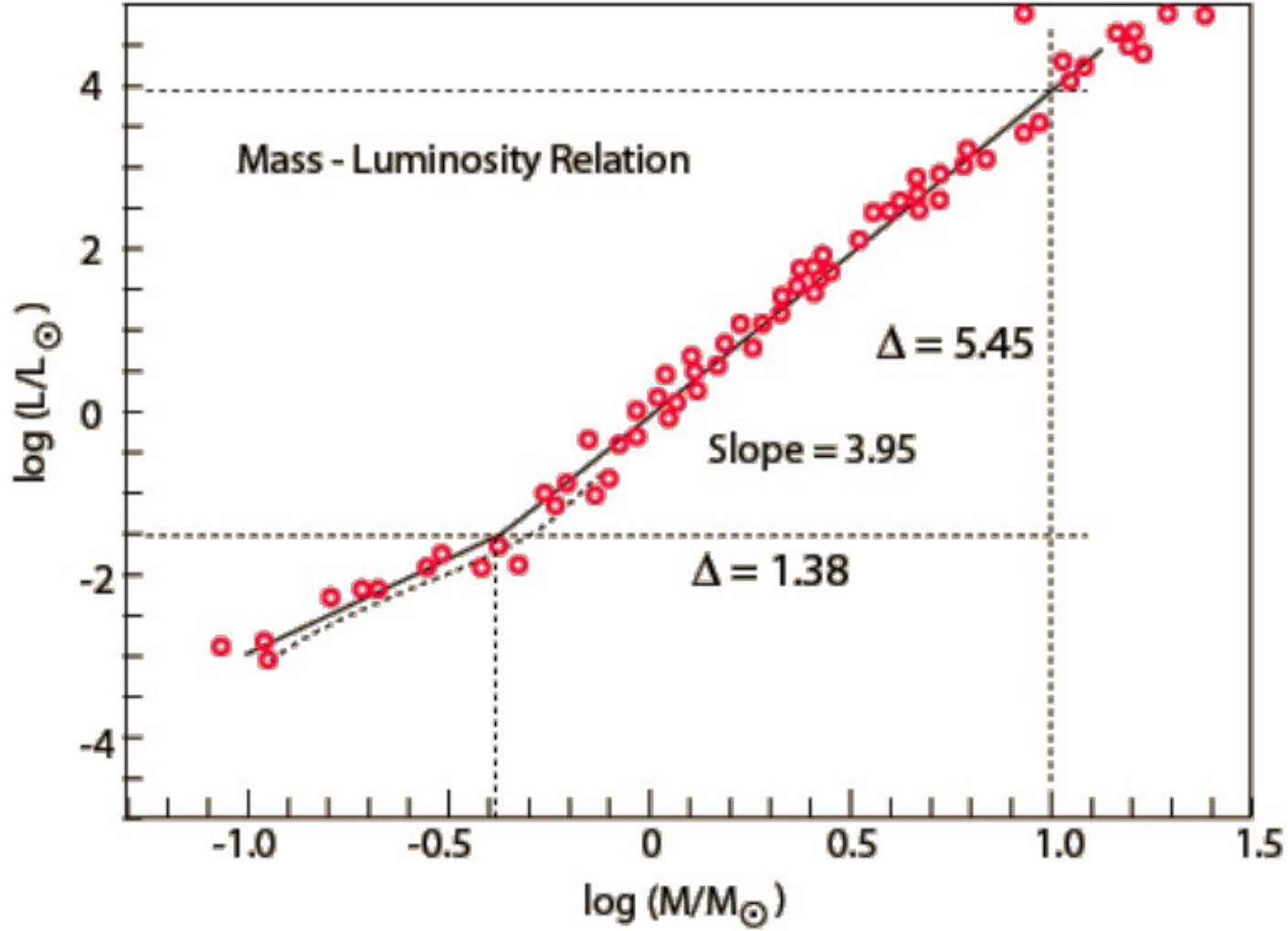
Yer üzerinde, farklı zaman dilimlerine dağılmış 3 ayrı noktadan yapılan merceklenme gözlemleri arasındaki fark da mikromerceğin paralaksını verir. (Gould vd. 2009)

Kütleçekimsel Merceğin Paralaksı



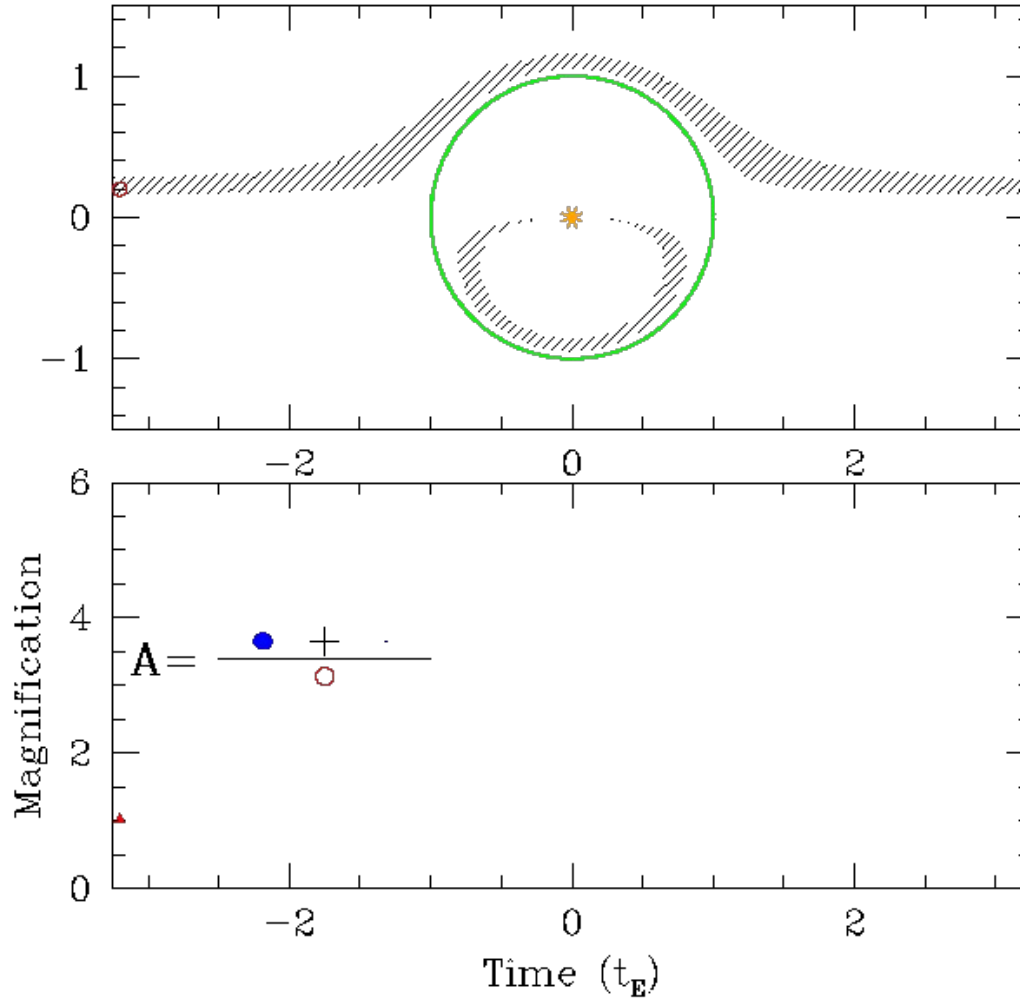
En az bir uzay teleskobu ile örneğin Yer'den konuşlandırılmış iki farklı gözlem aracı ile yapılan merceklenme gözlemleri arasındaki fark da mikromerceğin paralaksını verir. (Bhattachaya vd. 2025).

