

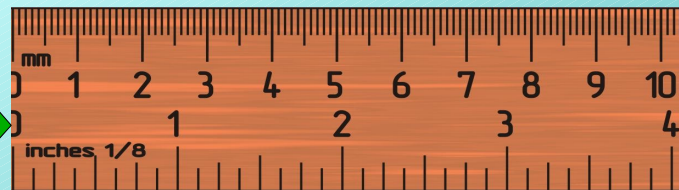
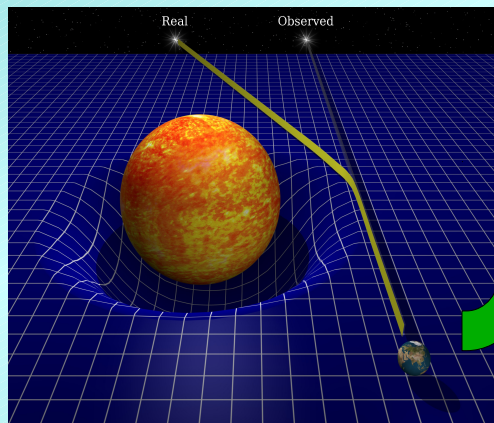
# Gravitational lenses as cosmic rulers: $\Omega_m$ , $\Omega_\Lambda$ from time delays and velocity dispersions

D. Paraficz & J. Hjorth

Gravitációs lencsék mint kozmikus vonalzó:  
 $\Omega_m$ ,  $\Omega_\Lambda$  az idő késésből és a sebesség  
diszperzióból

# A cikk célja

- Megmutatják, hogy standard vonalzó alkotható erős gravitációs lencséző rendszerek paramétereinek pontos mérésével
- Szimulációt készítettek ilyen rendszerekről, melyből kiszámolták a kozmológiai paraméterekre adott becslést

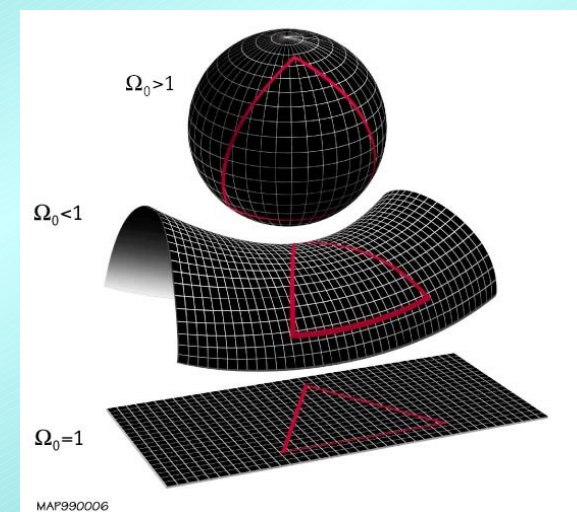


# Az előadás menete

- Kozmológiai bevezető: sík Univerzum,  $\Lambda$ , kozmológiai tesztek
- Alapfogalmak:
  - Standard gyertyák: Sn Ia mint előzmény
  - Standard vonalzó
  - Gravitációs lencsézés
  - Erős gravitációs lencsézés
    - idő késés ( $\Delta\tau$ ); sebesség diszperzió ( $\sigma$ ); Einstein-szög
- A cikk tárgyalása:
  - $\Delta\tau/\sigma^2$  jelentősége: standard vonalzó
  - A szimuláció
  - Eredmények 1 lencsére, több lencsére  $\rightarrow \Omega_m, \Omega_\Lambda$  értéke
- Jövőbeli égboltfelmérések ( $\Delta\tau/\sigma^2$  mérésére)
- Magyar eredmény

