



Gravitációs elméletek tesztelése
gravitációs hullámokkal,
a LIGO és Virgo detektorok méréseinek segítségével

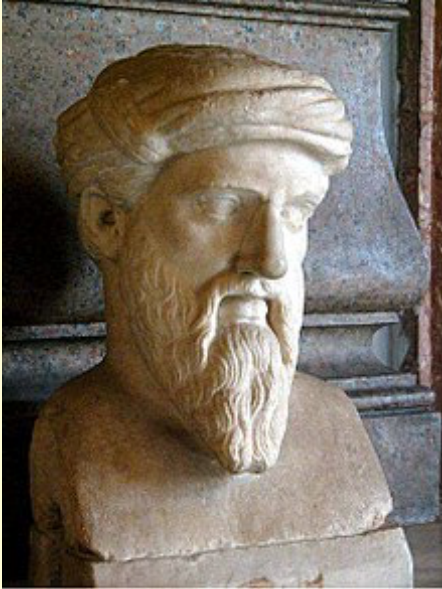
GERGELY Árpád László

Szegedi Tudományegyetem

Simonyi-nap, 2017, MTA Székház Nagyterem

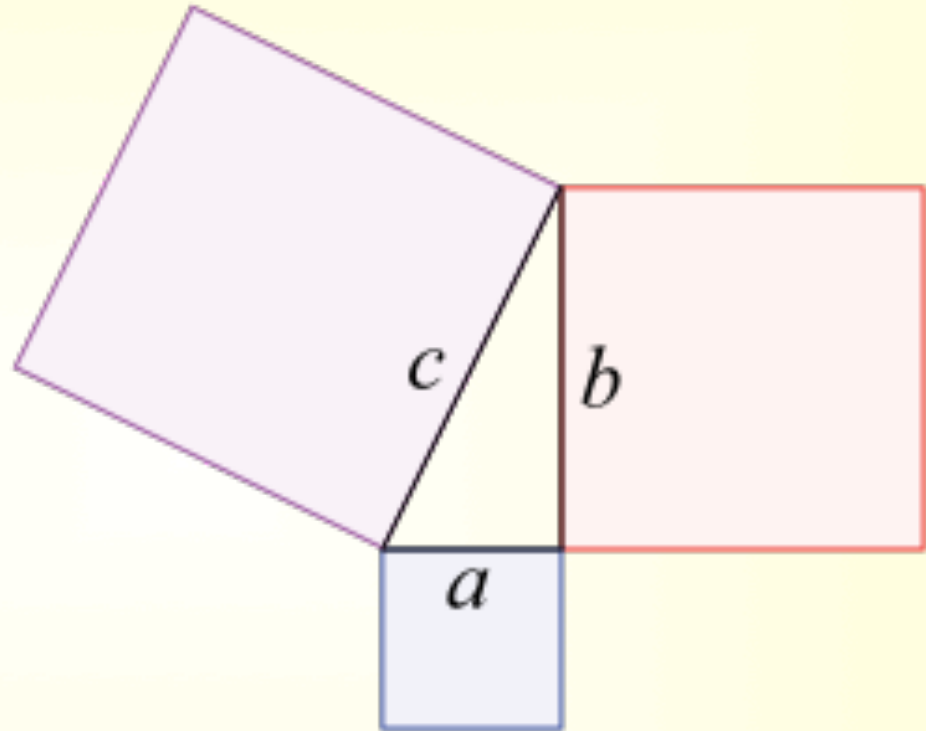
Az ókori görögök világképe

Pitágorasz



*í.e. 570 – í.e. 495
filozófus, matematikus*

Tétele:



Pitágorasz kimondta, hogy a Föld gömb alakú !

Az ókori természetfelfogás

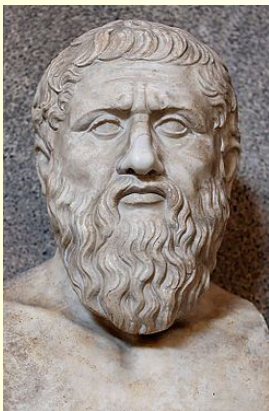
Empedoklész



Empedocle's.

í.e. 490 - í.e. 430

Platón



í.e. 427 - í.e. 347

kozmozgenikus elmélete

4 klasszikus összetevővel

(a 4 elem megnevezés

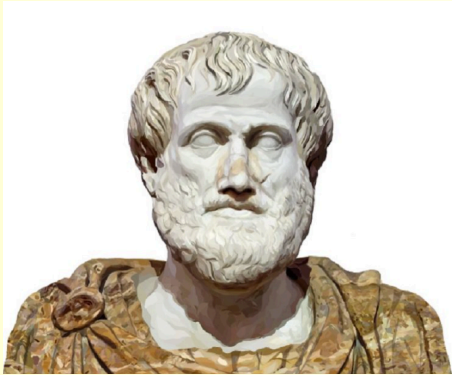
Platón-tól származik):

- **Levegő** (meleg és nedves, Zeusz)
modern megfelelője a gáz
- **Föld** (hideg és száraz, Héra)
modern megfelelője a szilárd anyag
- **Víz** (hideg és nedves,
Nestis = Perszezhóné)
modern megfelelője a folyadék
- **Tűz** (meleg és száraz,
Aidoneusz = Hádész)
modern megfelelője a plazma, hő



Gravitációelmélet (?) az ókorban

Arisztotelész



í.e. 384 - í.e. 322

Platón tanítványa

az első mindent átfogó nyugati filozófiai rendszer megalkotója
(fizika, biológia, zoológia, metafizika, logika, etika, esztétika, költészet, színház, zene, retorika, nyelvészet, politika, kormányzás)

Nagy (Makedón) Sándor tanítómestere (í.e. 343 után)

Empíricista (a világot csak érzékszerveinken keresztül érthetjük meg)

Azt gondolta, hogy a testek természetes állapota a nyugalom. **Nincs mozgás ok nélkül.**

Bevezeti a **lendület** fogalmát. Ez megmarad, miután elengedjük az eldobott követ, tehát egyenes pályán mozog tovább.

(Ez így nem igaz, a pálya egy parabola.)

Azt gondolta, **a nehezebb testek gyorsabban esnek.**
(Ez sem igaz, Arisztotelész nyomán 1000 évig hibásan gondolták.)

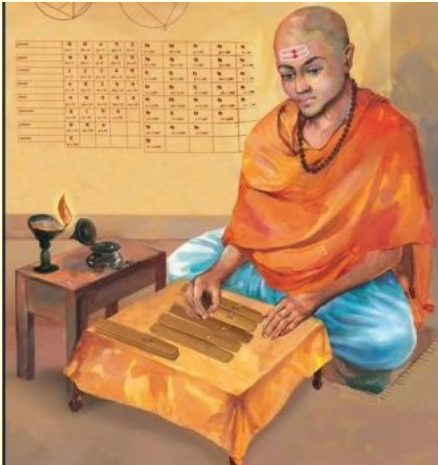
Az **univerzum közepe a Föld közepe.** Az ismert égitestek **szférákon** keringenek.

A nehéz elemek (**föld, víz**) természetüknél fogva esnek a központ felé, **lefelé.**

A könnyű elemek (**tűz, levegő**) természetüknél fogva igyekeznek **felfelé**, a Hold szférája felé.

A Föld vonzza a testeket

Brahmagupta
598 - 665



Al-Bírúní
973 Üzbegisztán -
1048 Afganisztán



Hindu matematikus és csillagász

Algebra, analízis, geometriai, trigonometriai
eredmények 2 könyvben, bizonyítások nélkül

A Hold fényességváltozásaiból levezeti, hogy a Hold
közelebb van a Napnál

A nullát számmá lépteti elő, mellyel műveletek
végezhetők (korábban csak valami hiányát fejezte ki)

A Föld gömb alakú és vonzza a testeket!

A Föld saját tengelye körül forog

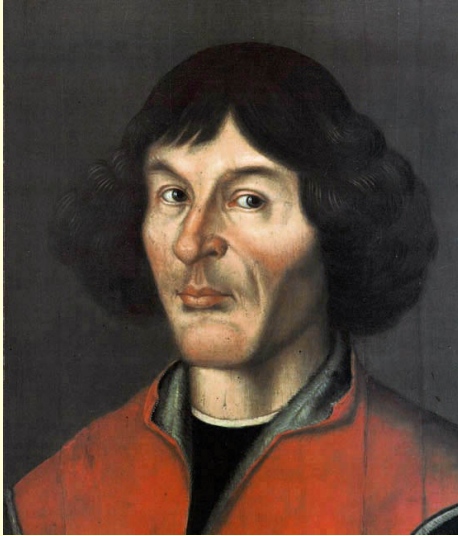
Afrika nem végtelen déli irányban

A virágoknak 3, 4, 5, 6, 8 szirma lehet, 7 vagy 9 nem

A hangsebesség kisebb a fénysebességnél

A Föld természete a dolgok vonzása és megtartása!

Kopernikusz



1473 – 1543
matematikus,
csillagász

NICOLAI COPERNICI TORINENSIS DE REVOLUTIONIBUS ORBIUM COELESTIUM, Libri VII.

Habes in hoc opere iam recens natus, & aucto,
studioso lector, motus stellarum, tam fixarum,
quam erraticarum, cum ex uteribus, tum etiam
ex recentibus observationibus refutatos: & no-
uis insuper ac admirabilibus hypothesebus or-
natos. Habes etiam Tabulas expeditissimas, ex
quibus eisdem ad quodvis tempus qualem facillime
calculare poteris. Igitur eme, lege, fructe.

Astronomice Nihil dicitur.

Norimbergae apud Ioh. Petreium,
Anno M. D. XLIII.

- 1514 előtt nem sokkal: *Commentariolus* (40 oldal)
- a Heliocentrikus világkép első leírása
 - barátainak küldte szét
 - 1533-ban Johann Albrecht Widmannstetter előadta Rómában
 - VII. Kelemen pápa és néhány püspök olvasta, érdeklődését fejezte ki

1539: Georg Joachim Rheticus a tanítványa lesz, közösen írnak egy könyvet: *Narratio Prima*

1543, főműve: *Nicolai Copernici Torinensis: De revolutionibus orbium coelestium*

Posztulátumai:

1. Az égitestek nem azonos pont körül keringenek
2. A Föld középpontja a Hold szférájának is központja
3. Az összes szféra a Nap körül forog, mely az univerzum közepéhez igen közel áll
4. A Föld-Nap távolság igen kicsi a csillagok távolságához mérten
5. A csillagok mozdulatlanok, látszólagos mozgásukat a Föld napi forgása adja
6. A Föld egy napköri szférán kering, de a Földnek másféle mozgása is van
7. A Föld Nap-köri mozgása az oka a bolygók időszakos visszafelé haladásának

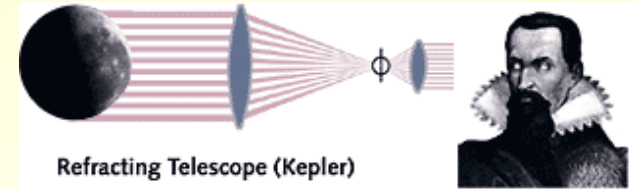
Johannes Kepler



1571 - 1630

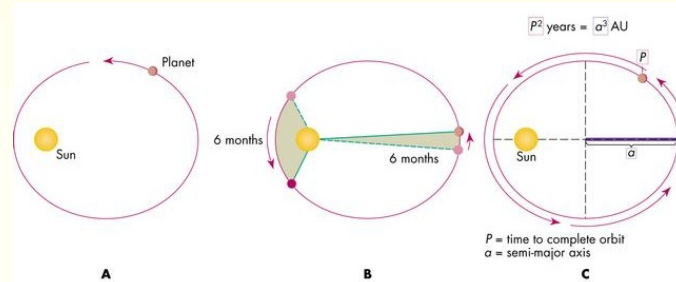
matematikus,
csillagász, asztrológus,
természetfilozófus,
az égi mechanika
megalkotója,
a 17. sz.-i tudományos
forradalom kulcsszereplője

Optikai munkásság:
Kepler távcső (refraktor)



Refracting Telescope (Kepler)

A bolygómozgás törvényei

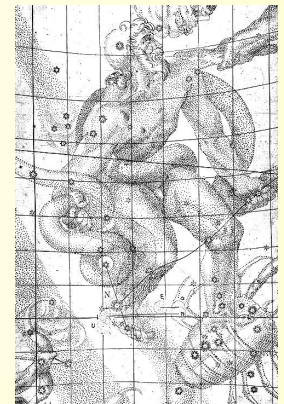
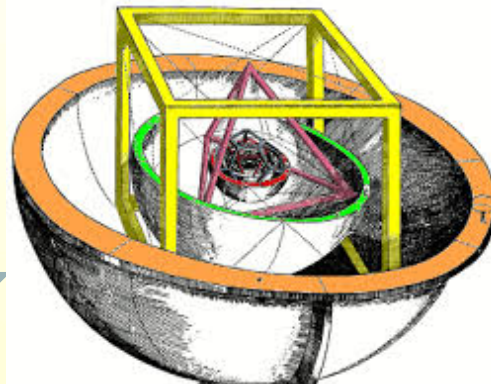


(munkái:
Astronomia nova,
Harmonices Mundi,
*Epitome of
Copernican Astronomy*)

A platoní formák határozzák meg a 6 ismert bolygó

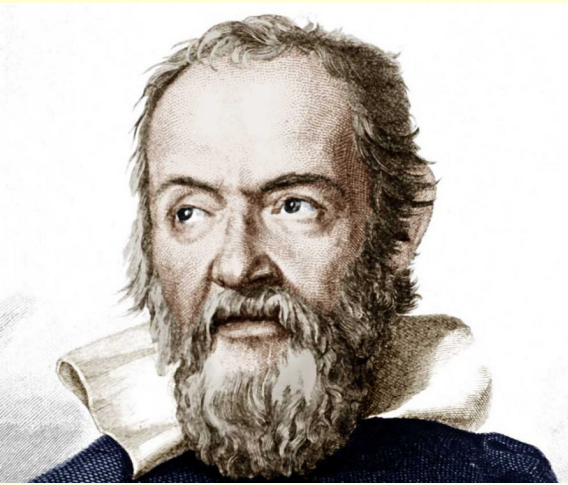


Naptól mért
távolságát



1604-es szupernóva
megfigyelése
(arisztotelészi tanok cáfolata)

Galileo Galilei

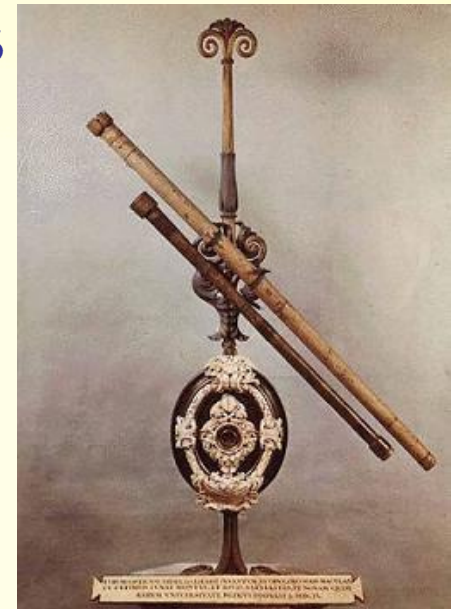
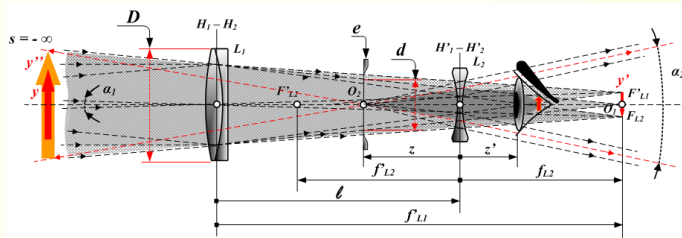
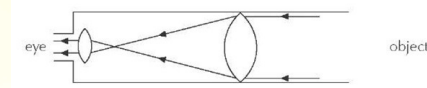
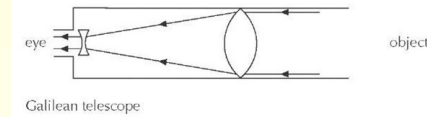


1564 - 1642

matematikus,
csillagász

modern tudomány atyja,
új találmányok,
a társadalom elitéje,
tudományos forradalom

Optikai munkásság: Galilei távcső
(refraktor)



Firenzében

1610: felfedezi
a Jupiter
4 nagy holdját
(Zeusz kedvesei):



A Jupiter holdjai



2002 végéig 40 jupiter-
holdat fedeztek fel.

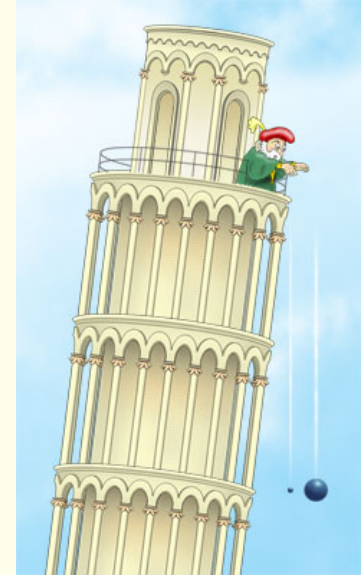
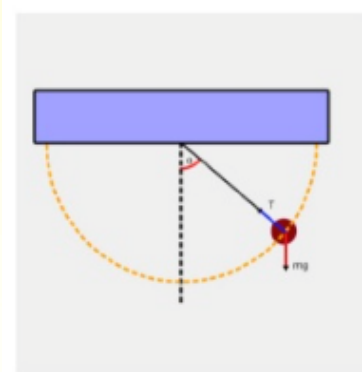
Galileo Galilei

Az ingamozgás törvénye ($T^2 \sim \text{inga hossz}$)

Az ekvivalencia-elv:

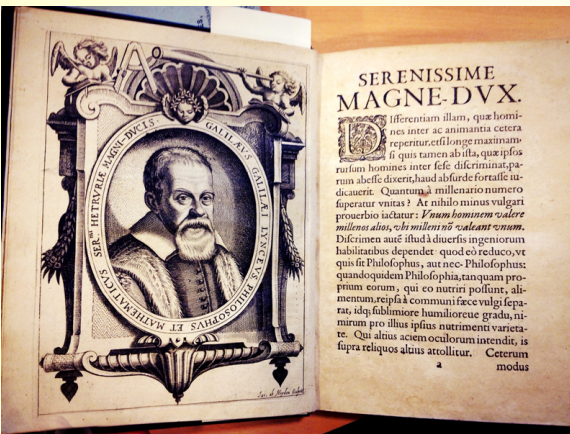


DIALOGO
DI
GALILEO GALILEI LINCEO
MATEMATICO SOPRAORDINARIO
DELLO STUDIO DI PISA.
E Filosofo, e Matematico primario del
SERENISSIMO
GR.DVCA DI TOSCANA.
Doue ne i congressi di quattro giornate si discorre
sopra i due
MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;
Proponeudo indistintamente le ragioni Filosofiche, e Naturali
haua per l'una, quanto per l'altra parte.
CON FRI VILEGI.
IN FIORENZA, Per Gio: Batista Landini MDCXXXII.
CON LICENZA DE' SUPERIORI.

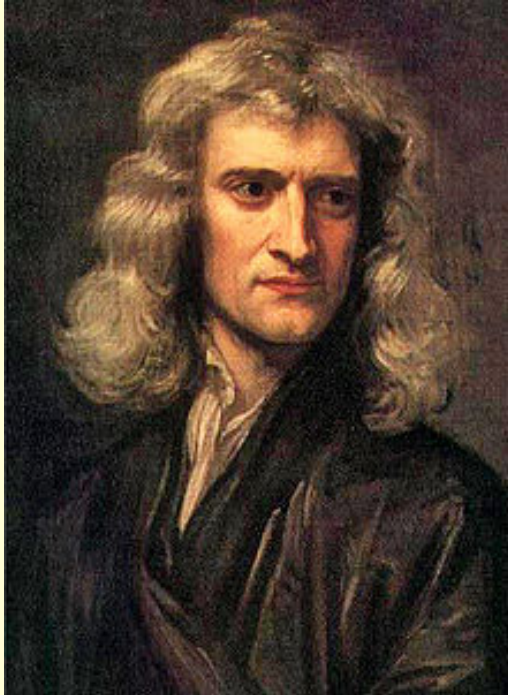


Párbeszédék

Galilei-hőmérő
(felhajtóerő + hőtágulás):



Isaac Newton



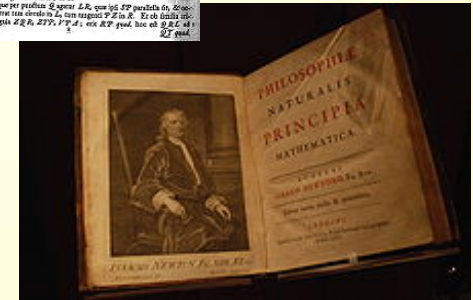
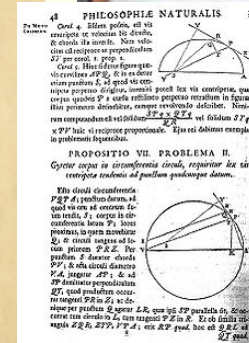
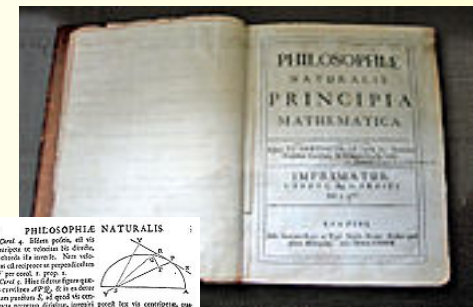
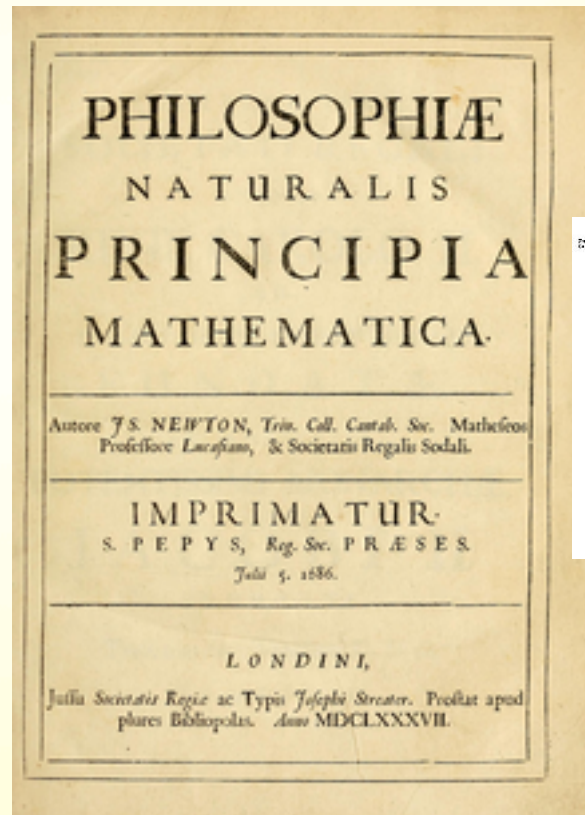
1642 - 1726/7

Angol
természetfilozófus,
matematikus

A tudományos
forradalom fő alakja

Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (1687)

- A klasszikus mechanika megalapozása
- Newton mozgástörvényei
- Newton univerzális gravitációtörvénye
- Kepler planetáris mozgás törvényeinek levezetése

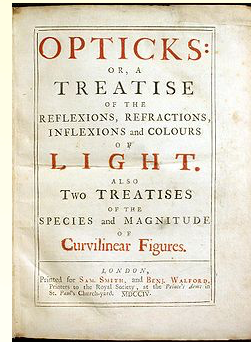
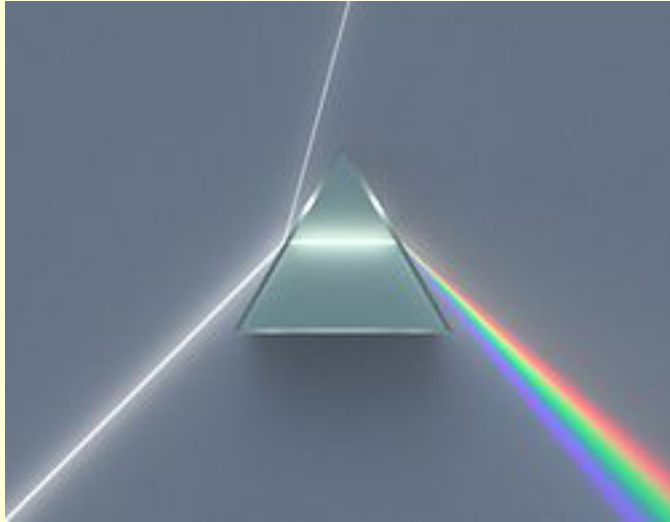


- A tudománytörténet egyik legfontosabb műve
- Általa kidolgozott kalkulusot használt fel

Isaac Newton

Optikai munkásság

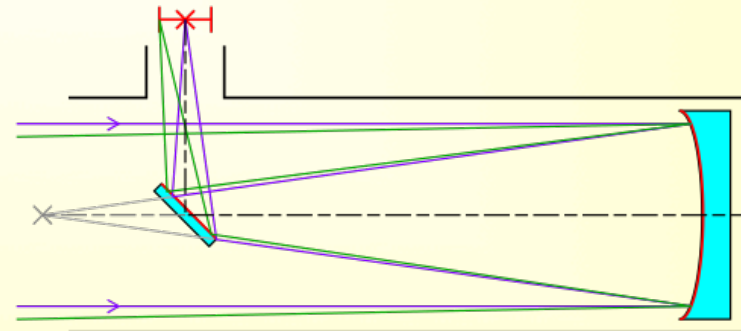
Fénytörés, színekre bontás



Newton távcső (1668) (első sikeres tükrös távcső)



Minden fénytörésen alapuló távcső a különböző színek jelenléte miatt kromatikus abberációt mutat



Newton gravitációelméletének sikere és korlátai

Pro:

- Az ismert jelenségeket (égitestek mozgása, tömegvonzás a Földön) **egyetlen logikai rendszerbe** rendezte
- Megjósolta a Neptunusz létezését az Uránusz mozgásának elemzéséből (Le Verrier)
- **Gyenge gravitációban és lassú mozgások esetén** (földi viszonyok közt) rendkívül **pontos**
- Egyszerű: egyetlen **skalármező**

Kontra:

- Felteszi az **éter** létezését
- A bolygók mozgását nem teljesen pontosan adja meg (**perihéliumvándorlás értéke**)
- Földi viszonyok közt sem teljesen pontos, ha **GPS-t** szeretnénk használni
- A gravitáció **terjedési sebessége végtelen** (pillanatszerű kölcsönhatás)

Gravitáció a modern fizikában: a 4 kölcsönhatás egyike

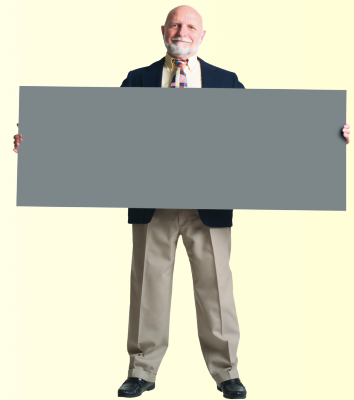
Csökkenő erősség

1. Erős kölcsönhatás (magerők)
2. Elektromágnesesség
3. Gyenge kölcsönhatás (radioaktív bomlás)

Kvantált kölcsönhatások



sík téridőben



4. Gravitáció

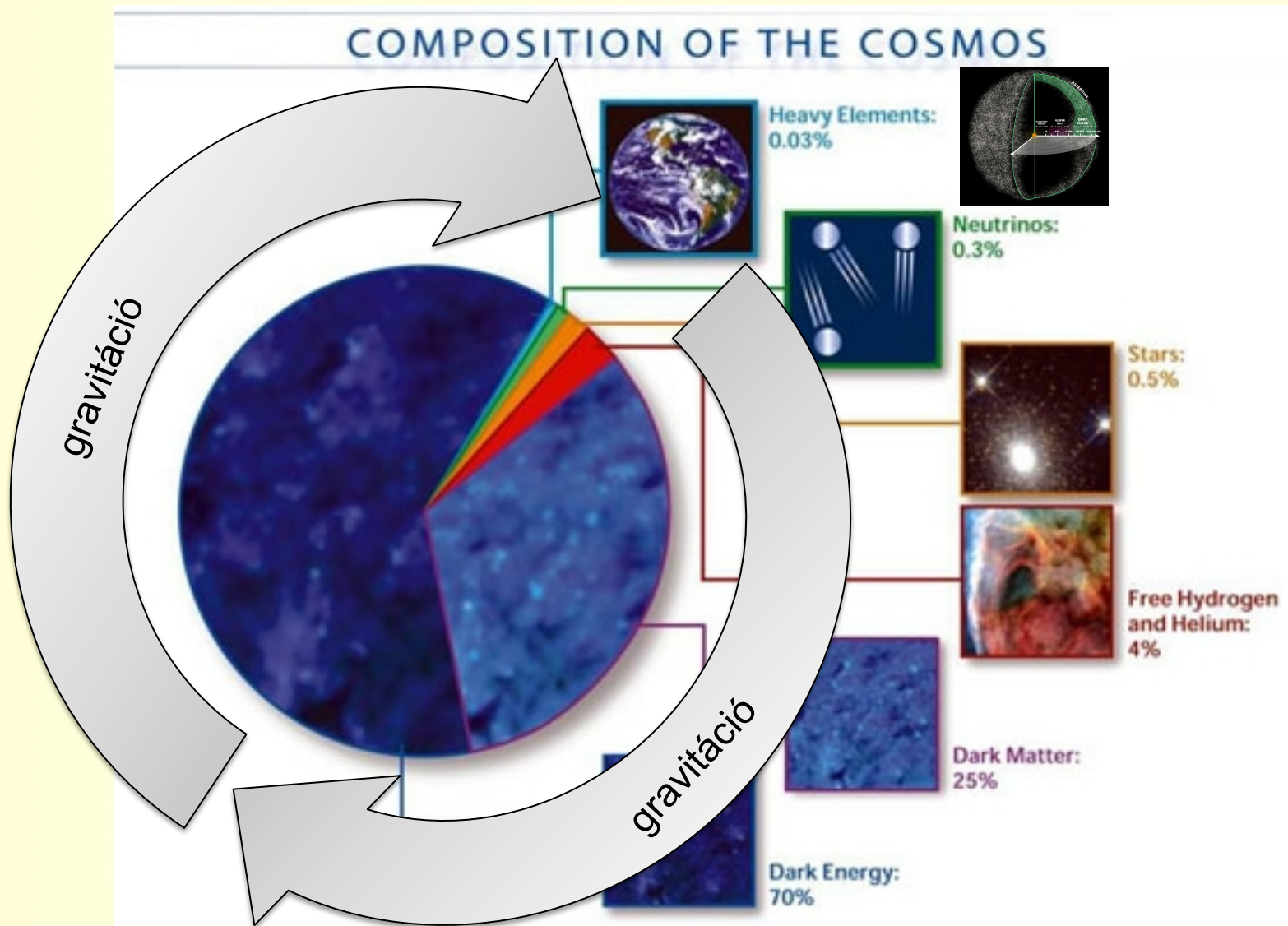
Klasszikus „kölcsönhatás”



