



# A VIRGO detektor missziója

---

*VASÚTH MÁTYÁS*

MTA WIGNER FK

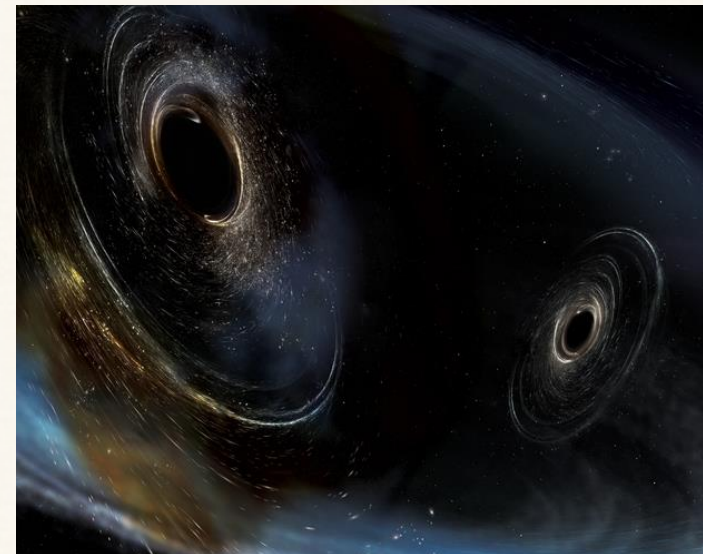
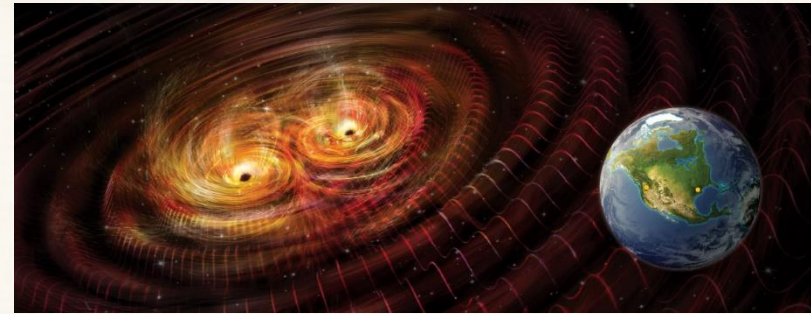
**GRAVITÁCIÓFIZIKAI KUTATÓCSOPORT**

**WIGNER VIRGO CSOPORT**

# Bevezetés



- Gravitációs hullámok
- A VIRGO detektor
- Közvetlen megfigyelések
- Neutroncsillagok jellemzői



# A téridő görbületének hepehupái

- Általános relativitáselmélet, a téridő görbültségét összekapcsolja az anyagi jellemzőket leíró energia-impulzus tenzorral

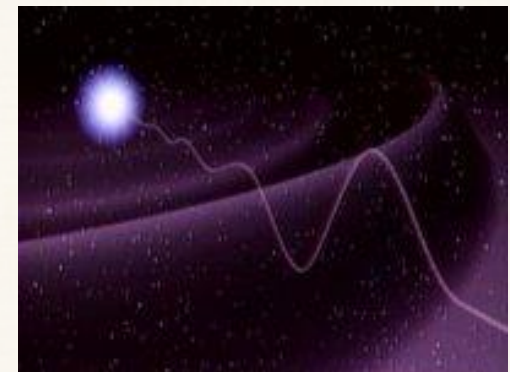
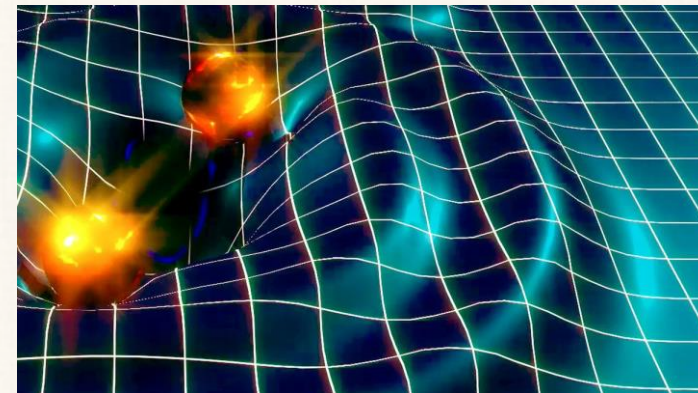
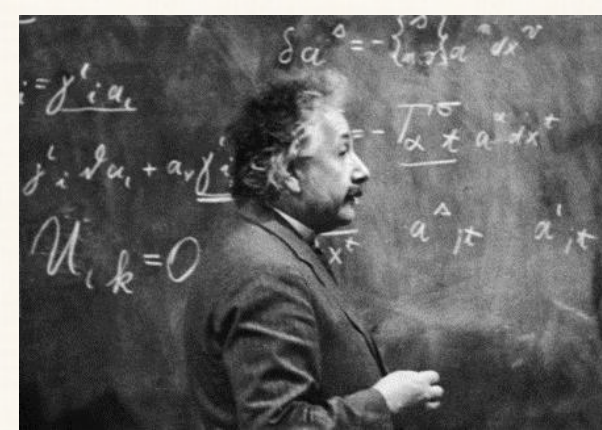
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- Gravitációs hullámok, a gravitációs hatás fénysebességgel tovaterjedő változásai, a téridő fodrozódásai

- Lineáris közelítés, a forrástól távol a hullámok a téridő geometriájának kis változásaiként írhatók le

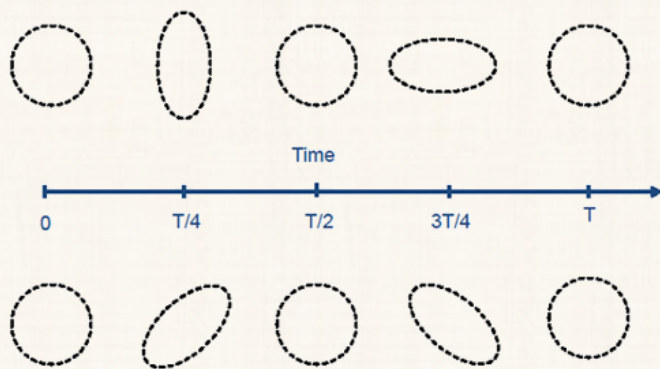
$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

$$\eta^{\rho\sigma} h^{\mu\nu}{}_{,\rho\sigma} = -16\pi\tau^{\mu\nu}$$

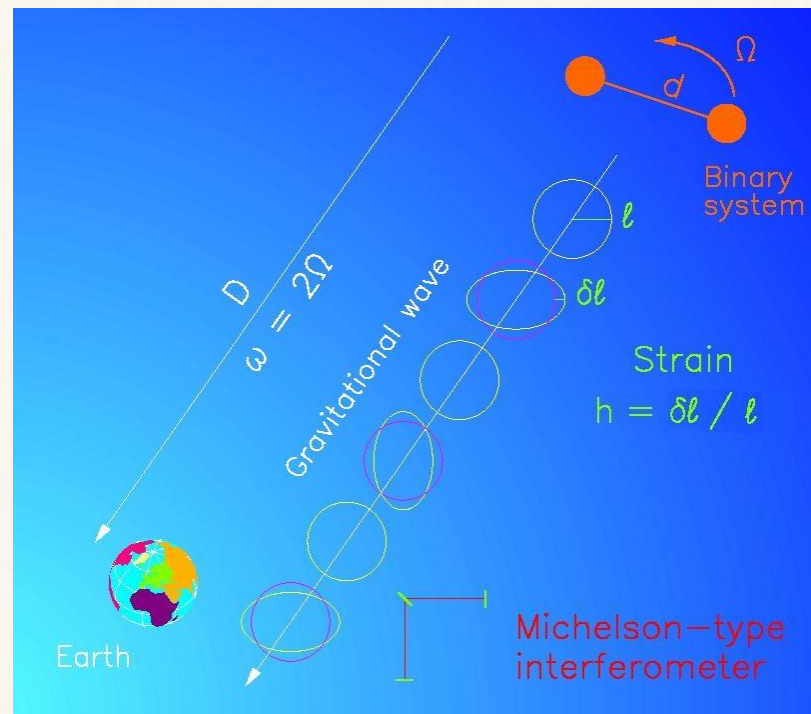
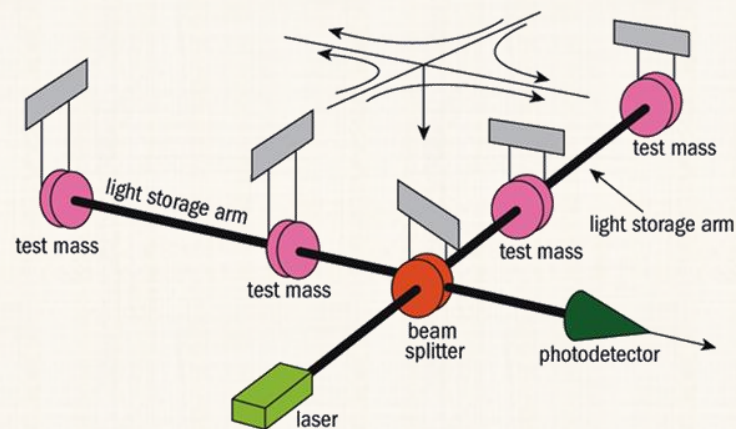
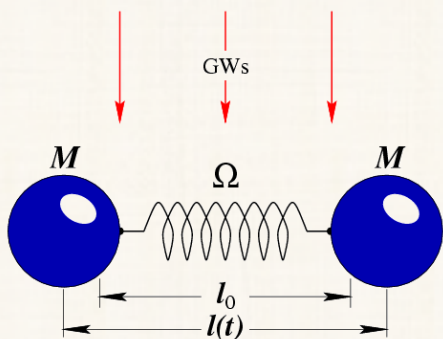


# Gravitációs hullámok

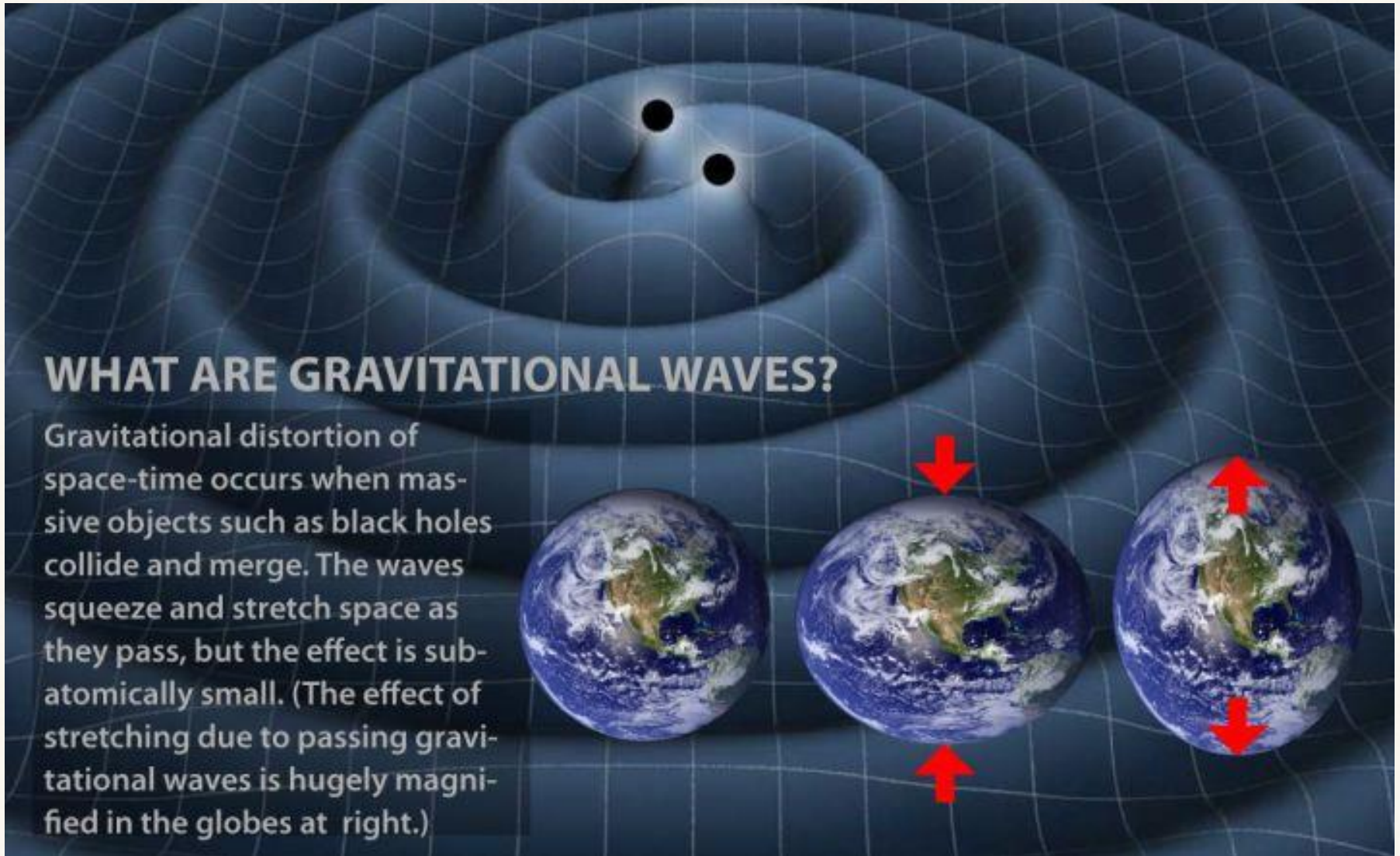
- Mértékrögzés, kétféle polarizációs állapot



