

## ნესტან მიქაძე - გრავიტაციული ტალღები - სამყაროს კვლევის ახალი მეთოდი

გრავიტაცია ფიზიკის ერთ-ერთი საბაზისო ცნებაა. ის განსაზღვრავს სხეულების ვარდნას, პლანეტების მოძრაობას და, საზოგადოდ, სამყაროს სტრუქტურას. სკოლაში გრავიტაციას ვასწავლით როგორც მიზიდულობის ძალას, რომელიც სხეულებს შორის მოქმედებს. თანამედროვე ფიზიკამ აჩვენა, რომ გრავიტაციას შეიძლება ჰქონდეს ისეთი გამოვლინება, რომლის შემჩნევაც უშუალო დაკვირვებით შეუძლებელია. ამ მოვლენას **გრავიტაციულ ტალღას** უწოდებენ. მისი არსებობის ექსპერიმენტული დადასტურება მეცნიერებისთვის მნიშვნელოვანი აღმოჩენაა. შესაძლებელი გახდა სამყაროზე ისეთი ინფორმაციის მიღება, რომელიც ადრე მხოლოდ არაპირდაპირი ნიშნებით იყო სავარაუდო.

იმის გასაგებად, რას ნიშნავს გრავიტაციული ტალღა, საჭიროა, გრავიტაციას სხვა კუთხით შევხედოთ, ვიდრე ამას კლასიკურ მექანიკაში ვაკეთებთ. თანამედროვე ფიზიკაში გრავიტაცია აღარ განიხილება მხოლოდ ძალად, რომელიც სხეულებს შორის მოქმედებს - ის დაკავშირებულია **სივრცისა და დროის ერთიან სტრუქტურასთან**, რომელსაც **სივრცე-დრო** ეწოდება. სწორედ ამ მიდგომამ გახადა შესაძლებელი **გრავიტაციული ტალღების** იდეის ჩამოყალიბება და მისი ფიზიკური მნიშვნელობის ახსნა.

ჩვენ სამყაროს სხვადასხვა გრძნობით აღვიქვამთ: **მხედველობით, შეხებით, გემოვნებით, სმენითა და ყნოსვით**. მსგავსად ამისა, ასტრონომებიც ინფორმაციის სხვადასხვა წყაროს გამოყენებით იკვლევენ სამყაროს. ესენია **სინათლე, ნაწილაკები და სივრცე-დროის რხევები**, რომლებსაც **გრავიტაციულ ტალღებს** უწოდებენ. ამ წყაროებიდან მიღებული მონაცემების გაერთიანებით კოსმოსური ობიექტებისა და მოვლენების შესახებ გაცილებით მეტის გაგებაა შესაძლებელი, ვიდრე მხოლოდ ერთ მათგანზე დაკვირვებით. მეცნიერები ამ მიდგომას **multi-messenger astronomy-ს** უწოდებენ (მრავალმაცნე ასტრონომია - გულისხმობს გრავიტაციულ ტალღებზე, ნეიტრინოებსა და ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებაზე ერთდროულ დაკვირვებას).

<https://rb.gy/q8ujqd>

**სინათლე** ფიზიკაში აღწერილია როგორც ნაწილაკური და ტალღური პროცესების ერთდროული გამოვლენა. ელექტრომაგნიტური სპექტრი მოიცავს ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სხვადასხვა სიხშირისა და სიგრძის ტალღებს.

ელექტრომაგნიტურ სპექტრში **რადიოტალღებს** აქვთ ყველაზე დაბალი ენერგია, უმცირესი სიხშირე და ტალღის უდიდესი სიგრძე. სამყარო სავსეა რადიოგამოსხივების მქონე ობიექტებით, ისეთებით, როგორებიცაა **პულსარები** (მაგნეტიზებული მბრუნავი ნეიტრონული ვარსკვლავები ან თეთრი ჯუჯა ვარსკვლავების ნარჩენები), **ნისლეულები** (ვარსკვლავთაშორისი ღრუბლები, რომლებიც მტვრის, აირისა და პლაზმისგან შედგება) და ზოგიერთი **გალაქტიკა**.