Kütleçekimsel Merceğin Kütlesi



Çok büyük teleskoplarla yüksek açısal çözünürlükte yapılan gözlemlerle merceğin parlaklığı ölçülebilirse bu durumda kütle ve uzaklık arasında bir bağıntı daha elde edilerek kütleye geçilebilir (Bhattachaya vd. 2025).

Aşağıda bir yıldızın (ortadaki sarı yıldız) uzay hareketi sırasında önünden geçtiği uzak ama daha parlak başka bir yıldız (kırmızı) ile mükemmel olmayan hizalanmasını görüyorsunuz. Mavi renk, gözlenmekte olan kırmızı yıldızdan alınan ışığı göstermektedir. Gözlenen arkaplan yıldızının (kırmızı) parlaklığı önünden geçen kütleçekim merceği (sarı yıldız) nedeniyle ani olarak artmaktadır. Yeşil çember, sarı yıldız için Einstein yarıçapını göstermektedir. Grafiklerde x-ekseninin konum değil, zaman olduğuna dikkat ediniz!



Zaman Ölçekleri

Gerçekleşme sıklığı: Bir yıldız için ~100 bin yıl! (çözüm çok sayıda yıldız uzun süre gözleyebilecek bir deney / düzenek tasarlamak!)

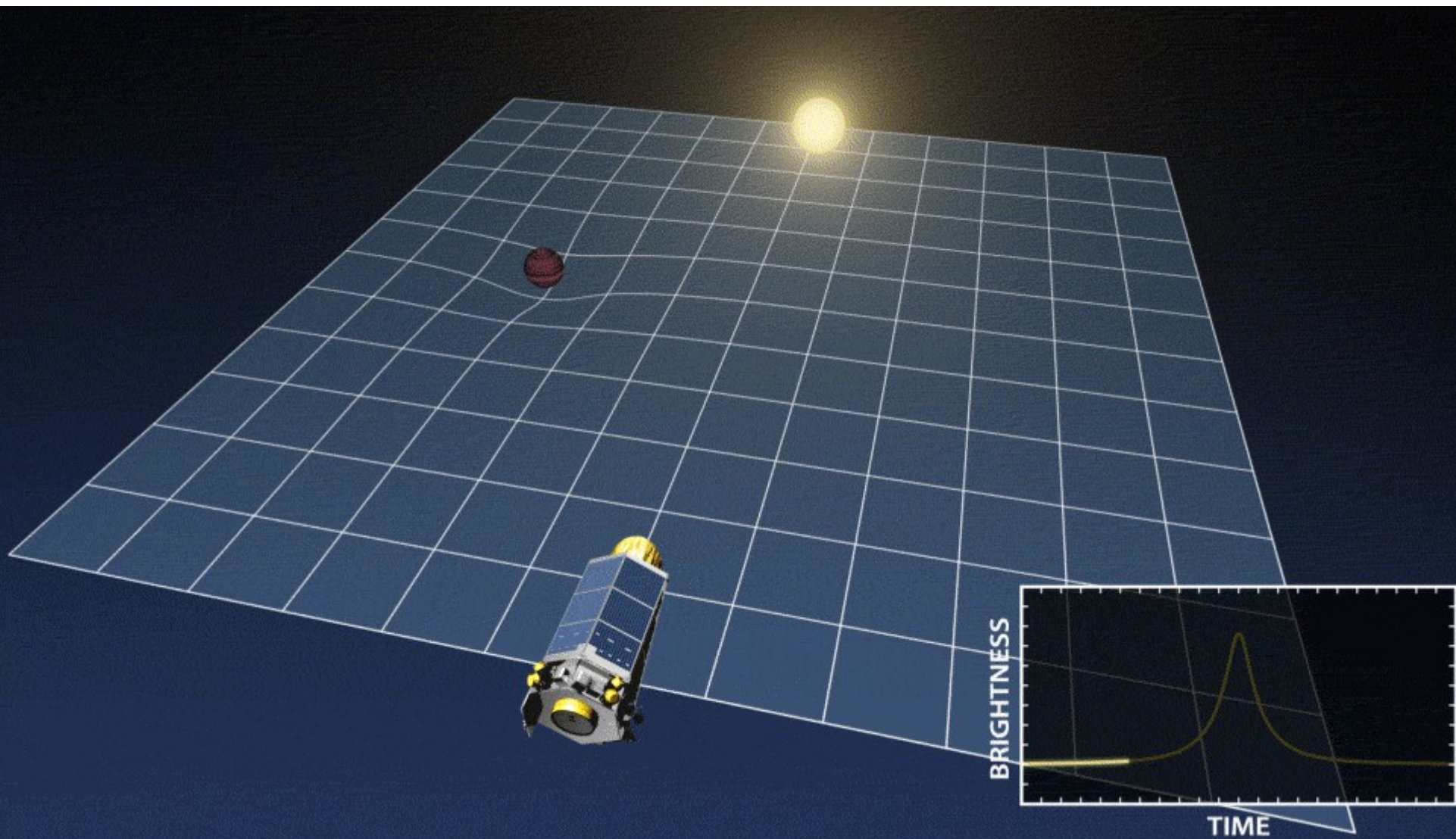
Kütleçekimsel mercek “olayının” gerçekleşme süresi (t_E): Birkaç günle birkaç yüz gün arasında.

Tipik zaman ölçeği:

$$t_E = \frac{\theta_E}{\mu} = 25 \text{ gün} \sqrt{\left(\frac{M}{0.5 M_{\text{Güneş}}} \right)}$$

μ (kütleçekimsel mercek yıldızının teğetsel uzay hızı -açısal-): 1 – 15 miliyaysaniyesi (mas) / yıl

θ_E (Einstein Yarıçapı): 0.1 – 2 mas (mercek kütlesine bağlı)



Şimdi ortadaki sarı yıldızdan belirli bir uzaklıkta bir gezegen (mor içi dolu daire) olduğunu düşünelim. Arkaplandaki yıldızın ışığı kütleçekim merceği yıldız ile hizalanmaya başladığı anda bir miktar artar. Kütleçekim merceği yıldızın etrafındaki gezegen de kütlesi nedeniyle uzayı bir miktar bükeceğinden arka plan yıldızının ışığında genliği ve süresi düşük ikinci bir artışa neden olur!

