

# **Feketelyuk-kettősök gravitációs sugárzása**

**szegedi hozzájárulás a LIGO Tudományos Kollaborációhoz**

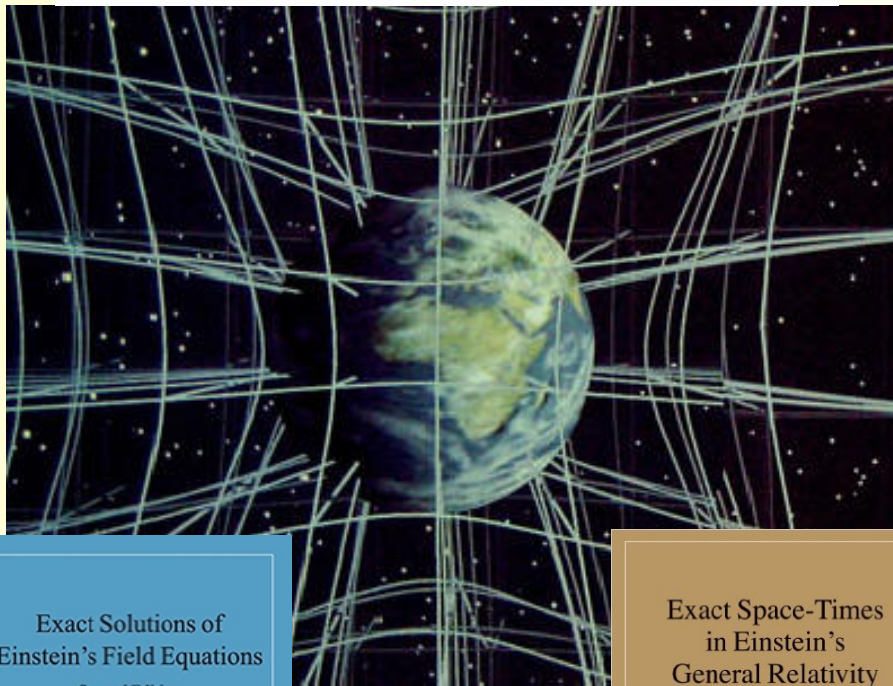
**GERGELY Árpád László**

*Fizikai Intézet, Szegedi Tudományegyetem*

# Az általános relativitáselmélet, mint gravitációelmélet

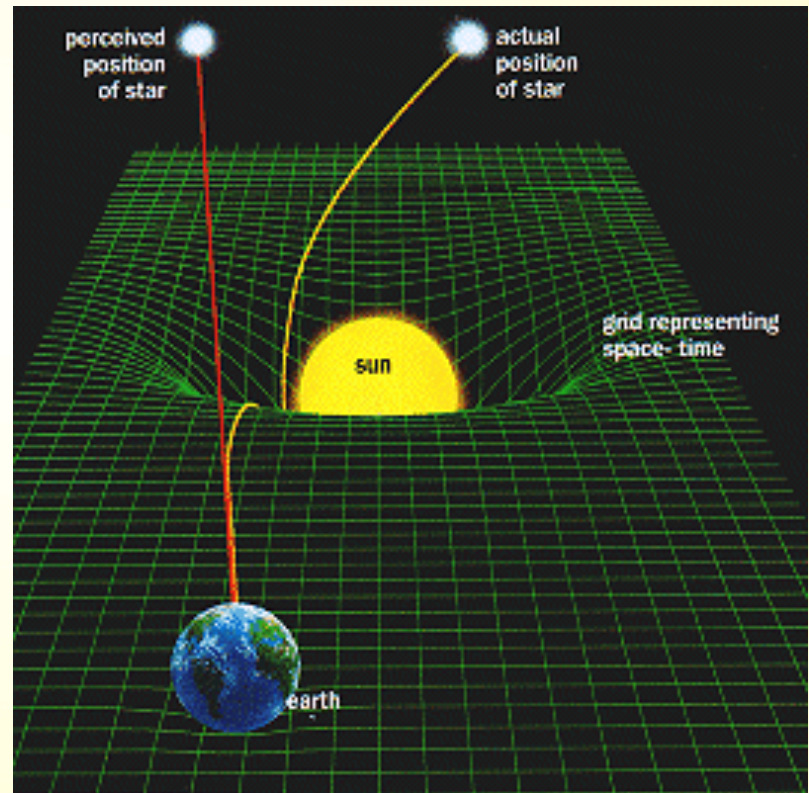
1. az anyag megmondja a téridőnek, hogyan görbüljön (Einstein egyenlet)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



2. A téridő megmondja az anyagnak, hogyan mozogjon (geodetikus egyenlet)

$$\frac{d^2 x^\mu}{ds^2} = -\Gamma^\mu_{\alpha\beta} \frac{dx^\alpha}{ds} \frac{dx^\beta}{ds}$$



Exact Solutions of  
Einstein's Field Equations

Second Edition

HANS STEPHANI  
DIETRICH KRAMER  
MALCOLM MACCALLUM  
CORNELIUS HOENSELAERS  
EDUARD HERTL

CAMBRIDGE MONOGRAPHS  
ON MATHEMATICAL PHYSICS

Exact Space-Times  
in Einstein's  
General Relativity

JERRY B. GRIFFITHS  
JIŘÍ PODOLSKÝ

CAMBRIDGE MONOGRAPHS  
ON MATHEMATICAL PHYSICS

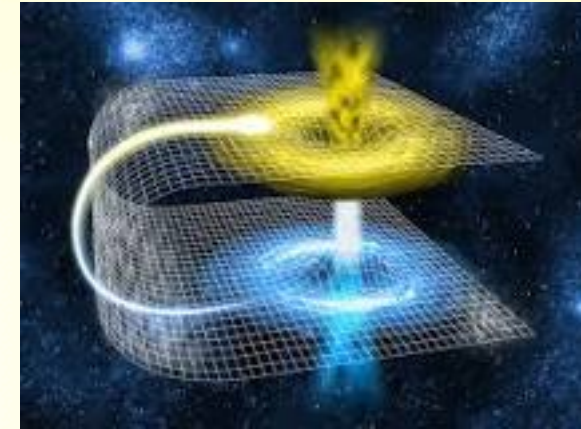
# Új effektusok, új fogalmak

## Új effektusok a Naprendszerben:

- Merkúr perihélium-precessziója
- gravitációs fényelhajlás (Napfogyatkozás)
- gravitációs vöröseltolódás / idődilatáció (GPS)
- Shapiro-késés / radarvisszhang

