

Gravitációs hullámok

Vasúth Mátyás

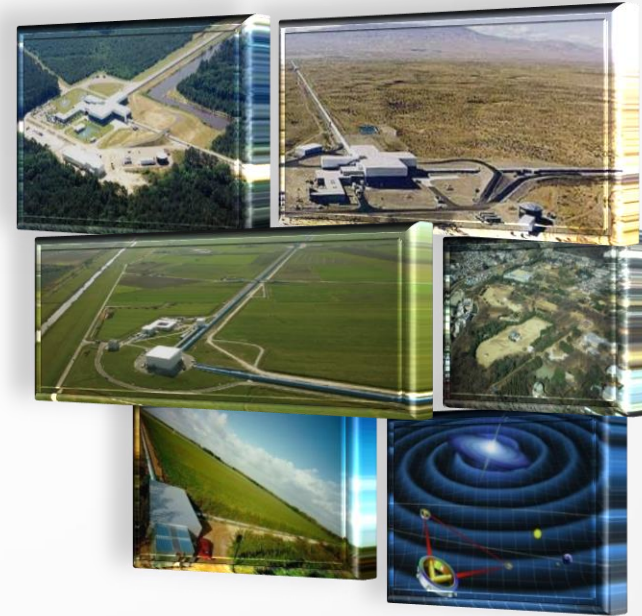
Wigner FK, RMI



Wigner FK, 2014.09.17-19

Bevezetés

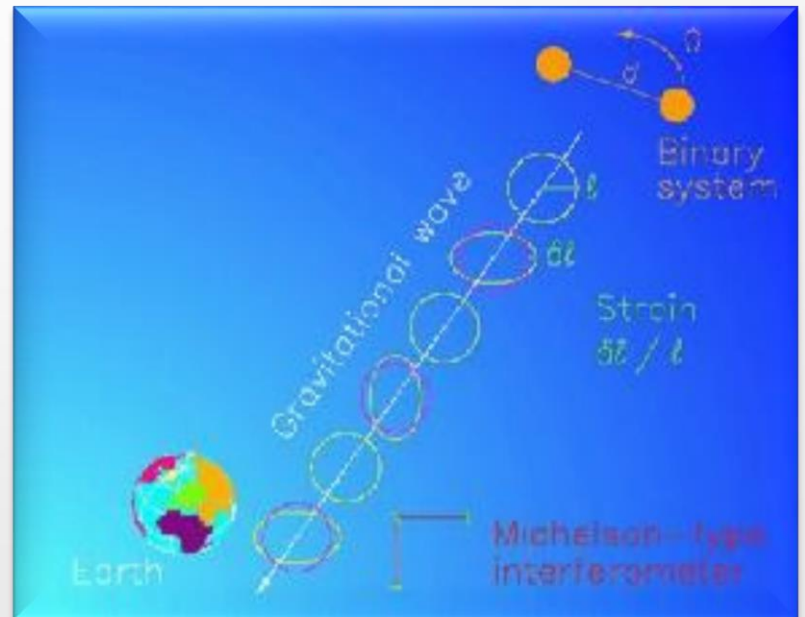
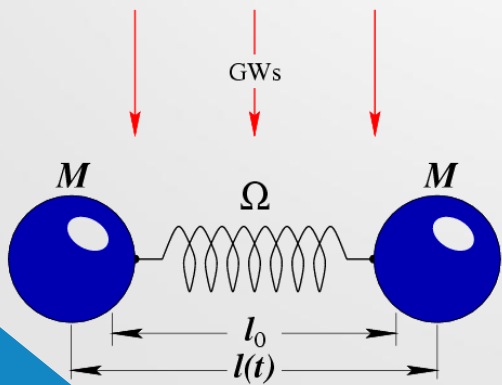
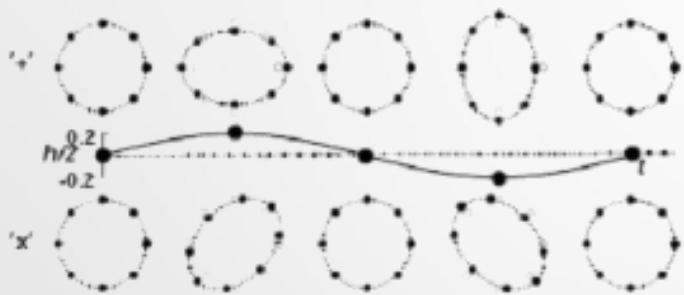
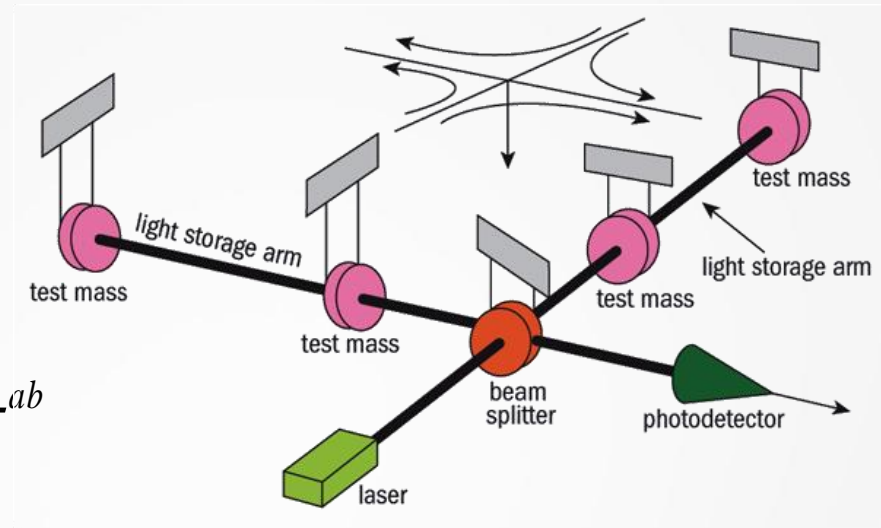
- Gravitációs hullámok és detektorok
- Adatgyűjtés
- Adatfeldolgozás, GPU
- Einstein-egyenletek, hullámformák
- Kettős rendszerek leírása



