

Válaszok a feltett kérdésekre

## Megmarad-e az energia a VE tágulása során?

- Tapasztalatunk szerint az energia helyileg (tehát az energiasűrűség) megmaradó mennyiség

**Hol? Mit értünk energia alatt?**

Biztosan annyit tudunk, hogy Naprendszerben.

Különböző anyagfajtákhoz rendeljük (anyag, sugárzás, sötét anyag, sötét energia),  
**gravitációhoz nem.**

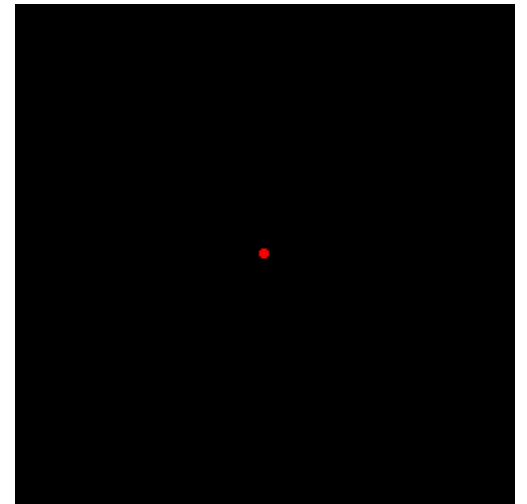
- Az EM tér (fotonok), az anyag energiasűrűsége csökken a tágulás során
- A sötét energia energiasűrűsége állandó
- A gravitációs tér energiasűrűségének nincs pontos meghatározása, a hozzá rendelhető energia valószínűleg nő.

## Mi okozza a vöröseltolódást?

A távoli égitestek fénye hosszú idő alatt jut el hozzánk. Az eltelt idő közben a VE tágult.

Hogyan képzelhetjük el a VE tágulását?

Képzeljük magunkat kétdimenziós embereknek, akik egy (lég)gömb felületén élnek. Képzeljünk a gömbre egy elektromágneses hullámot. Ha elkezdjük a léggömböt felfújni, akkor a felülete - a tér, amelyben élünk - tágul, és vele együtt a hullámhossz is nő. Növekvő hullámhossz a vörös felé való eltolódást jelent. Minél régebben indult el a fényhullám, annál hosszabb ideig tágult,



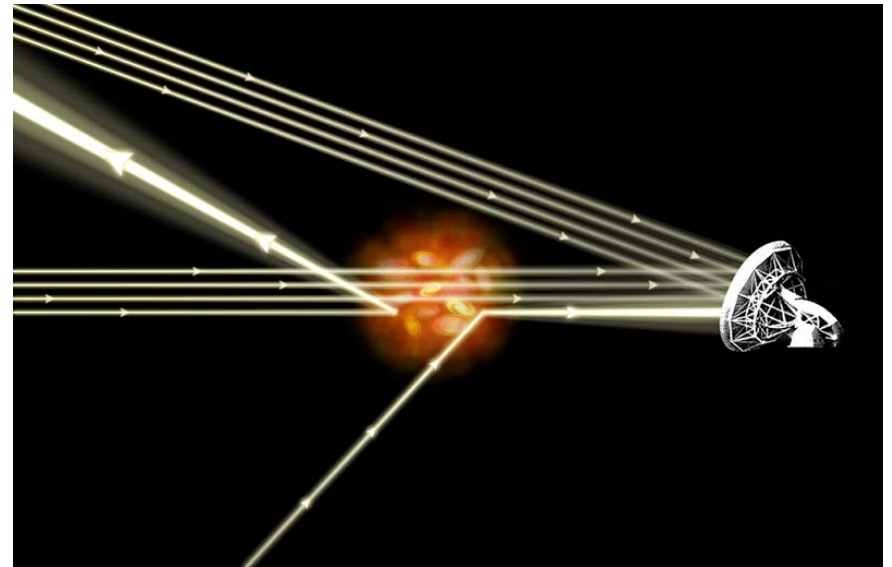
## A Hubble állandó új mérése?

A galaxis-csoportokat forró gáz veszi körül, amelyen szóródik a kozmikus háttérsugárzás, és így torzul a háttérsugárzás jele abban az irányban

A torzulás nagysága a gáz hőmérsékletétől, sűrűségétől és kiterjedésétől függ, így az utóbbit, **d**-t meg tudják állapítani.

A **d** olyan nagy, hogy szokásos háromszögelési módszerrel meg lehet határozni a látószögét,  **$\alpha$** -t

**$\alpha$**  és **d** ismeretében megkapjuk a távolságát



## A foton-kép és a Planck formula következményei

$$\left. \begin{array}{l} E_\gamma \propto \frac{1}{\lambda} \\ \langle E_\gamma \rangle \propto T \end{array} \right\} \Rightarrow T \propto \frac{1}{\lambda}$$

$T$	$\lambda_{\text{tip}}$
1K	0,29cm
300K	0,001cm
6000K	500nm

$$\langle \varepsilon_\gamma \rangle = \langle \rho_\gamma \rangle \langle E_\gamma \rangle \propto \frac{1}{\lambda^3} \frac{1}{\lambda} \propto T^4$$

**Stefan-Boltzmann!**

$$d\varepsilon = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{v^3 dv}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1} = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{k^4}{h^4} T^4 \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \propto T^4$$

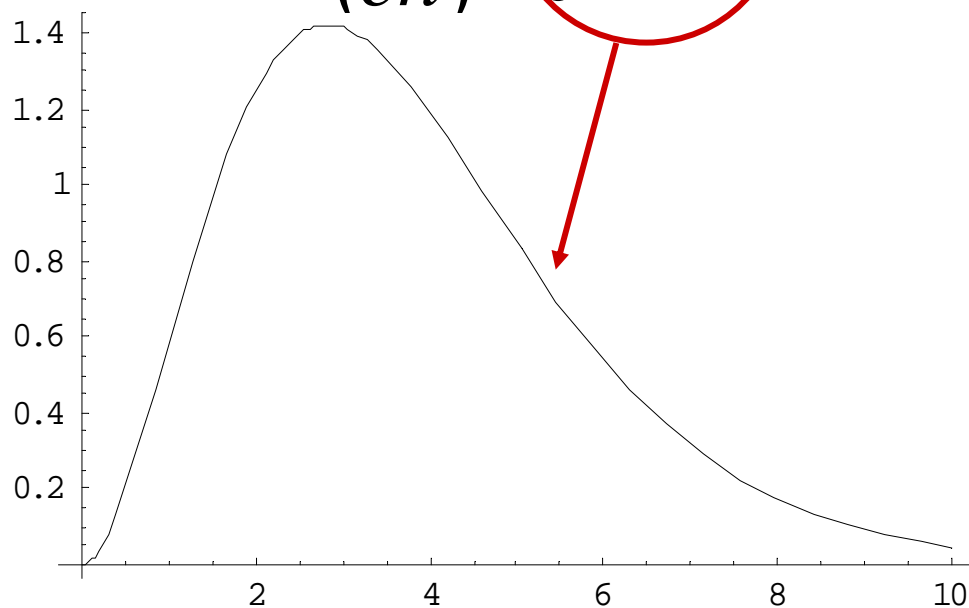
●∞2●:

$$d\varepsilon' = \frac{d\varepsilon}{16} = \frac{8\pi h}{16c^3} \frac{v^3 dv}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1} = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{v'^3 dv'}{e^{\frac{h2v'}{kT}} - 1} = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{v'^3 dv'}{e^{\frac{hv'}{k(T/2)}} - 1}$$

## Mekkora a kozmikus háttérsugárzás hullámhossza?

A hőmérsékleti sugárzás spektrumát a Planck-féle eloszlás írja le,  
nem jellemezhető egyetlen hullámhosszal

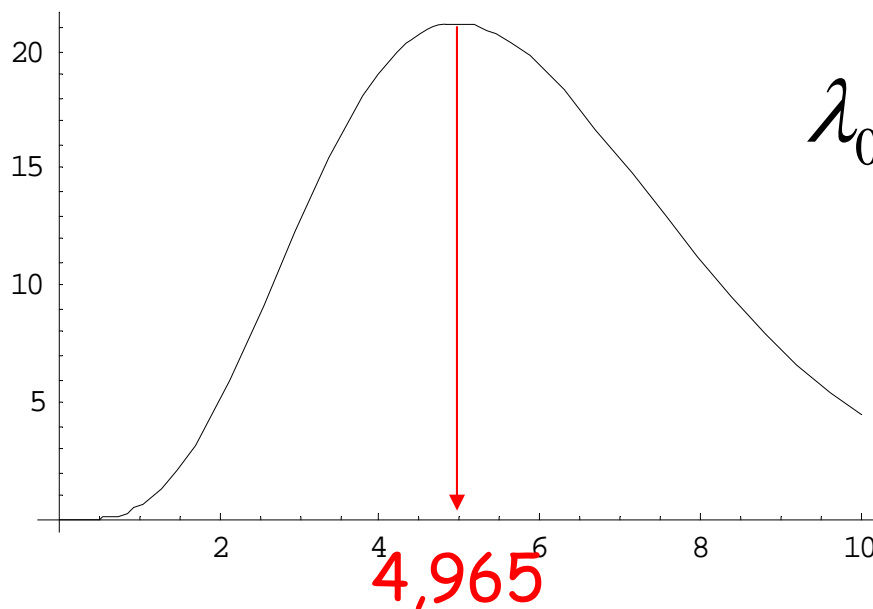
$$d\varepsilon(\nu, T) = 8\pi \frac{(kT)^4}{(ch)^3} \frac{x^3 dx}{e^x - 1}, \quad x = \frac{h\nu}{kT}$$



# Mekkora a kozmikus háttérsugárzás hullámhossza?

A Planck-féle eloszlás  $\lambda$  függvényében  
A maximumhoz tartozó hullámhossz a legvalószínűbb

$$\left( \frac{d\varepsilon(\lambda, T)}{d\lambda} \right)_{\lambda_0} = 8\pi \frac{(kT)^5}{(ch)^4} \frac{x_0^5}{e^{x_0} - 1} = 0, \quad \lambda_0 = \frac{hc}{kTx_0}$$



