

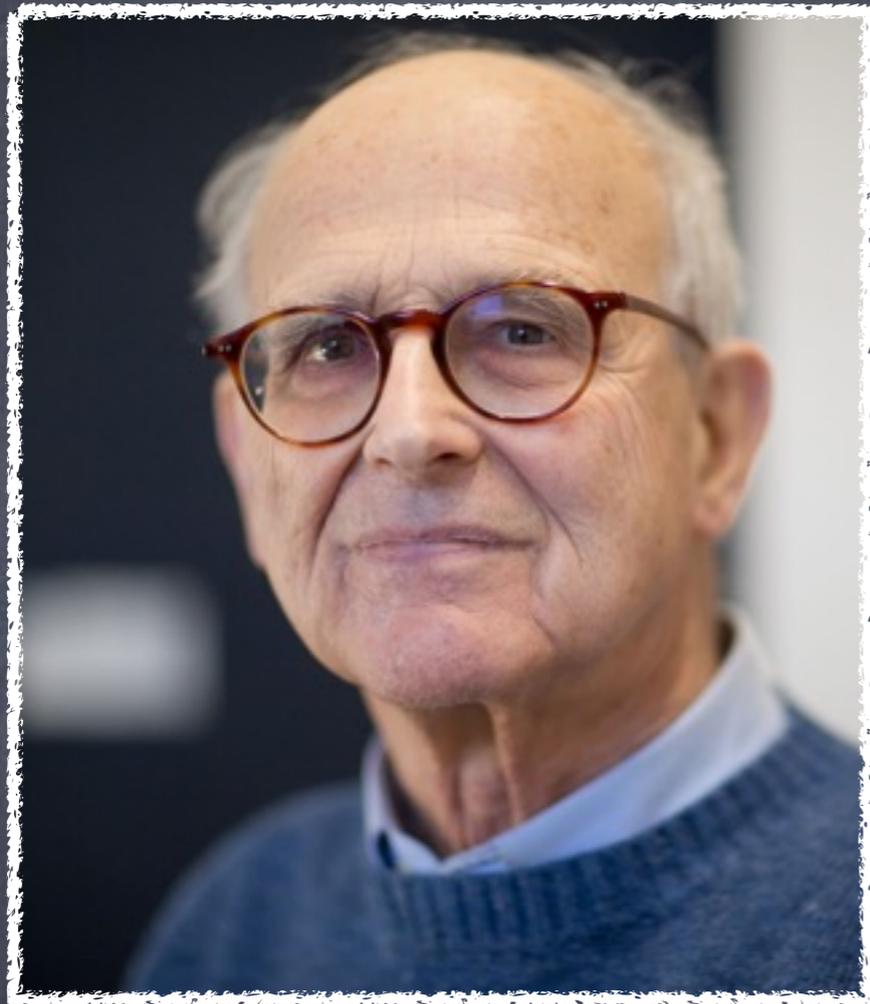
A löbbcsatornás csillagászat születése

Trócsányi Zoltán

Debreceni Egyetem, Fizikai Intézet

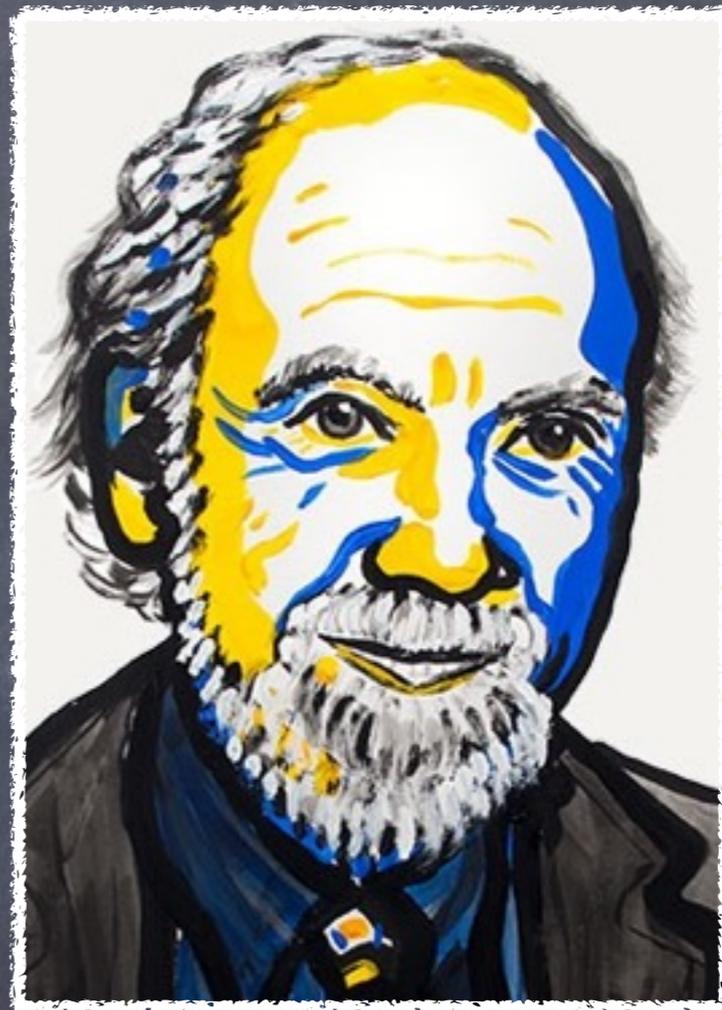
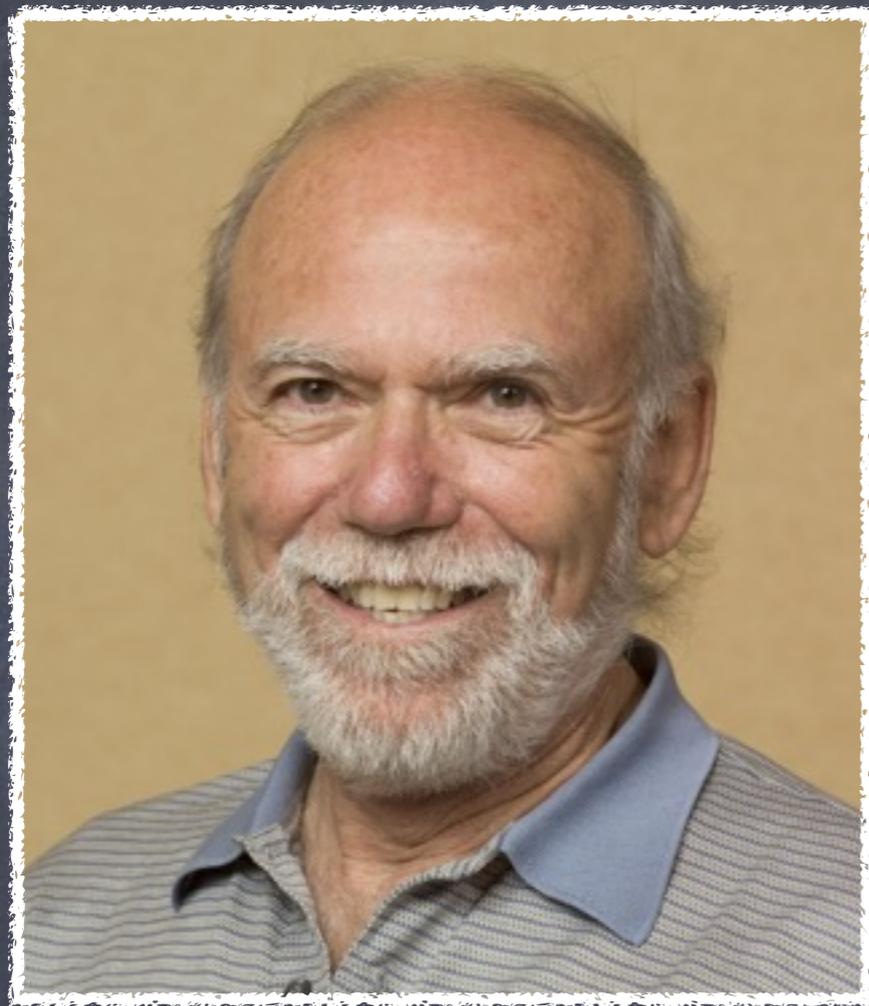
a 2017. évi Fizikai Nobel-díj
kitüntetettjei:

"döntő hozzájárulásukért a LIGO
detector építéséhez,
és a gravitációs hullámok
felfedezéséért"



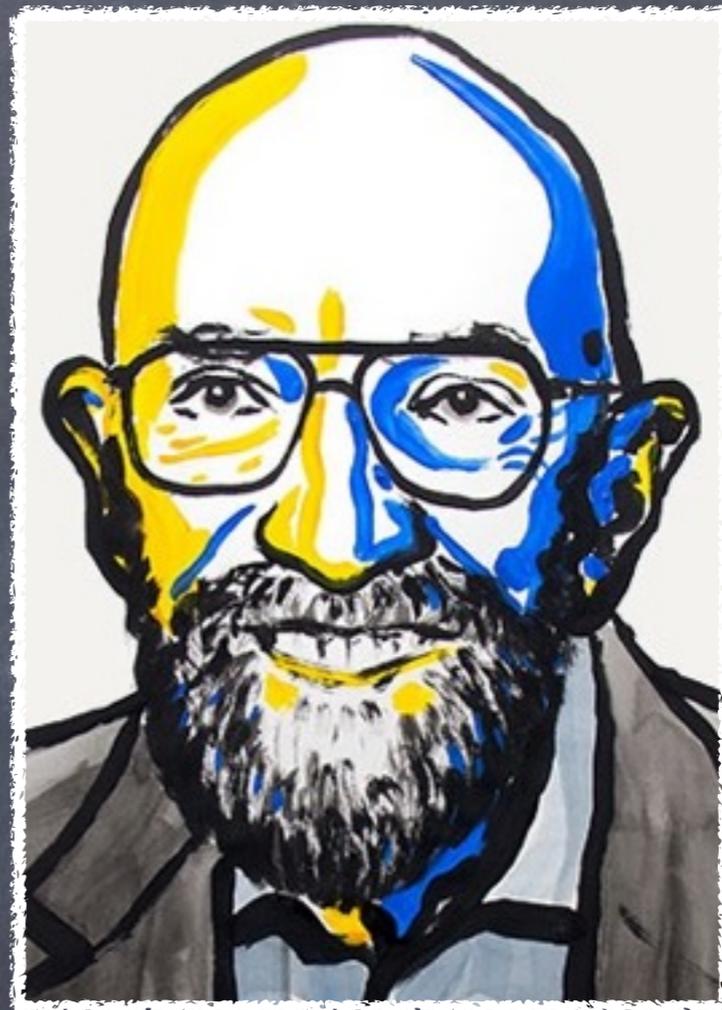
Rainer Weiss, LIGO/VIRGO Collaboration,
MIT, Cambridge, MA, USA

interferometriára alapuló gravitációs hullámészlelés
lehetőségének úttörője, és zászlósa 1967-től (1/2 rész)



Barry C. Barish, LIGO/VIRGO Collaboration,
Caltech, Pasadena, CA, USA

a LIGO program sikerének vezéregyénisége (1/4 rész)



Kip S. Thorne, LIGO/VIRGO Collaboration,
Caltech, Pasadena, CA, USA

a gravitációs hullámok elméletének nagymestere,
a kísérletek létrehozásának támogatója (1/4 rész)

Tömegvonzás - elektromos kölcsönhatás

- statika erőtvényei:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

csak vonzó

vonzó és taszító

- dinamika üres térben:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad \square \vec{B} = 0$$

$$\square h_{\mu\nu} = 0 \quad \square \vec{E} = 0$$

hullámegyenletek!

megoldásuk hullám üres térben,
amelyeknek forrása mozgó töltés

dimenzióanalízis

- a gömb felülete sugarának négyzetével arányos: $f \propto r^2$
- pontszerű forrásból érkező hullám energiaáram-sűrűsége a forrás és észlelő közötti távolság négyzetével fordítva arányos: $E \propto 1/r^2$
- a hullám amplitudója a távolsággal fordítottan arányos: $A \propto 1/r$
- a metrikának nincs fizikai dimenziója: $h \propto \frac{R_s}{r}$