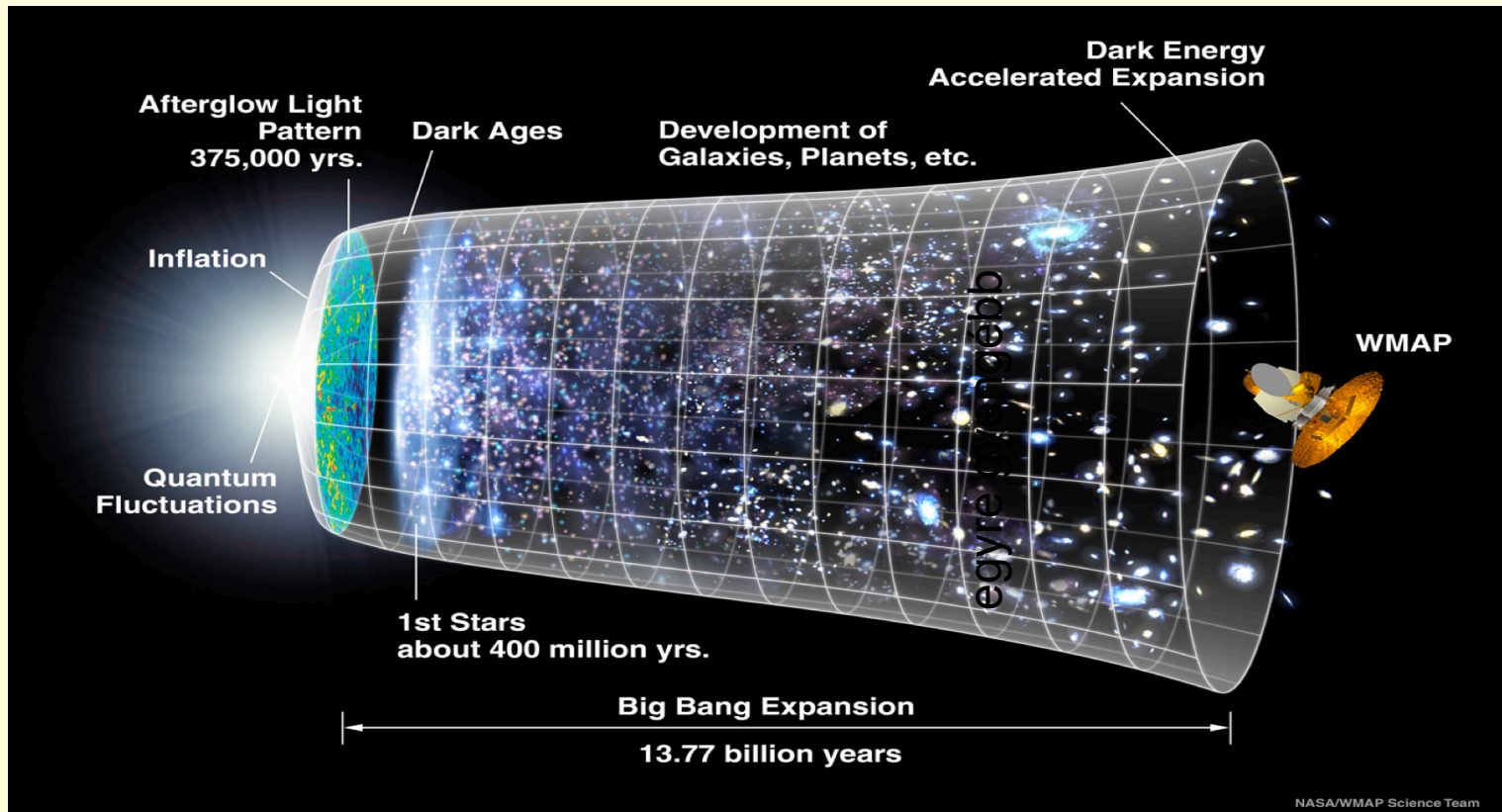
görbült téridőben



Az ismert Univerzum összetétele



Idő- és távolságskálák az Univerzumban



gravitáció



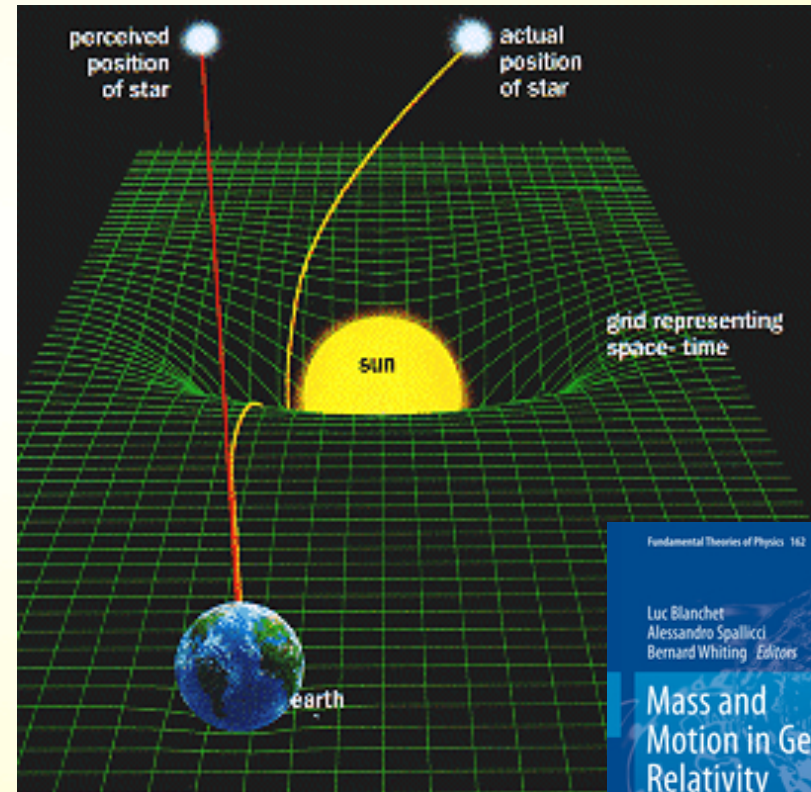
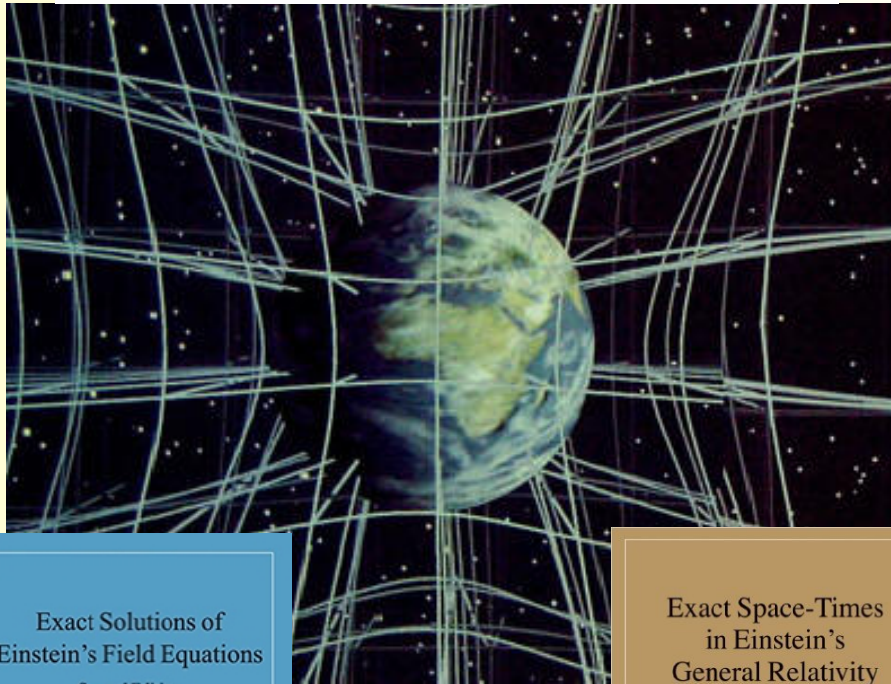
Az általános relativitáselmélet, mint gravitációelmélet

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
JÍŘÍ PODOLSKÝ

CAMBRIDGE MONOGRAPHS
ON MATHEMATICAL PHYSICS

Fundamental Theories of Physics 162

Luc Blanchet
Alessandro Spallicci
Bernard Whiting Editors

Mass and
Motion in General
Relativity

Springer

Új effektusok, új fogalmak

Új (gyenge-tér) effektusok a Naprendszerben:

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

Új fogalmak:

- fekete lyuk

csillagfejlődésből $M \leq 20M_{\odot}$

közepes tömegű $20M_{\odot} < M < 10^5 M_{\odot}$

szupernagy tömegű



- gravitációs (mikro)lencsézés

LHC nem lát szuperszimmetriát

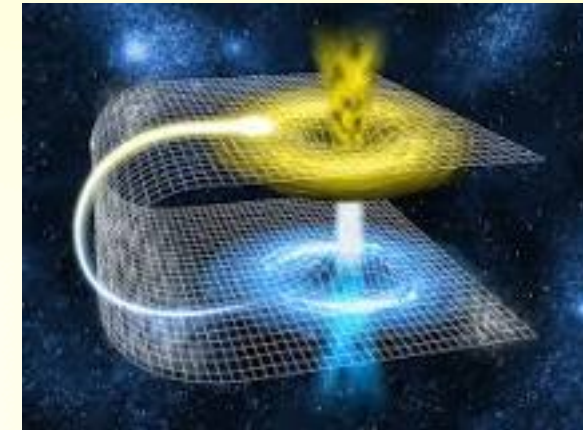
→ a sötét anyag nem WIMP

MACHO megfigyelések (Nagy Magellán felhő)

→ a sötét anyag legfeljebb 10%-a származhat csillagfejlődésből

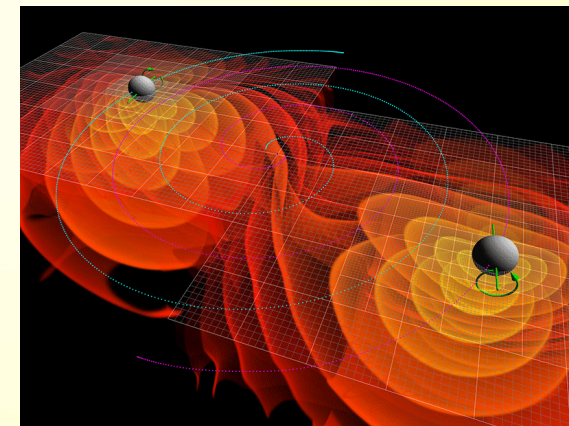
→ közepes tömegű, elsődleges fekete lyukakból áll-e a sötét anyag?

(dedikált megfigyelési program szükséges)

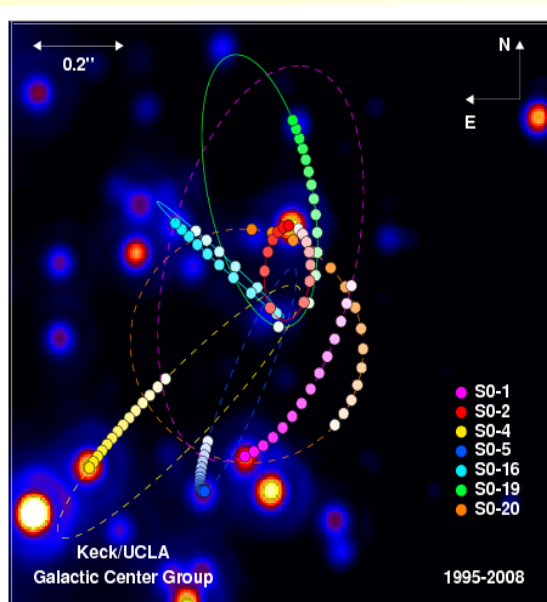


- féreglyuk

EP=EPR, kapcsolat a kvantumelméletekkel?



- gravitációs sugárzás



Miként észlelhetjük a fekete lyukakat?

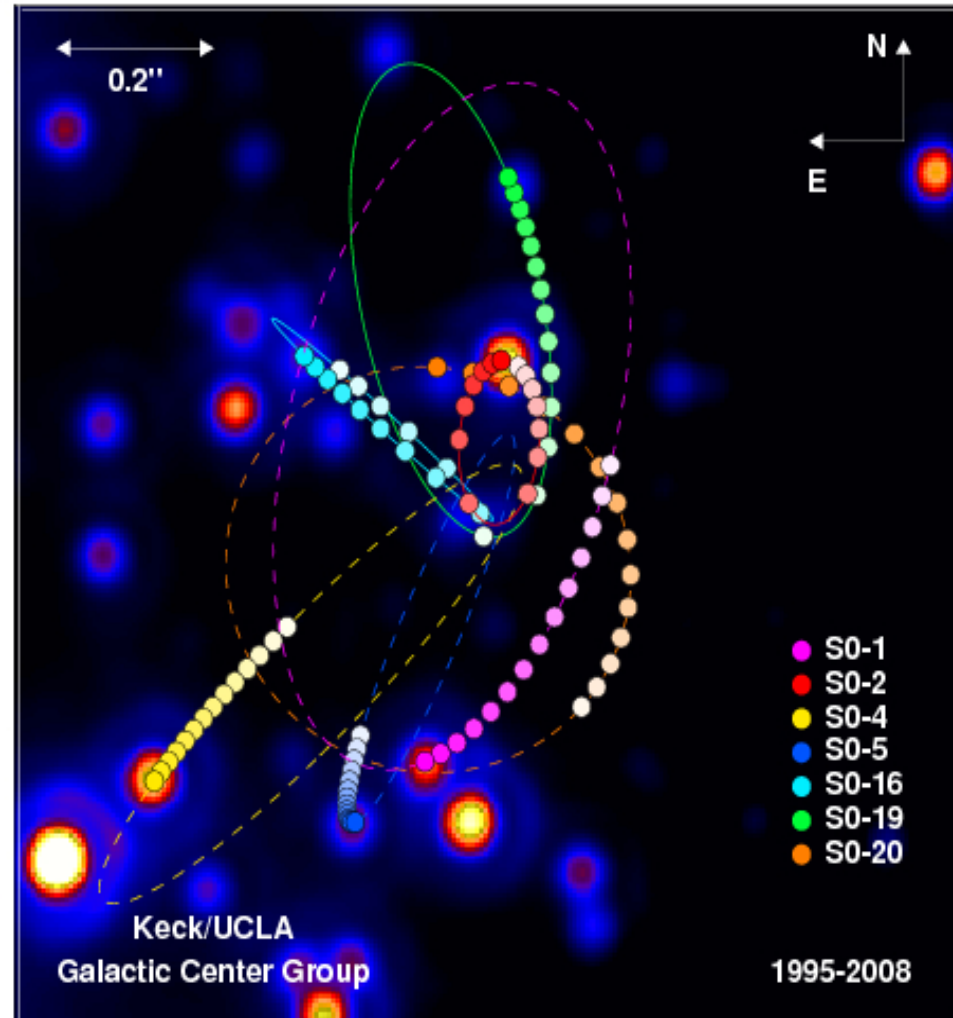
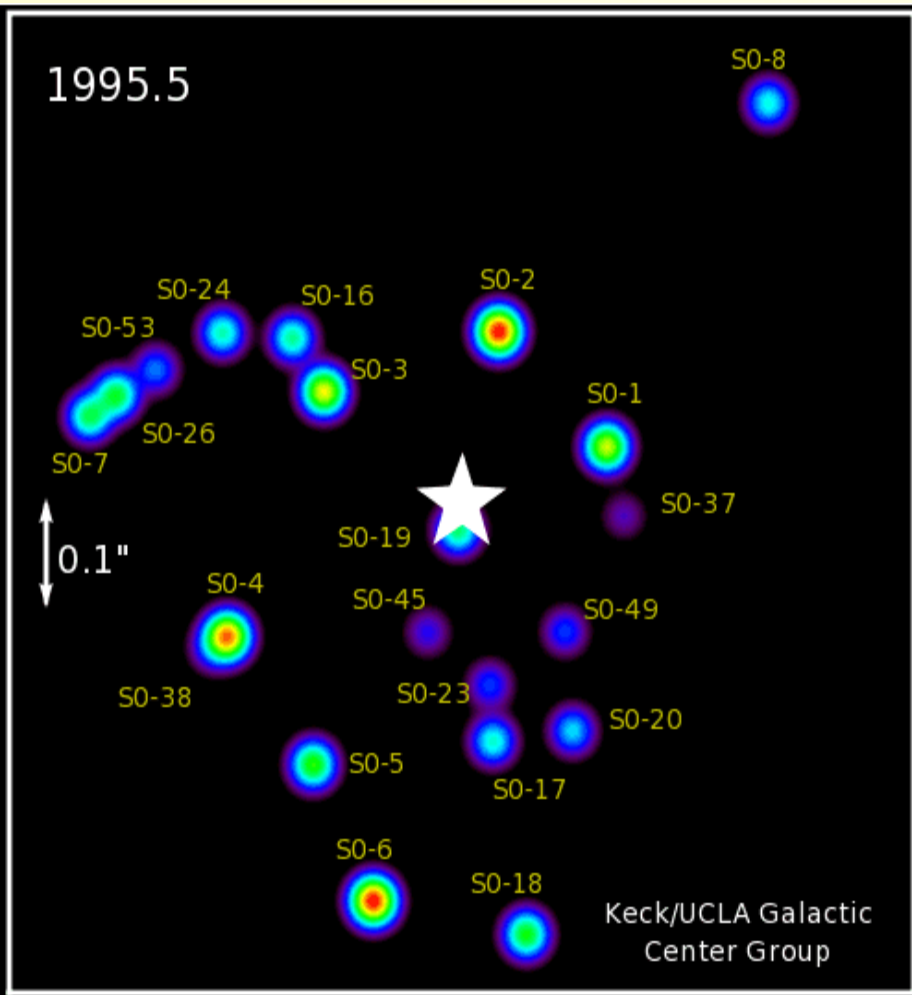
John Archibald Wheeler:



A készülő Gravitációs hullámok c. film részlete, rendező
Molnár H. Boglárka

A Tejútrendszer közepén található szupernagy tömegű fekete lyuk

hatalmas görbület \rightarrow fekete lyukak



Az égbolt (közeli) szupernehéz fekete lyukakban

Supermassive black hole spin-flip during the inspiral

L. Á. Gergely, P. L. Biermann, L. I. Caramete, *Class. Quantum Grav.* **27** (2010) 194009

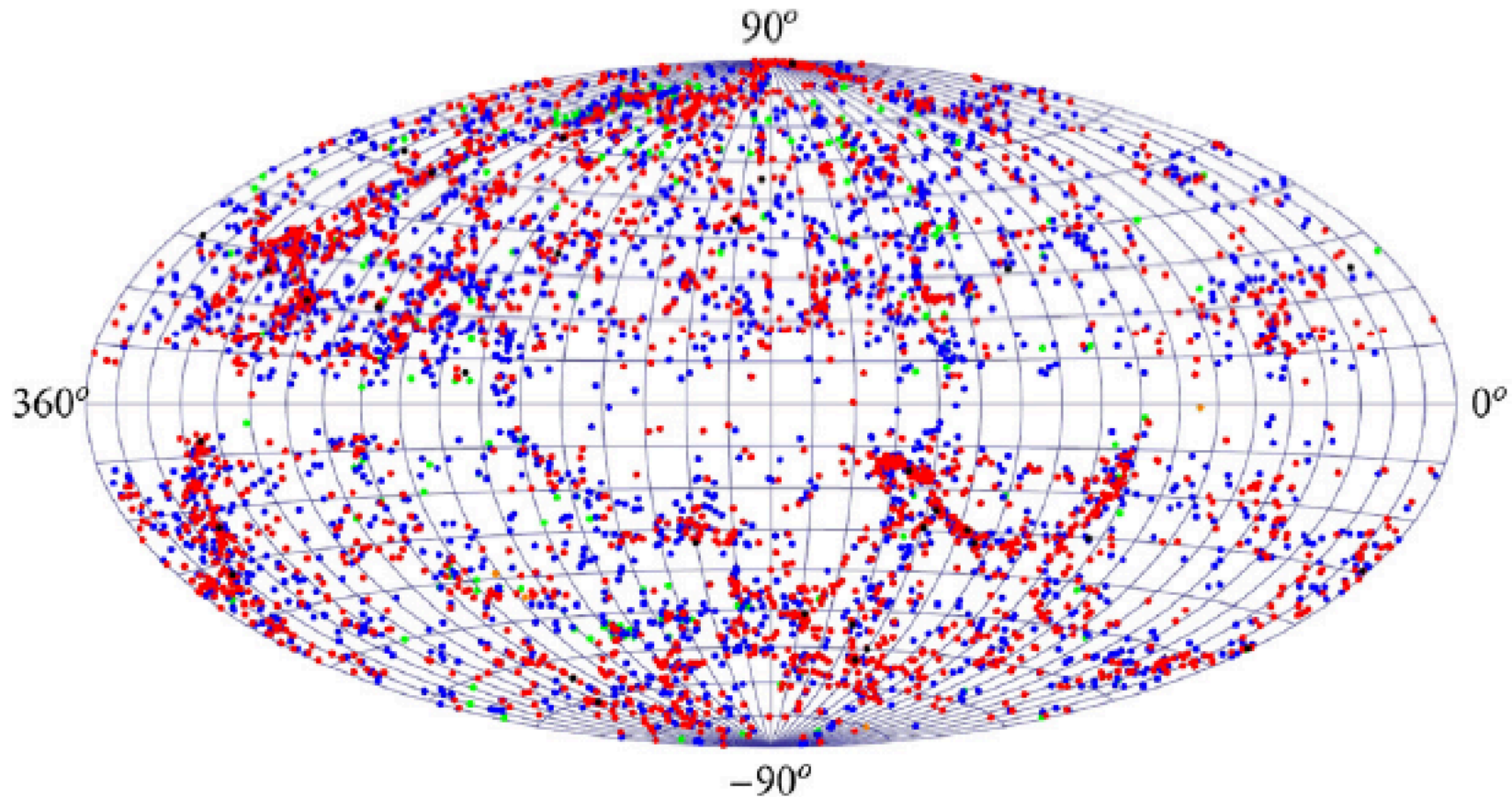


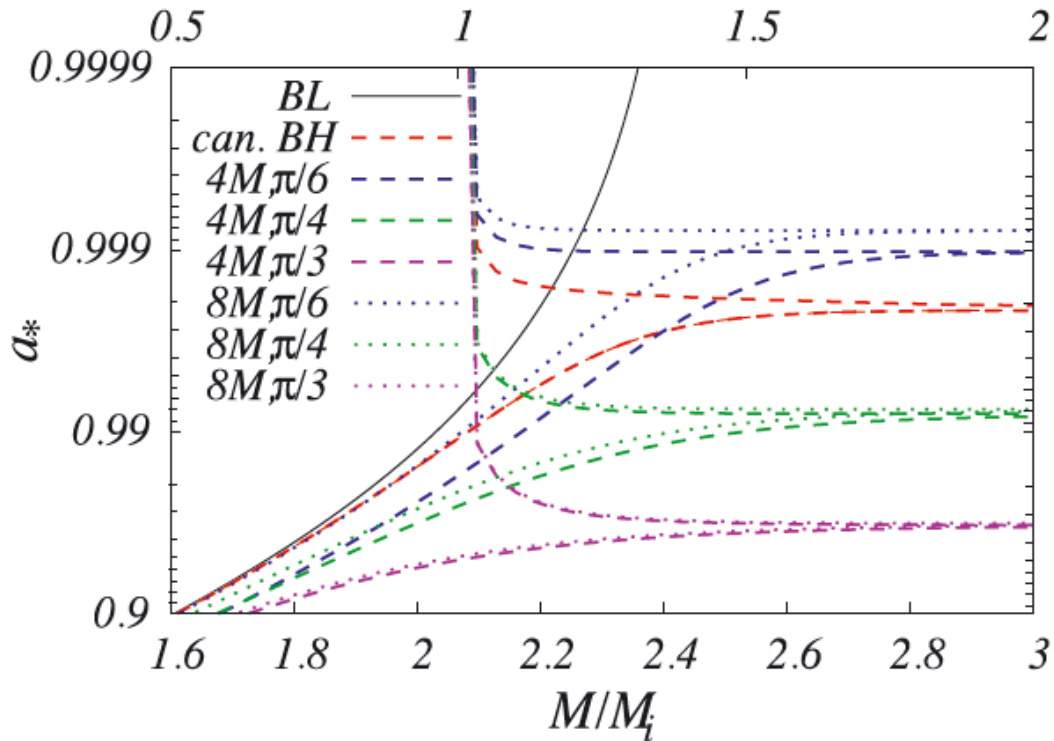
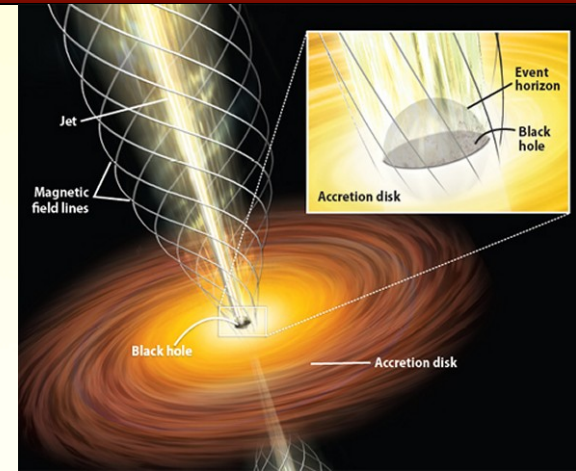
Figure 1. Aitoff projection in galactic coordinates of 5895 NED SMBH candidate sources. The sample is complete in a sensitivity sense; in order to derive densities one needs a volume correction. The color code (online only) is orange, green, blue, red, black corresponding to masses above $10^5 M_{\odot}$, $10^6 M_{\odot}$, $10^7 M_{\odot}$, $10^8 M_{\odot}$, $10^9 M_{\odot}$, respectively. With the exception of the less numerous first range (orange), representing compact star clusters, the rest are SMBHs.