Gezegen Barındıran Bir Kütleçekim Mercek Yıldızı

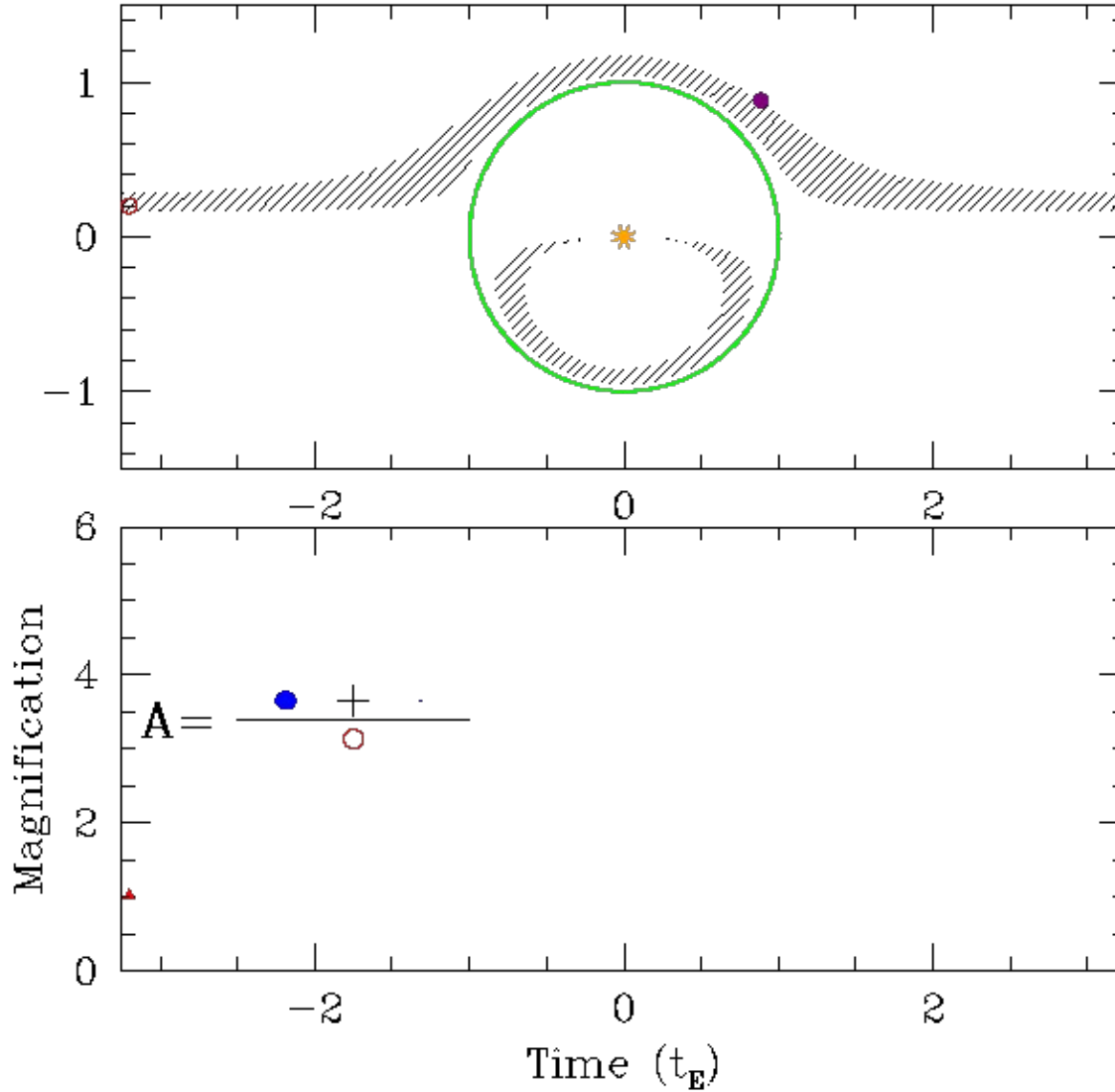
Gezegenin neden olduğu kütleçekimsel mercek “olayının” gerçekleşme süresi (t_g):
Gezegenin kütlesine bağlı olarak birkaç saatle birkaç gün arasında

$$t_g = \sqrt{q} t_E = 1 \text{ gün} \sqrt{\left(\frac{M_g}{M_{\text{mercek}}}\right)}$$

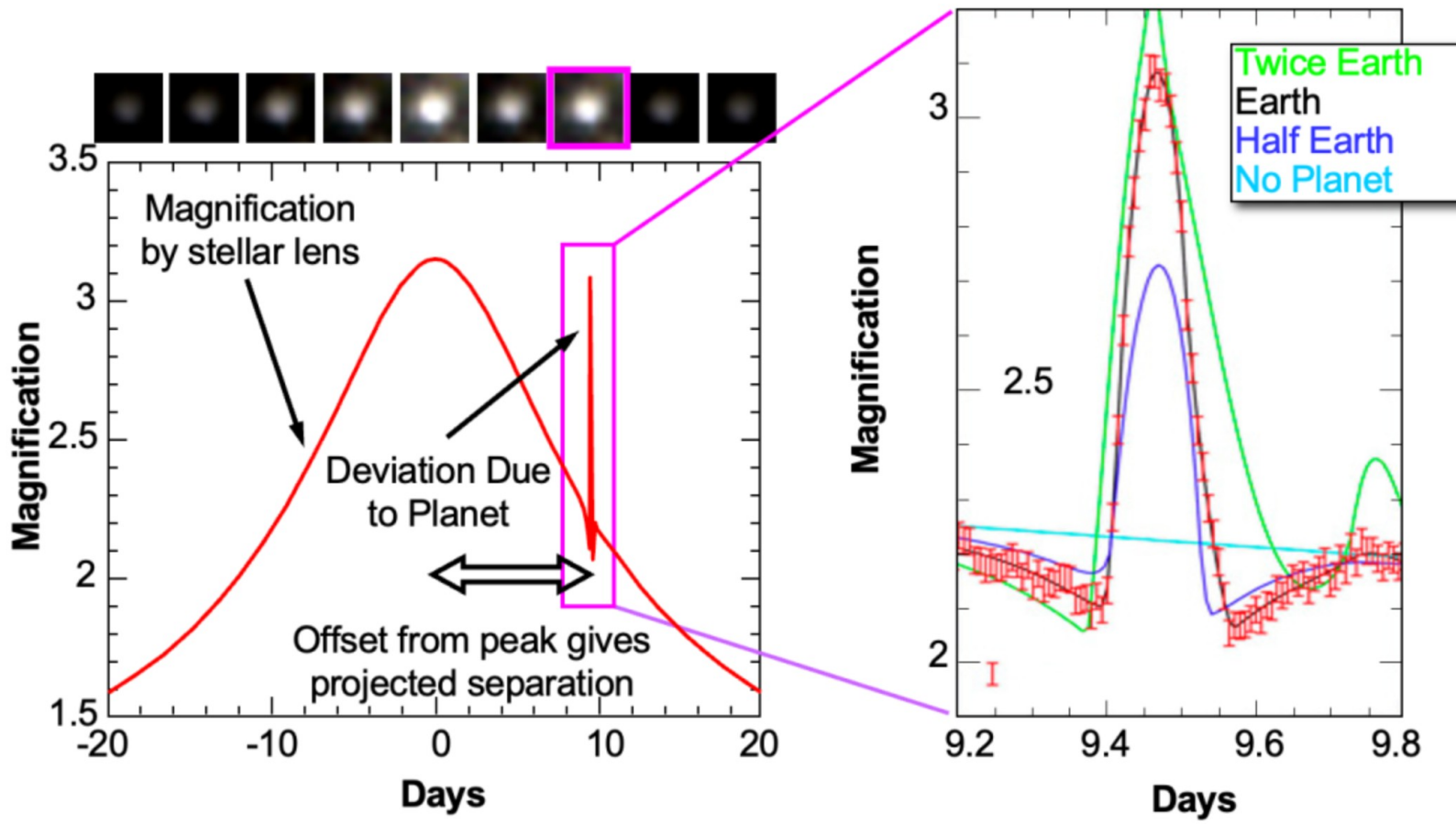
q : gezegenle barınak yıldızının kütlelerinin oranı): Jüpiter-Güneş ikilisi için yaklaşık 1/1000 olduğundan mikromercek olayının gerçekleşme süresi yaklaşık 1 gün / $\sqrt{1000} \sim 50$ dakika