## Új fogalmak:

- fekete lyuk

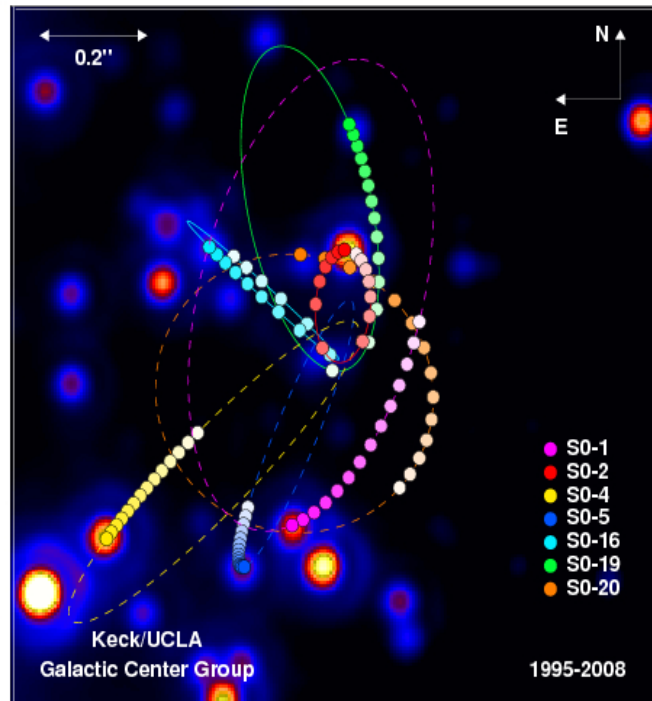
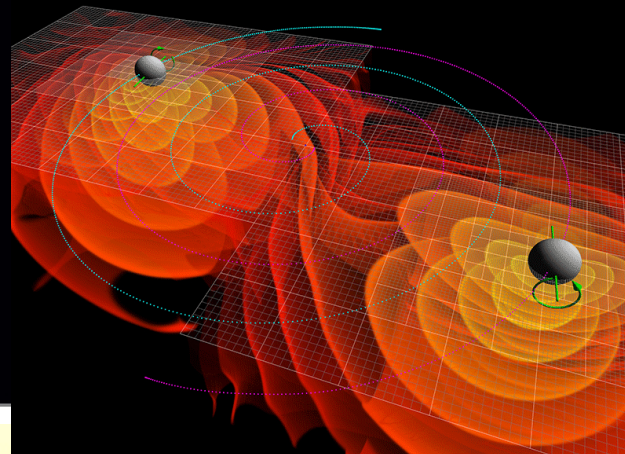


- féreglyuk

- gravitációs sugárzás



- gravitációs lencsésítés, mikrolencsésítés



# Feketelyuk-kettősök posztnewtoni közelítésben

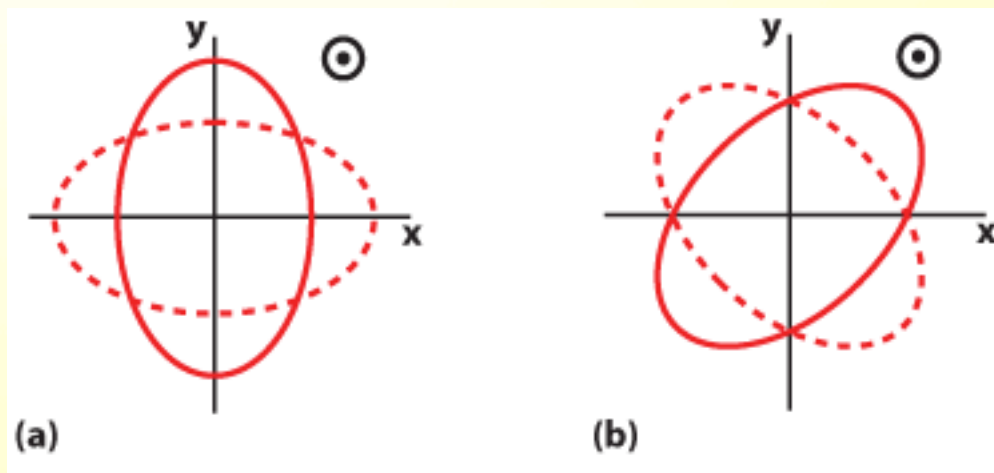
Érvényesség:

- a horizonttól távol
- fénysebességnél jóval kisebb sebességeknél

Perturbált Kepler dinamika:

- általános relativitáselméleti korrekciók 1PN, 2PN, ...  
(befolyásolják a pálya alakját)
- spinkorrekciók 1.5 PN, 2PN, ...  
(mozgatják a pályasíkot is)
- gravitációs sugárzás 2.5 PN, ...  
(energiát, impulzust és impulzusmomentumot visz el a rendszerből)

A gravitációs sugárzás kétféle polarizációban fordul elő:  
(ezek lineáris kombinációja)



# Feketelyuk-kettősök PN dinamikája és gravitációs sugárzása 1997-2006

Gergely, Perjés, Vasúth (RMKI)

- a gravitációs sugárzási visszahatás pályaaátlagának spín-pálya része

Phys. Rev. D **57**, 876 (1998); Phys. Rev. D **57**, 3423 (1998); Phys. Rev. D **58**, 124001 (1998)

- általános pályaaátlagolási módszer Astrophys. J. Suppl. Series **126**, 79 (2000)

Gergely (Strasbourg)

- a gravitációs sugárzási visszahatás pályaaátlagának spín-spín része

- az önspín kölcsönhatási járuléka első számolása

Phys. Rev. D **61**, 024035 (2000); Phys. Rev. D **62**, 024007 (2000)

Gergely, Mikóczi (SZTE), Vasúth (RMKI)

- a gravitációs hullám fázisában az önspín kölcsönhatási járuléka első számolása

Phys. Rev. D **71**, 124043 (2005)

Gergely, Keresztes, Mikóczi (SZTE)

- a gravitációs sugárzási visszahatás pályaaátlagának kvadrupól-monopól része

Phys. Rev. D **67**, 024020 (2003)

- a 2PN pontos Kepler-egyenlet levezetése

Phys. Rev. D **72**, 104022 (2005)

- még általánosabb pályaaátlagolási módszer

Astrophys. J. Suppl. Series **167**, 286 (2006)

# Feketelyuk-kettősök PN dinamikája és gravitációs sugárzása 2009-2012

Gergely, Mikóczi (SZTE), Biermann, Caramete (Bonn)

- LISA források fázisa 2PN rendig

Phys. Rev. D **79**, 064023 (2009); Class. Quantum Grav. **26**, 204006 (2009)

Gergely (SZTE), Biermann, Caramete (Bonn)

- a szupernagy tömegű fekete lyukak  
tömegarány-eloszlásának levezetése  
- a spin-átfordulás jelenségének magyarázata

Astrophys. J. **697**, 1621 (2009);

Class. Quantum Grav. **27**, 194009 (2010)

Gergely (SZTE), Biermann (Bonn),  
Kovács (Hong Kong)

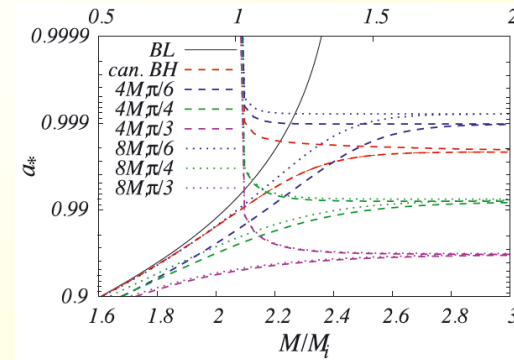
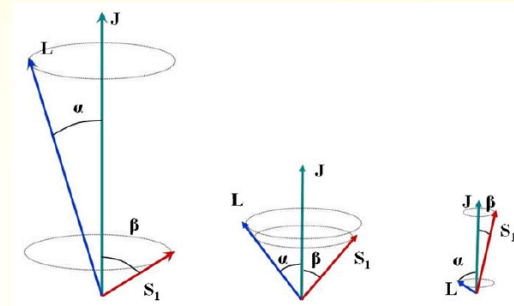
- akkréció és energiakonverzió hatékonyságának vizsgálata fekete lyuk + korong + magnetoszféra + jet rendszerben

