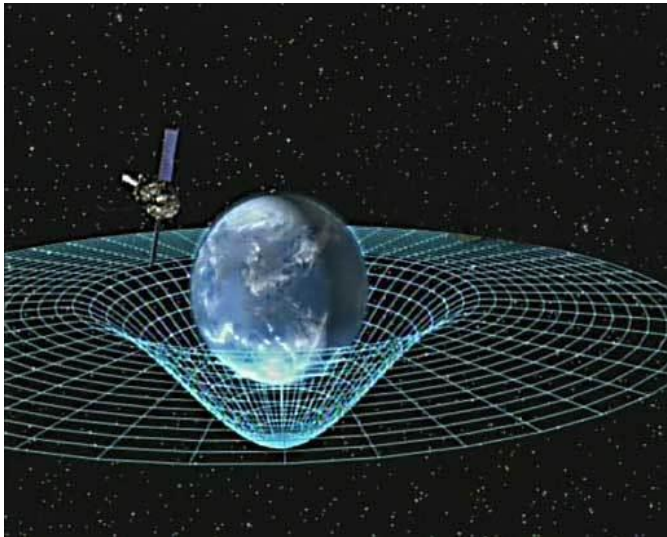


ავთანდილ შურღაია

გრაფიტაციული ტალღები და მათი აღმოჩენა

1915 წელს ა. აინშტაინმა შეიმუშავა ფარდობითობის ზოგადი თეორია. ძალიან მნიშვნელოვანი იყო მისი მოხსენება პრუსიის მეცნიერებათა აკადემიაში, სადაც მანამ წარადგინა განტოლება, რომელიც აღწერდა მატერიის გავლენას დრო-სივრცის გეომეტრიაზე. ეს განტოლება დღეს ა. აინშტაინის განტოლების სახელითაა ცნობილი. განტოლების შინაარსი შემდეგში მდგომარეობს - ის აღწერს დრო-სივრცის გეომეტრიას მატერიის გავლენით, ამასთან მატერიის მოძრაობას, თავის მხრივ, ამ სივრცის გეომეტრია განსაზღვრავს. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, დრო-სივრცის გეომეტრია მონაწილეობს ფიზიკურ პროცესში. ეს განტოლება არის საკმაოდ რთული და არსებითად არაწრფივი განტოლება დრო-სივრცის მეტრიკის მიმართ. 1916 წელს კ. შვარცშილიდის მიერ ნაპოვნი იქნა ამ განტოლების პირველი ბუსტი ამონახსნი. იგი შვარცშილიდის მეტრიკის სახელითაა ცნობილი. ამ ამონახსნის საფუძველზე შესაძლებელი გახდა გრაფიტაციული კოლაფსის საბოლოო სტადიის, აგრეთვე შავი ხვრელის აღწერა. იმავე წელს მოხდა ამ ამონახსნის განზოგადება და ნაპოვნი იქნა განტოლების ელექტრულად დამუხტული ამონახსნი (რეისნერ-ნორდსტიომის ამონახსნი). 1917 წელს ა. აინშტაინმა თავისი განტოლებით სცადა სამყაროს როგორც ერთი მთლიანის აღწერა - მან დაუშვა, რომ სამყარო იყო სტატიკური და განტოლებაში შემოიტანა კოსმოლოგიური მუდმივა (რითაც საფუძველი ჩაიყარა რელატივისტურ კოსმოლოგიას). თუმცა მოგვიანებით ე. ჰაბლის მიერ 1929 წელს აღმოჩენილ იქნა, რომ სამყარო სულაც არ იყო სტაციონარული და იგი ფართოვდებოდა. ეს ფაქტი კი კარგად აღიწერებოდა 1922 წელს ა. ფრიდმანის მიერ ა. აინშტაინის განტოლებიდან მიღებული განტოლების ამონახსნით, რომელიც აღწერდა კოსმოლოგიურ გაფართოებას. ჰაბლის აღმოჩენის შემდეგ ა. აინშტაინმა უარყო კოსმოლოგიური მუდმივა და მოგვიანებით მის შემოტანას თავად უწოდა შეცდომა.

ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ფარგლებში ჯერ კიდევ თვით ა. აინშტაინმა ახსნა გარკვეული მოვლენები. გარდა ამისა, 1919 წელს ა. ედინგტონმა მზის დაბნელებაზე დაკვირვების დროს დაადასტურა ა. აინშტაინის თეორიის პროგნოზი სინათლის სხივის წრფივი გავრცელებიდან გადახრის თაობაზე. ფარდობითობის თეორიის აღიარებისთვის განსაკუთრებულ წლებად ითვლება 1960-1975 წლები, როდესაც ასტროფიზიკურმა დაკვირვებებმა არაერთხელ დაადასტურა ფარდობითობის ზოგადი თეორიიდან გამომდინარე დასკვნების მართებულობა.



1916 წელს ა. აინშტაინმა თავის თეორიაში გრავიტაციული ტალღების არსებობა აჩვენა. ამ ტალღებს ელექტრომაგნიტური ტალღების მსგავსად გადააქვთ გამოსხივების ენერჯია. ამჯერად გრავიტაციული გამოსხივების ენერჯია და ეს ტალღები სინათლის სისწრაფით ვრცელდებიან. ა. აინშტაინის თეორიის მიხედვით გრავიტაცია სივრცის სიმრუდის შედეგია. მასიური სხეული იწვევს სივრცის გამრუდებას მის მახლობლობაში. რაც უფრო დიდია სხეულის მასა სივრცის მოცემულ არეში, მით მეტია სივრცის

სიმრუდე. როდესაც სხეული მოძრაობს სივრცეში, სიმრუდე მოძრაობს მასთან ერთად, ასახავს რა სხეული მდებარეობის ცვლილებას. გარკვეულ შემთხვევებში სხეულის აჩქარებული მოძრაობა სივრცის სიმრუდის ცვლილებას იწვევს და ეს ცვლილება ვრცელდება ტალღის სახით სინათლის სიჩქარით. სწორედ ამ მოვლენას უწოდებენ გრავიტაციულ ტალღას. ზოგადად გრავიტაციული ტალღები შეიძლება გამოასხივოს ჩვენ გარშემო აჩქარებით მოძრაობა (მათ შორის მბრუნავმა) სხეულებმა, მაგრამ, სამწუხაროდ, იმდენად მცირეა მათ მიერ გამოსხივებული ენერჯია, რომ შეუძლებელია ტალღის დამზერა. ამიტომაც არის მეცნიერების დაკვირვების ობიექტები ციური სხეულები (რომელთაც უზარმაზარი მასა გააჩნიათ) და მათი მოძრაობა. ისეთ სხეულებს, როგორც არის შავი ხვრელი, ნეიტრონული ვარსკვლავი, ვარსკვლავი მისი არსებობის ბოლო სტადიაში, ახასიათებთ ძალიან დიდი ცვლადი აჩქარება და უზარმაზარი ენერჯიის გამოსხივება.

საინტერესოა თვალი გავადევნოთ ქრონოლოგიურ ეტაპებს 2015 წლის სექტემბრამდე, სანამ გრავიტაციული ტალღების პირდაპირი დამზერა მოხერხდებოდა. ა. აინშტაინის მიერ 2016 წელს გრავიტაციული ტალღების არსებობის შესახებ გამოთქმული მოსაზრება მან თვითონვე უარყო მაქს ბორნისადმი მიწერილ წერილში. საინტერესოა, რომ უერთნაღმა Physical Review letter 1936 წელს უარი უთხრა ა. აინშტაინს სტატის გამოქვეყნებაზე, რომელშიც იგი უარყოფდა გრავიტაციული ტალღების არსებობას. საქმე ის არის, რომ რეცენზენტმა (როგორც მოგვიანებით გაირკვა - ჰოვარდ რობერტსონმა) შეამჩნია შეცდომა მათემატიკურ გაანგარიშებაში (ეს მან გაუზიარა ახალგაზრდა ინფელდს, აინშტაინის თანაავტორს). ეს სტატია მაინც გამოქვეყნდა სხვა, ნაკლებად ცნობილ უერთნაღმა, თუმცა შემდგომ ა. აინშტაინმა აღიარა თავისი შეცდომა.