Gravitációs hullámok



$$\eta^{ik} h^{ab}{}_{,ik} = -16\pi \tau^{ab}$$



Rezonáns detektorok



AURIGA,
Legnaro



NAUTILUS, Frascati

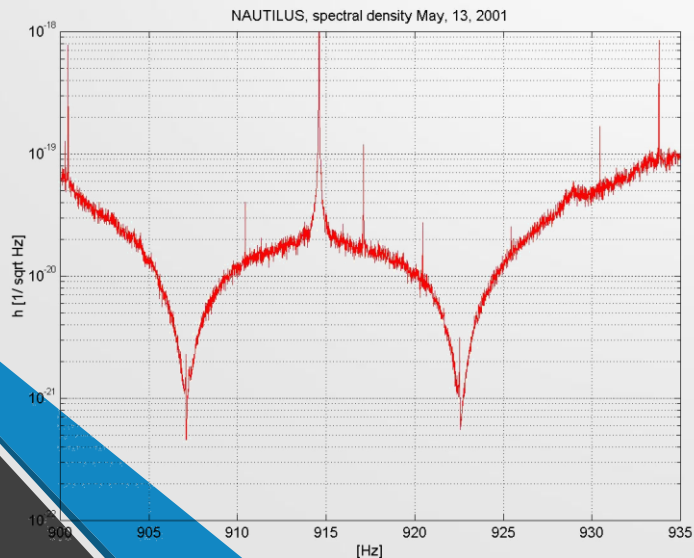


MiniGRAIL, Hollandia

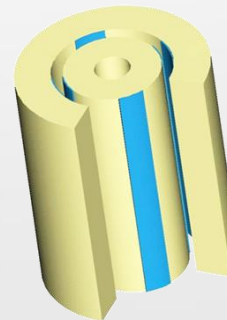


Tömeg: 1100-2300 kg

$h \sim 10^{-21}$ @ ~ 1 kHz



CERN



Dual

LIGO

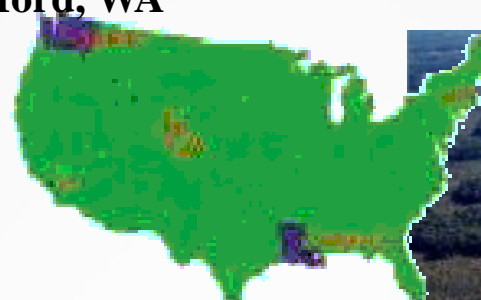
Karhossz:

4 km

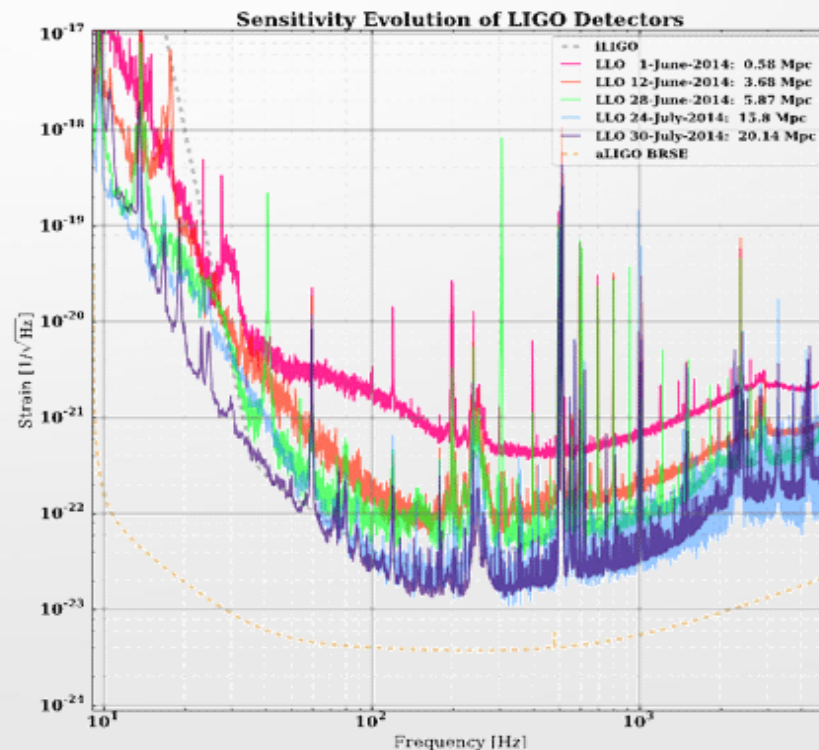
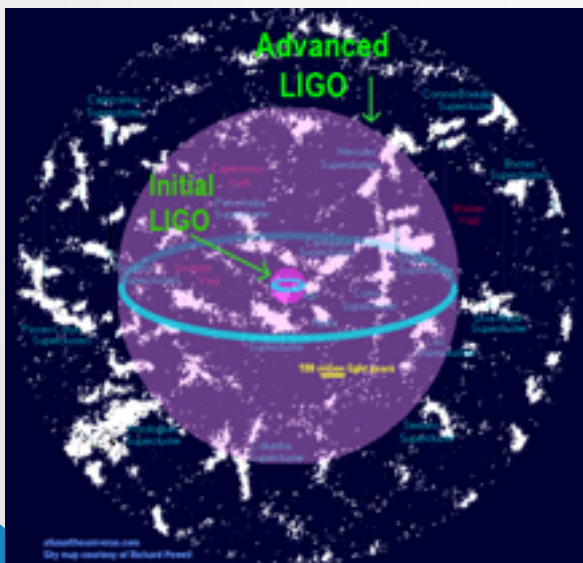
- Tudományos mérések 2002 – 2010
- L1 detektor beüzemelése: 2014 május
- 25 → 40 kg tükör , 10 → 200 W lézer
- Felkészülés a megfigyelésekre, O1



Hanford, WA



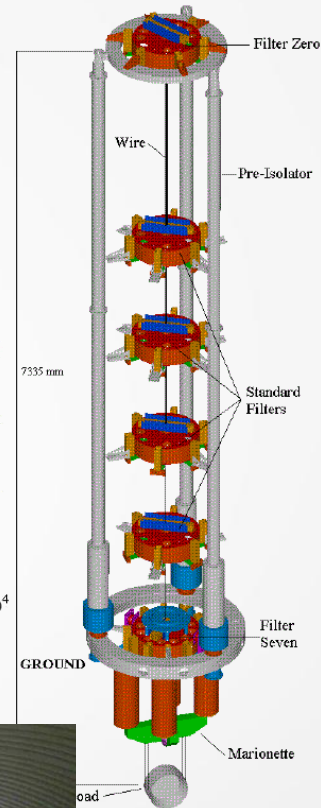
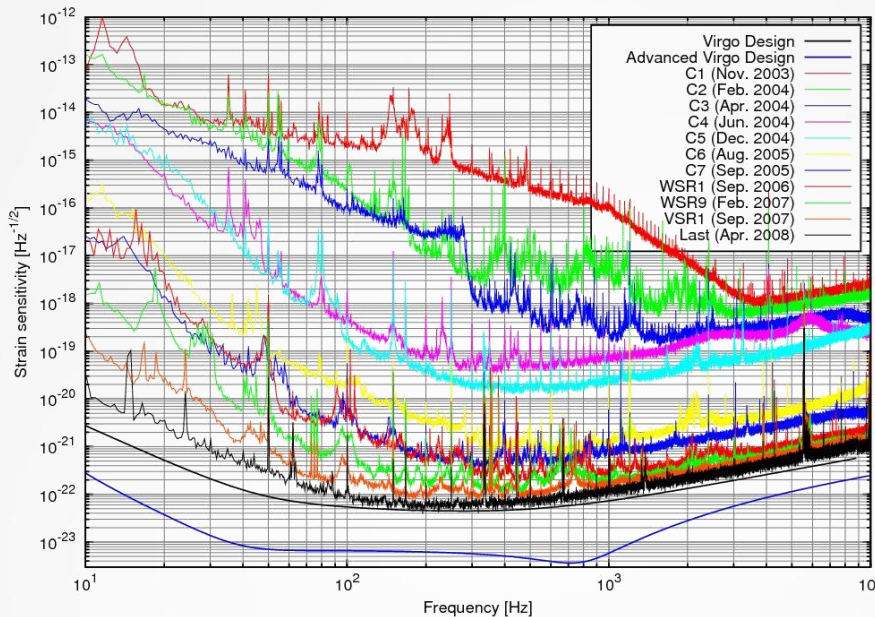
Livingston, LA