Mon. Not. Royal Astron. Soc. **416**, 991 (2011)

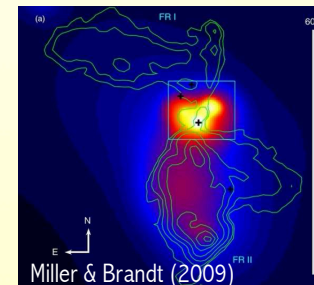
Gergely (SZTE), Biermann (Bonn), Gopal-Khrisna (Pune),  
Wiita (New Jersey)

- az x-alakú rádiógalaxisok keletkezésének magyarázata

Res. Astron. Astrophys. **12**, 127 (2012)



$\theta_{\max}$	$n$	$a_*(l)$	$\epsilon(l)$
$\pi/6$	1	0.8961	0.309
	2	0.8901	0.301
	3	0.8803	0.285
$\pi/4$	1	0.8976	0.312
	2	0.8933	0.306
	3	0.8872	0.298
$\pi/3$	1	0.8969	0.310
	2	0.8948	0.308
	3	0.8924	0.305
$\pi/6$	1	0.8968	0.311
	2	0.8901	0.302
	3	0.8822	0.291
$\pi/4$	1	0.8983	0.313
	2	0.8939	0.308
	3	0.8879	0.300
$\pi/3$	1	0.8975	0.312
	2	0.8955	0.311
	3	0.8931	0.307



# Feketelyuk-kettősök PN dinamikája és gravitációs sugárzása 2012-től

Gergely, Keresztes, Tápai (SZTE)

- spin-dominált gravitációs hullámformák bevezetése

Phys. Rev. D **86**, 104045 (2012)

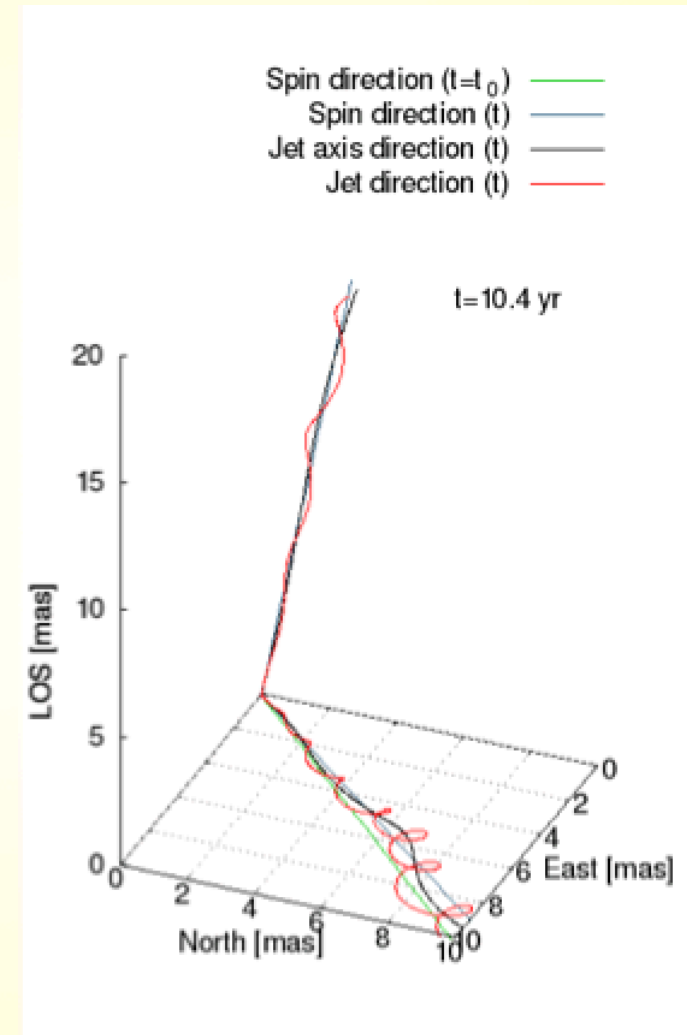
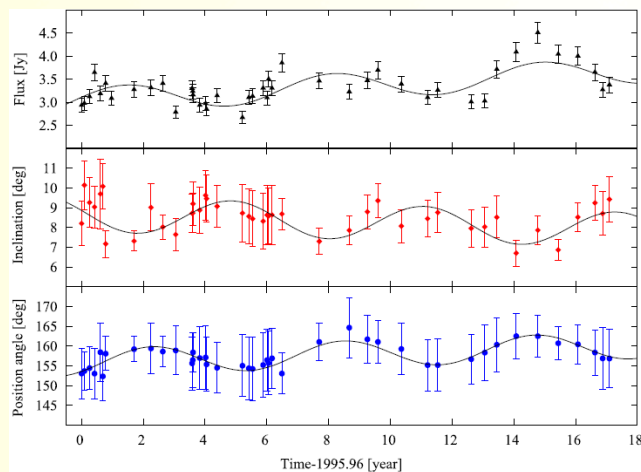
Gergely, Kun (SZTE), Gabányi, Frey (Penc),

Cseh (Nijmegen), Karouzos (Seoul), Britzen (Bonn)

- feketelyuk-kettősök kimutatása jetek-ből

Mon. Not. Royal Astron. Soc. **443**, 1509 (2014);

Mon. Not. Royal Astron. Soc. **454**, 1290 (2015)



Gergely, Keresztes (SZTE)

- feketelyuk-kettősök 2PN dinamikájának vizsgálata oszkuláló pályaelemekkel

Phys. Rev. D **81**, 084025 (2010); Phys. Rev. D **82**, 104031 (2010); Phys. Rev. D **91**, 024012 (2015)

A Szegedi Tudományegyetem  
Gravitációkutatási csoportja tagja a  
LIGO Tudományos Kollaborációnak,  
ezen belül a Compact Binary Coalescence (CBC)  
munkacsoportnak



LIGO tag  
2009 óta

LIGO tag  
2009-11 között

## Research Group in Gravitation, University of Szeged, Hungary

### László Árpád GERGELY

*Professor, Head of the Group*

*Cosmology & dark energy; black holes;  
gravitational waves; gravitational lensing;  
accretion; jets; X-shaped radio galaxies;  
general relativity; modified gravity;  
quantization*

*Present group members :*

LIGO tag  
2012 óta

### Zoltán KERESZTES

*Assistant Professor*

*Cosmology & dark energy models;  
gravitational waves & lensing;  
brane-worlds & modified gravity  
[inSPIRE publication data](#)*