1962 წელს ფიზიკოსებმა მ. გერცენშტეინმა და ვ. პუსტოვოიტივმა გამოაქვეყნეს პირველი სტატია, რომელშიც ისინი აღწერდნენ ინტერფერომეტრის გამოყენების მნიშვნელობას გრავიტაციული ტალღების აღმოჩენაში.

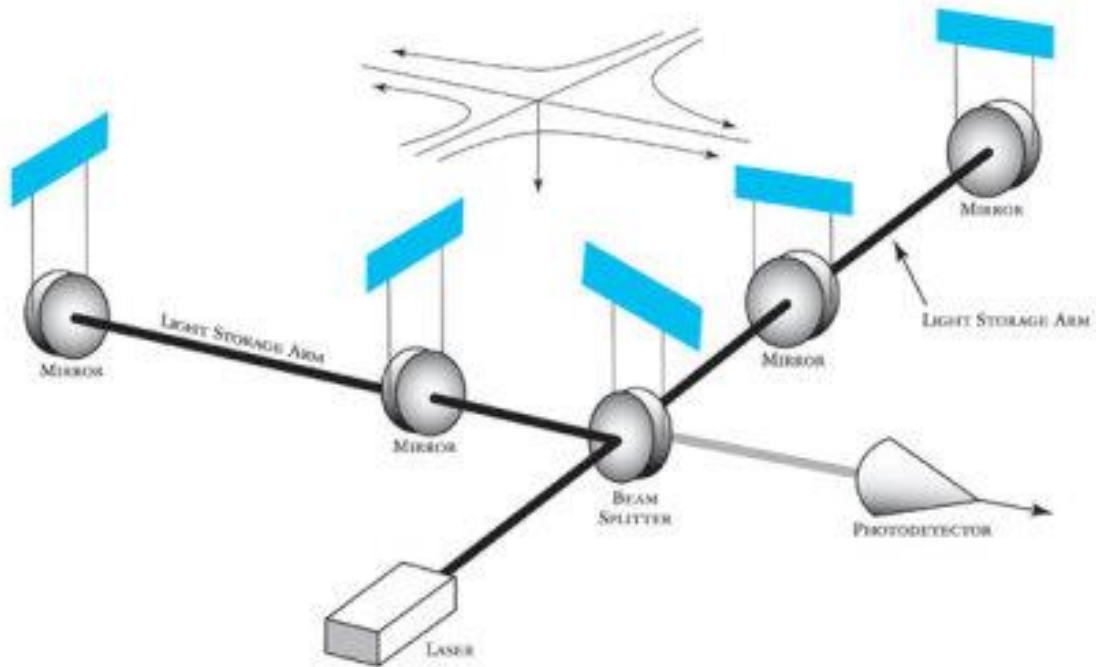
1968 წელს ი. ვებერმა განაცხადა გრავიტაციული ტალღის აღმოჩენის შესახებ, თუმცა მოგვიანებით გაირკვა, რომ შეცდომა იყო: რ. ვაისმა გააანალიზა მისი მეთოდი და დაინყო ფიქრი სხვა პროექტზე, რომელსაც შემდეგ LIGO ეწოდა.