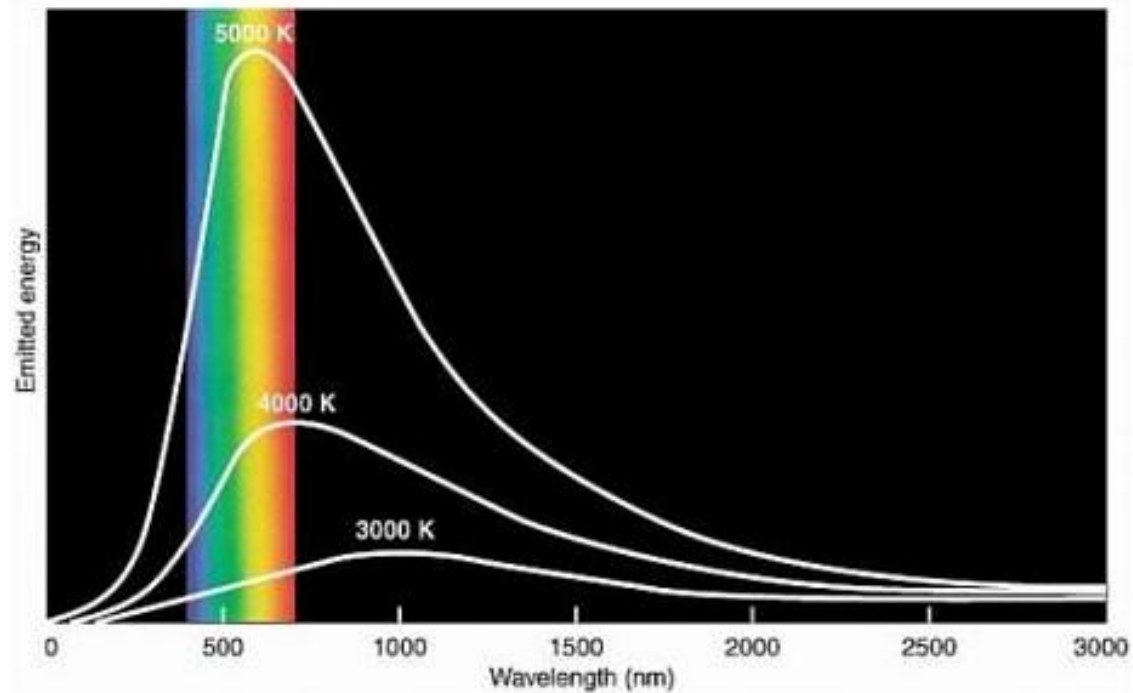
$$\lambda_0 = \frac{hc}{4,965 kT}$$

## Mekkora a kozmikus háttérsugárzás hullámhossza?

A legvalószínűbb hullámhossznál van a függvény maximuma

⑨ Wien-féle eltolódási törvény

$$\lambda_0 = \frac{2,9\text{mm}}{\{T\}}$$



A CMB esetén  $\lambda_0 = 1,06 \text{ mm}$



## Mekkora a kozmikus háttérsugárzás hullámhossza?

Az átlagos hullámhossz nagyobb

A fotonok sűrűsége a hullámhossz függvényében

$$dn(\lambda, T) = \frac{d\varepsilon(\lambda, T)}{h\nu} = 8\pi \frac{(kT)^3}{(ch)^3} \frac{x^2 dx}{e^x - 1}$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\int_0^\infty \lambda dn(\lambda, T)}{\int_0^\infty dn(\lambda, T)} = 0,6842 \frac{ch}{kT} = \frac{9,86\text{mm}}{\{T\}}$$

$$\langle \lambda \rangle_{\text{CMB}} = 3,6\text{mm}$$

## Hogyan fejlődnek a galaxisok?

Általános vélemény, hogy a kezdeti piciny sűrűség-ingadozásokat (amelyeket a CMB-ben látunk) a gravitációs vonzás hosszú idő alatt felerősítette

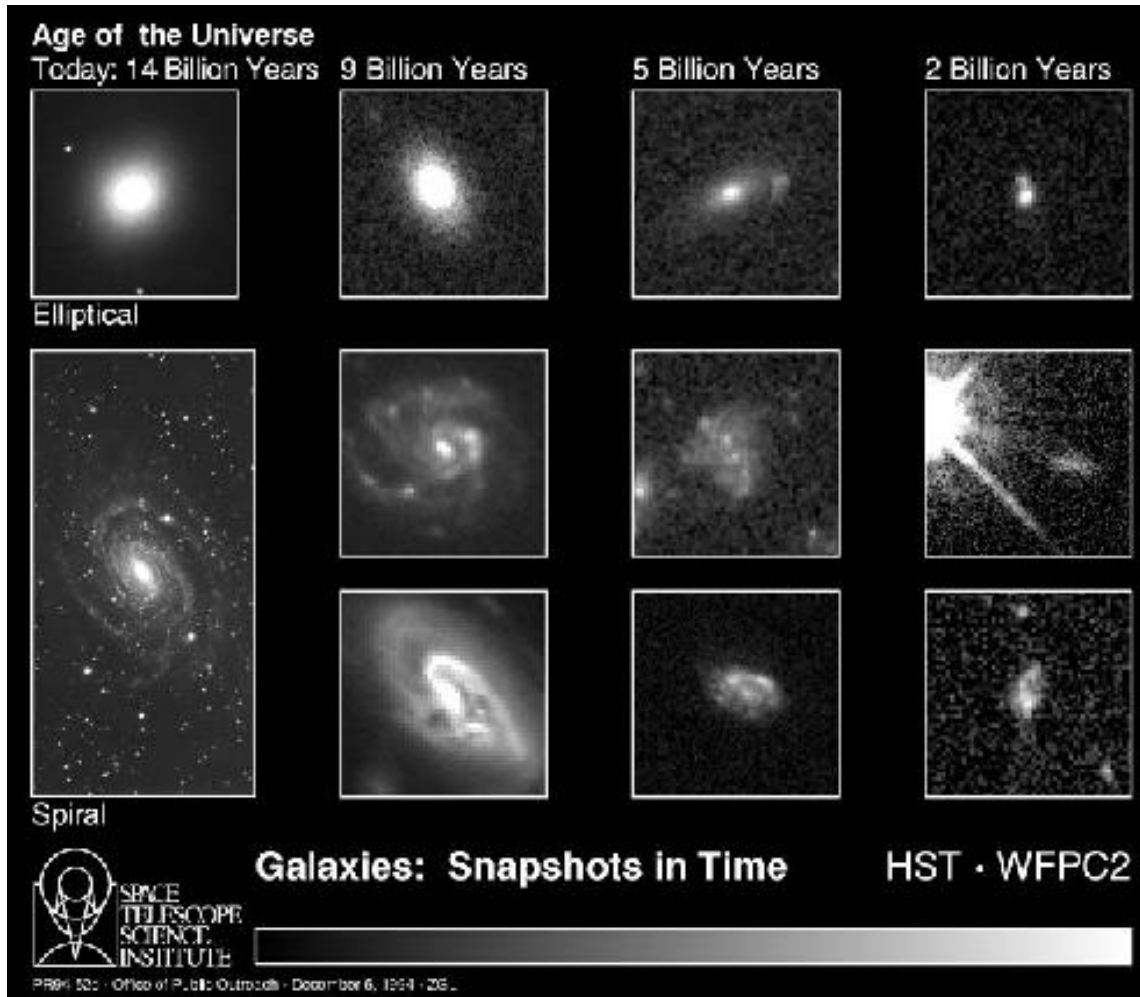
500 ezer évvel az Ősrobbanás után a Tejút helyén mintegy 0,5%-kal magasabb volt a sűrűség, mint a környezetében, ezért itt a tér lassabban tágult

A lassúbb tágulás felerősítette a sűrűség-többletet:

- a 15 millió éves VE-ben már 5%-kal volt magasabb a helyi sűrűség
- Az 1,2 milliárd éves VE-ben már 2-szer magasabb volt a helyi sűrűség

# Hogyan fejlődnek a galaxisok?

Elliptikus  
galaxis:



Spirális  
galaxis:

Formálódó csillagrendszerek?

## Magyarázható-e másként a Hubble-törvénytől való eltérés?

Igen. A sötét energia akkor adódik, ha feltételezzük, hogy a gravitációs kölcsönhatást a VE-ben mindenhol ugyanaz a törvény írja le (nagy skálákon).

Ezt érdemes kutatni, de

- A mérési eredményeket nagyon pontosan leírja a sötét energia feltevésével alkotott modell
- Az általános relativitás elmélete mind tetszetős, mind pedig igen pontos mérések támasztják alá (l. Einstein kiállítás)

## Előfordulhat-e fénysebességnél gyorsabb távolodás a galaxisok között?

Szerintem igen, nem ismerek olyan fizikai törvényt, ami ezt kizárná.

Nem valamilyen hatás terjedési sebességéről van szó, hanem a tér tágulásából eredő távolodásról.

A sebesség az ált. rel.ben helyi koordinátákkal számítandó ki, ezért egymástól távol levő testek sebességének összehasonlítása bajos.

# A feldobott kő analógiája meddig használható?

Tudtommal nincs határa

Az utóbbi két válasz az ált. rel. Pontosabb ismeretét igényelné

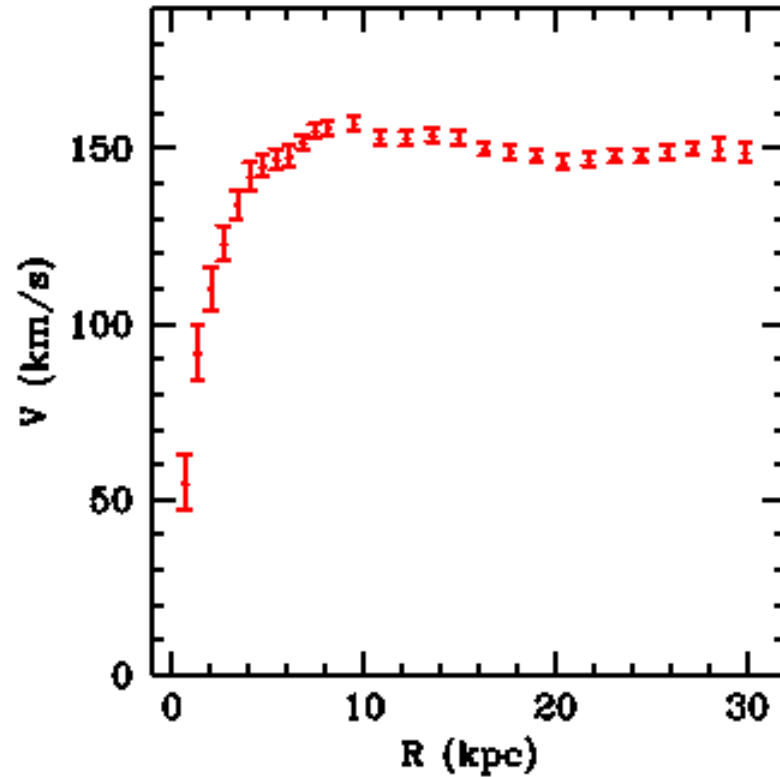
- Nem vagyok benne biztos, hogy az irodalomban teljesen ismerné a válaszokat, de szakértőt kell megkérdezni

# Mikro- és makrovilág kapcsolatáról még egyszer

- Miért kritikus a sűrűség?
- Honnan származik az anyag?
  - Kezdetben anyag és antianyag feltehetően ugyanannyi volt. Valami miatt ez a szimmetria megsérült. A VE tágulásával az anyag és antianyag EM sugárzássá alakult át, és visszamaradt egy kevés anyag (kb. egymilliárd fotonra jut egy proton)
- Mi a VE finomszerkezetének forrása?
- Mi a sötét anyag?