### Emma KUN

*Predocctoral Fellow*

*Spinning supermassive black  
hole binary signatures in jets;  
galactic rotation curves & dark matter  
[inSPIRE publication data](#)*

### Márton TÁPAI

*Predocctoral Fellow*

*Gravitational waveforms;  
LIGO Scientific Collaboration  
[inSPIRE publication data](#)*

### Márek DWORNIK

*Predocctoral Fellow*

*Dark matter alternatives;  
galaxy structure;  
[inSPIRE publication data](#)*

*Present undergraduate students :*

*M2: Zsolt GYÖNGYÖSI,*

*M1: Viktória PINTÉR, Tamás TARJÁNYI,*

*B3: Bence RACSKÓ, Bence DEÁK, Iván JUHÁSZ, Attila SIMKÓ,*

*B2: Krisztina KÖVÉR, Cecília NAGY*



# Korai LIGO eredményeink: pontosabb gravitációs hullám fázis

Gergely Árpád László, Veréb László, Keresztes Zoltán (SZTE)

2011-ben elsőként implementáltuk a gravitációs hullámok fázisába

- a kvadrupól-monopól és
- az önszín járulékokat

**Table 1.** Comparison of SpinQuadTaylor with SpinTaylor.

Spin contribution	SpinQuadTaylor					SpinTaylorFrameless				
	Evolution of				Contrib. to MECO	Evolution of				Contrib. to MECO
	$S_i$	$L_N$	$E_i$	$\omega$		$S_i$	$L_N$	$E_i$	$\Omega$	
Spin-orbit ( $S_i L_N$ )	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	
Spin-spin ( $S_1 S_2$ )	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	
Self-spin ( $S_i^2$ )	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Yellow	Yellow	
Quadrupole-monopole ( $Q_{1m_2}$ & $Q_{2m_1}$ )	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	

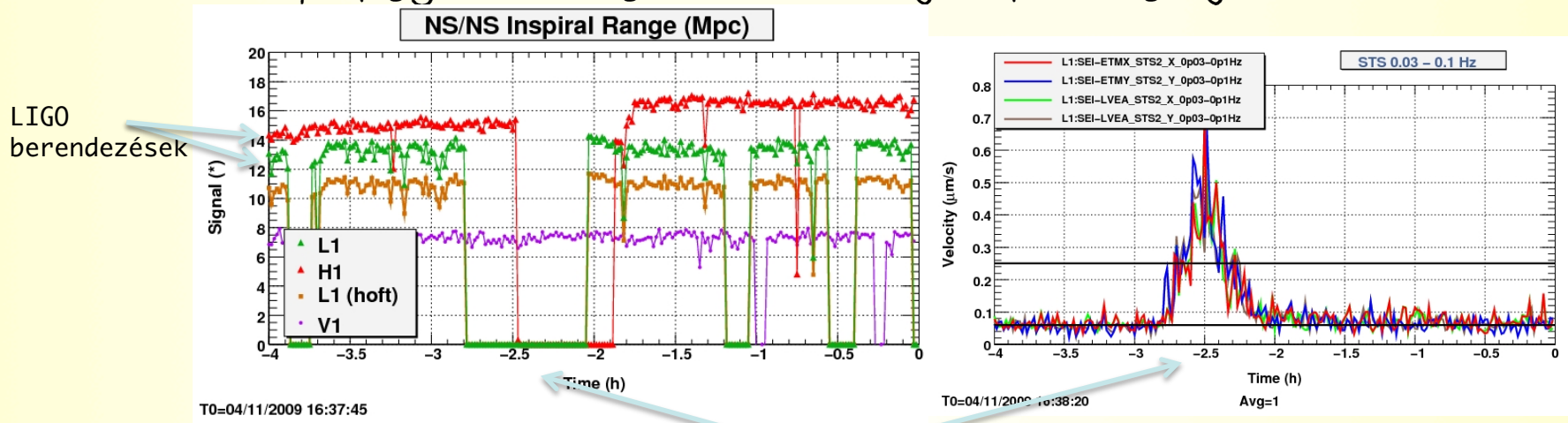
<b>Legend</b>	Green: implemented	Yellow: Not implemented	Red: There is no contribution
---------------	--------------------	-------------------------	-------------------------------

$S_i$  spins of bodies;  $L_N$  Newtonian orbital angular momentum;  $E_i$  frame basis vectors;  $\omega$  orbital frequency

A LIGO által jelenleg használt összes spines hullámforma átvette ezeket a járulékokat

# Korai LIGO tevékenység: közvetlen feladatvállalás a LIGO berendezéseknél

Gergely Árpád László (SZTE) és Raffai Péter (ELTE) 2009-ben 10 napig a LIGO Livingstone berendezés ún. Science Monitoring feladatát látta el. Ennek során az adatgyűjtési folyamatot ellenőriztük, a mérést zavaró jelenségeket azonosítottuk (pl. figyeltük az egész Földre kiterjedő földrengés-jelző rendszert)

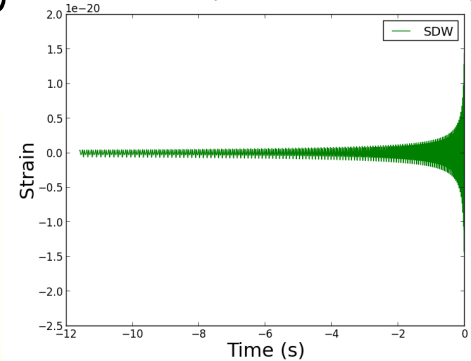


Richter skálán 4.9 erősségű földrengés Costa Rica-ban

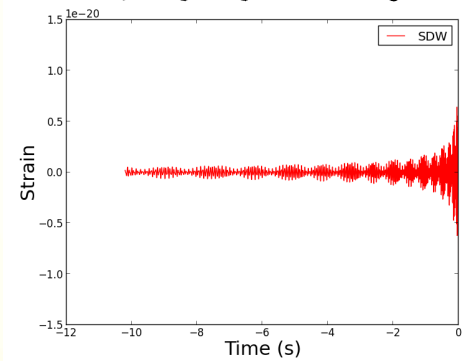
2015-től ún. Fellows Program indult el, melynek keretében minden csoportnak kötelessége 3 hónapos turnusokban kutatót küldeni a berendezésekhez. Ennek költsége jelenleg 410 USD / fő / év + napidíj a kinttartózkodáshoz.