általános relativitásból

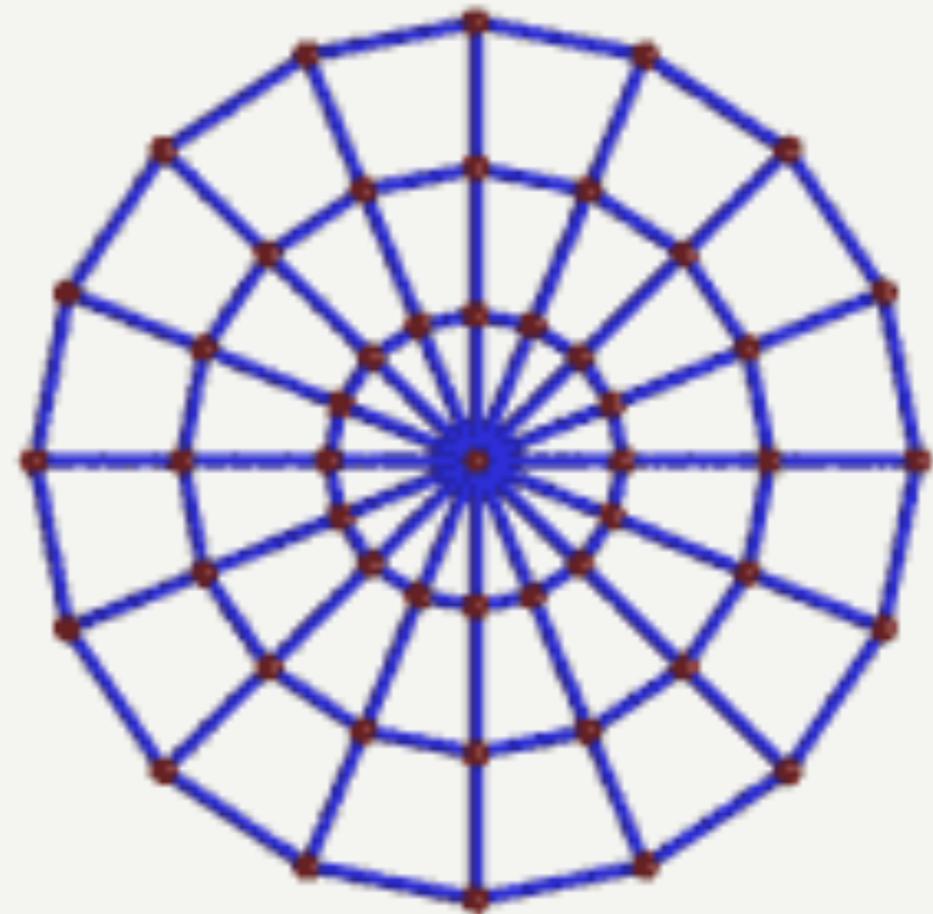
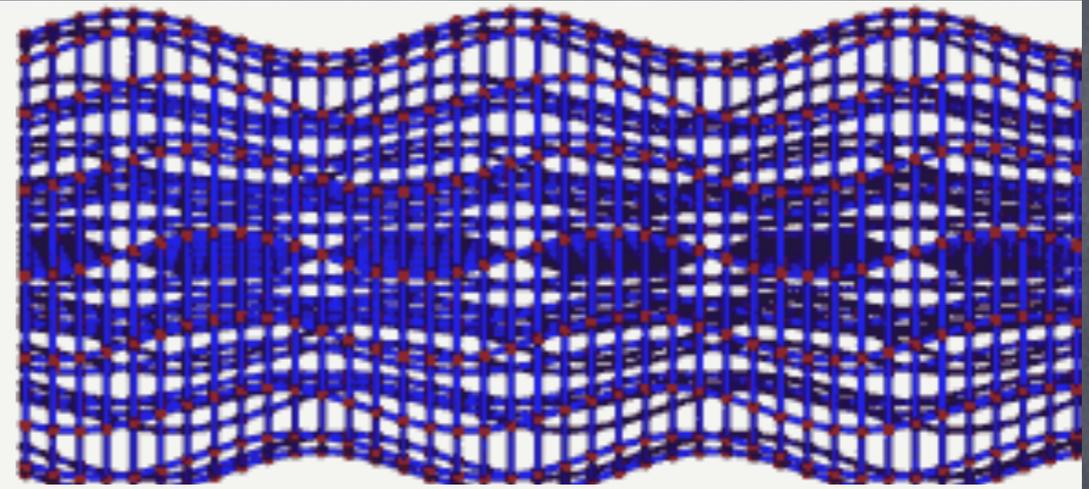
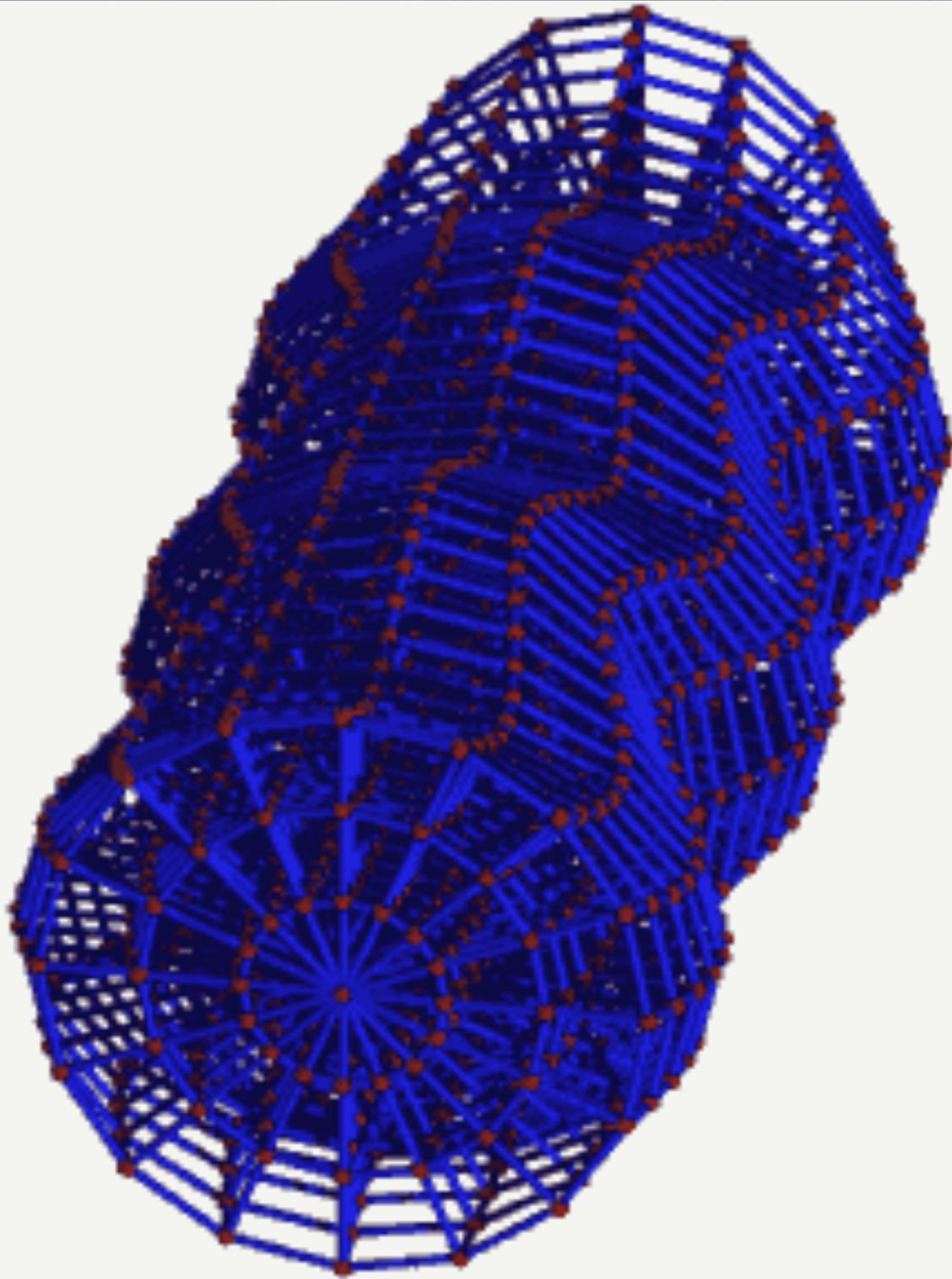
$$h = C \frac{R_s}{r}, \quad C \lesssim 1$$

- például: $R_s = 100 \text{ km} = 10^5 \text{ m}$,
 $r = 10^9 \text{ fényév} = 10^{25} \text{ m}$:

$$h = 10^{-20}$$

egy atomnyi változás a Nap-Föld távolságon!

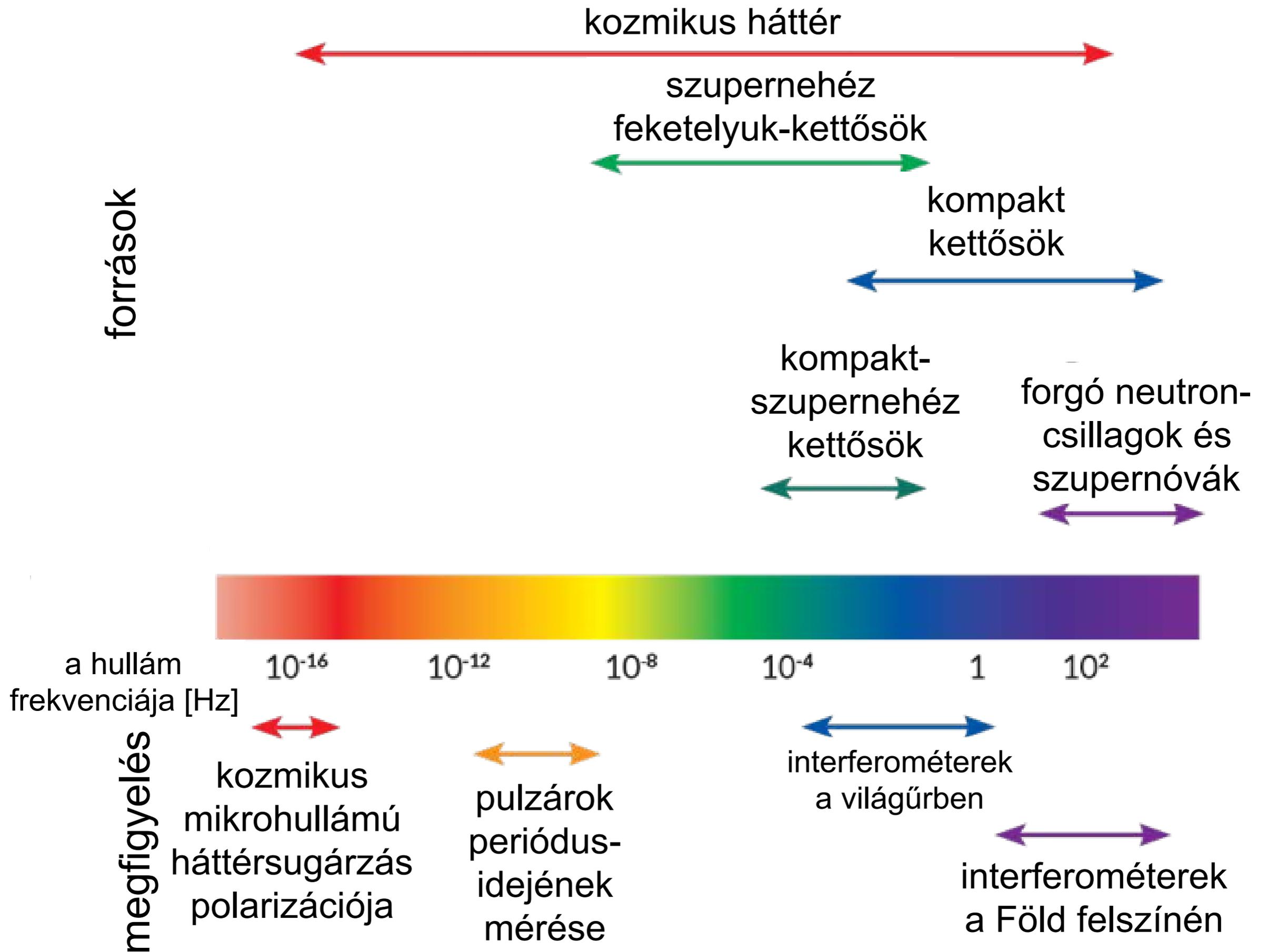
Gravitációs hullámok



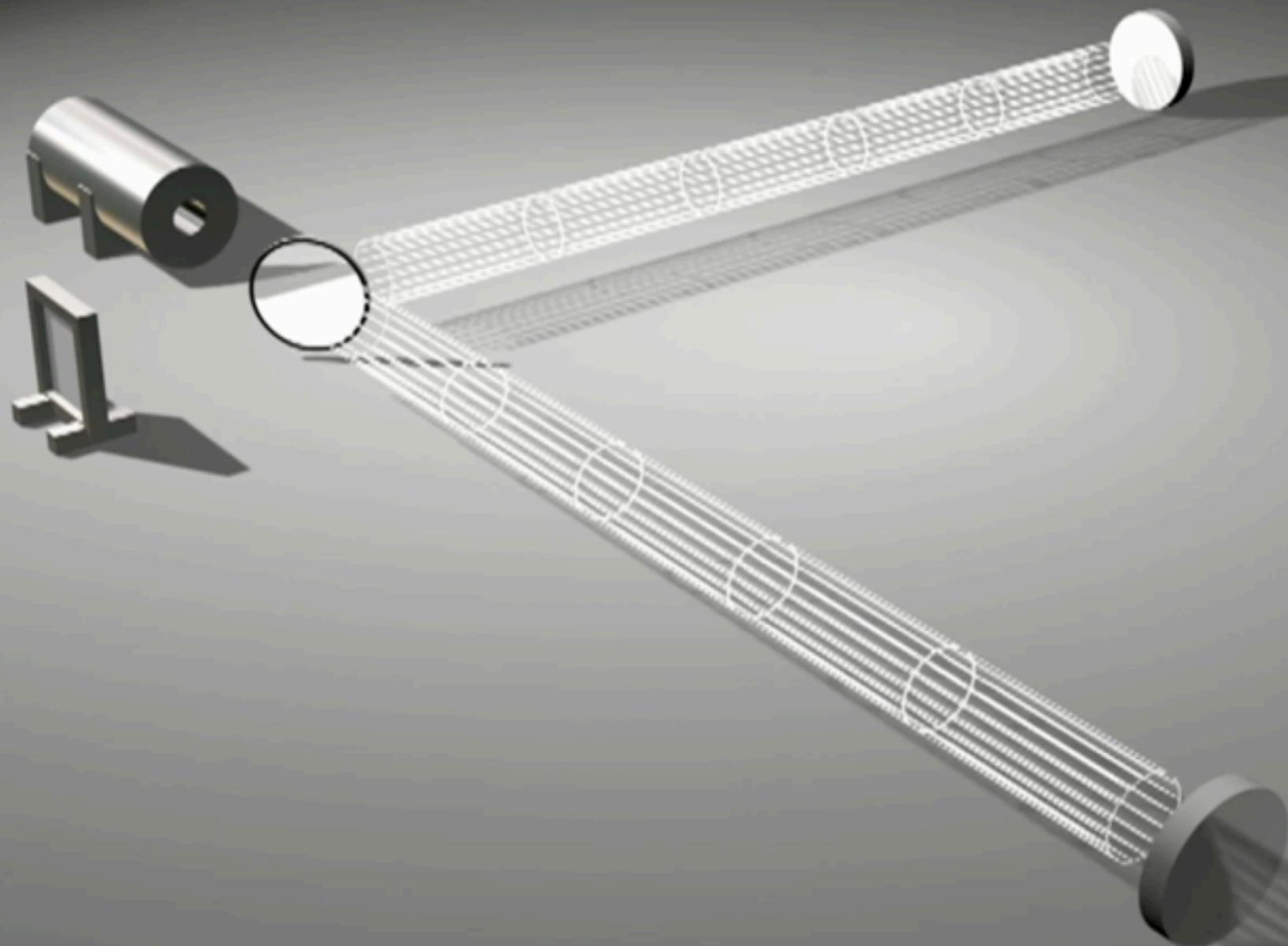
Einstein Online Vol. 02 (2006), 1008

hogyan lehet észlelni?