# Sötét anyag létezésének bizonyítéka

- A galaxisok forgási görbéje





## A forgási görbe következménye

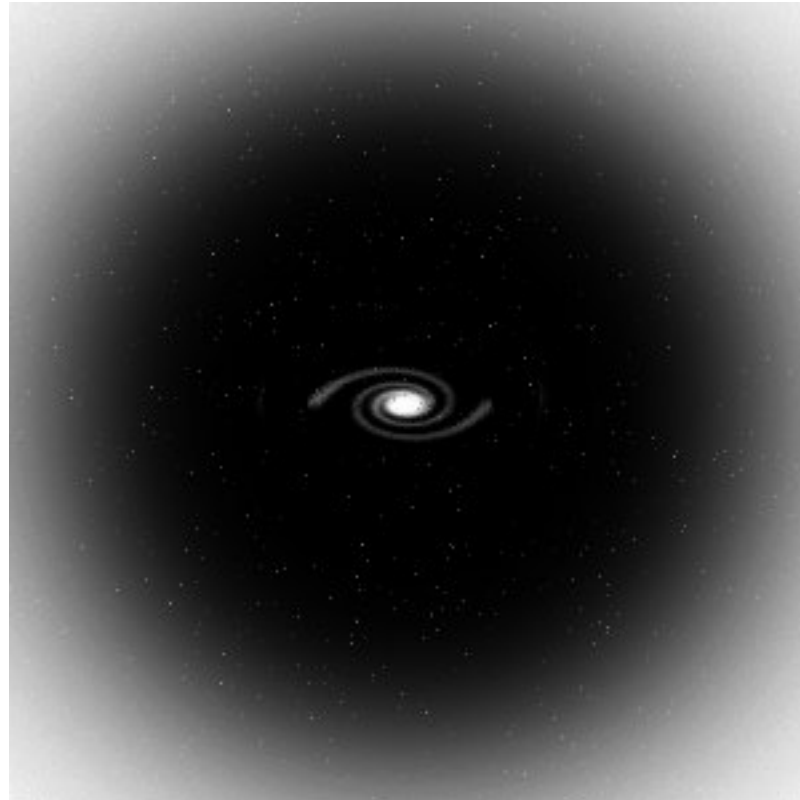
$$m \frac{v_t^2}{r} = G \frac{mM}{r^2} \qquad v_t^2 = G \frac{4}{3} \pi \rho \frac{r^3}{r}$$

$$\rho \propto \frac{1}{r^2} \qquad \rho_L \propto e^{-r}$$

- 9

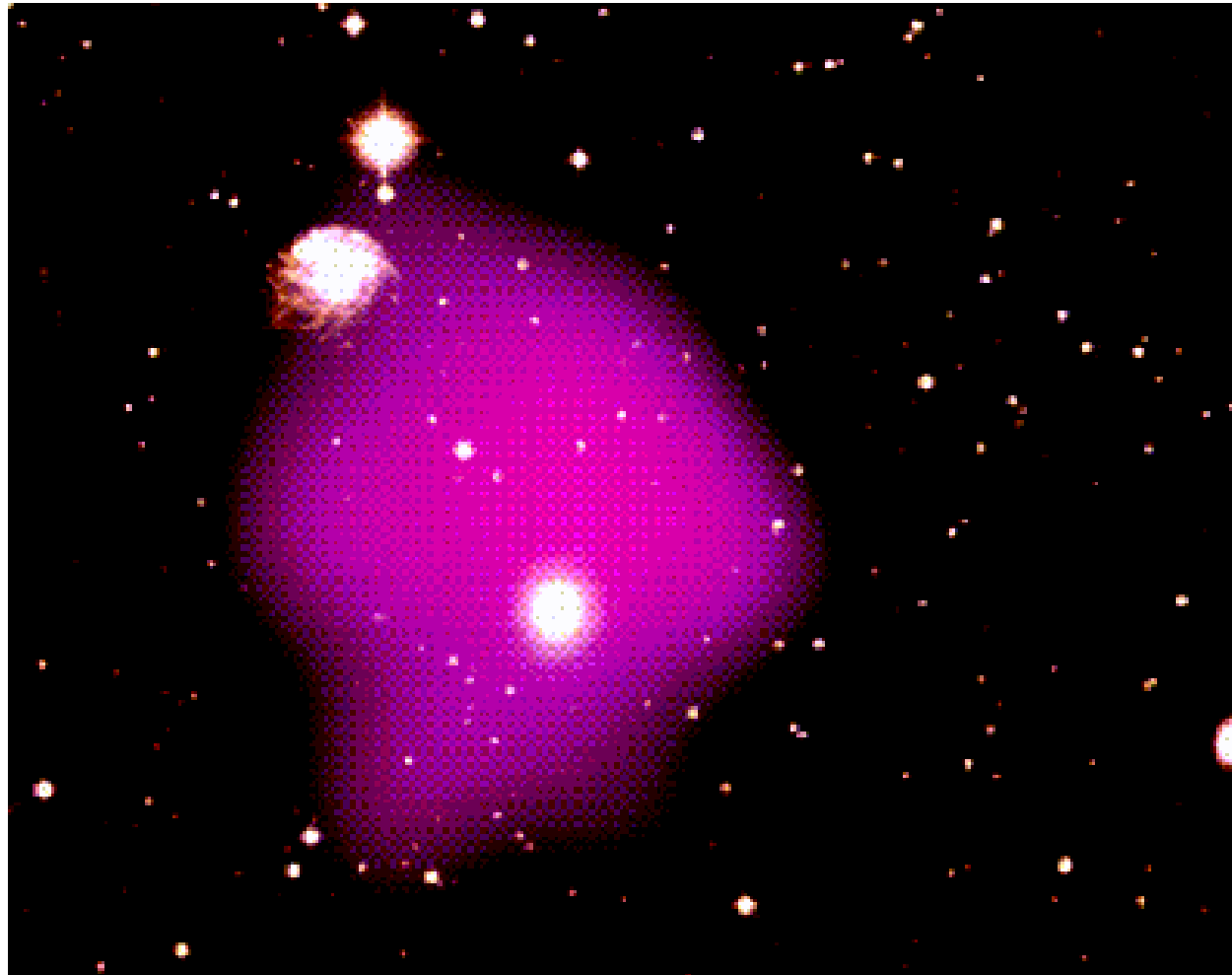
- a galaxisoknak udvara (halo) van, pl. az M51 udvara 50kpc távolságra terjed
- a galaxisban a sötét anyag tömege legalább 10szerese a fénylő anyag tömegének

## Sötét anyag a galaxisban



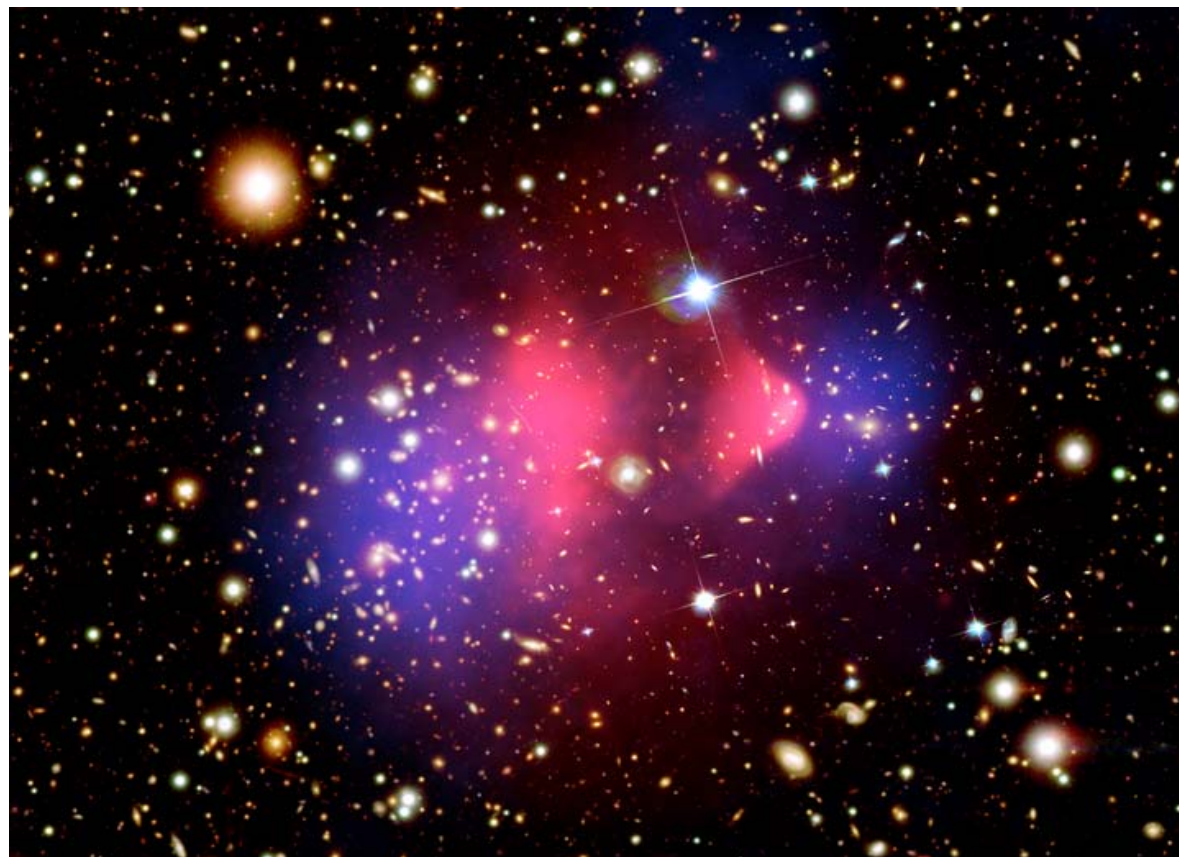
## Röntgensillagászat: gázfelhők léteznek

- A Chandra képe galaxisok közötti gázfelhőről:



## Sötét anyag létezésének bizonyítéka

- A Chandra képe két galaxishalmaz ütközéséről:



- Rózsaszín: forró gáz galaxishalmazok körül
- Kék: gravitációs fényelhajlásból következtetett SA

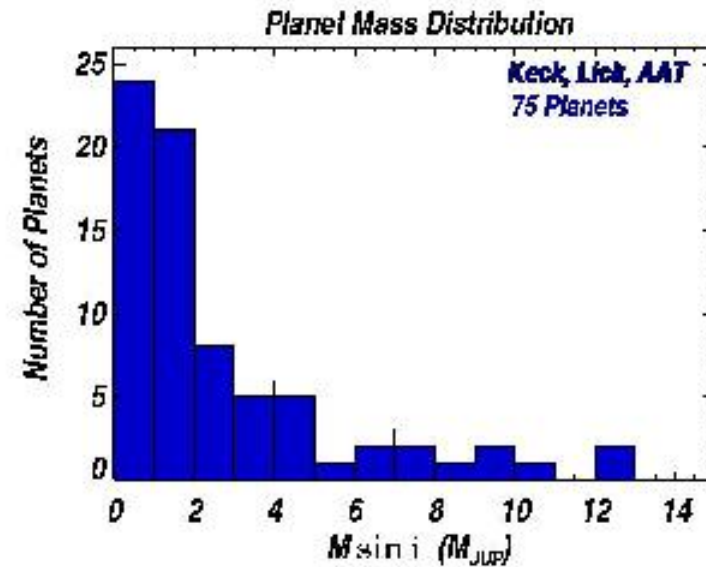
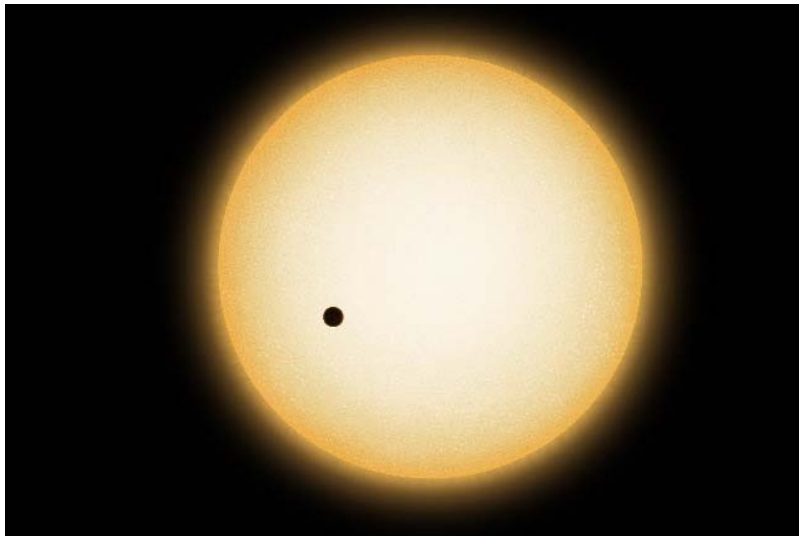
# Mi lehet a sötét anyag

- Barionikus
  - bolygók
  - fehér törpék
  - MACHO-k (**Massive Compact Halo Object**): barna, fekete törpék, neutroncsillagok, fekete lyukak
  - gázfelhők
- a nukleoszintézis alapján  $\Omega_B \sim 0,04 < \Omega_{DM} \sim 0,3$
- Nem barionikus (ismeretlen), gyengén hat kölcsön a barionikus anyaggal
  - „forró” (közel fénysebességű, HDM): neutrínók, ha van tömegük (ma: van de kevés)
  - „hideg” (lassú, CDM): **Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) LSP?**
- egyelőre nem sikerült megtalálni

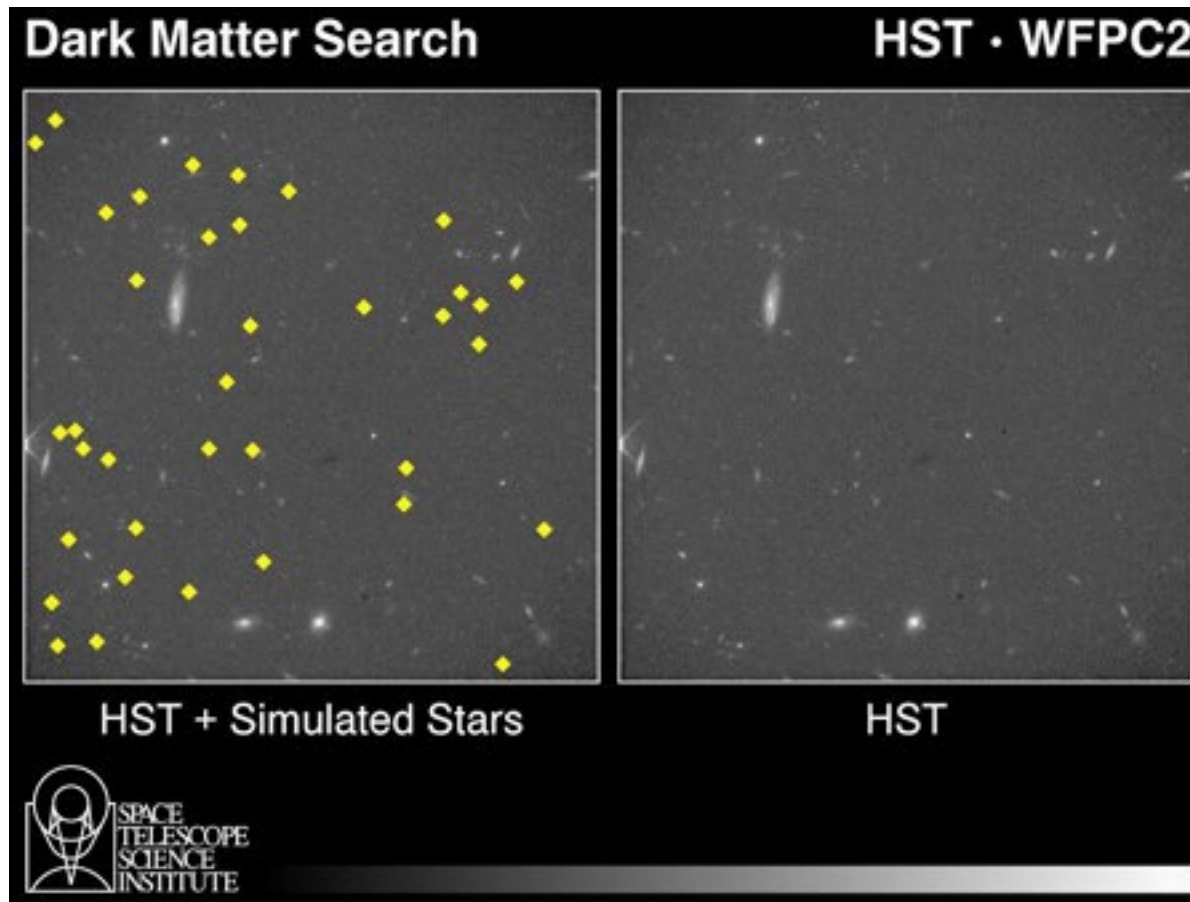
Netalán a gravitáció módosul nagy skálán?

# Bolygók

- 155-t ismerünk a Naprendszeren kívül (2005. júniusi adat)
- Észlelésük: csökkentik a csillag fényességét, ha elhaladnak előttük
- Általában nem jelentős a tömegük a „napuk” tömegéhez képest