További részvételünk nem lehetséges magyar pályázati források nélkül (a szegedi gravitációs csoportnak 9 nem támogatott OTKA pályázata volt)

A LIGO Tudományos Kollaborációban  
precesszáló, nem egyforma tömegű  
feketelyuk-kettősökből érkező  
gravitációs hullámokat modellezzünk



precessziómentes  
feketelyuk-kettősök



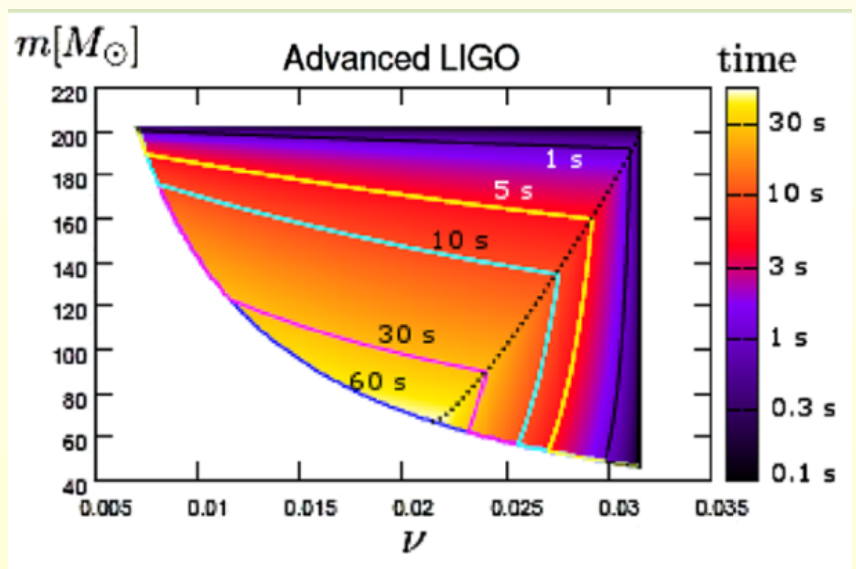
precesszáló  
feketelyuk-kettősök

Gergely Árpád László, Tápai Márton,  
Keresztes Zoltán (SZTE)

```

/**
 * Function calculating the Spin-Dominated waveforms
 * This waveform is an inspiral only, 1 spin, precessing waveform.
 * For the formulae see the appendix of Arxiv:1209.1722
 */
int XLALSimInspiralSpinDominatedWaveformDriver(
  REAL8TimeSeries **hplus,      /**< +-polarization waveform */
  REAL8TimeSeries **hcross,    /**< x-polarization waveform */
  REAL8 totalmass,             /**< total mass of the binary */
  REAL8 nu,                    /**< mass ratio */
  REAL8 chil,                  /**< dimensionless spin parameter */
  REAL8 D,                     /**< Distance to the source */
  REAL8 kappal,                /**< Angle span by S_1 and L */
  REAL8 betal,                 /**< Angle span by J and S_1 */
  REAL8 theta,                 /**< Angle span by the line of sight and J */
  REAL8 fStart,                /**< Starting gravitational wave frequency*/
  REAL8 fRef,                  /**< Ending gravitational wave frequency*/
  int phase0,                  /**< twice PN phase order */
  int amplitude0,              /**< twice PN amplitude order */
  REAL8 deltaT,                /**< Sampling time interval */
  REAL8 phiRef,                /**< Reference phase at the Reference Frequency */
  REAL8 phi0,                  /**< Starting value of the \phi_n parameter */
)
{
  int idx;
  int n;
  unsigned int i;
  REAL8 phiShift;
  LIGOTimeGPS tStart=LIGOTIMEGPSZERO;
  /* check inputs for sanity */
  if (*hplus) XLAL_ERROR(XLAL_EFAULT);
  if (*hcross) XLAL_ERROR(XLAL_EFAULT);
  if (deltaT <= 0) XLAL_ERROR(XLAL_EDOM);
  if (totalmass < 0) XLAL_ERROR(XLAL_EDOM);
  if (fStart <= 0) XLAL_ERROR(XLAL_EDOM);
  /* set up the integrator*/
  ark4GSLIntegrator *integrator= XLALAdaptiveRungeKutta4Init(LAL_SDW_NUM_VARIABLES,
  XLALSpinDominatedWaveformDerivatives, XLALSpinDominatedWaveformStoppingTest,
  LAL_SDW_ABSOLUTE_TOLERANCE, LAL_SDW_RELATIVE_TOLERANCE);
  if (!integrator) {
    XLALPrintError("XLAL Error - %s: Cannot allocate integrator\n", __func__);
    XLAL_ERROR(XLAL_EFUNC);
  }
}

```



Az Advanced LIGO által észlelhető gravitációs hullámok  
időtartama az össztömeg és tömegarány függvényében

A hullámforma generáló  
program részlete

# A spin-dominált hullámforma (SDW) előnye az alkalmasabb paraméterter

SDW hullámforma: 12 paramétert tartalmaz, ezek közül 3 időfüggő

ST4 hullámforma: 16 paramétert tartalmaz, ezek közül 10 időfüggő!!

## SDW

Időfüggetlen paraméterek (9):

$m$ : össztömeg

$D$ : forrás távolsága

$v$ : tömegarány ( $m_2/m_1$ )

$\theta$ :  $\mathbf{N}$  (forrás felé mutató vektor) és  $\mathbf{J}$  teljes impulzusmomentum által bezárt szög

$\chi_1$ : dimenziómentes spin paraméter

$\kappa_1$ :  $\mathbf{L}_N$  pályaimpulzus momentum és  $\mathbf{S}_1$  domináns spin által bezárt szög

$\beta_1$ : domináns spin polár szöge

$t_c$ : összeolvadás ideje

$\phi_c$ : összeolvadás pillanatában a fázis

Időfüggő változók (3):

$\phi_n$ :  $\mathbf{L}_N$  azimutális szöge

$\psi$ : fázis

$\varepsilon$ : PN paraméter

## ST4

Időfüggetlen paraméterek (6):

$m$ : össztömeg

$D$ : forrás távolsága

$v$ : tömegarány ( $m_2/m_1$ )

$\theta$ :  $\mathbf{N}$  (forrás felé mutató vektor) és  $\mathbf{J}$  teljes impulzusmomentum által bezárt szög

$t_c$ : összeolvadás ideje

$\phi_c$ : összeolvadás pillanatában a fázis

Időfüggő változók (10):

$\mathbf{L}_N$  pályaimpulzus momentum irányú egység vektor

$\mathbf{E}_1$   $\mathbf{L}_N$ -re merőleges egység vektor

(ez a két vektor két független változót ad)

$\mathbf{S}_1$  spinvektor (3 változó)

$\mathbf{S}_2$  spinvektor (3 változó)

$\psi$ : fázis

$\omega$ : pálya körfrekvencia

→ hatékonyabb hullámforma generálás

A paraméterek meghatározásának hibáját és a degenerációkat a Fisher-mátrix analízis adja meg. Ezt tervezzük kiterjeszteni az SDW-re is

## Spin-dominált hullámforma (SDW) fejlesztése

2012

SDW hullámforma kidolgozása és publikálása

2013

SDW dinamika számolása,  
LALSuite implementáció kezdete

2014

első működő SDW generáló kód a LALSuite programcsomagban, kódfejlesztés és optimalizálás

2015

más hullámformákkal való összehasonlítás kezdete  
továbbfejlesztett SDW kód a LALSuite-ban

2016

dinamikai egyenletek fejlesztése, kód fejlesztés,  
összehasonlítás más LALSuite-beli hullámformákkal  
(SpinTaylorT4, SpinTaylorT2, SEOBNRV3),

rövid- és  
középtávú  
tervek

belső „review” folyamat elindítása  
a paramétertér metrikájának megállapítása  
Fisher-mátrix analízis  
általánosítás excentrikus pályákra  
merger-ringdown szakaszokkal való kiegészítés