VIRGO

Karhossz: 3 km



- Tudományos mérések 2004 – 2011
- 6800 m³, 10⁻¹⁰ mbar vákuum
- 20 kHz-es mintavételezési frekvencia, analízis 4/16 kHz -en, 200 TB/detektor adat évenként
- Szeizmikus izoláció (superattenuator) 10⁻⁹ - 10⁻¹³ csillapítás (4 – 200 Hz)



Gravitational Wave Detectors

● Interferometric

● Resonant-Mass



LISA



GEO

EXPLORER ● AURIGA
VIRGO ● NAUTILUS



TAMA



NIOBE



LIGO



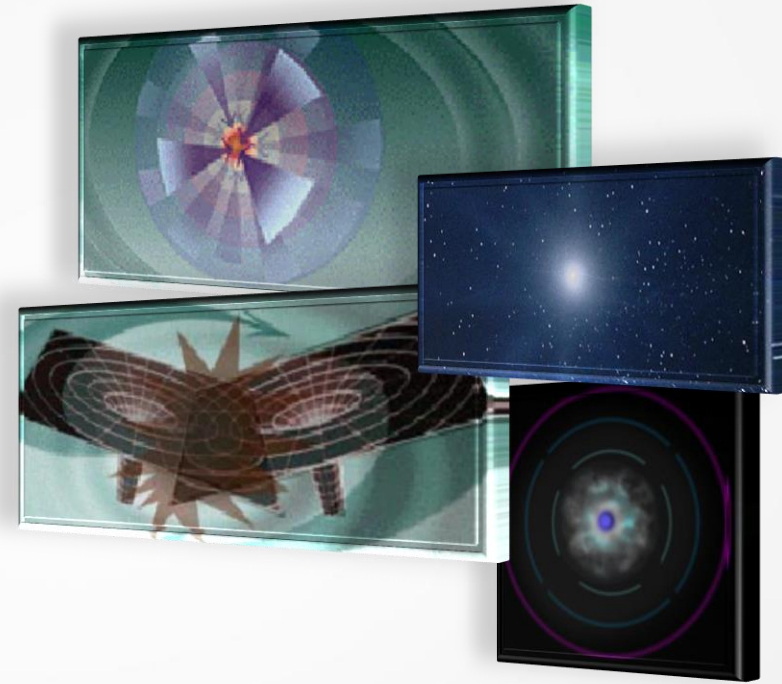
LIGO

ALLEGRO

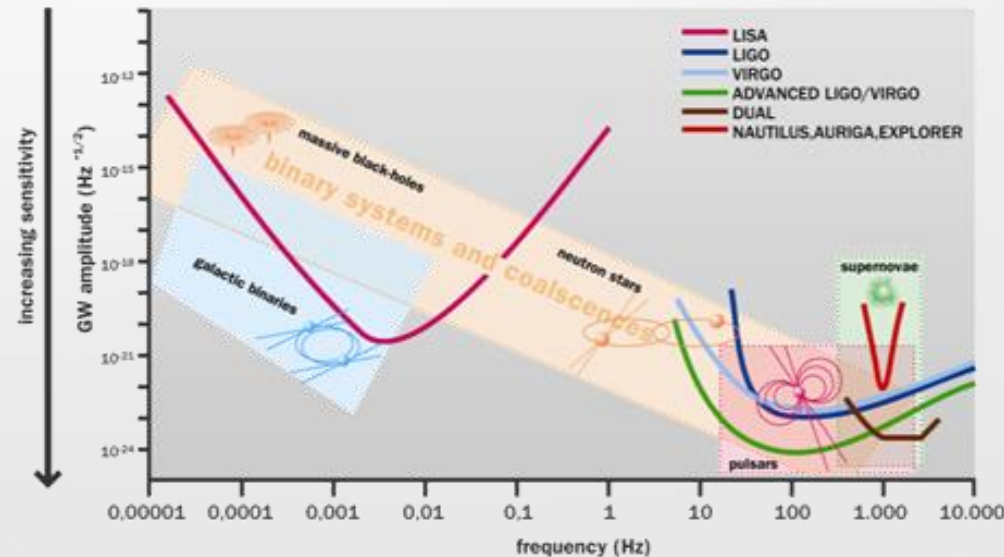
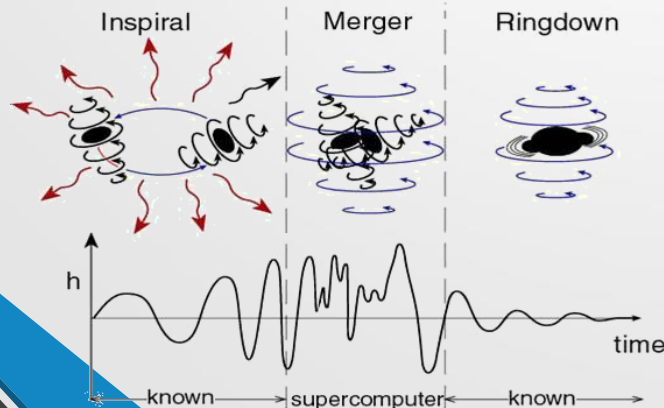
A hullámok forrásai

Frekvencia

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

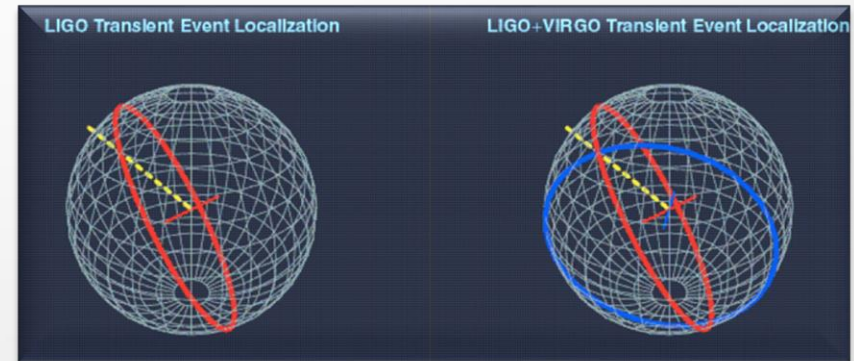
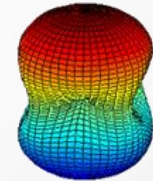
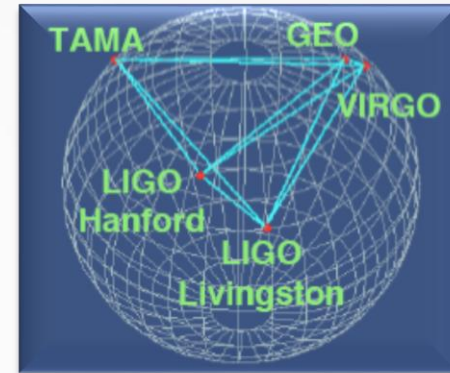


A kompakt kettősök, mint a gravitációs hullám obszervatóriumok jelentős forrásai, jól meghatározott hullámformával jellemezhetők fejlődésük korai és késői szakaszában (perturbatív leírás)