- Az árapályerők által okozott relatív hosszváltozások megfigyelése



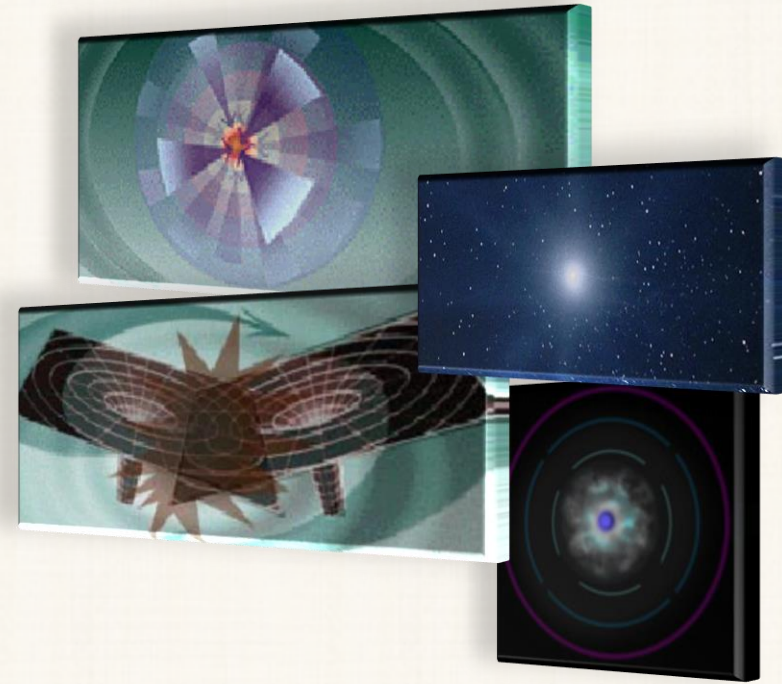
# Gravitációs hullámok



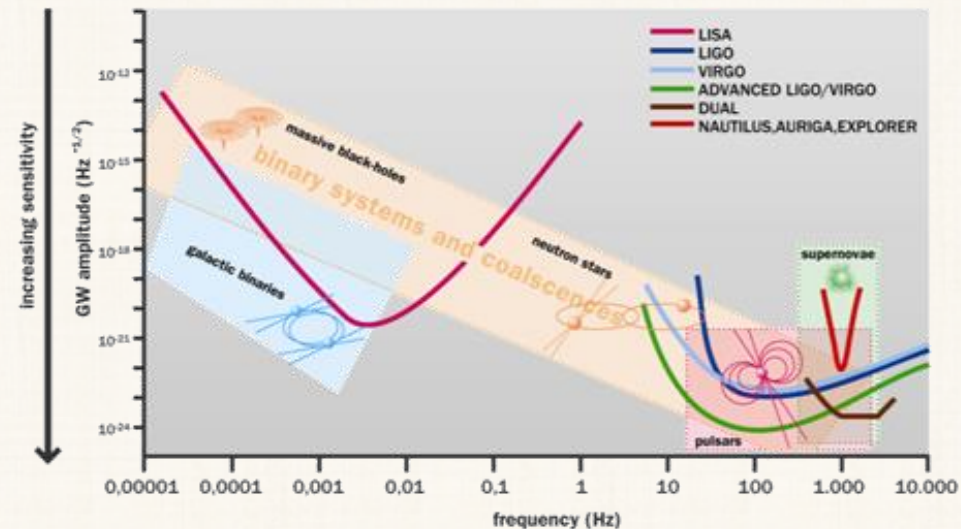
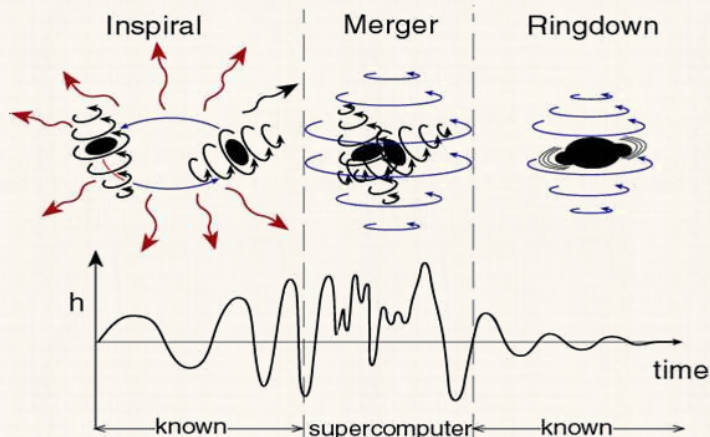
# A hullámok forrásai

## Frekvencia

- Szupernóva robbanás 1Khz
- Forgó neutroncsillagok 1 ... 10Khz
- Véletlenszerű források
- Összeolvadó kettős rendszerek 200Hz ... 2Khz



A kompakt kettősök, mint a gravitációs hullám obszervatóriumok jelentős forrásai, jól meghatározott hullámformával jellemezhetők fejlődésük **korai** és **késői** szakaszában (**perturbatív leírás**)



# A Virgo detektor

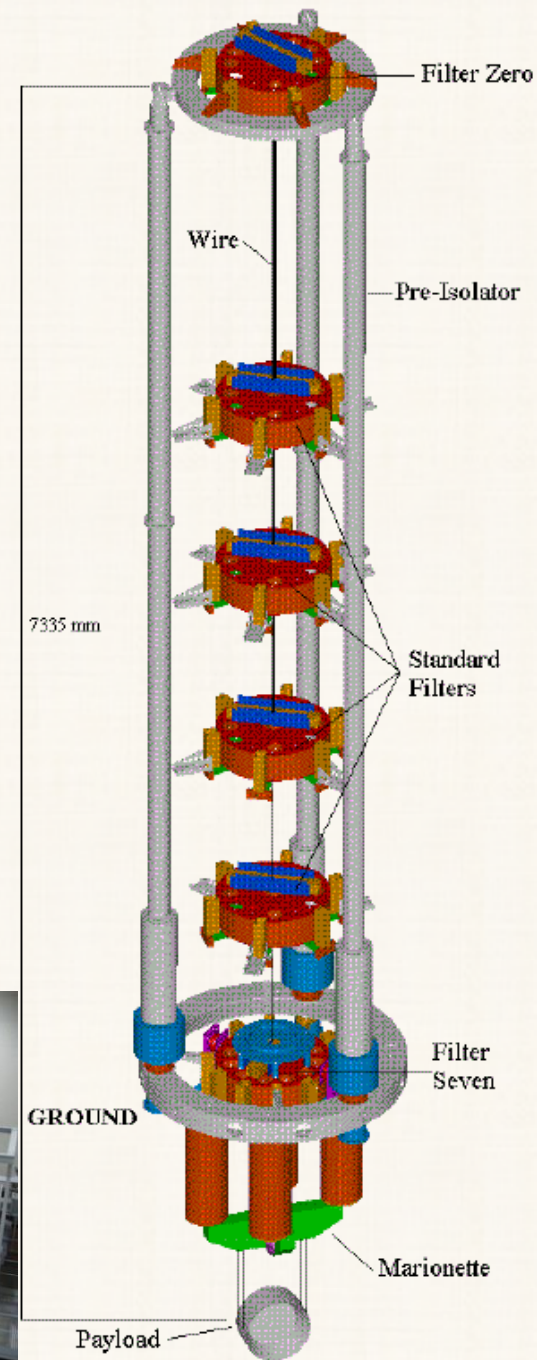
- 1985-től: Alain Brillet (CNRS, Franciaország) és Adalberto Giazotto (INFN, Olaszország) együttműködése
- 1989: Az első Virgo javaslat benyújtása
- 1994: A projektet elfogadja a CNRS és az INFN
- 1996 - 2003: Helyszíni munkálatok Pisa mellett, Cascinában



- 2007: LIGO - Virgo együttműködés, a mérési adatok, feldolgozó eljárások és számítási erőforrások megosztása
- 2007: Hollandia (Nikhef Intézet) csatlakozik a Virgo együttműködéshez, majd később Lengyelország, Magyarország (**Wigner Fizikai Kutatóközpont**) és Spanyolország

# Szeizmikus zajok csillapítása

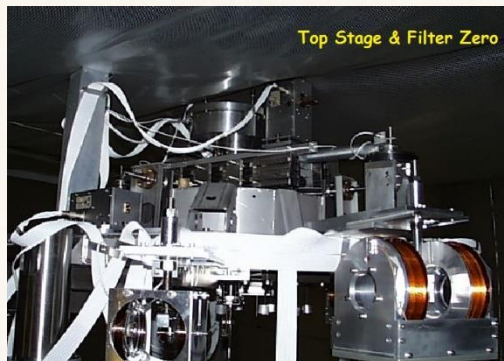
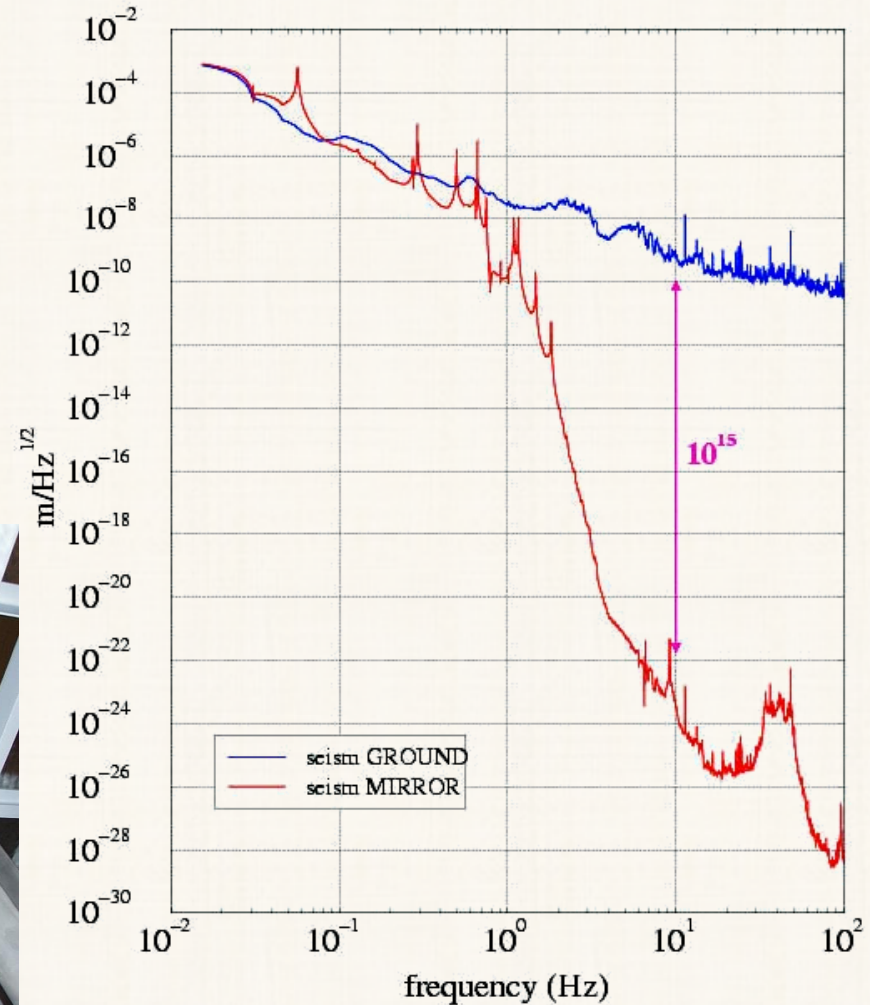
- A szeizmikus zajok a meghatározók a földi GH detektorok számára
- A VIRGO felfüggesztési rendszere (**Super Attenuator**) jelentősen csillapítja a szeizmikus zajokat 100 Hz alatt
- Hibrid (**passzív/aktív**) rendszer
- SA, többfokozatú inga
  - Fordított inga
  - 6 vagy 2 szeizmikus szűrő
  - Teher/tükör