Fekete lyukak akkréciója és jet-ek

Maximal spin and energy conversion efficiency in a symbiotic system of black hole, disc and jet

Z. Kovács, L. Á. Gergely, P. L. Biermann, Mon. Not. R.

Astron. Soc. **416**, 991–1009 (2011)



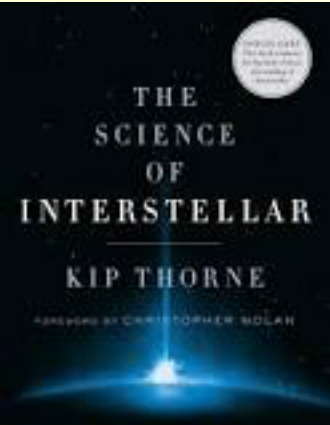
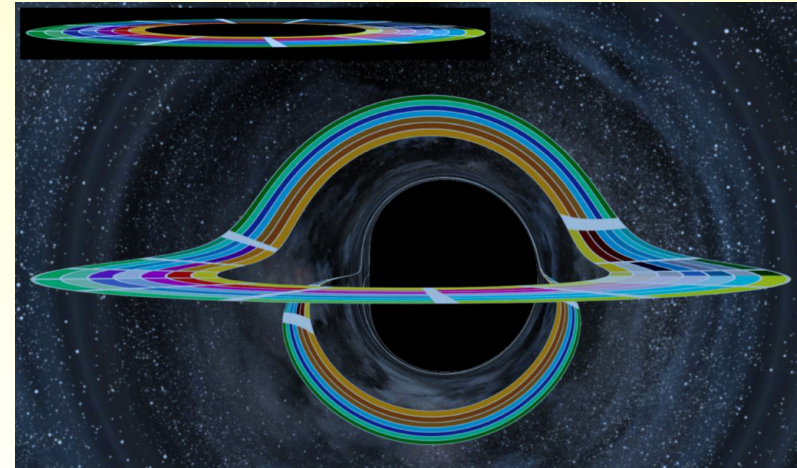
θ_{\max}	n	a_* (I)	ϵ (I)
$\pi/6$	1	0.8961	0.309
	2	0.8901	0.301
	3	0.8803	0.285
$\pi/4$	1	0.8976	0.312
	2	0.8933	0.306
	3	0.8872	0.298
$\pi/3$	1	0.8969	0.310
	2	0.8948	0.308
	3	0.8924	0.305
$\pi/6$	1	0.8968	0.311
	2	0.8901	0.302
	3	0.8822	0.291
$\pi/4$	1	0.8983	0.313
	2	0.8939	0.308
	3	0.8879	0.300
$\pi/3$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

Fekete lyukak gravitációs lencsézése



A fekete lyuk:

- Elhajlítja az akkréciós korong fényét
- Két képét mutatja



OPEN ACCESS

IOBP Publishing

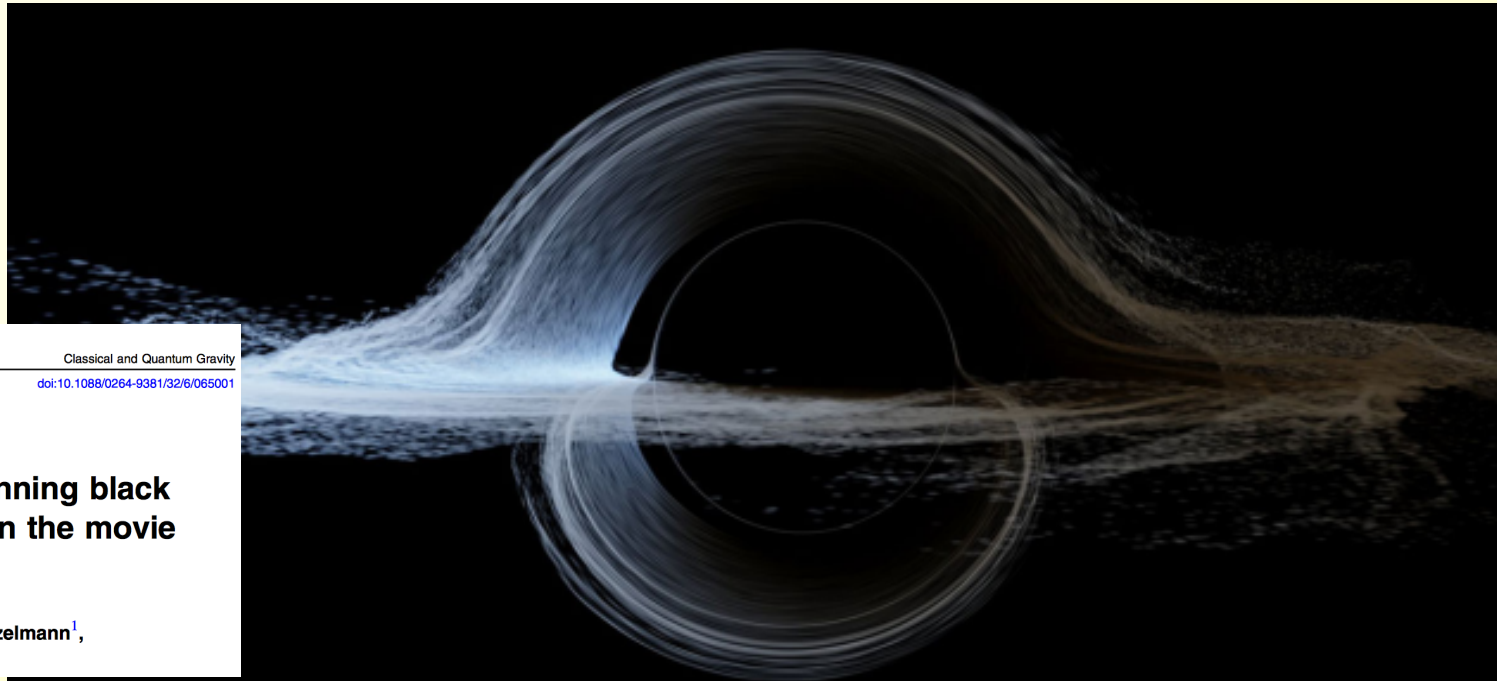
Class. Quantum Grav. 32 (2015) 065001 (41pp)

Classical and Quantum Gravity

doi:10.1088/0264-9381/32/6/065001

Gravitational lensing by spinning black holes in astrophysics, and in the movie *Interstellar*

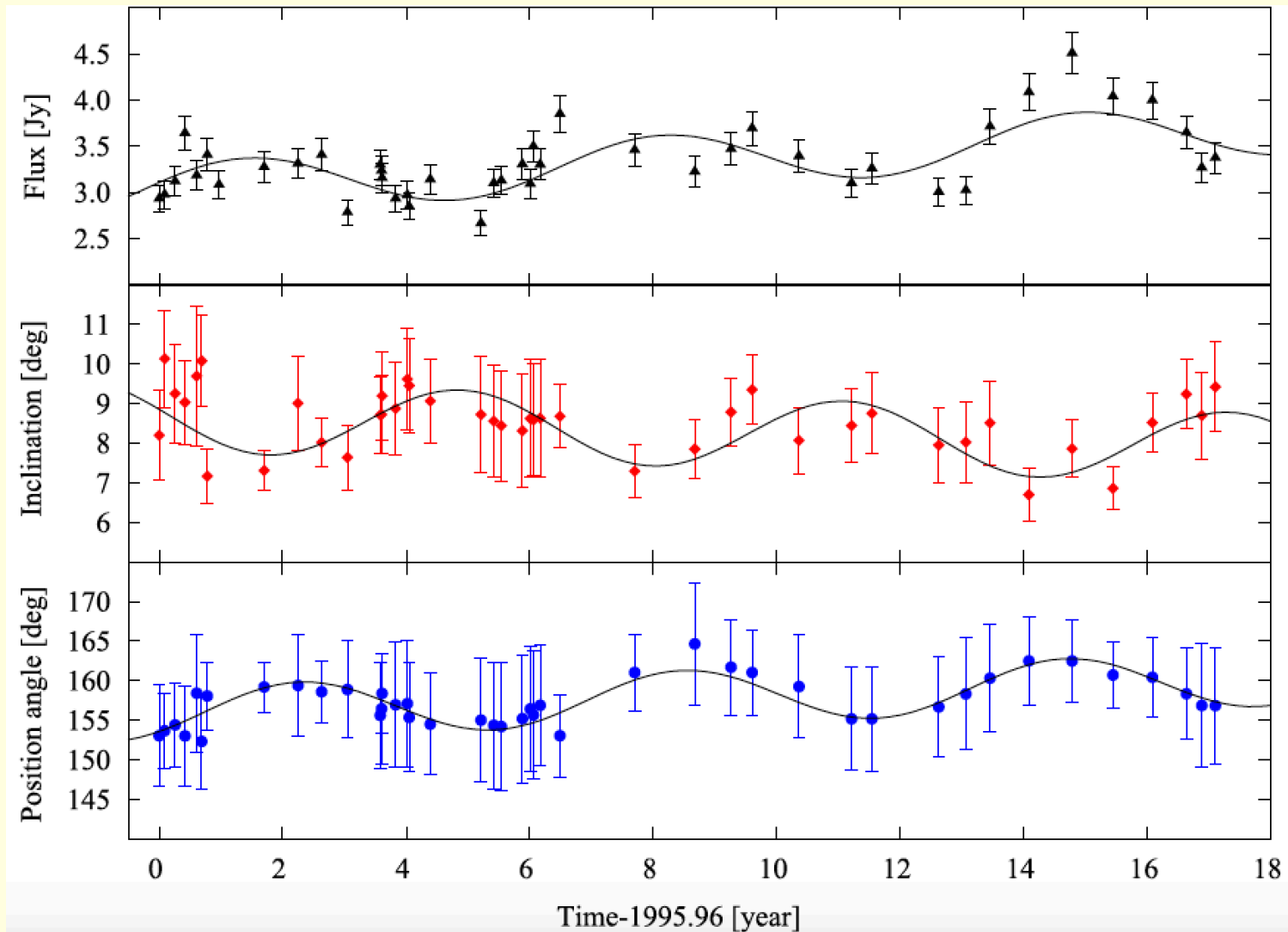
Oliver James^{1,*}, Eugénie von Tunzelmann¹,
Paul Franklin¹ and Kip S Thorne²



Ütköző feketelyuk-kettős gravitációs lencsézése



Ütköző feketelyuk-kettősök jelei a jet-ek elektromágneses spektrumában



A spinning supermassive black hole binary model consistent with VLBI observations of the S5 1928+738 jet
E. Kun, K. É. Gabányi, M. Karouzos, S. Britzen, L. Á. Gergely, MNRAS **445**, 1370–1382 (2014)

Nagyenergiás neutrínók feketelyuk-kettősök ütközéséből

A nagyenergiás neutrínó-kibocsátás olyan energetikus proton–proton ütközések következménye, melyekben a protonok kinetikus energiája a pion-keltési energia fölött van.

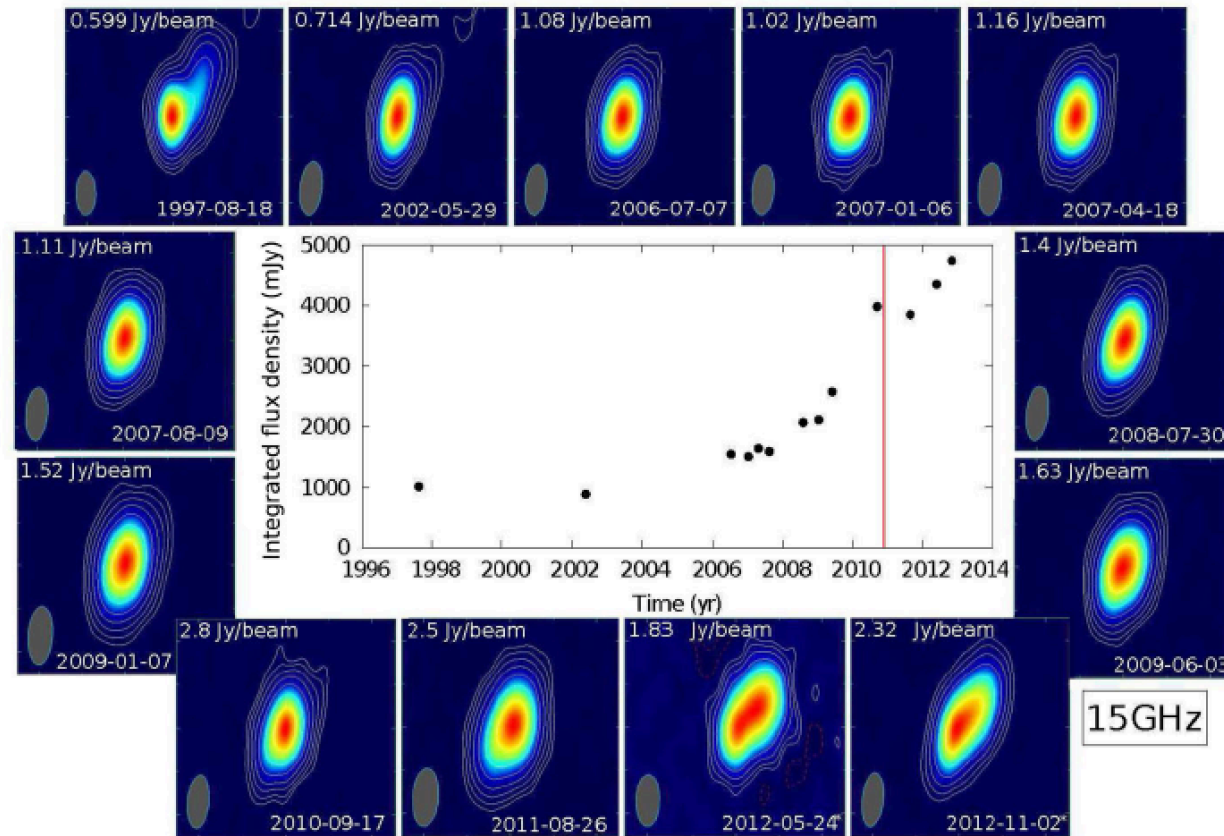
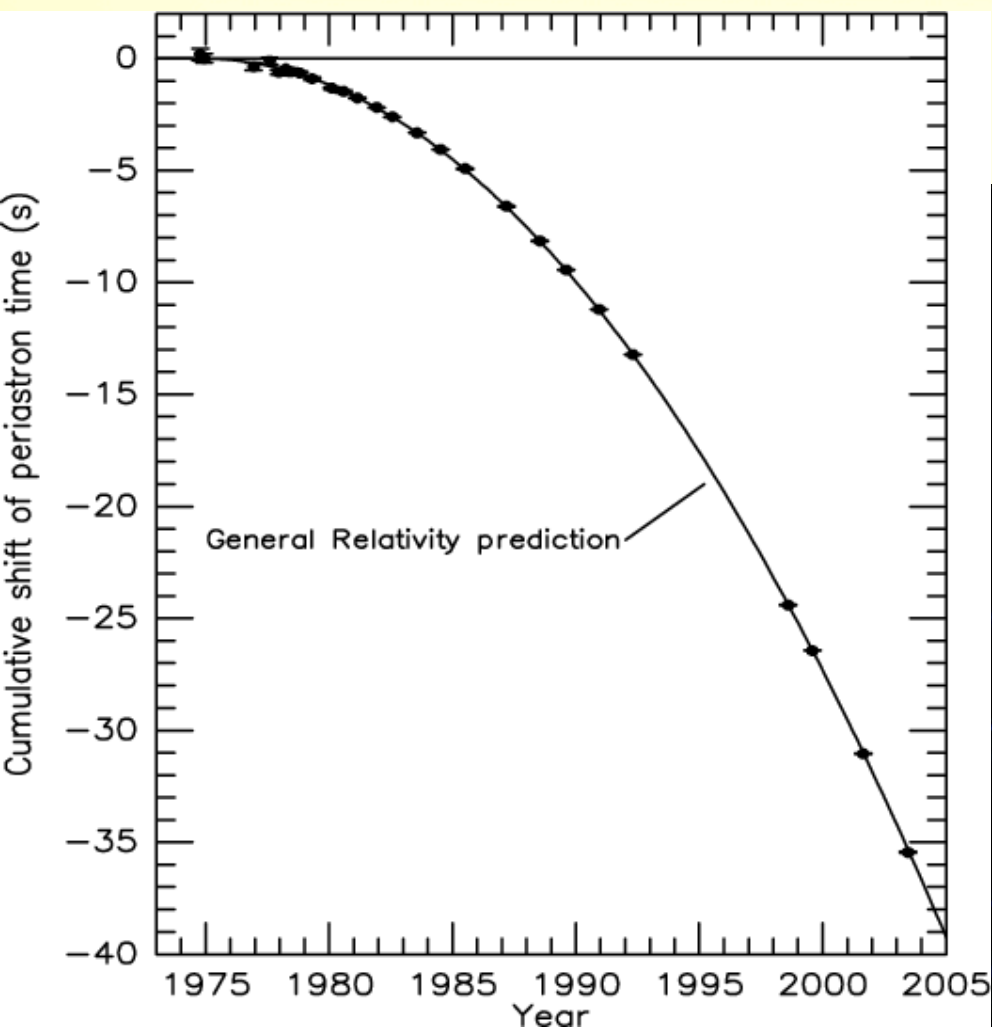


Figure 2. The radio maps of PKS 0723–008 over 12 epochs, represented on logarithmic scale with base 10. They were produced by processing the available VLBA visibilities provided by the MOJAVE team. Iso-flux density contours are in per cent of the peak flux density marked in the left upper corner of the maps. They increase by factors of 1, except the last two epochs (marked by stars), where the contours increase by factors of 2. In the middle, the integrated flux density of the source at 15 GHz is represented as a function of the time. The time of the corresponding neutrino detection (ID5) is indicated by a red vertical line.

A flat-spectrum candidate for a track-type high-energy neutrino emission event, the case of blazar PKS 0723–008

E. Kun, P. L. Biermann, L. Á. Gergely, MNRAS **466**, L34–L38 (2017)

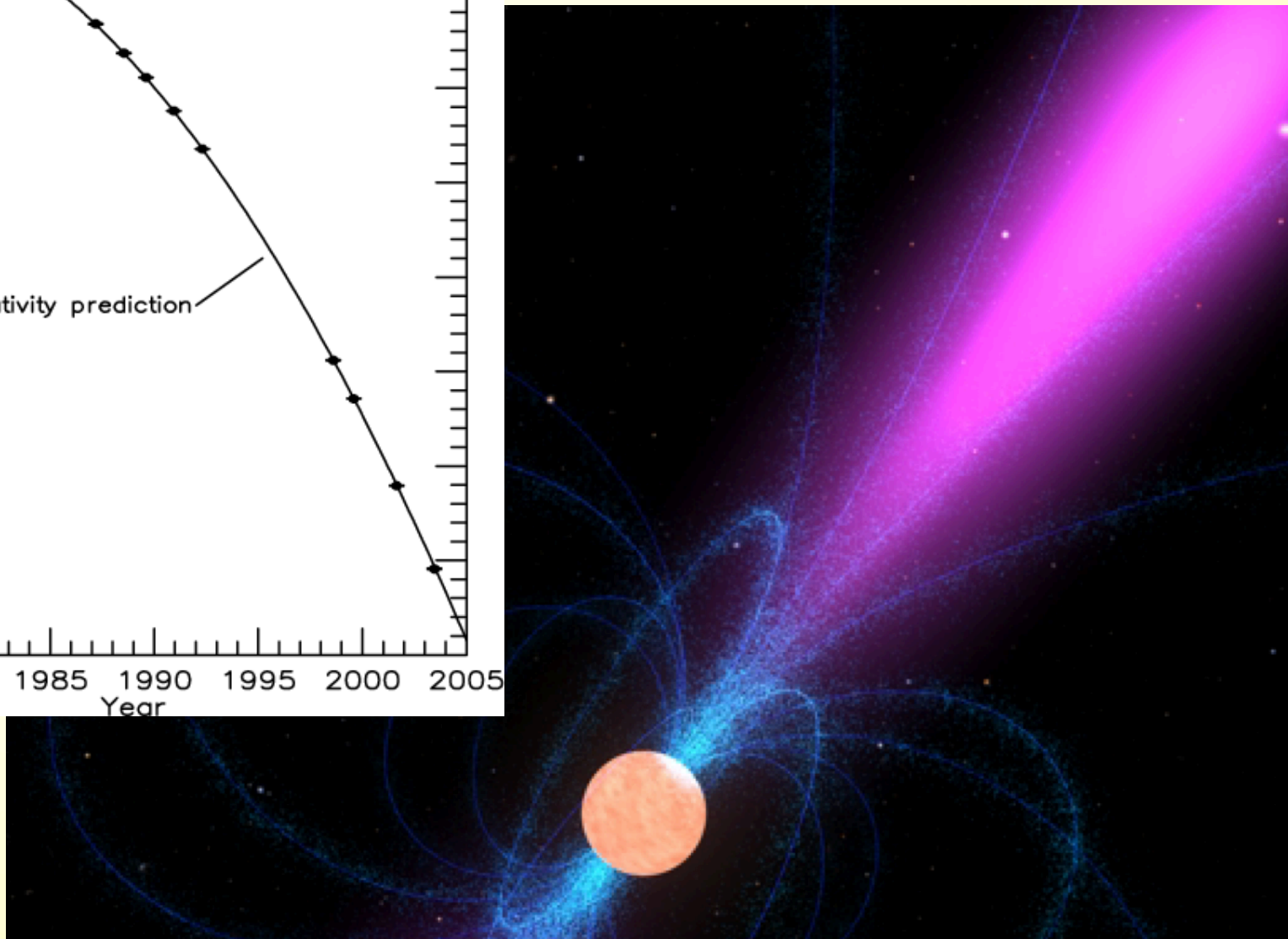
Gravitációs hullámok létezésének indirekt bizonyítéka: a Hulse-Taylor pulzár



A létező fizikai elméletek egyik legpontosabb igazolása:

40s változás 30 év alatt !! (4×10^{-8})

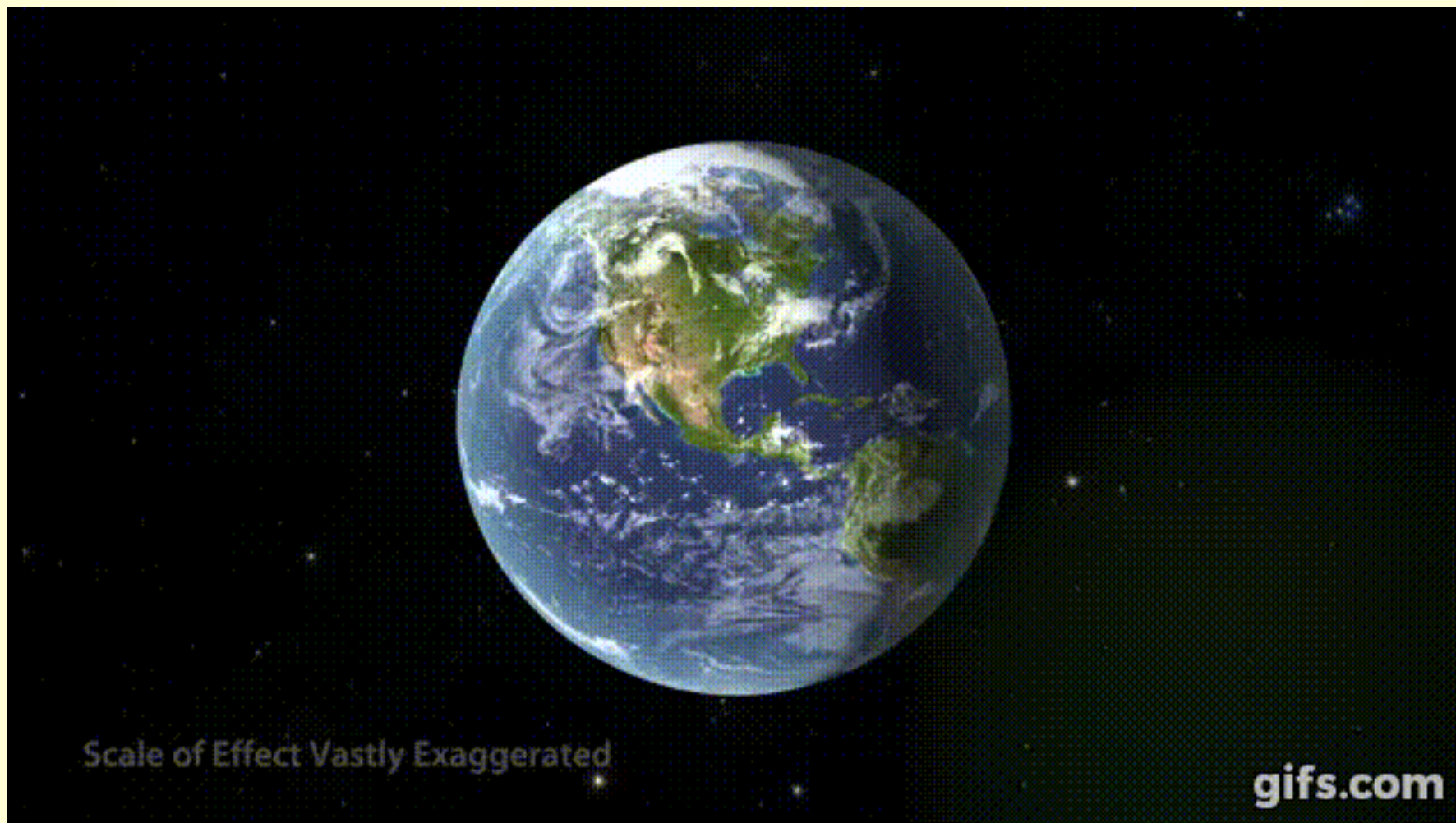
Nobel-díj
1993



Ütköző feketelyuk-kettős gravitációs sugárzása



A gravitációs sugárzás Földre gyakorolt hatása

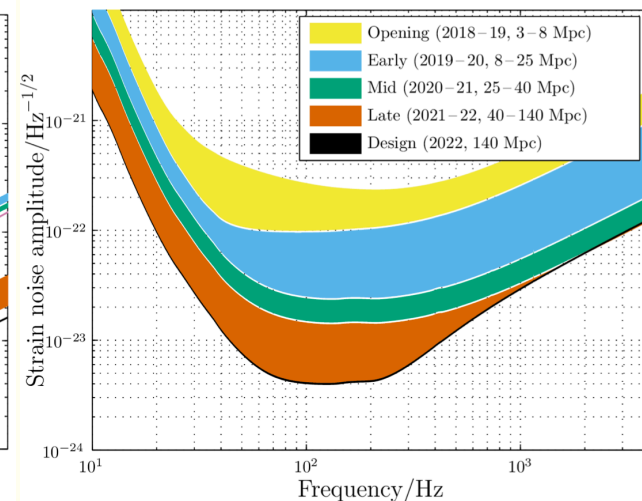
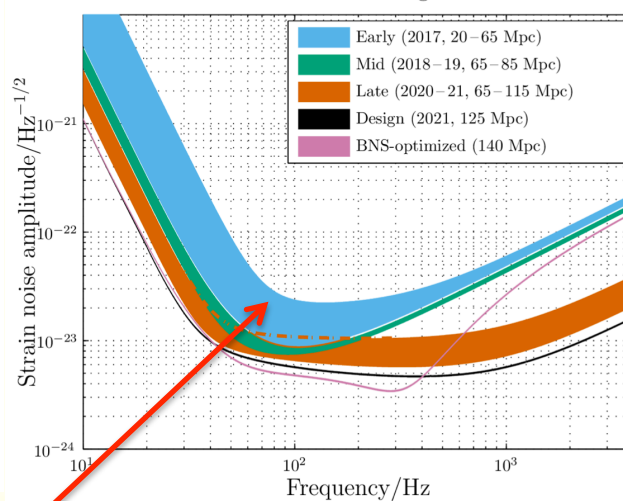
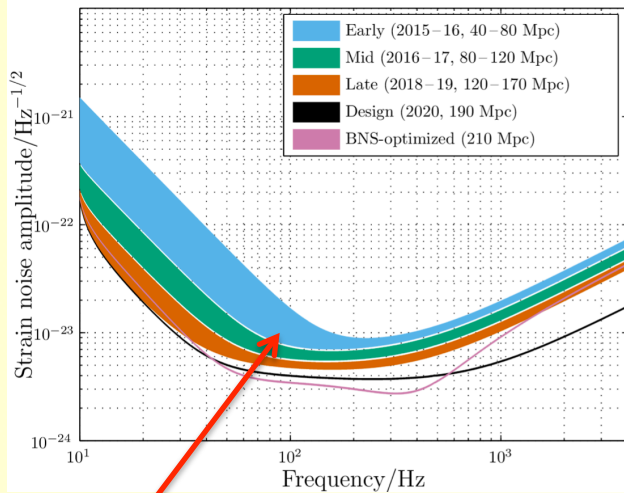


Szerencsére nincs a közelünkben feketelyuk-kettős!!

Második generációs interferometrikus gravitációshullám-detektorok hálózata



Advanced LIGO, Hanford, USA, 4km Advanced LIGO, Livingston, USA, 4km Advanced Virgo, Cascina, Italy, 3km KAGRA, Kamioka, Japan, 3km



GW150914
GW151226
GW170104
GW170814

Table 1 Plausible target detector sensitivities. The different phases match those in Figure 1. We quote the range, the average distance to which a signal could be detected, for a $1.4M_{\odot}+1.4M_{\odot}$ binary neutron star (BNS) system and a $30M_{\odot}+30M_{\odot}$ binary black hole (BBH) system.

	LIGO		Virgo		KAGRA	
	BNS range/Mpc	BBH range/Mpc	BNS range/Mpc	BBH range/Mpc	BNS range/Mpc	BBH range/Mpc
Early	40 – 80	415 – 775	20 – 65	220 – 615	8 – 25	80 – 250
Mid	80 – 120	775 – 1110	65 – 85	615 – 790	25 – 40	250 – 405
Late	120 – 170	1110 – 1490	65 – 115	610 – 1030	40 – 140	405 – 1270
Design	190	1640	125	1130	140	1270



LIGO Scientific Collaboration

A collage of logos from various academic and research institutions participating in the LIGO Scientific Collaboration. The logos are arranged in a grid-like fashion across the page.

Top Row: Trinity University, University of Maryland, Andrews University, Washington State University, California State University Fullerton, The University of Alabama in Huntsville.

Second Row: Whitman College, American University, Sonoma State University, indigo, Montclair State University, University of Glasgow, Australian National University.

Third Row: Max Planck Institute for Gravitational Physics Albert Einstein Institute, University of Strathclyde, UWS, Texas Tech University, Tsinghua University, R.I.T., Goddard Space Flight Center, ICTP SAIFR.

Fourth Row: The University of Western Australia, PAH, MICHIGAN, CITA ICAT, West Virginia University, Southern University, University of Cambridge.

Fifth Row: The University of Chicago, Montana State University, A&T, The University of Mississippi, Monash University, Southern University, Columbia University.

Sixth Row: Caltech, Universitat de les Illes Balears, University of Minnesota, The University of Adelaide, University of Birmingham, The University of Melbourne.

Seventh Row: UTRGV, INPE, University of Florida, University of Washington, University of Wisconsin Milwaukee, Stracuse University.

Eighth Row: Monash University, University of Southampton, Northwestern University, Georgia Institute of Technology, Cardiff University.

Ninth Row: LSU, ACIGA, University of Southampton, Penn State, Charles Sturt University.

Tenth Row: Embry-Riddle Aeronautical University, Leibniz Universität Hannover, Penn State, Rutherford Appleton Laboratory.