# Kozmológiai bevezető

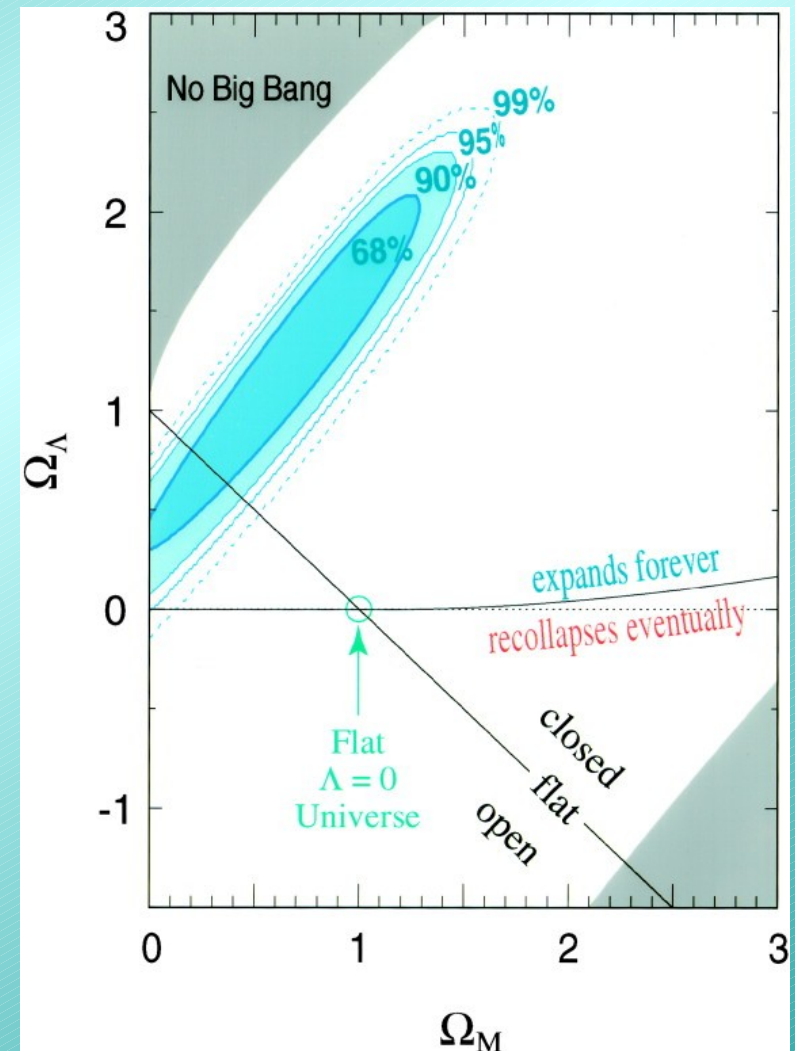
- Standard kozmológia: Friedmann-egyenletek megoldása
  - $k$ : téridő geometriájának jellege, lásd ábra
  - $\rho_{krit} = 3H^2/8\pi G \rightarrow \Omega = \rho/\rho_{krit}$
  - Sík Univerzum esetén:  $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$
  - Milyen feltételekkel oldjuk meg: mi dominálja az Univerzumot?
    - Anyagdominált eset (Einstein – de Sitter modell)
    - Sugárzásdominált eset (relativisztikus)
    - Vákuumdominált eset (de Sitter modell)
  - Ennek eldöntésére: *kozmológiai tesztek*



$k=0, \Omega=1 \rightarrow$  sík

# Előzmény: *Sn Ia* standard gyertya

- 1,4  $M_{\text{NAP}}$  átlépésekor  
(Chandrasekhar-határ) robban  $\rightarrow$   
abszolút fényesség állandó  $\rightarrow$   
távolság adódik
  - Távolabb vannak tőlünk, mint azt a galaxisok vöröseltolódása alapján várták
  - Világegyetem tágulásának üteme jelenleg gyorsul  $\rightarrow \Lambda$  újratevezetése
- Anyagformák arányára megszorítást adnak:
  - Sík ( $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ ) Univerzum esetén:
    - ( $\Omega_{\text{bar}} = 0.045$ ) + ( $\Omega_{\text{CMB}} = 0.23$ )  $\approx \Omega_m = 0.27$
    - $\Omega_\Lambda = 0.73$  („sötét energia”)
  - Pontos értékük fontos a Világegyetem történelmének tanulmányozásában!