# Szeizmikus zajok csillapítása

- Hibrid rendszer: **aktív** csillapítás 4 Hz alatt, **passzív** e fölött
- Mért max. csillapítás: 10 Hz-en  $10^{15}$



# Obszervatóriumok világszerte



LIGO  
Hanford



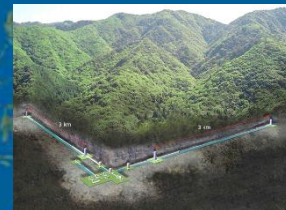
GEO  
Virgo



LIGO  
India  
(approved)

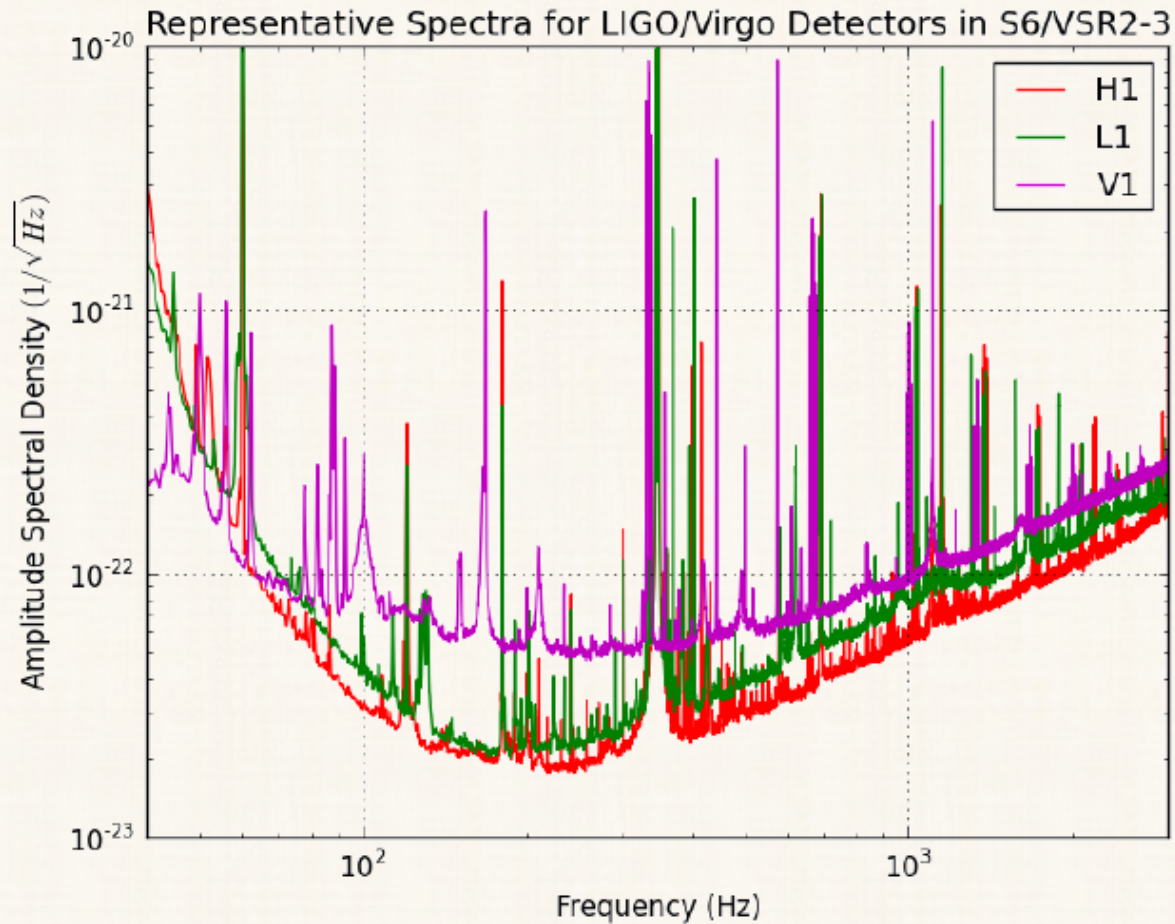


KAGRA

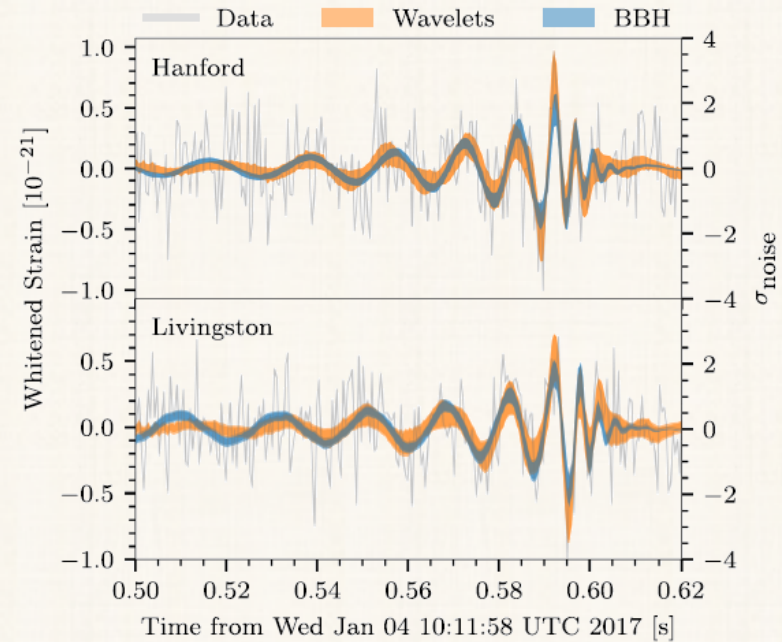
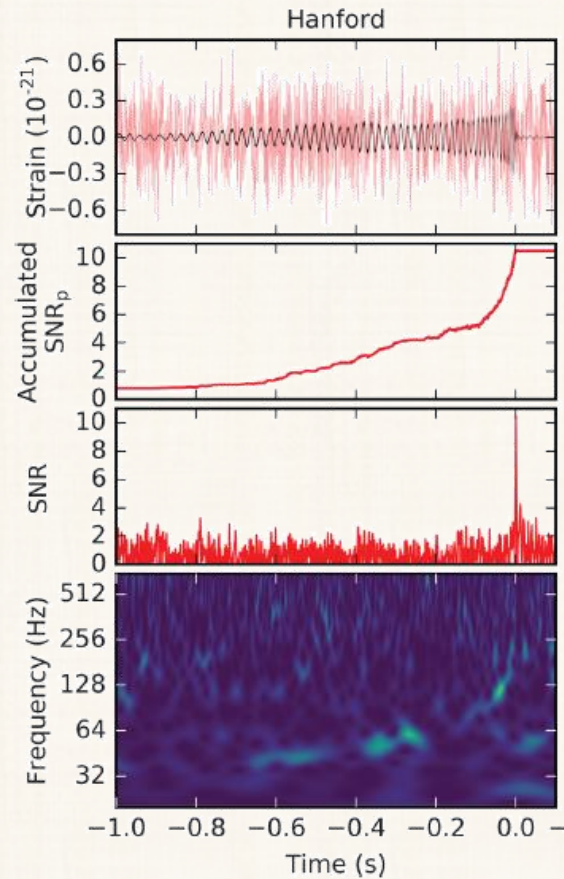
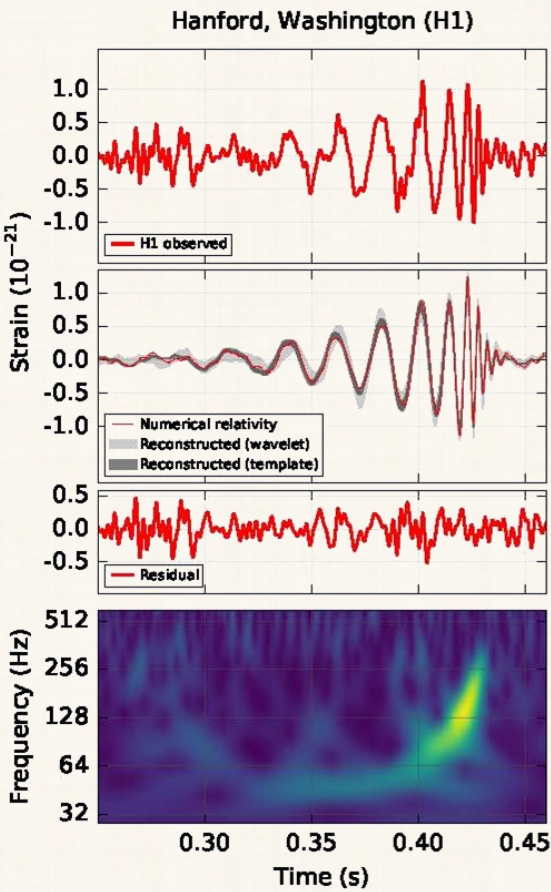


# Az első generációs detektorok

- Az első generációs detektorok érzékenysége, 2009 - 2010



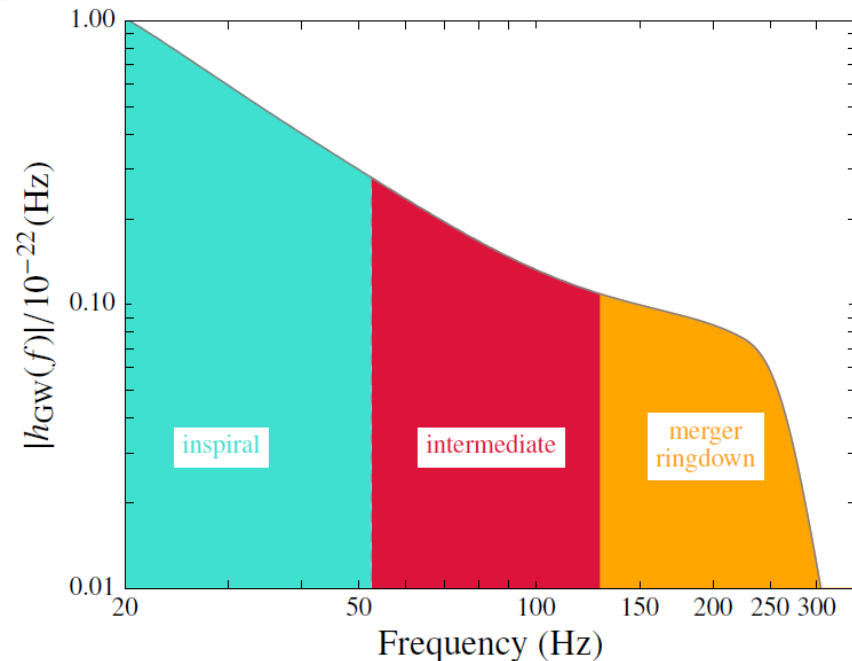
# Közvetlen megfigyelések – GW150914, GW151226, GW170104



