

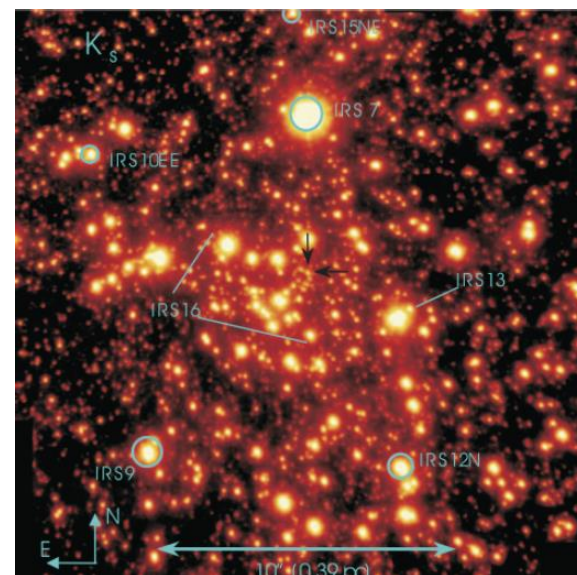
Gravitációshullám-asztrofizika – egy új korszak kezdete

Kocsis Bence

GALNUC ERC Starting Grant kutatócsoport
ELTE, Atomfizikai tanszék

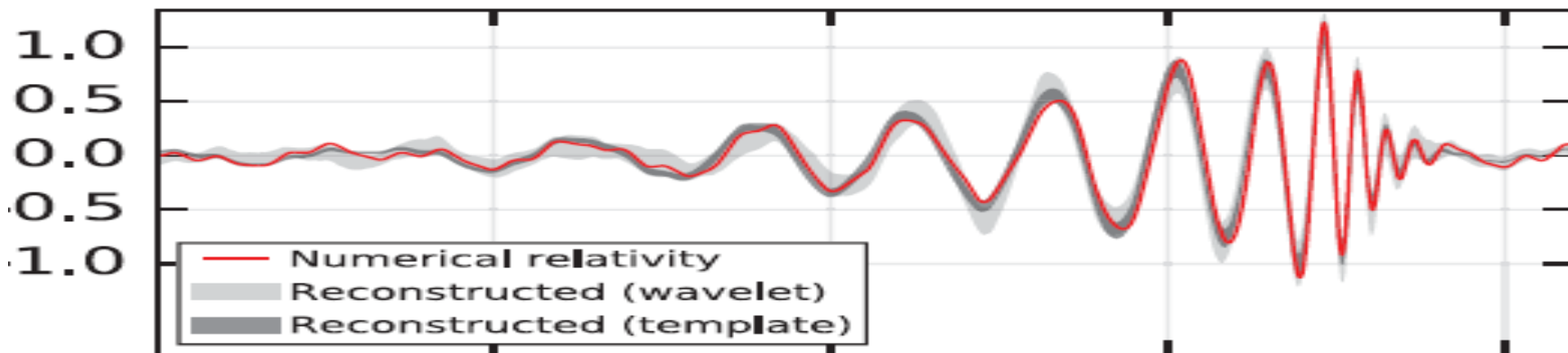
GALNUC csoporttagok

- **posztdok:** Yohai Meiron, Zacharias Roupas
- **phd:** Gondán László, Balázs Boldizsár
- **msc:** Máthé Gergely
- **bsc:** Kovács Áron



2016. május 5. Magyar Tudományos Akadémia
A gravitációs hullámok felfedezése, asztrofizikai perspektívák

Mit tudtunk meg február 11.-én?