1970-იან წლებში გამოჩნდა პრობები, რომლებშიც ირიბად დასტურდებოდა გრავიტაციული ტალღების არსებობა. კერძოდ, სწრაფი პულსარების წყვილის აჩქარებული მოძრაობა, რომელთა მიერ გამოსხივებული ენერგია გავრცელდა გრავიტაციული ტალღის სახით, დამზერილ იქნა ძალიან ახლო. 1984 წელს ამერიკის ეროვნულმა სამეცნიერო ფონდმა თხოვნით მიმართა მასაჩუსეტის ტექნოლოგიურ ინსტიტუტს (MIT) და კალიფორნიის ტექნოლოგიურ ინსტიტუტს (CALTECH) ძალების გაერთიანების თაობაზე, რათა შეემუშავებინათ ერთობლივი პროექტი გრავიტაციული ტალღების აღმოსაჩენად. შეიქმნა კომიტეტი კ. თორნის, რ. ვაისის და რ. დრევერის შემადგენლობით. ასე გაჩნდა პროექტი LIGO – Laser Interferometry Gravitational Waves Observatory (გრავიტაციული ტალღების ობსერვატორიის ლაზერული ინტერფერომეტრი). 1994 წელს LIGO-ს მეცნიერთა ჯგუფმა წარადგინა პროექტი, ბიუჯეტი და მიიღო ამერიკის ეროვნულმა სამეცნიერო ფონდის - NSF – დაფინანსება 395 მლნ. დოლარის ოდენობით, რაც წარმოადგენდა ისტორიაში NSF-ის მიერ დაფინანსებულ უდიდეს პროექტს. 2002 წელს LIGO იწყებს გრავიტაციული ტალღების ძებნას. 2004 წელს NSF-ის საბჭომ დაამტკიცა გაუმჯობესებული LIGO-ის პროექტი. 2014 წლის 17 მარტს სიმპსონის ასტროფიზიკურმა ცენტრმა განაცხადა, რომ პირდაპირი დაკვირვებით აღმოაჩინა გრავიტაციული ტალღები, რაც მკდარი აღმოჩნდა. 2015 წელს LIGO იწყებს მუშაობას.

2016 წლის 11 თებერვალს LIGO-მ განაცხადა, რომ 2015 წლის სექტემბერში მან პირდაპირი დაკვირვებით აღმოაჩინა გრავიტაციული ტალღები, რომლის წყაროს ერთმანეთის მიმართ და ერთმანეთისკენ სპირალურ ტრაექტორიაზე მბრუნავი და შერწყმული შავი ხვრელის ბინარული სისტემა წარმოადგენდა, რომელიც დედამიწიდან 400 მეგაპარსეკის (1.3 მილიარდი სინათლის წელიწადი) მანძილზე მდებარეობდა. შერწყმის ამ მოვლენას მიენიჭა სახელი - GW150914.

განვიხილოთ, რას წარმოადგენს LIGO-ის ინტერფერომეტრი და როგორ მოახერხა მან გრავიტაციული ტალღის დაფიქსირება. ინტერფერომეტრი წარმოადგენს ხელსაწყოს, რომელშიც სინათლის ორი წყაროს ზედდების შედეგად წარმოიქმნება ინტერფერენციული სურათი, რომლის ანალიზი შესაძლებელია. ეს სურათი შეიცავს ინფორმაციას შესასწავლი ობიექტის შესახებ და უფრო ხშირად ძალიან მცირე მანძილების გაზომვისას გამოიყენება. LIGO-ის ინტერფერომეტრი იძლევა საშუალებას, გაიზომოს პროტონის დიამეტრის 1/10000 რიგის მანძილები. (იხ. ქვემოთ სქემატური სურათი). იგი წარმოადგენს ორ ორთიერთმართობულ არხს (თითოეული 4კმ. სიგრძის, ერთი მეტრის დიამეტრის ვაკუუმურ მილებს), რომლებშიც ლაზერის სხივებს უშვებენ. ლაზერის სხივი არხების გადაკვეთის წერტილში ნაწილობრივ ირეკლება 45°-იანი კუთხით და ნაწილობრივ გადის პირდაპირ ლაზერის სხივის გზაზე ჩამოკიდებულ სარკეებში. თითოეულ არხშიმის ბოლოს ჩამოკიდებულ სარკეებში ეს სხივები ირეკლება და