# Közvetlen megfigyelések – GW150914, GW151226, GW170104

## GW150914

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180}$ Mpc
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$



## GW151226

Primary black hole mass	$14.2^{+8.3}_{-3.7} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$7.5^{+2.3}_{-2.3} M_{\odot}$
Chirp mass	$8.9^{+0.3}_{-0.3} M_{\odot}$
Total black hole mass	$21.8^{+5.9}_{-1.7} M_{\odot}$
Final black hole mass	$20.8^{+6.1}_{-1.7} M_{\odot}$
Radiated gravitational-wave energy	$1.0^{+0.1}_{-0.2} M_{\odot} c^2$
Peak luminosity	$3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$ erg/s
Final black hole spin	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$
Luminosity distance	$440^{+180}_{-190}$ Mpc
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

## GW170104

Primary black hole mass $m_1$	$31.2^{+8.4}_{-6.0} M_{\odot}$
Secondary black hole mass $m_2$	$19.4^{+5.3}_{-5.9} M_{\odot}$
Chirp mass $\mathcal{M}$	$21.1^{+2.4}_{-2.7} M_{\odot}$
Total mass $M$	$50.7^{+5.9}_{-5.0} M_{\odot}$
Final black hole mass $M_f$	$48.7^{+5.7}_{-4.6} M_{\odot}$
Radiated energy $E_{\text{rad}}$	$2.0^{+0.6}_{-0.7} M_{\odot} c^2$
Peak luminosity $\ell_{\text{peak}}$	$3.1^{+0.7}_{-1.3} \times 10^{56}$ erg s $^{-1}$
Effective inspiral spin parameter $\chi_{\text{eff}}$	$-0.12^{+0.21}_{-0.30}$
Final black hole spin $a_f$	$0.64^{+0.09}_{-0.20}$
Luminosity distance $D_L$	$880^{+450}_{-390}$ Mpc
Source redshift $z$	$0.18^{+0.08}_{-0.07}$

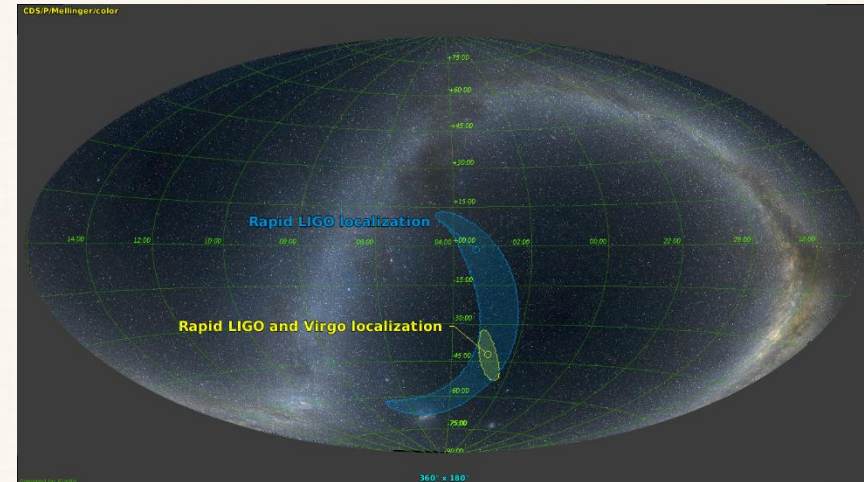
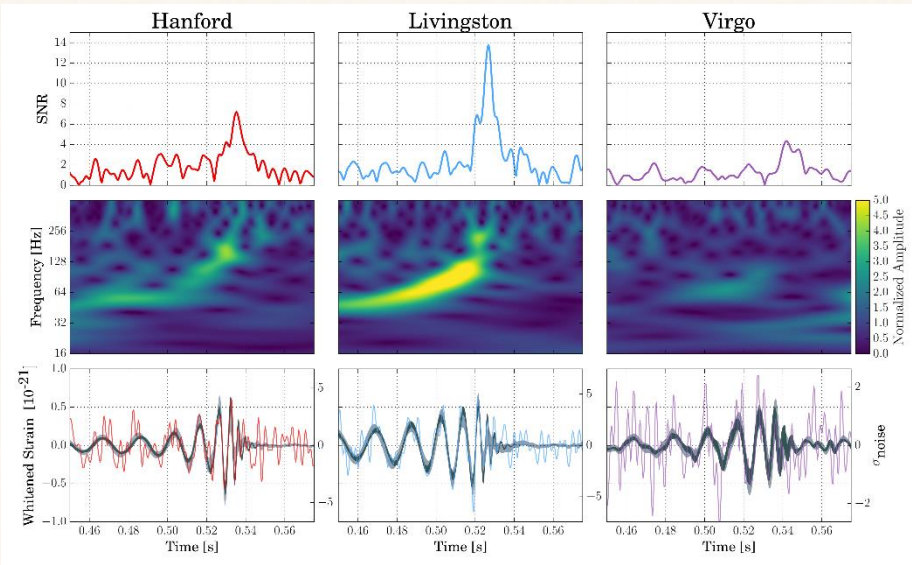
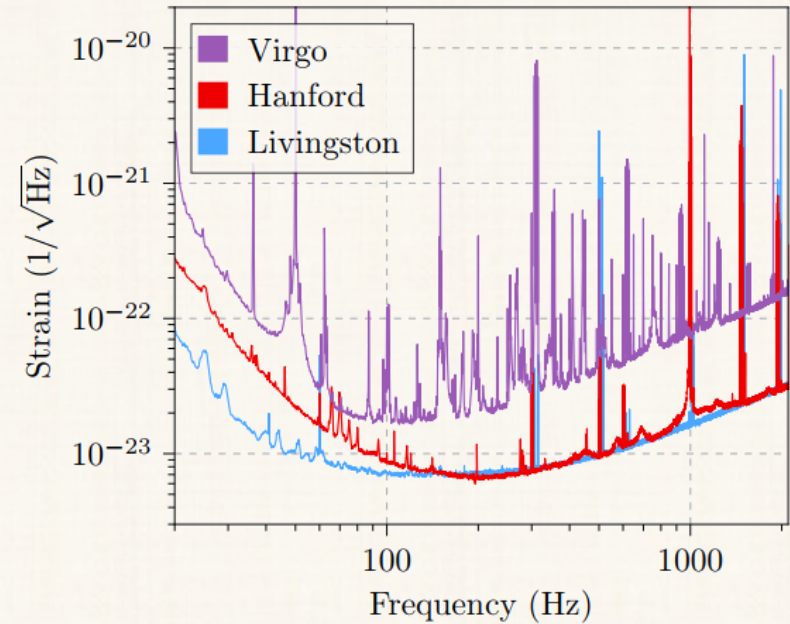
# A fejlesztett Virgo detektor

- 2011. október: Az első generációs Virgo detektor leállítása
- 2012. április: A fejlesztett Virgo végleges terveinek kidolgozása
- 2016. augusztus: Az integrációs szakasz vége: a fejlesztett Virgo teljes vákuumrendszere üzemel
- 2017. február: A fejlesztett Virgo átadási ünnepe
- 2017. március: 1 órás stabil detektorműködés
- 2017. augusztus: A Virgo csatlakozik a LIGO-hoz egy 4 hetes mérési időszakra
- 2017. szeptembe: Az első Virgo észlelési adatokat is tartalmazó gravitációshullám-megfigyelés publikációja



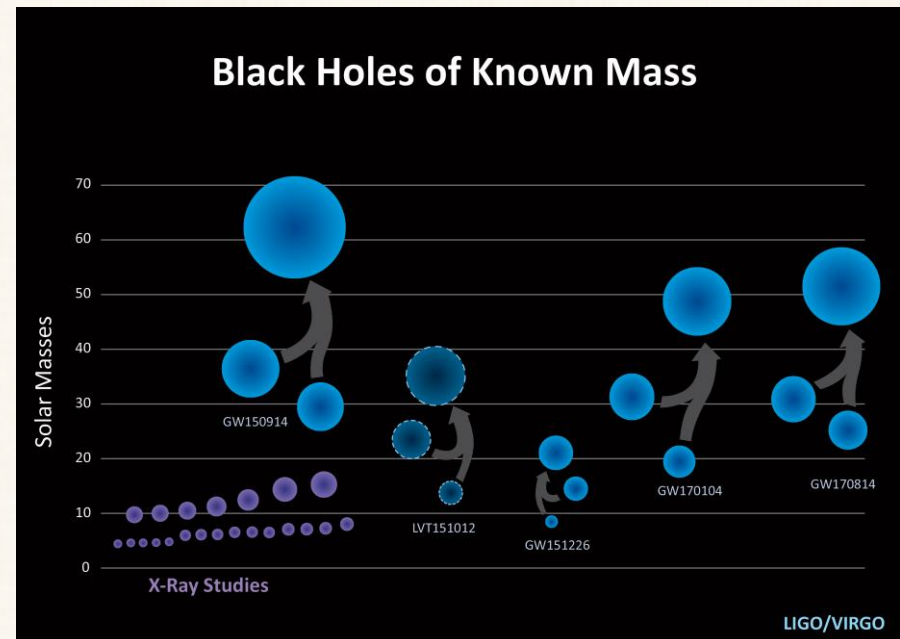
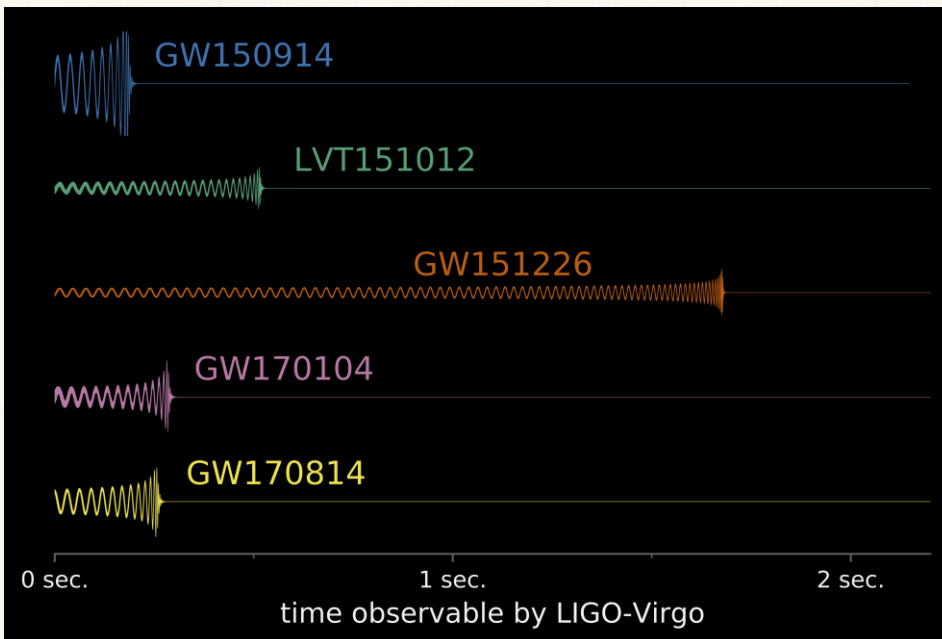
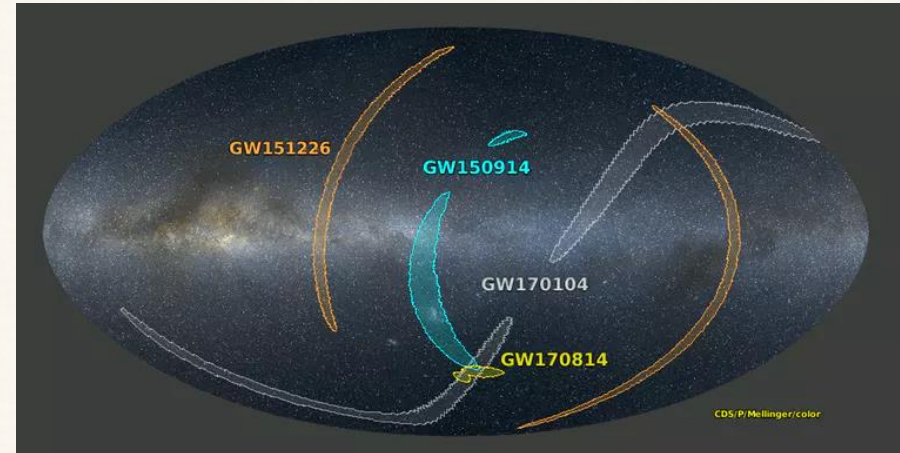
# Az első 3 detektoros észlelés – GW170814