LV kollaboráció

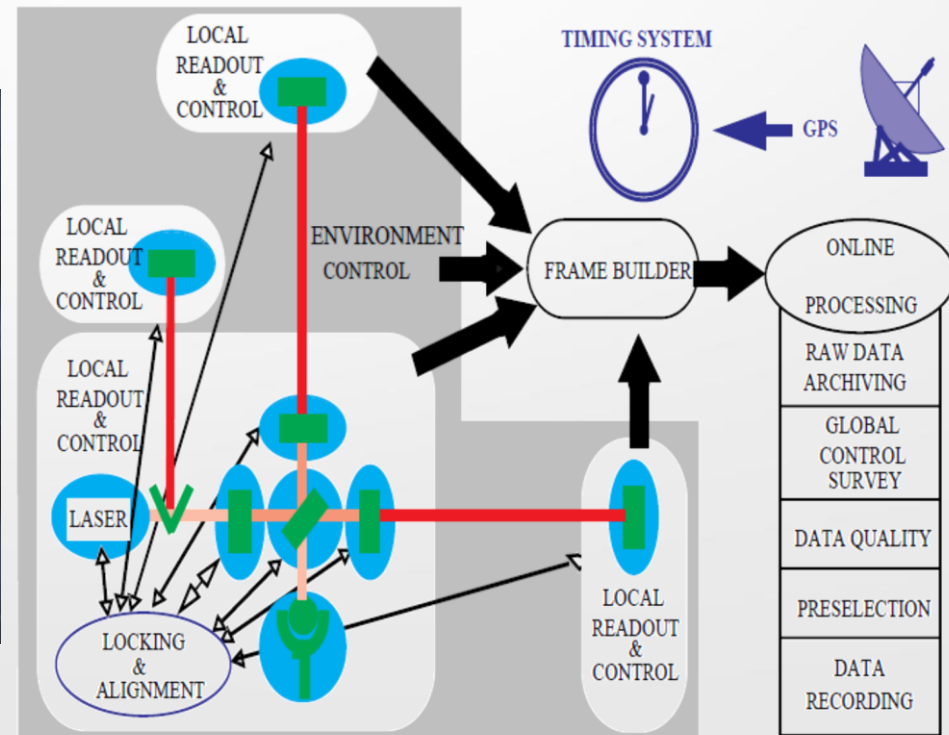
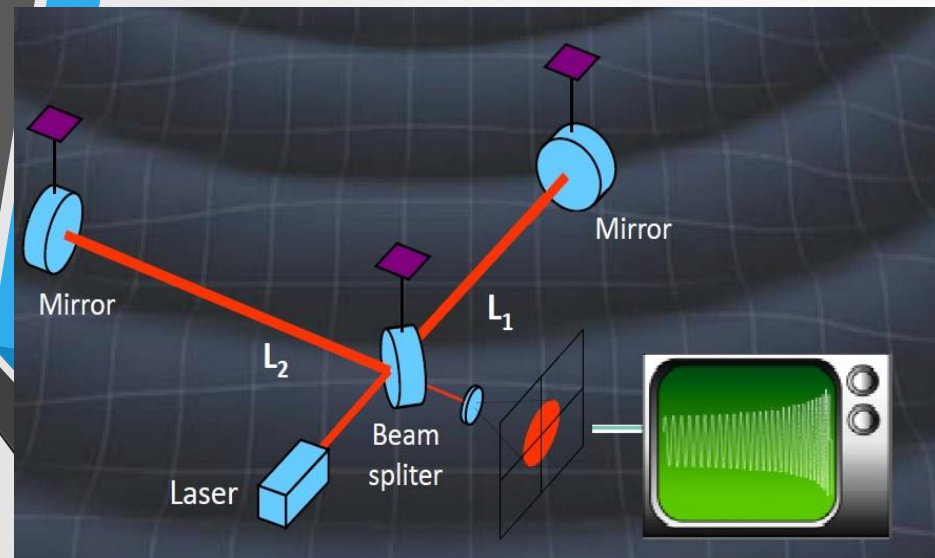
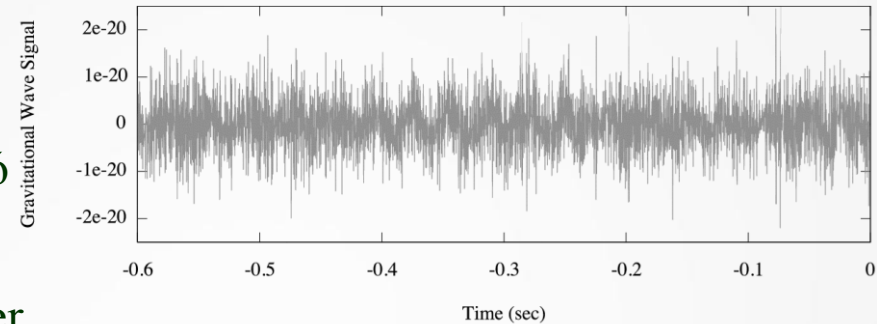
- A gravitációs hullámdetektorok egy világméretű hálózataként a LIGO és Virgo detektorok együttműködésük keretében megosztják pl. a mérési adatokat, a feldolgozó eljárásokat és számítási erőforrásokat
- Koincidencia-mérések, hamis jelek kiszűrése
- Pontos helymeghatározás



Adatgyűjtés

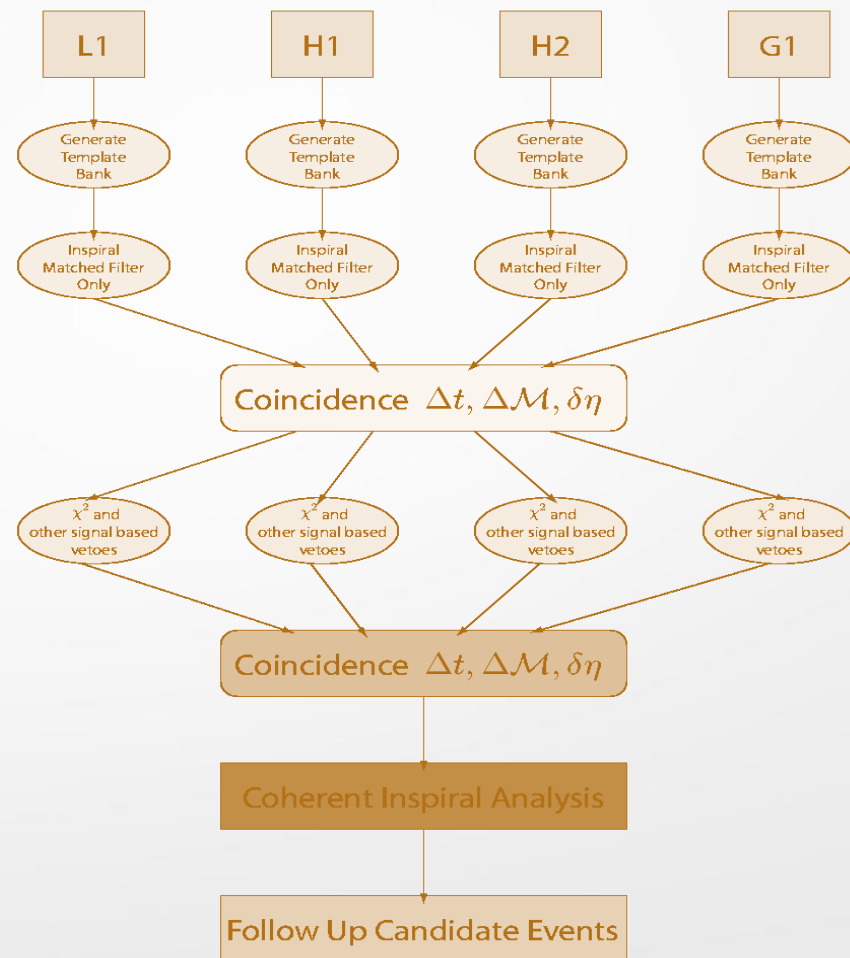
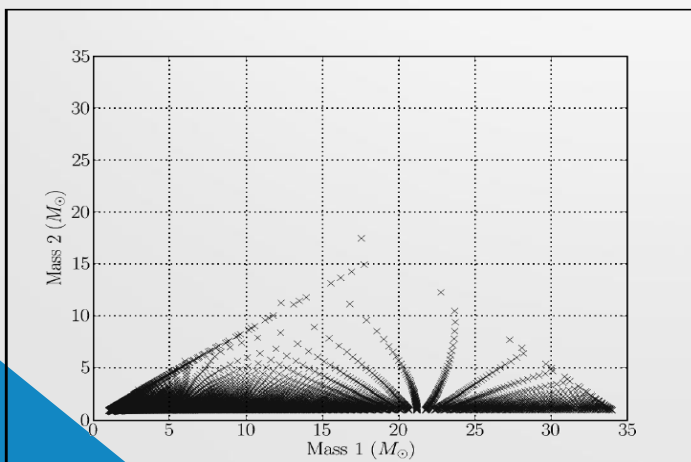
- $h(t)$ meghatározása (online): az interferenciakép változása, a tükrökre ható erő mérése
- Környezeti érzékelők, a vezérlő rendszer érzékelői
- 20 kHz-es mintavételezés (8 byte float), majd az adatok továbbítása (IN2P3, CNAF)

