

GW190521: AZ EDDIG ÉSZLELT LEGNAGYOBB ÖSSZTÖMEGŰ FEKETE LYUKAK ÖSSZEOLVADÁSA

MIT FIGYELTÜNK MEG?

2019. május 21-én az [Advanced LIGO](#) és az [Advanced Virgo](#) detektorok különleges [fekete lyukakból](#) származó gravitációshullám-jelet észleltek. A GW190521 elnevezésű jel sokkal rövidebb volt és alacsonyabb [frekvencia](#)csúccsal rendelkezett, mint az eddig megfigyelt kettős fekete lyukak.

Az összeolvadásokból származó jelek hossza fordítottan arányos a kettős rendszer össztömegével. A GW190521 esetében ez az időtartam mindössze 0,1 másodperc volt – sokkal rövidebb, mint pl. az elsőként megfigyelt kettős fekete lyuk-összeolvadás, a [GW150914](#). Hasonlóan, a bespiráló kettősök által kisugárzott gravitációshullám-jelek maximumának frekvenciája is fordítottan arányos a kettős össztömegével. A GW190521 esetén a frekvencia csúcs 60 Hz körül volt, szintén sokkal a GW150914 150 Hz-es csúcsánál alacsonyabban. Így tehát a kezdetektől (lásd az 1. ábrát) nyilvánvaló volt, hogy a LIGO és a Virgo nagyon nagy fekete lyukakat talált.

A 2. ábra a GW190521 jelet létrehozó fekete lyukak mért tömegeit mutatja. A nagyobbik fekete lyuk tömege körülbelül 85-szöröse volt a [Napének](#) (a naptömeget az M_{\odot} szimbólum jelzi), míg a kisebbiké $66 M_{\odot}$ -nek adódott. Mind a két test sokkal nehezebb, mint *bármelyik* kettős fekete lyuk, amelyet [eddig a Virgo és a LIGO észlelt](#) – és még a kisebbik fekete lyuk is nehezebb, mint a legtöbb *maradvány* fekete lyuk, amely ezen összeolvadások során keletkezett (lásd a 3. ábrát).

A GW190521 esetében az összeolvadás utáni maradvány fekete lyuk tömege körülbelül $142 M_{\odot}$, ezzel bőven elnyerve a LIGO-Virgo listáján a legnagyobb fekete lyuk címet. A maradvány tömege kb. $8 M_{\odot}$ -gel kevesebb, mint az összeolvadó fekete lyukak össztömege; ez a tömeg alakult át energiává, ami gravitációs hullámok formájában sugárzódott ki.

MITŐL KÜLÖNLEGES A GW190521 ÉSZLELÉS?

A fekete lyukak kivételesen nagy tömegének nagyobb jelentősége van, mint a rekordok döntögetése: feszegeti a tudásunkat a fekete lyukak keletkezéséről és egyedi laboratóriumként szolgál a gravitáció természetének megértéséhez.



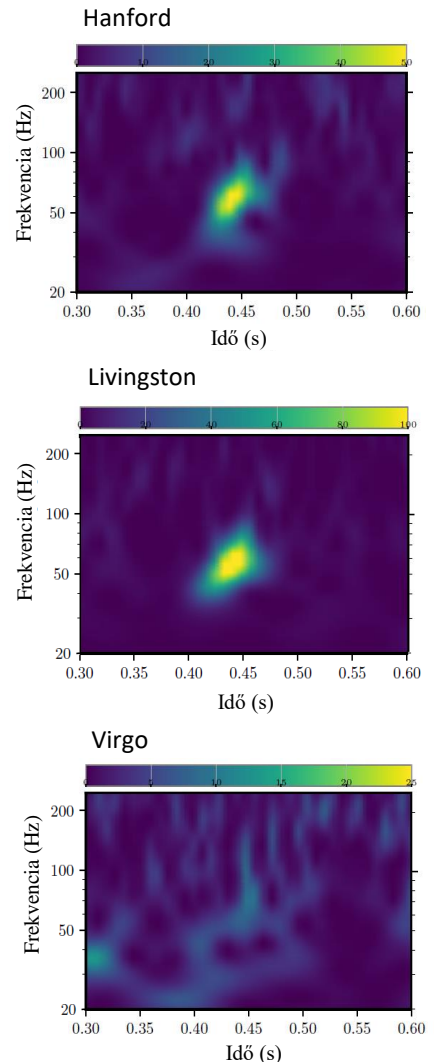
Látogassa meg a
weboldalainkat:

<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>
<http://ligo.elte.hu>

A fekete lyukak keletkezése

A csillagászok a tömegük szerint osztályozzák a fekete lyukakat. A különböző kategóriák között lényegi eltérés van: az egyes tömegtartományokba tartozó fekete lyukak teljesen más folyamatok során keletkeznek.