Gravitációs hullámok forrásai és megfigyelési módjai



Interferométerrel!



méretek

- 100 Hz frekvenciájú gravitációs hullám hullámhossza

$$\frac{300000 \text{ km/s}}{100 \text{ Hz}} = 3000 \text{ km}$$

- legerősebb jelet akkor kapjuk, ha egy karhosszon az optikai úthossz különbsége $\lambda/4$, tehát $\sim 750 \text{ km}$ hosszú karokra van szükség 100 Hz-es jel észleléséhez
- a frekvenciával fordítottan arányos a legjobb karhosszúság

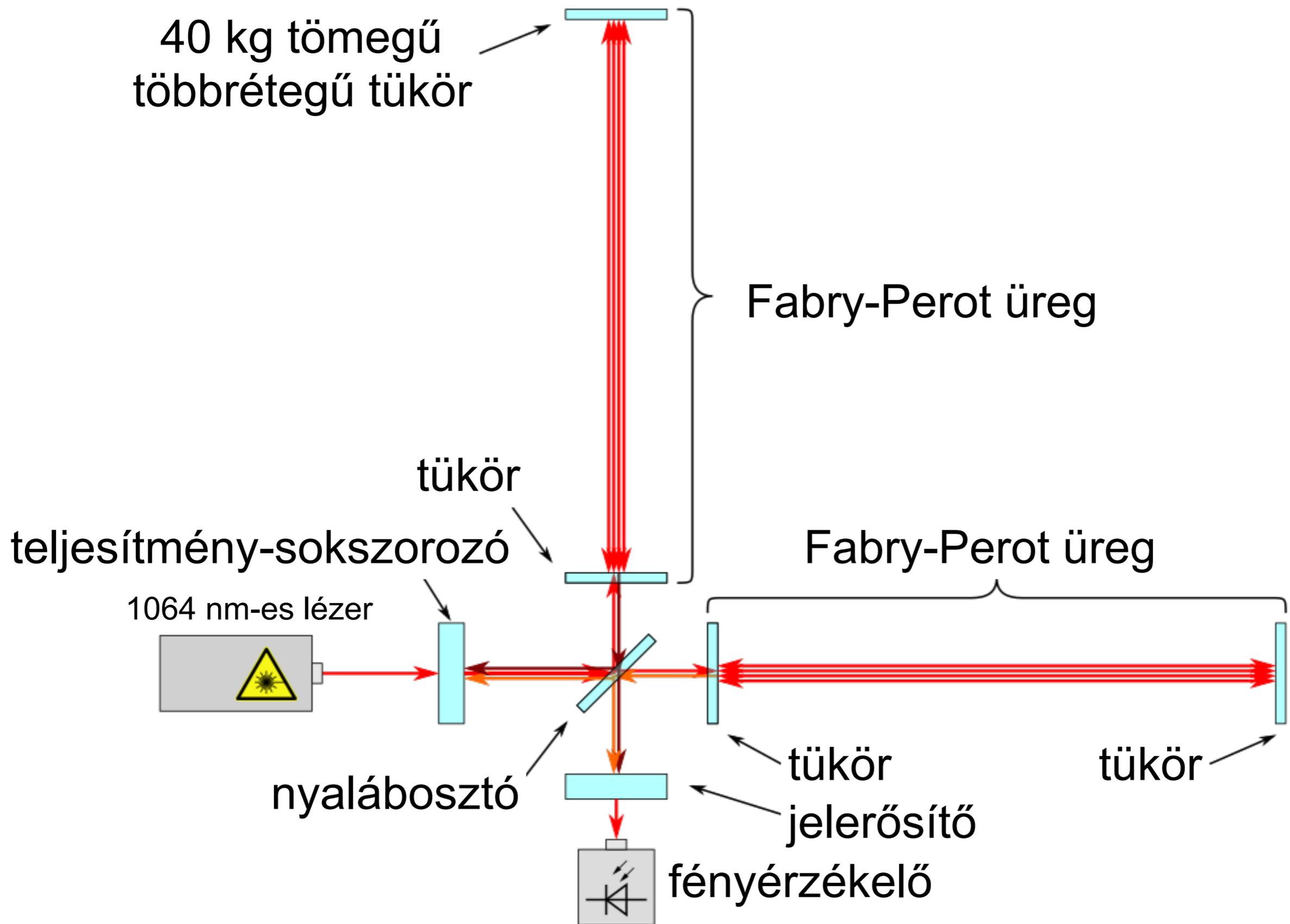
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
Livingstone, Luisiana 4 km-es karhosszal



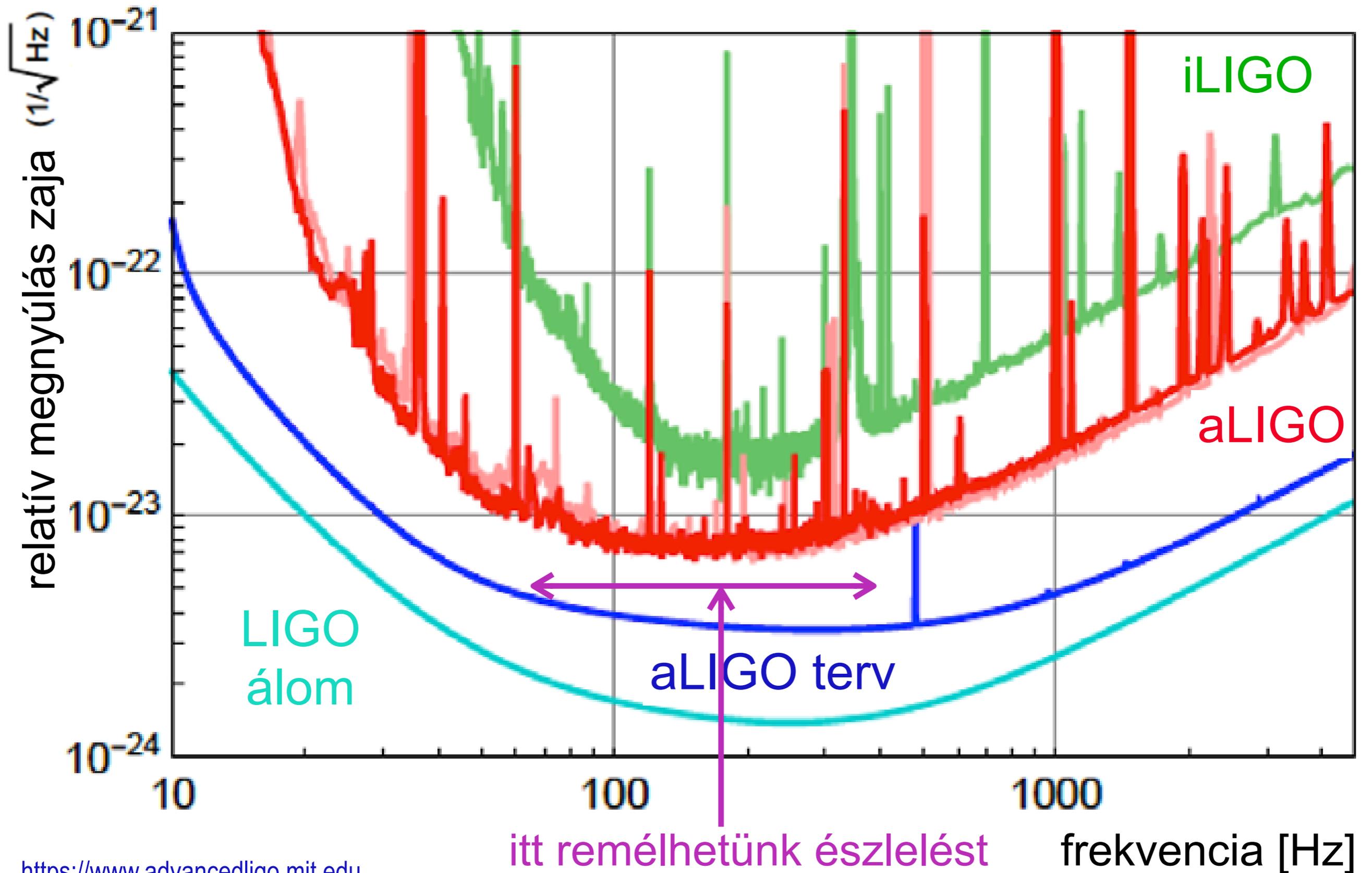
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
Hanford, Washington: c.(10 ms) távolságra



aLIGO vázlatos felépítése



aLIGO érzékenységi görbéje



A csörptömeg

- legnagyobb érzékenység nagy tömegű feketelyuk-kettős összeolvadására, amit a M "csörptömeg" jellemez

$$M = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

- differenciálegyenlet a frekvenciára:

$$\dot{f} = \frac{96}{5} \pi^{8/3} \left(\frac{GM}{c^3} \right)^{5/3} f^{11/3}$$

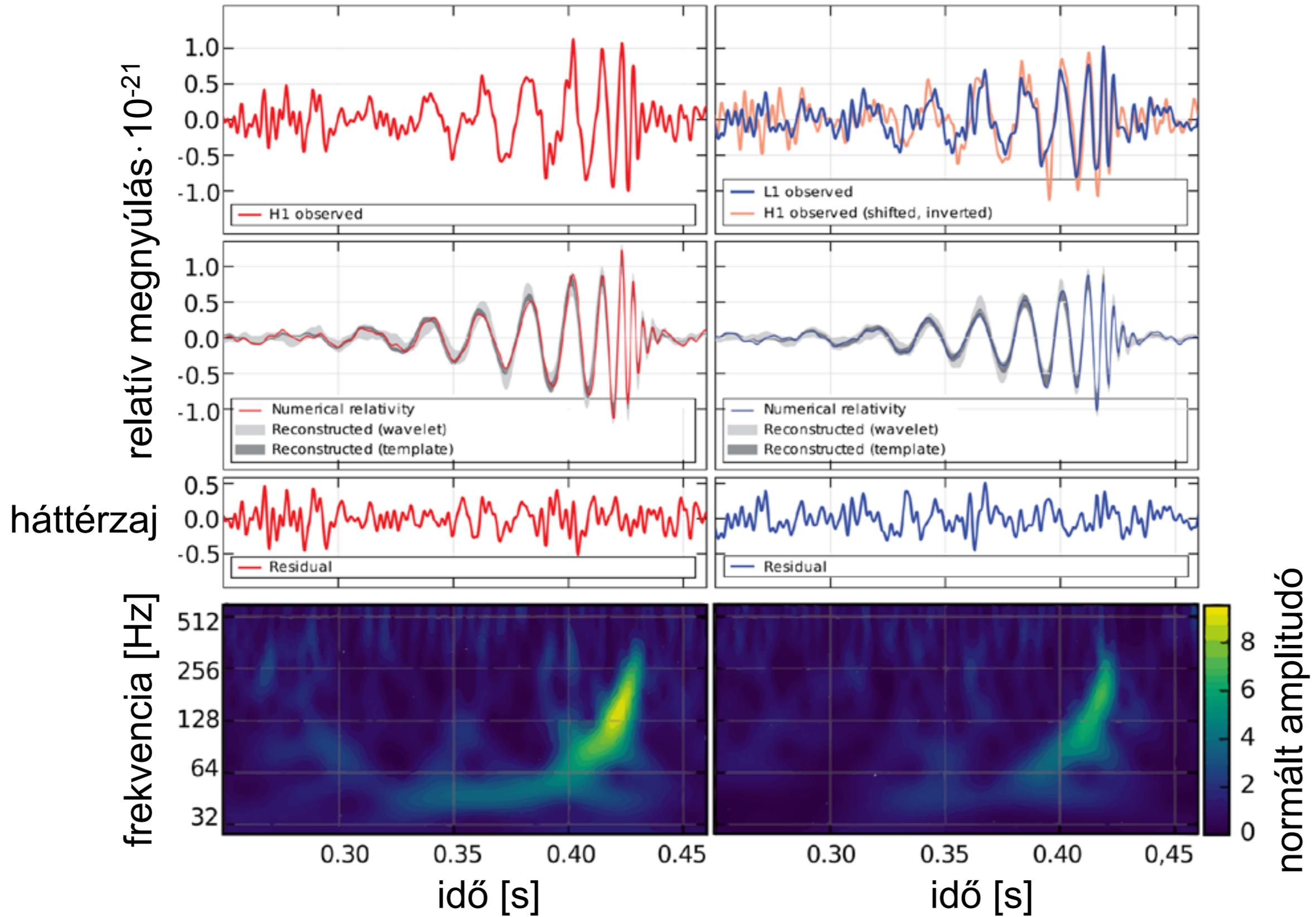
- megoldása:

$$-\frac{3}{8} f^{-8/3} = \frac{96}{5} \pi^{8/3} \left(\frac{GM}{c^3} \right)^{5/3} t + C$$

Első észlelés feketelyuk-kettős összeolvadásról: GW150914

Hanford (H1)

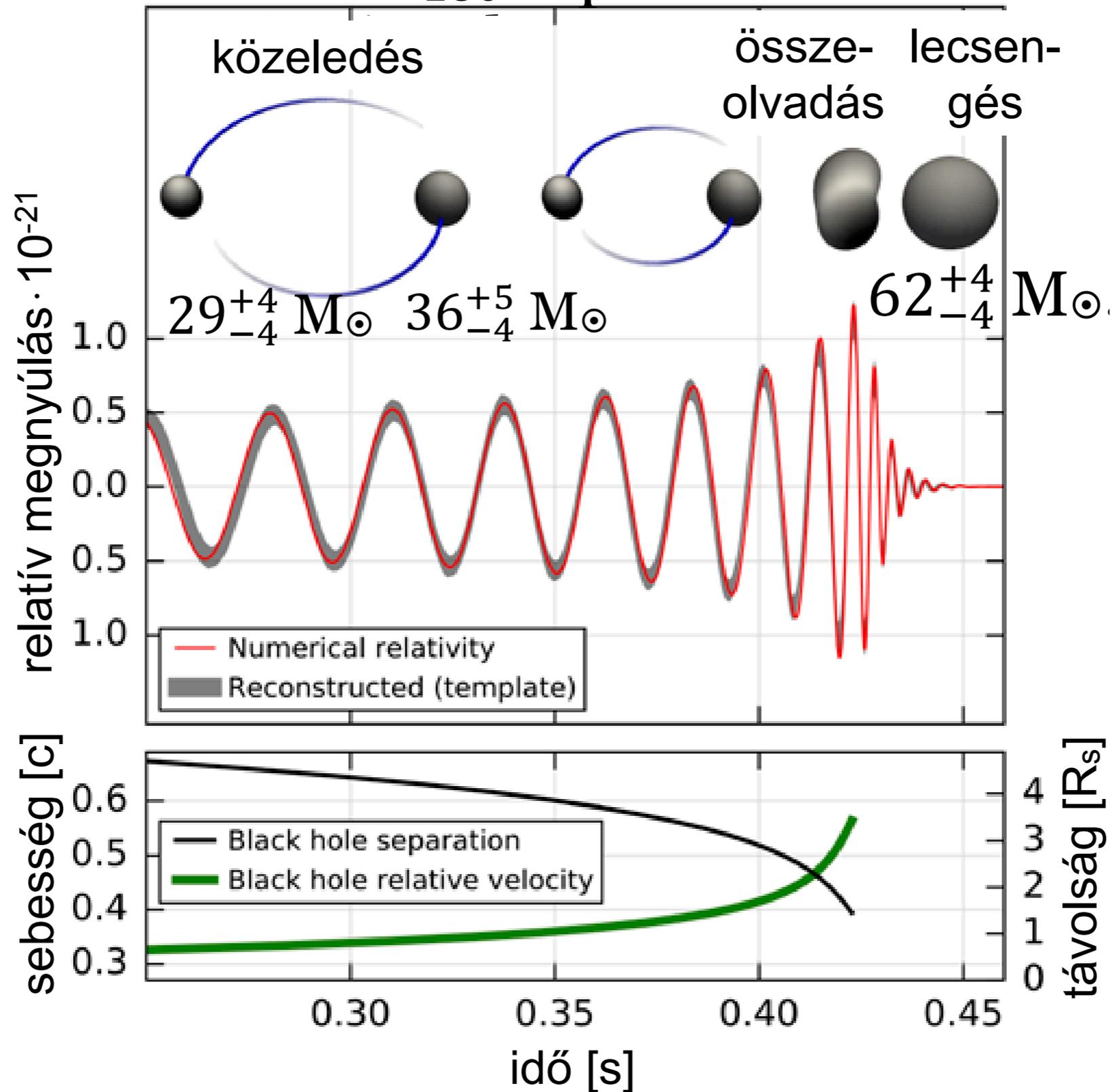
Livingston (H1)



Értelmezés:

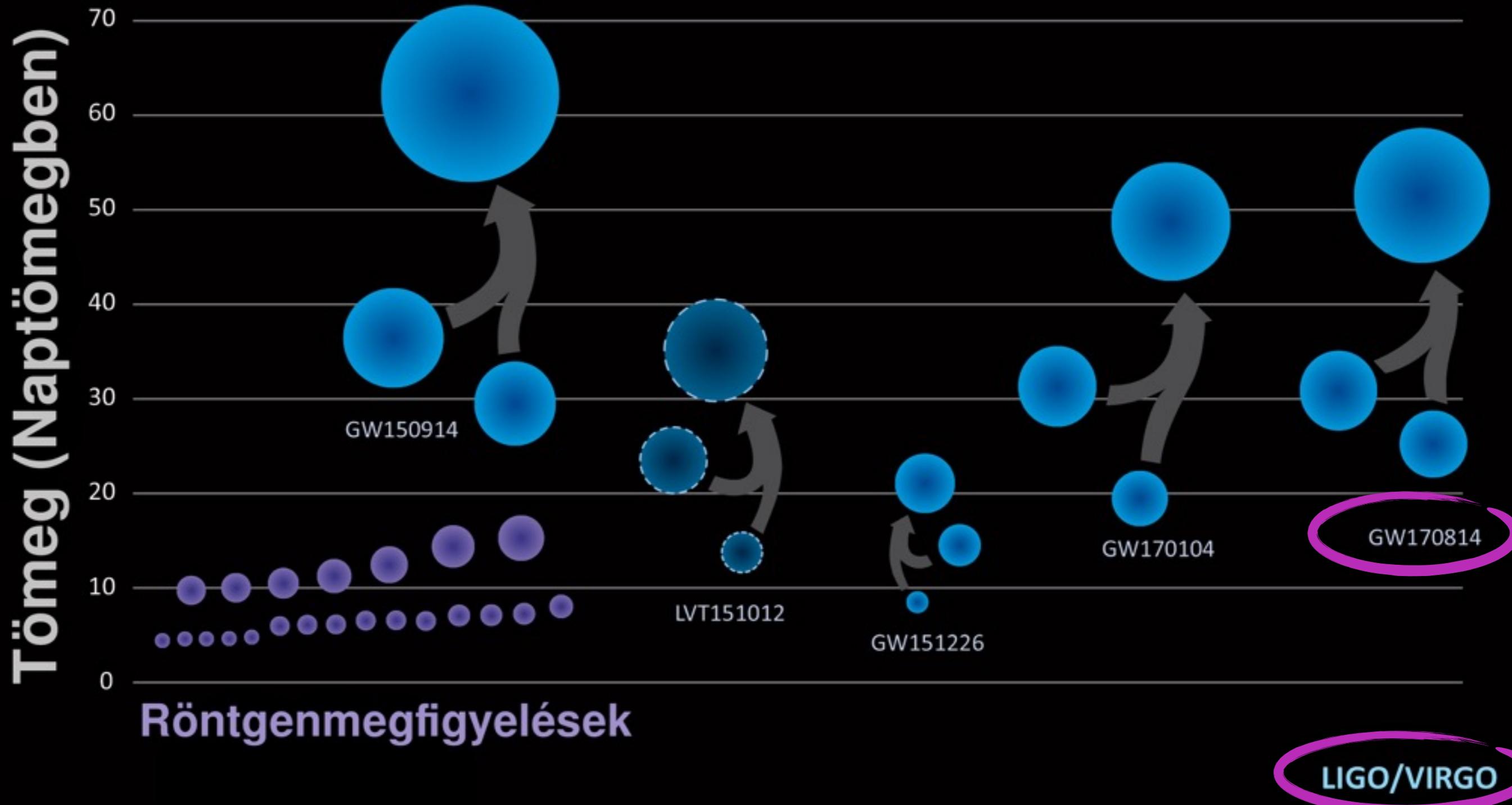
szupernehéz feketelyuk-kettős összeolvadásával

410^{+160}_{-180} Mpc-re tőlünk



Észlelések két év alatt:

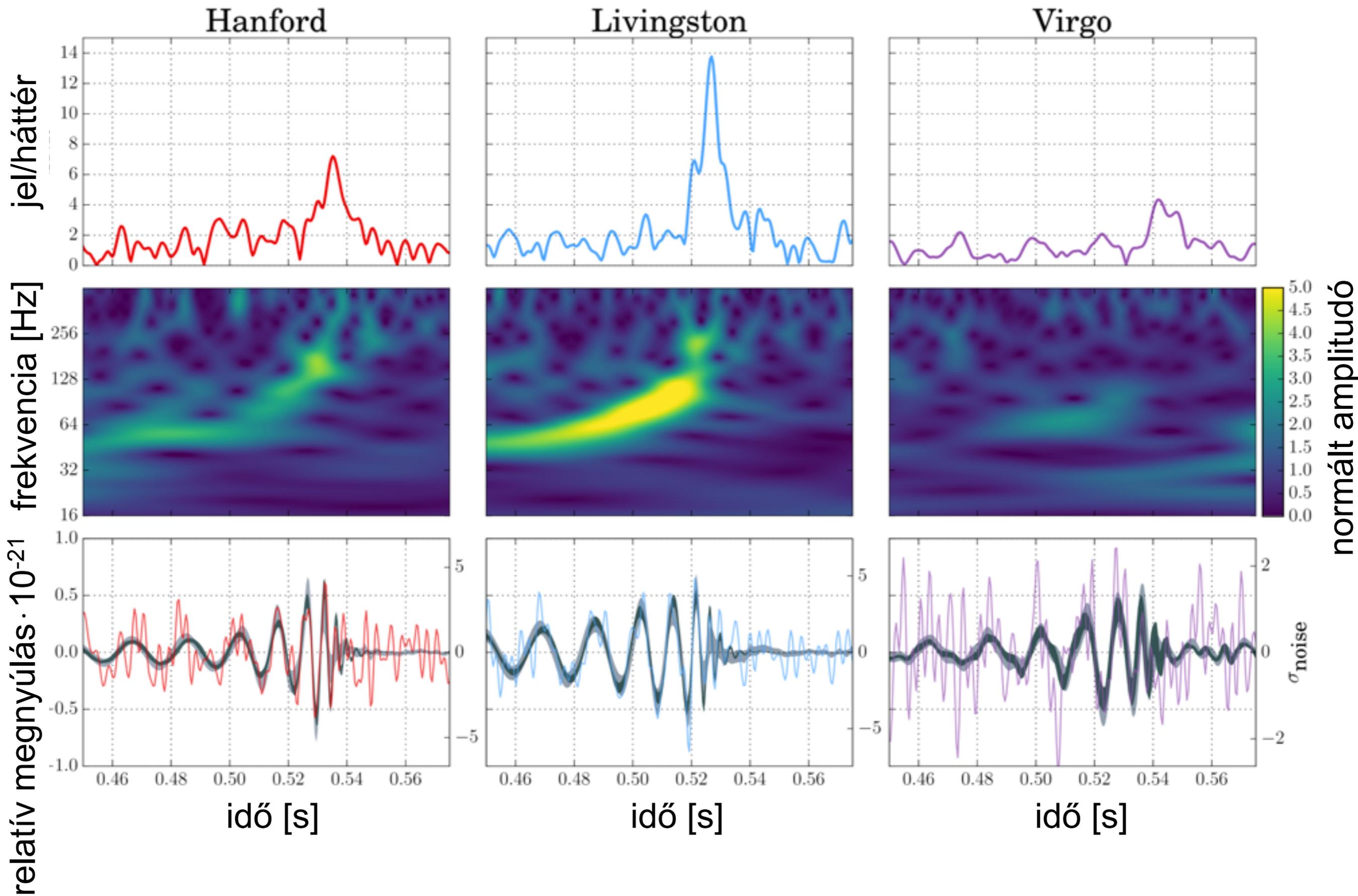
Ismert tömegű sztelláris fekete lyukak



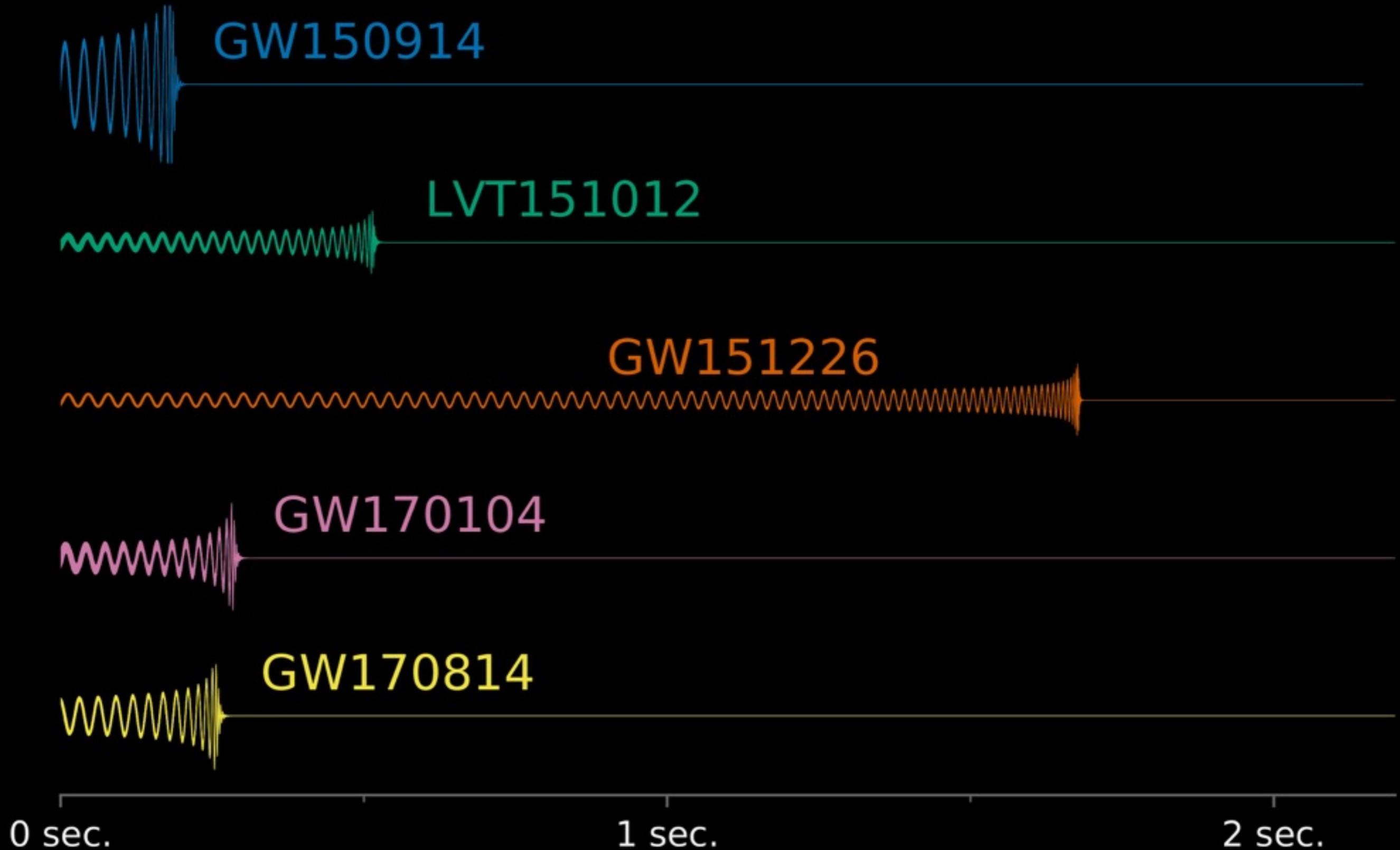
VIRGO interferometer Cascina (Pisa), Olaszország