Example Inspirational Gravitational Waves with Noise



Adatelemzés – hitelesített algoritmusok

- hullámforma-jóslatok generálása
(néhány % eltérés, paraméterter nagy lehet)
- matched filtering
- azonos események összegyűjtése
- χ^2 teszt és további jel alapú szűrés
- többszörös egybeesés esetén további vizsgálatok, ellenőrzés, ...



Adatfeldolgozás

- Részvétel a különböző Grid rendszerek összekapcsolásának fejlesztésében:

EGI Grid ↔ OSG ↔ LDG

- A detektorok mérési adatainak (200 TB/év/interferométer) továbbítása, feldolgozása, elemzése stb
 - Elemzés: Hannover, Bologna, Bp. és amerikai szerverek
- GPU-n futó (Graphical Processing Units) keresési algoritmusok fejlesztése jól párhuzamosítható, vagy nagy számítástechnikai kapacitást igénylő eljárások esetén.
- Kompakt kettősök összeolvadását leíró keresési algoritmusok
 - Periodikus hullámok keresése (F-statistics, Hough-módszer)



Einstein-egyenletek megoldása, hullámformák

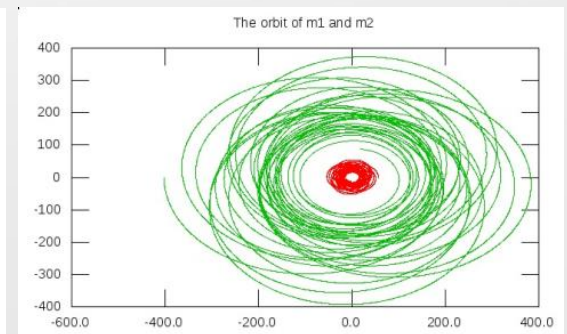
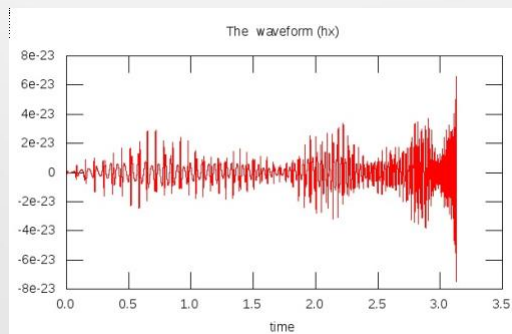
■ GridRipper

Negyedrendű kód adaptív lépésközzel (AMR) hiperbolikus parciális differenciálegyenlet-rendszerek, pl. az Einstein-egyenletek numerikus megoldására, amellyel, többek között, a következő kérdések vizsgálhatók:

- Folyadékok vagy skalárterek gömbszimmetrikus gravitációs összeomlása
- Kozmikus infláció
- Einstein-Klein-Gordon rendszerek 3D viselkedése (multipole expansion)

■ CBwaves

Kettős rendszerek mozgásegyenleteinek (poszt-Newtoni formalizmus) numerikus integrálása (negyedrendű RK) excentricitás és spinek jelenlétében, hullámformák generálása összeolvadás esetén



CBwaves - pályamozgás

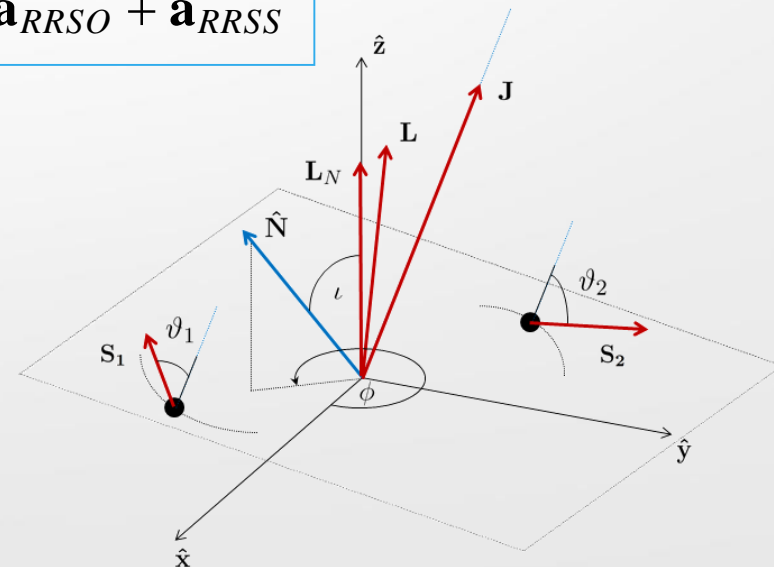
- Analitikus, poszt-newtoni leírás az ismert járulékok figyelembe vételével
- A 3.5PN mozgásegyenletek numerikus integrálása, negyedrendű Runge-Kutta-módszer

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_N + \mathbf{a}_{PN} + \mathbf{a}_{SO} + \mathbf{a}_{2PN} + \mathbf{a}_{SS} + \mathbf{a}_{RR} \\ + \mathbf{a}_{PNSO} + \mathbf{a}_{3PN} + \mathbf{a}_{RR1PN} + \mathbf{a}_{2PNSO} + \mathbf{a}_{RRSO} + \mathbf{a}_{RRSS}$$

- 3PN spinprecessziós egyenletek
- A legfontosabb paraméterek
 - kezdeti távolság és excentricitás, tömegek, spinek és irányuk

A gyorsulás járulékai

- L. Kidder (95)
2PN spinekkel, sugárzási visszahatás 2.5PN
- H. Tagoshi et.al. (01), G Faye et.al. (06)
SO járulék 1PN korrekciója
- T. Mora and C. M. Will (04) 3PN
- B. R. Iyer and C. M. Will (95)
3.5PN sugárzási visszahatás
- C. M. Will (05), H. Wang and C. M. Will (07)
a sugárzási visszahatás SO, SS járulékai
- A. Bohé et.al. (13)
SO járulék 2PN korrekciója