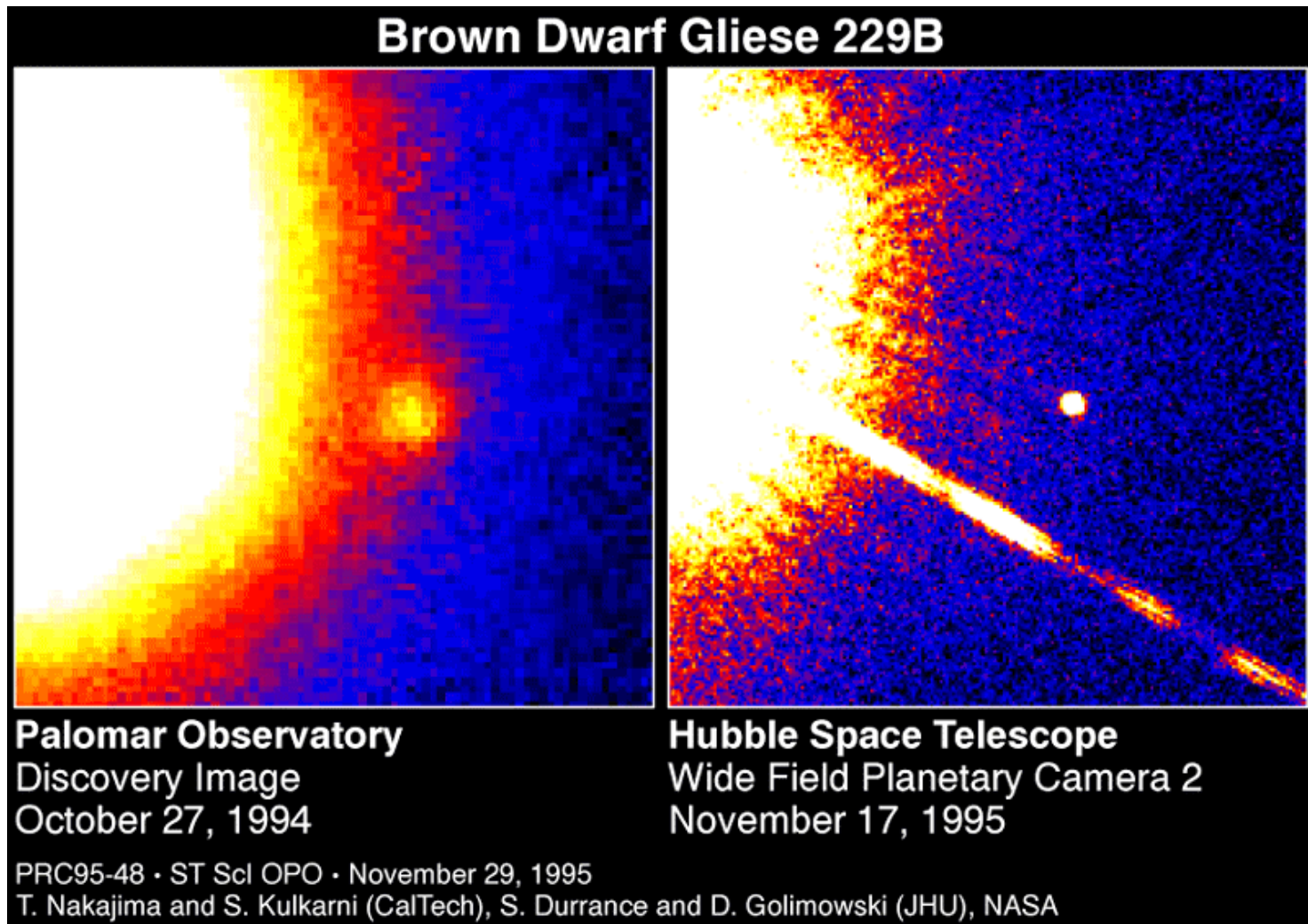
# Fehér törpék



Kevés

# MACHO-k

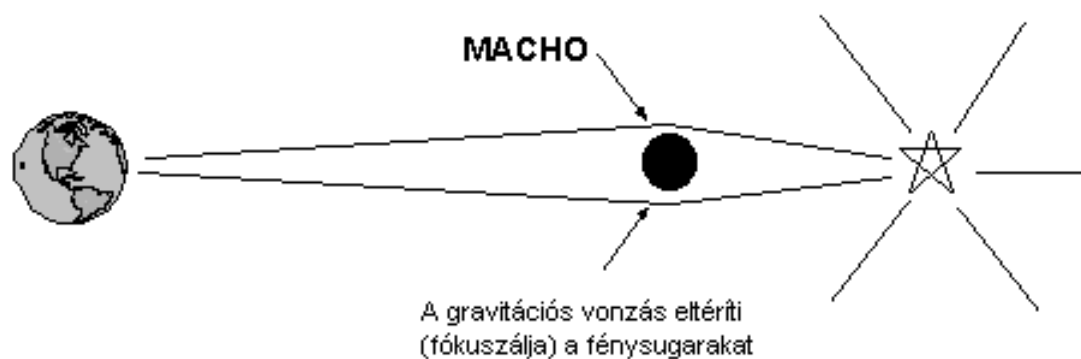
- Közvetlen kimutatásuk nehéz, mert nem világítanak



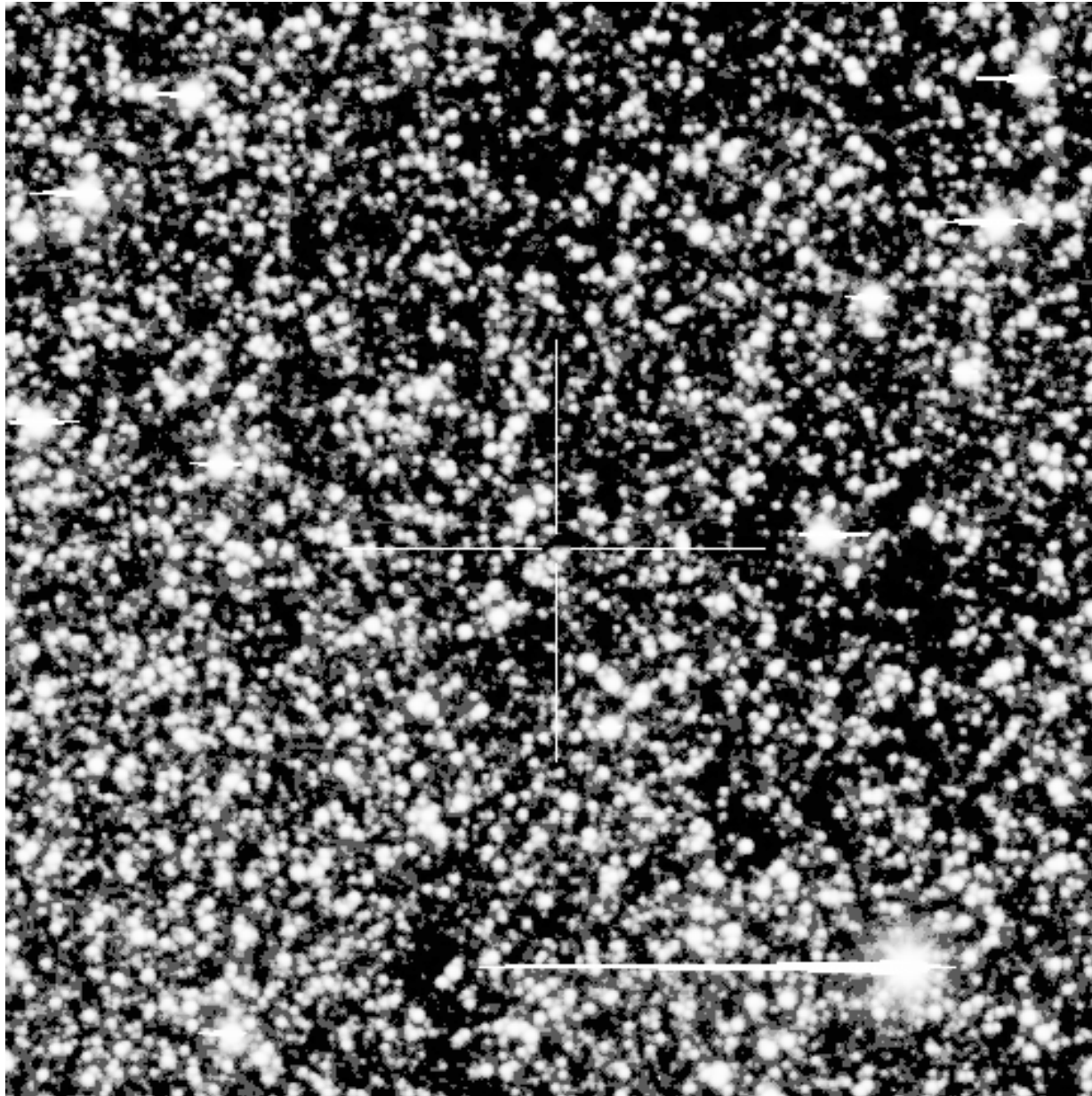


# MACHO-k

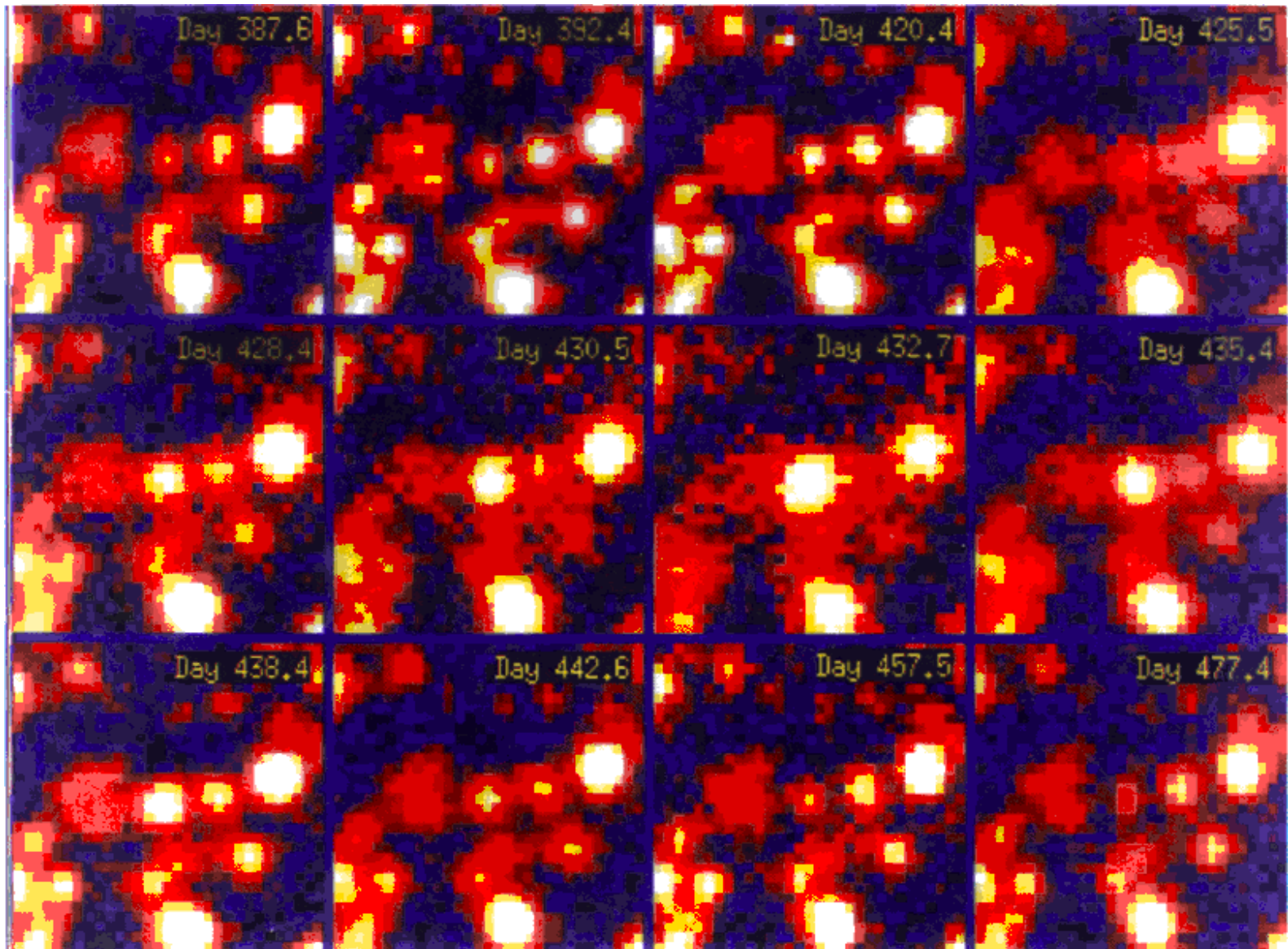
- Közvetlen kimutatásuk nehéz, mert nem világítanak
- Közvetve: gravitációs mikrolencsehatás