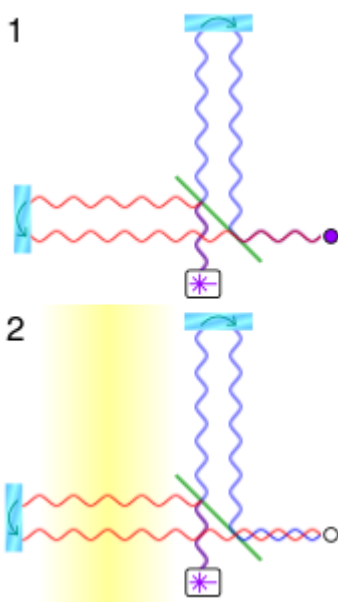
ერთმანეთს კვლავ არხების გადაკვეთის წერტილში ხვდება. თუ არხების სიგრძე უცვლელია, მაშინ ინტერფერენციის შედეგად სხივები ერთმანეთს აქრობენ. საკმარისია,



შეიცვალოს არხების ზომა, რომ გამოჩნდეს ინტერფერენციული სურათი.



LIGO-არხების ფოტოსურათები

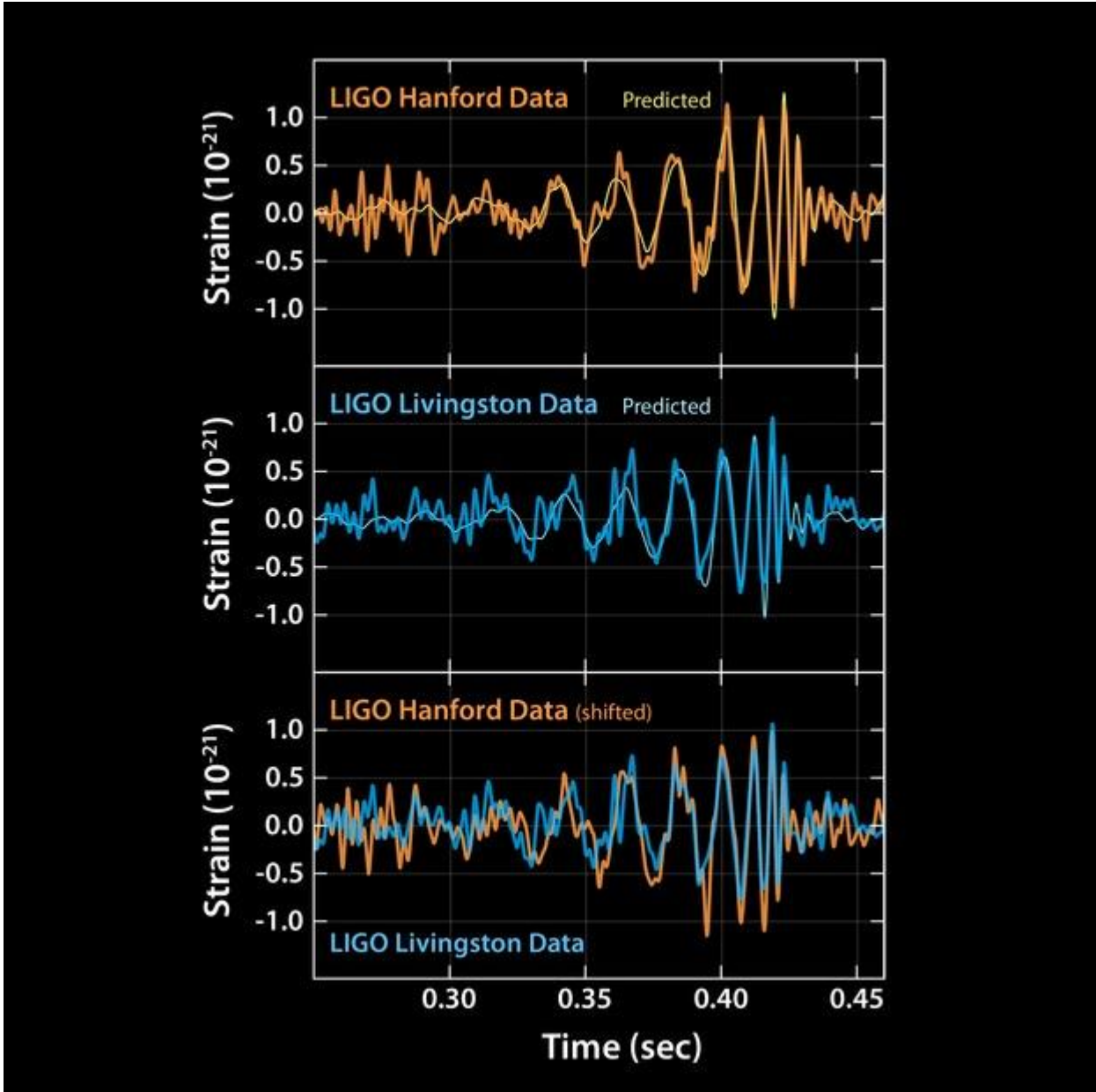


LIGO-ის ინტერფერომეტრის შემთხვევაში ეს ცვლილება არის პროტონის ზომის $1/10000$ ნაწილი, რაც ინტერფერომეტრის ძალიან მაღალ მგრძობიარობას ადასტურებს. ამ ცვლილების გამოწვევა კი სწორედ გრავიტაციულ ტალღებს შეუძლია. LIGO-ის პროექტის მიხედვით ინტერფერომეტრი აგებულ იქნა აშშ-ში ორ ადგილას - ვაშინგტონთან ჰანფორდში და ლივინგსტონში ლუიზიანაში, რომლებიც ერთმანეთისგან დაშორებულნი არიან დაახლოებით 3000 კმ. სურათზე მოცემულია ინტერფერომეტრის ქმედების გამარტივებული სურათი.

2015 წლის 14 სექტემბერს დილის 5სთ და 51 წუთზე ორივე ინტერფერომეტრმა დააფიქსირა ინტერფერენციული სურათის ცვლილება. ლივინგსტონში ეს მოხდა 7 მილიწამით ადრე, ვიდრე ჰანფორდში.

ინტერფერომეტრის ქმედების გამარტივებული სურათი

ინტერფერენციული სურათის ცვლილების ანალიზმა აჩვენა, რომ ორივე მიღებული ტალღა პრაქტიკულად იდენტური იყო, რაც მოწმობს ექსპერიმენტის საიმედოობას. გარდა ამისა, ტალღის სურათი დიდი სიზუსტით ემთხვევა ა. აინშტაინის მიერ ნაწინასწარმეტყველები გრავიტაციული ტალღის