CBwaves - hullámformák

- A sugárzási tér meghatározása a mozgásleírással egyidejűleg történik a 2PN általános excentrikus hullámformák segítségével

A hullámforma járulékai

- R. V Wagoner and C. M. Will (76,77) 0.5 és 1PN járulékok Q_{ij} -hez
- A. G. Wiseman (92) 1.5PN Q_{ij} tag
- L. Kidder (95) spinjárulékok
- C. M. Will and A. G. Wiseman (96) 2PN járulékok Q_{ij} -hez

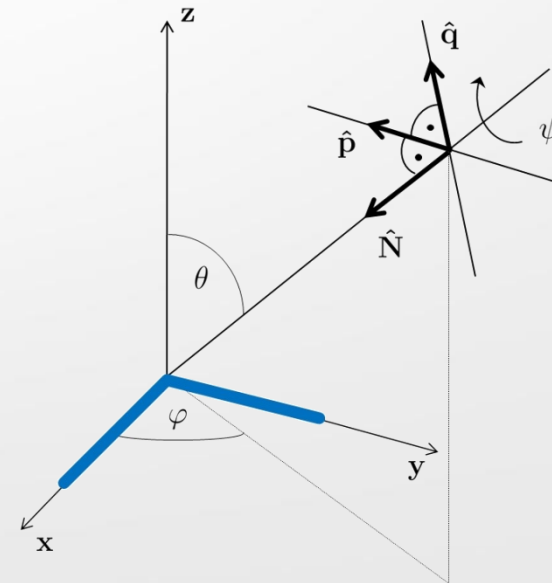
$$h_{ij} = \frac{2G\mu}{c^4 D} \left(Q_{ij} + P^{0.5} Q_{ij} + P Q_{ij} + P Q_{ij}^{SO} + P^{1.5} Q_{ij} + P^{1.5} Q_{ij}^{SO} + P^2 Q_{ij} + P^2 Q_{ij}^{SS} \right)$$

- A $h(t)$ hullámforma a polarizációs állapotok segítségével adható meg (sugárzási rendszer) $(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{p}}, \hat{\mathbf{q}})$

$$h_+ = \frac{1}{2}(\hat{p}_i \hat{p}_j - \hat{q}_i \hat{q}_j) h_{ij}^{TT}, \quad h_\times = \frac{1}{2}(\hat{p}_i \hat{q}_j + \hat{q}_i \hat{p}_j) h_{ij}^{TT}$$

$$h(t) = F_+ h_+(t) + F_\times h_\times(t)$$

- Idő- és frekvenciatérbeli hullámformák (beépített FFT)
- A forráskód letölthető



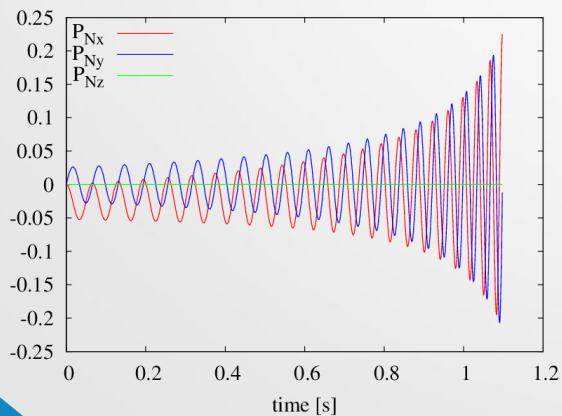
CBwaves - visszalökődés

■ The linear momentum loss

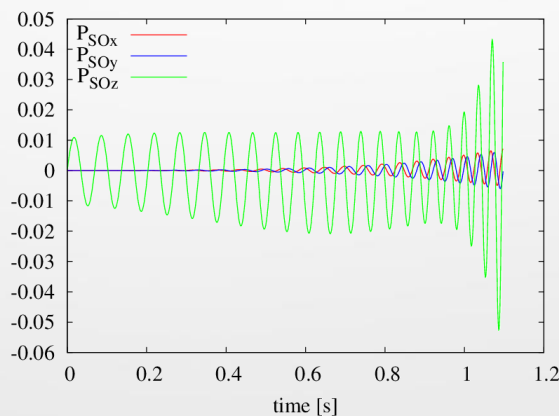
$$\dot{\mathbf{P}}_N = -\frac{8}{105} \frac{\delta m}{m} \eta^2 \left(\frac{m}{r}\right)^4 \left\{ i\hat{\mathbf{n}} \left[55v^2 - 45\dot{r}^2 + 12\frac{m}{r} \right] + \mathbf{v} \left[38\dot{r}^2 - 50v^2 - 8\frac{m}{r} \right] \right\}$$

$$\dot{\mathbf{P}}_{SO} = -\frac{8}{15} \frac{\mu^2 m}{r^5} \left\{ 4\dot{r}(\mathbf{v} \times \Delta) - 2v^2(\hat{\mathbf{n}} \times \Delta) - (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{v})[3\dot{r}(\hat{\mathbf{n}} \cdot \Delta) + 2(\mathbf{v} \cdot \Delta)] \right\}$$

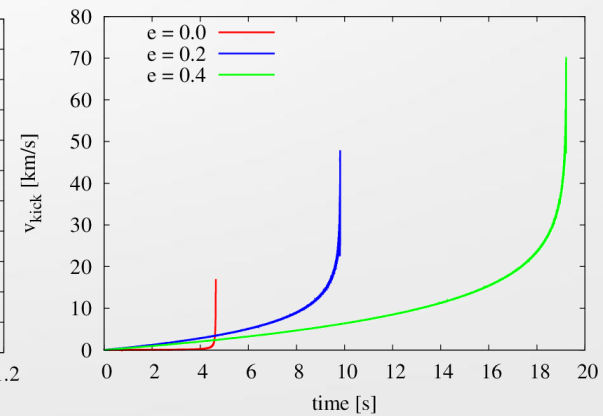
$m_1=18 M_\odot$, $m_2=10 M_\odot$



Ellentétes spinek a pályasíkban



$m_1=3.8 M_\odot$, $m_2=10 M_\odot$



Kettős rendszerek leírása

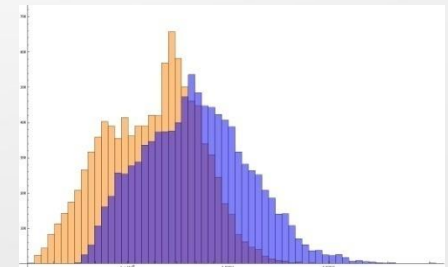
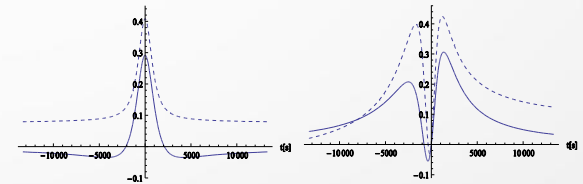
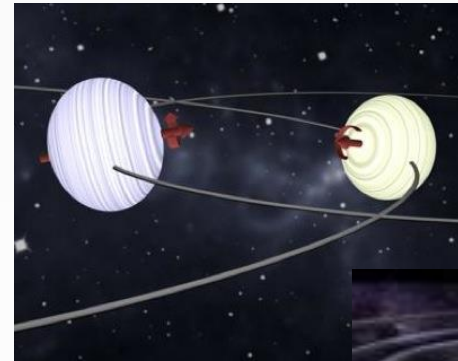
- Forgó kettős rendszerek mozgásának leírása (poszt-Newtoni formalizmus)