# Rövidtávú célkitűzés: bekapcsolódás a CBC csoport adatelemzési tevékenységébe

Előzmény:

Tápai Márton (SZTE) és Vasúth Mátyás (Wigner)

2015 október, munkalátogatás:

Observational Relativity and Cosmology  
Csoport, Albert Einstein Intézet, Hannover

elsajátították:

- a pycbc programcsomag elemző  
scriptjének futtatását  
<https://github.com/ligo-cbc/pycbc>
- az adatelemzés kiértékelését

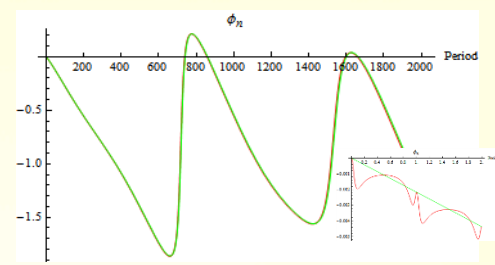
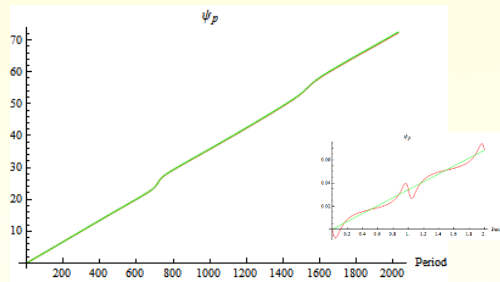
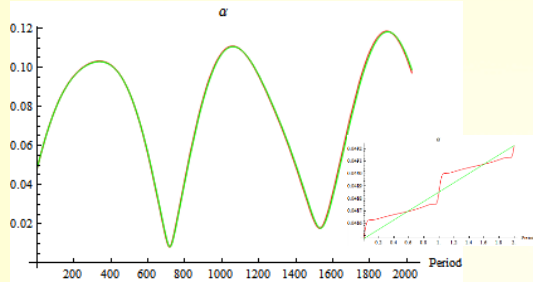
Terv: az Advanced LIGO  
(szeptemberben induló 2 x 3 hónapos) második mérési ciklusában (O2)  
legalább két 5 napos adatsor:

- elemzése
- kiértékelése

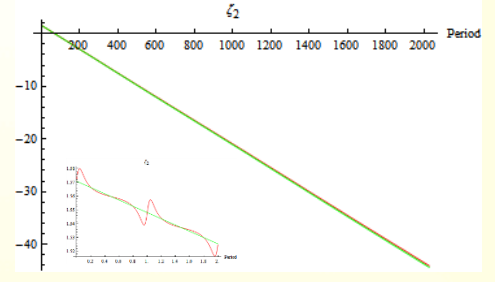
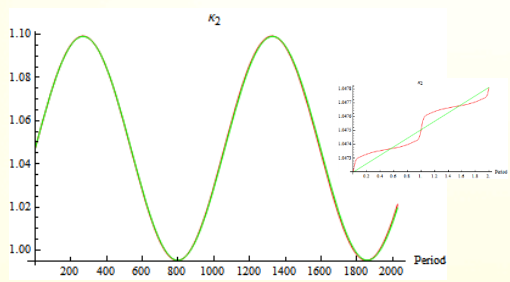
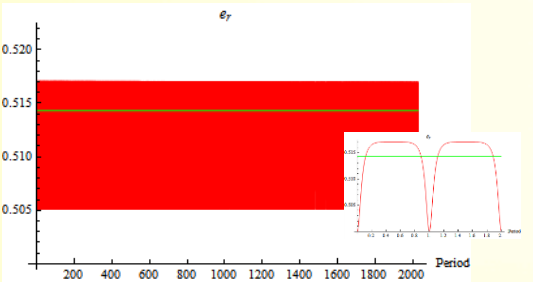
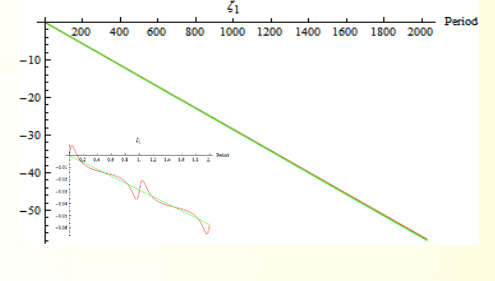
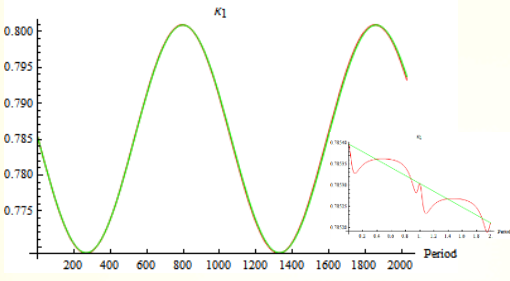
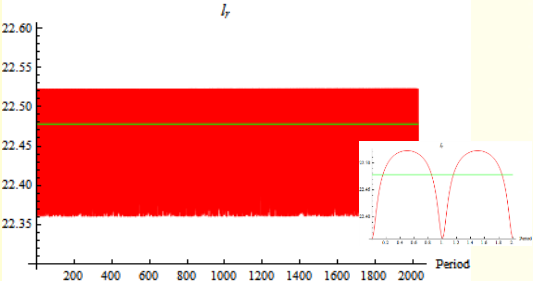
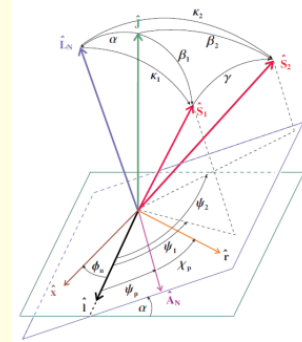


# Rövidtávú célkitűzés: 2PN átlagolt dinamika származtatása és érvényessége

Gergely, Keresztes, Tápai (SZTE)