- 2 héttel a Virgo csatlakozása után megtörtént az észlelés



# Közvetlen megfigyelések

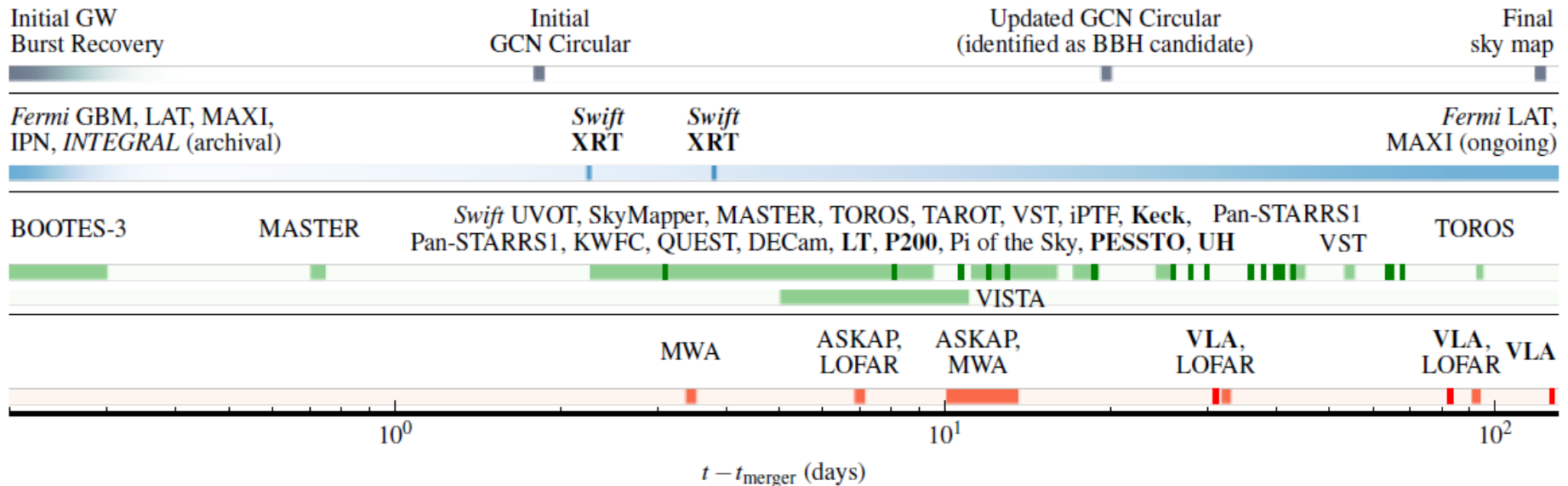
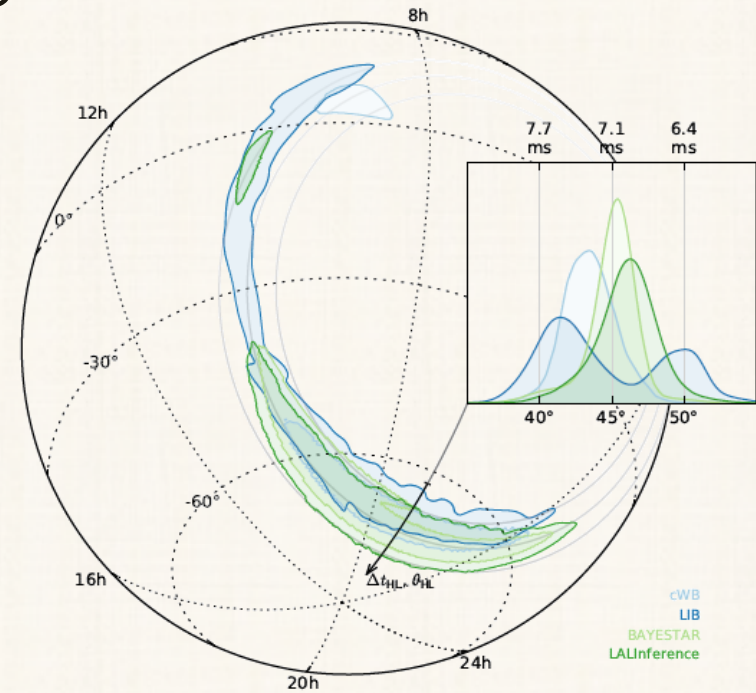
- Égi pozíció pontos meghatározása  
 $1160 \text{ deg}^2 \rightarrow 60 \text{ deg}^2$
- Polarizációs állapotok





# Égi pozíció

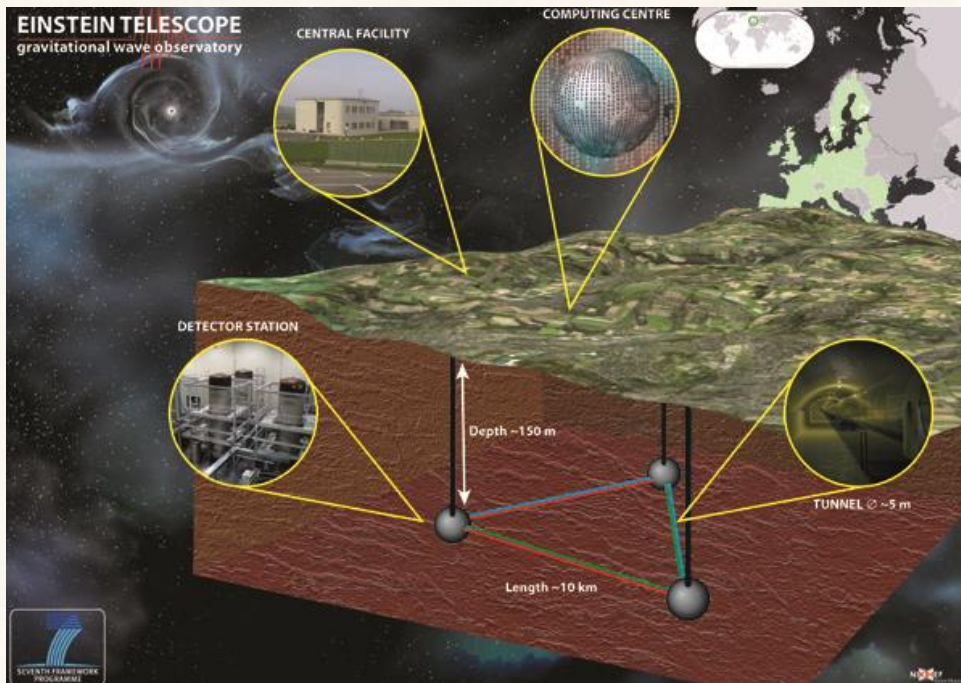
- Alacsony érzékenységű online keresőalgoritmusok
- Utólagos megfigyelések nagyenergiás, optikai infravörös, rádió teleszkópokkal
- BH források esetén EM megfelelő nem várható



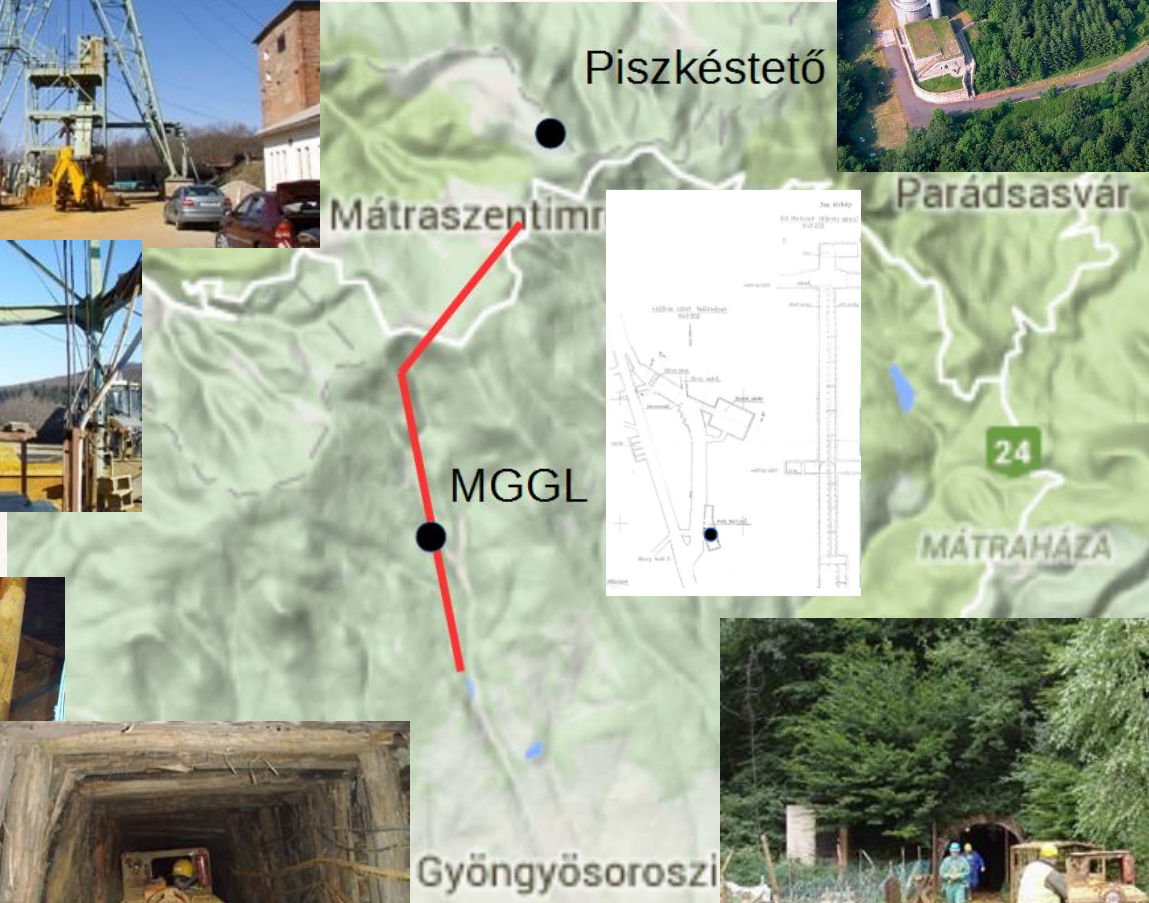
# További tervek

- Folytatódó megfigyelések és fejlesztések
- Nemzetközi együttműködés a 3. generációs detektorok kifejlesztésére  
**Gravitational Wave International Committee**

Observing run	Epoch	Duration (months)	aLIGO sensitivity	AdVirgo sensitivity
O1	2015–2016	4	Early	—
O2	2016–2017	6	Mid	Early
O3	2017–2018	9	Late	Mid
O4	2019	12	Design	Late
O5	2020+	–	Design	Design