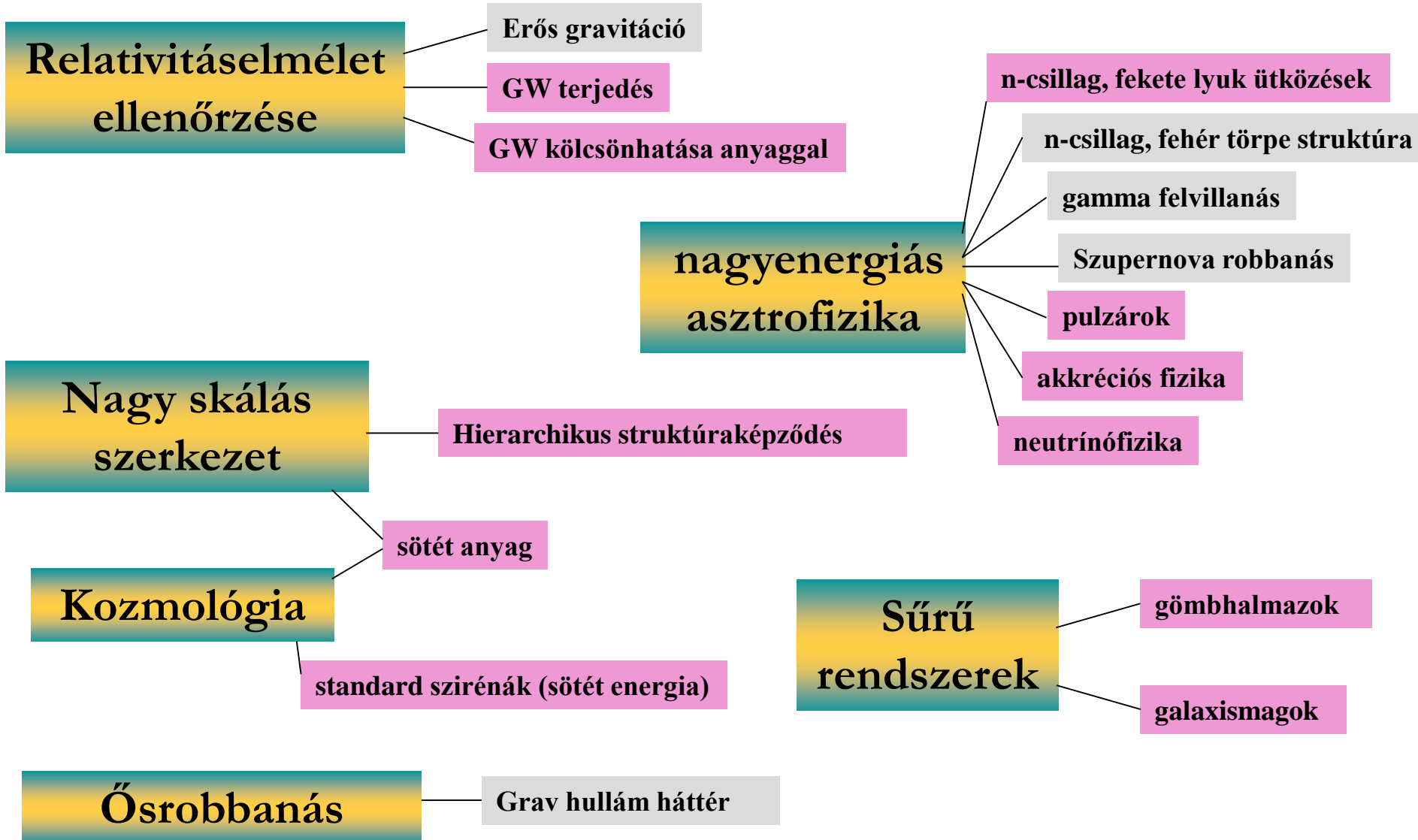
bespirálózás

ütközés

lecsengés

- Fekete lyukak **léteznek!**
 - van horizontjuk
 - relativitáselmélet ellenőrizve erős gravitációnál és időfüggő esetben
 - **graviton tömege** konzisztens nullával ($< 10^{-22}$ eV), Compton hullámhossz > 1 fényév
- Fekete lyukak **sokkal nehezebbek lehetnek** mint korábban gondoltuk !
 - 30 naptömeg lehetséges!
- Léteznek fekete lyuk – fekete lyuk **kettősök**
- ütközések **gyakorik** $> 2-53/\text{yr}/\text{Gpc}^3$
- **Óriási meglepetés:** elektromágneses gamma kitörés 0.4 másodpercen belül

Gravitációshullám asztrofizika



Nulladrendű kérdések

- Milyen asztrofizikai folyamat hozta létre a megfigyelt fekete lyuk ütközést?
 - Hogyan keletkeznek ekkora fekete lyukak?
 - Hogyan formálódott a kettős?
 - Hogyan jutott el a kettős az ütközésig?
- Hol keletkeznek a leggyakoribb források?
 - galaxismag, gömbhalmaz, galaxiskorong, halo?

Lehetséges folyamatok

– csillagfejlődés új módusa (teljesen konvektív csillag)

(Belczynski+ 2016, Mandel+de Mink 2016; de Mink+Mandel 2016, Merchant+ 2016)

– legősibb csillagok (fémmentes, szupernehéz csillag)

(Kinugawa+ 2014, 2016, Inayoshi+ 2016, Hartwig+ 2016)

– forgó csillag magösszeomlása

(Reisswig+ 2013, Loeb 2016, Woosley 2016)

– sötét anyag fekete lyukakból áll (!)

(Bird+ 2016, Clesse+Garcia-Bellido 2016, Sasaki+ 2016)

– sűrű csillagklaszterekben dinamikai ütközések

(Portegies Zwart+McMillan 2000, O'Leary, Kocsis, Loeb 2009, O'Leary, Meiron, Kocsis 2016, Rodriguez+ 2016)

– galaxismagban szupermasszív fekete lyuk segít

(Kovács, Kocsis, Naoz 2016)

– aktív galaxismagban gázkorong segít

(Bartos, Kocsis, Haiman, Marka 2016, Stone+ 2016)

– galaxismagban fekete lyuk korongok képződnek dinamikailag

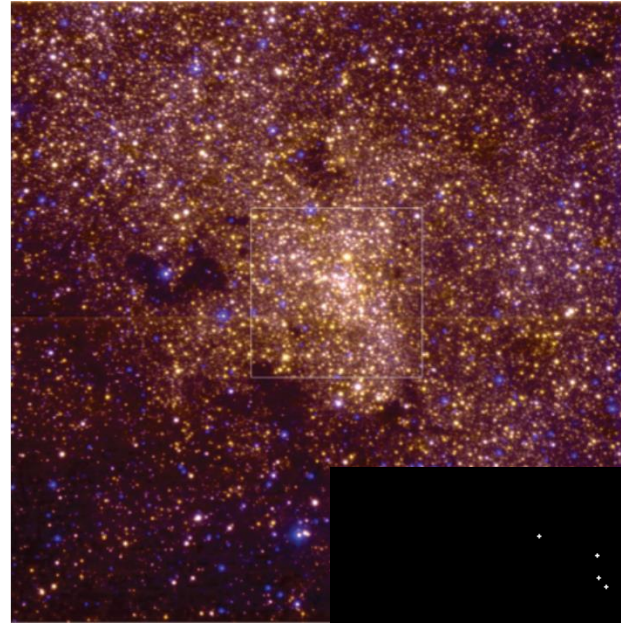
(Kocsis+Tremaine 2016, Roupas+Kocsis 2016)

Legvalószínűbb színtér

Galaxismag

A legsűrűbb csillaghalmazok

- $10^6 - 10^9 M_{\text{sun}}$ szupermasszív fekete lyuk
- $10^6 - 10^9$ csillag
- $10^4 - 10^7$ naptömegű fekete lyuk
- Méret: 1 pc – 1 kpc



Gömbhalmaz

- 200 darab a Tejút galaxisban
- $10^4 - 10^6$ csillag, $10^1 - 10^3$ fekete lyuk
- Nincs központi fekete lyuk
- Méret: 1 pc – 10 pc



Megértésük kulcsfontosságú az asztrofizikában

Galaxis és gömbhalmazok

Gömbhalmazok

10^5 - 10^6 csillag, 100 db egy galaxisban, nincs bennük szupermasszív fekete lyuk



