

2015. szeptember 14-én a LIGO obszervatórium mindkét detektora gravitációs hullámokat észlelt. A jelalakok alapos elemzése után megállapították, hogy a hullámokat a Földtől 1,3 milliárd fényévnnyire található, 36, illetve 29 naptömeggel rendelkező *fekete lyukak* összeolvadása hozta létre. Vajon mennyire közelíthette meg egymást a két fekete lyuk, amikor összeolvadtak? Vajon mekkora egy – adott tömegű – fekete lyuk mérete?

A fekete lyukak létezésének lehetőségét a klasszikus fizika törvényeit alkalmazva az angol *John Mitchell* és tőle függetlenül a francia *Pierre-Simon de Laplace* vetette fel a 18. század végén. Azt a kérdést vizsgálták, hogy mekkora és milyen tömegűnek kellene lennie egy csillagnak ahhoz, hogy a felszínéről még a fény se tudjon eltávozni. Newton gravitációs törvénye szerint egy  $M$  tömegű,  $R$  sugarú égitest felszínéről  $v$  sebességgel elinduló  $m$  tömegű test akkor tud „végtelen messzire” eltávozni (megszökni), ha

$$\frac{1}{2}mv^2 - \gamma \frac{Mm}{R} \geq 0.$$

Amennyiben ez a feltétel még a  $c$  sebességgel haladó „fényrészecskékre” se teljesül, vagyis ha

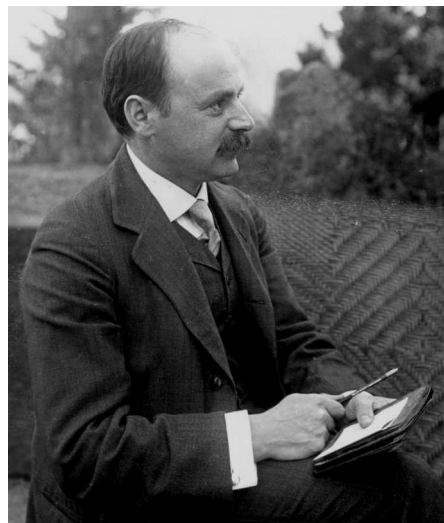
$$(1) \quad R \leq \frac{2\gamma M}{c^2},$$

akkor még a csillag fénye is visszaesik a csillagra, soha nem juthat el a szemünkbe, tehát ez az égitest *láthatatlan* – érvelt az 1700-as évek végén a két tudós. (Érdekes, hogy a fényrészecskék tömegéről semmit nem kellett tudniuk, hiszen az kiesik a szökési sebesség képletéből.)

Az (1) képlet jobb oldalán szereplő távolság a Napra például kb. 3 km, lényegesen kisebb, mint a Nap tényleges (700 000 km-es) sugara. Két évszázadon keresztül csak elvi érdekesség volt, hogy létezhetnek olyan furcsa objektumok az Univerzumban, amelyekbe csak „beleeshet” a fény, de ki nem juthat belőlük. Ezek „*fekete lyukak*” – mondta *J. A. Wheeler* amerikai elméleti fizikus már a 20. században, és ez a találó elnevezés rajtuk is maradt. (Az elnevezés nem a szokásos értelemben vett lyukat jelenti, inkább a világűr egy olyan részét, ami mindent elnyel, és ahonnan semmi, még a fény se tud visszatérni.)

A saját fényét is fogságban tartó, láthatatlan objektumok létének feltételezése helyes gondolat, de az (1) összefüggés „levezetése” mai ismereteink szerint két okból is hibás! Egyrészt a fényt – legyen az akár részecske, akár hullám – nem lehet a klasszikus (newtoni, nemrelativisztikus) fizika képleteivel leírni. Másrészt a gondolatmenetben szereplő „gravitációs potenciális energia” fogalma a nagyon erős gravitációs terekben értelmét veszti, szerepét az általános relativitáselméletben a tér és idő „szövedékének” (az ún. téridőnek) a görbülete veszi át.

A fekete lyukak részletes elméleti leírását az általános relativitáselmélet keretei között *Karl Schwarzschild* (1873–1916) német fizikus és csillagász, a potsdami asztrofizikai intézet igazgatója dolgozta ki Einstein elméletének közzététele évében, 1915-ben. Kiemelkedő matematikai tudással rendelkező csillagász és elméleti fizikus volt, aki már 1900-ban, 27 éves korában azon töprengett, hogyan lehetne csillagászati bizonyítékot találni a tér nemeuklideszi geometriája mellett. Sikerült neki az, ami Einsteinnek nem: megtalálta a bonyolult, nemlineáris téregyenletek egyik egzakt megoldását, ami az üres (anyagmentes) tér gömbszimmetrikus, de az origóban szinguláris állapotát írja le. (Ez a pontszerű testek Newton-féle gravitációs potenciáljának megfelelője az általános relativitáselméletben.) Ebben a megoldásban megjelenik egy hosszúság dimenziójú mennyiség, ami azt mutatja meg, hogy honnan nem szökhet meg még a fény sem a téridő görbülete miatt, feltéve, hogy a görbületséget létrehozó tömeg teljes egészében ezen sugáron belül található. Ezt a távolságot – amit a fekete lyukak „méretének” tekinthetünk, és ami érdekes módon megegyezik a klasszikus, többszörösen hibás levezetés eredményével – az ő tiszteletére *Schwarzschild-sugárnak* nevezik. A Schwarzschild-sugárnak megfelelő gömbfelületet – találóan – a fekete lyuk *eseményhorizontjának* hívják, mert azok az események, amelyeknek a szinguláris ponttól mért távolsága ennél kisebb, kívül esnek minden külső szemlélő „látóhatárán”.



*Karl Schwarzschild, aki 1915-ben elsőként talált egy egzakt megoldást Einstein téregyenleteire*

Schwarzschild 1915 tavaszán és nyarán – az I. világháborúban – a német hadsereg egyik műszaki alakulatával az orosz fronton tartózkodott. Súlyos fertőző betegséget kapott, ami miatt hazarendelték Németországba. Betegsége alatt két kiemelkedő dolgozatot írt. Az egyik az Einstein-féle téregyenletek fent említett megoldása, a másik a színeképvonalak elektromos erőter hatására kialakuló felhasadását (az ún. Stark-effektust) értelmezte a Bohr-modell keretei között. Ez utóbbi cikke a halála napján, 1916. május 11-én jelent meg.

Halálának százéves évfordulóján a kiemelkedő képességű, fiatalon elhunyt tudósra emlékezünk most, a gravitációs hullámok és az egymásba olvadó fekete lyukak észlelésének évében.