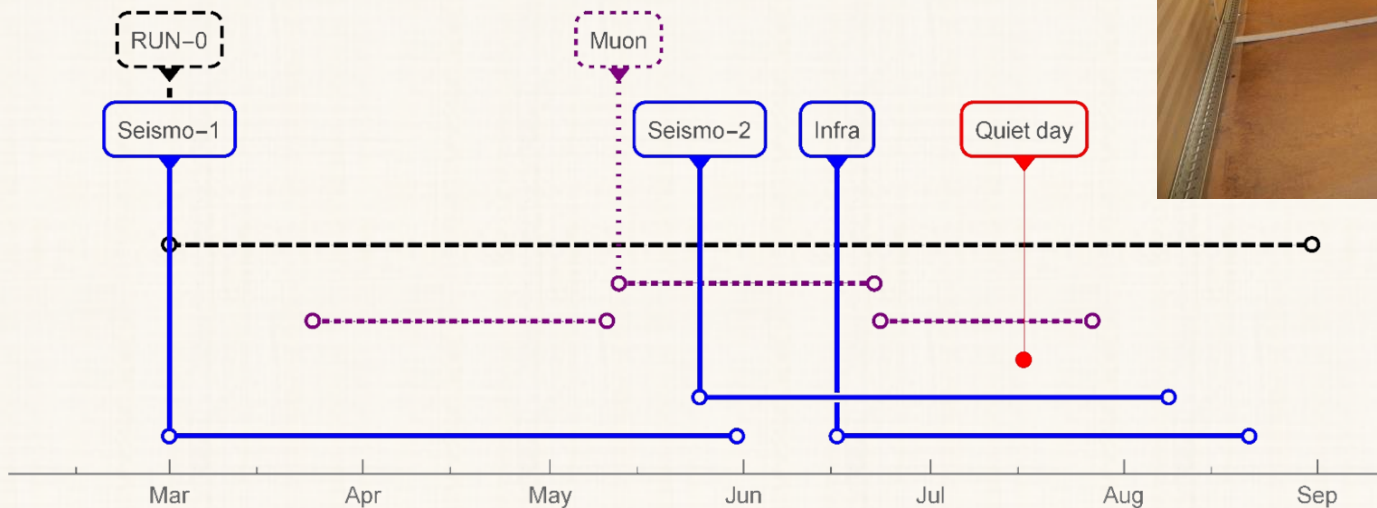


# GyöngyöSOROSZI bányA



# Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium

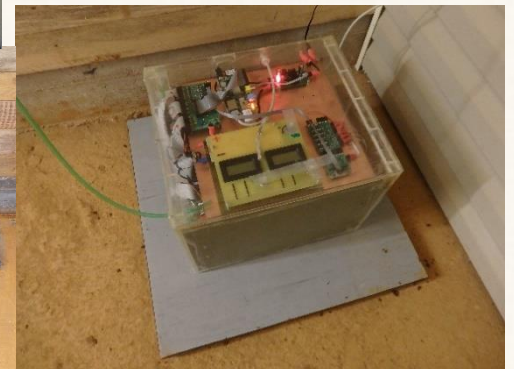
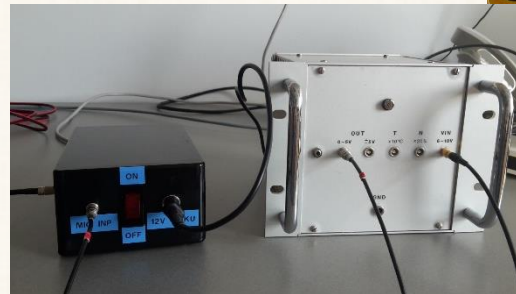
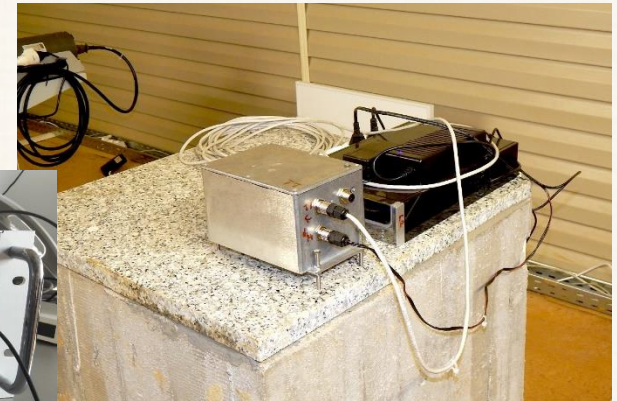
- Kialakítása **2016 februárjában** fejeződött be
  - **1.3 km**-re a bejárattól, **88 m**-re a felszín alatt
  - 3 mérőhely
  - optikai adatkábel a felszíni csatlakozáshoz
  - adatgyűjtés **2016 márciusától**



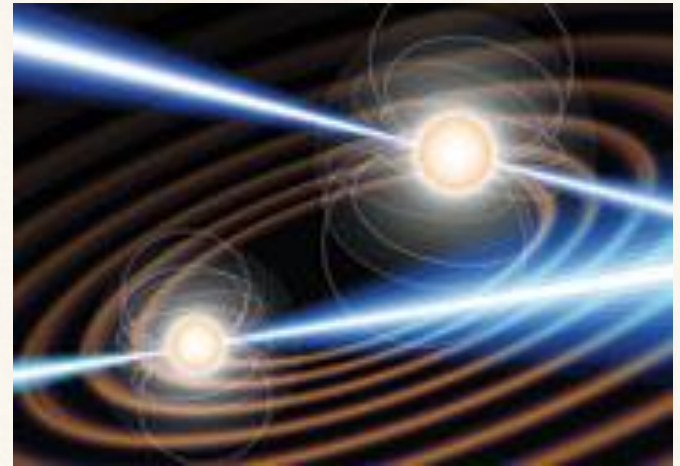
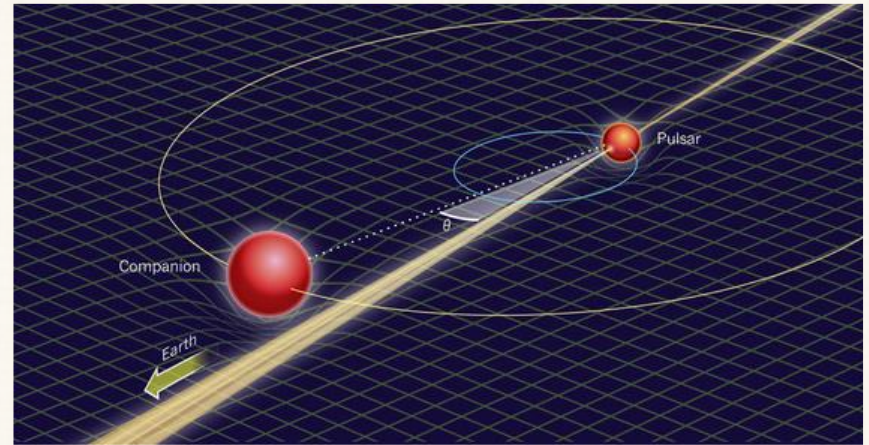
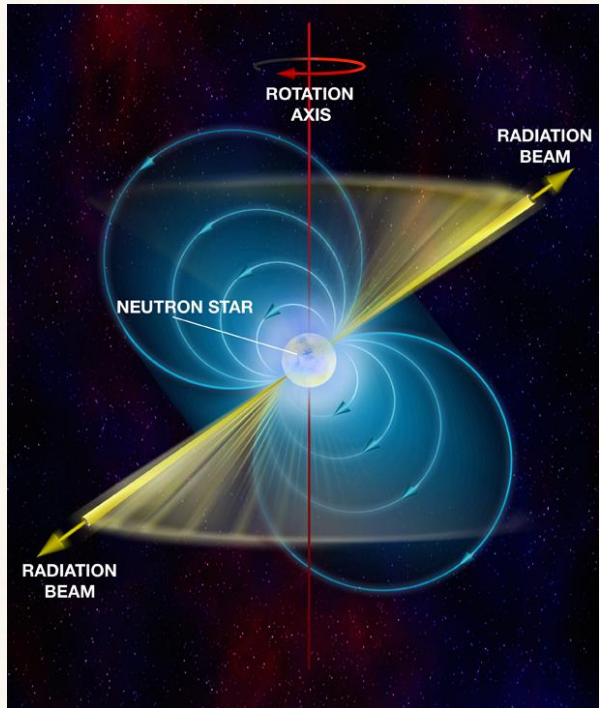
# Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratórium

## ■ Mérőeszközök

- Güralp CMG-3T **szeizmométer**
- A Varsói Egyetem **szeizmikus szenzora**
- **Infrahang** detektor
- Lemi-120 **magnetométer**
- hordozható **müon detektor**