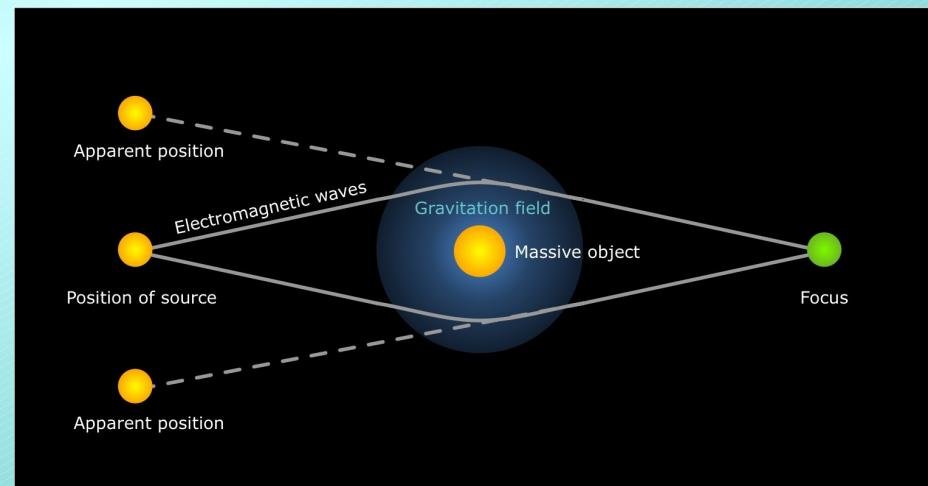


# Standard vonalzó

- Geometriai távolságmérő módszerek = Standard vonalzók
  - Speciális esetben: az objektum méretét ismerve és szögátmérőjét az égen megmérve: távolság adódik
    - pl. trigonometrikus parallaxis
  - Általánosan: az objektum valamilyen tulajdonságának méréséből és egy másik tulajdonság elméleti meghatározásából a távolsága adódik
- A kozmológiában többféle távolság definíció létezik (az Univerzum tágulása miatt)
  - Standard vonalzó → szögátmérő távolságot ( $D$ ) mér
  - Standard gyertya → luminozítás távolságot ( $d$ ) mér
  - Köztük lévő kapcsolat:  
$$d = D * (1 + z)^2$$

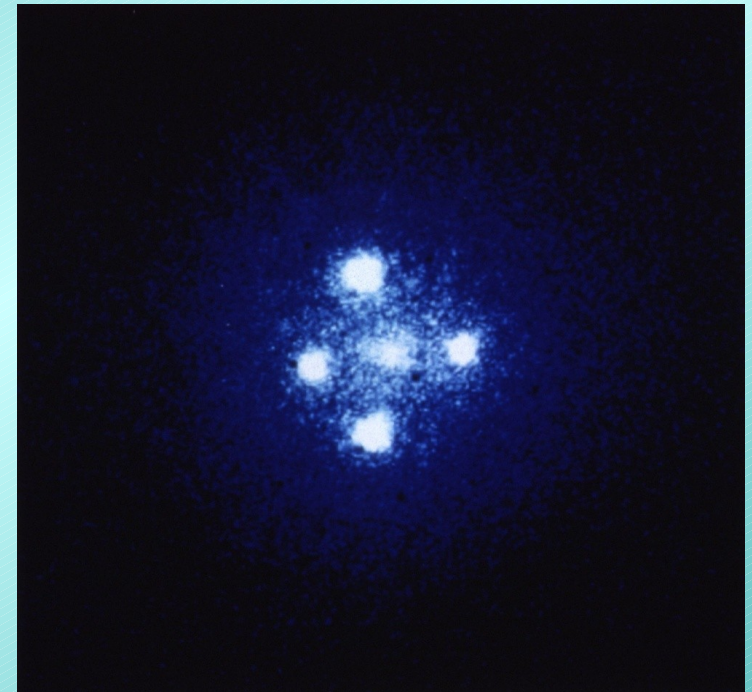
# Gravitációs lencsézés

- Chwolson megjósolta (1924), de Einstein is foglalkozott vele (1936).
- Zwicky figyelte meg először (1979): Iker-kvazár a Nagy Medvében
- Általános relativitáselmélet → gravitáció meggörbíti a téridőt → a fény görbe úton halad → a háttér képe felnagyított, torzított és máshol látszik
- Egy távoli kvazár fényét az előtér objektum (nagy tömegű galaxis) úgy torzítja, mintha lencse lenne
  - Egy vonalba eső rendszerek: Einstein-gyűrű, sugara: *Einstein-szög* ( $\theta_E$ )
  - Nem egy vonalba eső rendszerek: az ív egy darabját látjuk csak
  - Nem gömb alakú lencse: a relatív pozícióktól és a gravitációs potenciáltól függően több, torzult kép jön létre



# Gravitációs lencsézés fajtái

- Gyenge: ha egy-egy rendszeren nem vizsgálható a torzulás, csak statisztikusan, nagy mintán
  - használták már korábban kozmológiai tesztekben
- Erős: könnyen látható torzulások, önállóan is megfigyelhető rendszerek
- Mikrolencsézés: nincs változás az alakban, de a beérkező fény mennyisége változik az időben (Tejútrendszer csillagai a lencsék)



Einstein-kereszt  
(QSO 2237+0305)  
*Kvazár: 8 milliárd fényév*  
*Lencse: 400 millió fényév*



# Erős gravitációs lencsézés

- Idő késés:  $\Delta\tau$ 
  - A forrás fényének változása a képeken különböző időpontokban jelenik meg – ennek hossza a  $\Delta\tau$
  - Tipikus értéke: nap – hónap
  - Oka kettős:
    - Optikai úthosszak különböznek
    - Gravitációs potenciál a két út mentén különbözik
- Sebesség diszperzió:  $\sigma$ 
  - A lencséző galaxison belül a csillagok sebességének eltérése az átlagos sebességtől (szórás)
  - Mérése: spektrumvonalak kiszélesedéséből
- Mindkettőt használták már kozmológiai tesztekben (külön).