A legnagyobb tömegűeket [szupernehéz fekete lyukaknak](#) nevezzük. A legtöbb, ha nem minden galaxis közepén ilyen fekete lyuk található, tömegük százezer vagy akár több milliárd naptömeg is lehet.



1. ábra. A LIGO Hanford, a LIGO Livingston és a Virgo megfigyeléséből származó frekvencia-idő adatok, amelyek a GW190521 jelet is tartalmazták. Az idő 2019. május 21-én, magyar idő szerint 05:02:29-hez képest van ábrázolva. Az energiát egy adott frekvencia-idő tartományban a színezés mutatja. Megfigyelhető a rendkívül rövid időtartam és a 60 Hz-es frekvencia csúcs. (A [GW190521 felfedezéséről szóló cikk](#) 1. ábrája alapján.)

A mi galaxisunk, a [Tejútrendszer galaxis-magjában](#) is egy ilyen fekete lyuk található, amelynek tömege 4 milliószorosa a Napénak. Ezeknek a fekete lyuk szörnyetegeknek a pontos keletkezését máig rejtély övezi. Annyit mindenesetre sejtethünk, hogy még az Univerzum hajnalán keletkezettek, így lehetett elég idejük ilyen nagyra nőni.

A tömegspektrum másik végén a [csillagtömegű fekete lyukak](#) vannak. Ezek nagytömegű csillagok összeomlásakor keletkeznek, egy [szupernóva robbanást](#) követően. A csillagtömegű fekete lyukak tömege néhányszor tíz naptömeg lehet, és ezek alkotják a Virgo és a LIGO által eddig megfigyelt kettős fekete lyukakat.

A csillagtömegű és a szupernehéz fekete lyukak között terül el a [köztes tömegű fekete lyukak](#) titokzatos birodalma. Ezek tömege értelemszerűen 100 és 100.000 M_{\odot} között van. Májig nem sikerült még minden kétséget kizáróan ilyen típusú fekete lyukakat megfigyelni, de vannak már elméletek arról, hogy hogyan keletkezhetnek. A köztes tömegű fekete lyukak utáni vadászat kezd egyre komolyabbá válni, ahogy a teleszkópok és a gravitációshullám-detektorok egyre jobban fejlődnek.

A nagytömegű csillagokról alkotott elméleteink alapján úgy gondoljuk, hogy 65 és 120 M_{\odot} közötti fekete lyukak *nem* keletkezhetnek csillagok összeomlásakor. Így a GW190521 így kilóg a sorból, mivel a nagyobb tömegű (az "elsődleges") fekete lyuk ezen intervallum kellős közepén található. Ráadásul a két fekete lyuk összeolvadása során keletkező "maradvány" fekete lyuk még különösebb, mivel a köztes tömegű fekete lyukak közé sorolható.

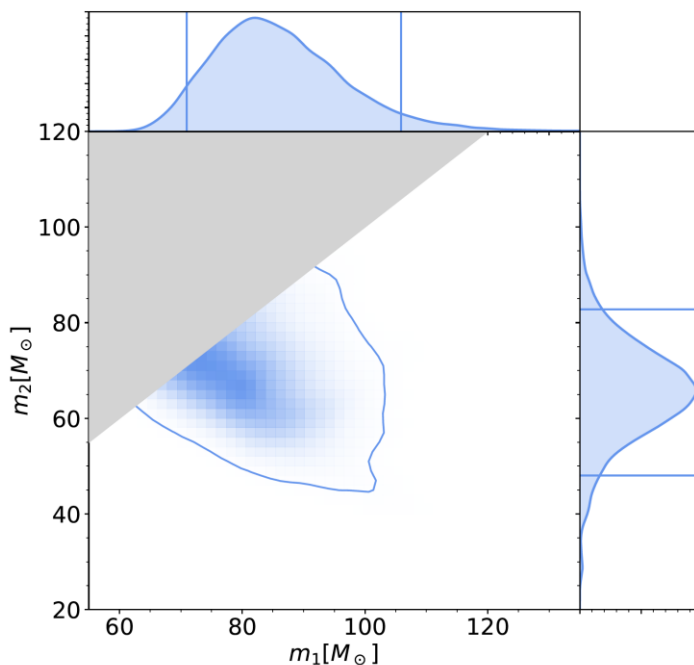
A LIGO-Virgo GW190521 észlelése így arra utal, hogy vagy mégis keletkezhetnek csillagokból ilyen nagy tömegű fekete lyukak is vagy pedig néhány fekete lyuk más módon keletkezik – az egyik lehetséges magyarázat az, hogy ez a fekete lyuk is egy korábbi összeolvadás során jött létre. Ilyen módon akár az is elképzelhető, hogy még nagyobb fekete lyukak keletkezzenek ebben a tartományban, amennyiben a most létrejött fekete lyuk egy *újabb* összeolvadásban venne részt. Ennek a végbemeneteléséhez arra van szükség, hogy a fekete lyukak egy speciális környezetben jöjjenek létre, ahol rengeteg társuk veszi őket körül, amivel lehetőség nyílik a sokszoros összeolvadásra. A csillagászok szerint léteznek is ilyen területek az Univerzumban, például a [csillaghalmazok](#) vagy az [aktív galaxismagok akkréciós korongjai](#) elég sűrűek lehetnek ahhoz, hogy megteremtsék a szükséges feltételeket.