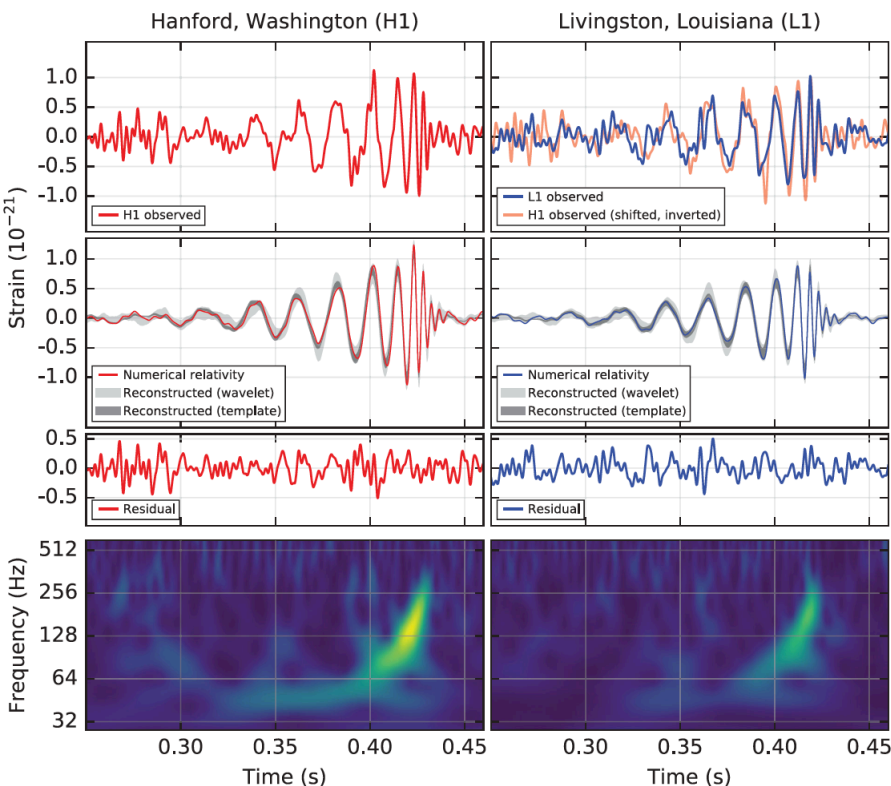
A gravitációs hullámok első közvetlen kimutatása: GW150914

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

GW150914: FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; SIMULATION OF BLACK HOLE HORIZONS (MIDDLE-TOP), BEST FIT WAVEFORM (MIDDLE-BOTTOM)

first direct detection of gravitational waves (GW) and first direct observation of a black hole binary

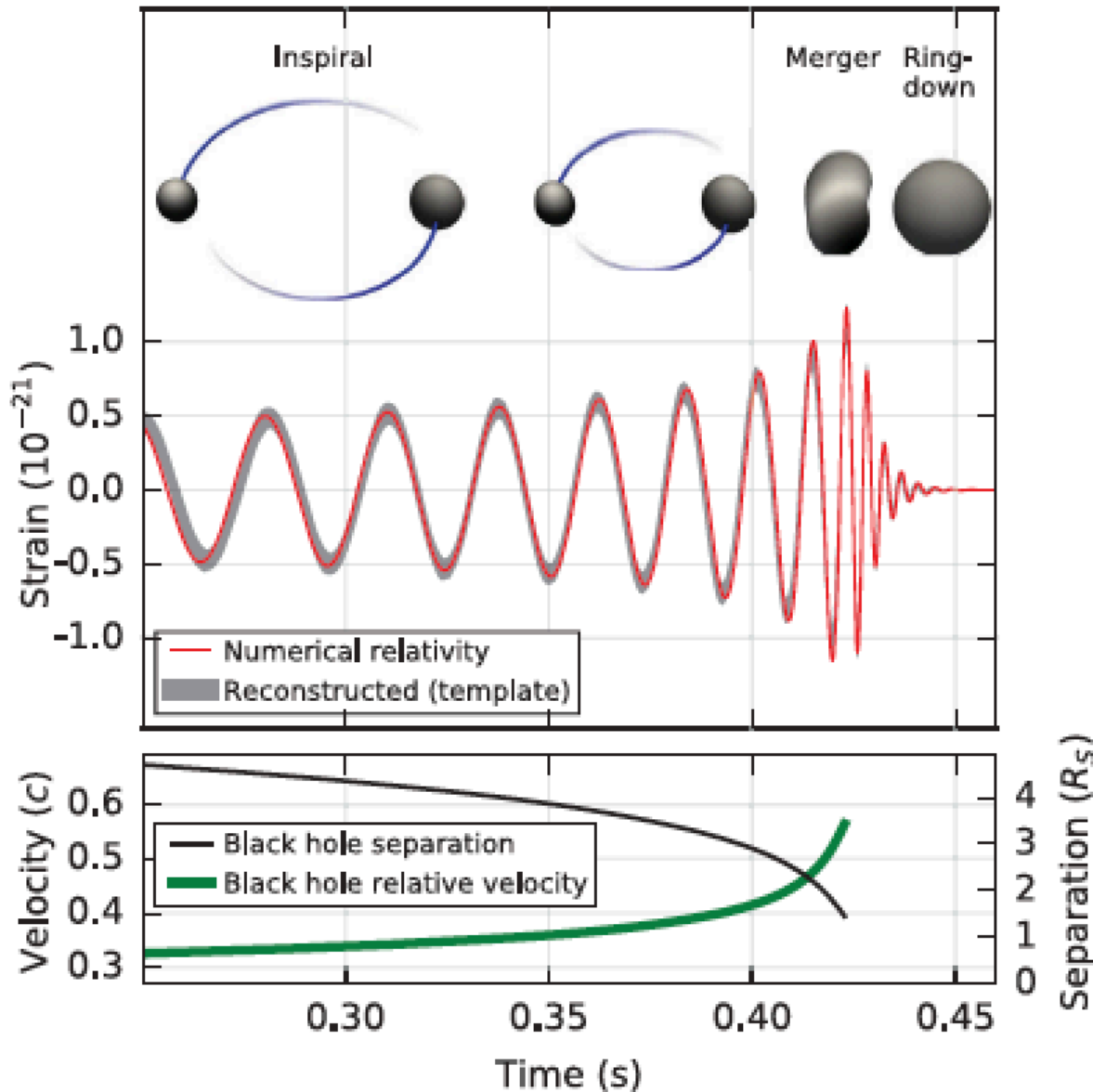


observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz	~10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	1×10^{-21}
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	± 0.002 fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 Mpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.054 to 0.136	peak speed of BHs	~ 0.6 c
signal-to-noise ratio	24	peak GW luminosity	3.6×10^{56} erg s ⁻¹
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M _⊙
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses	M _⊙	remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, 3.5×10^5 km ²
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< 1.2×10^{-22} eV
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc ⁻³ yr ⁻¹
mass ratio	0.6 to 1	online trigger latency	~ 3 min
primary BH spin	< 0.7	# offline analysis pipelines	5
secondary BH spin	< 0.9	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
remnant BH spin	0.57 to 0.72	papers on Feb 11, 2016	13
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
likely sky position	Southern Hemisphere		
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		

Detector noise introduces errors in measurement. Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear= 9.46×10^{12} km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= 10^3 Mpc, fm=femtometer= 10^{-15} m, M_⊙=1 solar mass= 2×10^{30} kg

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 !

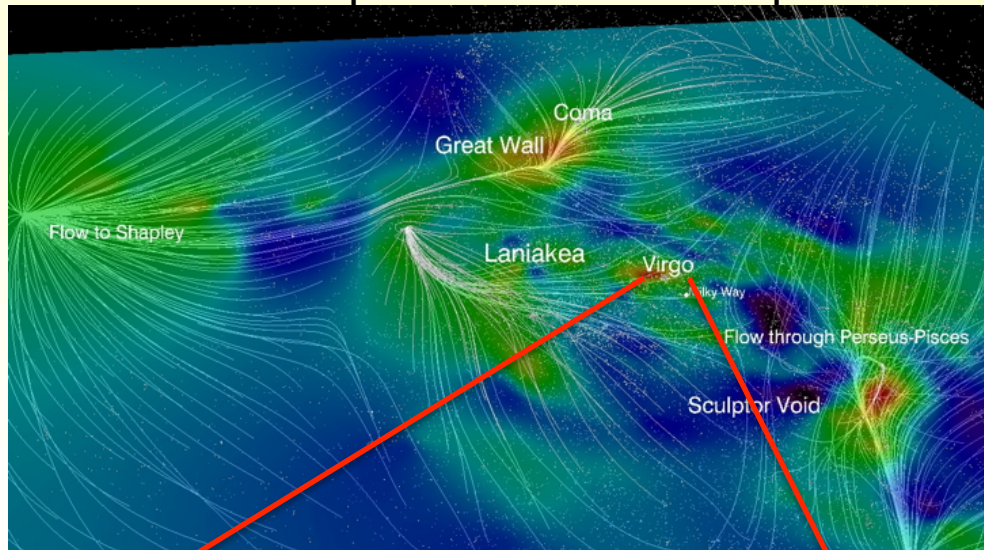
a nagy távolság miatt az Advanced LIGO lézerezinterferométereiben a proton méretének ezredrésznyi változását okozta !

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

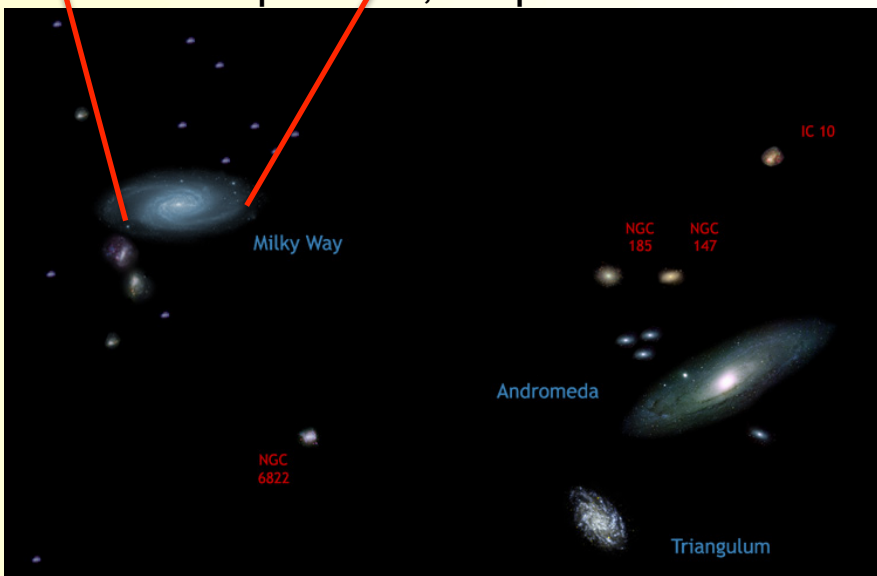
Tejútrendszer ~ 30 kpc



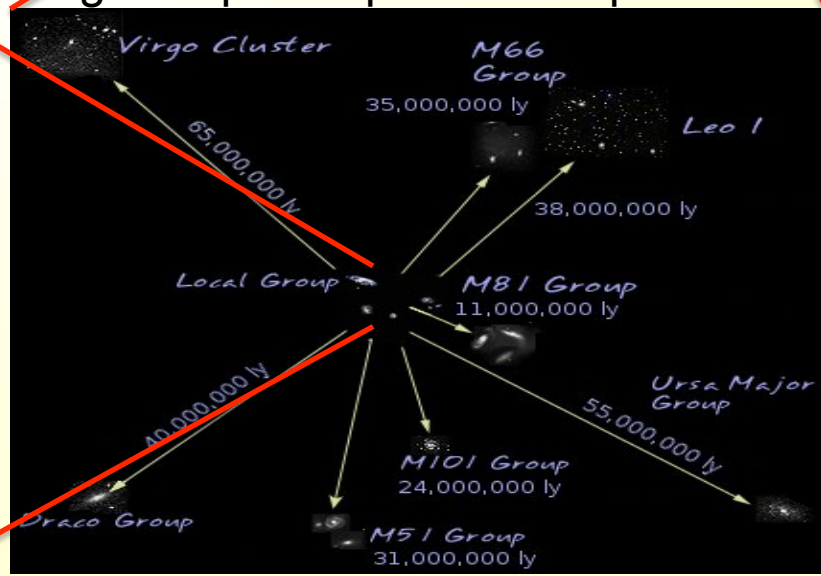
Laniakea szuperklaszter ~ 160 Mpc



Lokális Csoport ~ 3,1 Mpc



Virgo szupercsoport ~ 33 Mpc

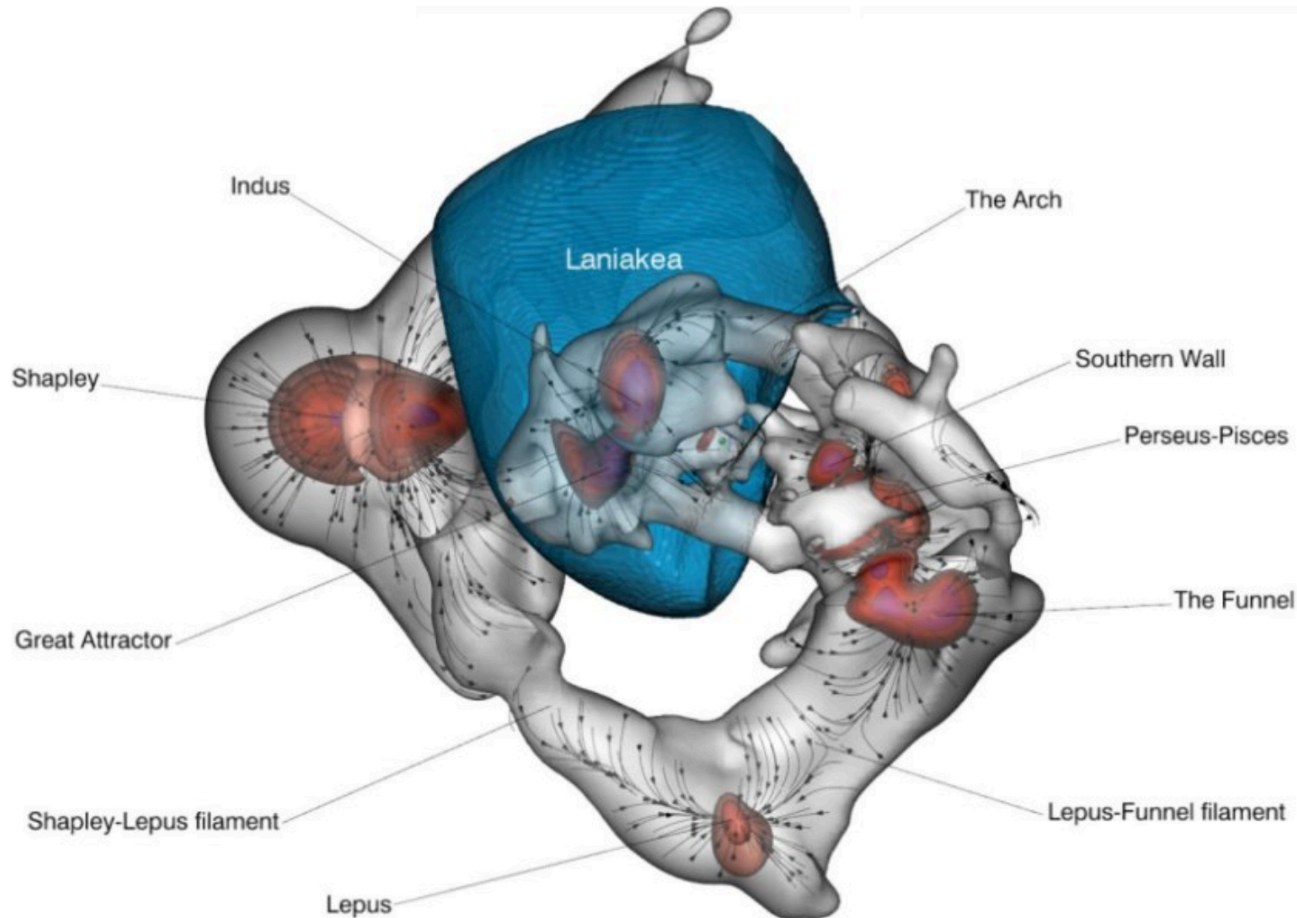


A lokális Univerzum feltérképezésének új módja !

<https://pionic.org/motions-of-thousands-of-galaxies-mapped>

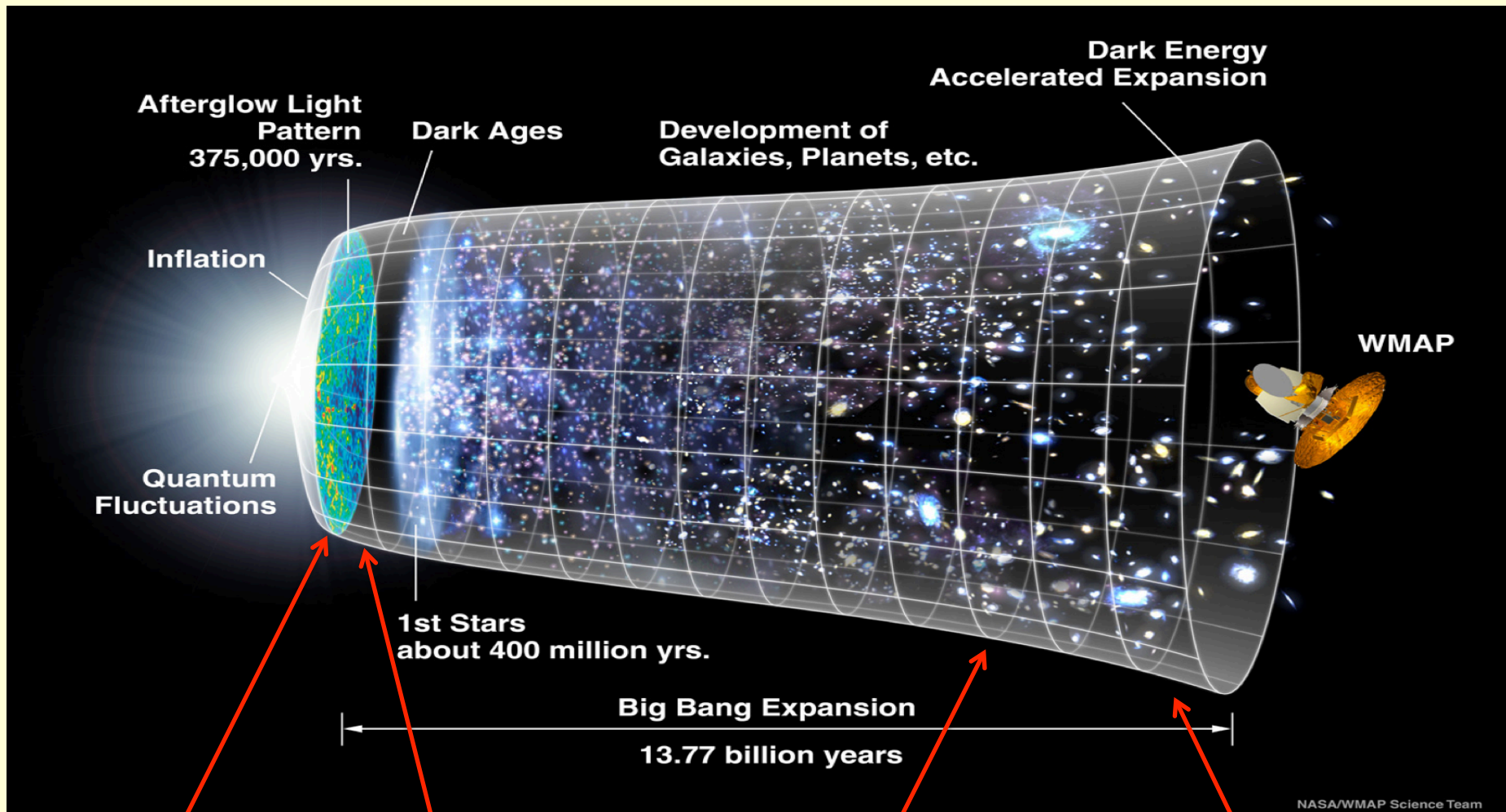
<https://player.vimeo.com/video/206210825?byline=0&badge=0&portrait=0&title=0&api=1&autoplay=1>

Motions Of Thousands Of Galaxies Mapped



The cosmic velocity web is represented by surfaces of knots in red and surfaces of filaments in gray. The black lines with arrows illustrate local velocity flows within filaments and toward knots. The Laniakea Supercluster basin of attraction that includes our Milky Way galaxy is represented by a blue surface. The region being displayed extends across one billion light years. Credit: Daniel Pomarede, Yehuda Hoffman, R. Brent Tully and Helene Courtois. Credit: Daniel Pomarede, Yehuda Hoffman, R. Brent Tully, Helene Courtois

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



Ősrobbanás

(13,7 milliárd év)

Sötét Korszak

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

elkezdődik a

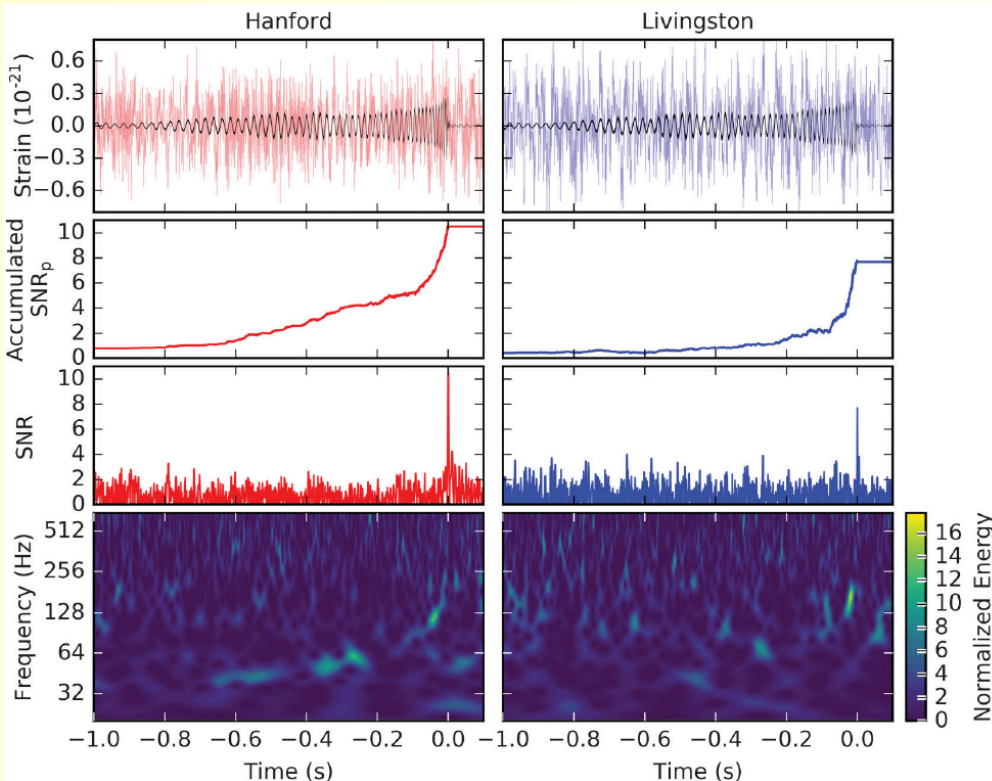
gyorsuló tágulás
~ $z=0,4$ (1700 Mpc)

kb. innen érkezett

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

A gravitációs hullámok második közvetlen kimutatása: GW151226

Phys. Rev. Lett.
116, 241103 (2016)

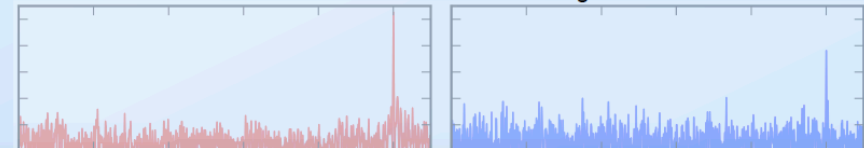


GW151226: FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND SIGNAL-TO-NOISE RATIO TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; EXAMPLE WAVEFORM (MIDDLE)

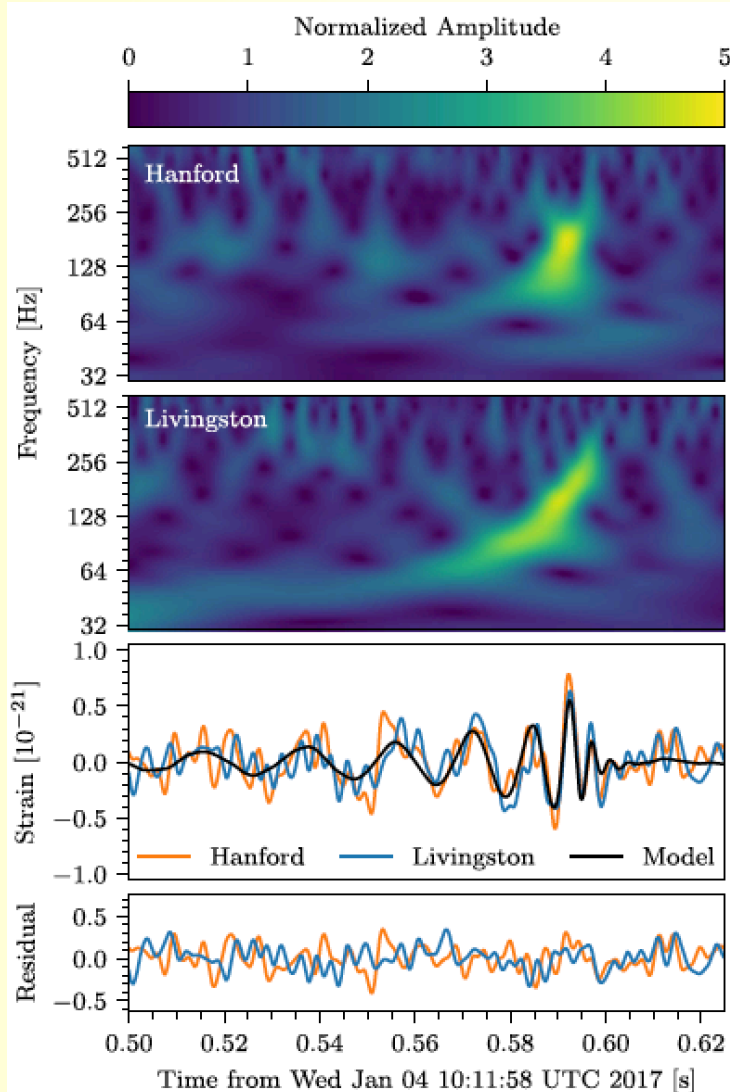
observed by	LIGO L1, H1	duration from 35 Hz	~ 1 s
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 35 Hz	~ 55
date	26 Dec 2015	signal arrival time	arrived in H1 1 ms after
time	03:38:53 UTC	delay	L1
distance	250 to 620 Mpc	peak GW strain	$\sim 3.4 \times 10^{-22}$
redshift	0.05 to 0.13	peak displacement of interferometers arms	$\sim \pm 0.7$ am
signal-to-noise ratio	13	frequency/wavelength at peak GW strain	420 Hz, 710 nm
false alarm prob.	~ 1 in 10 million	peak speed of BHs	~ 0.6 c
Source Masses M_{\odot}		peak GW luminosity	2 to 4×10^{56} erg s^{-1}
total mass	20 to 28	radiated GW energy	0.8-1.1 M_{\odot}
primary BH	11 to 23	remnant ringdown freq.	~ 750 Hz
secondary BH	5 to 10	remnant damping time	0.00 ~ 1.3 ms
remnant BH	19 to 27	remnant size, area	60 km, 3.5×10^4 km 2
mass ratio	> 0.28	online trigger latency	~ 67 s
spin of one of the black holes	> 0.2	# offline analysis pipelines	2
remnant BH spin	0.7 to 0.8		
resolved to	~ 850 sq. deg.		

Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1/H1=LIGO Livingston/Hanford; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, am=attometer= 10^{-18} m, M_{\odot} =1 solar mass= 2×10^{30} kg



A gravitációs hullámok harmadik közvetlen kimutatása: GW170104

Phys. Rev. Lett.
118, 221101 (2017)



GW170104: FACTSHEET

Background Images: time-frequency trace (top), H1 and L1 time series and maximum-likelihood binary black hole model (middle top), residuals between data and best-fit model (middle bottom), reconstructed waveforms from wavelet and binary black hole analyses (bottom)

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 0.25 to 0.31 s
source type	black hole (BH) binary	# of cycles from 30 Hz	~ 14 to 16
date	04 Jan 2017	signal arrival time delay	arrived at H1 3 ms before L1
time	10:11:58.6 UTC	credible region sky area	1200 sq. deg.
signal-to-noise ratio	13	peak GW strain	$\sim 5 \times 10^{-22}$
false alarm rate	< 1 in 70,000 years	peak displacement of interferometer arm	$\sim \pm 1$ am
probability of astrophysical origin	> 0.99997	frequency at peak GW strain	160 to 199 Hz
distance	1.6 to 4.3 billion light-years	wavelength at peak GW strain	1510 to 1880 km
redshift	0.10 to 0.25	peak GW luminosity	1.8 to 3.8×10^{56} erg s $^{-1}$
total mass	46 to 57 M_{\odot}	radiated GW energy	1.3 to 2.6 M_{\odot}
primary BH mass	25 to 40 M_{\odot}	remnant ringdown freq.	297 to 373 Hz
secondary BH mass	13 to 25 M_{\odot}	remnant damping time	2.5 to 3.2 ms
mass ratio	0.36 to 0.94	consistent with general relativity?	passes all tests performed
remnant BH mass	44 to 54 M_{\odot}	graviton mass combined bound	$\leq 7.7 \times 10^{-23}$ eV/c 2
remnant BH spin	0.39 to 0.7	evidence for dispersion of GWs	none
remnant size (effective radius)	123 to 150 km		
remnant area	1.9 to 2.8×10^5 km 2		
effective spin parameter	-0.42 to 0.09		
effective precession spin parameter	unconstrained		

Parameter ranges correspond to 90% credible intervals.