— Átlagolt  
— Pillanatnyi



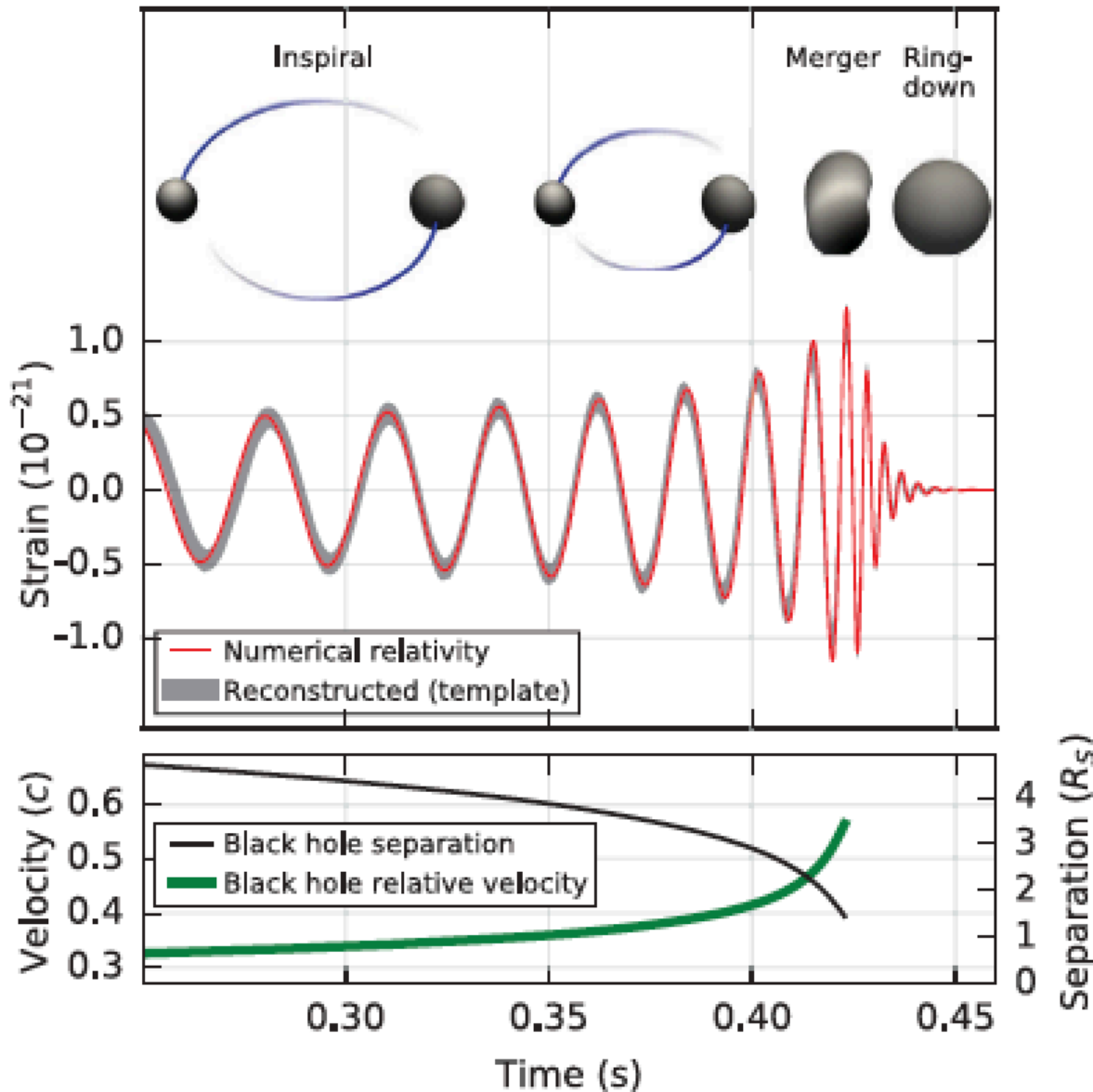
tömegarány: 1:2  
össztömeg: 40 naptömeg  
spin1 = 0.8  
spin2 = 0.4  
epsilon = 0.003  
kezdeti excentricitás = 0.5

3 időskála: pályaperiódus << precessziós periódus << gravitációs sugárzás (konzervatív) időskála  
230 pályaperiódus  
2000 pályaperiódus  
8 precessziós periódus

→ A 2PN átlagolt dinamika egyszerűbb és kiválóan használható a pillanatnyi dinamika helyett mind precessziós, mind konzervatív időskálán

# A gravitációs hullámok első közvetlen kimutatása: GW150914

Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016)



29 és 36 naptömegű fekete lyukak összeolvadása  $\rightarrow$  0,05 sec alatt 3 naptömegnyi energia szabadult fel gravitációs hullámok formájában

=

a Paksi Atomerőmű  $10^{31}$  évi energiatermelése !

a nagy távolság miatt az Advanced LIGO lézerezinterferométereiben a proton méretének ezredrésznyi változását okozta !