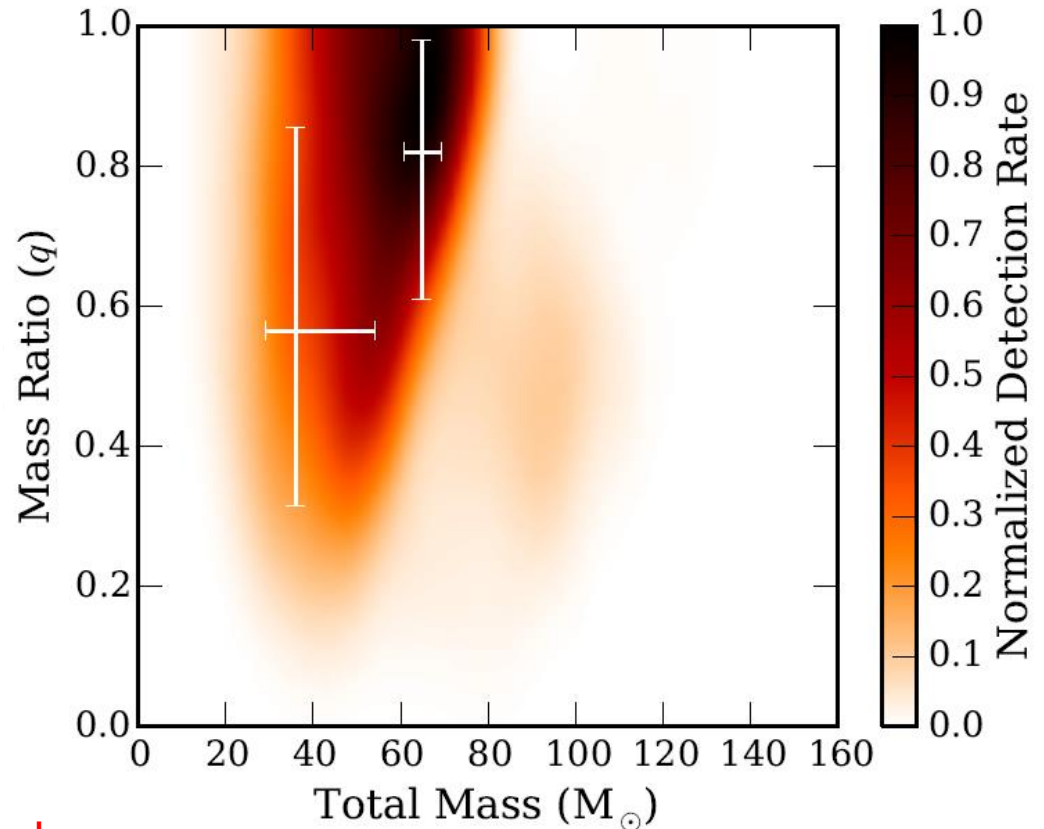
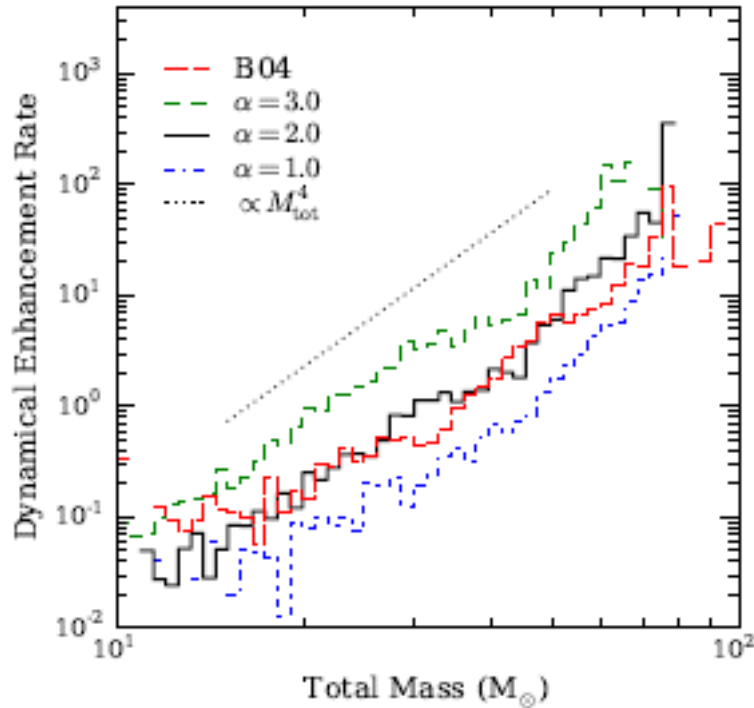
6144 stars, credit Simon Zwart & Frank Summers

Mag összeomlás



A „jóslat”

(Oleary, Meiron, Kocsis, 2016. február 9.)

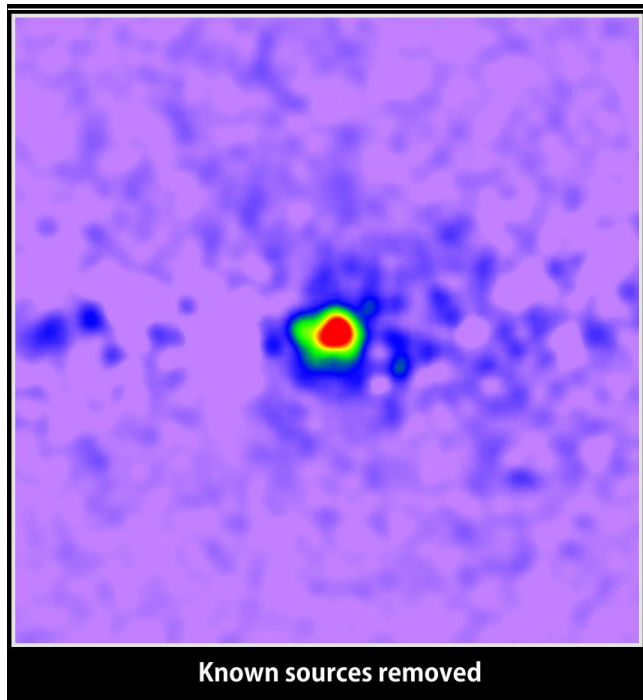


Nehéz objektumok **gyakrabban ütköznek**

Össztömeg-tömegarány síkon megjósolhatjuk a várt ütközés-gyakoriságot gömbhalmazokban

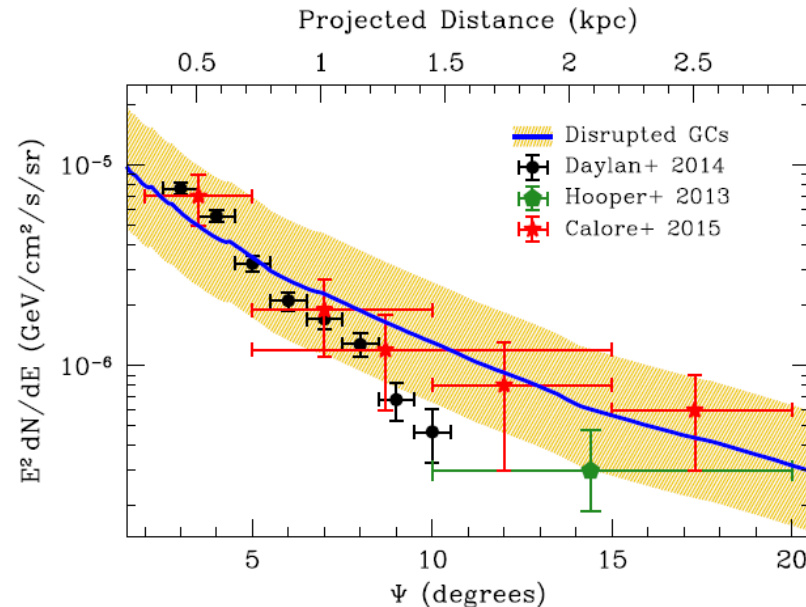
Hogyan keletkeznek a galaxismagok?

gömbhalmazok lassan beesnek



Fermi: gamma sugárzás a galaxis közepéről

- Milliszekundumos pulzár **spektrum hasonló**
- Milliszekundumos pulzár **nem keletkeznek a magban**
- Beeső gömbhalmazok jutatták oda a pulzárokat
(Semmi szükség sötét anyag annihilációra!)