# A $\Delta\tau/\sigma^2$ mint standard vonalzó

- Ha a lencse geometriája (megfigyelésekből) és potenciálja (galaktikus dinamikai számolásokból) ismert:

$$\Delta\tau \sim D_{OS} \times D_{OL} / D_{LS}$$

ahol O: megfigyelő, S: forrás, L: lencse

- A viriáltétel fölhasználásával és az Einstein-szög mérésével a sebesség diszperzió:

$$\sigma^2 \sim D_{OS} / D_{LS}$$

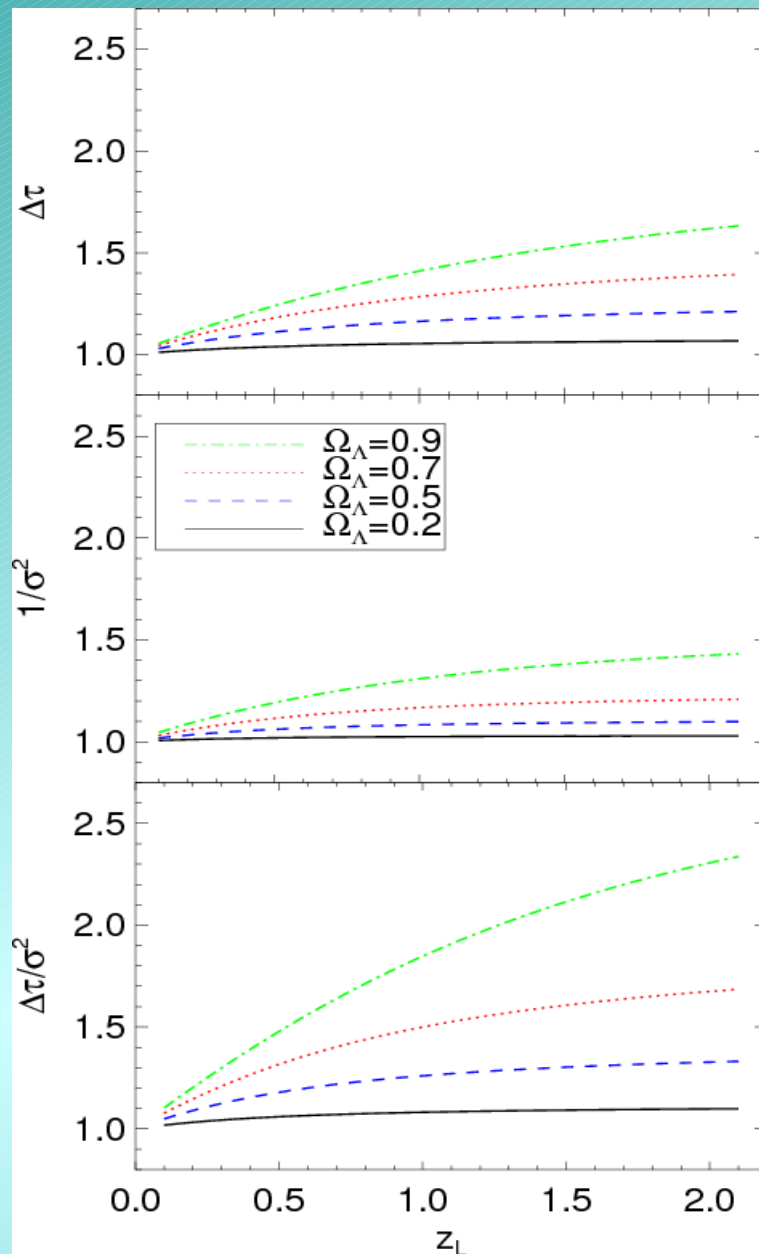
- A kettő hányadosa csak a lencséző galaxis távolságától függ:

$$\Delta\tau / \sigma^2 \sim D_{OL}$$



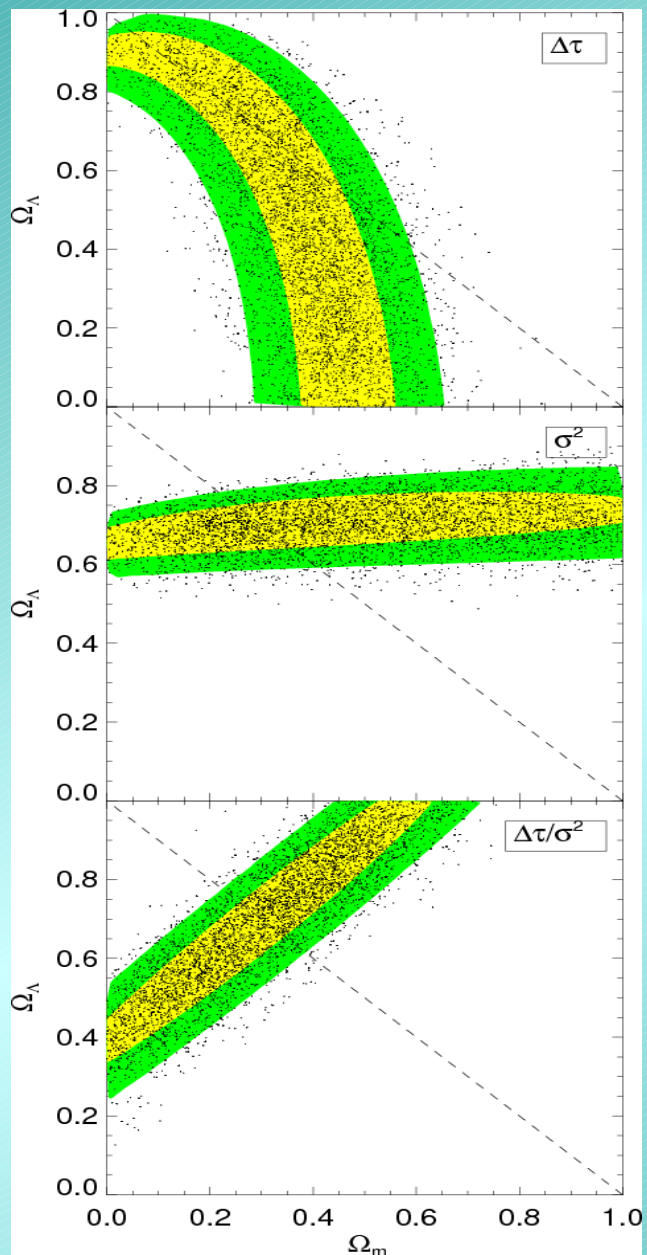
Standard vonalzó!

# Miért jó a $\Delta\tau/\sigma^2$ ?



- Csak a lencse  $z_L$  vöröseltolódásától (távolságától) függ, a forrásétól nem
- Sokkal érzékenyebb a kozmológiai paraméterekre ( $\Omega_m$ ,  $\Omega_\Lambda$ ), mint a  $\Delta\tau$  és  $1/\sigma^2$  külön-külön (ábra)
- Nagy  $z_L$ -eknél még érzékenyebb

# Miért jó még?



- 125 szimulált galaxis → megszorítás a kozmológiai paraméterekre
- Külön-külön nem adnak elég megszorítást (felső két ábra).
- Közös mérésükkel a szupernóvákéhoz hasonló ábrát kapunk (alsó ábra).

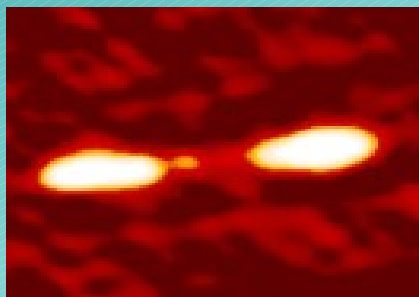
# A szimulációhoz használt modell

- $\Delta\tau$  és  $\sigma^2$  is függ a lencse gravitációs potenciáljától  $\rightarrow$
- Modell a lencséző galaxisra:  
Szinguláris Izotermikus Gömb (SIS)
  - Gömbszimmetrikus (legegyszerűbb) sűrűségeloszlás:
$$\rho(r) = \sigma^2 / 2\pi Gr^2$$
  - Nem fizikai ( $r=0$ : szingularitás,  $\rho=\infty$ ), de könnyű használni
  - Ezzel a modellel  $\Delta\tau$  és  $\sigma^2$  is könnyen kifejezhető analitikusan.
- Felteszik továbbá: sík Univerzum, és  $\Omega_m = 0,3$ ;  $\Omega_\Lambda = 0,7$