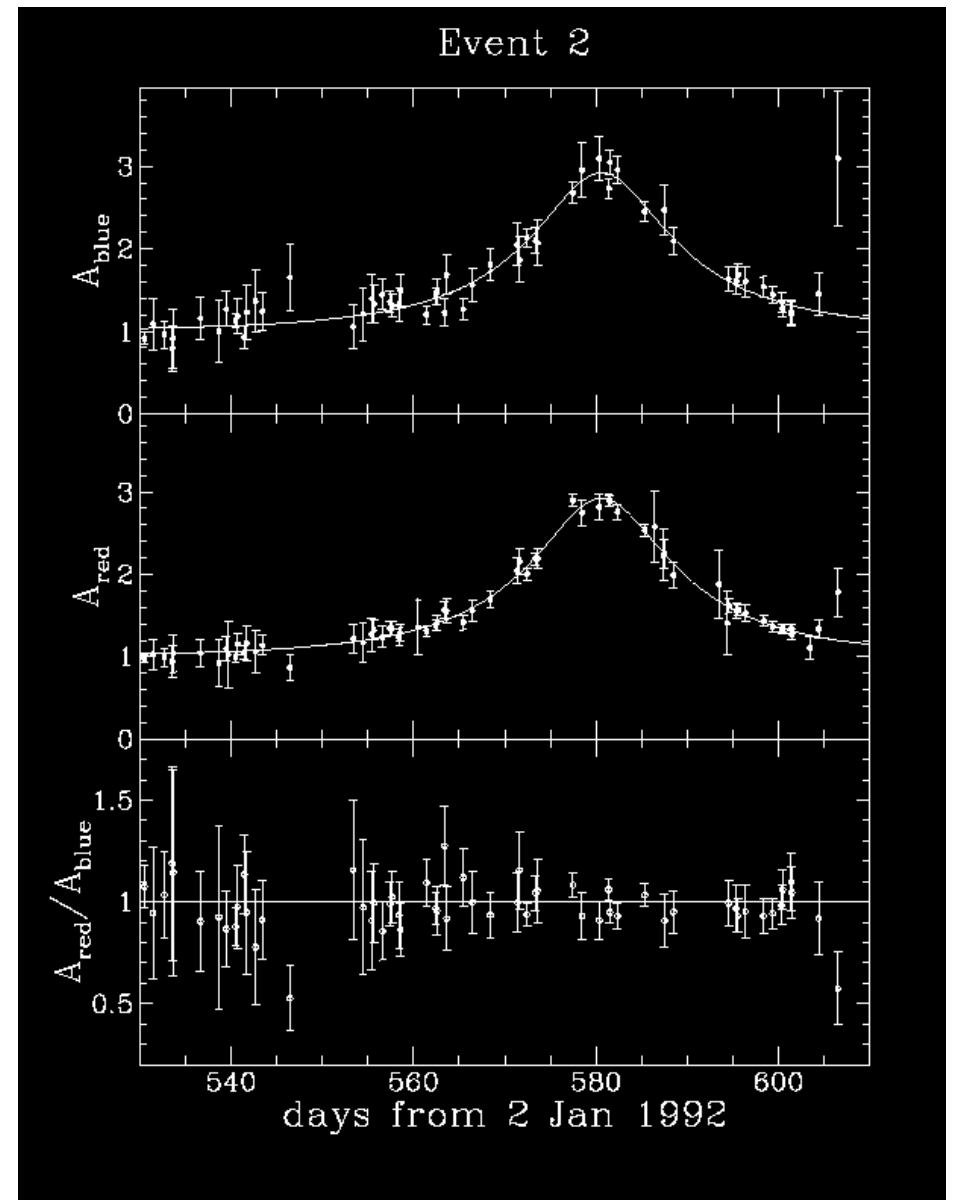
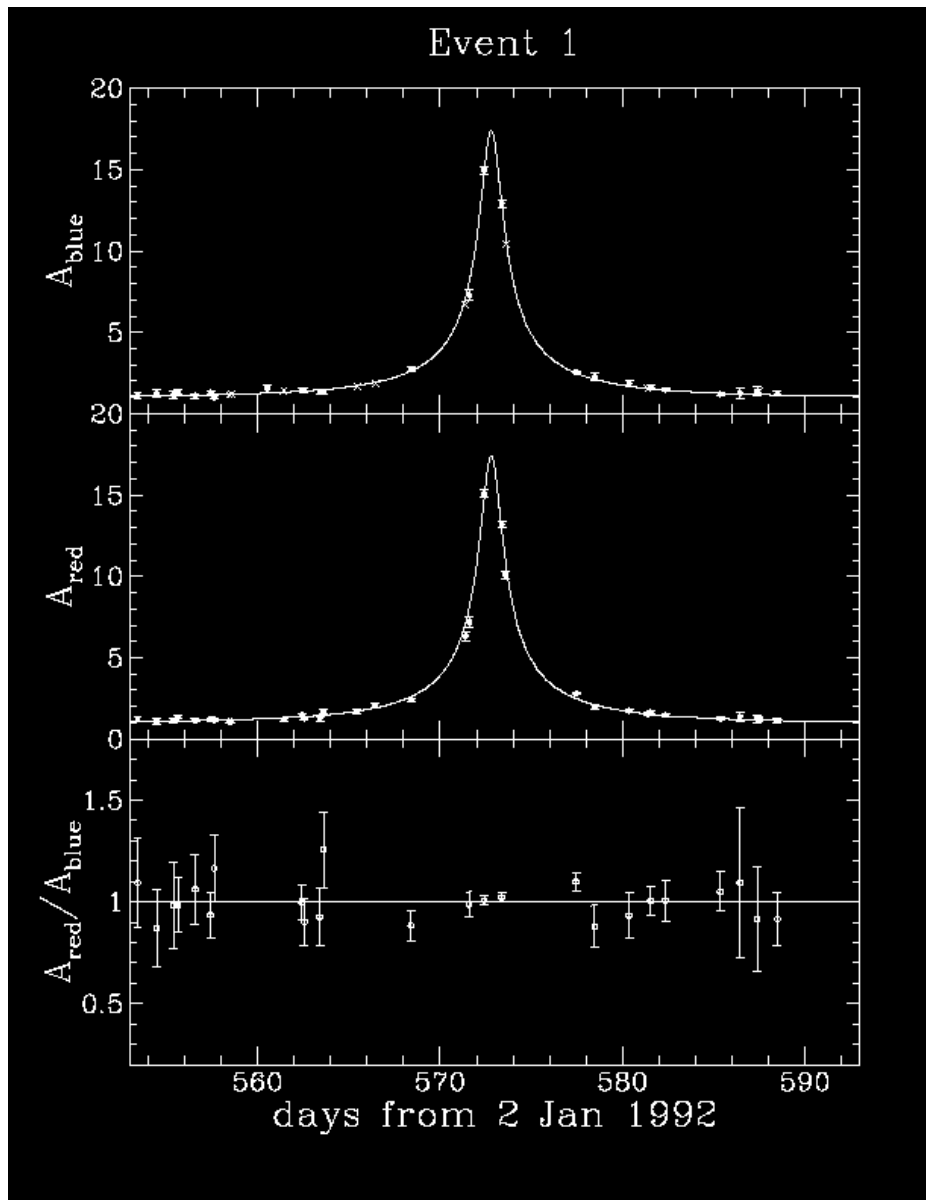
## MACHO: tű a szénakazalban



## Egy fókuszáló MACHO hatása



# A MACHO-k fényesedési görbéi



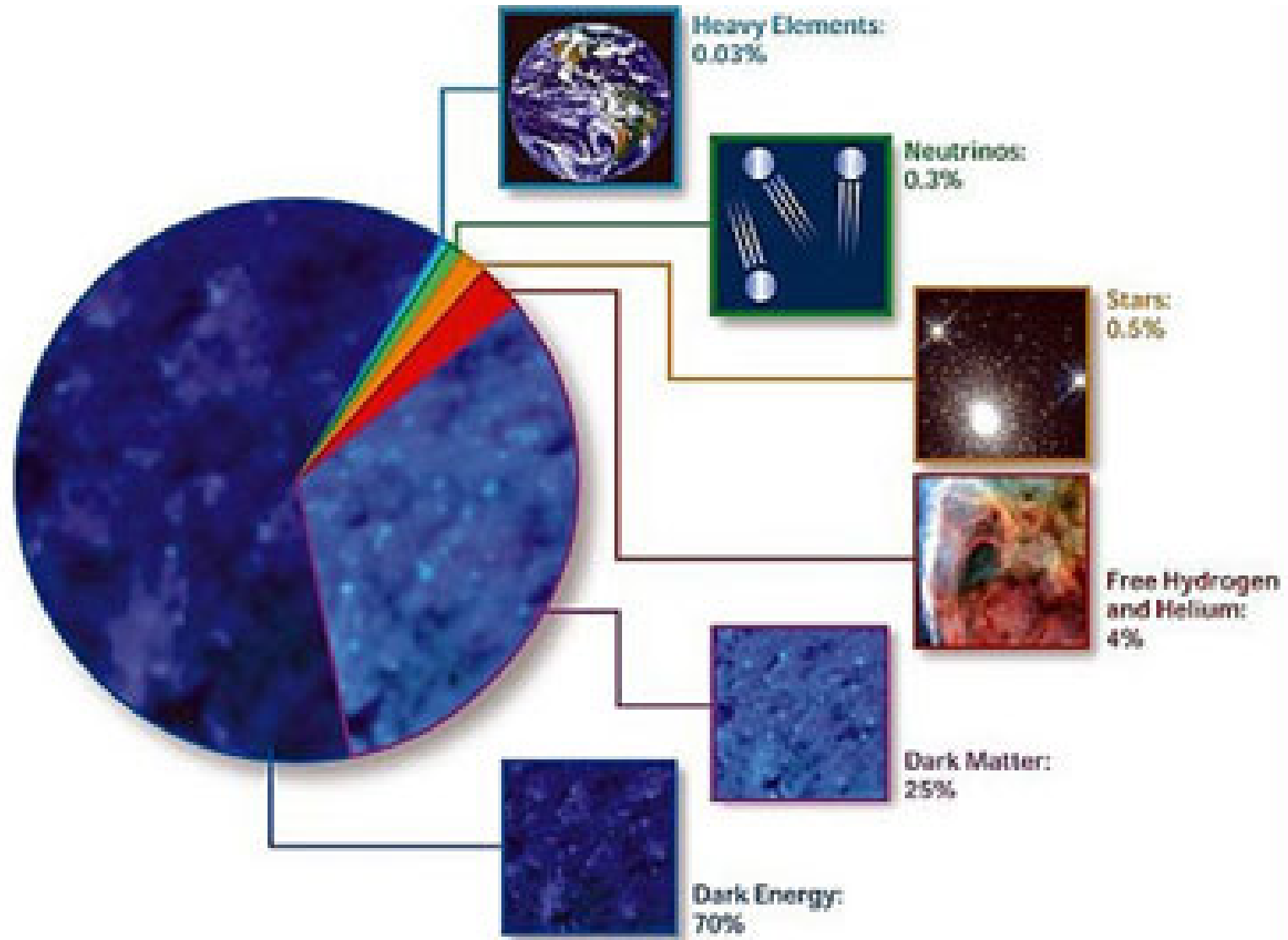
## Mi lehet a sötét anyag?