ასტრონომები მიკროტალღებით შეისწავლიან გალაქტიკების სტრუქტურას. შესაბამისი დიაპაზონის გამოსხივება გამოიყენება კოსმოსური მიკროტალღური ფონის რუკის შესაქმნელად.

**ინფრაწითელ გამოსხივებას** მეცნიერები იყენებენ ვარსკვლავებს შორის კოსმოსური მტვრის რუკის შესაქმნელად და ახალდაბადებულ ვარსკვლავებზე დასაკვირვებლად. ინფრაწითელი სხივებით შესაძლებელია სამყაროს უძველესი ვარსკვლავების შესწავლა.

**ხილული სინათლით** ხდება ყველა სახის კოსმოსურ ობიექტებზე დაკვირვება. ხილულ სინათლეს იყენებენ ეგზოპლანეტების, ანუ ჩვენი მზის სისტემის მიღმა არსებული სამყაროების აღმოსაჩენად.

**ულტრაიისფერი გამოსხივება** კოსმოსში საშუალებას გვაძლევს, დავაკვირდეთ დიდი ენერჯისა და მაღალი ტემპერატურის პროცესებს, რომლებიც შეუიარაღებელი თვალით არ ჩანს. მაგ., ახალგაზრდა ვარსკვლავებს, გალაქტიკის ცენტრებსა და ვარსკვლავურ აფეთქებებს.

**რენტგენის სხივებით** ასტრონომები სწავლობენ ნეიტრონულ ვარსკვლავებს, შავი ხვრელების გარემოს, სუპერნოვებს (ზეახალ ვარსკვლავებს) და აქტიურ გალაქტიკებს. რენტგენის სხივები საშუალებას გვაძლევს, დავაკვირდეთ კოსმოსის ყველაზე ენერჯიულ და დინამიკურ მოვლენებს.

**გამა სხივები** გამოიყენება მასიური ვარსკვლავური აფეთქებების, ნეიტრონული ვარსკვლავებისა და შავი ხვრელების შეჯახების შესასწავლად. გამა სხივებით გამოვლენილია მრავალი მნიშვნელოვანი მოვლენა.

მრავალი კოსმოსური ობიექტი და ამ ობიექტებზე მიმდინარე პროცესები გამოტყორცნის მაღალსიჩქარიან **ნაწილაკებს**. ეს ნაწილაკები მეცნიერებს საშუალებას აძლევს, დააკვირდნენ ისეთ ადგილებს, რომლებიც სინათლით არ ჩანს. ზოგიერთ ნაწილაკს შეუძლია, შექმნას უკიდურესად მკვრივი გარემო, საიდანაც სინათლემ ვერ ახერხებს გამოსვლას.

კოსმოსური ნაწილაკები ორ კლასად იყოფა - ნეიტრინოებად და კოსმოსურ სხივებად.

**ნეიტრინოები** ფუნდამენტური ნაწილაკებია - უფრო მცირე ნაწილებად მათი დაშლა შეუძლებელია. ეს ნაწილაკები წარმოიქმნება რადიოაქტიური დაშლისა და ბირთვული რეაქციების შედეგად, მათ შორის - ისეთი რეაქციებისა, რომლებიც ხდება ბირთვულ რეაქტორებში, ვარსკვლავების ბირთვებში, სუპერნოვას აფეთქების დროს და მაშინ, როდესაც შავი ხვრელები ვარსკვლავებს ამსხვრევს. ნეიტრინოები რიცხვობრივად სამყაროში არსებულ ყველა ატომს აღემატება, მოძრაობს თითქმის

სინათლის სიჩქარით და იშვიათად ურთიერთქმედებს სხვა მატერიასთან. ეს მახასიათებლები ნეიტრინოებს საინტერესოს, მაგრამ რთულად შესასწავლს ხდის.