A gravitációs sugárzás polarizációs állapotainak vizsgálata

Parabolikus és hiperbolikus pályán mozgó kettősök, valamint az általuk kisugárzott gravitációs hullámok vizsgálata

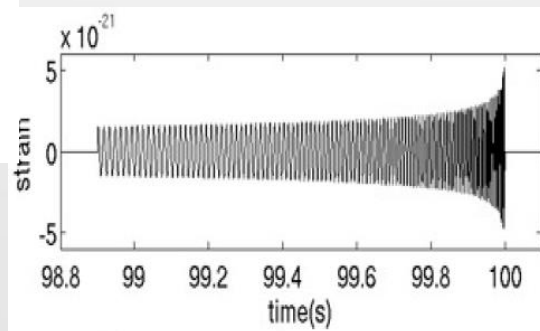
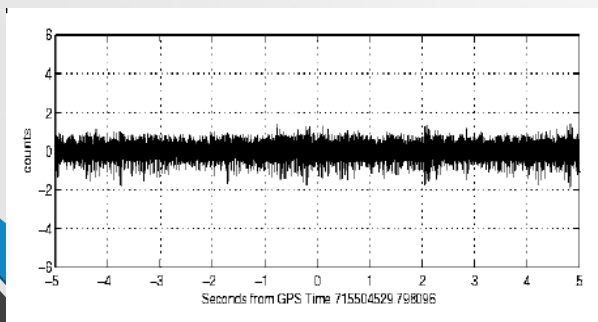
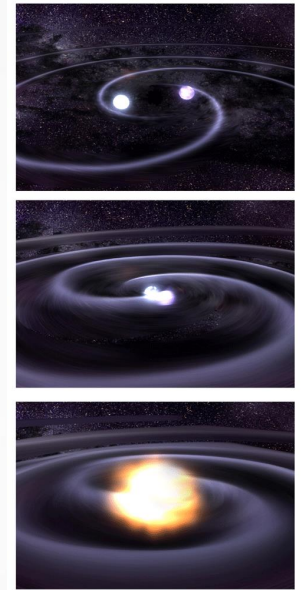
- Kompakt kettős rendszerek mozgása

A kettős paramétereinek becslése az excentricitás figyelembe vételével (Fisher-mátrix) nagy tömegű fekete lyukakra vonatkozóan (LISA)

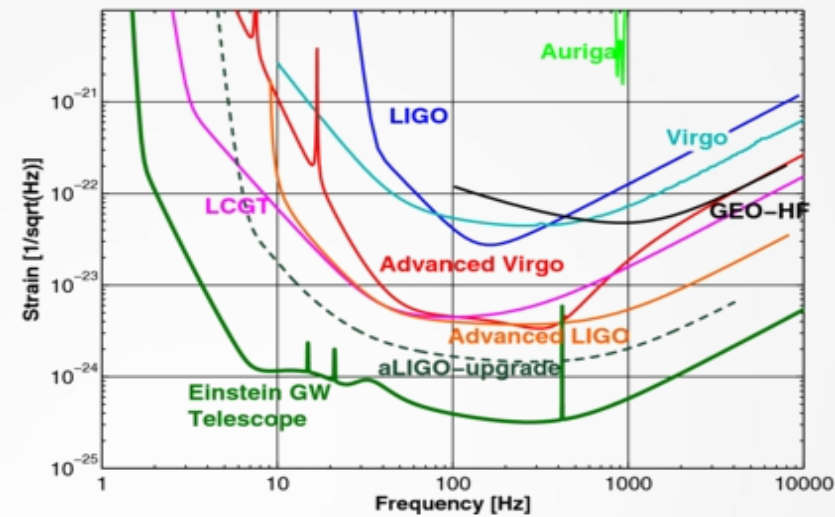


Kutatási területek

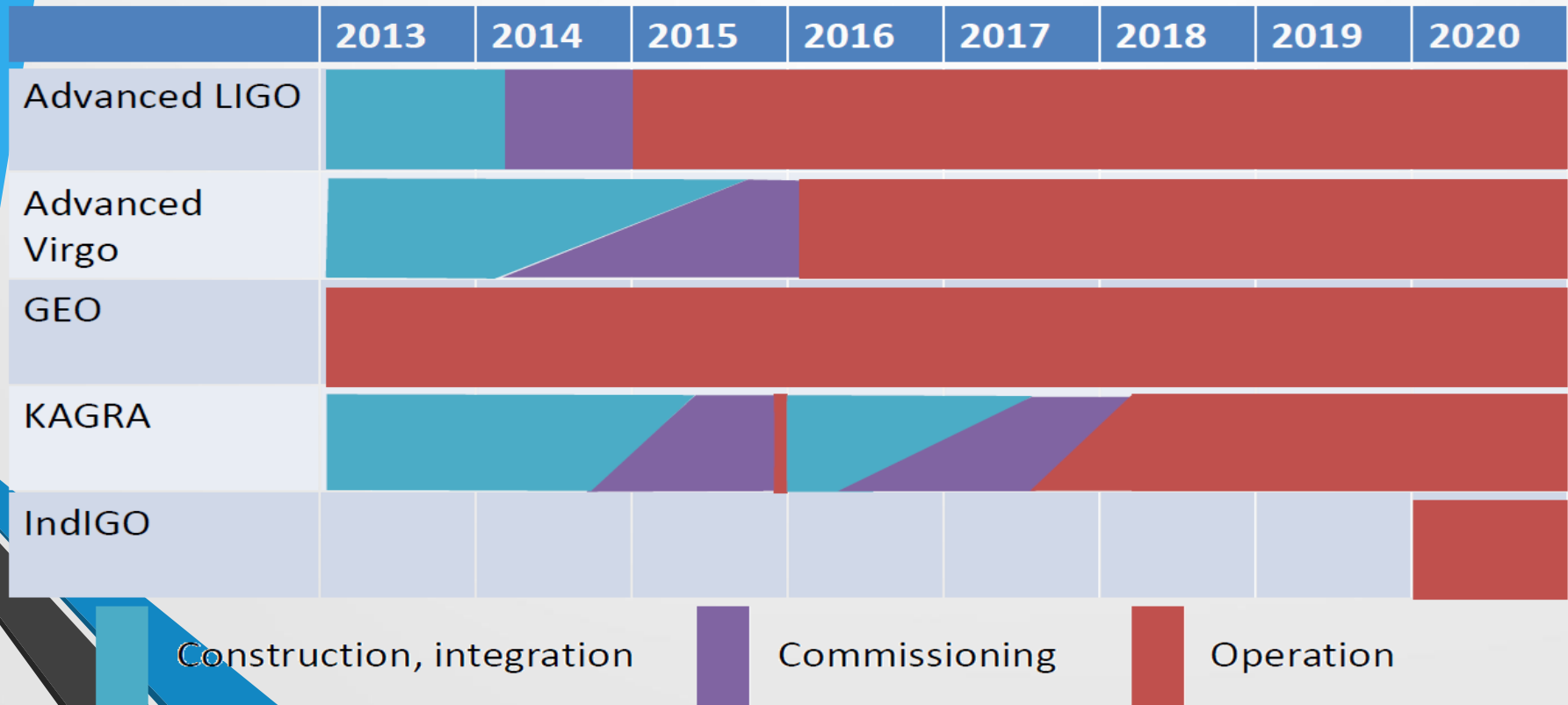
- Hullámformák elméleti és numerikus vizsgálata és modellezése, spinek és excentricitás hatásainak elemzése, reduced basis
- Einstein-egyenletek numerikus megoldása
- Adatanalízis módszerek kidolgozása, alkalmazása
- Modell független keresési algoritmusok fejlesztése
- GPU programozás, Grid fejlesztés