Acronyms:

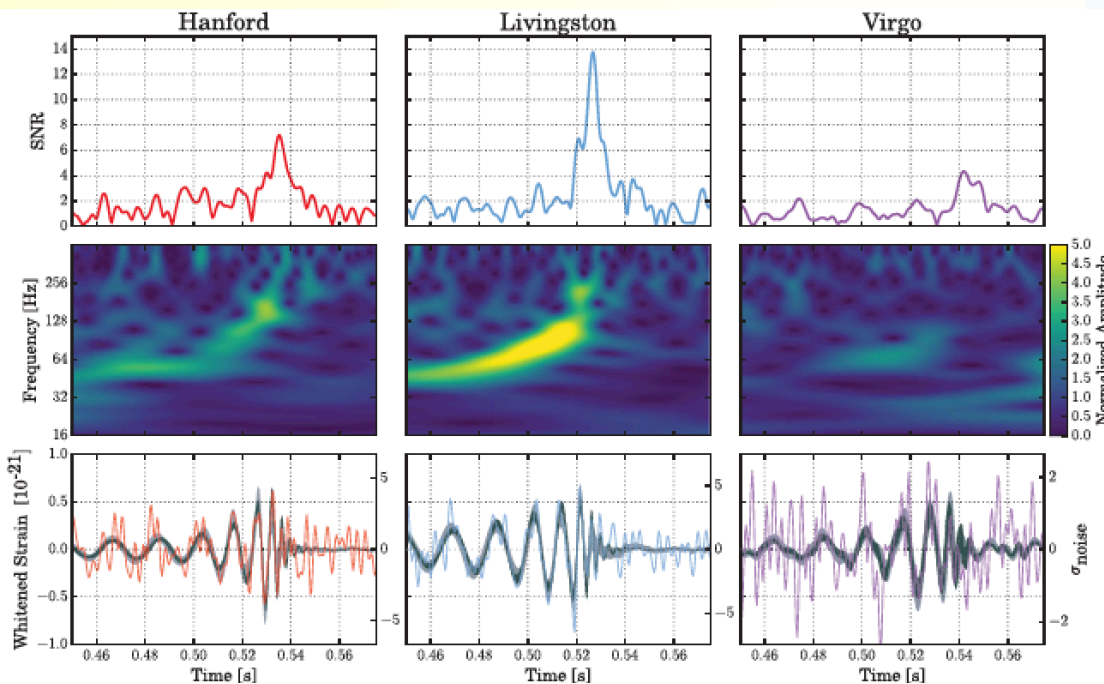
L1/H1=LIGO Livingston/Hanford, am=attometer= 10^{-18} m, M_{\odot} =1 solar mass= 2×10^{30} kg

A gravitációs hullámok negyedik közvetlen kimutatása: GW170814

Phys. Rev. Lett.
119, 141101 (2017)

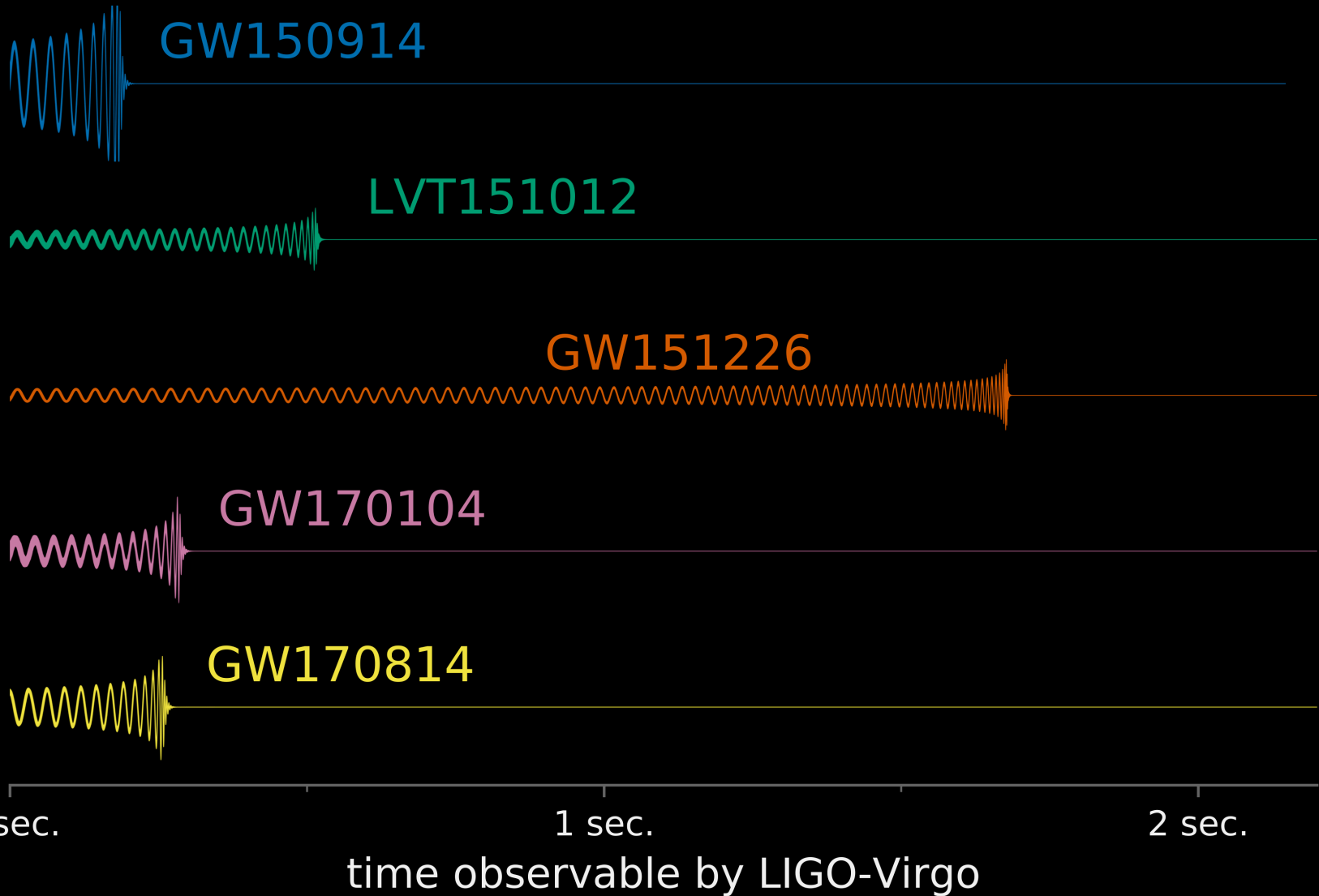
GW170814: FACTSHEET

observed by	H1, L1, V1	duration from 30 Hz	~ 0.26 to 0.28 s
source type	black hole (BH) binary	# of cycles from 30 Hz	~ 15 to 16
date	14 Aug 2017	credible region sky area (with V1)	60 deg ²
time	10:30:43 UTC	credible region sky area (without V1)	1160 deg ²
online trigger latency	~ 30 s	latitude, longitude (at time of arrival)	45° S, 73° W
signal arrival time delay	at L1 8 ms before H1 and 14 ms before V1	sky location	in direction of Eridanus constellation
signal-to-noise ratio	18	*RA, Dec	03 ^h 11 ^m , -44°57 ^s
false alarm rate		Peak GW strain (10 ⁻²¹) (H1, L1, V1)	~ 6, 6, 5
probability of noise producing V1 SNR peak	0.3%	peak stretching of interferometer arm (H1, L1, V1)	~ ± 1.2, 1.2, 0.8 m
distance	1.1 to 2.2 billion light-years	frequency at peak GW strain	155 to 203 Hz
redshift	0.07 to 0.14	wavelength at peak GW strain	1480 to 1930 km
total mass	53 to 59 M _⊙	peak GW luminosity	3.2 to 4.2 × 10 ⁵⁶ erg s ⁻¹
primary BH mass	28 to 36 M _⊙	radiated GW energy	2.4 to 3.1 M _⊙ c ²
secondary BH mass	21 to 28 M _⊙	remnant ringdown freq.	312 to 345 Hz
mass ratio	0.6 to 1.0	remnant damping time	3.1 to 3.6 ms
remnant BH mass	51 to 56 M _⊙	consistent with general relativity?	passes all tests performed
remnant BH spin	0.65 to 0.77	evidence for dispersion of GWs	none
remnant size (effective radius)	139 to 153 km		
remnant area	2.4 to 2.9 × 10 ⁸ km ²		
effective spin parameter	-0.06 to 0.18		
effective precession spin parameter	unconstrained		

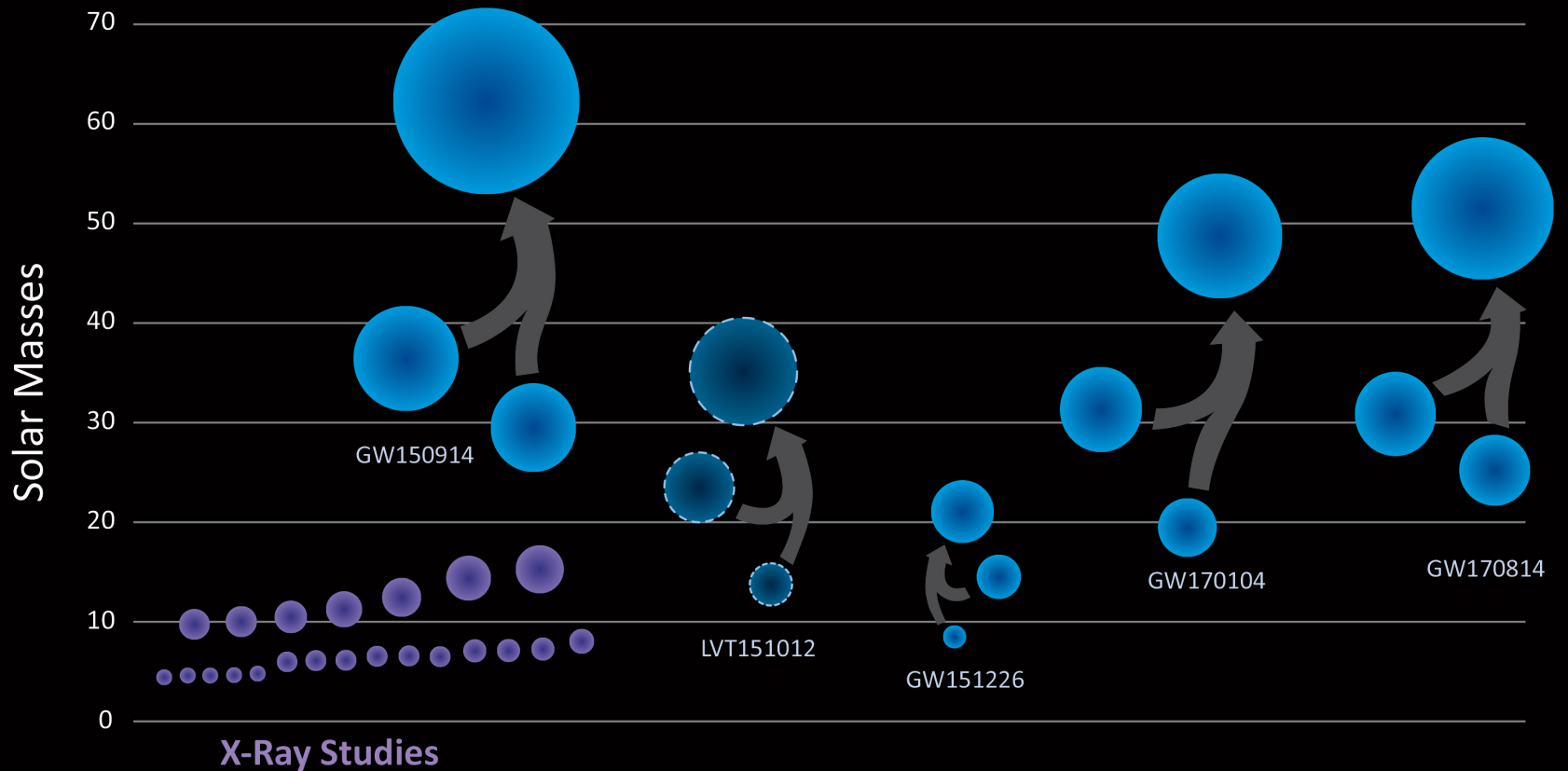


Parameter ranges correspond to 90% credible intervals.
L1/H1=LIGO Livingston/Hanford, V1=Virgo, am=attometer=10⁻¹⁸ m, M_⊙=1 solar mass=2 × 10³⁰ kg
Background Images (H1, L1, V1 from left to right): time-frequency trace (top), sky maps (middle), and time series with reconstructed waveforms from modeled and un-modeled searches (bottom)
* Maximum a Posteriori estimates

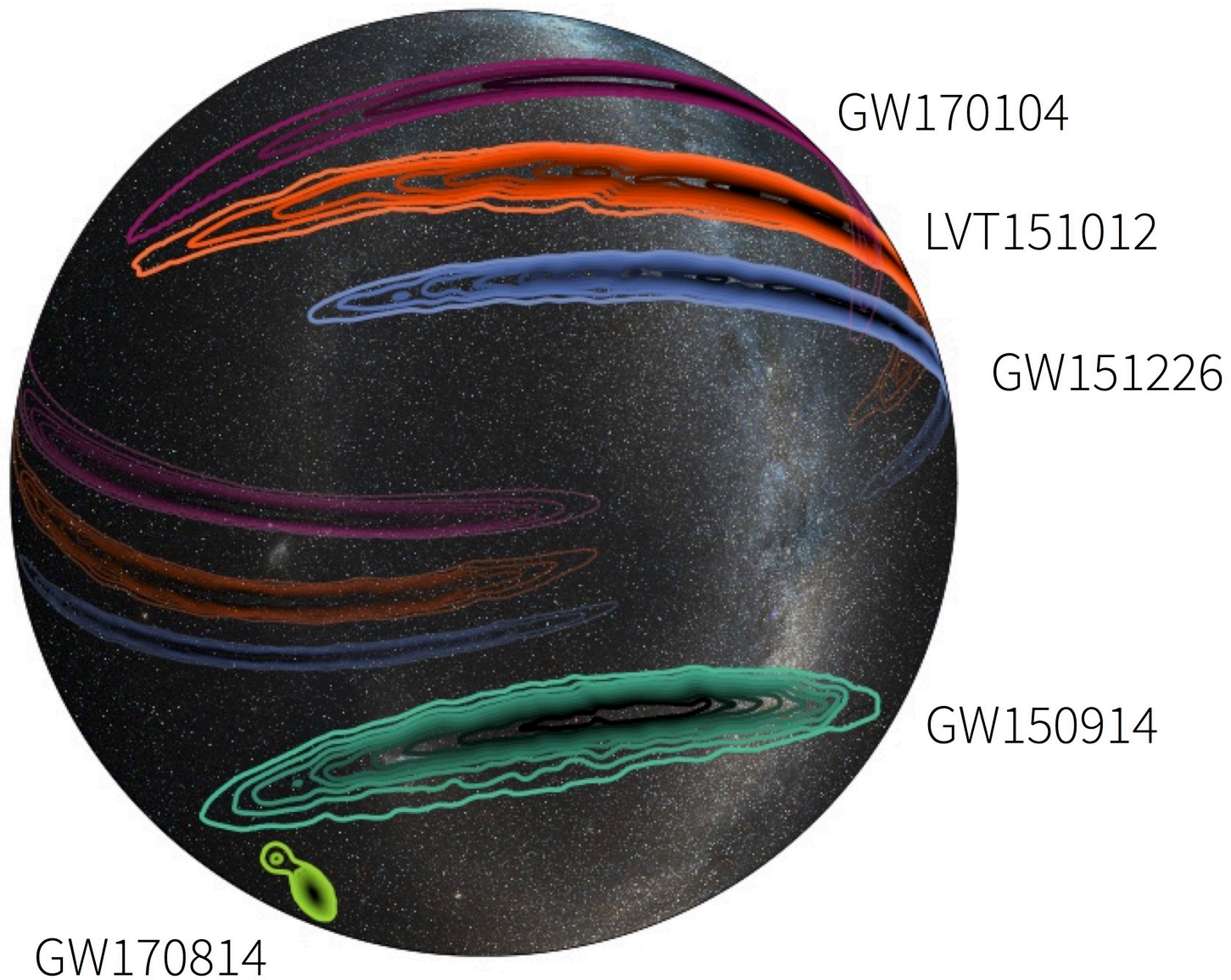
A gravitációs hullámok összehasonlítása



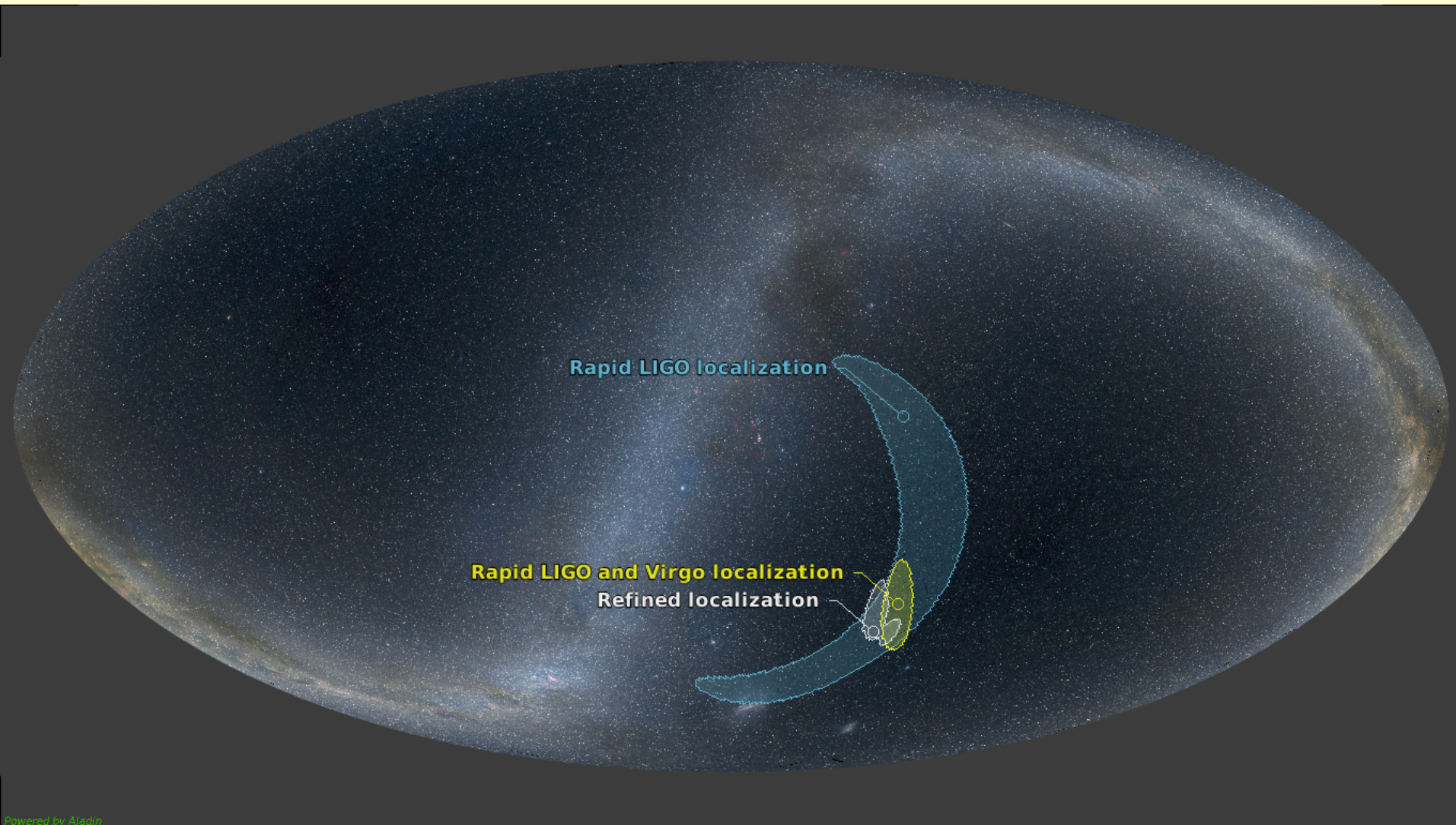
Black Holes of Known Mass



Források égi helyzete



A harmadik detektor szerepe a lokalizációban



Fizikai Nobel-díj 2017



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed

Rainer Weiss

Prize share: 1/2



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed

Barry C. Barish

Prize share: 1/4



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed

Kip S. Thorne

Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2017 was divided, one half awarded to Rainer Weiss, the other half jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne *"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"*.

A gravitációs hullámok elméleti tárgyalása

Kompakt kettősök posztnewtoni közelítésben:

Érvényesség:

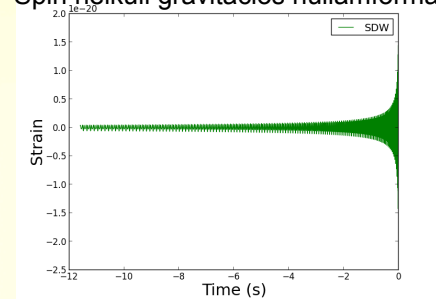
- a horizonttól távol
- fénysebességnél jóval kisebb sebességeknél

Perturbált Kepler dinamika:

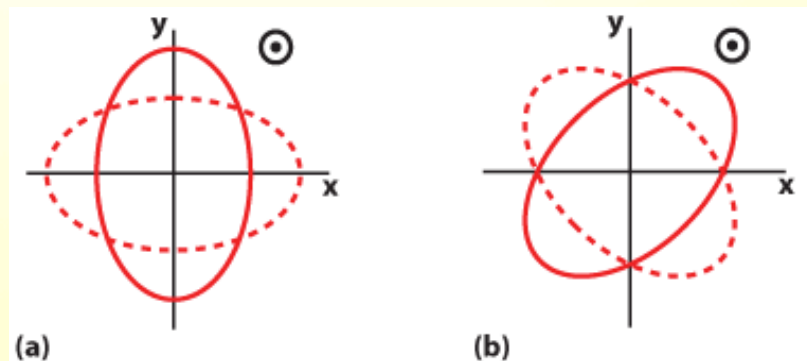
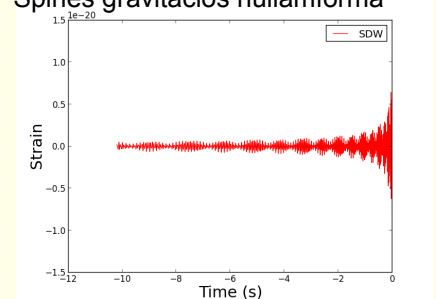
- általános relativitáselméleti korrekciók 1PN, 2PN, ...
(befolyásolják a pálya alakját)
- spinkorrekciók 1.5 PN, 2PN, ...
(mozgatják a pályasíkot is)
- kvadrupól-korrekciók 2PN, ...
(neutroncsillag állapotegyenletével vagy feketelyuk forgásával kapcsolatos)
- gravitációs sugárzás 2.5 PN, ...
(energiát,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

Az általános relativitáselméletben a gravitációs sugárzás kétféle polarizációban fordul elő:
(ezek lineáris kombinációja)

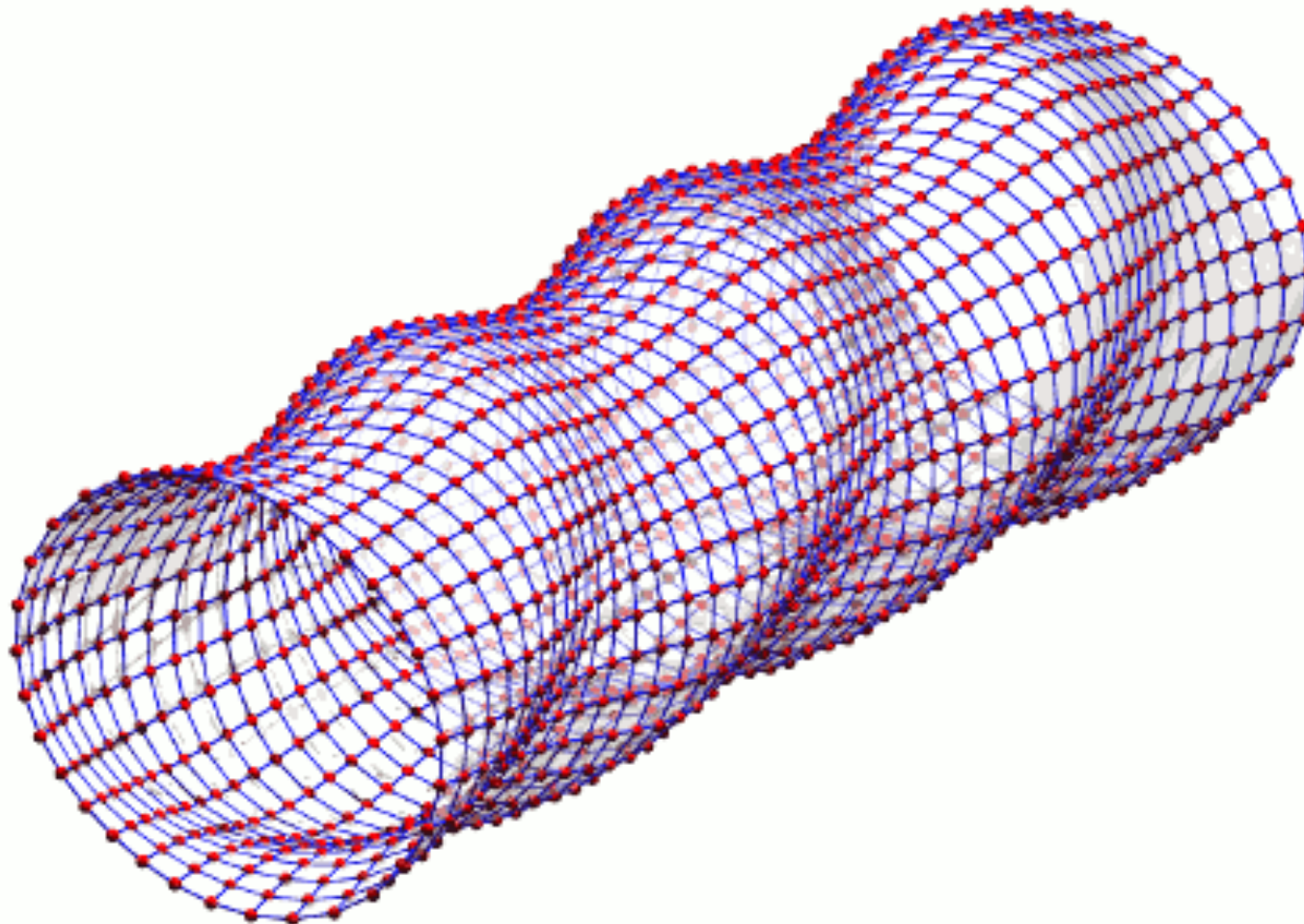
Spin nélküli gravitációs hullámforma



Spines gravitációs hullámforma



A gravitáció fénysebességgel terjed: gravitációs hullámok

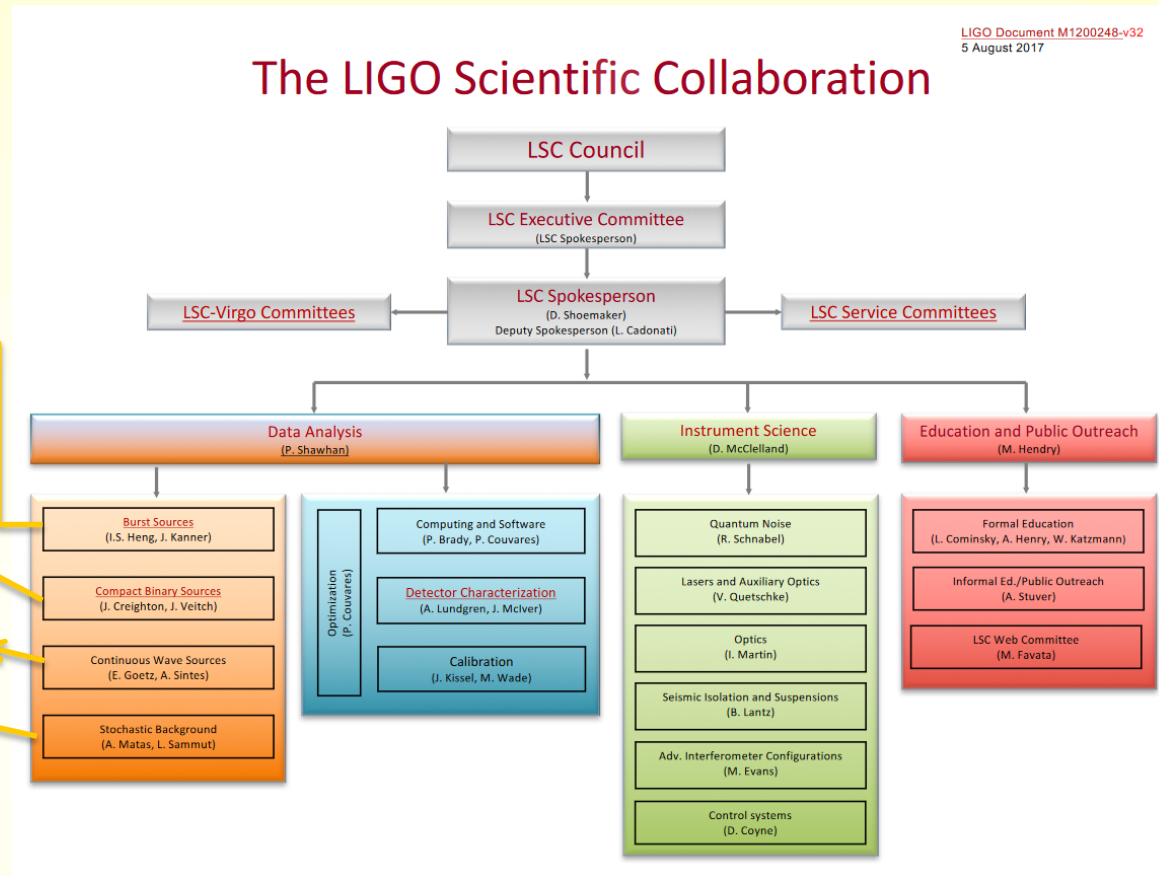


www.einstein-online.info

Szegedi Gravitációelméleti csoport LIGO tevékenysége

LIGO kollaboráció GTT kereséssel foglalkozó csoportjai:

- Kítörésszerű (Burst)
- Kompakt kettősök (Compact Binary Coalescence)
→ **Szegedi csoport ennek része**
- Periodikus (Continuous wave)
- Sztochasztikus háttér



A CBC csoport két „Offline” elemző szoftvert használ : **gstlal** és **PyCBC** .

A 2 szoftver különböző módszerrel készült, más módon keresnek gravitációs hullámot. Feladatuk 5 napnyi, mindkét detektor által felvett adatsorok elemzése. Akkor beszélhetünk detektálásról, ha mindkét módszerrel megtalálják a jelet.

PyCBC keresés folyamata

PyCBC kereső szoftver futtatása és felügyelete a mérési adatsoron (LIGO kollaboráció által elérhető szuperszámítógépen, pl.: NSF által támogatott XSEDE, Open Science Grid, illetve az AEI Atlas)

Kiszűrendő időszakokat figyelembe véve újra előkészíteni a futtatást

Leghangosabb zajforrások idejének kigyűjtése és átadása az adatminőséggel foglalkozó csoportnak

Az adatsor feldolgozásakor a szoftver kiveszi a lehetséges (mindkét detektorban megjelenő) jeleket (így lesz „vak” az analízis). Ezen, a csak zajokat tartalmazó adatsoron javításokat hajt végre, megtisztítva azt a nyilvánvaló zajforrásoktól. Amikor már nem javítható az adatsor minősége, ezt a zárt analízist a kollaboráció CBC csoportja előtt prezentálja a felelős kutató és a CBC csoport dönt arról, hogy javítható-e még az adatsor. Ha nem, a hasonló javításon átesett teljes adatsort tartalmazó „zárt dobozt” kinyitja az adatsorért felelős kutató, és kiderül hogy az adatsor tartalmaz-e gravitációs hullámot

Szegedi Gravitációelméleti csoport LIGO tevékenysége



PyCBC csoportban résztvevő intézetek:

- Albert Einstein Institute (Németország)
- NASA Gravitational Astrophysics Laboratory (Amerikai Egyesült Államok)
- California Institute of Technology (Amerikai Egyesült Államok)
- Syracuse University (Amerikai Egyesült Államok)
- Szegedi Tudományegyetem (Magyarország)
- Cardiff University (Egyesült Királyság)
- Abilene Christian University (Amerikai Egyesült Államok)

Tápai Márton (SZTE) és Vasúth Mátyás (Wigner) a hannoveri Albert Einstein Intézet Observációs Relativitáselmélet és Kozmológia csoportjában tett munkálátogatás során ismerkedtek meg a PyCBC szoftverrel:

<https://github.com/ligo-cbc/pycbc>

Az Advanced LIGO második mérési időszakában (O2) során

Tápai Márton három mérési adatsor PyCBC elemzéséért felelt, melyből az egyik adatsor gravitációs hullámot tartalmazott!