A GW190521 megfigyelése arra enged következtetni, hogy a köztes fekete lyukak egy része ilyen módon, csillagtömegű fekete lyukak összeolvadásával jöhetett létre. Hasonlóan az is elképzelhető, hogy a szupernehéz fekete lyukak is ilyen módon keletkeznek.

A gravitációval kapcsolatos ismereteink ellenőrzése

A gravitáció működéséről alkotott elméleteinket Einstein [általános relativitáselmélete](#) foglalja össze. A fizikusok ennek segítségével meg tudják határozni az összeolvadó fekete lyukak által kibocsátott gravitációshullám-jelek alakját. Ezekkel pedig lehetőség nyílik a Virgo és a LIGO adatainak elemzésére. Másfelől viszont a gravitációs hullámok megfigyelése felhasználható arra, hogy ellenőrizzük, mennyire voltak pontosak az előzetes számítások. Így ha valami esetleg eltérne az elmélettől, az lehetőséget adhatna [alternatív gravitációs elméletek](#) kidolgozására.

A gravitációs hullámok fizikai kísérletként való alkalmazása nem újdonsága: a korábbi LIGO-Virgo észleléseket is használták már az [általános relativitáselmélet tesztelésére](#). Akkor mitől más a GW190521?

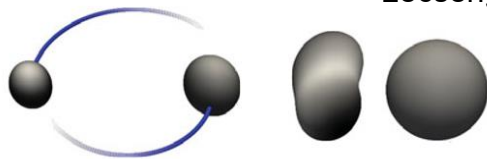


2. ábra. A GW190521 jelet létrehozó fekete lyukak mért tömegeinek valószínűség-eloszlása. A LIGO-Virgo elemzéséből az adódott, hogy a tömegek 90%-os valószínűséggel a kék körvonalon belüli tartományban vannak a középső ábrán (amely a két tömeg együttes valószínűségét mutatja). Ugyanez igaz a függőleges illetve a vízszintes kék vonalakra az ábra felső és jobb oldalán lévő grafikonokon. Ezek a görbék az egyes fekete lyukak tömegének valószínűség-eloszlását mutatják. A szürke rész a bal felső sarokban azt a LIGO-Virgo konvenciót jelzi, hogy az "elsődleges" m_1 tömeg mindig nagyobb (vagy egyenlő), mint a másodlagos m_2 tömeg. (A [GW190521 felfedezéséről szóló cikk](#) 2. ábrája alapján.)

A fekete lyukak összeolvadása során kibocsátott gravitációshullám-jelek [három különböző fázison](#) mennek át (lásd a 4. ábrát): az első a "bespirálózás", ekkor a két fekete lyuk még jól elkülönülve kering egymás körül; utána jön az "összeolvadás", amikor a két fekete lyuk egyesül; végül pedig a "lecsengés" következik, amikor is a maradvány fekete lyuk úgy zeng, mint egy nagy harang, mielőtt teljesen lenyugszik stabil, végső állapotába.

Ahogy korábban említettük, az összeolvadásokból származó jelek a LIGO-Virgo adataiban különböző időtartamúak és más-más frekvencián csúcsosodnak ki attól függően, hogy mekkora volt a fekete lyukak tömege. Ennek eredményeként a kettős tömegétől függ, hogy a detektorok a gravitációshullám-jel melyik részére érzékenyek. A kisebb tömegű fekete lyukak inkább a bespirálózás és az összeolvadás során figyelhetőek meg. Sokkal nagyobb tömegek esetén, mint a GW190521 esetében is, nagyon jó lehetőség adódik az összeolvadás késői szakaszának és a lecsengésnek az elemzésére.