Gezegen Einstein yarıçapına ne kadar yakın ise neden olacağı parlama yüksek olacağından yakalanması da o kadar kolay!

$$a \approx r_E = \theta_E D_{\text{mercek}} \approx 2.8 AB \sqrt{\left(\frac{M}{0.5 M_{\text{Güneş}}}\right)}$$



Önemli Sonuç: Denklemden de görülebileceği gibi $0.5 M_{\text{güneş}}$ 'lik bir kütleçekimsel mercek için gezegenin yıldızına uzaklığı $2.8 AB$ ise yakalanma olasılığı maksimumdur. ($2 M_{\text{güneş}}$ 'lik bir mercek için rakam $5.6 AB$ 'ye yükselir!). Yani kütleçekimsel mercek yöntemi daha önce gördüğümüz yöntemlerden farklı olarak yıldızına uzak gezegenleri keşfetmek konusunda daha başarılıdır!



Kütleçekimsel mercek nedeniyle arkaplan yıldızının parlaklığındaki değişime Paczynski ışık eğrisi adı verilir. Işık eğrisinin analiziyle kütleçekimsel mercek kaynağı cisimlerin kütlesi ve birden fazla cismin varlığında aralarındaki (açısal) uzaklık bulunabilir (Bhattacharya 2025)

Kütleçekimsel Mercek Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

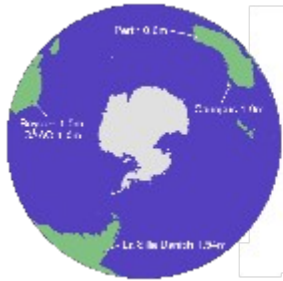
Avantajları:

- ✓ Son verilen denklemde de görülebileceği gibi $0.5 M_{\text{güneş}}$ 'lik bir kütleçekimsel mercek için gezegenin yıldızına uzaklığı 2.8 AB ise yakalanma olasılığı maksimumdur. ($2 M_{\text{güneş}}$ 'lik bir mercek için rakam 5.6 AB'ye yükselir!). Yani kütleçekimsel mercek yöntemi daha önce gördüğünüz yöntemlerden farklı olarak yıldızına uzak gezegenleri keşfetmek konusunda daha başarılıdır!
- ✓ Bu nedenle bu yöntemle “buz sınırının” (ing. snow line) ötesinde gezegen keşfetmek mümkündür!
- ✓ Yörüngesi büyük gezegenlerin yanı sıra yıldızı olmayan, “serbest dolaşan gezegenleri” (ing. free floating planets) de keşfetme imkanı sağlar! (OGLE-2016-BLG-1928, Mroz vd. 2020)
- ✓ Yakın gezegenlere duyarlı olmadığından diğer yöntemlerden bu yönde gelen yanlışlıkların zıttı bir yanlışlıkla onları tamamlar!
- ✓ Ne gezegeni barınırdan mercek yıldızdan ne de gezegenden doğrudan ışık almak gibi bir zorunluluk yoktur! “Göremediğimiz yıldızların etrafında göremediğimiz gezegenleri arıyoruz!” (Debra Fischer, 2000)
- ✓ Özellikle geçiş ve dikine hız yönteminin çalışma zorluğu olan çok sayıda yıldızın bulunduğu galaktik merkez doğrultusunda ve oldukça uzak mesafelerde (1-8 kpc) gezegen keşfine olanak sağlar!
- ✓ Daha büyük kütleli gezegenleri (yaratacakları merceklemeye etkisi daha büyük olacağından) bulmak daha kolaydır. Kütle alt limiti “Ay kütlesi” olarak verilir ki oldukça küçük gezegenleri bile bulmaya olanak sağladığı görülmektedir.
- ✓ Ufalanma süreçleriyle moleküler bulutlardan ya da kütleçekimsel kararsızlıkla diskte oluşması muhtemel cisimlerin keşfini sağladığı için bu senaryoların testi açısından önemlidir.

Dezavantajları:

- ✓ Parlamaya neden olan hizalanma kısa sürelidir ve tamamen tesadüfen gerçekleştiği için keşif yöntemi alet bakımından (adanmış özel teleskoplar, özel geniş alan gören CCD'ler,) oldukça talepkardır.
- ✓ Hizalanmanın kısa süreli olması ve yıldız ve gezegenden (çoğunlukla) ışık alınamıyor oluşu cismin parametrelerinin duyarlı belirlenmesini (karakterizasyonunu) ve barınak yıldızın uzun süreli çalışılmasını imkansız hale getirmektedir. “Göremediğimiz yıldızların etrafında göremediğimiz gezegenleri arıyoruz!”

Optical Gravitational Lensing Experiment

**PLANET**

Probing Lensing Anomalies NETwork

MicroFUN 2007

MICROLENSING FOLLOW-UP NETWORK

Kütleçekimsel mercek teleskop ağırları, sadece gezegen keşfi için çalışmaz. Gezegen keşfi özellikle galaktik karın (bulge) bölgesinin Yer'den gözlenebilir olduğu Kasım-Şubat ayları arasındaki "karın mevsiminde" (bulge season) yapılır. Bu süre boyunca yıldız yoğunluğunun en büyük olduğu galaktik merkez doğrultusunda pek çok hizalanma gerçekleşebilmektedir.