1. alkalmazás: kaméleon pályák (egyenlő tömegekre)

A *kaméleon pályákon* a lokális pályaelemek (newtoni értelemben) elliptikusak a pericentrum közelében, viszont *hiperbólikusak nagyobb távolságokon*

Magyarázat: az általános relativitáselmélet erősebb gravitációt jósol kis távolságokon a newtoninál

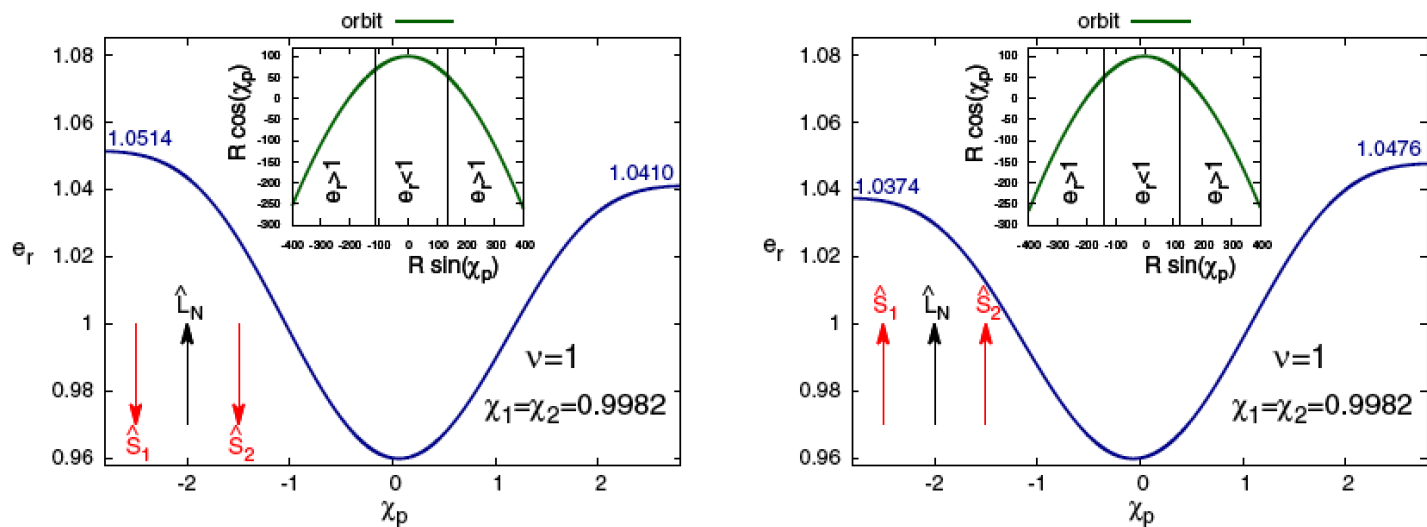


FIG. 2 (color online). Chameleon orbits due to 1PN and SO effects for binaries with equal masses and spins ($\chi_1 = \chi_2 = 0.9982$). The curves and initial conditions are as on Fig. 1. On the left (right) panel the spins are antialigned (aligned) with the orbital angular momentum.

Spinning compact binary dynamics and chameleon orbits

L. Á. Gergely and Z. Keresztes, Phys. Rev. D **91**, 024012 (2015)

1. alkalmazás: kaméleon pályák (1:30 tömegarány)

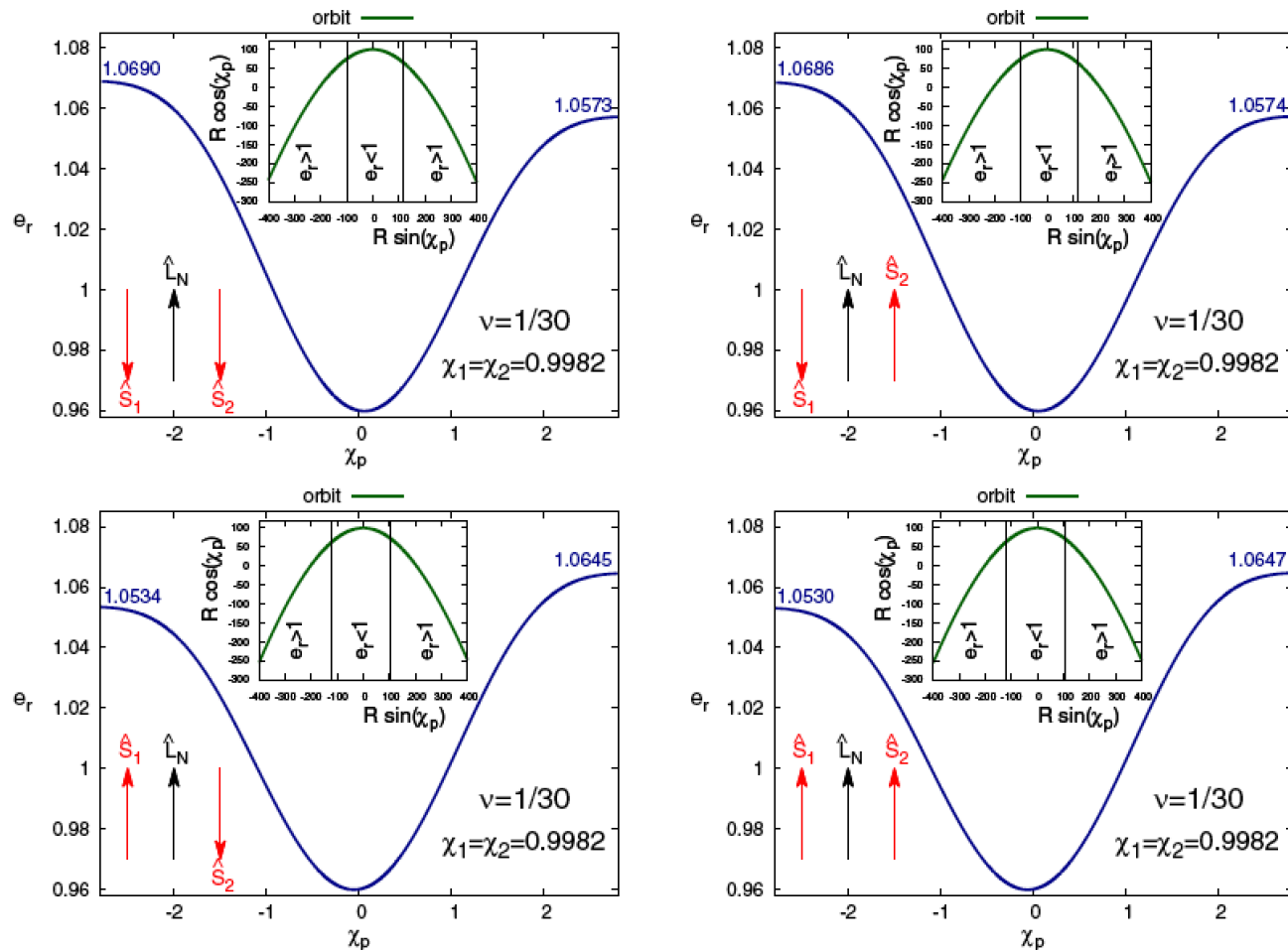


FIG. 3 (color online). Chameleon orbits created by 1PN and SO effects are represented for unequal mass ($\nu = 1/30$) spinning binaries. The same functions as on Fig. 1 are shown for the same initial conditions. The relative direction of the spins and the orbital momentum are indicated by arrows. The dimensionless spin values are the same $\chi_1 = \chi_2 = 0.9982$ in all panels.

2PN szekuláris dinamika

Secular precessing compact binary dynamics, spin and orbital angular momentum flip-flops
M.Tápai, Z. Keresztes, L. Á. Gergely, LIGO Document P1600207, submitted to Phys. Rev D

- Precesszáló kettős 2PN pontosságig **konzervatív szekuláris fejlődése**, vezető rendű **spín-pálya, spín-spín és tömeg kvadrupólus - monopólus** járulékokkal
- A **spín és pályaimpulzusmomentum poláris és azimutális szögeinek**, valamint a **periasztron argumentumának fejlődése elsőrendű közönséges differenciálegyenletek zárt rendszere** szerint
- A pillanatnyi dinamikával ellentétben a szekuláris dinamika **autonóm**

A pálya alakját jellemző paraméterek (félnagy tengely és excentricitás) megmaradnak:

$$\bar{l}_r = \bar{l}_r^{PN} = \bar{l}_r^{SO} = \bar{l}_r^{SS} = \bar{l}_r^{QM} = \bar{l}_r^{2PN} = 0$$

$$\bar{e}_r = \bar{e}_r^{PN} = \bar{e}_r^{SO} = \bar{e}_r^{SS} = \bar{e}_r^{QM} = \bar{e}_r^{2PN} = 0$$

→ A 2PN szekuláris dinamika egyszerűbb a pillanatnyinál

2PN szekuláris dinamika: Euler szögek

Inklináció:

$$\bar{\alpha}^{PN} = 0 ,$$

$$\bar{\alpha}^{SO} = \frac{\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^3} \sum_{k=1}^2 (4\nu^{2k-3} + 3) \times \chi_k \sin \kappa_k \cos(\psi_p + \zeta_k) ,$$

$$\bar{\alpha}^{SS} = -\frac{3\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^4} \chi_1 \chi_2 \times [\sin \kappa_1 \cos \kappa_2 \cos(\psi_p + \zeta_1) + \cos \kappa_1 \sin \kappa_2 \cos(\psi_p + \zeta_2)] ,$$

$$\bar{\alpha}^{QM} = -\frac{3\eta\pi}{2\mathfrak{I} \bar{l}_r^4} \sum_{k=1}^2 \nu^{2k-3} w_k \chi_k^2 \times \sin 2\kappa_k \cos(\psi_p + \zeta_k) .$$

$$\bar{\alpha}^{2PN} = 0 .$$

Felszálló csomó hossza:

$$\bar{\phi}_n^{PN} = 0 ,$$

$$\bar{\phi}_n^{SO} = -\frac{\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^3 \sin \alpha} \sum_{k=1}^2 (4\nu^{2k-3} + 3) \times \chi_k \sin \kappa_k \sin(\psi_p + \zeta_k) ,$$

$$\bar{\phi}_n^{SS} = \frac{3\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^4 \sin \alpha} \chi_1 \chi_2 \times [\sin \kappa_1 \cos \kappa_2 \sin(\psi_p + \zeta_1) + \cos \kappa_1 \sin \kappa_2 \sin(\psi_p + \zeta_2)] ,$$

$$\bar{\phi}_n^{QM} = \frac{3\eta\pi}{2\mathfrak{I} \bar{l}_r^4 \sin \alpha} \sum_{k=1}^2 \nu^{2k-3} w_k \chi_k^2 \times \sin 2\kappa_k \sin(\psi_p + \zeta_k) ,$$

$$\bar{\phi}_n^{2PN} = 0 .$$

Periasztron argumentuma:

$$\bar{\psi}_p^{PN} = \frac{6\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^2} ,$$

$$\bar{\psi}_p^{SO} = -\frac{\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^3} \sum_{k=1}^2 (4\nu^{2k-3} + 3) \times \chi_k [2 \cos \kappa_k + \cot \alpha \sin \kappa_k \sin(\psi_p + \zeta_k)] ,$$

$$\bar{\psi}_p^{SS} = \frac{3\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^4} \chi_1 \chi_2 \times \{ \cot \alpha [\sin \kappa_1 \cos \kappa_2 \sin(\psi_p + \zeta_1) + \cos \kappa_1 \sin \kappa_2 \sin(\psi_p + \zeta_2)] + 2 \cos \kappa_1 \times \cos \kappa_2 - \sin \kappa_1 \sin \kappa_2 \cos(\zeta_2 - \zeta_1) \} ,$$

$$\bar{\psi}_p^{QM} = \frac{3\eta\pi}{2\mathfrak{I} \bar{l}_r^4} \sum_{k=1}^2 \nu^{2k-3} w_k \chi_k^2 \times [\cot \alpha \sin 2\kappa_k \sin(\psi_p + \zeta_k) - 3 \sin^2 \kappa_k + 2] ,$$

$$\bar{\psi}_p^{2PN} = \frac{3\pi}{2\mathfrak{I} \bar{l}_r^4} [33\bar{e}_r^2 - 4\eta - 6\bar{e}_r^2 \eta + 2] .$$

→ A 2PN szekuláris dinamika egyszerűbb a pillanatnyinál

2PN szekuláris dinamika: spin szögek

Spin polár szögek:

$$\bar{\kappa}_i^{PN} = 0 ,$$

$$\bar{\kappa}_i^{SO} = \frac{\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^3} \times (4\nu^{2j-3} + 3) \chi_j \sin \kappa_j \sin (\zeta_i - \zeta_j) ,$$

$$\bar{\kappa}_i^{SS} = -\frac{\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^4} \chi_j \sin \kappa_j \times \sin (\zeta_i - \zeta_j) (2\bar{l}_r \nu^{2j-3} + 3\chi_i \cos \kappa_i) ,$$

$$\bar{\kappa}_i^{QM} = -\frac{3\eta\pi}{2\mathfrak{I} \bar{l}_r^4} \nu^{2j-3} w_j \chi_j^2 \times \sin 2\kappa_j \sin (\zeta_i - \zeta_j) ,$$

$$\bar{\kappa}_i^{2PN} = 0 ,$$

Spin azimutális szögek:

$$\bar{\zeta}_i^{PN} = -\bar{\psi}_p^{PN} ,$$

$$\bar{\zeta}_i^{SO} = \frac{\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^3} \{ \bar{l}_r (4 + 3\nu^{3-2i}) + 3 (4\nu^{2i-3} + 3) \chi_i \cos \kappa_i + (4\nu^{2j-3} + 3) \chi_j \times [2 \cos \kappa_j + \cot \kappa_i \sin \kappa_j \cos (\zeta_i - \zeta_j)] \}$$

$$\bar{\zeta}_i^{SS} = -\frac{2\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^3} \nu^{2j-3} \chi_j [\cos \kappa_j + \cot \kappa_i \sin \kappa_j \cos (\zeta_i - \zeta_j)] - \frac{3\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^4} \chi_i \chi_j \times \{ \cot \kappa_i [3 \sin \kappa_i \cos \kappa_j + \cos \kappa_i \sin \kappa_j \cos (\zeta_i - \zeta_j)] - \sin \kappa_i \sin \kappa_j \cos (\zeta_i - \zeta_j) \} ,$$

$$\bar{\zeta}_i^{QM} = -\frac{6\eta\pi}{\mathfrak{I} \bar{l}_r^3} w_i \chi_i \cos \kappa_i - \frac{3\eta\pi}{2\mathfrak{I} \bar{l}_r^4} \sum_{k=1}^2 w_k \nu^{2k-3} \chi_k^2 \times [(2 - 3 \sin^2 \kappa_k) + \cot \kappa_i \sin (2\kappa_k) \cos (\zeta_i - \zeta_k)] ,$$

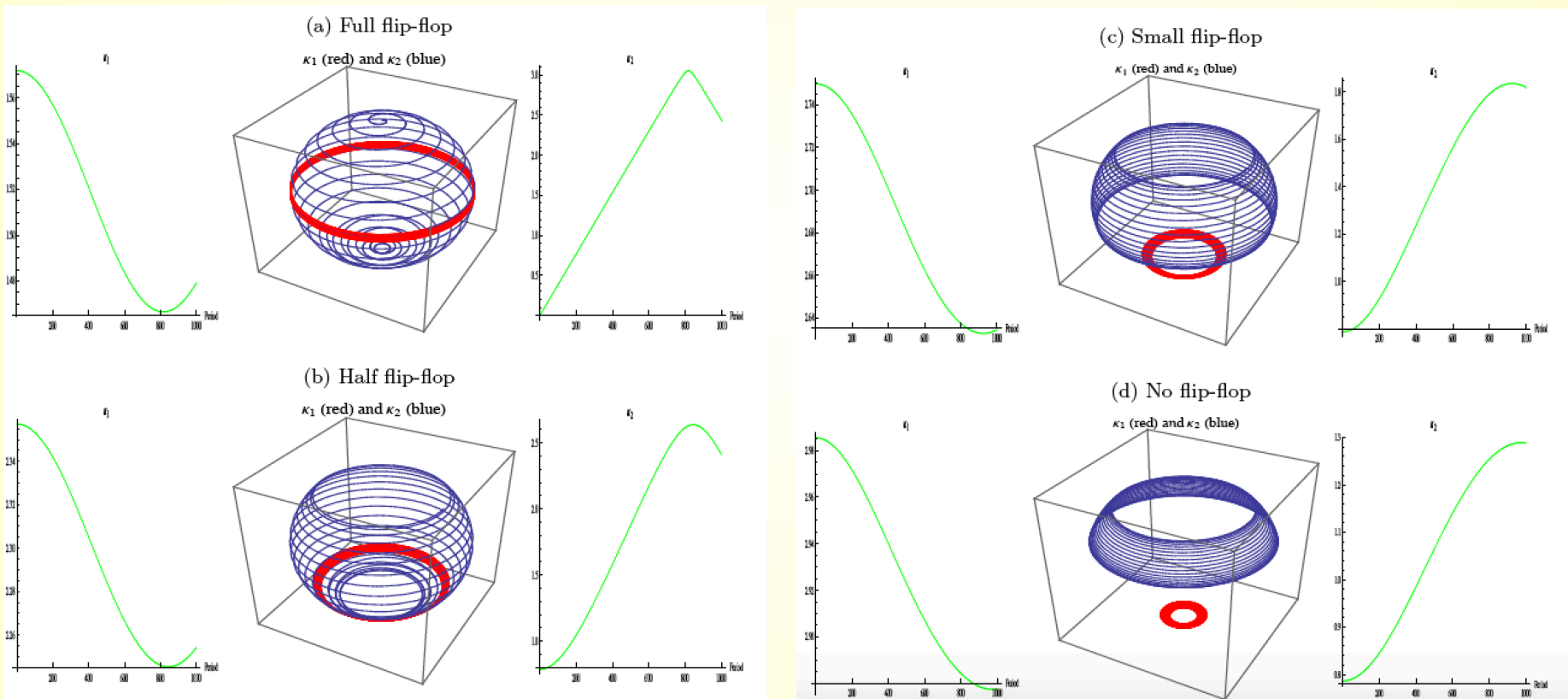
$$\bar{\zeta}_i^{2PN} = -\bar{\psi}_p^{2PN} .$$

→ A 2PN szekuláris dinamika egyszerűbb a pillanatnyinál

2. alkalmazás: A flip-flop effektus vizsgálata

A kisebbik spin az egyik pályától a másikig bolyong (numerikus vizsgálatok partikuláris esetekre)
C. O. Lousto, J. Healy, Flip-flopping binary black holes, Phys. Rev. Lett. **114**, 141101 (2015).

Analitikusan vizsgálhatjuk az effektust!



Secular precessing compact binary dynamics, spin and orbital angular momentum flip-flops
M. Tápai, Z. Keresztes, L. Á. Gergely, LIGO Document P1600207, publikálásra benyújtva, Phys. Rev D

3. alkalmazás: A spin-flip effektus

- GH kibocsátás miatt a nagyobbik spin a \mathbf{J} irányába fordul

The spin-flip phenomenon in supermassive binary black hole mergers

L. Á. Gergely, P. L. Biermann, *Astrophys. J.* **697**, 1621 (2009)

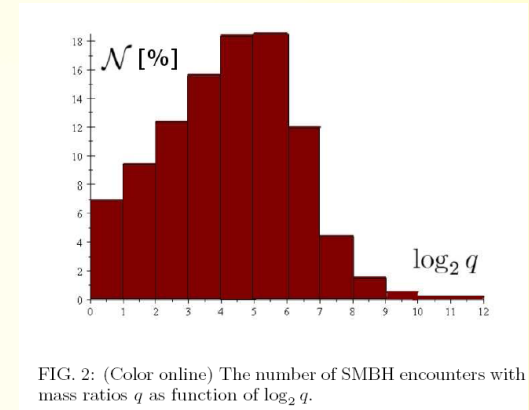
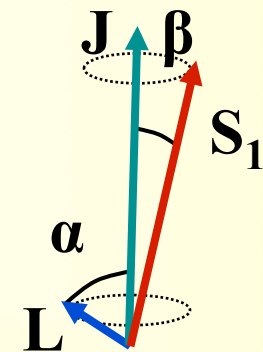
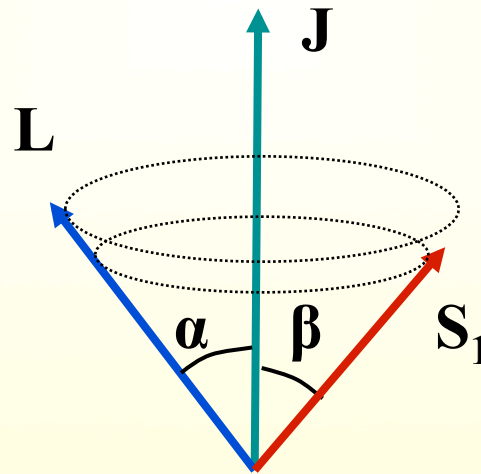
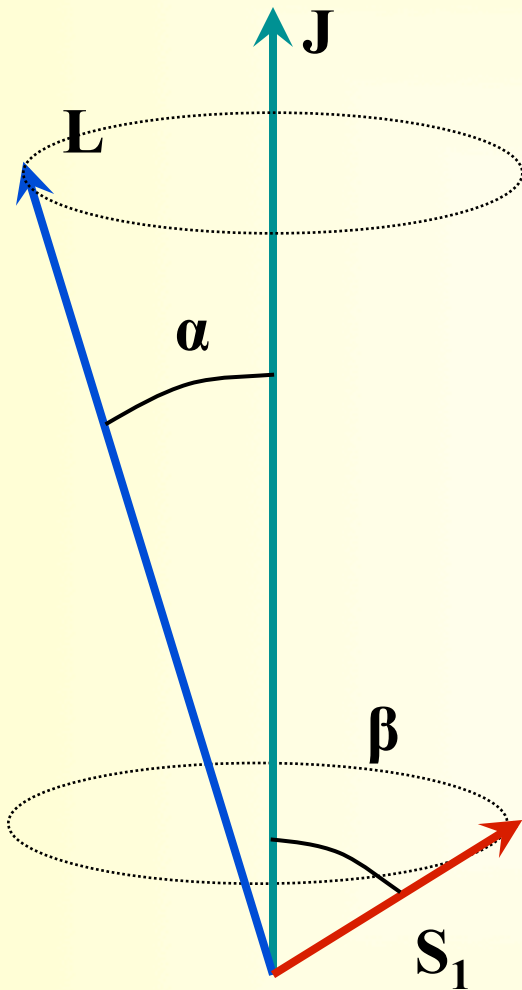


FIG. 2: (Color online) The number of SMBH encounters with mass ratios q as function of $\log_2 q$.

Kulcselemek: (i) tipikusan a fekete lyukak tömegei nem azonosak, $m_2 \ll m_1$, így $\mathbf{S}_2 \sim m_2^2$ elhanyagolható, (ii) \mathbf{J} iránya megmarad, (iii) \mathbf{S}_1 nagysága megmarad \rightarrow **spin-flip**

3. alkalmazás: A spin-flip effektus

Table 2: Order of magnitude estimates for the inspiral rate \dot{L}/L , angular precessional velocity Ω_p and tilt velocity $\dot{\alpha}$ of the vectors \mathbf{L} and \mathbf{S}_1 with respect to \mathbf{J} , represented for the three regimes with $L > S_1$, $L \approx S_1$ and $L < S_1$, characteristic in the domain of mass ratios $\nu = 0.3 \div 0.03$. The numbers in brackets represent inverse time scales in seconds⁻¹, calculated for the typical mass ratio $\nu = 10^{-1}$, post-Newtonian parameter 10^{-3} , 10^{-2} and 10^{-1} , respectively and $m = 10^8 M_\odot$ (then $c^3/Gm = 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$).

	$L > S_1$	$L \approx S_1$	$L < S_1$
$-\dot{L}/L$	$\frac{32c^3}{5Gm}\varepsilon^4\eta$ ($\approx 10^{-15}$)	$\frac{32c^3}{5Gm}\varepsilon^4\eta$ ($\approx 10^{-11}$)	$\frac{32c^3}{5Gm}\varepsilon^4\eta$ ($\approx 10^{-7}$)
Ω_p	$\frac{2c^3}{Gm}\varepsilon^{5/2}\eta$ ($\approx 10^{-11}$)	$\frac{2c^3}{Gm}\varepsilon^{5/2}\eta\frac{J}{L}$ ($\approx 10^{-8}\frac{J}{L}$)	$\frac{2c^3}{Gm}\varepsilon^3$ ($\approx 10^{-5}$)
$\frac{\dot{\alpha}}{\sin(\alpha+\beta)}$	$\frac{32c^3}{5Gm}\varepsilon^{9/2}\frac{\eta}{\nu}$ ($\approx 10^{-16}$)	$\frac{32c^3}{5Gm}\varepsilon^{9/2}\frac{\eta}{\nu}\frac{L^2}{J^2}$ ($\approx 10^{-11}\frac{L^2}{J^2}$)	$\frac{32c^3}{5Gm}\varepsilon^{7/2}\eta\nu$ ($\approx 10^{-8}$)

Összeolvadásig: 30 million years 300 years few months

Precessziós időskála: 3000 years 3 years **days**

Írányváltozás egy precesszió során: 2 arcsec (6×10^{-4} arcsec/year) 3 arcmin (/day)

3. alkalmazás: A spin-flip effektus

Tipikus szupernagy tömegű feketelyuk-kettősökben a **spin-flip** bekövetkezik a **bespirálózás** során!

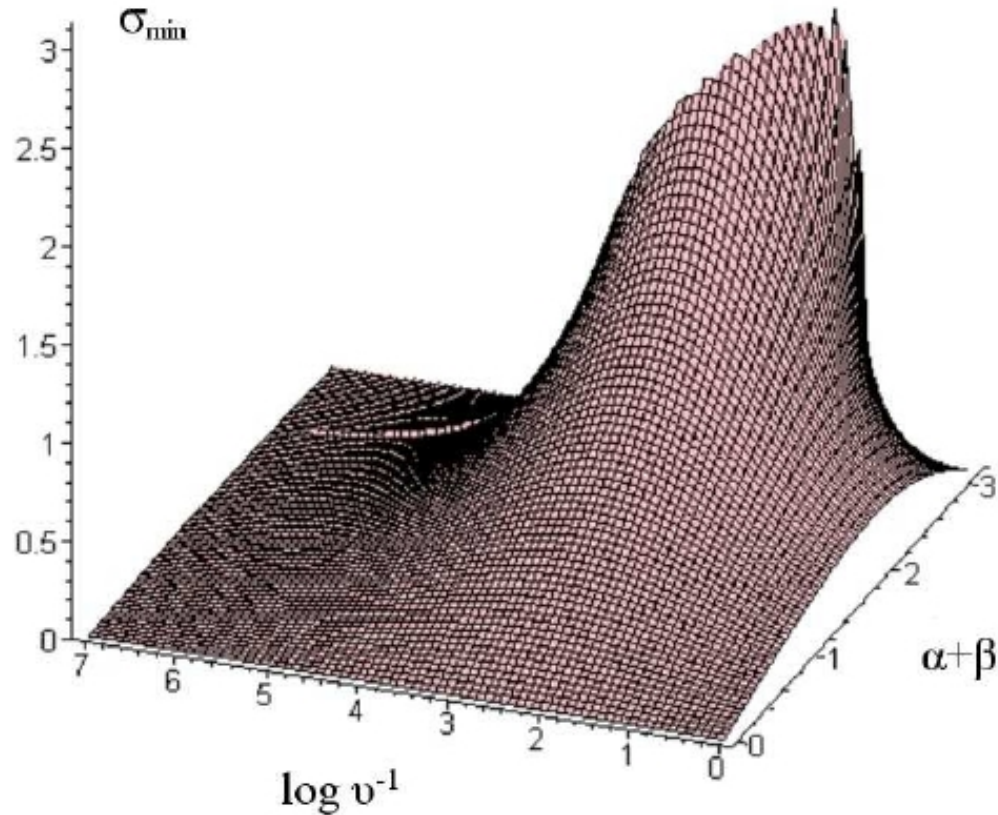
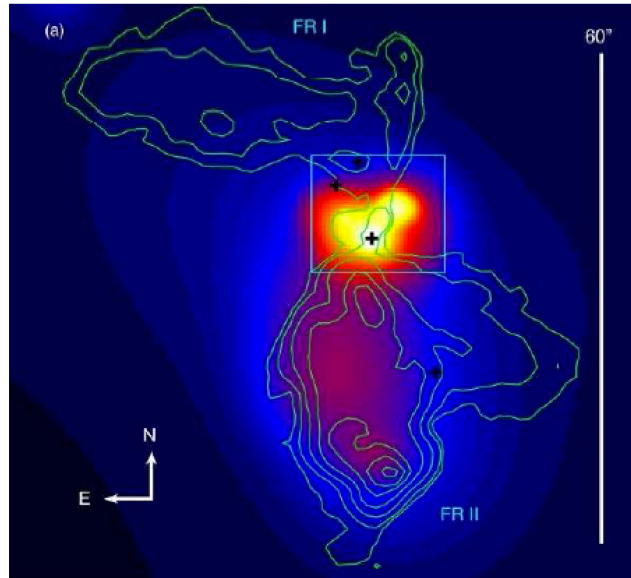


Figure 2. The spin-flip angle σ_{\min} as function of the relative orientation of the spin and orbital angular momentum $\alpha + \beta$ (a constant during inspiral), and mass ratio ν . For a given mass ratio the spin-flip angle has a maximum shifted from $\pi/2$ towards the anti-aligned configurations. The mass ratios $\nu = 1; 1/3; 1/30$ and $1/1000$ are located on the $\log \nu^{-1}$ axis at 0; 1.09; 3.40 and 6.91, respectively, confirming the prediction, that a significant spin-flip will happen in the mass ratio range $\nu \in (1/30, 1/3)$. For mass ratios smaller than $1/100$ the spin does not flip at all, as the infalling SMBH acts as a test particle.

Supermassive black hole spin-flip during the inspiral

L. Á. Gergely, P. L. Biermann, L. I. Caramete, *Class. Quantum Grav.* **27** (2010) 194009

X-alakú rádió galaxisok: összeolvadt feketelyuk-kettősök maradványai



On the origin of X-shaped radio galaxies
Gopal-Krishna, P. L. Biermann, L. Á. Gergely, P. J. Wiita,
Research in Astron. Astrophys. **12**, 127–146 (2012)

Fig. 1 Radio contours overlain on X-ray emission for the XRG 3C 433. Reprinted with permission from Miller & Brandt (2009); copyright AAS.