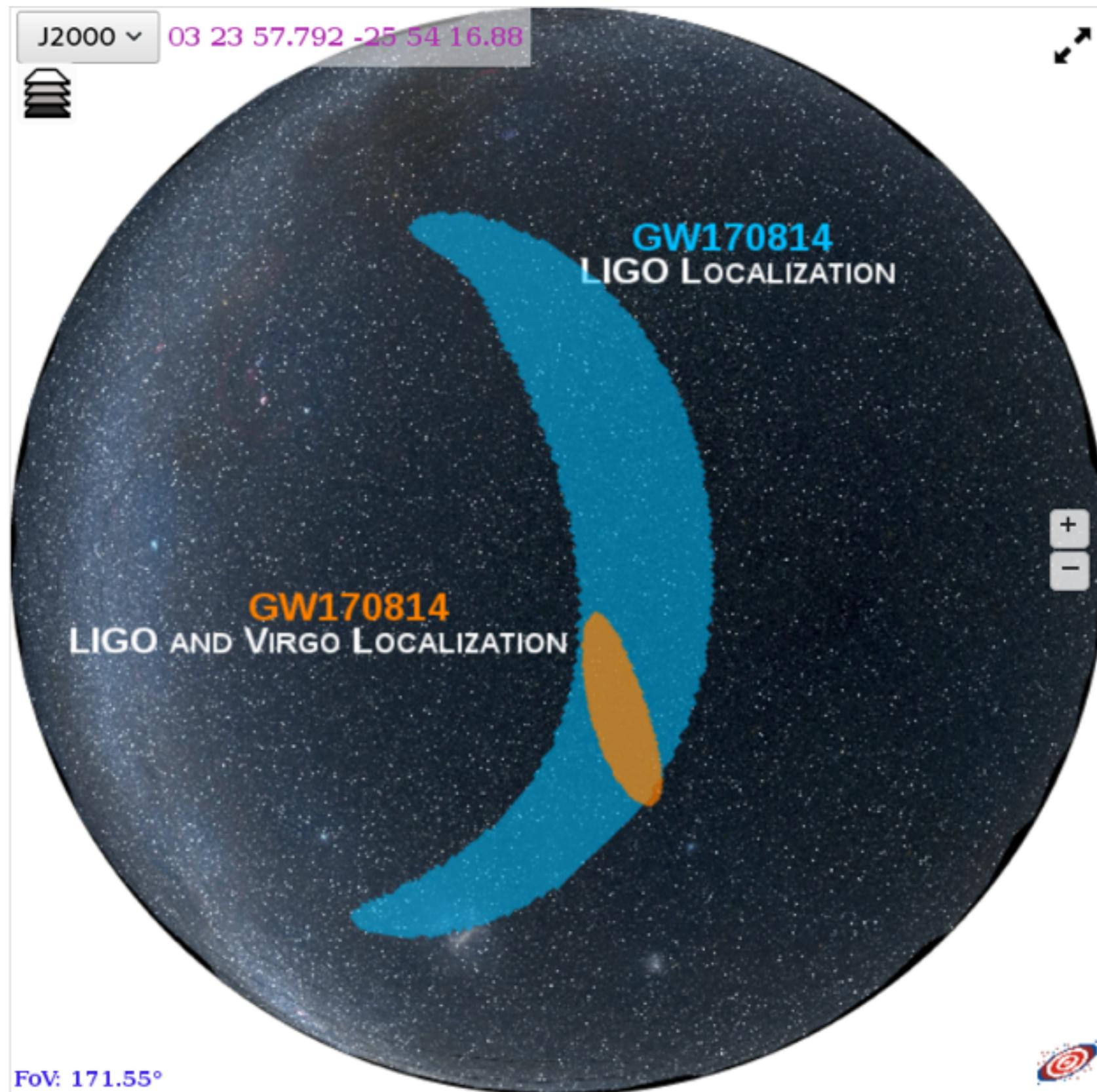
VIRGO interferometer



visszaállított jelek összehasonlítása



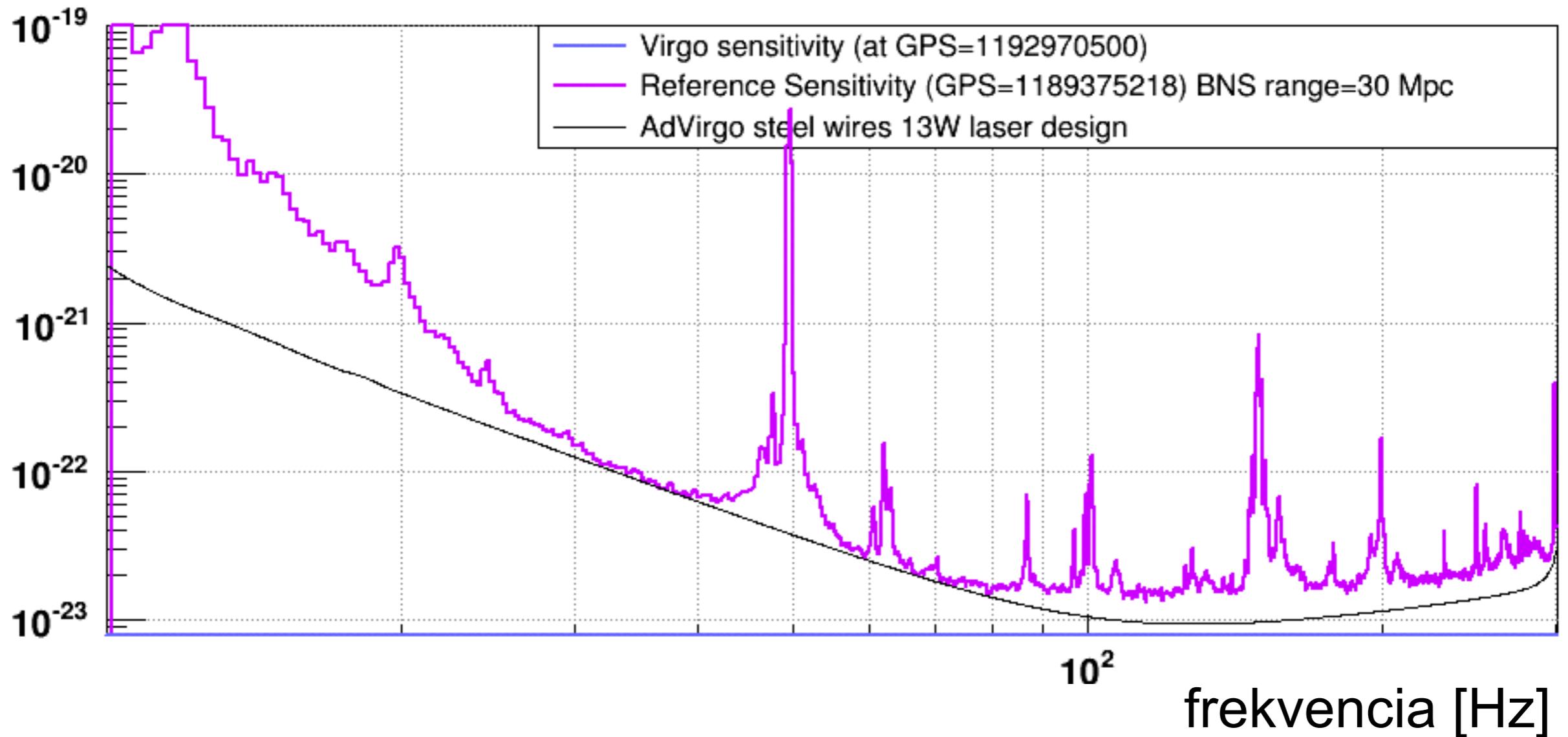
forrás azonosítása



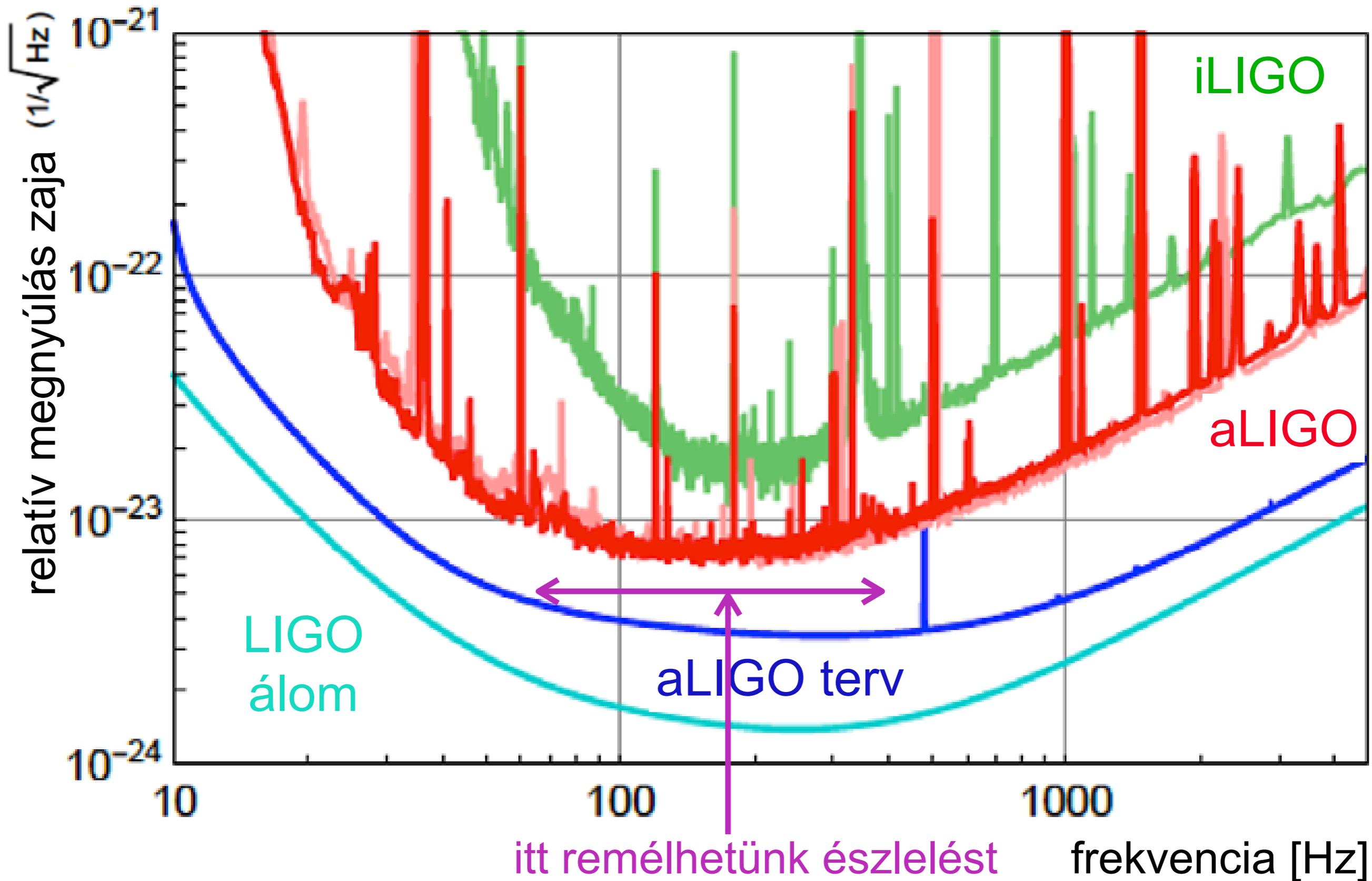
VIRGO interferometer érzékenységi görbéje 2017.10.25-én délelben

relatív megnyúlás zaja [$1/\sqrt{\text{Hz}}$]

Last Sensitivity

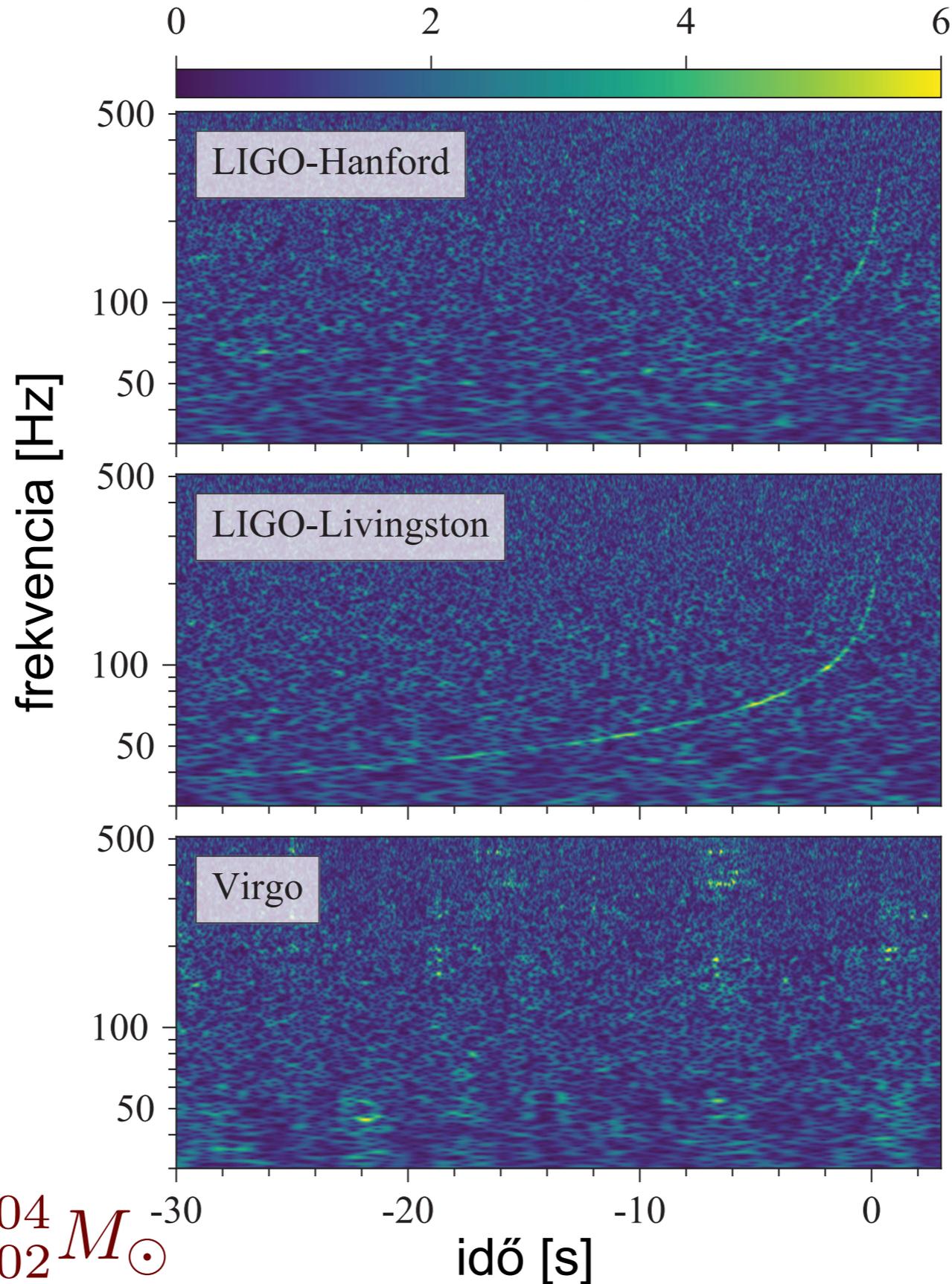


A LIGO ~10-szer nagyobb térfogatban érzékeny



GW170817 észlelése

normált amplitudó



$$\mathcal{M} = 1.188^{+0.004}_{-0.002} M_{\odot}$$

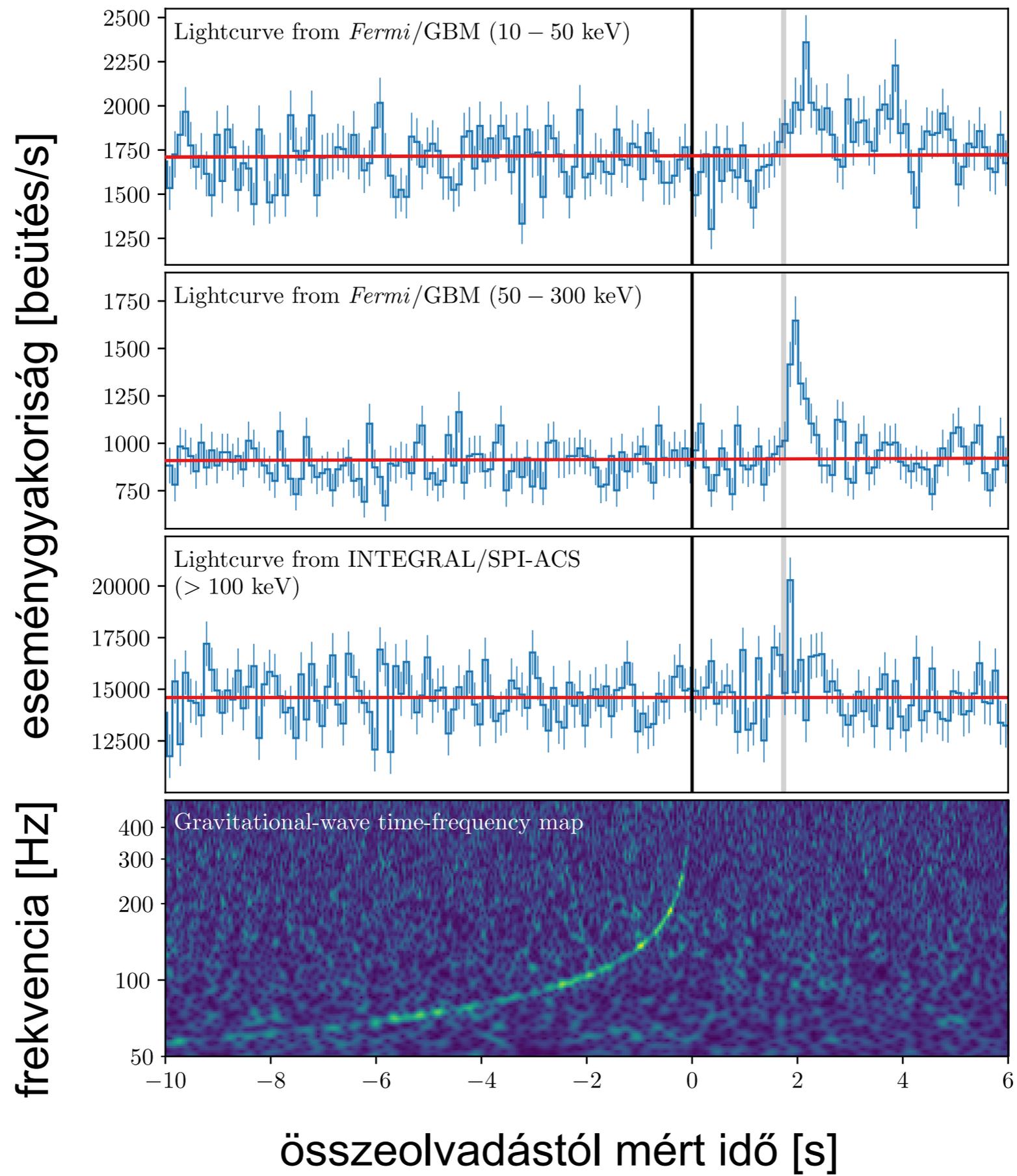
a forrás mért paramétere

	Low-spin priors ($ \chi \leq 0.05$)	High-spin priors ($ \chi \leq 0.89$)
Primary mass m_1	1.36–1.60 M_\odot	1.36–2.26 M_\odot
Secondary mass m_2	1.17–1.36 M_\odot	0.86–1.36 M_\odot
Chirp mass \mathcal{M}	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$
Mass ratio m_2/m_1	0.7–1.0	0.4–1.0
Total mass m_{tot}	$2.74^{+0.04}_{-0.01} M_\odot$	$2.82^{+0.47}_{-0.09} M_\odot$
Radiated energy E_{rad}	$> 0.025 M_\odot c^2$	$> 0.025 M_\odot c^2$
Luminosity distance D_L	40^{+8}_{-14} Mpc	40^{+8}_{-14} Mpc
Viewing angle Θ	$\leq 55^\circ$	$\leq 56^\circ$
Using NGC 4993 location	$\leq 28^\circ$	$\leq 28^\circ$
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	≤ 800	≤ 700
Dimensionless tidal deformability $\Lambda(1.4M_\odot)$	≤ 800	≤ 1400

2017.08.17: Csillagászat első ízben
gravitációs és elektromágneses hullámokkal

- első esemény: GW170817
- forrás: kompakt-kettős (neutron-, kvarkcsillag, fekete lyuk?)
összeolvadása
- GRB170817A majdnem egyidejű,
független észlelése

összeolvadás
GRB kezdete



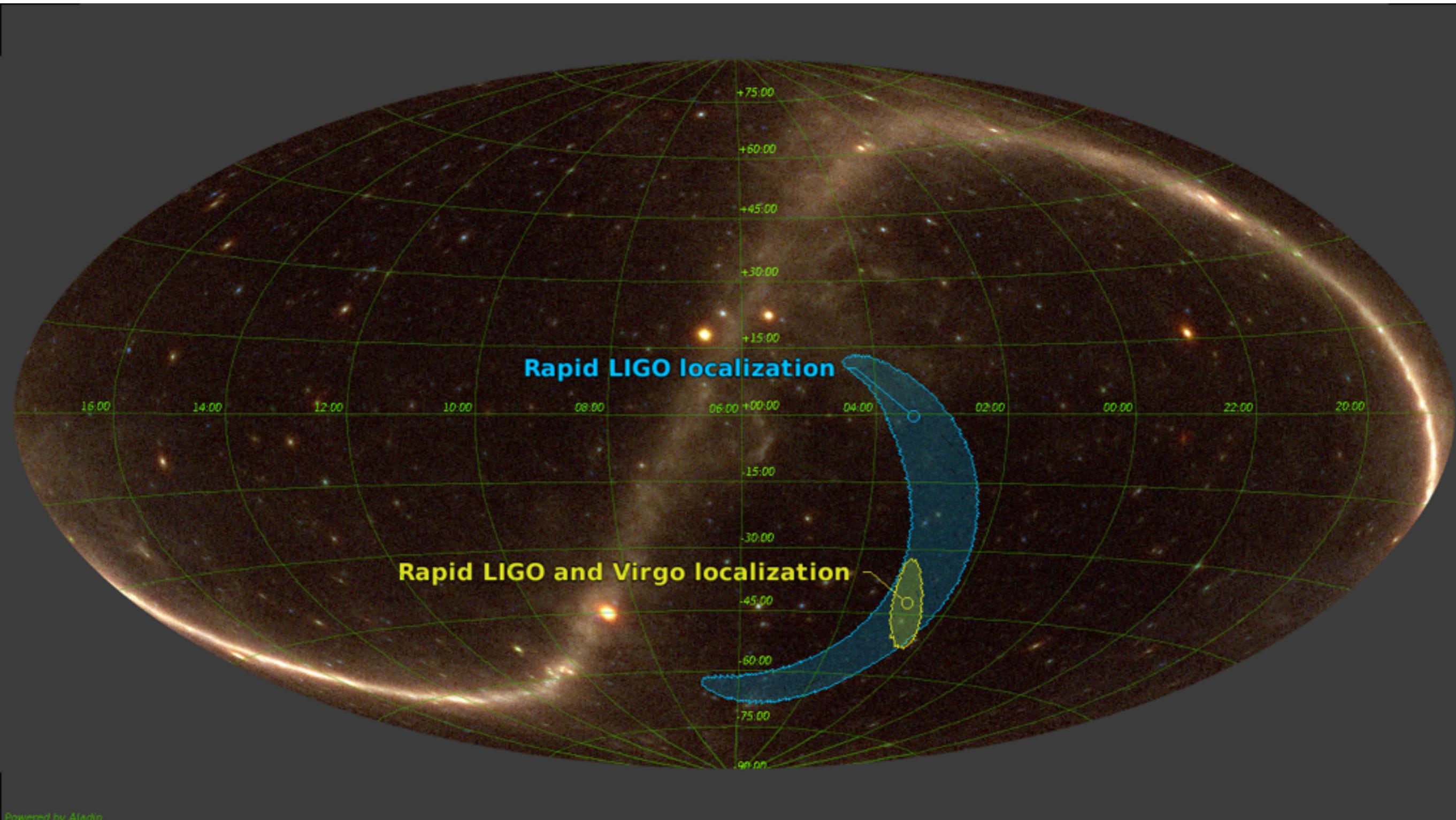
2017.08.17: Csillagászat első ízben
gravitációs és elektromágneses hullámokkal

- első esemény: GW170817
- forrás: kompakt-kettős (neutron-, kvarkcsillag, fekete lyuk?)
összeolvadása
- GRB170817A majdnem egyidejű,
független észlelése
- elektromágneses spektrumban
észlelők riasztása világszerte 10
percen belül

2017.08.17: Csillagászat
gravitációs és elektromágneses hullámokkal

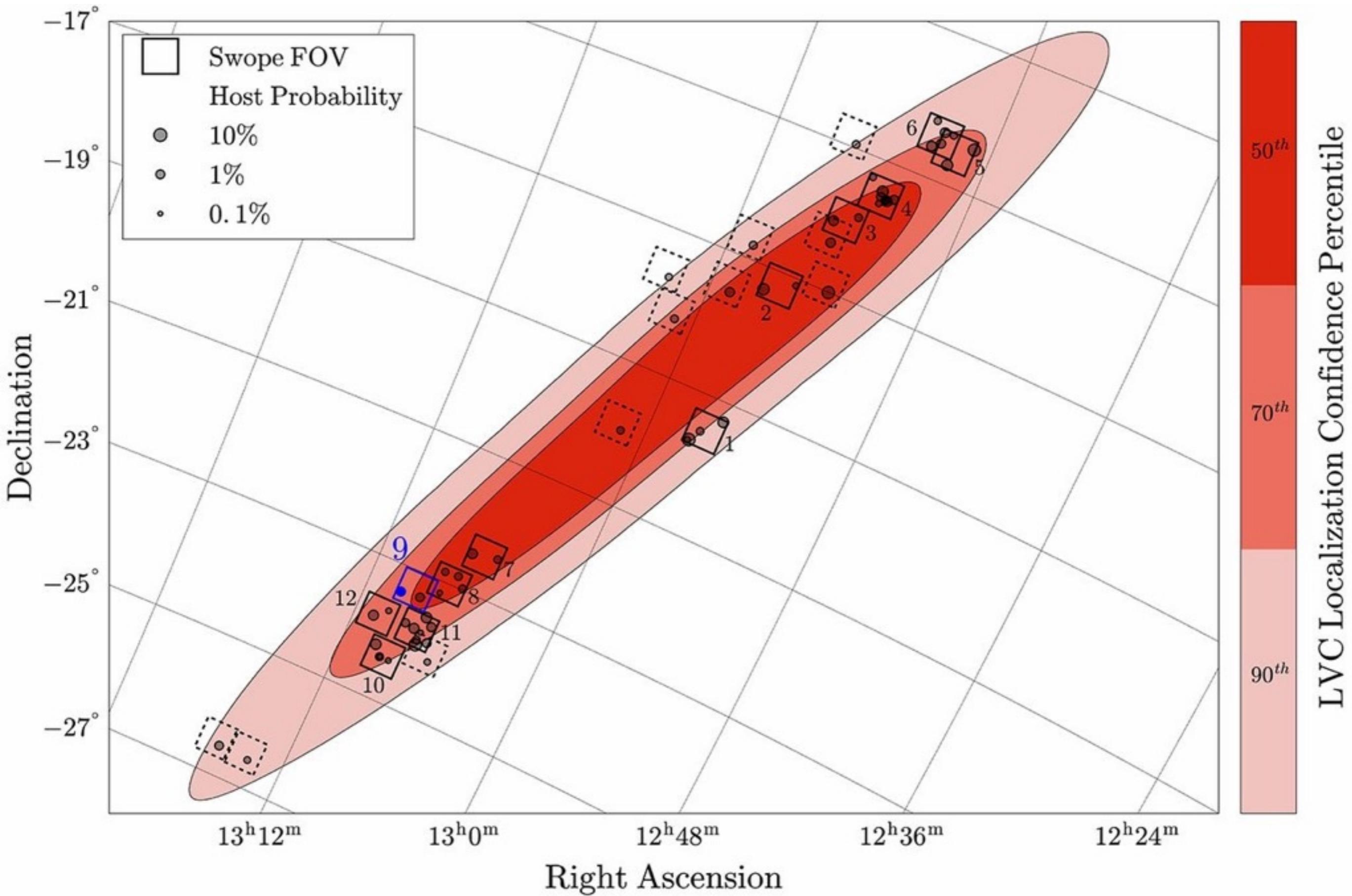


GW170817 forrásának azonosítása



a forrás azonosítása Swope távcsővel

- korábban katalogizált galaxisok megfigyelése 1m-es optikai távcsővel (Las Campanas Observatórium, Chile)
- a GW170817 által megadott tartományban 12 valószínű forráshelyet jelöltek ki a katalógus alapján



a forrás azonosítása Swope távcsővel

- korábban katalogizált galaxisok megfigyelése 1m-es optikai távcsővel (Las Campanas Observatórium, Chile)
- a GW170817 által megadott tartományban 12 valószínű forráshelyet jelöltek ki a katalógus alapján
- riasztás ideje Csilében 9:41, megfigyelés kezdete 23:13, 23:33-kor került sor a 9. tartományra, ahol a katalógus szerint két valószínű jelölt van

Ψ Hydrae

HD 114098

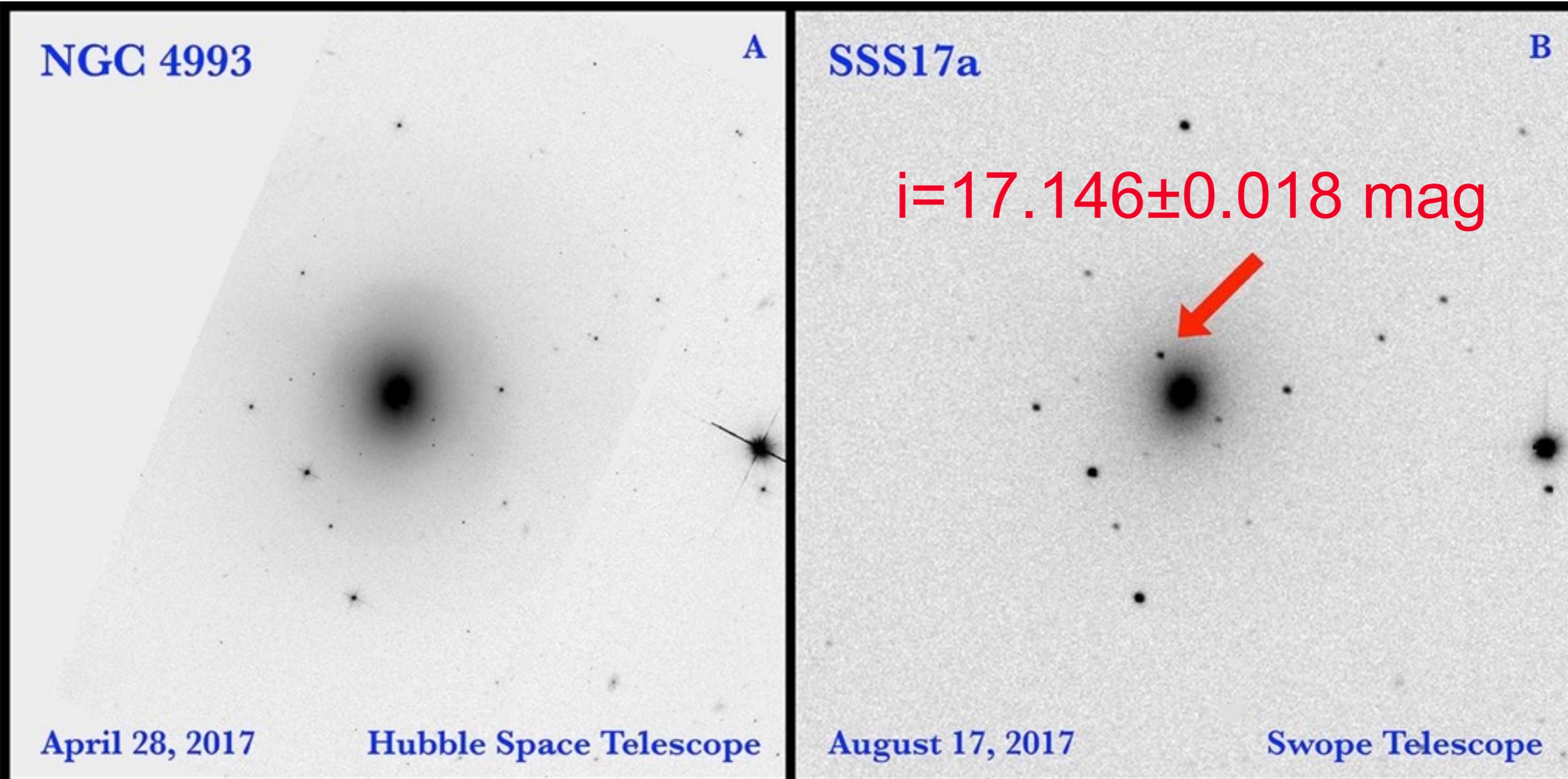
NGC 4993
 $p = 0.022$



ESO 508-G014
 $p = 0.009$



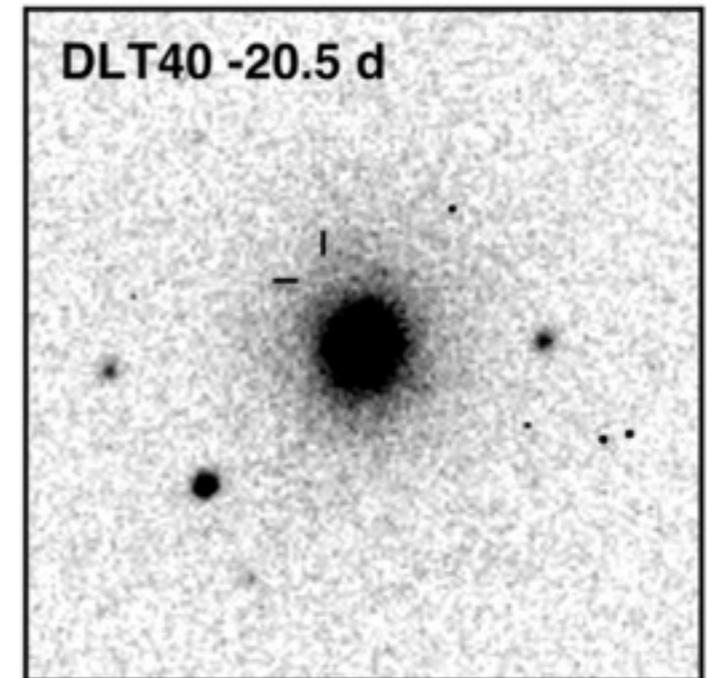
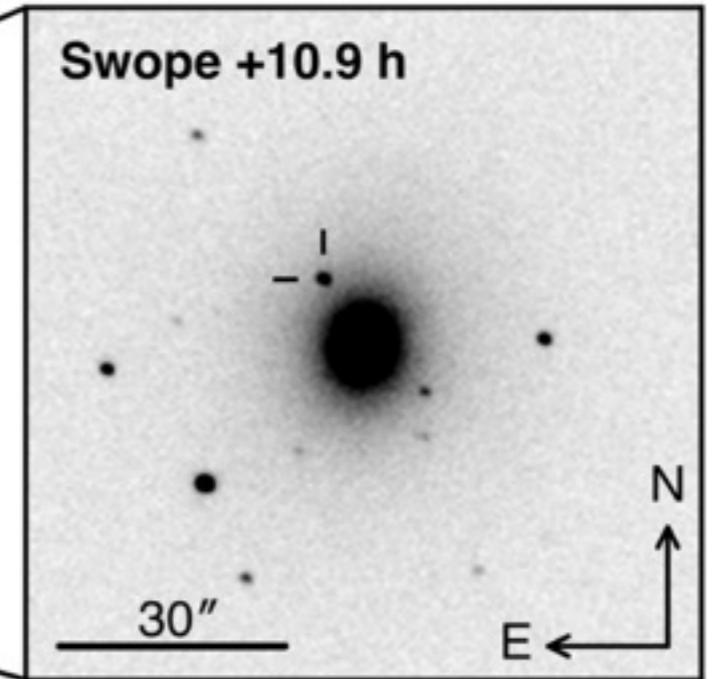
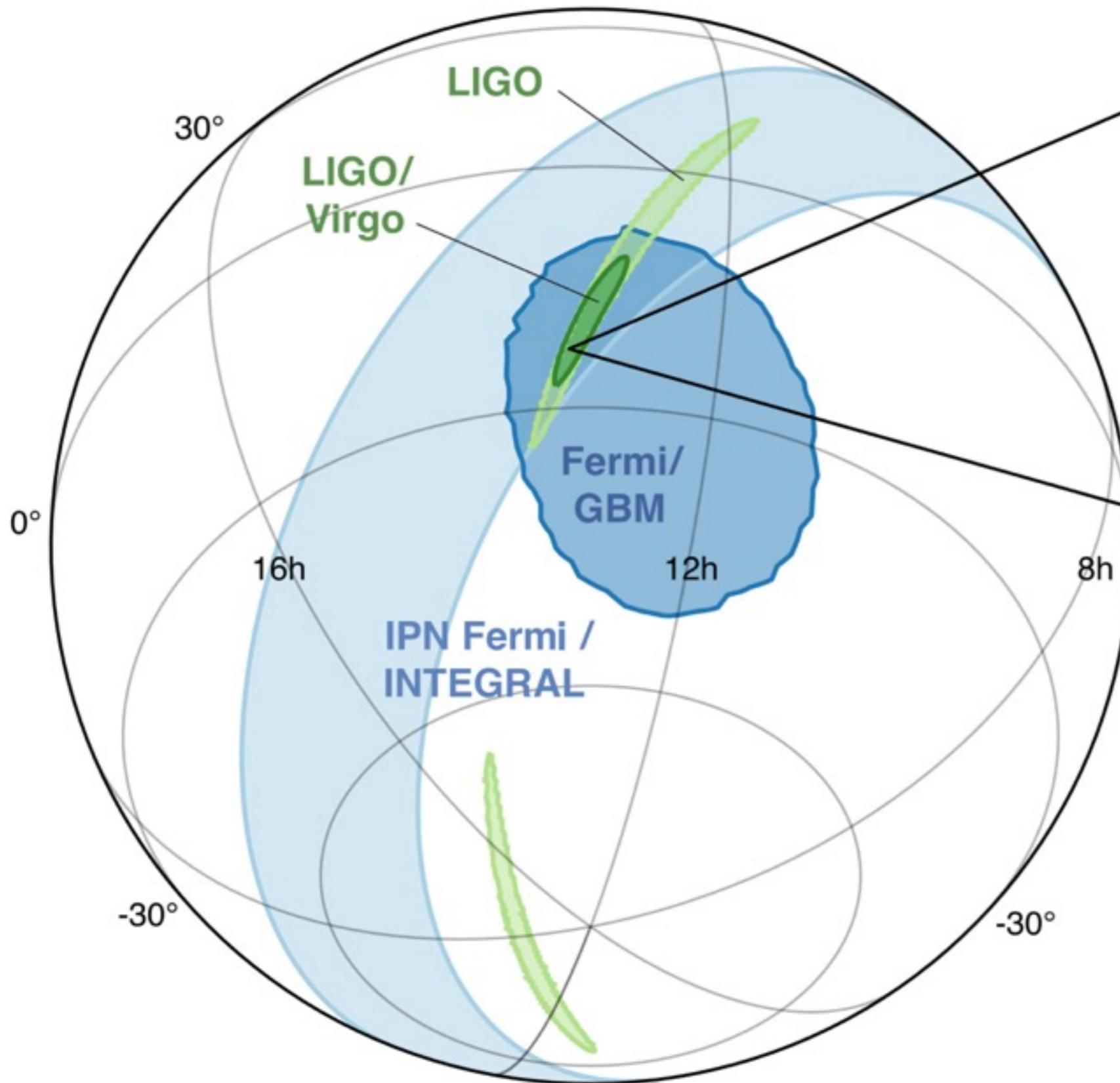
a forrás azonosítása Swope távcsővel: SSS17a
akár amatőrök is felfedezhetik



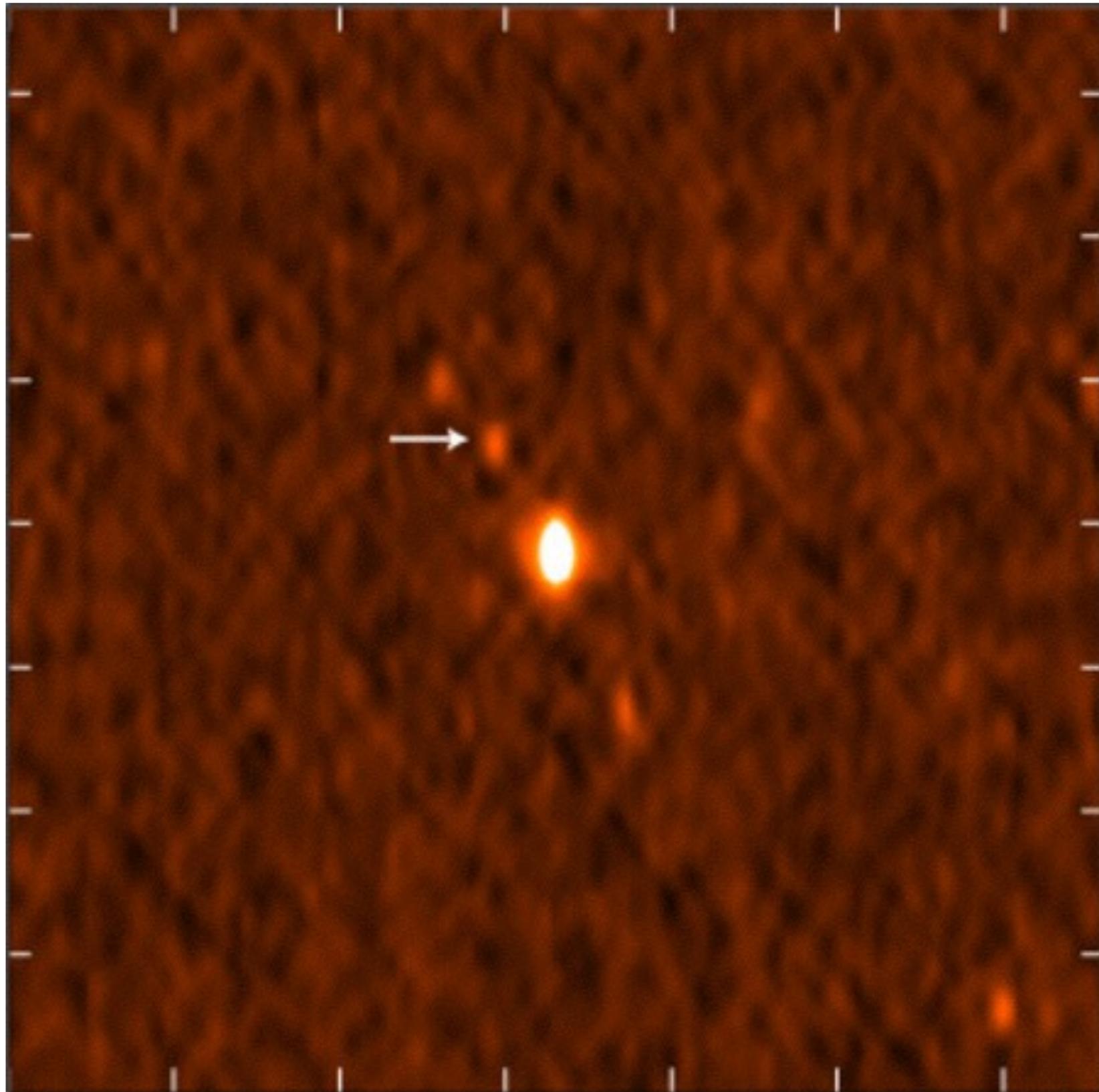
más fényes tranziens megjelenését a GW170817
tratományban 95,3%-os biztonsággal kizárták

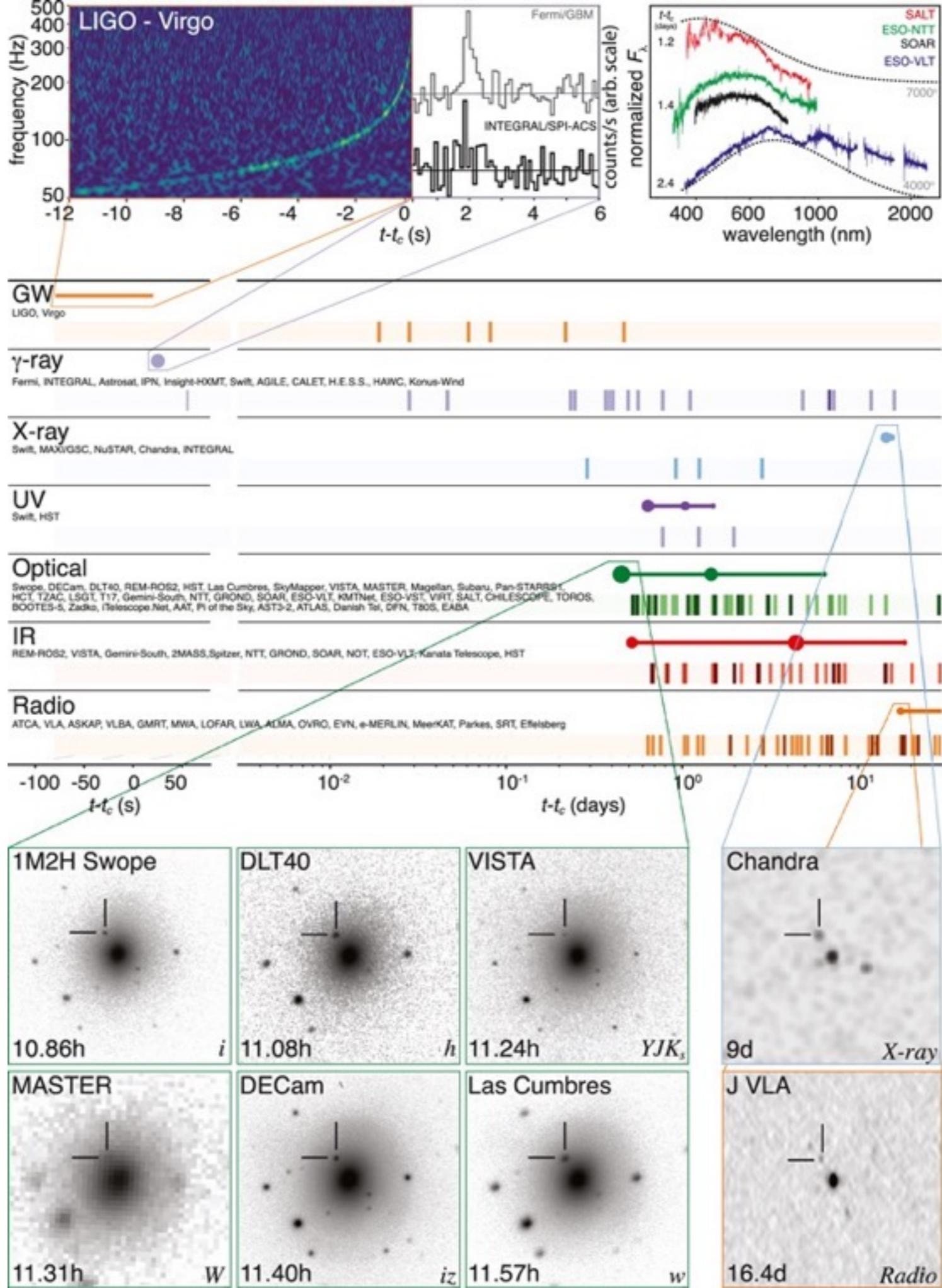
<http://science.sciencemag.org/content/early/2017/10/13/science.aap9811.full>

a forrás helye:



a forrás azonosítása rádiótávcsővel: NGC4993



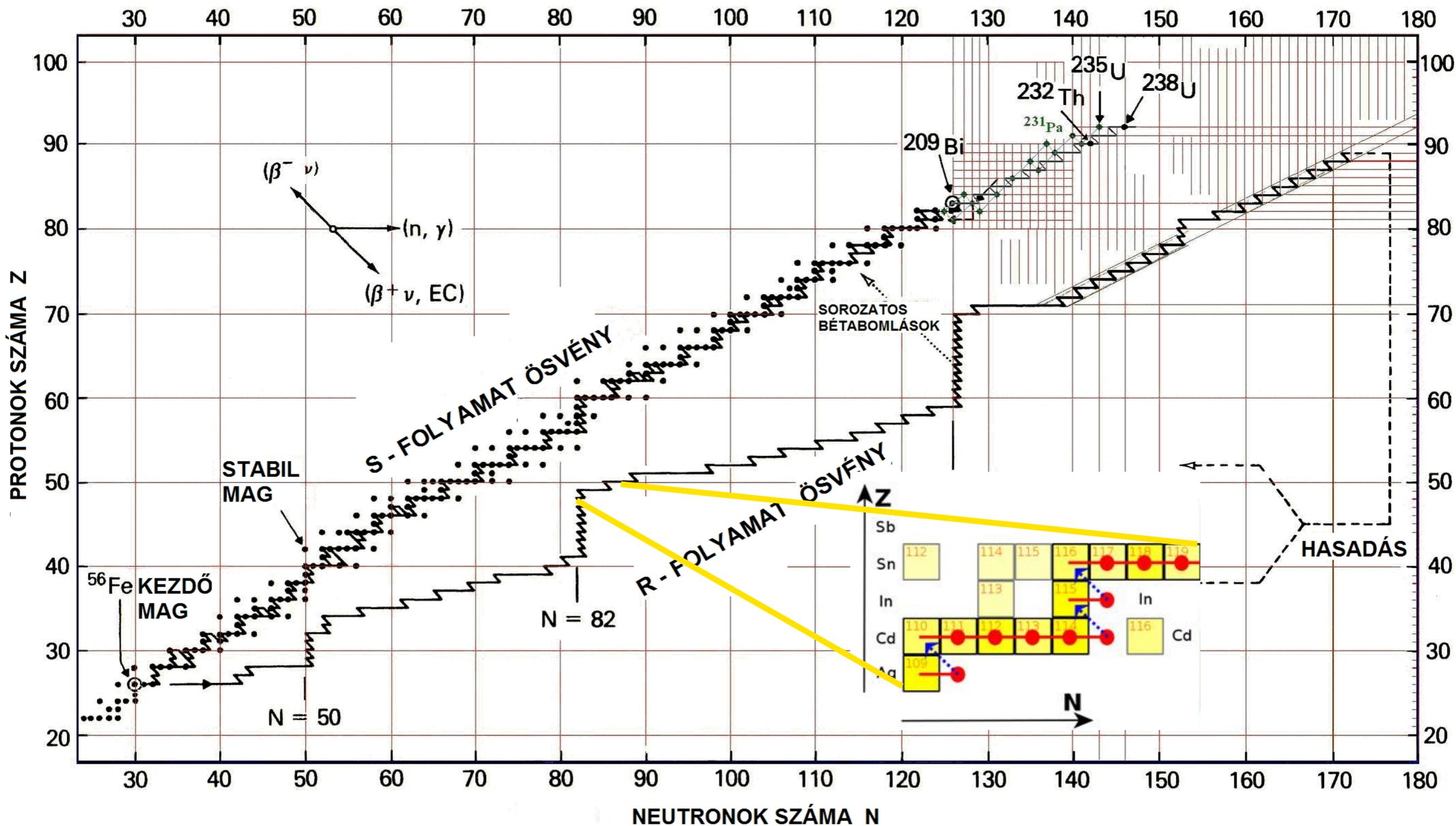


GW170817: neutroncsillag-kettős összeolvadásának (kilonova) megfigyelése gravitációs és elektromágneses hullámokkal

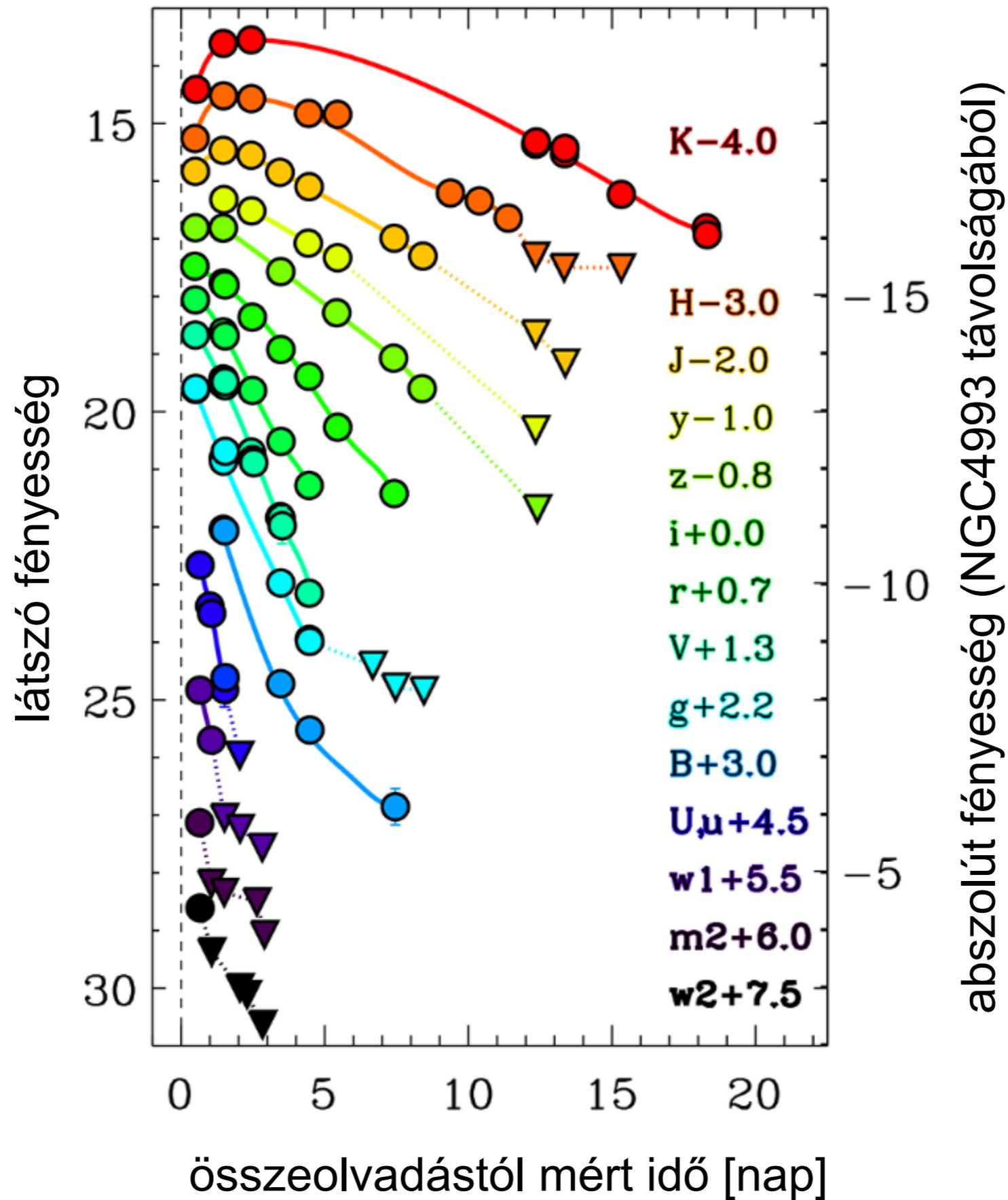
GW és GRB egyidejű megfigyelése riasztotta az EM megfigyeléseket lehetővé téve:

- a forrás azonosítását, így a GW paraméterek pontosabb mérését, pl. a gravitációs hullámok sebességére: $-3 \cdot 10^{-15} \leq \frac{v - c}{c} \leq +7 \cdot 10^{-16}$
- a VE tágulásának közvetlen mérését:
 $H_0 = 70^{+12}_{-8} \text{ (km/s)/Mpc}$
(v.ö. $67.9 \pm 0.55 \text{ (km/s)/Mpc}$ [Planck])
- az összeolvadás folyamatainak pontosabb megértését, pl. a nehéz elemek keletkezését (r-folyamat mag szintézis)

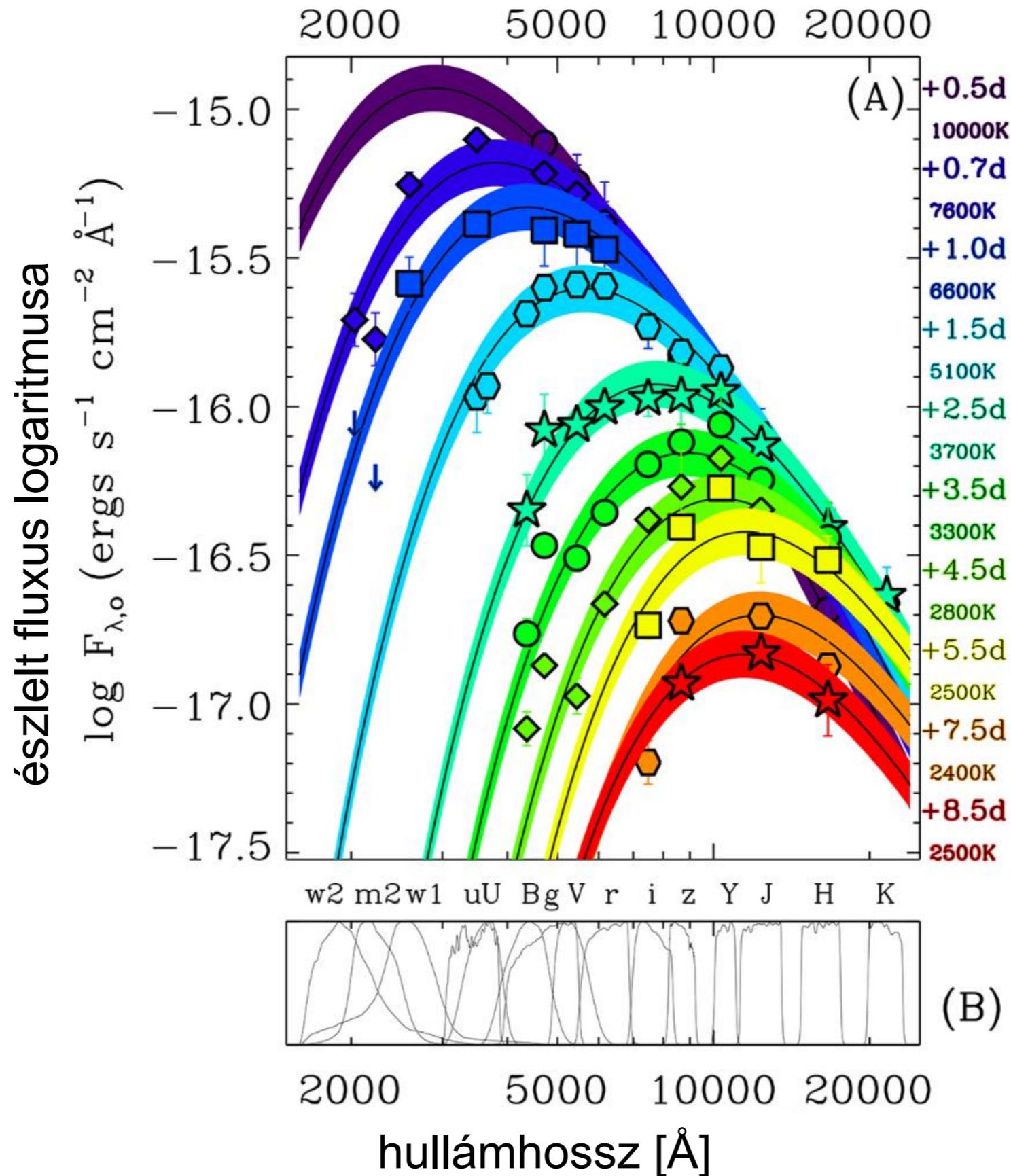
nehéz elemek atommagszintézise



SSS17A fotometria UV — közeli IR tartományban

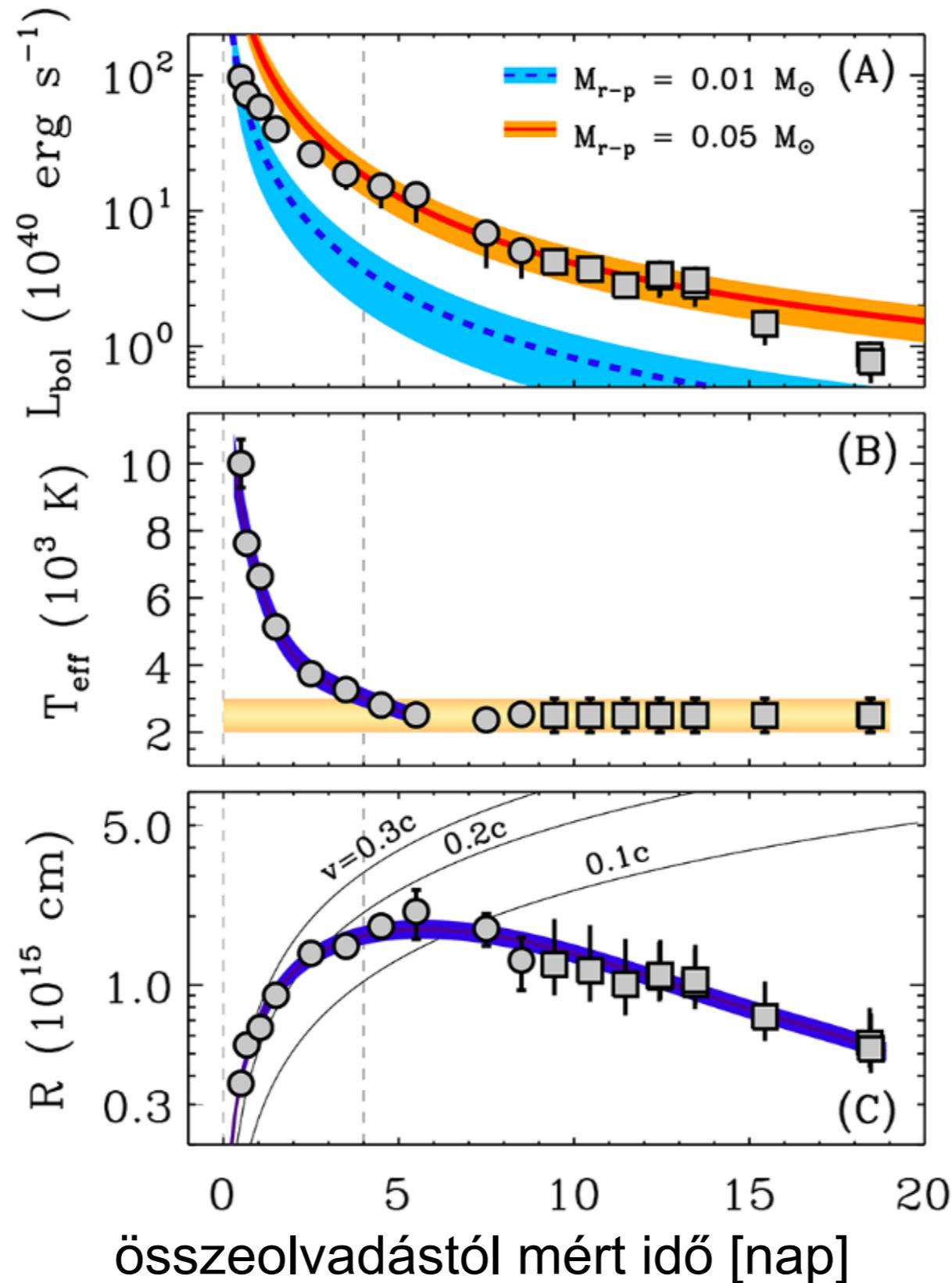


SSS17A fotometria UV — közeli IR tartományban ~feketetest-sugárzási spektrumok időtől függetlenül



SSS17A fotometria UV — közeli IR tartományban ~feketetest-sugárzási spektrumok időtől függetlenül

sugárzó mérete, hőmérséklete, kisugárzott energiája



az elemek eredete

1 H																	2 He									
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne									
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar									
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr									
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe									
55 Cs	56 Ba											72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																									
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu										
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U																					

összeolvadó neutroncsillagok felrobbanó nagy tömegű csillagok ősrobbanás
kis tömegű csillagok felrobbanó fehér törpék hasadás kozmikus sugárzásban

Gravitációs hullámok észlelésének jövője