MOA

Microlensing Observations in Astrophysics

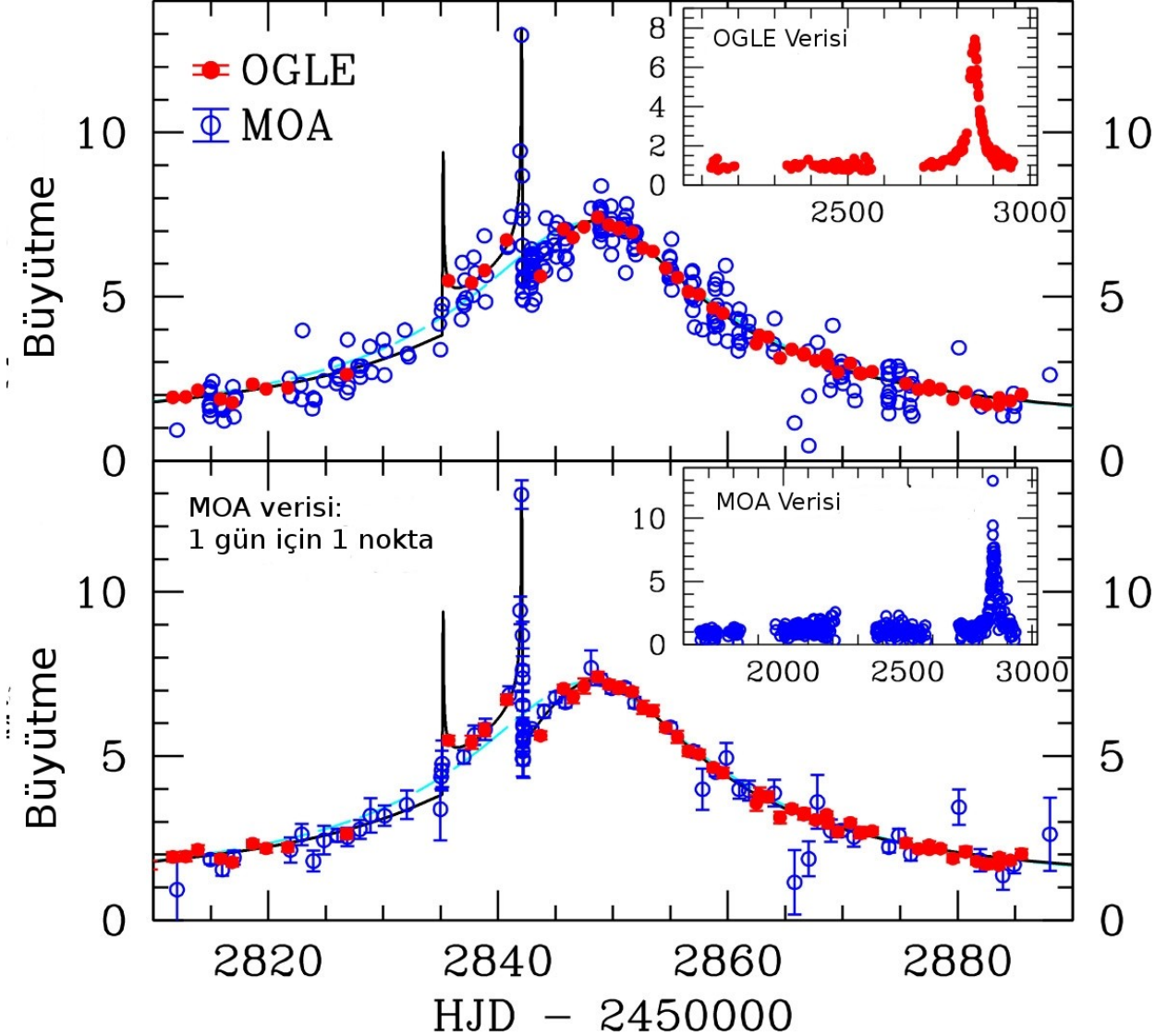
RoboNet 1.0



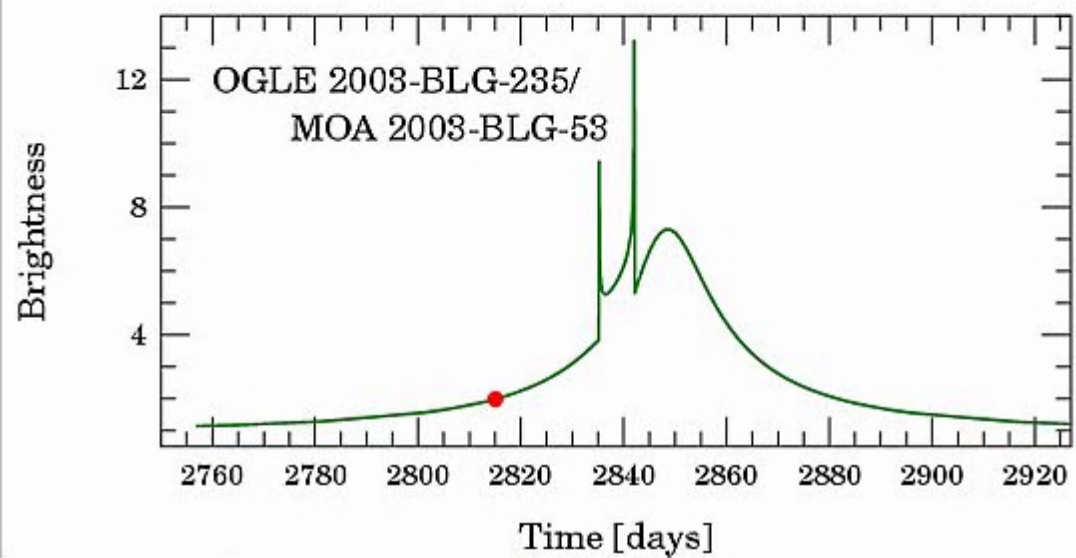
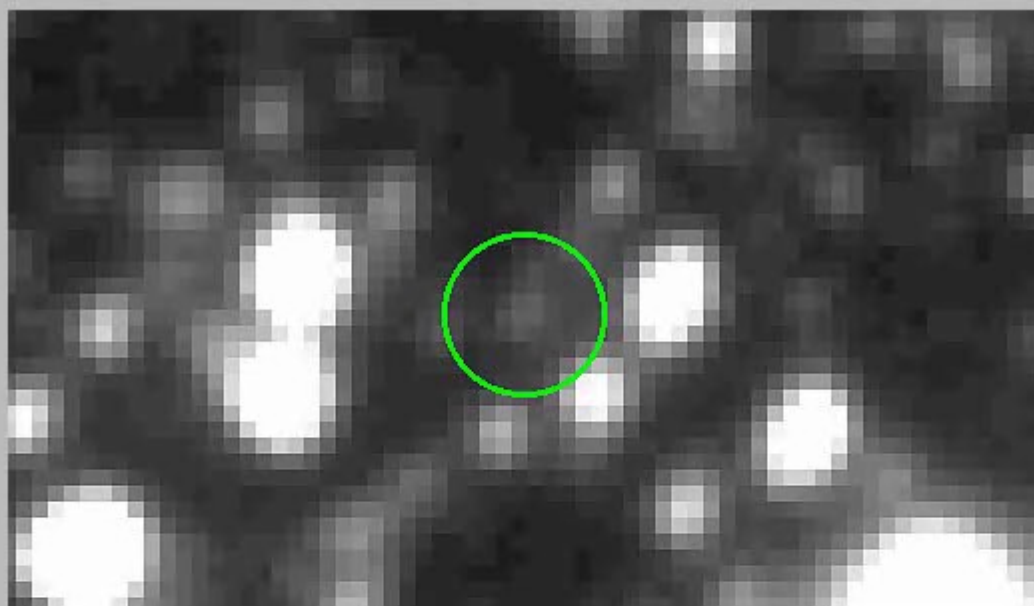
Kore Kütleçekimsel Mercek Teleskop Ağı (KMTN):