Bespirálózás Összeolvadás Lecsengés



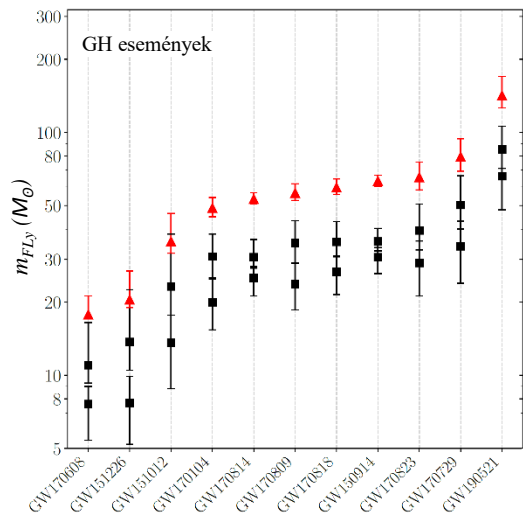
4. ábra. A rajz két fekete lyuk összeolvadásának a három fázisát mutatja, amelyek során a gravitációs hullámok keletkeznek.

Csakúgy, mint az eddigi összes megfigyelésnél, az általános relativitáselmélet megfelelt a GW190521 mért adatainak. Egy ilyen ellenőrző teszt volt például az, hogy külön megvizsgálták a jel első két, illetve az utolsó fázisát. Így a két elemzést össze lehetett hasonlítani, hogy mindkettő alapján ugyanolyan paraméterű fekete lyukak voltak-e a jel forrásai. Ellenőrizni lehetett továbbá, hogy vannak-e olyan minták a jelekben, amelyeket más gravitációs elméletek jósoltak, illetve hogy lehetett-e valami más a jel forrása. Egyik ilyen teszt sem tudta megcáfolni, hogy a GW190521 két fekete lyuk összeolvadásából származott, pontosan olyan formában, ahogy az általános relativitáselmélet alapján várható volt.

ÖSSZEGZÉS

A GW190521 egy rekorder a gravitációs hullámok között, amely bővítette a fekete lyukak keletkezésével kapcsolatos ismereteinket és lehetőséget adott az extrém nagy gravitáció tanulmányozására. Emellett arra is enged következtetni, hogy létezik a nagytömegű feketelyuk-összeolvadásoknak egy olyan populációja, amit a [jövőbeli megfigyelési időszakok](#) alatt a LIGO (a [LIGO Indiával](#) együtt), a Virgo és a japán [KAGRA](#) észlelhetnek.

A legnehezebb csillagtömegű fekete lyukak feltérképezésével pontosabb képet kaphatunk a fekete lyukak keletkezéséről és környezetéről. A GW190521 egyelőre élvezheti csúcstartó helyét a legnagyobb kettős fekete lyukak élén, de jobb, ha nem rendezkedik be hosszú távra. A LIGO, a Virgo és a Kagra tovább fogja pásztázni az eget gravitációs hullámok után kutatva, egyre nagyobb érzékenységgel. A jövő detektorai pedig képesek lesznek még alacsonyabb frekvenciájú jelek észlelésére, így sokkal több nagytömegű fekete lyukat figyelhetünk majd meg. Az új detektorok megépítése már tervben van: az [Einstein-teleszkóp](#) és a [Cosmic Explorer](#) a Földön, a [LISA](#) pedig az űrben fog majd kutatni további rekorderek és váratlan felfedezések után!



3. ábra. A grafikon a LIGO-Virgo [első két, az O1 és az O2 megfigyelési időszakok](#) során észlelt feketelyuk-összeolvadásokban résztvevő komponensek tömegét (fekete négyzetek) mutatja, összehasonlítva a GW190521 jellel. A piros háromszögek az összeolvadások utáni maradvány fekete lyukak tömegét mutatják. A függőleges sávok a mérések bizonytalanságát jelzik. Az ábra jól láthatóan mutatja, hogy a GW190521 új rekordot állított fel. (A [GW190521 asztrofizikai vonatkozásairól szóló cikk](#) 10. ábrája alapján.)

TUDJON MEG TÖBBET:

Látogassa meg weboldalainkat: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu, ligo.elte.hu

Olvassa el a LIGO és a Virgo sajtóközleményeit a GW190521 felfedezéséről:

<http://ligo.elte.hu/detections/GW190521.php>

<http://www.virgo-gw.eu/GW190521>

Olvassa el a teljes, ingyenesen elérhető szakkikket a GW190521 felfedezéséről:

<https://dcc.ligo.org/P2000020/public>

Olvassa el a kapcsolódó szakkikket a GW190521 asztrofizikai vonatkozásairól:

<https://dcc.ligo.org/P2000021/public>

A GW190521 adatai elérhetőek a Gravitational Wave Open Science Centre [honlapján](#).