Következtetés:

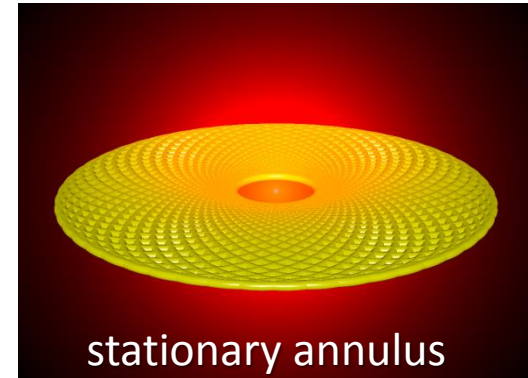
fekete lyukaktól hemzsegnek
a galaxismagok

Brandt & Kocsis (2015)

Fekete lyuk korongok

Legfőbb dinamikai folyamatok a galaxismagban:

- szupermasszív fekete lyuk körül keringés
- gömbszimmetrikus csillaghalmaz miatt precesszió



a keringési pályasíkok gyorsan relaxálódnak

Érdekesség:

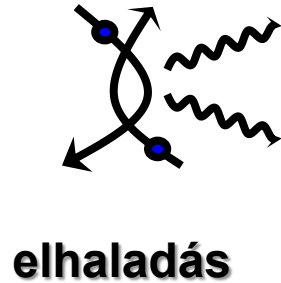
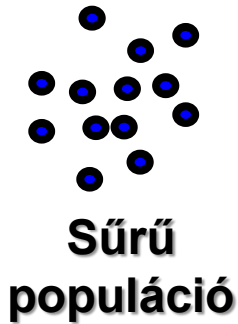
**Hosszú időskálán a korongok között ható grav. kölcsönhatás
Hamiltonfüggvénye azonos a folyadékkristályokéval**

(Kocsis+Tremaine 2015, 2016, Roupas+Kocsis 2016)

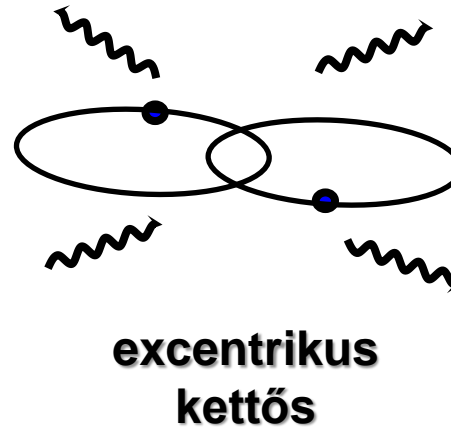
Maximális entrópia:

- rendezett nematikus fázis (szembeforgó korong)
- fekete lyuk korongok

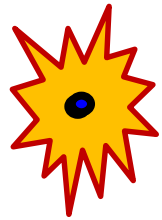
Ismétlődő gravitációshullám felvillanások



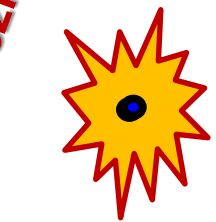
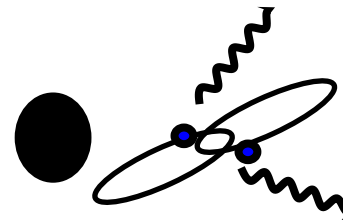
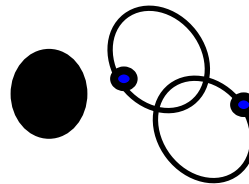
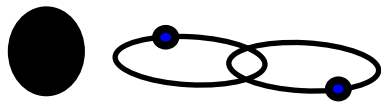
grav. hull. emisszió



grav. hull. emisszió

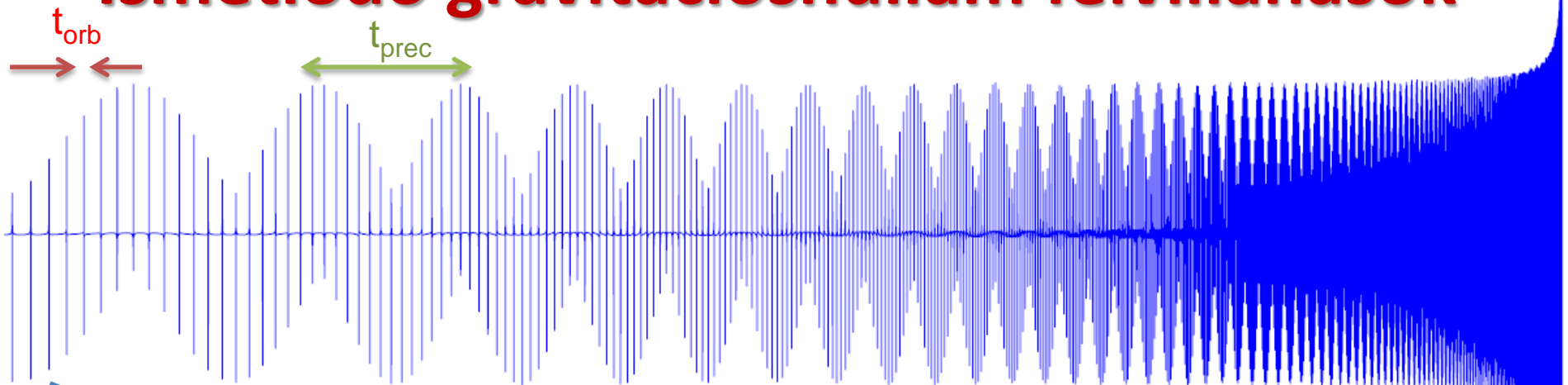


Kocsis, Gaspar, Marka 2006; O'Leary, Kocsis, Loeb 2009; Kocsis & Levin 2012



Wen 2003; Antonini & Perets (2012); Naoz, Kocsis, Loeb, Yunes (2012), Kovacs, Kocsis, Naoz 2016

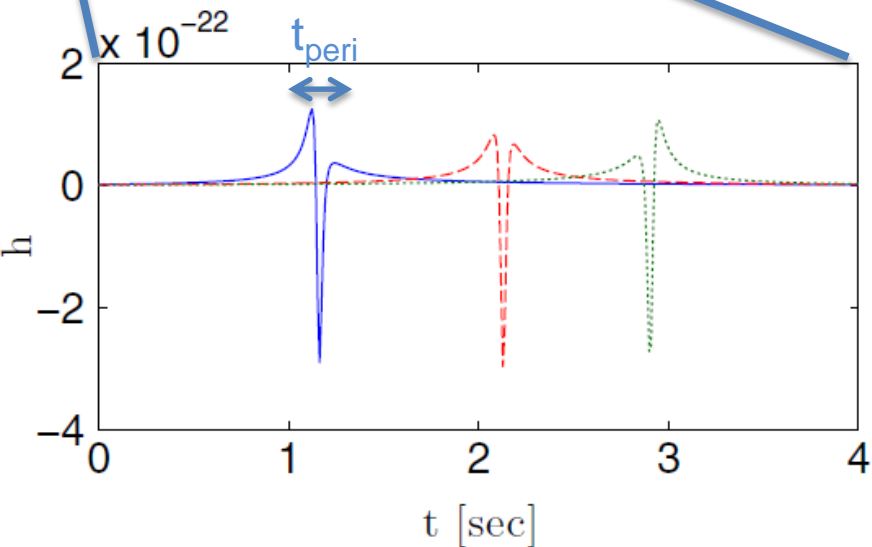
Ismétlődő gravitációshullám felvillanások