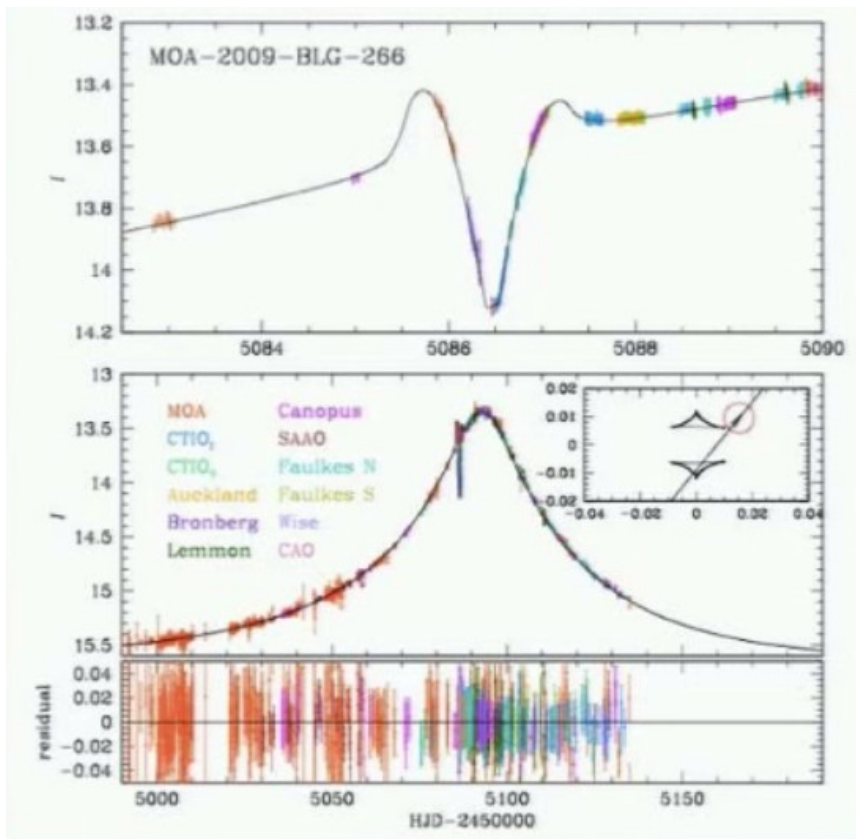
Keşfedilen İlk Gezegen:

OGLE-2003-BLG-235/MOA-2003-BLG-53

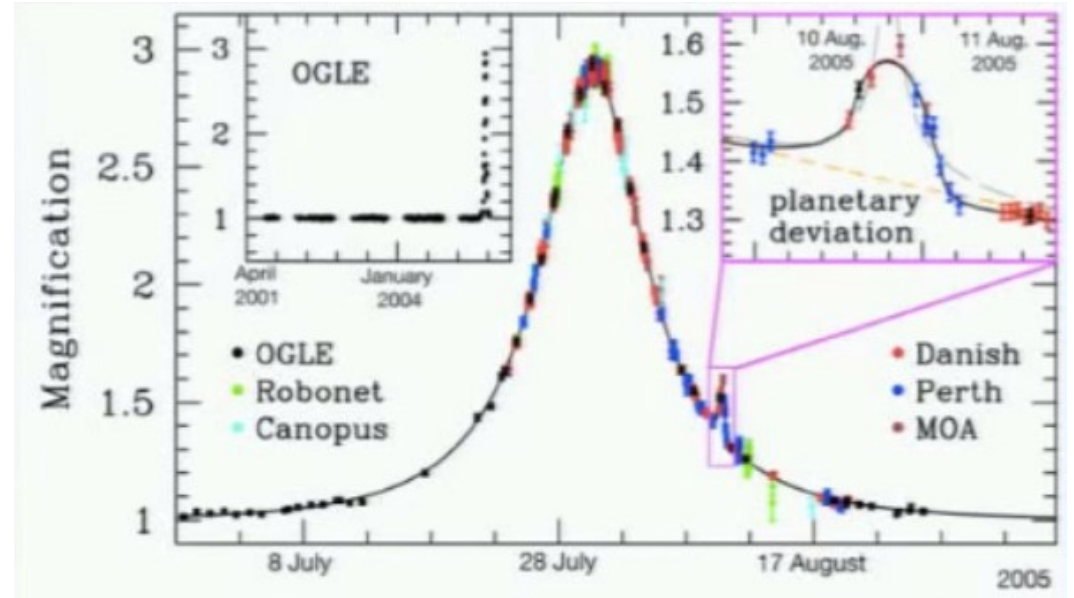


Bond vd. (2007)