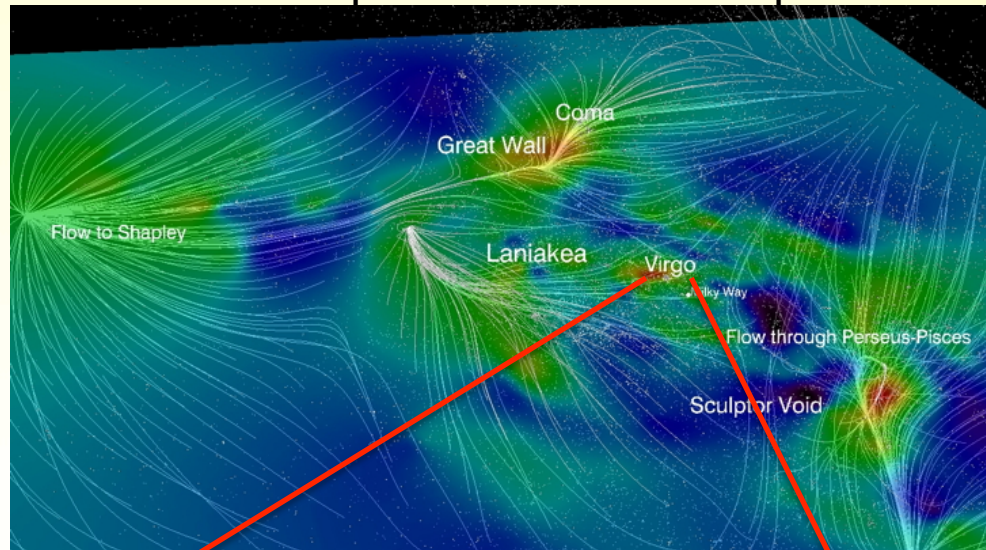


# Honnan is jött a GW150914 gravitációs hullám? (230-500 Mpc)

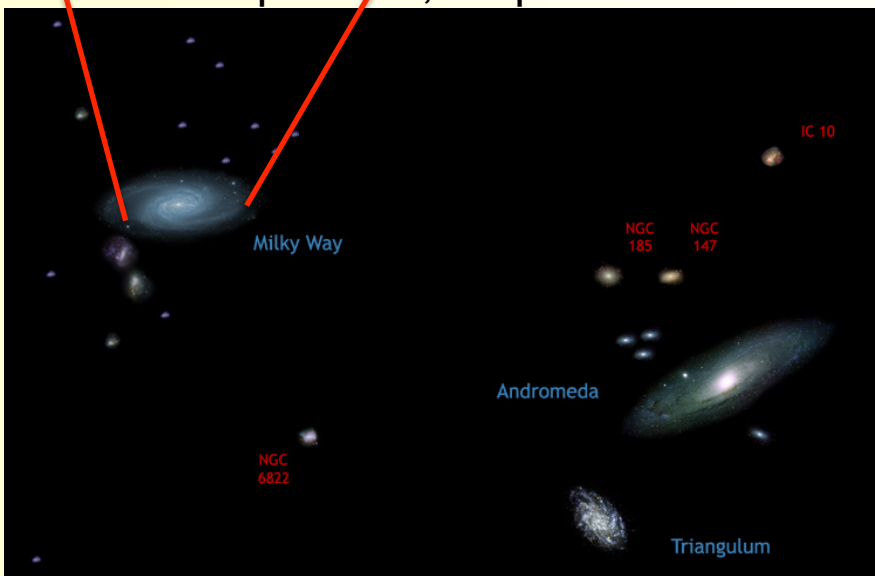
Tejútrendszer ~ 30 kpc



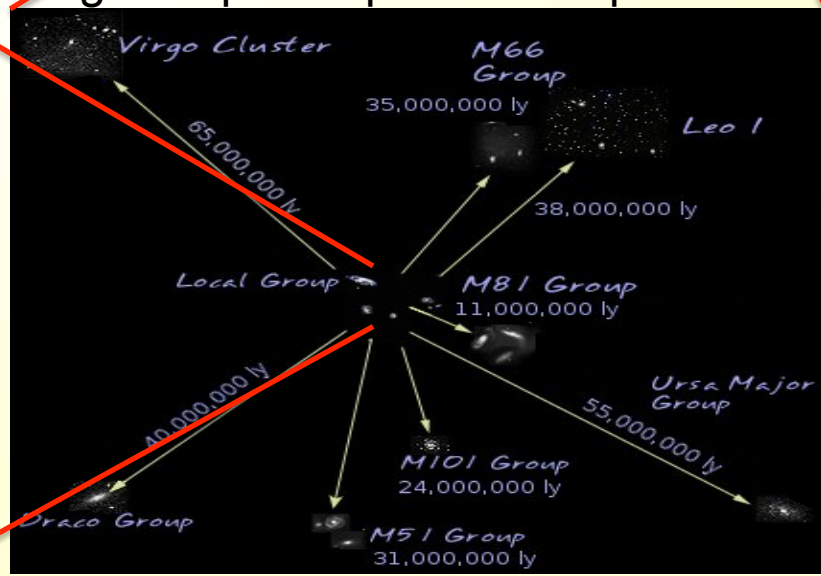
Laniakea szuperklaszter ~ 160 Mpc



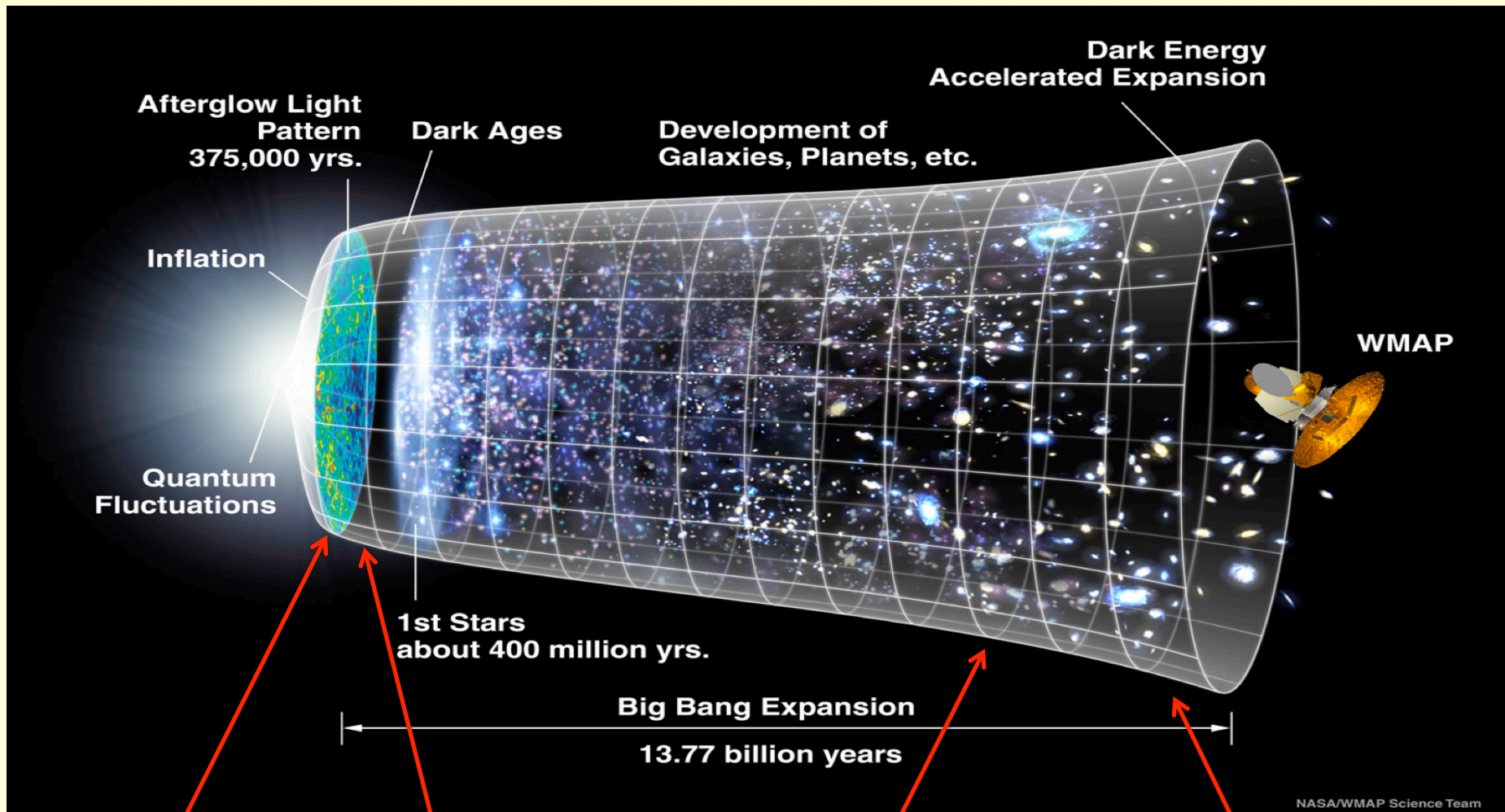
Lokális Csoport ~ 3,1 Mpc



Virgo szupercsoport ~ 33 Mpc



# Honnan is jött a GW150914 gravitációs hullám? (230-500 Mpc)



NASA/WMAP Science Team

Ősrobbanás

(13,7 milliárd év)

Sötét Korszak

innen **fény nem,**  
**de gravitációs hullám**  
**érkezhet** hozzánk!!

elkezdődik a

gyorsuló tágulás  
 $\sim z=0,4$  (1700 Mpc)

kb. innen érkezett

$\sim z=0,1$  (1,3 milliárd év)  
*a Földön kialakul*  
*az oxigénnel telített légkör*

# Közép- és hosszútávú kutatási célkitűzéseink Szegeden

## 1. vannak-e új polarizációk?

skalár-tenzor és más módosított gravitációelméletekben:

+ és  $\times$  polarizációk mellett  
2 skalár módus (lélegző és longitúdínális/tömeges)  
2 vektor módus ( $\chi$  és  $\Upsilon$ )

## 2. tömeges-e a graviton?

## 3. az univerzum gyorsuló tágulásának független vizsgálata

→ sötét energia modellek tesztelése

## 4. gravitációs hullámok vizsgálata erős gravitációban, geometriai optikai (nagyfrekvenciás) közelítésben, általános relativitáselméletben és módosított gravitációelméletekben

## 5. speciális gravitációs hullámok kvantálása