Tervezett fejlesztések



S.Hild 2012 COG 29 124006



EINSTEIN TELESCOPE

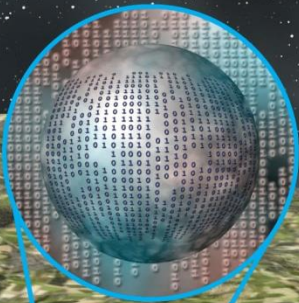
gravitational wave observatory



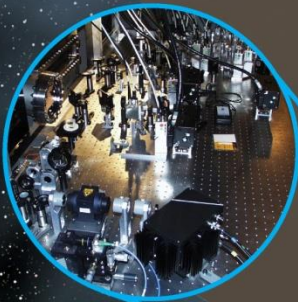
CENTRAL FACILITY



COMPUTING CENTRE



DETECTOR STATION



END STATION



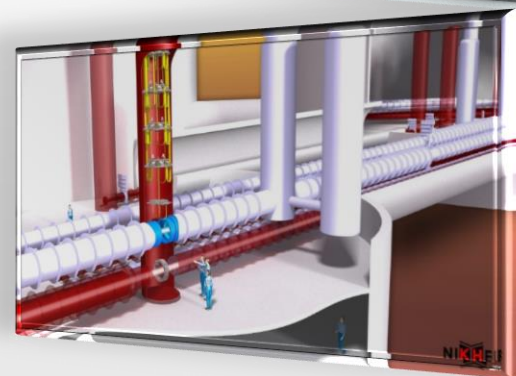
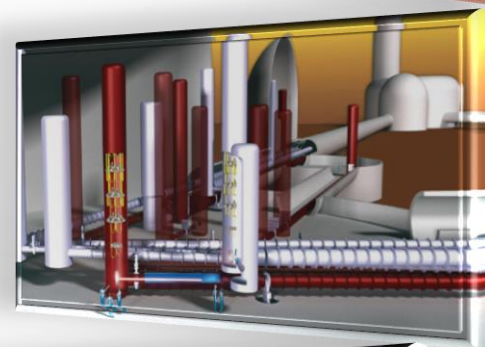
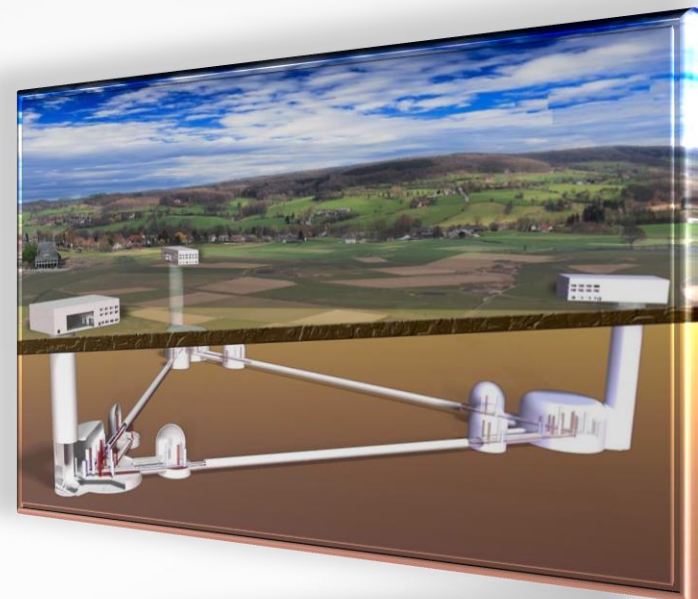
Length ~10 km



TUNNEL \varnothing ~5 m

3. gen. GH detektor

- 1 nagyságrenddel nagyobb érzékenység
1000x-es eseményszám
- Föld alatt
- Karhosszúság: 10 km
- Új geometria
- MW-os lézer
- 200 kg-os tükrök
- Helyszíneresés Mo.-on
- R&D: ASPERA, EGWII

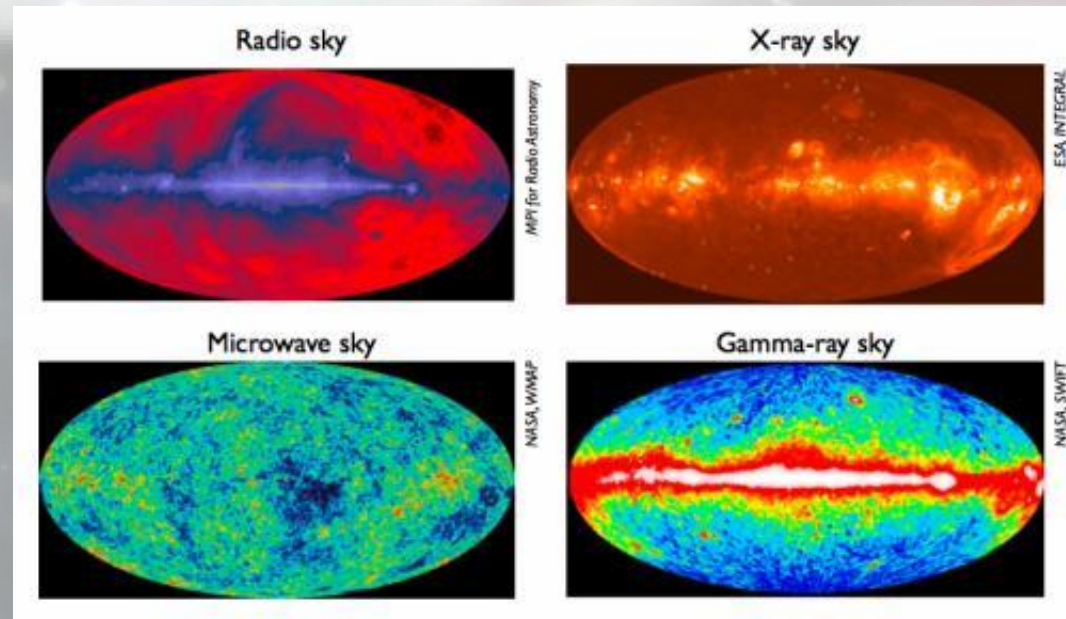


Cél

- A GH-ok közvetlen mérése, majd elemzése

Gravitációshullám-csillagászat

- dinamikai folyamatok, nagy sűrűségű területek megfigyelése
- sötét anyag, sötét energia
- az Univerzum korai állapota



GH?

Wigner Virgo csoport

LSC-VIRGO 2015
Collaborating Meeting



» lvc@asszisztencia.hu
» Phone: +36 1 350 1854

[Home](#) [Program](#) [Venue](#) [Registration & Hotel](#) [Social Events](#) [Travel Info](#) [Contact](#)

31 August - 4 September 2015
Kempinski Hotel Corvinus Budapest, Hungary



LSC-VIRGO Collaborating Meeting

31 August - 4 September 2015 | Budapest, Hungary



We are pleased to announce that the LSC-Virgo Collaborating Meeting will be held in Budapest, Hungary between 31 August - 4 September 2015 and kindly invite researchers to participate in this 5 day event.

virgo.rmki.kfki.hu