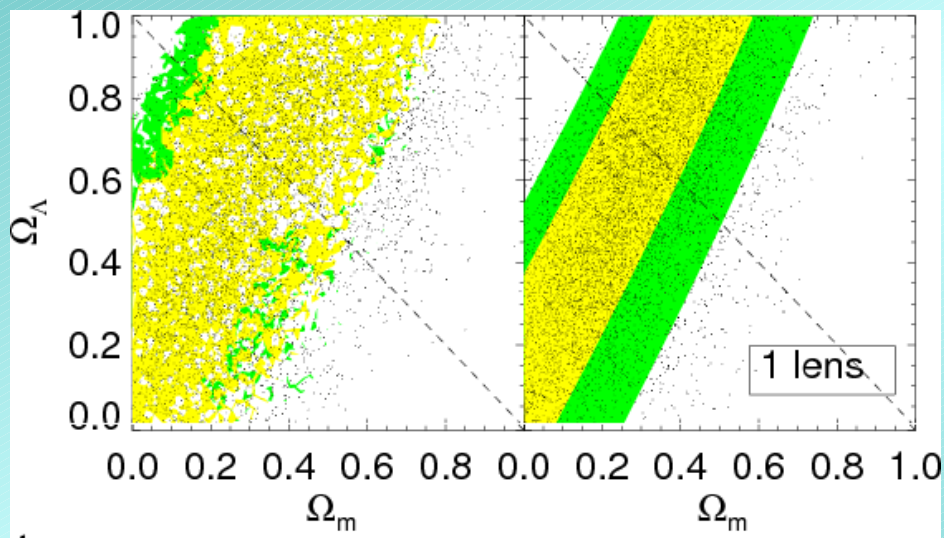
# A szimuláció

- Algoritmus: MCMC =  
Markov-lánc Monte Carlo módszer
  - Monte Carlo: független pontok sorozatát generálja egy paraméterterben
  - De: a rendszer paramétereinek ( $z_L, z_S, \sigma$ ) eloszlása: ?
  - Markov-lánc: sztochasztikus folyamat; a rendszer jövőbeli állapota nem függ a múlttól, csak a jelentőtől.
  - MCMC: a generált pontsorozat a paraméterterben lassan és szabálytalanul lépeget, a lépés nem függ az előző lépésektől, csak a kiinduló helytől
  - Kiküszöböli azt a problémát, hogy a közvetlen mintavétel nehéz.