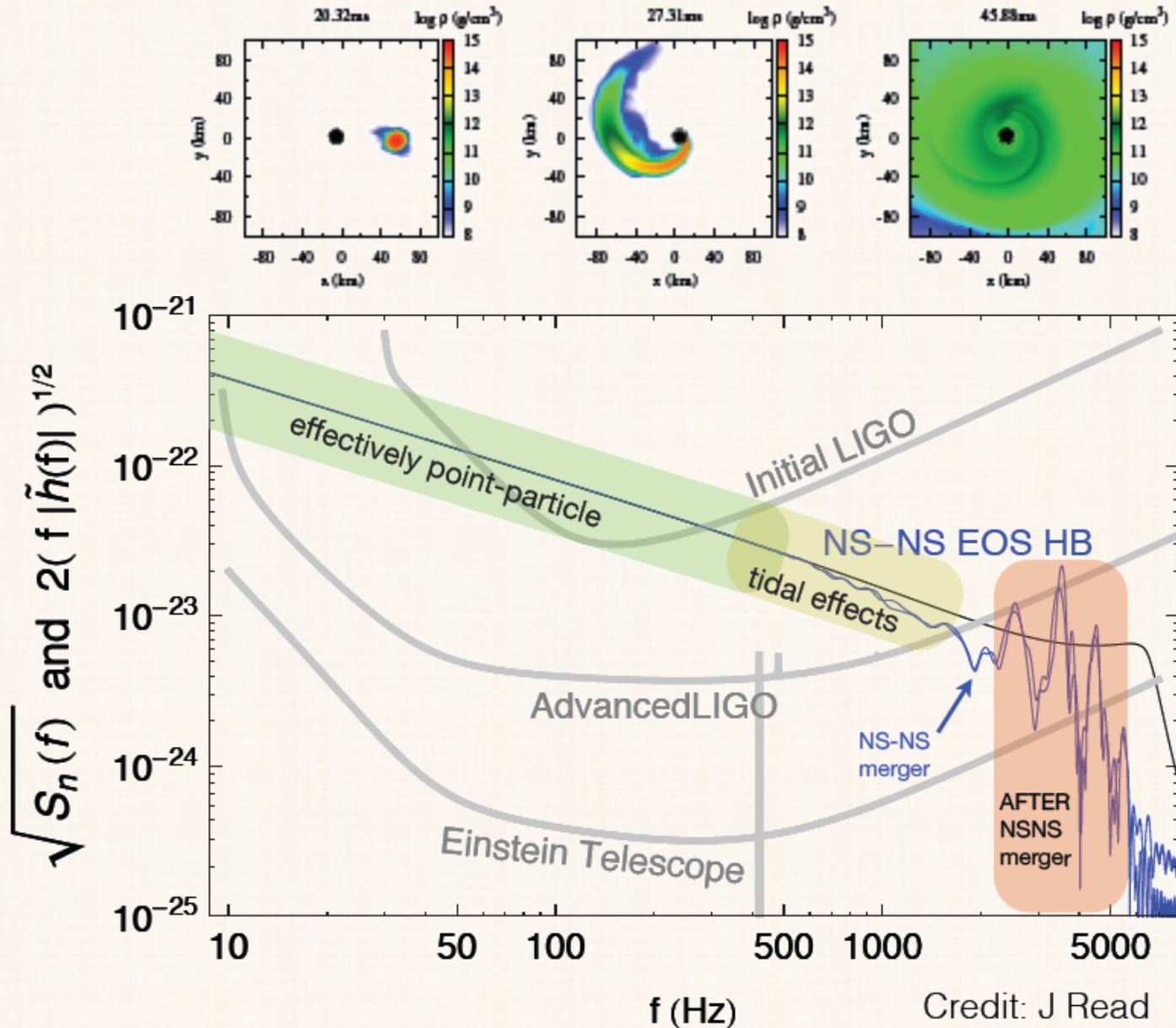


# Neutroncsillagok, fekete lyukak



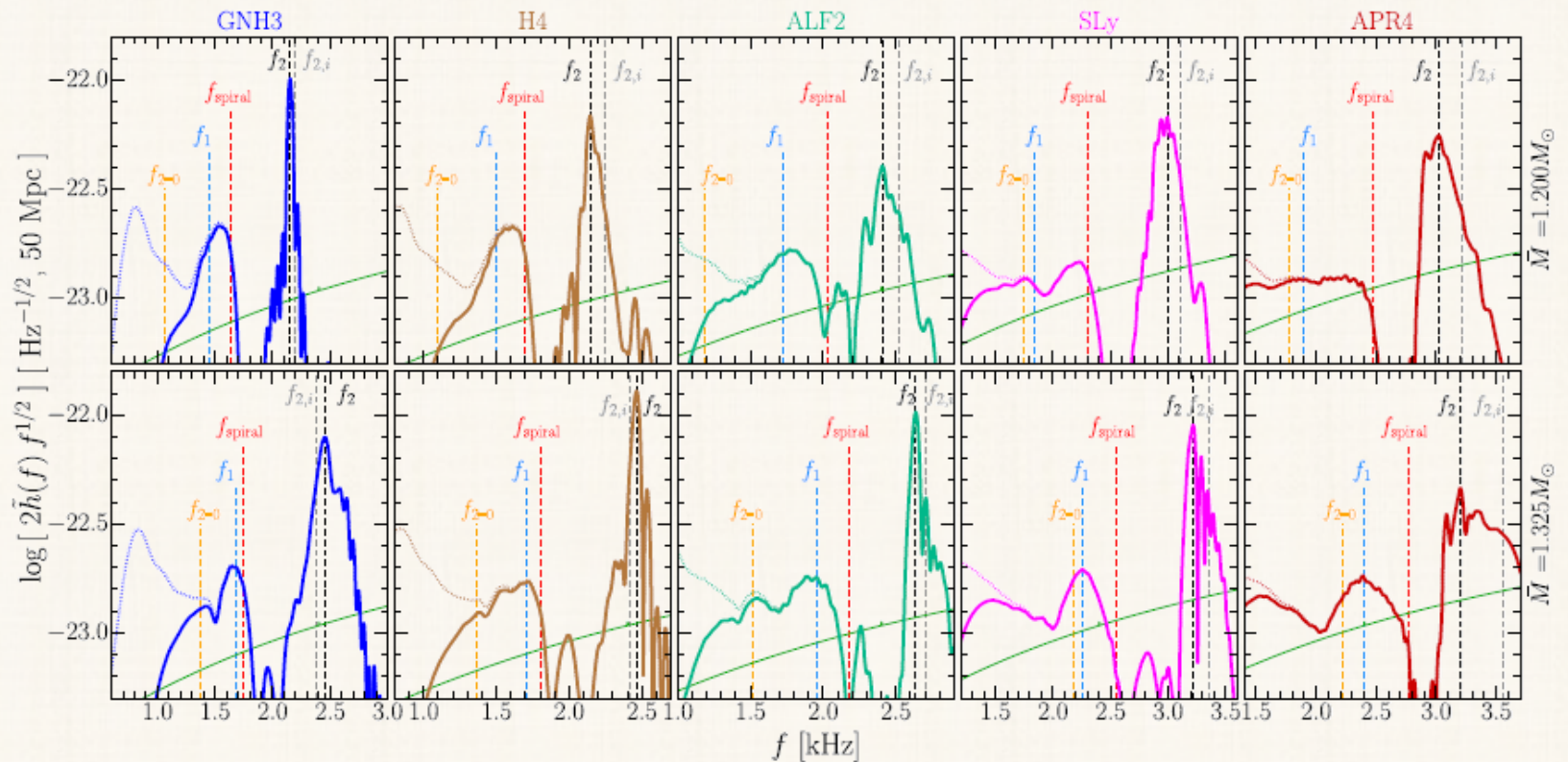
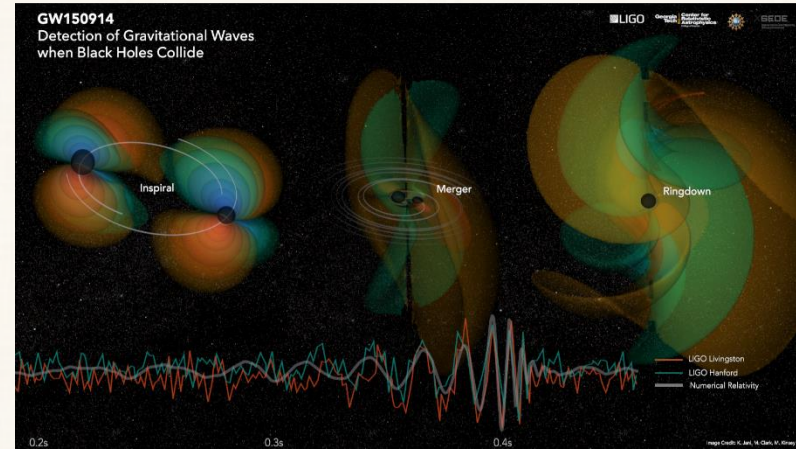
# NS megfigyelések, EM sugárzás

Kyutoka et al, 2015



# Hullámformák

- Numerikus számítások  
pl. **LORENE, KADATH**
- ÁRE és hidrodinamika  
pl. **Rezzola és Takami, 2016**





# Hullámformák

## ■ poszt-Newtoni közelítés

Kidder, 1995

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_N + \mathbf{a}_{PN} + \mathbf{a}_{SO} + \mathbf{a}_{2PN} + \mathbf{a}_{SS} + \mathbf{a}_{RR}$$

$$\mathbf{a}_N = -\frac{Gm}{r^2} \hat{\mathbf{n}}$$

$$\mathbf{a}_{PN} = -\frac{Gm}{c^2 r^2} \left\{ \hat{\mathbf{n}} \left[ (1 + 3\eta)v^2 - 2(2 + \eta)\frac{Gm}{r} - \frac{3}{2}\eta\dot{r}^2 \right] - 2(2 - \eta)\dot{r}\mathbf{v} \right\}$$

$$\mathbf{a}_{SO} = \frac{G}{c^2 r^3} \left\{ 6\hat{\mathbf{n}}[(\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{v}) \cdot (\mathbf{S} + \boldsymbol{\sigma})] - [\mathbf{v} \times (4\mathbf{S} + 3\boldsymbol{\sigma})] + 3\dot{r}[\hat{\mathbf{n}} \times (2\mathbf{S} + \boldsymbol{\sigma})] \right\}$$

$$\mathbf{a}_{RR} = \frac{8}{5}\eta\frac{G^2 m^2}{c^5 r^3} \left\{ \dot{r}\hat{\mathbf{n}} \left[ 18v^2 + \frac{2}{3}\frac{Gm}{r} - 25\dot{r}^2 \right] - \mathbf{v} \left[ 6v^2 - 2\frac{Gm}{r} - 15\dot{r}^2 \right] \right\}$$

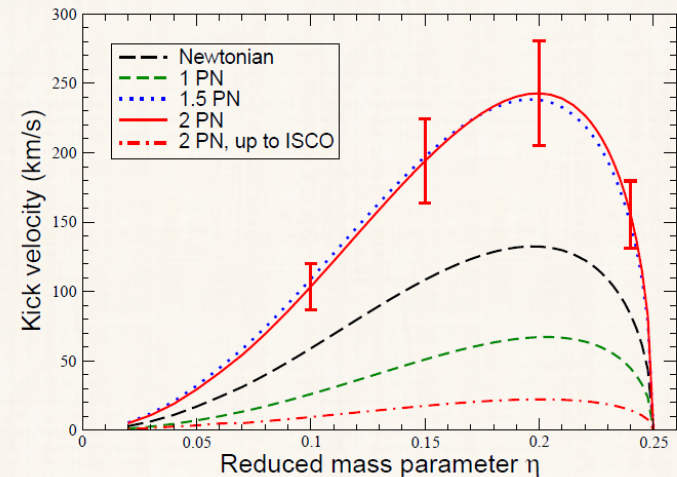
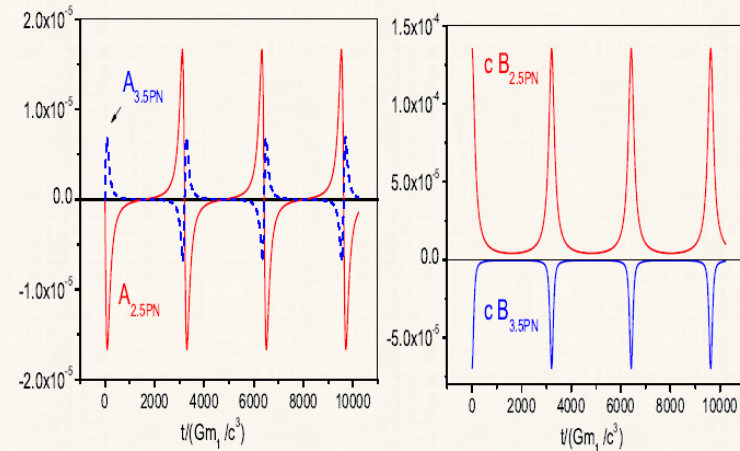
$$h_{TT}^{ij} = \frac{2G\mu}{c^4 D} \left[ Q^{ij} + P^{0.5} Q^{ij} + P Q^{ij} + P Q_{SO}^{ij} + P^{1.5} Q^{ij} + P^{1.5} Q_{SO}^{ij} \right]_{TT}$$

$$Q^{ij} = 2 \left[ v^i v^j - \frac{Gm}{r} n^i n^j \right]$$

$$P^{0.5} Q^{ij} = \frac{\delta m}{cm} \left\{ 3\frac{Gm}{r} [2n^{(i} v^{j)} - \dot{r} n^i n^j] (\hat{\mathbf{N}} \cdot \hat{\mathbf{n}}) + \left[ \frac{Gm}{r} n^i n^j - 2v^i v^j \right] (\hat{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{v}) \right\}$$