Paraméter mérés:

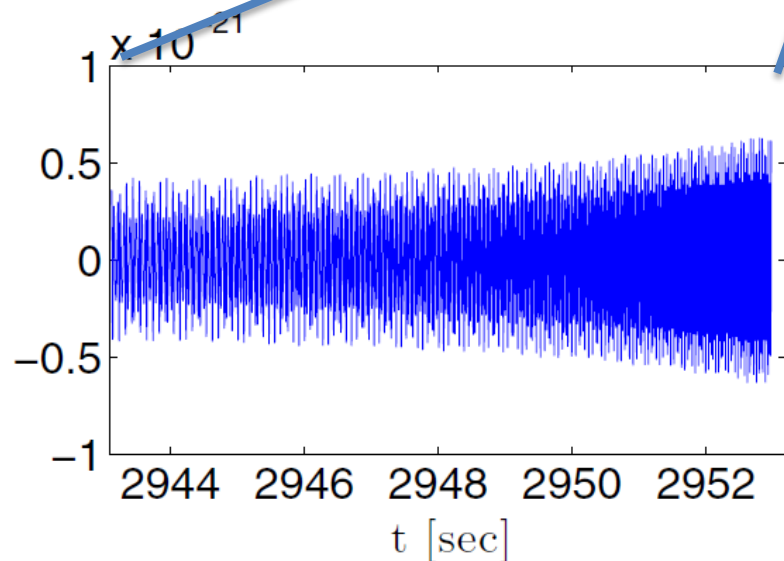
Gondán László, KB, Raffai Péter, Frei Zsolt

Ismétlődő felvillanás



Első 3 elhaladás (34 másodperccel eltolva)

Végső Chirp

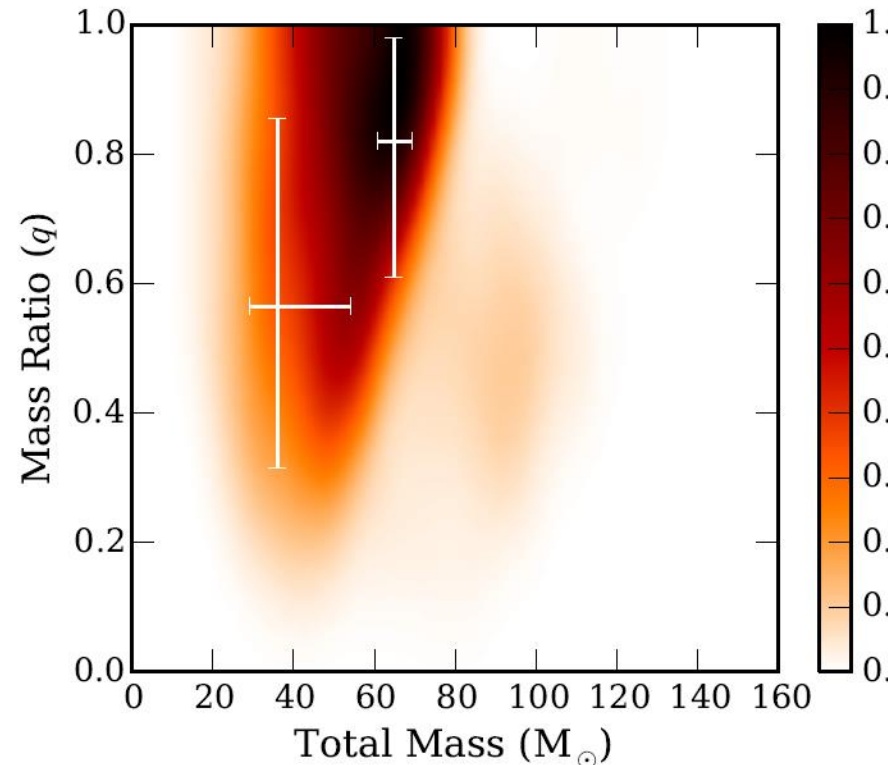


Utolsó 10 másodperc az ütk. előtt

LIGO-VIRGO-KAGRA

gravitációshullám asztrofizika jövője

- eseményeloszlásból azonosítjuk a forrástípusokat
- legősibb csillagok születése
- Neutroncsillag belseje: legsűrűbb anyag
- sötét anyag közvetlen mérhető?
- galaxismagok megértése
- Sok más



LISA és pulzár-időmérés

- szupermasszív fekete lyukak
- Galaxisfejlődés, kozmológia
- Akkréciós korongok

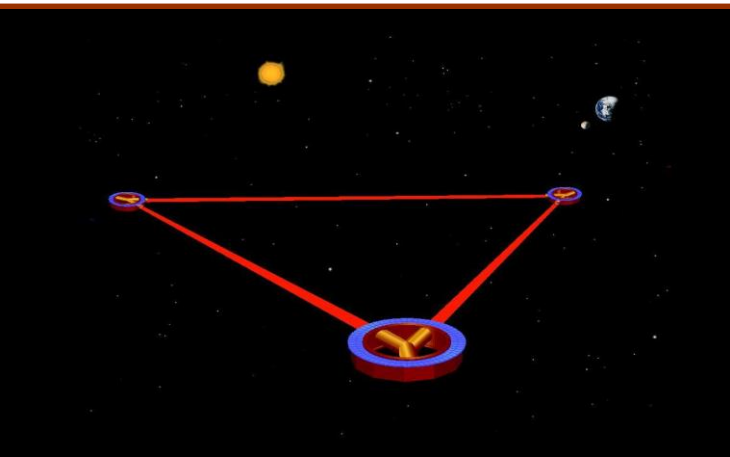
Stb:

- „bolygóvándorlás”
- galaktikus fehér törpe kettősök

Pulzár időmérő rendszerek



PTA

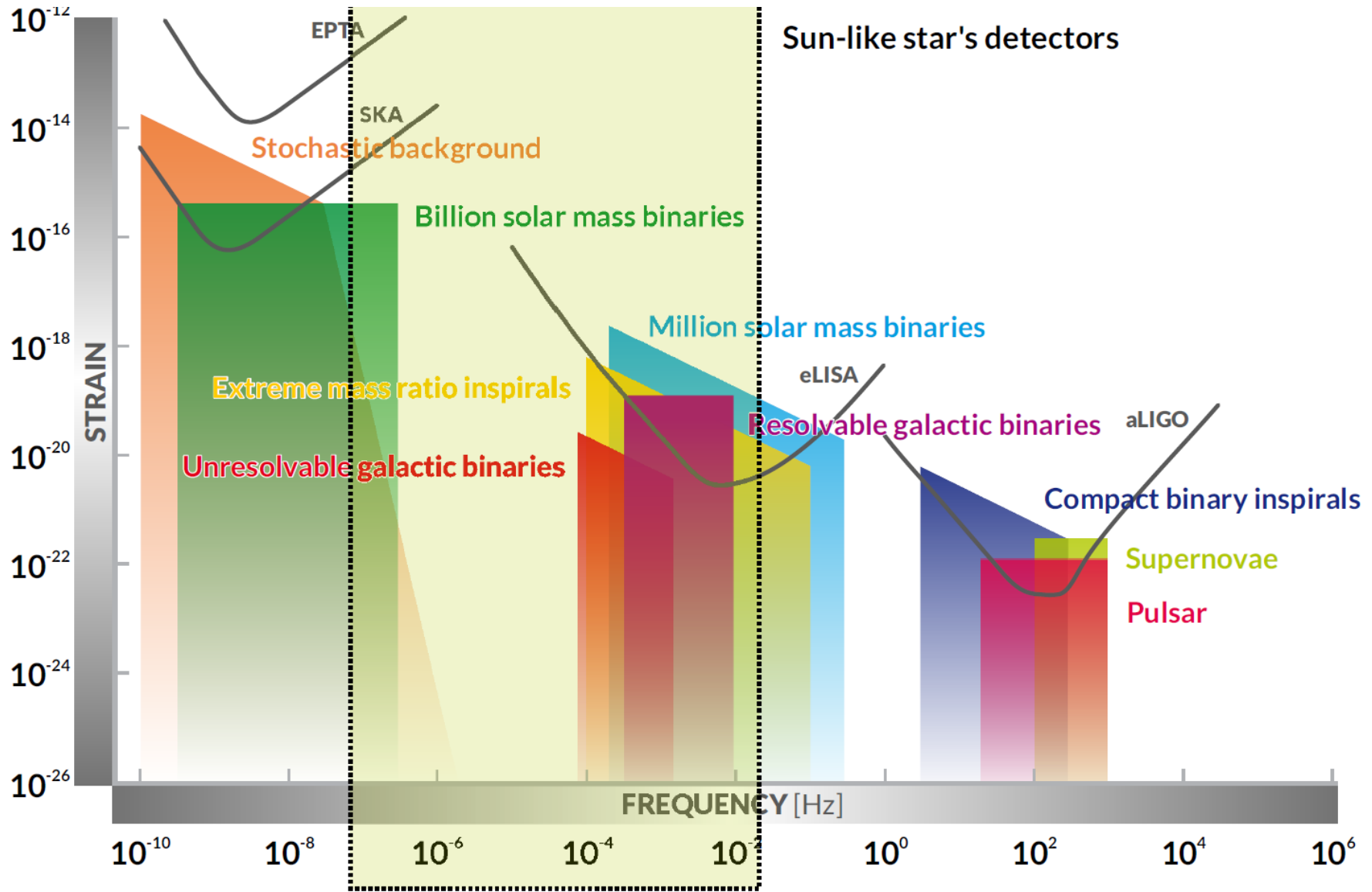


Intenzitás

idő

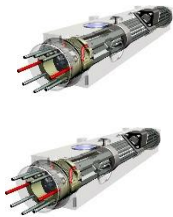
Pulzár

Föld

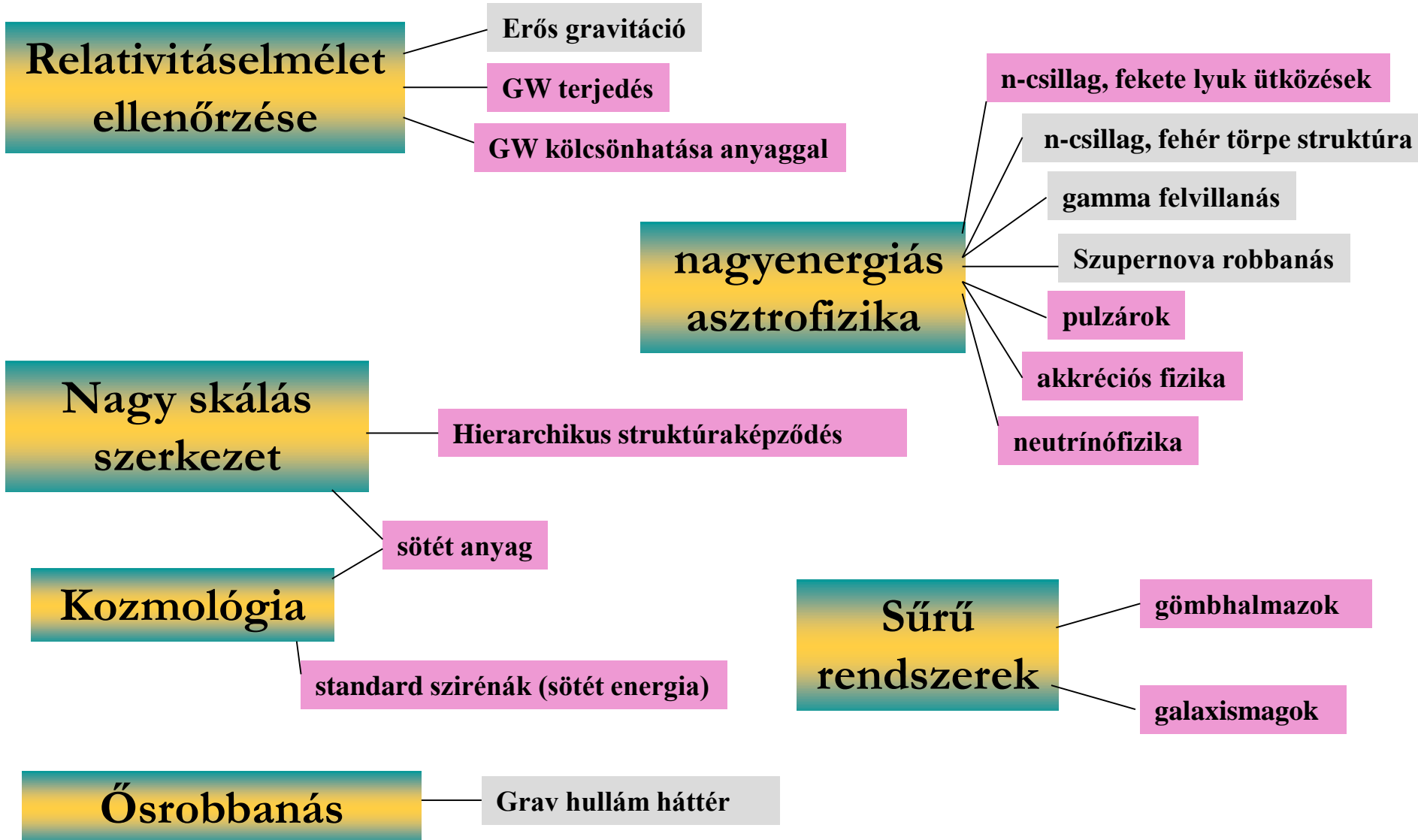


További lehetőségek

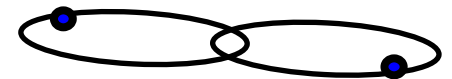
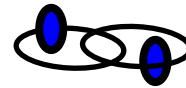
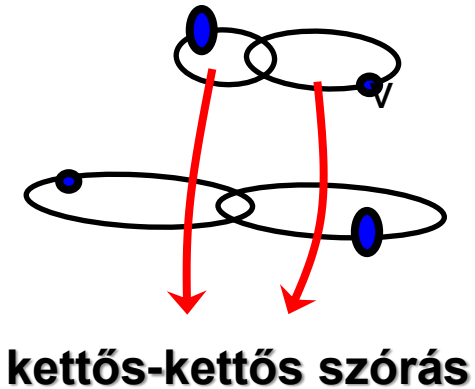
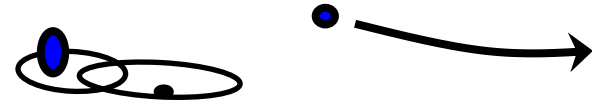
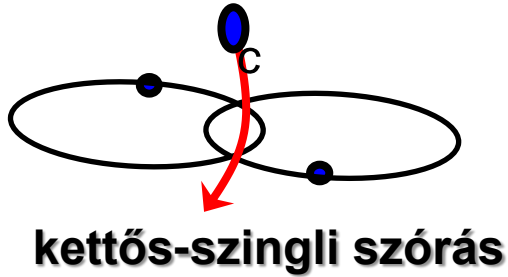
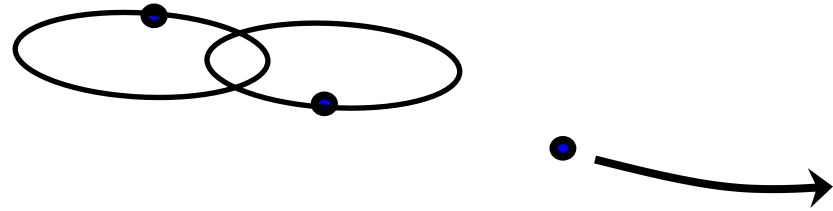
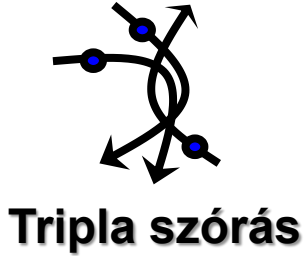
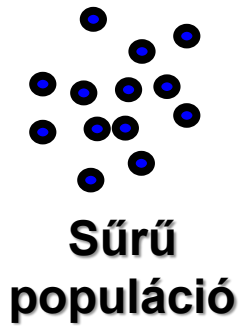
- Elektromágneses kvazár-kettősök optikai távcsövekkel