**კოსმოსური სხივები** მაღალი ენერგიის დამუხტული ნაწილაკებია, რომლებიც სინათლის სიჩქარით მოძრაობს. ეს ნაწილაკები უმთავრესად წყალბადის ბირთვები ან პროტონებია, თუმცა მათ გვერდით აღმოაჩინეს ელექტრონები, ნეიტრონები და უფრო მძიმე ატომების ბირთვებიც. კოსმოსური სხივები ვრცელდება აფეთქებული ვარსკვლავებისა და სხვა ასტროფიზიკური პროცესების გარემოში, გამოყოფს დიდ ენერგიას და მათი გზა გადაიხრება ვარსკვლავებისა და სხვა ობიექტების მაგნიტური ველების გავლენით.

**გრავიტაციული ტალღები** ფუნდამენტურად განსხვავდება ელექტრომაგნიტური გამოსხივებისგან, ისევე როგორც სმენა - მხედველობისგან. სამყაროზე სინათლით მიღებული ინფორმაცია მნიშვნელოვანია, მაგრამ არასრული, გრავიტაციული ტალღები კი წარმოადგენს სხვა „გრძნობის ორგანოს“, რომელიც საშუალებას გვაძლევს, კოსმოსში მიმდინარე ისეთი პროცესები შევისწავლოთ, რომელთა შესახებ სინათლე ვერ გვაწვდის ინფორმაციას. გრავიტაციული ტალღა სამყაროზე დაკვირვების „ახალი ფანჯარა“.

გრავიტაციული ტალღები სივრცე-დროში, სამყაროს ქსოვილში არსებული ტალღებია, რომლებიც სინათლის სიჩქარით მოძრაობს; წარმოიქმნება მაშინ, როდესაც ობიექტი მოძრაობას აჩქარებს, ანელებს ან მიმართულებას იცვლის. სინათლის მსგავსად, მათ აქვთ ტალღის სხვადასხვა სიგრძე და სიხშირე. ნებისმიერი აჩქარებული მასა წარმოქმნის გრავიტაციულ ტალღებს. ამჟამად მეცნიერებს შეუძლიათ მხოლოდ ზემოკვრივი ვარსკვლავური ნარჩენების - შავი ხვრელებისა და ნეიტრონული ვარსკვლავების - მიერ წარმოქმნილი ტალღების აღმოჩენა. სივრცეში ეს ტალღები ყველა მიმართულებით სინათლის სიჩქარით მოძრაობს, მანძილის მატებასთან ერთად ძლიერად იფანტება და გაივლის ყველაფერში, რაც გზაზე ხვდება.

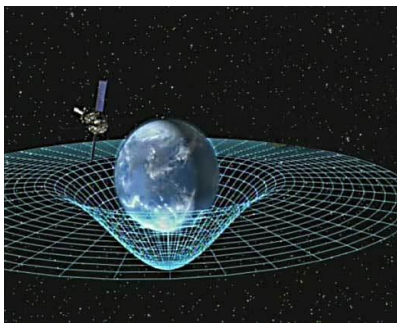
ყველაზე ძლიერ გრავიტაციულ ტალღებს წარმოქმნის კატაკლიზმური პროცესები. გრავიტაციული ტალღის გამომწვევი მოვლენების რამდენიმე მაგალითია:

- ვარსკვლავის ასიმეტრიული აფეთქება (**სუპერნოვა**);
- ორი დიდი ვარსკვლავის ერთმანეთის გარშემო ბრუნვა;
- ორი შავი ხვრელის ტრიალი და შერწყმა.

გრავიტაციული ტალღების წარმოქმნილი მოვლენები ძალიან შორს ხდება და როცა სიგნალი დედამიწამდე აღწევს, ის უკვე უკიდურესად შესუსტებულია, რაც ტალღების აღმოჩენას მნიშვნელოვნად ართულებს.

**შეგვიძლია, მოვიყვანოთ ასეთი შედარება:** წარმოიდგინეთ სამყარო უზარმაზარ რეზინის სიბრტყედ; მასის მქონე მატერია სივრცე-დროს ამრუდებს, როგორც მძიმე ბურთი - რეზინის ზედაპირს. რაც უფრო დიდია მასა, მით უფრო მეტია გამრუდება, რის შედეგადაც სინათლე და პლანეტები გადაადგილდებიან მრუდე ტრაექტორიაზე. მზე ძალზე მასიურია და თავის გარშემო ქმნის მრუდე სივრცე-დროს, რაც წარმოშობს მიზიდულობის ეფექტს, ანუ გრავიტაციას; სწორედ ამიტომ მოძრაობენ დედამიწა და სხვა პლანეტები მზის გარშემო.