- Nem barionikus (ismeretlen), gyengén hat kölcsön a barionikus anyaggal
- Az LHC-n felfedezhető (pl. legkönnyebb szuperszimmetrikus részecske)

# A sötét energiáról

- Az üres tér energiája(???)
- A sűrűsége a tágulás során állandó, mindenhol ugyanakkora (nem sűrűsödik be!)
  - Kozmológiai állandó?  
(Negatív nyomás a VE állapotegyenletében, aminek hatására a tér gyorsulva tágul.)
  - Kvintesszencia?  
(Ismeretlen skalártér - talán a Higgs tér? -, amely potenciáljának nem az abszolút minimumában van, ahhoz közeledik a tágulás során, így folyamatosan energia áramlik a térbe)

# A VE összetétele részletesebben



Fekete lyukak



fekete lyuk? nem



# Eseményhorizont

Szökési sebesség:

$$v_{\text{II}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \leq c$$

Fejezzük ki  $R$ -t, határesetben ⑨ Schwarzschild-sugár:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

## Eseményhorizont

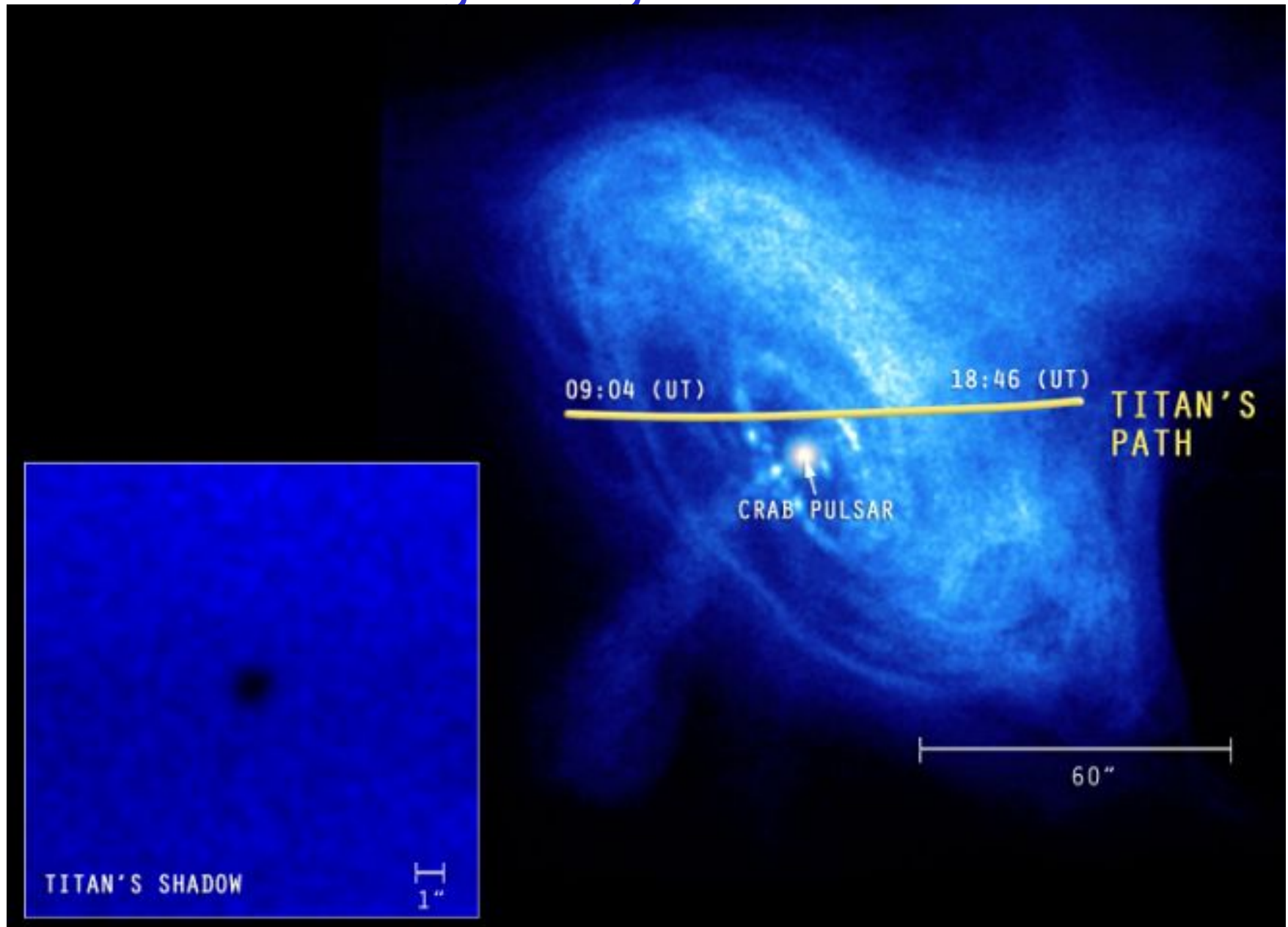
	$\frac{M}{M_{\text{nap}}}$	$R_s = 2 \frac{GM}{c^2}$	$\rho_{R_s} \left( \frac{g}{\text{cm}^3} \right)$
Föld	$10^{-7}$	9 mm	$2 \cdot 10^{27}$
Nap	1	3 km	$2 \cdot 10^{16}$
galaxis	$10^{11}$	0,3 fényév	$2 \cdot 10^{-6}$
Világegyetem	$10^{22}$	$3 \cdot 10^9$ fényév	$2 \cdot 10^{-28}$

# Egy csillag élete



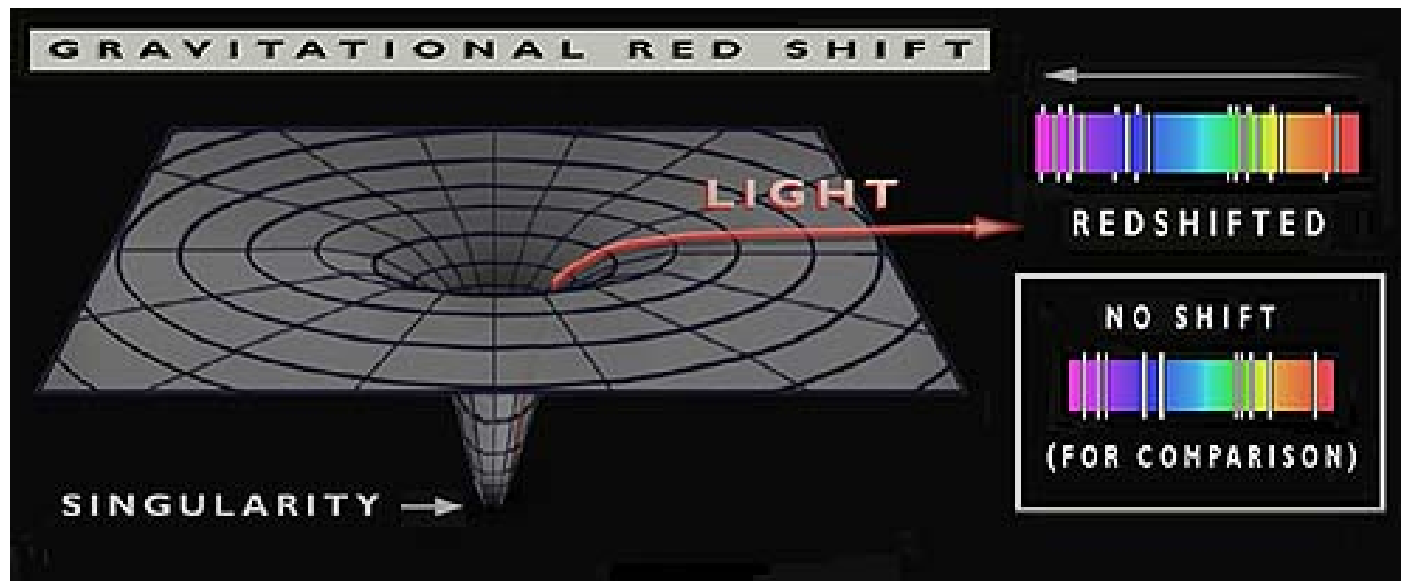


# Öreg csillagok elmélete



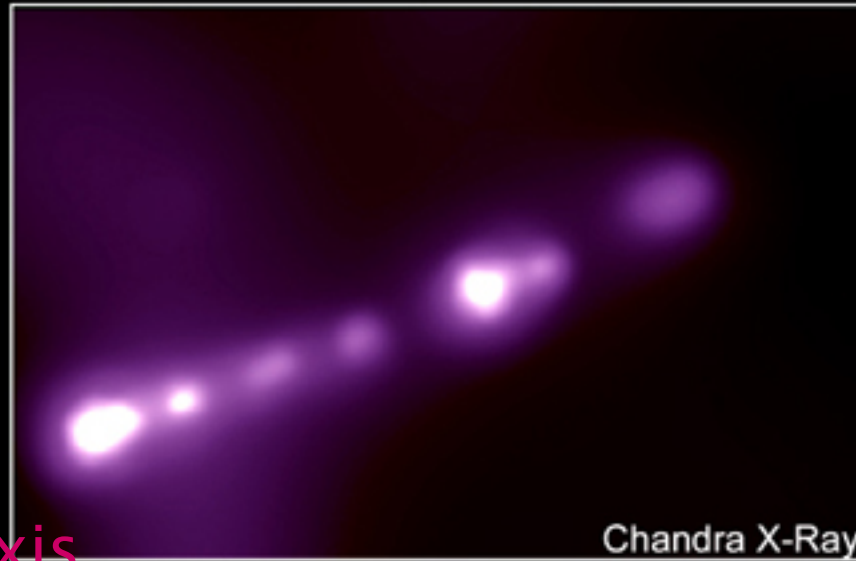
# Fekete lyuk

- Kritikus tömeg felett a neutroncsillag sem stabil: fekete lyuk (=anyag a saját eseményhorizontján belül) keletkezik (elméleti jóslat)
- A fekete lyuk közelében  $c$  állandó,  $v \rightarrow 0$ : gravitációs vöröseltolódás  $\Rightarrow$  csak közvetett bizonyíték lehetséges (gravitációs hatás)