(Kocsis, Frei, Haiman, Menou 2006, Kocsis, Haiman, Menou 2008, Haiman, Kocsis, Menou 2009; Graham+ 2016)
- Gázkorong detektálása gravitációs hullámokkal
(Kocsis, Yunes, Loeb, Haiman 2011; Yunes, Kocsis, Loeb 2011)
- Hármassziszterek detektálása (Kocsis 2013; Meiron, Kocsis, Loeb 2016)
- Gravitációshullámok kölcsönhatása anyaggal
 - Kismértékű disszipáció → infravörös jel (Kocsis+Loeb 2009)
 - Csillagrezonáns gerjesztése → gravitációshullám „napfogyatkozás”
(Li, Kocsis, Loeb 2013, McKernan, Ford, Kocsis, Haiman, 2014)
- Atomórák a Föld körül (Loeb 2015)



Gravitációshullám asztrofizika

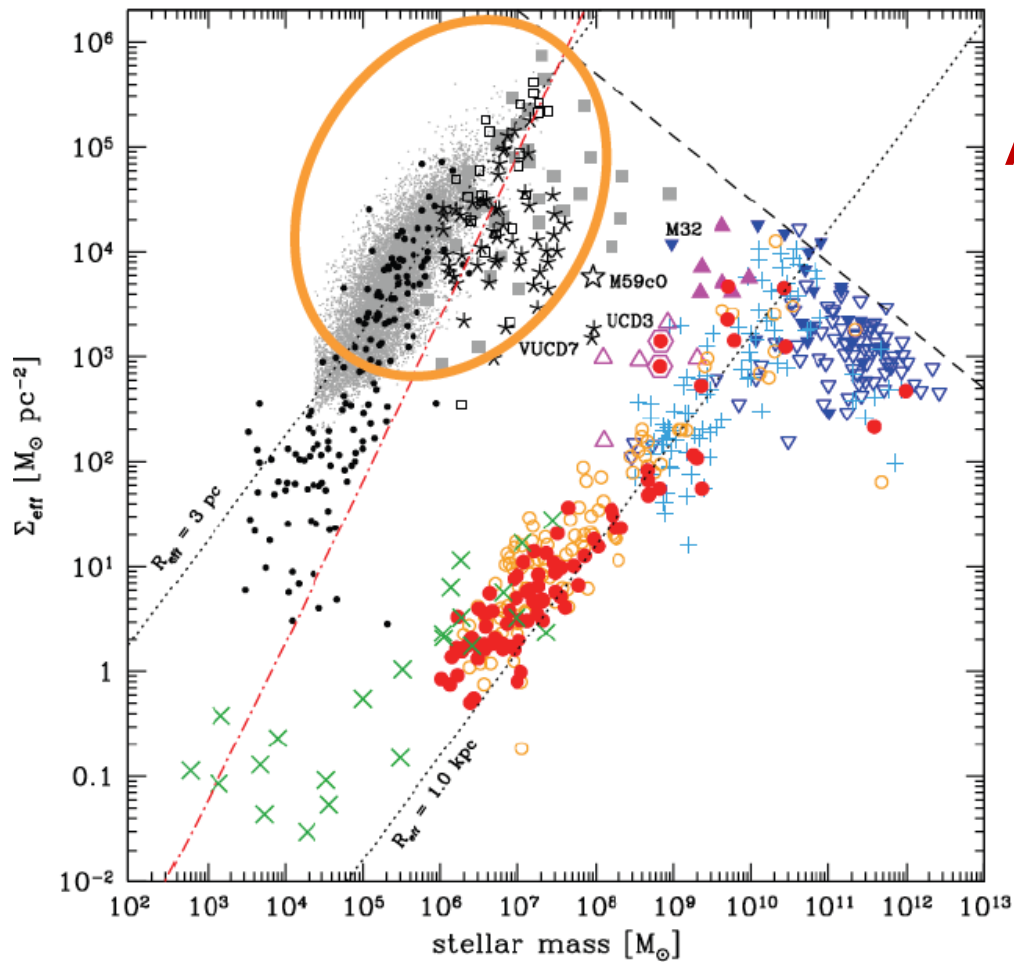


Gömbhalmaz dinamika 1.