აჩქარებით მოძრავი დიდი მასის მქონე სხეულები, მაგ., ორი შავი ხვრელი, წარმოქმნის გრავიტაციულ ტალღებს, რომლებიც სივრცე-დროს ტალღურად ამრუდებს. მსგავსი ეფექტი აქვს ყველა მოძრავ სხეულს, მათ შორის ადამიანსაც, თუმცა ძალიან სუსტი, ამიტომ მისი აღქმა და შესწავლა შეუძლებელია.



*ორგანზომილებიანი ილუსტრაცია იმისა, თუ როგორ ამახინჯებს სამყაროში მასა სივრცე-დროს (ავტორი: NASA)*

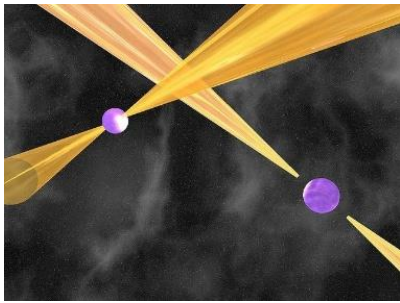
ალბერტ აინშტაინმა გრავიტაციული ტალღების არსებობა 1916 წელს, ფარდობითობის ზოგად თეორიაში იწინასწარმეტყველა. მისი გამოთვლების მიხედვით, აჩქარებით მოძრავი მასიური ობიექტები სივრცე-დროს ტალღურად ამრუდებს, რის შედეგადაც გრავიტაციული ტალღები სინათლის სიჩქარით ყველა მიმართულებით ვრცელდება და ატარებს ინფორმაციას მათი წარმოშობის ბუნების შესახებ.

ქვემოთ მოცემული ანიმაცია ასახავს, თუ როგორ ავრცელებს გრავიტაციულ ტალღებს ორი ნეიტრონული ვარსკვლავი ერთმანეთის გარშემო ბრუნვისა და შერწყმის პროცესში. გრავიტაციული ტალღები უხილავია, მაგრამ გავრცელების საილუსტრაციოდ ანიმაციაში ხილულად არის წარმოდგენილი.

<https://rebrand.ly/zsuavyc>

გრავიტაციული ტალღების არსებობის პირველი მტკიცებულება გაჩნდა 1974 წელს. ასტრონომებმა რასელ ჰალსმა და ჯოზეფ ტეილორმა პუერტო-რიკოში მდებარე არესიბოს რადიოობსერვატორიიდან აღმოაჩინეს დედამიწიდან 21 000 სინათლის წლის მანძილზე მდებარე ბინარული პულსარი (ნეიტრონული ვარსკვლავი,

რომელიც ელექტრომაგნიტურ რადიაციას ასხივებს). ორბიტალური პერიოდის ცვლილებების შესასწავლად მეცნიერთა ჯგუფი რამდენიმე წლის განმავლობაში აკვირდებოდა ვარსკვლავების რადიოგამოსხივებას. ოთხწლიანი დაკვირვების შედეგად დადასტურდა, რომ ვარსკვლავები ერთმანეთს ისე უახლოვდებოდნენ, როგორც პროგნოზირებდა ზოგადი ფარდობითობის თეორია - ისინი გრავიტაციული ტალღებს ასხივებდნენ. ექსპერიმენტით გაზომილი სიჩქარე თეორიულთან მხოლოდ ნახევარპროცენტთან სხვაობას იძლეოდა. 1993 წელს ჰალსმა და ტელიორმა ფიზიკის დარგში ნობელის პრემია მიიღეს **პულსარის ახალი ტიპის აღმოჩენისთვის, რამაც მეცნიერებს გრავიტაციის შესასწავლად ახალი შესაძლებლობები გადაუშალა.**



*ბინარული პულსარის მხატვრისეული წარმოდგენა (ავტორები: მაიკლ კრამერი, ჯოდრელ ბანკი, მანჩესტერის უნივერსიტეტი)*