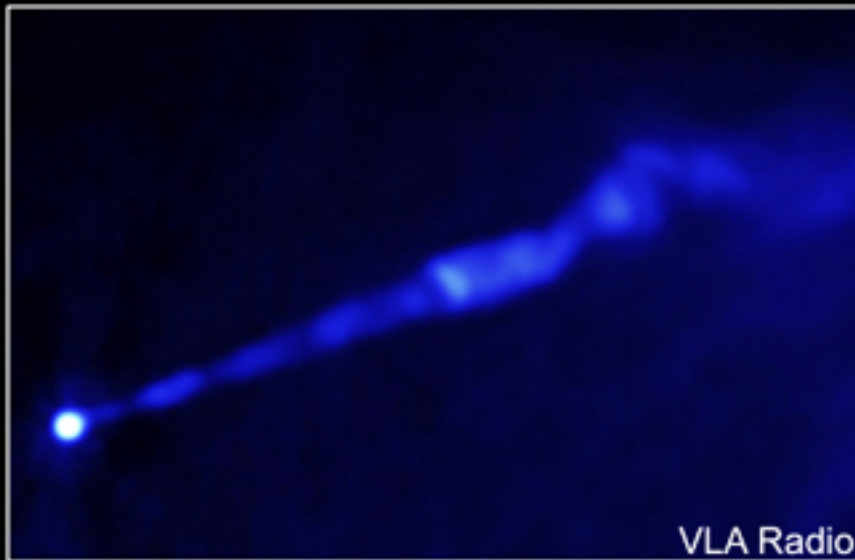


# Fekete lyuk észlelése: gázkilövés

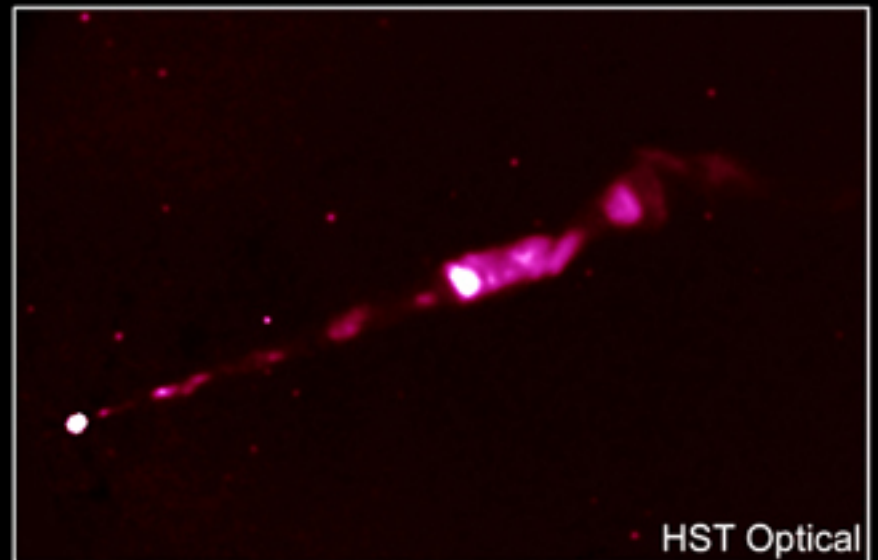
M87 galaxis



Chandra X-Ray

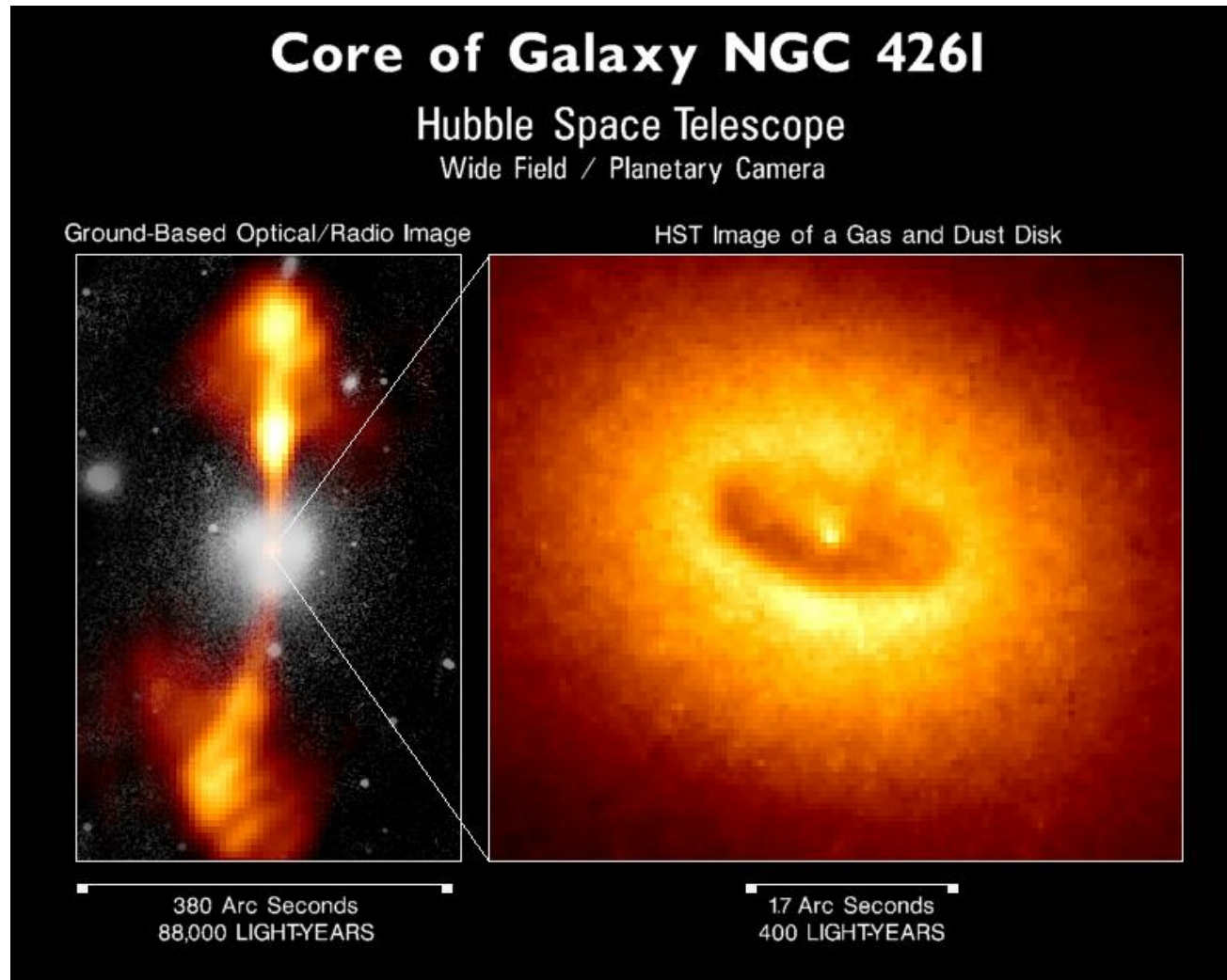


VLA Radio



HST Optical

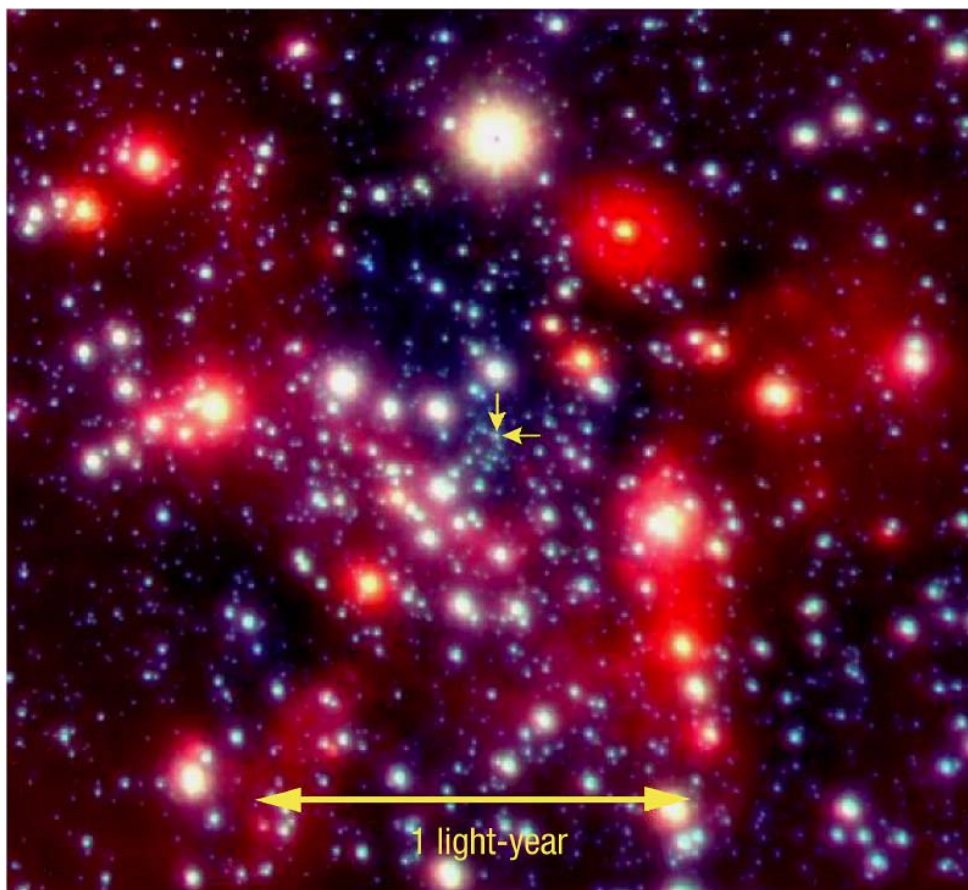
# Fekete lyuk észlelése: gázkilövés



NGC 4261 galaxis



# Fekete lyuk észlelése: gravitációs hatás



The Centre of the Milky Way  
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory



A Tejút közepe

## A fekete lyukak nem feketék

- Fekete lyuk mellett csökkenhet az entrópia?!  
(gáztartályok) => sérül a hőtan II. főtétele?
- S. Hawking:
  - az eseményhorizonton kibocsátott fénysugarak nem közelednek egymáshoz
  - ha anyag hullik bele, az eseményhorizont nő
- => olyan, mint az entrópia
- J. Bekenstein: jellemezzük a fekete lyuk entrópiáját eseményhorizontjának felületével
- => nem sérül a II. főtétel
- Entrópia  $> 0$  => hőmérséklet  $> 0$ 
  - ⇒ Hőmérsékleti sugárzás!
- ⇒ Hawking (1973): a fekete lyukak sugároznak?

## A feketelyuk-sugárzás (pop) elmélete

- vákuum tele virtuális részecskepárokkal (Lamb eltolódás igazolja)
- A fekete lyuk eseményhorizontja mellett keletkező virtuális pár egyik tagja a lyukba esik=> a partner valódi részecskeként jelenik meg
- A Naptömegű fekete lyuk hőmérséklete  $100\text{nK}$  => nyelő
- Kistömegű ( $\sim 1Eg$ ) fekete lyuk többet sugároz, mint amennyit elnyel ( $\sim 10\text{GW}$  teljesítménnyel) => 15 milliárd év alatt elpárolog, végül felrobban, ami észlelhető (Cserenkov sugárzás)