# 1 lencse szimulálása



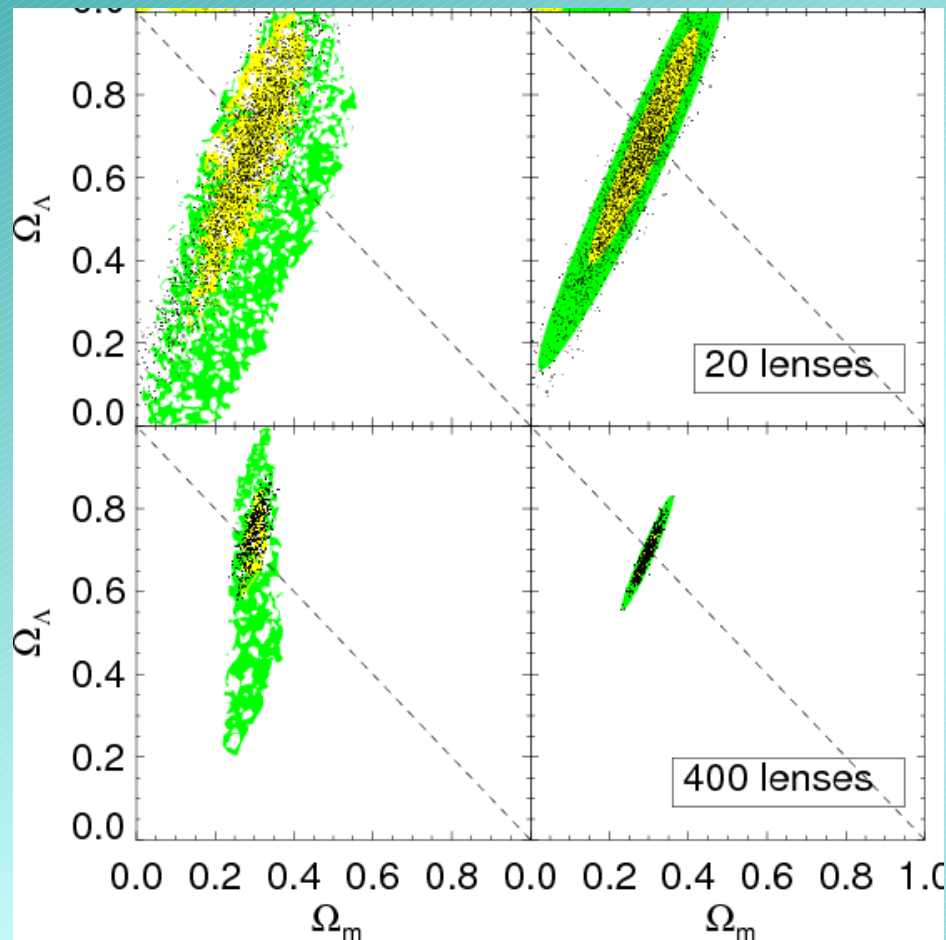
MG 2016+112



$z_L = 1,0; z_S = 3,27; \theta_E = 1,7''$   
sárga, zöld: 5%-os és 10%-os  
bizonytalansági skála

- Milyen kényszert ad egyetlen magas  $z$ -jű lencse a kozmológiai paraméterekre?
- Széles csík, merőlegesen a  $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$  egyenesre
- Két eset:
  - $H_0 = 70 \pm 5$  km/sMpc változhat (bal)
  - $H_0 = 70$  km/sMpc fix (jobb)

# Több lencse szimulálása



- 20 (fönt) és 400 (lent) lencséző rendszer szimulálása →

- Gyorsabban konvergál a feltett  $\Omega_m = 0,3$  és  $\Omega_\Lambda = 0,7$  körül
- Következésképp már 400 lencse megfigyelésével kis mérési hibával adódnak a kozmológiai paraméterek:

$$\Omega_m = 0,30 \pm 0,02$$

$$\Omega_\Lambda = 0,70 \pm 0,06$$

$z_L$ : 0,5 és 1,5 között egyenletesen

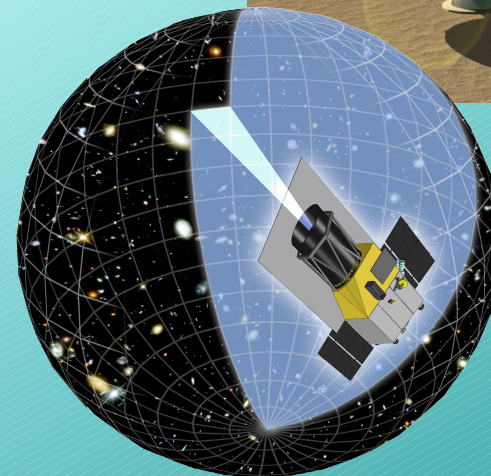
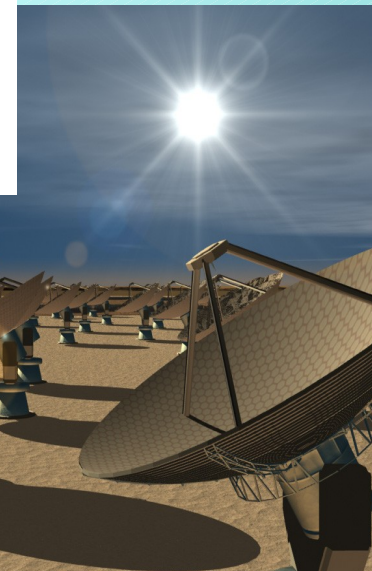
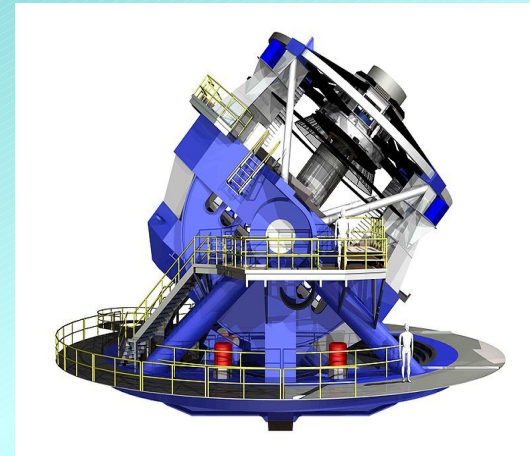


# A szimulációból kapott eredmények diskussziója

- Sok szisztematikus bizonytalanság fölléphet a valódi méréskor, ezeket kezelni kell, mielőtt a módszert precíziós kozmológiához alkalmazzák.
- Jelenleg rendelkezésre álló mérési adatok:
  - 200 erős gravitációs lencse rendszer ismert, de csak 20-nak van mért  $\Delta\tau$ -ja  $\rightarrow$
  - ez nem adna olyan megszorítást, mely versenyképes a többi kozmológiai módszerrel
  - nagy minta szükséges  $\rightarrow$  közeljövő felmérései