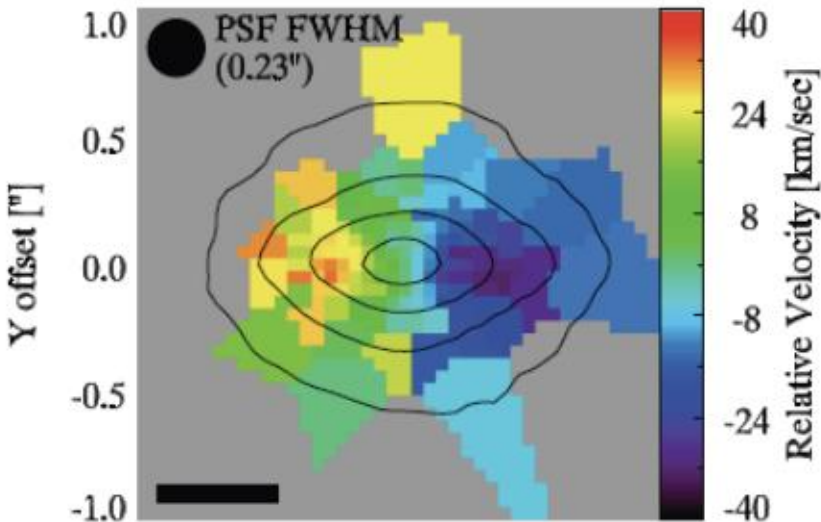
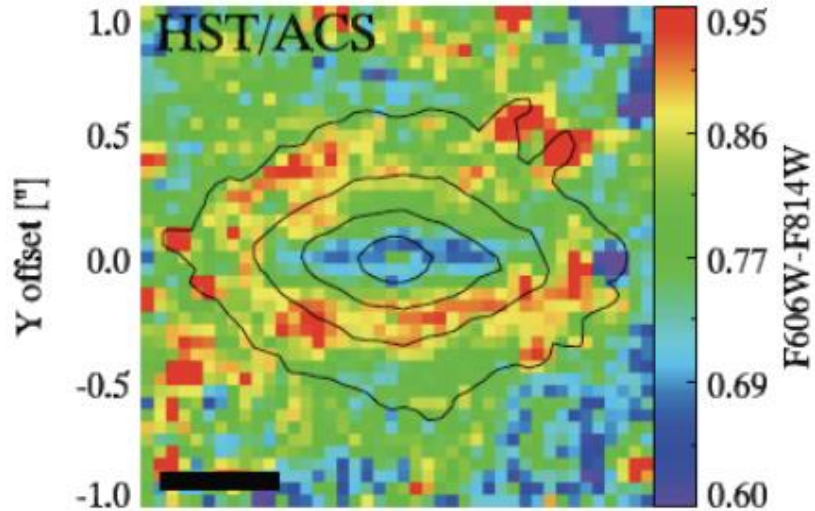
- **Nehéz objektum kiüti a könnyűt**
- **Szoros kettős még szorosabb lesz**
- **Tág kettős még tágabb lesz (vagy akár felbomolhat)**

Nukleáris csillagklaszterek



A legsűrűbb csillagpopuláció

Nukleáris csillagklaszterek



A legsűrűbb csillagpopuláció

Többféle csillagkomponens

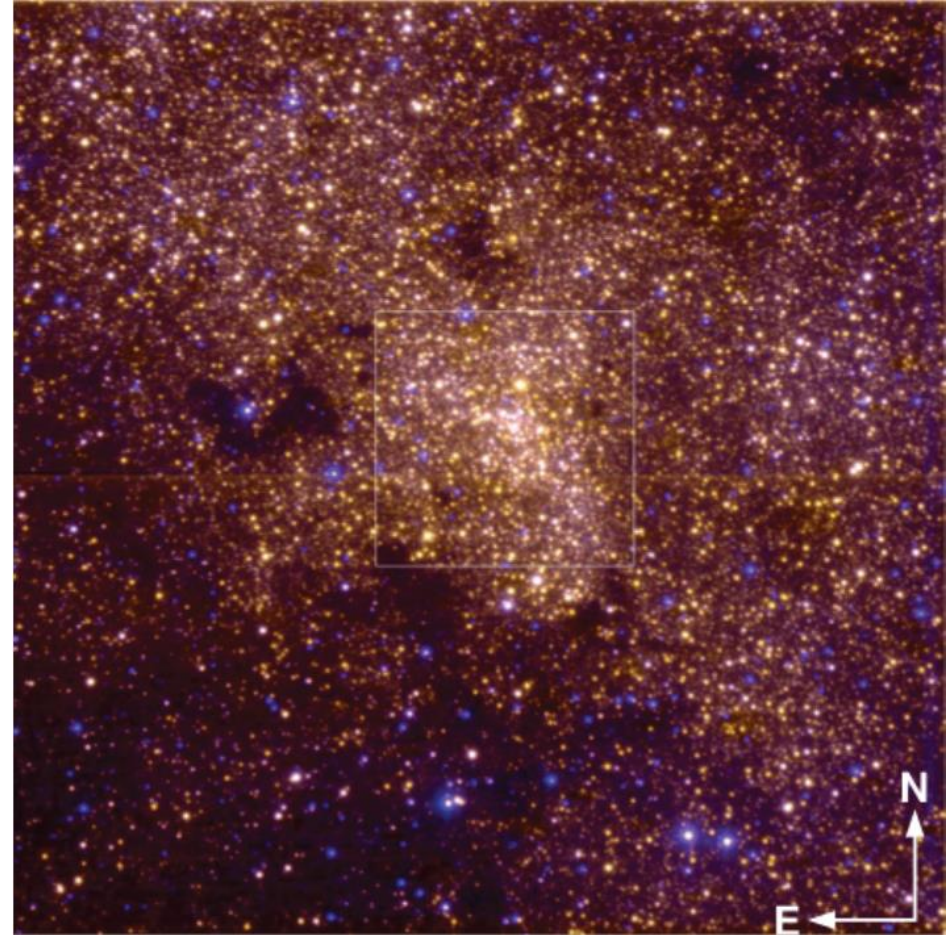
Walcher+ '06, Rossa+ '06, Seth+ 06, 08, 10

- Öreg, vörös gömbszerű
- fiatal, kék diszk
- Mindkettő forog
- Több éléről megfigyelt galaxis:
szembeforog a galaxissal

Galaxismag

A legsűrűbb csillag populáció

- $10^{6-9} M_{\text{Nap}}$ szupermasszív fekete lyuk
- 10^{6-9} csillagok
- 10^{4-7} naptömegű fekete lyuk
- Relaxáció a dinamikai egyensúlyig



Schoedel et al. 150"x150"