Spin-flip model:

wing formation ceases before the primary lobes begin to form

Description

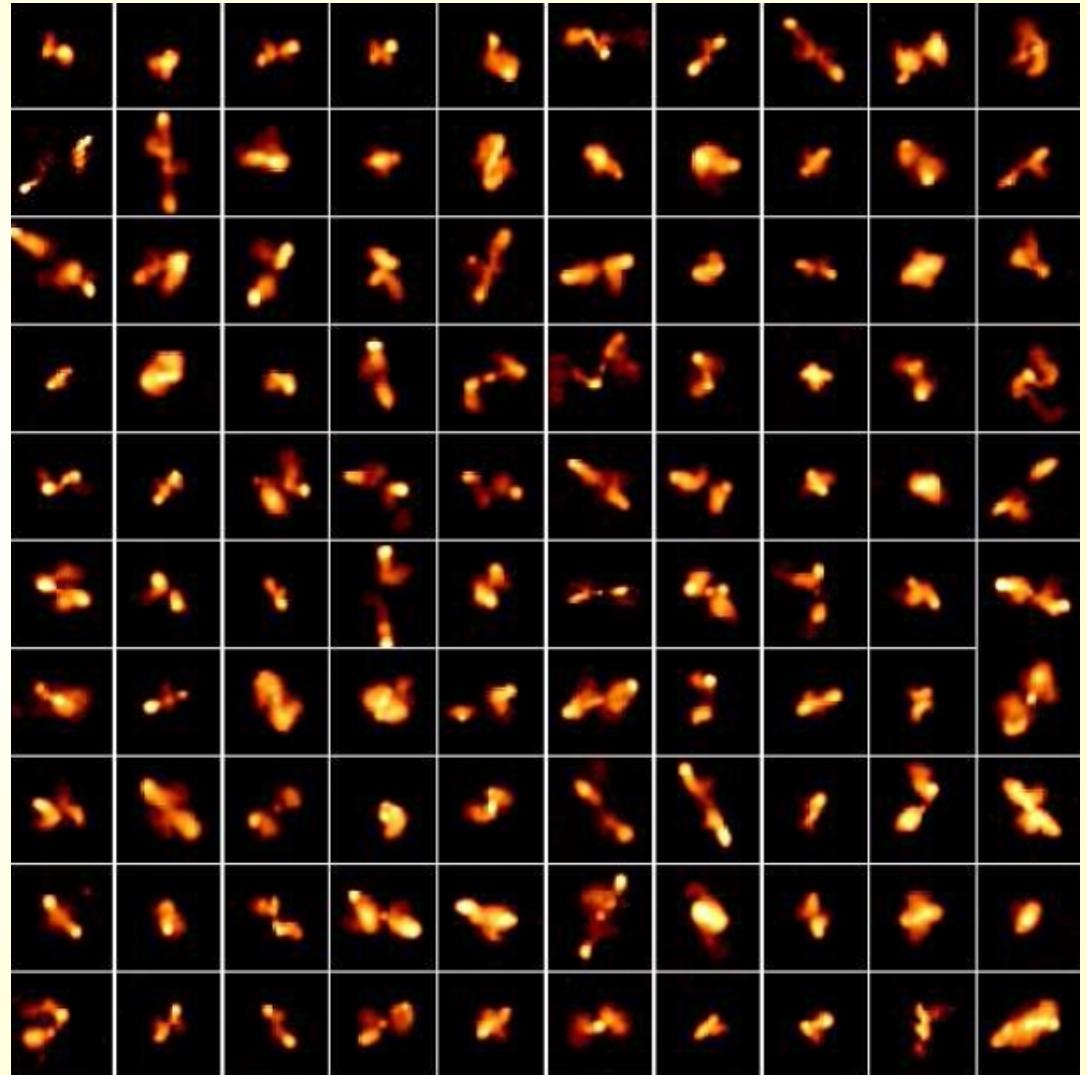
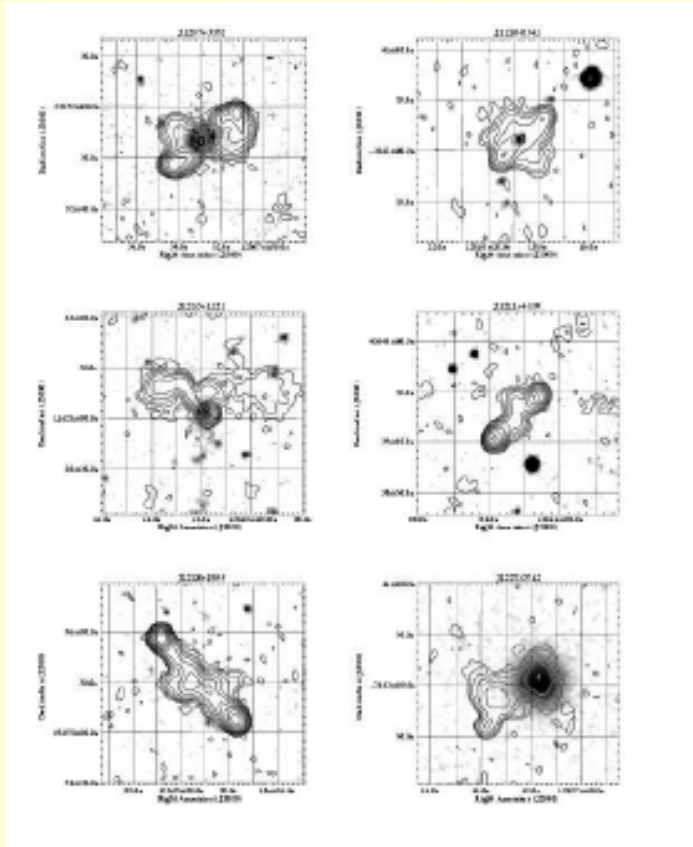
Jet direction flips due to re-alignment of the spin of the dominant SMBH, due to its merger with another SMBH.

Key merit/evidence

- * Explains why hotspots are never seen in both lobe pairs.
- * Can explain secondary lobes being larger than primary lobes.
- * Post spin-flip, jets can easily propagate straight outwards.
- * Z-symmetry of the wings can be easily understood.
- * The empirically inferred systematic excess of SMBH mass in XRGs (compared to those in RGs) fits naturally into this picture.
- * Can also explain the formation of superdisks.
- * The correlation of the radio lobe axis with the optical axis of the host elliptical.

Does not naturally explain

XRG katalógus, spin-flip-en átesett rádió galaxisok



Az általános relativitáselméleten is túl?

1. motiváció:

- a **sötét energia** az univerzum $\approx 71\%$ -át alkotja
- Mibenléte nem ismert
- Legegyszerűbb változata a kozmológiai konstans, de annak mind állandó jellegét, mind nagyságát nehéz magyarázni
- Nem csomósodik, egyenletesen tölti ki az univerzumot
- Gyorsuló tágulást okoz
- Csak gravitációosan hat kölcsön

→ **Olyan módosított gravitációelmélet, amelyben a gyorsuló tágulás természetes módon megjelenik, de a módosítások csak igen nagy léptékben válnak észlelhetővé?**

Az általános relativitáselméleten is túl?

2. motiváció:

- a sötét anyag az univerzum 24%-át alkotja
- Mibenléte nem ismert
- Eddig javasolt változatainak kimutatása sikertelen
- Csomósodik, galaktikus és lokális csoport halokban tömörül
- Csak gravitációsan hat kölcsön

→ Olyan módosított gravitációelmélet, amelyben a módosítások csak galaktikus, vagy annál is nagyobb léptékben válnak észlelhetővé?

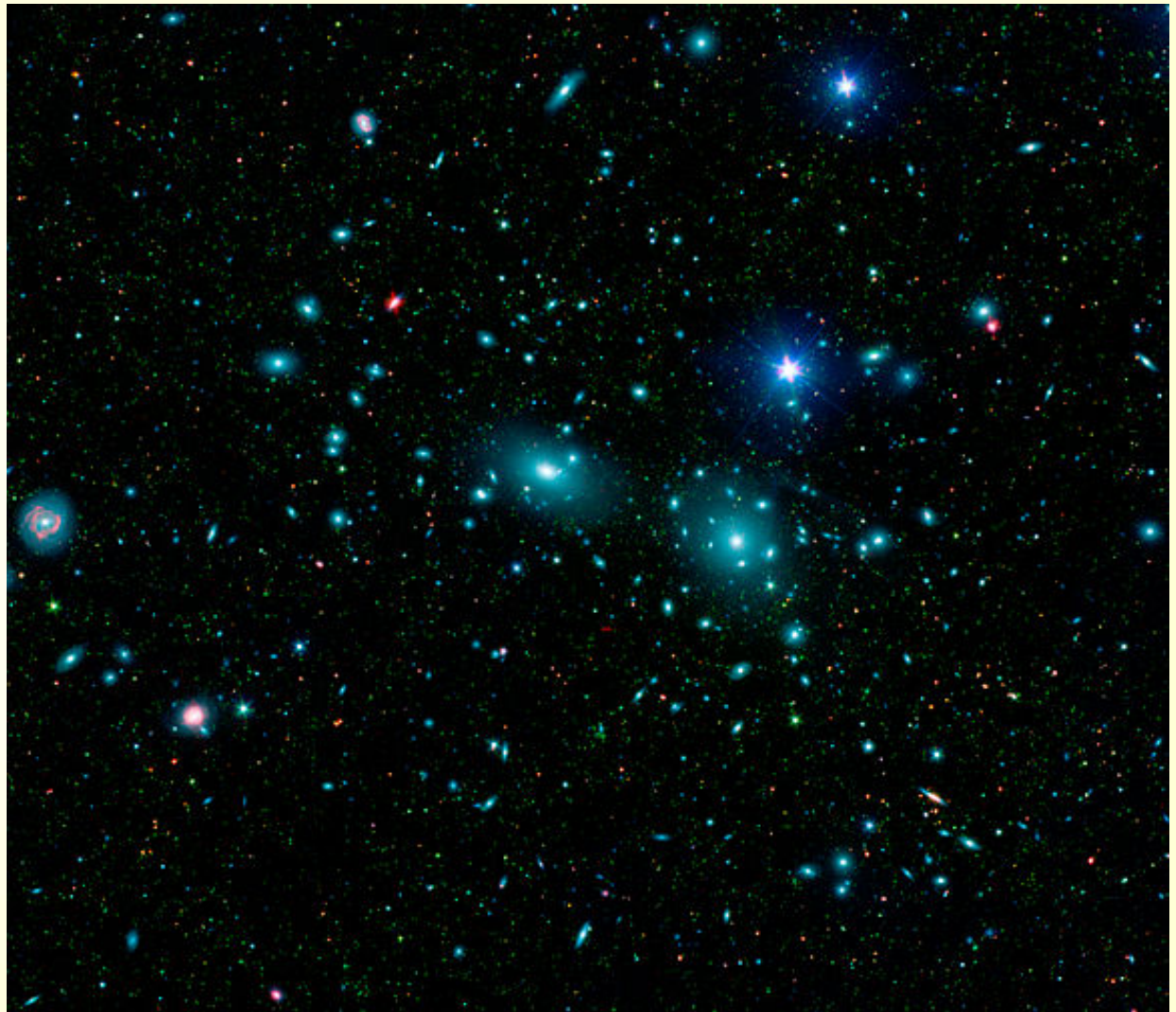
(pl. *Skalár-tenzor elméletek*, melyekben a skalár tömege természetes távolságskálát ad)

A sötét anyag



1933
Fritz Zwicky
1898 - 1974

Coma
galaxisklaszter



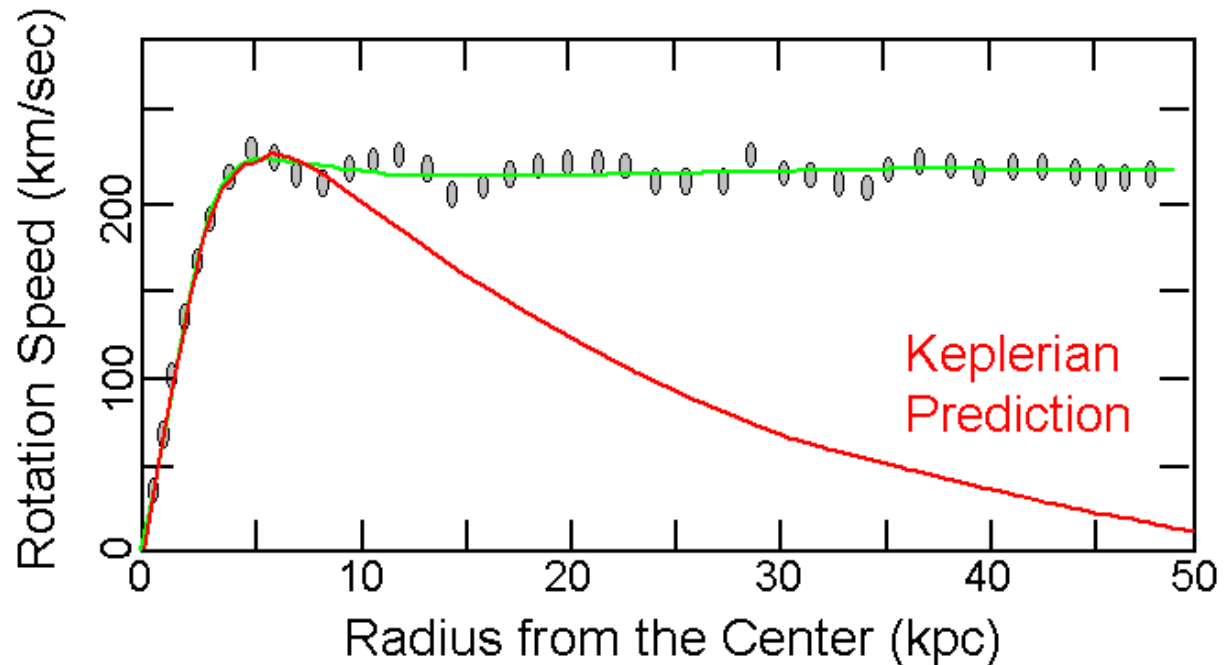
A sötét anyag



1970
Vera Rubin
1928 - 2016

Galaxis
forgásgörbék

Observed vs. Predicted Keplerian



A sötét anyag keresése

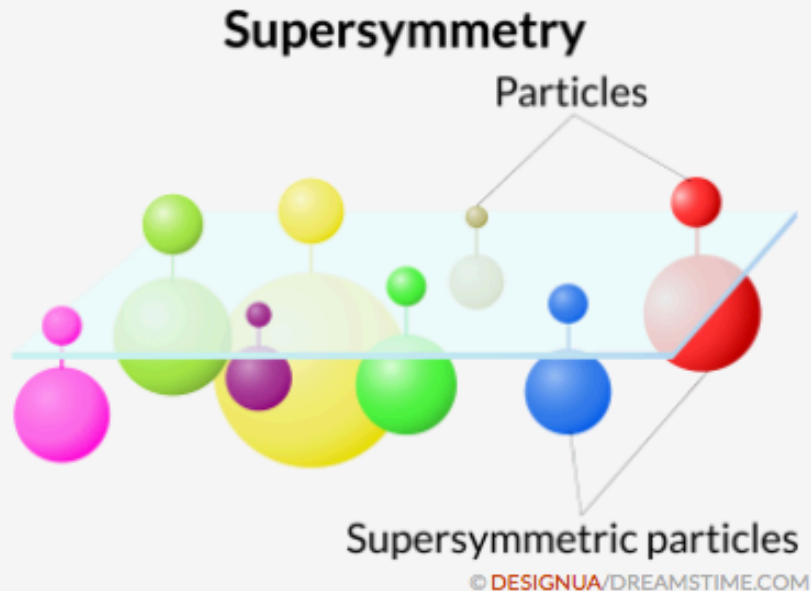
1. Szuperszimmetrikus részecskék keresése (LHC: *nem*)
2. Steril neutrínók keresése (IceCube: *nem*)
3. WIMP sötét anyag részecskék keresése (LUX, PandaX-II, Xenon100: *nem*)
4. Extra dimenziók keresése (LHC: *nem*)
5. MACHO sötét anyag keresése (mikrolencsézés: *nem*)
6. Axion sötét anyag keresése (Axion Dark Matter Experiment, Center for Experimental Nuclear Physics and Astrophysics (CENPA), University of Washington: *nem*)

Szuperszimmetrikus részecskék keresése (LHC)

<https://www.sciencenews.org/article/supersymmetry's-absence-lhc-puzzles-physicists>

Partnered up

Supersymmetry predicts that the known fundamental particles in physics (top) have superparticle partners (bottom). For example, the electron has a partner known as a "selectron," and the Higgs boson's partner is the Higgsino. The superpartners are more massive than their counterparts (indicated by the size of the spheres).

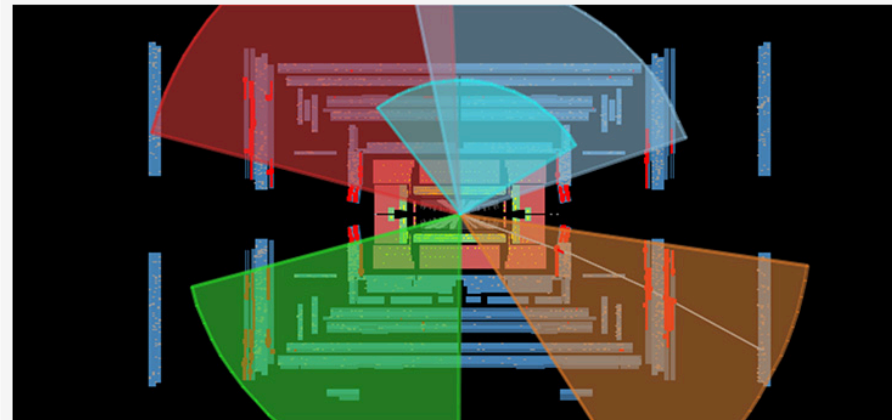


2016 október:

2015-16-ban az LHC
semmilyen nyomát nem
találta a szuperszimmetriának

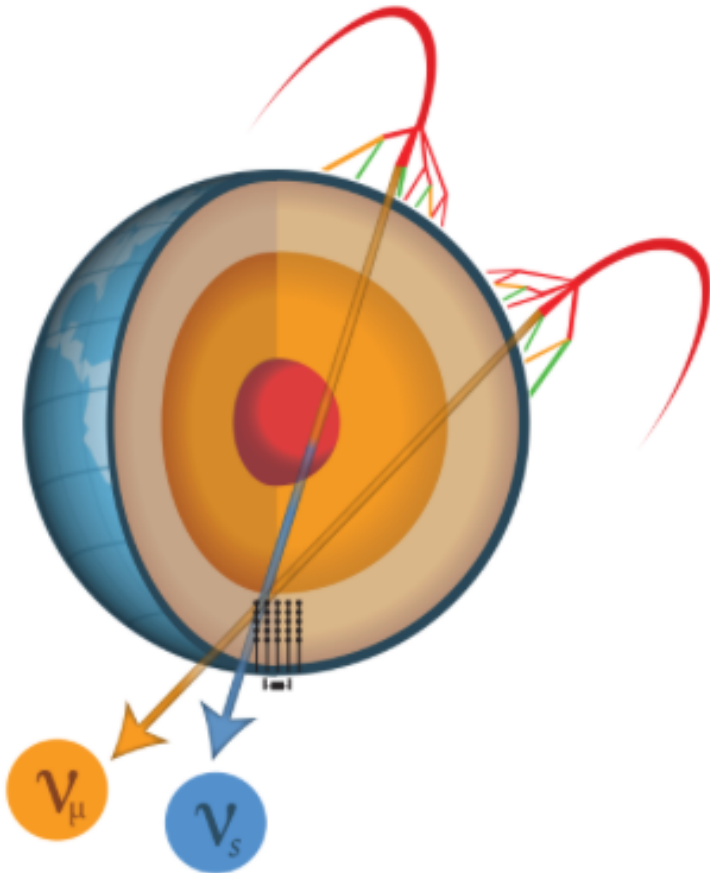
Supersymmetry search

To find supersymmetric particles, LHC scientists search for particular signatures in their data. This collision, recorded by the ATLAS experiment at the LHC, was selected as a candidate in the search for supersymmetric particles. In this visualization, rectangles indicate components of the detector, and the five cones indicate "jets" or sprays of particles produced in the collision. The scientists ultimately didn't find any evidence of the new particles.



Steril neutrínók keresése (IceCube)

<http://icecube.wisc.edu/news/view/438>



*If sterile neutrinos exist, IceCube would measure a disappearance of atmospheric neutrinos that would otherwise reach the detector on a trajectory through the Earth's core.
Credit: IceCube Collaboration*

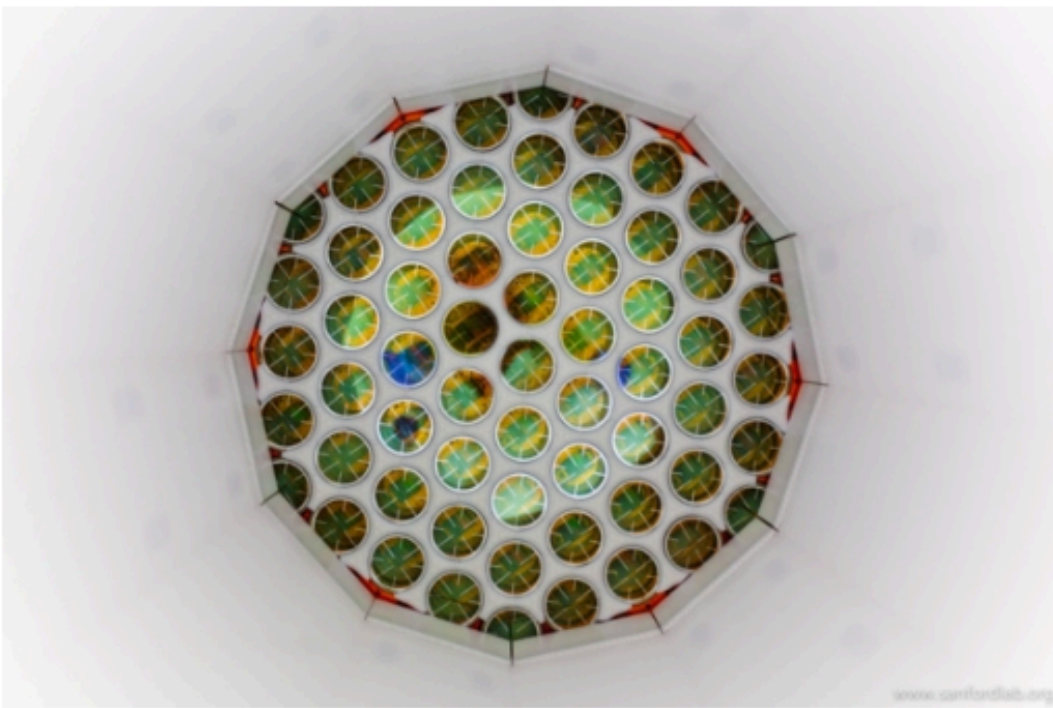
A steril neutrínók nem hatnak kölcsön az anyaggal, de befolyásolják, hogy a többi neutrínó hogyan hat kölcsön

2016 augusztus:
IceCube (Phys. Rev. Lett)

Kb 200.000 neutrínó esemény feldolgozása után a steril neutrínó hipotézis 99%-os biztonsággal elvethető

WIMP keresése (LUX, PandaX-II, Xenon100)

<https://www.scientificamerican.com/article/physics-confronts-its-heart-of-darkness/>



Sensors on the Large Underground Xenon dark matter detector can register the emission of just a single photon from a dark matter interaction within the detector's giant xenon tank. So far, however, no signs of dark matter have been seen. *Credit: MATT KAPUST, SANFORD UNDERGROUND RESEARCH FACILITY*

A WIMP-ek tömege 1 és 1000 protontömeg közötti

Gravitációsan és gyengén hatnak kölcsön

LUX kísérlet (Dél-Dakota, Sanford Földalatti Kutatóintézet)

302 kg hűtött, folyékony xenon titánium tartályban, besüllyesztve 272.500 liter vízbe

WIMP esetén a xenon felvillan, a víz szerepe más környezeti tényezők kizárása

2014-16 közötti mérések eredménye negatív

Következő műszer: LUX-Zemlin, 70-szeres érzékenység

Extra dimenziók keresése (LHC)

Bounds on Universal Extra Dimension from LHC Run I and II data

Debajyoti Choudhury¹ and Kirtiman Ghosh²

Department of Physics and Astrophysics, University of Delhi, Delhi 110007, India

¹*debajyoti.choudhury@gmail.com*, ²*kirti.gh@gmail.com*

We discuss the collider bounds on minimal Universal Extra Dimension (mUED) model from LHC Run-I and II data. The phenomenology of mUED is determined by only two parameters namely, the compactification scale (R^{-1}) of the extra dimension and cutoff scale (Λ) of the theory. The characteristic feature of mUED is the occurrence of nearly degenerate mass spectrum for the Kaluza-Klein (KK) particles and hence, soft leptons, soft jets at the collider experiments. The degree of degeneracy of KK-mass spectrum crucially depends on Λ . The strongest direct bound on R^{-1} (~ 950 GeV for large Λ) arises from a search for a pair of soft dimuons at the Large Hadron Collider (LHC) experiment with 8 TeV center-of-mass energy and 20 fb^{-1} integrated luminosity. However, for small Λ and hence, small splitting within the first KK-level, the bounds from the dimuon channel is rather weak. On the other hand, the discovery of 126 GeV Higgs boson demands small Λ to prevent the scalar potential from being unbounded from below. We discuss LHC monojet searches as a probe of low Λ region of mUED parameter space. We also compute bounds on the mUED parameter space from 13 TeV multijets results.

Theories with one or more extra space-like dimension(s) accessible to all or a few of the Standard Model (SM) fields are of interest for various reasons. For example, the ADD [1, 2] (seemingly) and RS [3] models provide solutions to the long-standing naturalness/hierarchy problem by postulating the existence of compactified extra-dimension(s) accessible only to gravity with the SM fields being confined to a 3-brane embedded in the extra-dimensional bulk. On the other hand, there are a class of models wherein some or all of the SM fields can access the extended space-time manifold [2, 4], whether fully or partially. Such extra-dimensional scenarios could lead to a new mechanism of supersymmetry breaking [2], relax the upper limit of the lightest supersymmetric neutral Higgs mass [5], give a different perspective to the issue of fermion mass hierarchy [6], interpret the Higgs as a quark composite leading to a electroweak symmetry breaking (EWSB) without a fundamental scalar or Yukawa interactions [7], lower the unification scale down to a few TeVs [8], provide a cosmologically viable candidate for dark matter [9, 10], explain the long life time of proton [11], predict the number of fermion generations to be an integral multiple of three [12] and give rise to interesting signatures at collider experiments. As a result, search for the extra dimension(s) is one of the prime goals of the Large Hadron Collider (LHC) experiment [13, 14]. Our concern here is a specific and particularly interesting framework, called the Universal Extra Dimension (UED) scenario.

the context of higher-dimensional theories. The particle spectrum of mUED contains infinite towers of Kaluza-Klein (KK) modes (identified by an integer n , called the KK-number) for each of the SM fields with the zero modes being identified as the corresponding SM particles. The key feature of the UED Lagrangian is the conservation of the momentum along fifth direction. From a 4-dimensional perspective, this implies conservation of the KK-number. However, the additional Z_2 symmetry ($y \leftrightarrow -y$), which is required to obtain chiral structure of the SM fermions, breaks the translational invariance along the 5th dimension. As a result, KK-number conservation breaks down at loop-level, leaving behind only a conserved KK-parity, defined as $(-1)^n$. There are several interesting consequences of this discrete symmetry which, in turn, is an automatic outcome of the S^1/Z_2 orbifolding. KK-parity ensures the stability of the lightest KK-particle (LKP), allows only pair production of level-1 KK-particles at the collider, and prohibits KK-modes from affecting tree-level EW precision observables. And, although KK-modes do contribute to standard electroweak processes at higher orders, KK-parity ensures that, in a loop, they appear only in pairs resulting in a substantial suppression of such contributions.

Being a higher dimensional theory, mUED is nonrenormalizable and should be treated as an effective theory valid upto a cutoff scale Λ , expected to be somewhat larger than R^{-1} . With KK-parity ensuring that one-loop [1] mUED corrections to all electroweak observables

MACHO keresése (mikrolencsézés)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 542:281–307, 2000 October 10
© 2000. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

THE MACHO PROJECT: MICROLENSING RESULTS FROM 5.7 YEARS OF LARGE MAGELLANIC CLOUD OBSERVATIONS

C. ALCOCK,^{1,2} R. A. ALLSMAN,³ D. R. ALVES,⁴ T. S. AXELROD,⁵ A. C. BECKER,⁶ D. P. BENNETT,^{7,1} K. H. COOK,^{1,2}
N. DALAL,^{2,8} A. J. DRAKE,^{1,5} K. C. FREEMAN,⁵ M. GEHA,¹ K. GRIEST,^{2,8} M. J. LEHNER,⁹ S. L. MARSHALL,^{1,2}
D. MINNITI,^{1,10} C. A. NELSON,^{1,11} B. A. PETERSON,⁵ P. POPOWSKI,¹ M. R. PRATT,⁶ P. J. QUINN,^{1,2}
C. W. STUBBS,^{2,5,6,13} W. SUTHERLAND,¹⁴ A. B. TOMANEY,⁶ T. VANDEHEI,^{2,8} AND D. WELCH¹⁵
(THE MACHO COLLABORATION)

Received 2000 January 14; accepted 2000 May 15

ABSTRACT

We report on our search for microlensing toward the Large Magellanic Cloud (LMC). Analysis of 5.7 yr of photometry on 11.9 million stars in the LMC reveals 13–17 microlensing events. A detailed treatment of our detection efficiency shows that this is significantly more than the ~ 2 –4 events expected from lensing by known stellar populations. The timescales (\hat{t}) of the events range from 34 to 230 days. We estimate the microlensing optical depth toward the LMC from events with $2 < \hat{t} < 400$ days to be $\tau_2^{400} = 1.2_{-0.3}^{+0.4} \times 10^{-7}$, with an additional 20% to 30% of systematic error. The spatial distribution of events is mildly inconsistent with LMC/LMC disk self-lensing, but is consistent with an extended lens distribution such as a Milky Way or LMC halo. Interpreted in the context of a Galactic dark matter halo, consisting partially of compact objects, a maximum-likelihood analysis gives a MACHO halo fraction of 20% for a typical halo model with a 95% confidence interval of 8%–50%. A 100% MACHO halo is ruled out at the 95% confidence level for all except our most extreme halo model. Interpreted as a Galactic halo population, the most likely MACHO mass is between 0.15 and 0.9 M_\odot , depending on the halo model, and the total mass in MACHOs out to 50 kpc is found to be $9_{-3}^{+4} \times 10^{10} M_\odot$, independent of the halo model. These results are marginally consistent with our previous results, but are lower by about a factor of 2. This is mostly due to Poisson noise, because with 3.4 times more exposure and increased sensitivity to long-timescale events, we did not find the expected factor of ~ 4 more events. In addition to a larger data set, this work also includes an improved efficiency determination, improved likelihood analysis, and more thorough testing of systematic errors, especially with respect to the treatment of potential backgrounds to microlensing. We note that an important source of background are supernovae (SNe) in galaxies behind the LMC.