სურათს. მეცნიერების მიერ ჩატარებულმა ანალიზმა აჩვენა, რომ ეს ტალღა წარმოიქმნა ორი ერთმანეთის მიმართ სპირალურად და ერთმანეთისკენ დიდი აჩქარებით მოძრავი შავი ხვრელის შერწყმის შედეგად. თითოეული ხვრელის მასა დაახლოებით 30-ჯერ მეტი იყო მზის მასაზე, ხოლო მათი შერწყმით წარმოქმნილი შავი ხვრელის მასა დაახლოებით 60 მზის მასის ტოლია. ეს შერწყმა კი, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, მოხდა დედამიწიდან 1.3 მილიონი სინათლის წელიწადის მანძილზე წამის ძალიან მცირე მონაკვეთის განმავლობაში. შეფასების თანახმად გამოსხივებული სიმძლავრის მაქსიმუმი დაახლოებით 50-ჯერ მეტია, ვიდრე დამზერადი ვარსკვლავების სიმძლავრე ერთად აღებული. ეს ენერგია გამოსხივდა, როგორც აფეთქება შავი ხვრელების შერწყმის ბოლო სტადიაზე. მკითხველს ვთავაზობთ ბმულს https://www.youtube.com/watch?v=s06_jRK939I, რომელშიც პროფესორი ბ. გრინი კომპიუტერული სიმულაციის მეშვეობით გასაგებად ხსნის გრავიტაციული ტალღის წარმოქმნის პროცესს და მის გავლენას დედამიწაზე. ქვემოთ მოცემულია გრავიტაციული ტალღის გრაფიკები, მიღებული ორივე სამეცნიერო ცენტრში ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად. ეს გრაფიკები ნათლად ადასტურებს გრავიტაციული ტალღების აღმოჩენას. გრაფიკებზე ისიც ჩანს, თუ რამდენად ზუსტად ემთხვევა ეს გრაფიკები ა. აინშტაინის მიერ ნაწინასწარმეტყველებ თეორიულ გრაფიკს.