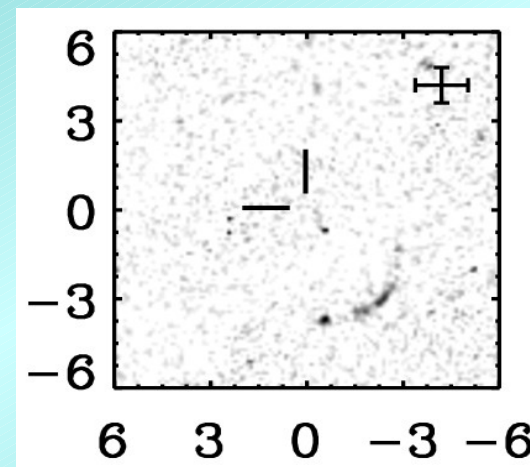
# Jövőbeli felmérések

- LSST: Nagy Szinoptikus Felmérő Távcső
  - Észak-Chile, 8,4m-es tükör, 3,5°-os látómező, 24,5<sup>m</sup> határfényesség
  - 3 naponként lefényképezné a teljes eget
  - Terv: 2016
- SKA: Négyzet Kilométeres Tömb
  - Rádiótávcső 1 km<sup>2</sup>-es teljes felülettel
  - Dél-Afrika, Ausztrália, Új-Zéland
  - Terv: 2013-ban kezd, 2022-re lesz teljes
- Euclid:
  - ESA-űrtávcső a Nap-Föld L<sub>2</sub>-pontjába
  - Cél: z<2 galaxisok foto- és spektrometriája optikai és közeli IR tartományban → távolságmeghatározás → sötét anyag és energia
  - Terv: 2017

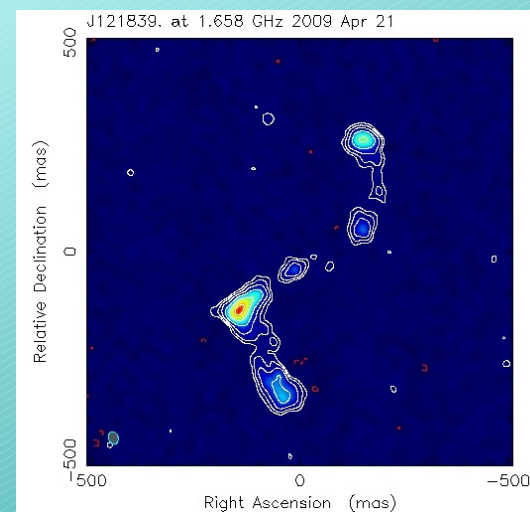


# Magyar eredmények

- The radio-loud active nucleus in the “dark lens” galaxy J1218+2953  
*≈ A rádió-hangos aktív mag a J1218+2953 „sötét lencse” galaxisban*
  - Szerzők: Frey Sándor, Paragi Zsolt, Bob Campbell, Móor Attila
  - ívszerű objektum Hubble-űrtávcső felvételén, de a lencséző galaxist nem sikerült detektálni, pedig ezermilliárd naptömegűnek kellene lennie → felfedezői feltételezték, hogy sötét anyagból áll
  - de: galaxis helyéről halvány rádiósugárzás érezkzik, ez aktív galaxismagra utal → Európai VLBI Hálózattal (EVN) mérték
  - megtalálták az XMM-Newton röntgen-műhold katalógusában is
  - → a galaxisban a megszokottnál több fényelnyelő anyag van, ezért látszik sötétnek a látható fény tartományában




Hubble-felvétel, 2008



1.6 GHz-es VLBI-felvétel, 2009

# Források

- Cserepes – Petrovay: Kozmikus fizika
- wikipedia.org
- hirek.csillagaszat.hu
- Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae, S. PERLMUTTER et al. APJ 517:565–586, 1999
- The Influence of Evolving Dark Energy on Cosmology, Luke Barnes et al., Publ.Astron.Soc.Austral.22:315,2005
- Time delay in gravitational lens systems and cosmological parameters, D. Narasimha, Bull. Astr. Soc. India (2002) 30, 723-728
- Kiss László: Kozmológiai távolságok és a vöröseltolódás kapcsolata
- <http://www.skatelescope.org/>



**Köszönöm a  
figyelmet!**