Subject headings: dark matter — Galaxy: halo — Galaxy: structure — gravitational lensing — stars: low-mass, brown dwarfs — white dwarfs

On-line material: Color figures

1. INTRODUCTION

Following the suggestion of Paczyński (1986), several groups are now engaged in searches for dark matter in the form of massive compact halo objects (MACHOs) using gravitational microlensing, and many candidate microlensing events have been reported. Reviews of microlensing in this context are given by Paczyński (1996) and Roulet & Mollerach (1996).

Previously (Alcock et al. 1997a), we conducted an analysis of 2.1 yr of photometry of 8.5 million stars, and found 6–8 microlensing events, implying an optical depth toward the LMC of $2.9_{-0.5}^{+1.4} \times 10^{-7}$ for the 8 event sample and $2.1_{-0.7}^{+1.1} \times 10^{-7}$ for the 6 event sample (Alcock et al. 1996a, 1997a; hereafter A96 and A97, respectively). Interpreted as evidence for a MACHO contribution to the Milky Way dark halo, this implied a MACHO mass out to 50 kpc

A 10 naptömegnél
könnyebb
MACHO-k a sötét
anyagnak csak
10%-át adhatják

Axion keresése (Axion Dark Matter Experiment)

<http://depts.washington.edu/admx/index.shtml>



HOME

ABOUT ADMX ▾

COLLABORATION

NEWS/EVENTS

PUBLICATIONS ▾

GALLERIES ▾



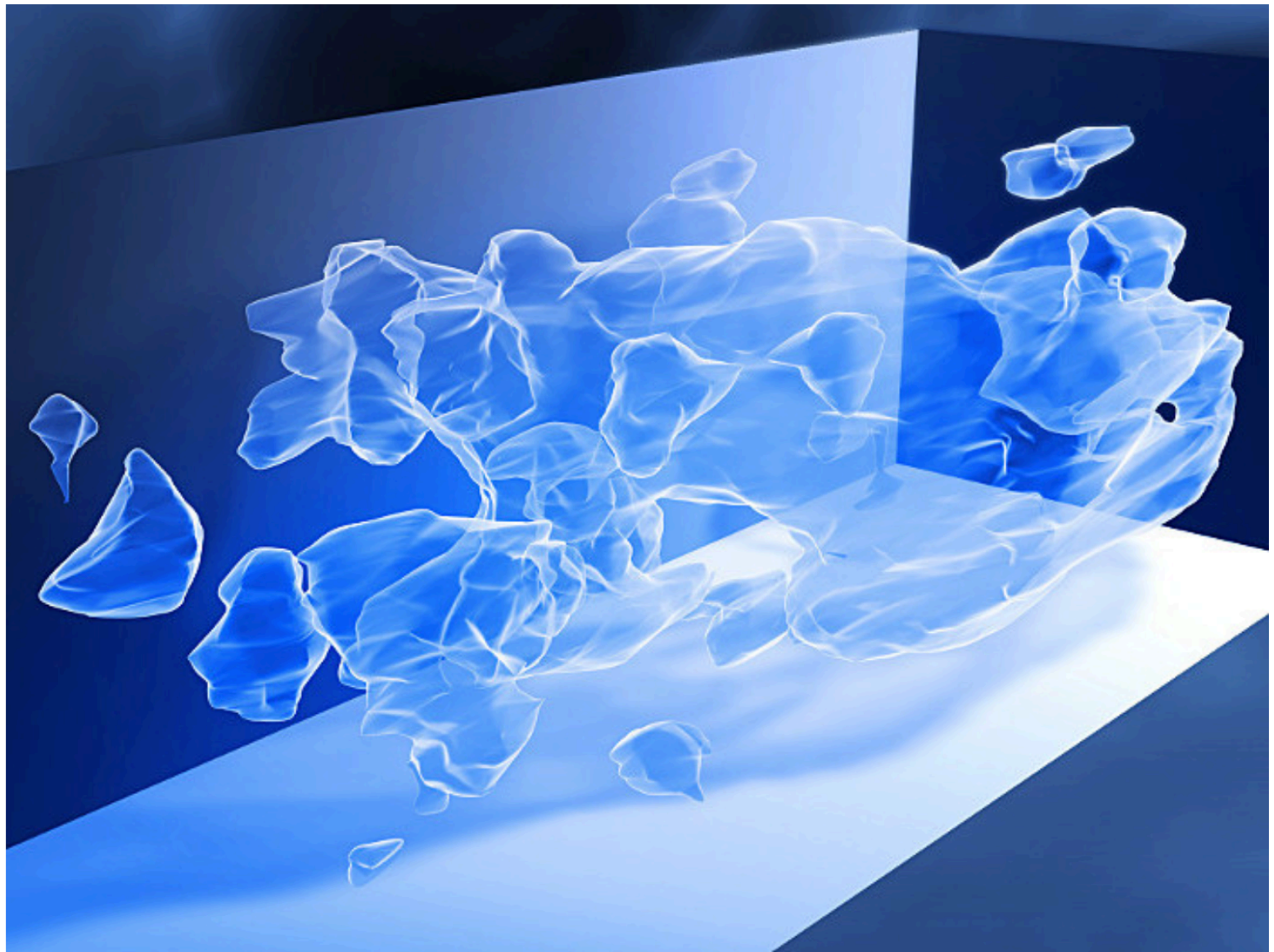
*"There are viable theories and there are natural and elegant theories.
However, all viable, natural and elegant theories contain dark-matter axions" - Ann Nelson.*



Dancing in the Dark: BBC Documentary

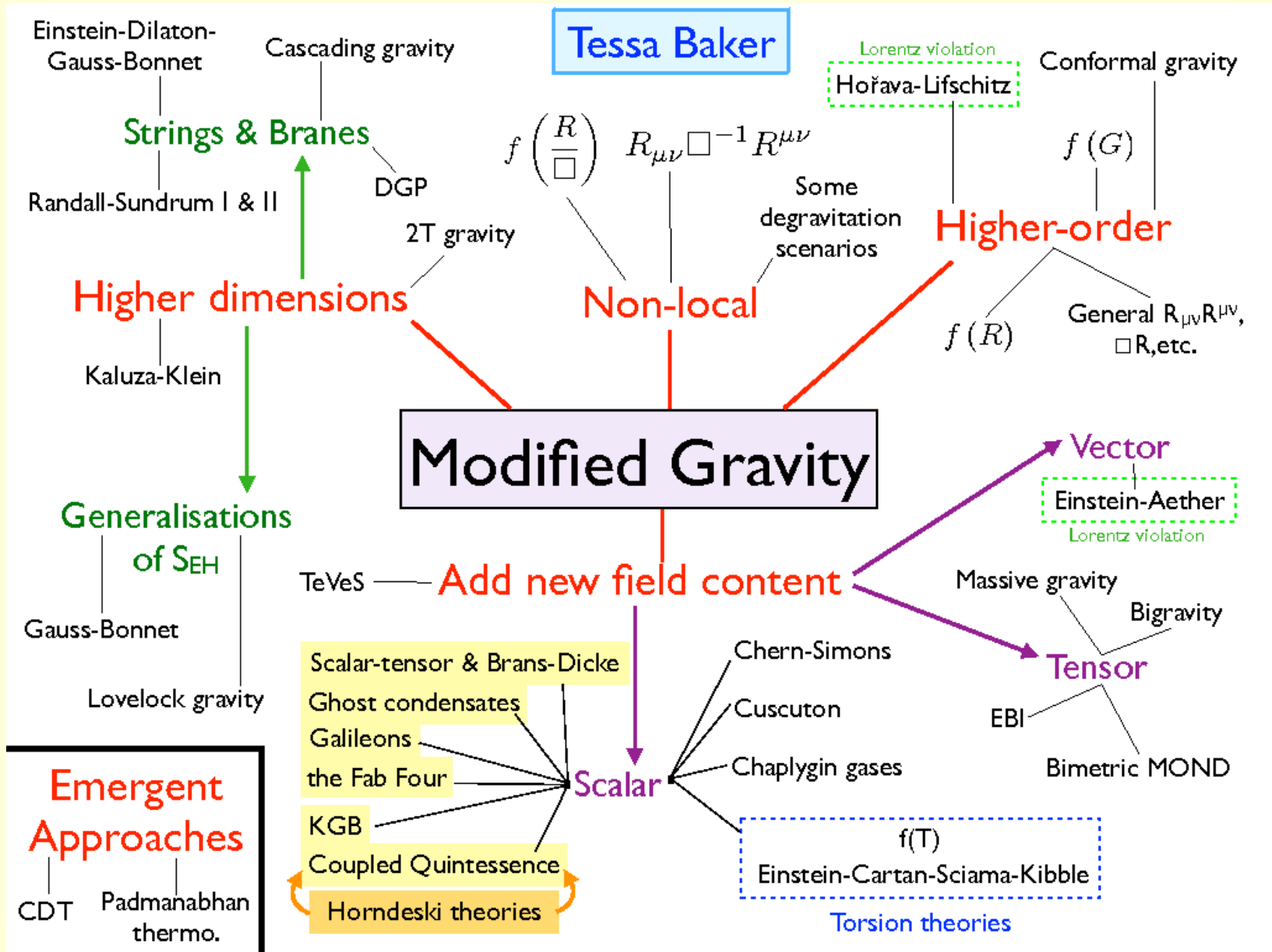
Scientists genuinely don't know what most of our universe is made of. The atoms we're made from only make up four per cent. The rest is dark matter and dark energy...

A sötét anyag numerikus szimulációja

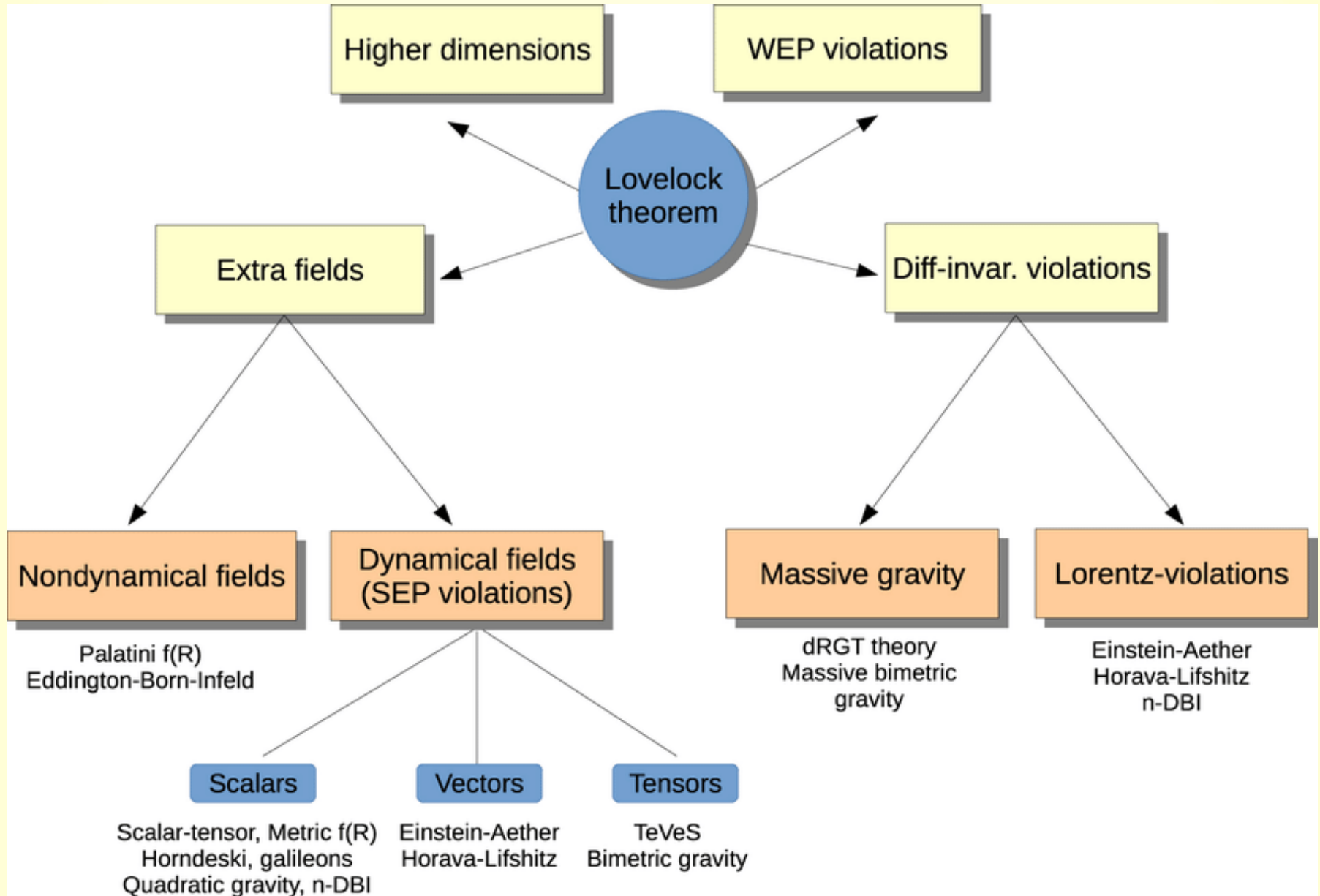


This 3-D map illustrates the large-scale distribution of dark matter, reconstructed from measurements of weak gravitational lensing by using the Hubble Space Telescope. Image credit: LLNL / NASA.

Módosított gravitációelméletek



Módosított gravitációelméletek



GH-k módosított gravitációelméletekben

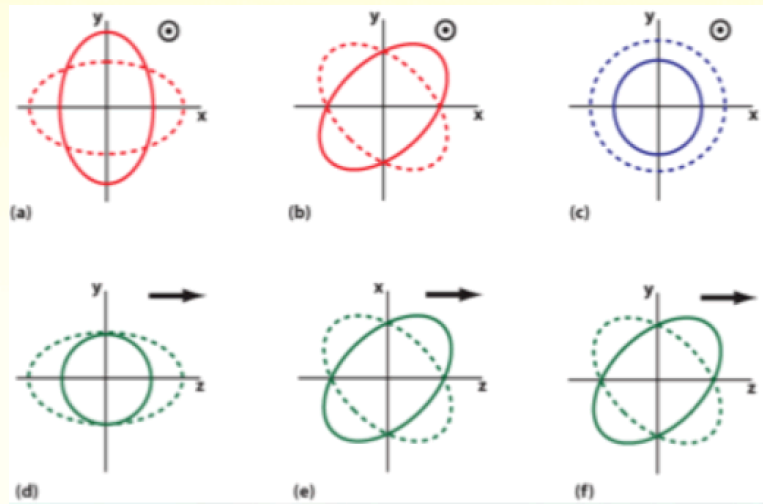
- új polarizációk:

+ és x

1 lélegző módus

1 longitudinális

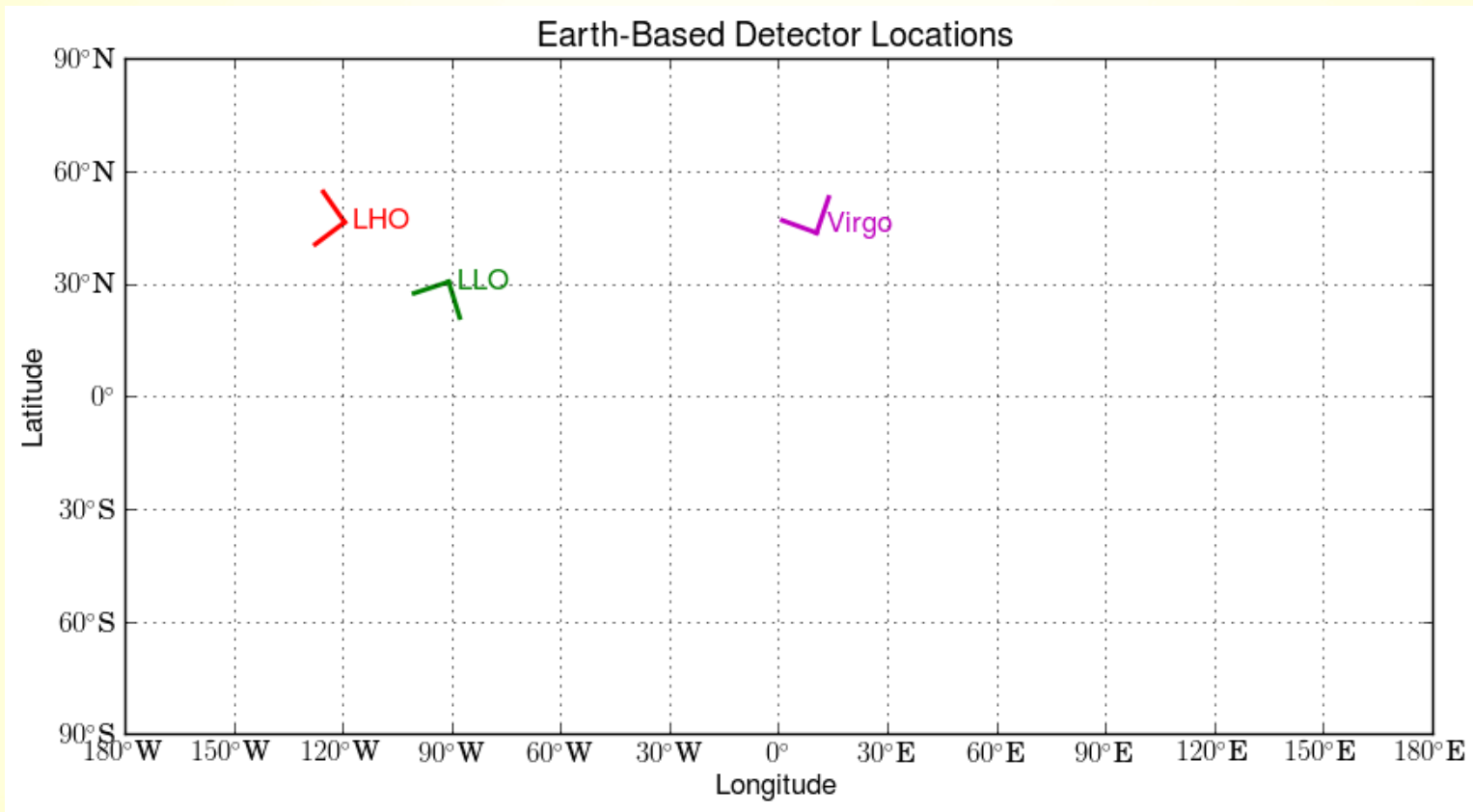
2 vektor módus



- Tenzor-, vektor-, skalár-módusok vizsgálандók
- új járulékok az amplitúdó és fázishoz
- Lokális Lorentz-invariancia sértés (díszperziós relációk módosulása)
- Fénysebességtől különböző G_H terjedési sebesség

Polarizációk vizsgálata

- Hullámforma = \sum_i antennafüggvény_i x módus_i
- A Virgo orientációja lényegesen különbözik a 2 LIGO detektorétól
→ az antennafüggvények közötti degenerációt csökkenti

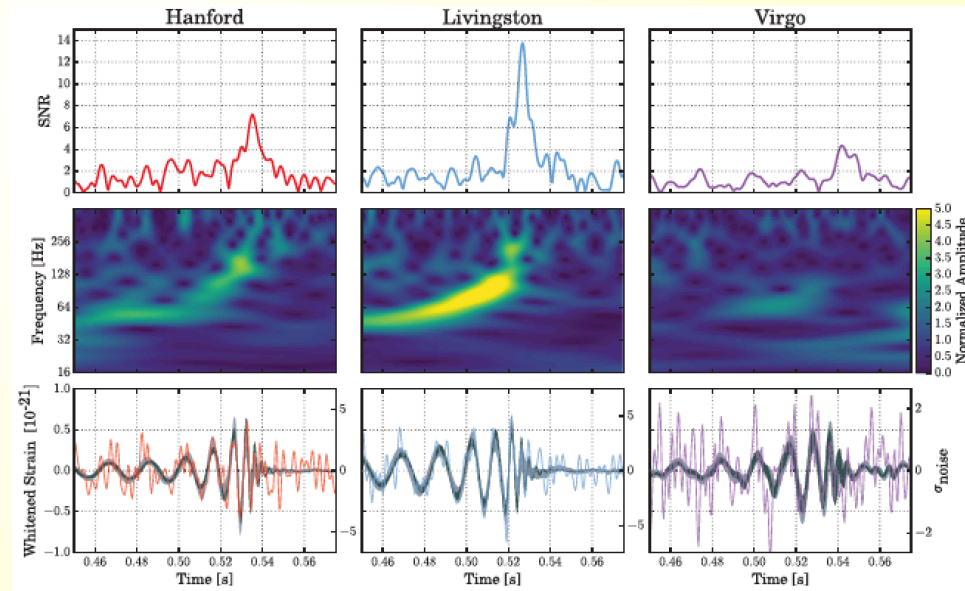


Polarizációk vizsgálata

• Hullámforma = \sum_i antennafüggvény_i x módus_i

• Előzetes vizsgálat,
játék-modellek tesztelése:

1. GH tisztán vektor módus
(Bayes-faktor 200-szor)
2. GH tisztán skalár módus
(Bayes-faktor 1000-szer
kisebb, mint az Ált. Rel.
jósolt)
3. GH tisztán tenzor módus



Hullámforma vizsgálata

PRL 116, 221101 (2016)

Selected for a *Viewpoint in Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS



Tests of General Relativity with GW150914

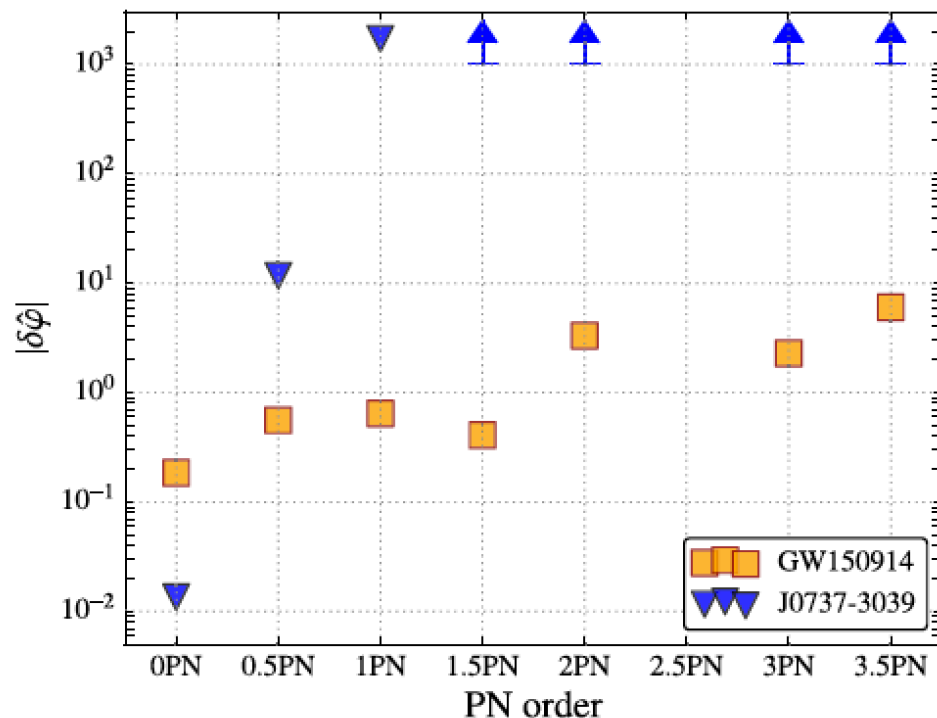
B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific and Virgo Collaborations)

(Received 26 March 2016; revised manuscript received 9 May 2016; published 31 May 2016)

Inspiral-merger-ringdown teszt:
Módosított hullámformák
paraméterezett alakban

- a χ^2 nem tért el szignifikánsan az Ált. Rel. által jósolt alaktól !
- Az eddigieknél nagyobb pontossággal igazolta a PN együtthatók értékeit !



Graviton tömegének vizsgálata

PRL 116, 221101 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS



Tests of General Relativity with GW150914

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific and Virgo Collaborations)

(Received 26 March 2016; revised manuscript received 9 May 2016; published 31 May 2016)

Tömeges graviton esetén a

diszperziós reláció: $E^2 = p^2 c^2 + m_g^2 c^4$

Compton-hullámhossz: $\lambda_g = h / (m_g c)$

Sebesség / energíafüggő frekvencia /
hullámhossz:

$$v_g^2 / c^2 \equiv c^2 p^2 / E^2 \simeq 1 - h^2 c^2 / (\lambda_g^2 E^2)$$

Newtoni potenciál Yukawa-típusú

korrekciót kap: $\varphi(r) = GM/r [1 - \exp(-r/\lambda_g)]$.

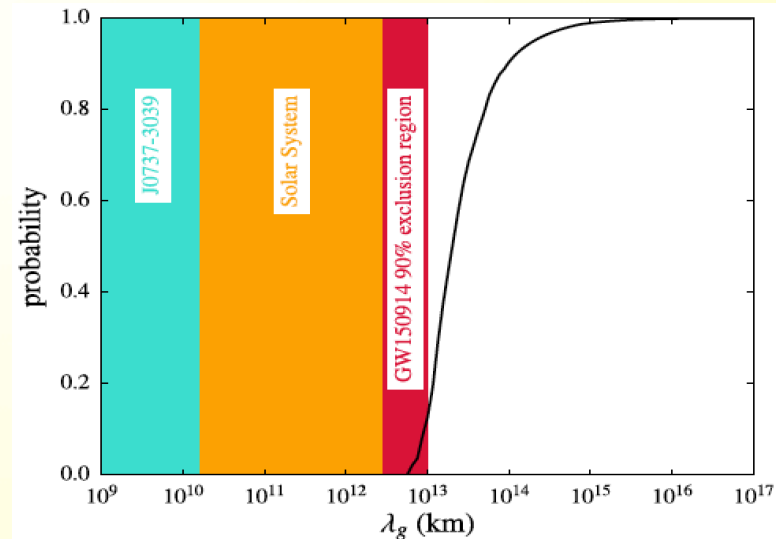
A GH fázisa módosul: $\Phi_{\text{MG}}(f) = -(\pi D c) / [\lambda_g^2 (1+z) f]$

(de LCDM, kettős dinamikájára

gyakorolt hatás elhanyagolásával)

C. M. Will, Phys. Rev. D 57, 2061 (1998).

→ A GH-eknek a 2 LIGO berendezéshez való érkezési időkülönbségéből a graviton Compton-hullámhosszának minden eddiginél pontosabb alsó korlátja: 10^{13} km !



$$m_g \leq 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2.$$

Lokális Lorentz-invariancia sértés vizsgálata

Módosított diszperziós reláció:

$$E^2 = p^2 c^2 + A p^\alpha c^\alpha, \alpha \geq 0,$$

S. Mirshekari, N. Yunes, and C. M. Will, *Phys. Rev. D* **85**, 024041 (2012).

Tömeges graviton elméletek: ($\alpha = 0, A > 0$)

Multifraktál téridők: ($\alpha = 2.5$)

Duplán speciális relativitáselmélet: ($\alpha = 3$),

Horava-Lifsic és extra dimenziók: ($\alpha = 4$)

Sebesség / energiafüggő

frekvencia / hullámhossz:

$$v_g/c = 1 + (\alpha - 1) A E^{\alpha-2} / 2$$

N. Yunes, K. Yagi, and F. Pretorius, *Phys. Rev. D* **94**, 084002 (2016).

Lorentz-invariancia sértés és graviton tömege egyszerre vizsgálható!

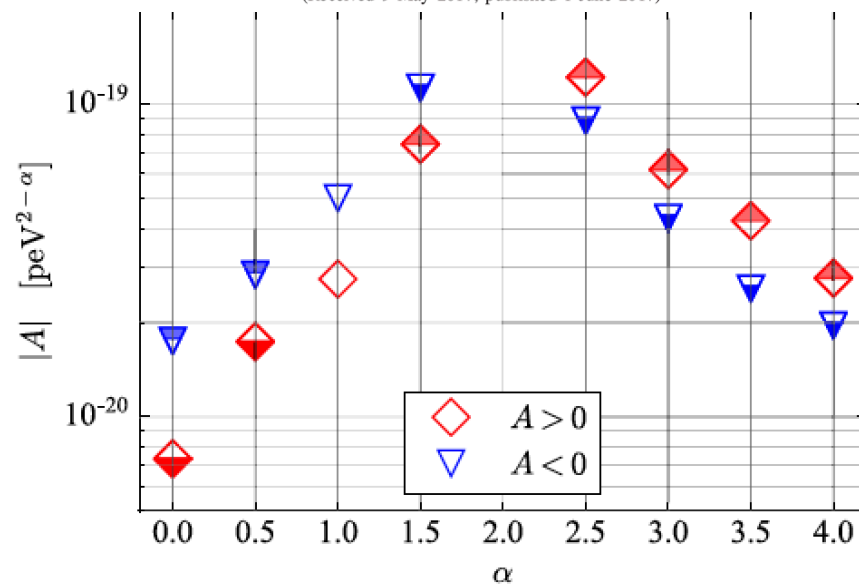
PRL 118, 221101 (2017)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific and Virgo Collaboration)
(Received 9 May 2017; published 1 June 2017)



Első qHT-kból levezetett kényszer a Lorentz-invariancia sértésre!

Az első 3 észlelt qHT-ból:

$$\lambda_g > 1.6 \times 10^{13} \text{ km.}$$

$$m_g \leq 7.7 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2.$$

Köszönöm a
figyelmet!