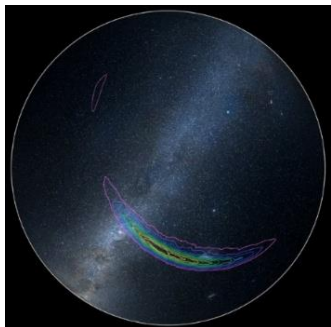
ამ უდიდესი აღმოჩენის შემდეგ ასტრონომები სწავლობდნენ პულსარების რადიოგამოსხივებას და ადასტურებდნენ გრავიტაციული ტალღების არსებობას, თუმცა დადასტურება ყოველთვის ირიბი იყო. ყველაფერი შეიცვალა 2015 წლის 14 სექტემბერს, როცა **LIGO-მ - ლაზერული ინტერფერომეტრის გრავიტაციული ტალღების ობსერვატორიამ** - პირველმა აღმოაჩინა, დაახლოებით 1,3 მილიარდი წლის წინ ორი შავი ხვრელის შეჯახების შედეგად წარმოქმნილი სივრცე-დროის ტალღები. ეს აღმოჩენა ისტორიაში ერთ-ერთ უდიდეს სამეცნიერო მიღწევად ჩაიწერა.

LIGO არის გრავიტაციული ტალღების დეტექტორი, რომელიც სივრცე-დროის უმცირეს რხევებს აფიქსირებს და იძლევა შავი ხვრელებისა და ნეიტრონული ვარსკვლავების შეჯახების შესწავლის შესაძლებლობას. გრავიტაციული ტალღები, ვინაიდან მატერიასთან სუსტად ურთიერთქმედებს, სამყაროში თითქმის დაუმახინჯებლად ვრცელდება და სანდო ინფორმაციას იძლევა წარმომშობი წყაროს შესახებ. ამ სიგნალების აღმოჩენა მეცნიერებს სამყაროს შესწავლის სრულიად ახალ შესაძლებლობებს უშლის.

ეს კომპიუტერული სიმულაცია აჩვენებს ორი შავი ხვრელის შეჯახებას, რომელიც LIGO-მ 2015 წლის 14 სექტემბერს დააფიქსირა. ანიმაციაში შავი ხვრელების გამოსახულება ეფუძნება შეჯახების შედეგად მიღებულ რეალურ მონაცემებს:

<https://rb.gy/0d81qi>

მიუხედავად მათი წარმოქმნის უზარმაზარი ენერჯისა, გრავიტაციული ტალღების მიერ დედამიწაზე გამოწვეული რხევა უკიდურესად მცირეა. LIGO-ს მიერ პირველად დაფიქსირებული ეფექტი ატომის ბირთვის ზომაზე 10 000-ჯერ ნაკლები იყო.



*სამხრეთი ნახევარსფეროს ცის რუკაზე აღმოჩენილი პირველი გრავიტაციული ტალღების, GW150914-ის, მიახლოებითი მდებარეობა. LIGO*

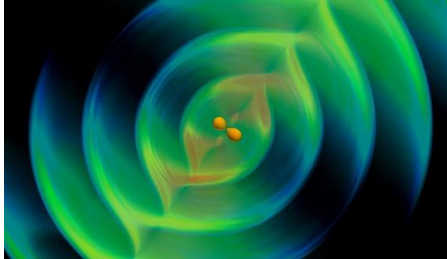
მეცნიერ-მკვლევრებმა კიპ თორნმა, ბარი ბარიშმა და რაინერ ვაისმა გრავიტაციული ტალღების აღმოსაჩენად ჩატარებული კვლევებით და ტექნოლოგიების განვითარებაში შეტანილი წვლილით გადამწყვეტი როლი შეასრულეს LIGO-ს პროექტის რეალობად ქცევაში. 2017 წელს მათ მიენიჭათ ნობელის პრემია ფიზიკის დარგში **LIGO დეტექტორსა და გრავიტაციულ ტალღებზე დაკვირვებაში შეტანილი გადამწყვეტი წვლილისთვის.**

კოსმოსის უკიდურეს სივრცეში გრავიტაცია ძალიან სუსტად მოქმედებს. მათი წყარო საკმარისად მასიური უნდა იყოს, რათა შექმნას შესამჩნევი გამრუდება, რომლის აღმოჩენასაც ადამიანი შეძლებს. აფეთქებულ სუპერნოვას შეუძლია გრავიტაციული ტალღების წარმოქმნა, ისევე როგორც კოლაფსირებული ვარსკვლავებისგან (შავი ხვრელებისგან) შემდგარი ორმაგი სისტემის შერწყმას. მილიარდობით წლის წინ სამყაროს შექმნისას აღძრული გრავიტაციული გამოსხივების ნარჩენებს დღემდე აფიქსირებენ.