$$P Q_{SO}^{ij} = \frac{2G}{cr^2} (\Delta \times \hat{\mathbf{N}})^{(i} n^{j)}$$

Zhang, 2013



Blanchet, 2005

# Hullámformák

Favata, 2014

- Stationary Phase Approximation

$$\tilde{h}_T(f) = \mathcal{A} f^{-7/6} e^{i\Psi_T(f)}$$

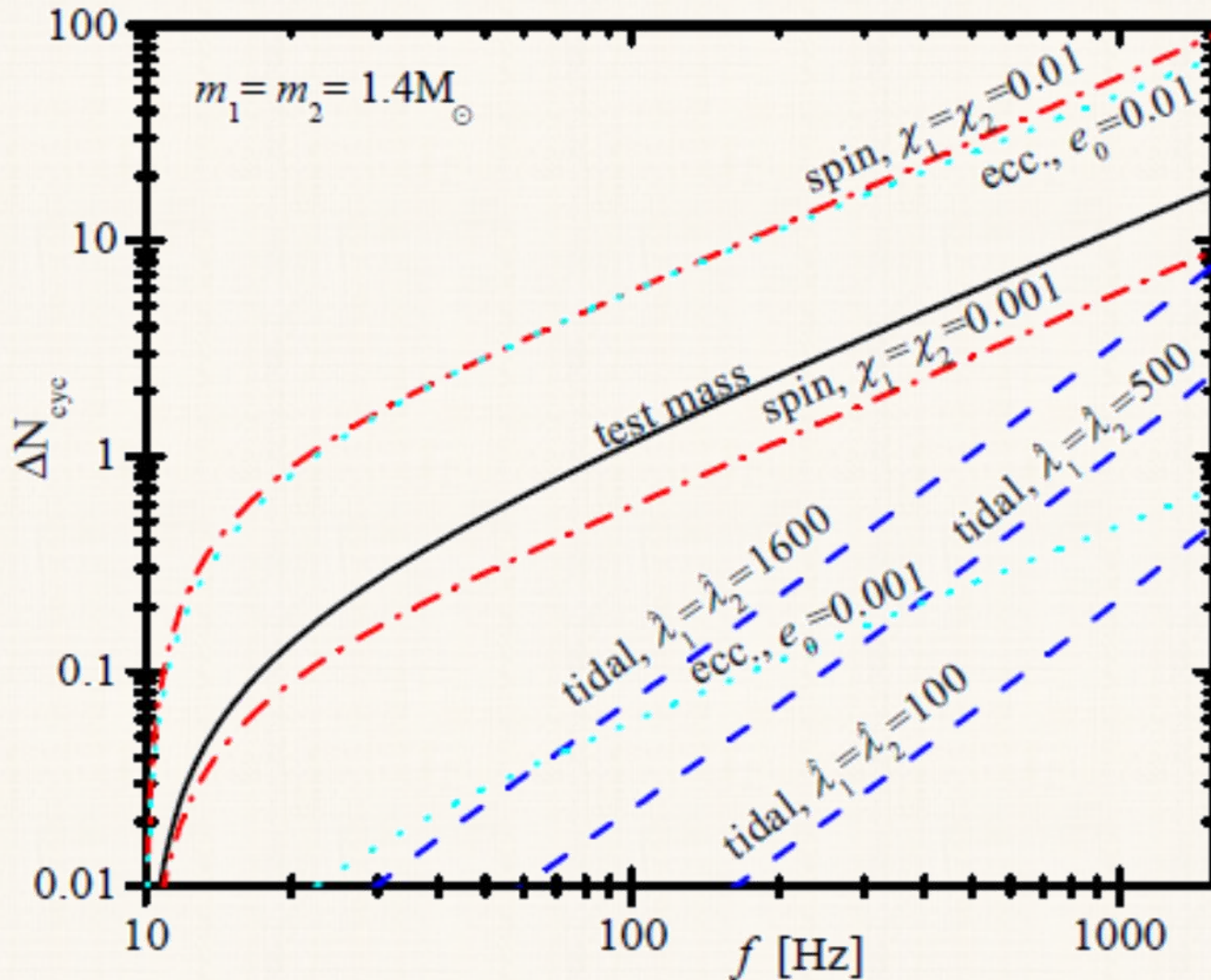
- A hullám fázisa

$$\begin{aligned} \Psi_T(f) = \phi_c + 2\pi f t_c + \frac{3}{128\eta v^5} & \left( \Delta\Psi_{3.5\text{PN}}^{\text{pp}} \right. \\ & \left. + \Delta\Psi_{3\text{PN}}^{\text{spin}} + \Delta\Psi_{2\text{PN}}^{\text{ecc.}} + \Delta\Psi_{6\text{PN}}^{\text{tidal}} + \Delta\Psi_{6\text{PN}}^{\text{tm}} \right) \end{aligned}$$

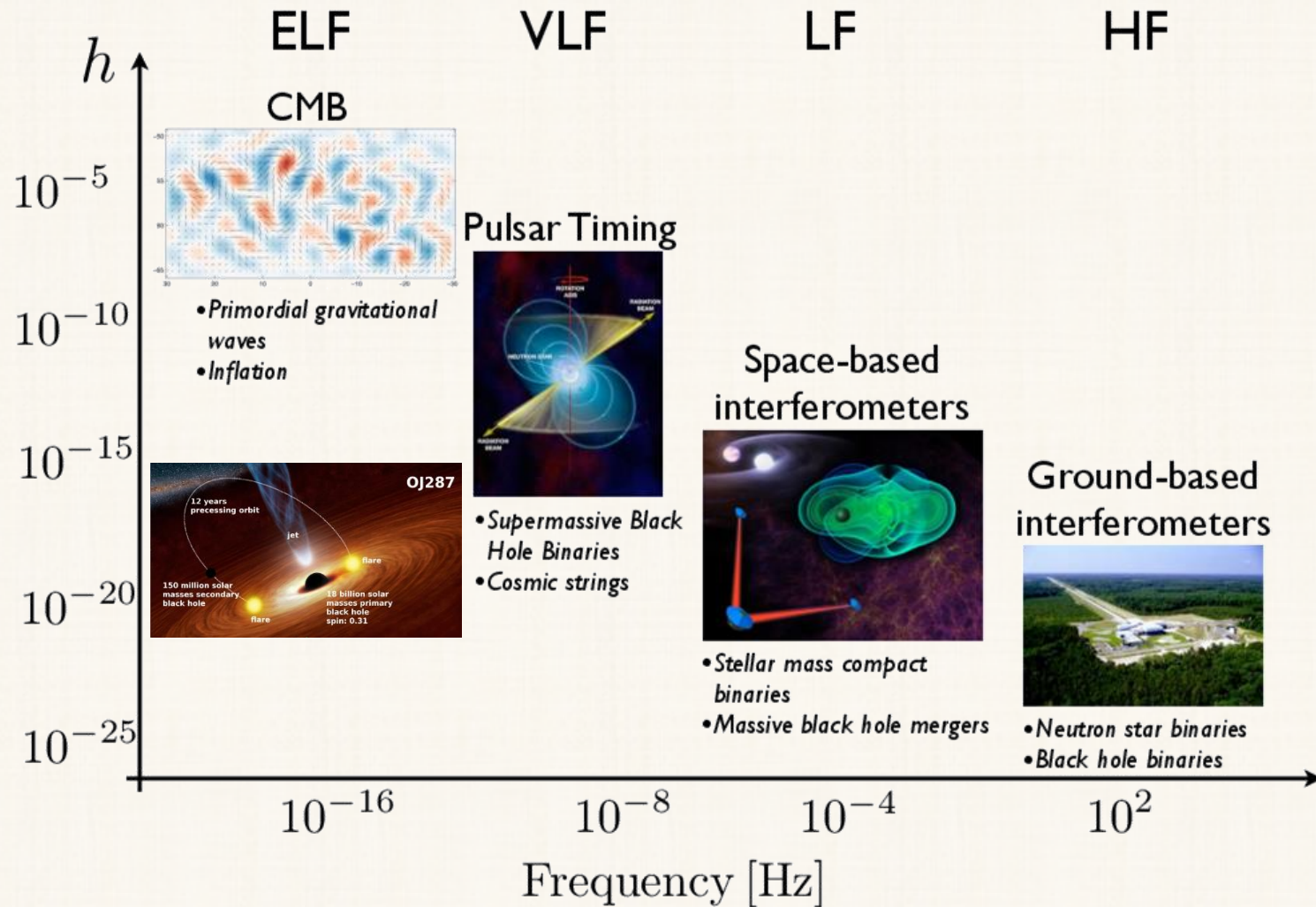
- NS tidal love number:  $\sim 200$   
fekete lyukakra:  $0$

$$\Delta\Psi_{6\text{PN}}^{\text{tidal}} = -\frac{39}{2} \tilde{\Lambda} v^{10} + v^{12} \left( \frac{6595}{364} \delta\tilde{\Lambda} - \frac{3115}{64} \tilde{\Lambda} \right)$$

# Neutroncsillagok megfigyelése



# Gravitációshullám - csillagászat



# A Wigner Virgo csoport tagjai

**VASÚTH MÁTYÁS**

PhD

**NAGY-EGRI MÁTÉ FERENC**

PhD diák

**BARTA DÁNIEL**

PhD diák

**SOMLAI LÁSZLÓ**

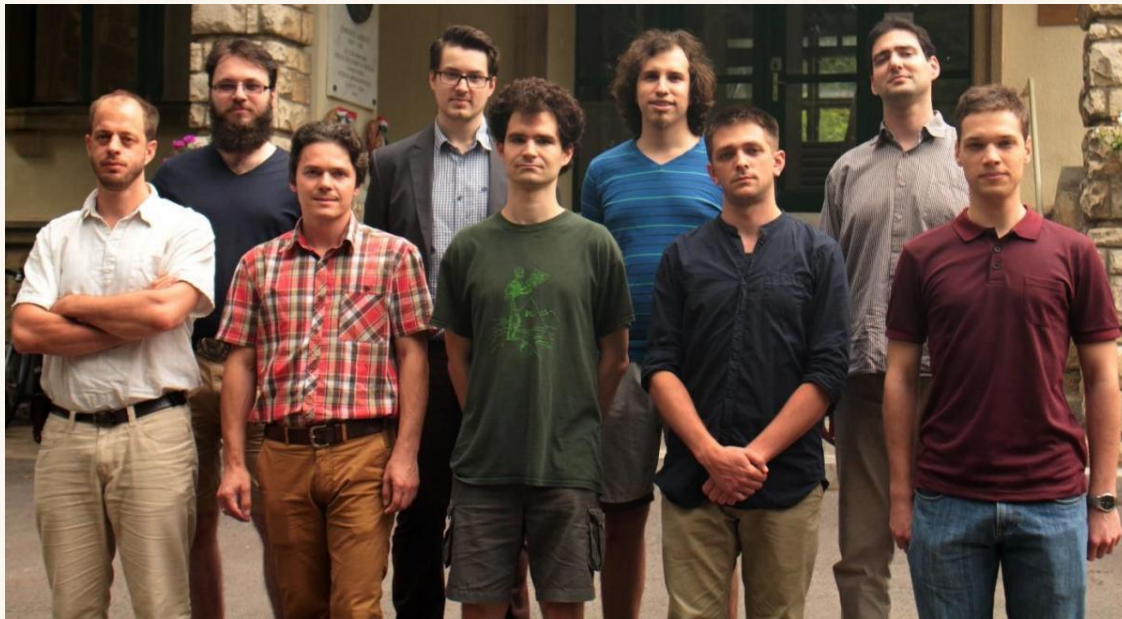
PhD diák

**KACSKOVICS BALÁZS**

MsC

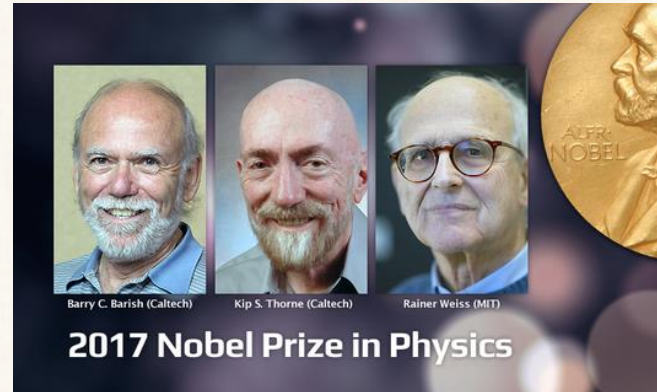
**MARÓTI JÁNOS ENDRE**

MsC





Köszönöm a figyelmet!



# GH-k a Wignerben

- 1990-91, Perjés Zoltán, kutatási ösztöndíj a Caltech-be Kip Thorne-hoz  
**spinhatások vizsgálata**
- Spinek önkölcsönhatása  
**Mikóczy B, Gergely ÁL, VM, 2005**
- GRID rendszerek összekapcsolása  
EGI Grid ↔ OSG ↔ LDG
- GPU fejlesztés, párhuzamosítás
- PYCBC, részvétel a programcsomag fejlesztésében
- CBwaves, poszt-Newtoni hullámformák generálása