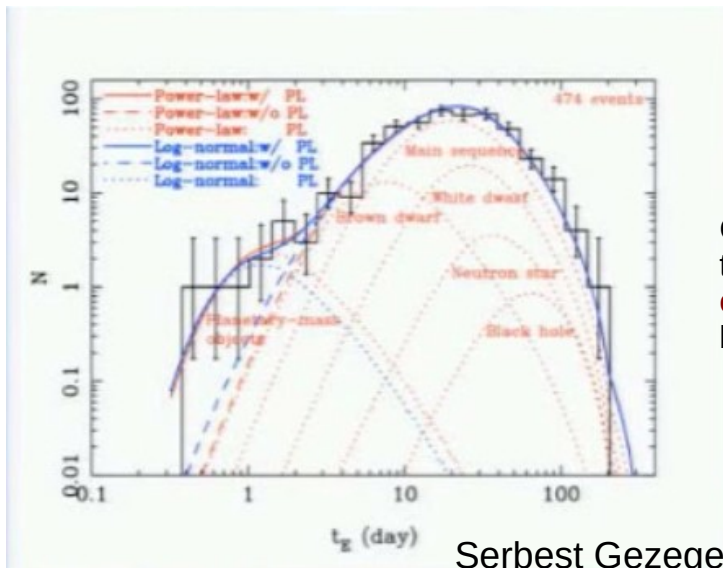




MOA, μ Fun, RoboNet, Planet verileri
(Muraki vd. 2001): $\sim 10 M_{\text{YER}}$

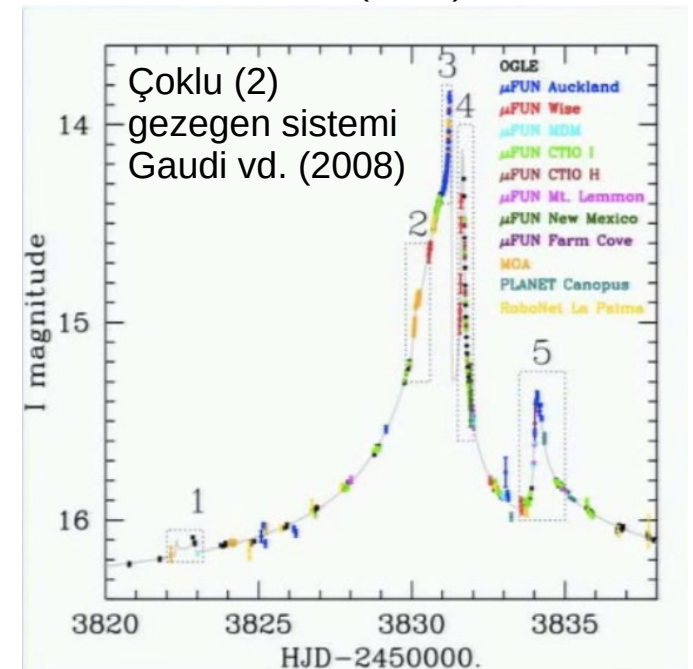


$\sim 5.5 M_{\text{yer}}$ kütleli bir “Süper Dünya”
Beaulieu vd. (2006)

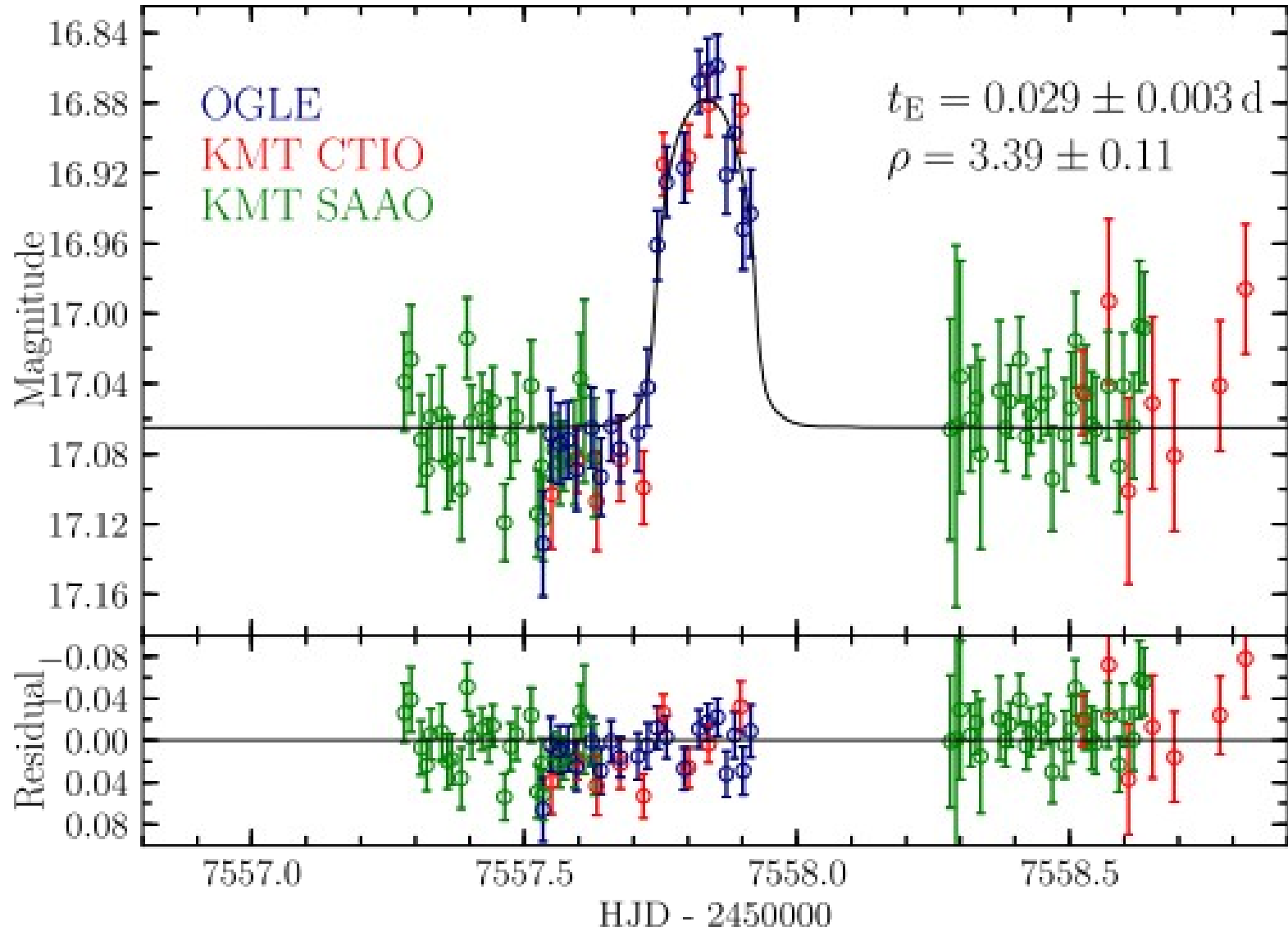


Gezegen tanımı gereği bu tür cisimlere “kahverengi cüce altı cisimler” (sub brown dwarf) diyoruz!

Serbest Gezegen Sumi vd. (2011)



Çoklu (2) gezegen sistemi
Gaudi vd. (2008)

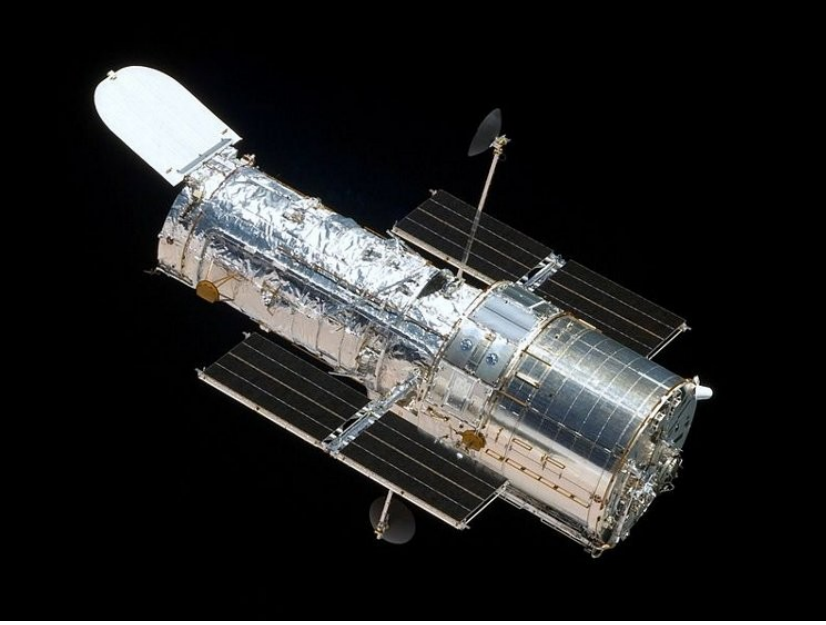


Mroz vd. (2020) tarafından keşfedilen $0.3-2.0 M_{\text{yer}}$ kütle aralığındaki serbest olması muhtemel gezegen (8 AB'den yakın yıldız bileşen olmadığı gösterilmiştir) yöntemle keşfedilmiş en kısa süreli merceklenme olayına (41.5 dakika) neden olan şu ana kadar yöntemle keşfedilmiş en küçük kütleli gezegendir.