ზედა ორ გრაფიკზე შესაბამისად ნაჩვენებია ჰენფორდსა და ლივინგსტონში დარეგისტრირებული გრაფიტაციული ტალღები. ამავე გრაფიკებზე ყვითელი წვრილი მრუდით მოტანილია ა. აინშტაინის მიერ ნაწინაწარმეტყველები გრაფიკი. ნათლად ჩანს, რამდენად ზუსტია დამთხვევა. ქვედა მესამე გრაფიკზე დატანილია ორივე ცენტრში დარეგისტრირებული ტალღები. გრაფიკების დამთხვევა ნათელია. გრაფიკებზე ვერტიკალურ ღერძზე გადაზომილია ქანების დაძაბულობა, რომელიც არის 10^{-21} რიგის, ჰორიზონტალურზე გადაზომილია დრო. გრაფიკებიდან ჩანს, რომ შერწყმა და შესაბამისად გრაფიტაციული ენერჯის გამოსხივება დაახლოებით 0.05წმ-ის განმავლობაში

გრძელდებოდა. ამრიგად ეს გრაფიკები ადასტურებენ გრავიტაციული ტალღების აღმოჩენას.

დასასრულ მოვიტანთ ამ პროექტის ერთ-ერთი დამფუძნებლის, კ. თორნის სიტყვებს: „ამ აღმოჩენით ჩვენ ადამიანები ვინცებთ ახალ ძიებას: ძიებას, რათა გამოვიკვლიოთ სამყაროს გამრუდებული მხარე, გამრუდებული დრო-სივრცის მიერ შექმნილი საგნები და მოვლენები. ჩვენ მიერ დამზერილი შერწყმული შავი ხვრელები და გრავიტაციული ტალღები ამის შესანიშნავი მაგალითია“. აქვე მოვიტანთ მეორე დამფუძნებლის რ. ვაისის სიტყვებს: „ამ დაკვირვების აღწერა შესანიშნავადაა მოცემული ა. აინშტაინის ფარდობითობის ზოგად თეორიაში, რომელიც 100 წლის წინ შეიქმნა. ამ დაკვირვების აღწერა თავის თავში მოიცავს თეორიის პირველ გამოცდას ძლიერ გრავიტაციაში. კარგი იქნებოდა შეგვძლებოდა და ა. აინშტაინისთვის ამ აღმოჩენის შესახებ გვეხარებინა“. აქვე დავძენთ, რომ ა. აინშტაინს არ სჯეროდა ამ ტალღების დეტექტირების შესაძლებლობის მისი სისუსტის გამო. ეს მისი შეცდომა იყო.

წერილში გამოყენებულია შემდეგი მასალები:

<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20160211>

<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20160211a>

<https://www.ligo.caltech.edu/page/ligos-ifo>

<http://www.ligo.org/science/GW-IFO.php>

<http://space.mit.edu/LIGO/>

<http://space.mit.edu/LIGO/more.html>

<https://en.wikipedia.org/wiki/LIGO>

https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave