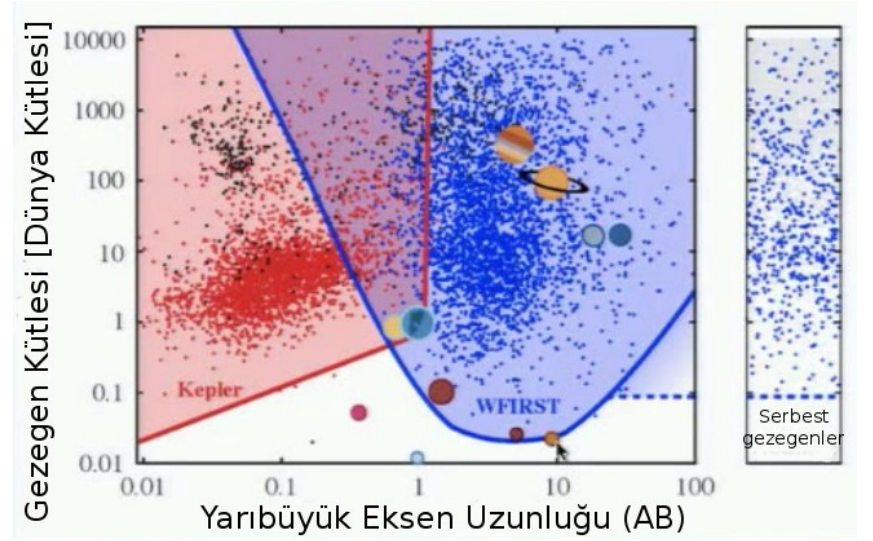
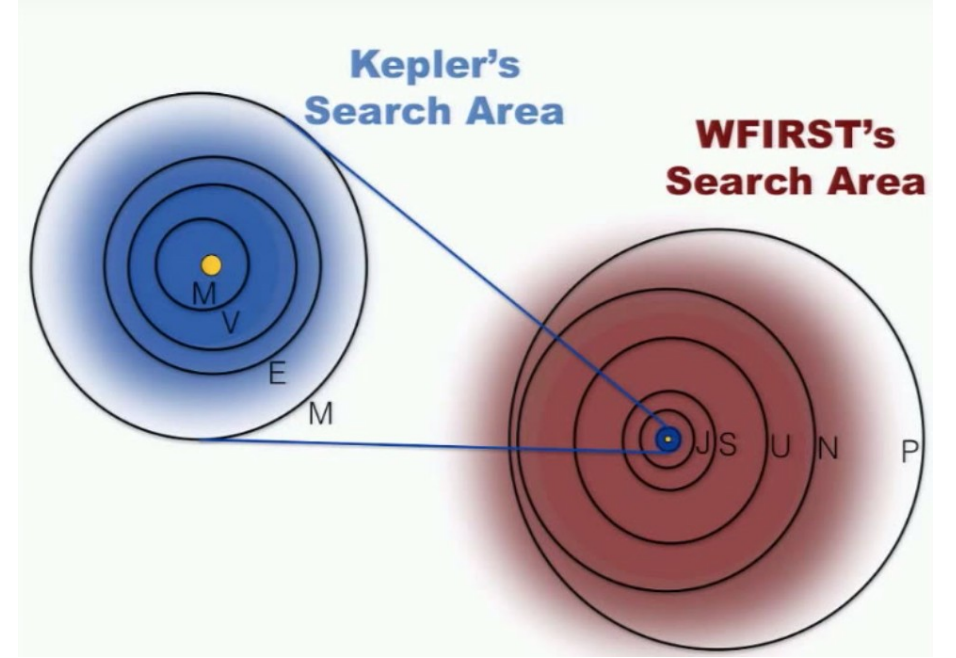
Nancy Grace Roman Telescope

~~WFIRST: Wide Field Infrared Survey Telescope~~

(Geniş Alan - Kızılöte Araştırma Teleskobu)



4 milyar \$'lık bir bütçeyle desteklenen Nancy Grace Roman Teleskobu henüz yapım aşamasında olup, 2027 yılında uzaya gönderilmesi beklenmektedir.



Kaynaklar

- ✓ Bean, J. L., vd., 2007, *"The Mass of the Candidate Exoplanet Companion to HD 33636 from Hubble Space Telescope Astrometry and High-Precision Radial Velocities"*, The Astronomical Journal, 134, 749
- ✓ Bennett, D.P., 2009, *"Detection of Extrasolar Planets by Gravitational Microlensing"*, arXiv:0902.1761v1
- ✓ Bennett, D.B. vd, 2010, *"Masses and Orbital Constraints for the OGLE-2006-BLG-109Lb,c Jupiter/Saturn Analog Planetary System"*, The Astrophysical Journal, 713, 837-855
- ✓ Beuallieu, J.P. vd. 2006, *"Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing"*, Nature, 439, 437
- ✓ Bond, I.A. vd., 2004, *"OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53: A Planetary Microlensing Event"*, The Astrophysical Journal, 606, L155-L158
- ✓ Chauvin G., vd., 2004, *"A giant planet candidate near a young brown dwarf. Direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing"*, Astronomy & Astrophysics, 425, L29
- ✓ Deeg, H.J., vd., 2008, *"Extrasolar planet detection by binary stellar eclipse timing: evidence for a third body around CM Draconis"*, Astronomy & Astrophysics, 480, 563
- ✓ Gaudi, S. vd. 2008, *"Discovery of a Jupiter/Saturn Analog with Gravitational Microlensing"*, "Introduction to Microlensing", in Proceedings of the Manchester Microlensing Conference
- ✓ Kalas, P., vd., 2008, *"Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth"*, Science, 322, 1345
- ✓ Lagrange, A.M., vd., 2010, *"A Giant Planet Imaged in the Disk of the Young Star β Pictoris"*, Science, 329, 57
- ✓ Marois, C. vd., 2006, *"Angular Differential Imaging: A Powerful High-Contrast Imaging Technique"*, The Astrophysical Journal, 641, 556
- ✓ McArthur, B.E., 2010, *"New Observational Constraints on the ν Andromedae System with Data from the Hubble Space Telescope and Hobby-Eberly Telescope"*, The Astrophysical Journal, 715, 1203
- ✓ Steffen, J.H., vd., 2011, *"The architecture of the hierarchical triple star KOI 928 from eclipse timing variations seen in Kepler photometry"*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 417, 31
- ✓ Sumi, T., 2011, *"Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing"*, Nature, 453, 349-372
- ✓ Vahhaj, Z., vd., 2013, *"The Gemini Planet-finding Campaign: The Frequency Of Giant Planets around Debris Disk Stars"*, The Astrophysical Journal, 773, 179