ეს ექსტრემალური მოვლენები ჩვენგან ძალიან შორს ხდება. ვიდრე ისინი მილიონობით ან მილიარდობით წლის შემდეგ დედამიწამდე მოაღწევენ, ტალღების ეფექტი მნიშვნელოვნად სუსტდება. სივრცე-დროის მცირე ცვლილებების აღმოჩენა პროტონის სიგანის მხოლოდ მცირე ნაწილს შეადგენს და ამის გაკეთების საუკეთესო გზა **ლაზერული ინტერფერომეტრიაა**. ეს მეთოდი იყენებს სინათლის ორი ლაზერული სხივის ინტერფერენციას უსასრულოდ მცირე ცვლილებების პირდაპირ გასაზომად. ამ ტალღებს მაღალი სიზუსტით აფიქსირებს **ლაზერული ინტერფერომეტრის გრავიტაციული ტალღების ობსერვატორია**.

წყაროს ზუსტი ადგილმდებარეობის დადგენა ასტრონომიაში ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი საკითხია. თუ გრავიტაციულ ტალღებს თან ახლავს სინათლის გამოსხივებაც, მეცნიერებს ამ მონაცემების გამოყენება წყაროს იდენტიფიცირებისთვის შეუძლიათ. LIGO-ს მიერ დაფიქსირებული ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი მოვლენა სწორედ ნეიტრონული ვარსკვლავების (ნეიტრონებით მჭიდროდ შეფუთული ვარსკვლავური ბირთვების) შეჯახება იყო, რომელსაც თან

სდევდა გამა-სხივების აფეთქება და კილონოვას სახელით ცნობილი ოპტიკური ნათება. ეს ფაქტი იქცა პირველ პრაქტიკულ მაგალითად, როდესაც მეცნიერებმა ერთი და იგივე კოსმოსური მოვლენა ერთდროულად შეისწავლეს გრავიტაციული ტალღებისა და სინათლის მეშვეობით. სინათლის უეცარმა აფეთქებამ კოსმოსურ ტელესკოპ „ჰაბლს“ საშუალება მისცა, თავისი ინსტრუმენტების გამოყენებით ეპოვა და დაეფიქსირებინა კილონოვას ზუსტი ადგილმდებარეობა.



ხილულ და ინფრაწითელ დიაპაზონში დაკვირვების შესაძლებლობის წყალობით „ჰაბლმა“ აფეთქება სპექტრული ანალიზის მეშვეობით შეისწავლა. მიღებულმა მონაცემებმა გამოავლინა კილონოვას შემდგომი გაფართოების დინამიკა და ქიმიური შემადგენლობა, რამაც მეცნიერულად დაადასტურა, რომ ეს მოვლენა სწორედ დაფიქსირებული გრავიტაციული ტალღების წყარო იყო. ამ პროცესში სხვა ობსერვატორიებიც ჩაერთნენ, რათა ცის იმავე მონაკვეთიდან კილონოვას შესახებ მაქსიმალური ინფორმაცია მიეღოთ.

### გრავიტაციული ტალღების წყაროები და ტიპები

ყველა ფიზიკური ობიექტი, რომელიც აჩქარებულად მოძრაობს, გრავიტაციულ ტალღებს წარმოქმნის. ესენი არიან ადამიანები, მანქანები, თვითმფრინავები და ა.შ. თუმცა დედამიწაზე არსებული ობიექტების მასები და აჩქარებები მეტისმეტად მცირეა იმისთვის, რომ მათ მიერ წარმოქმნილი გრავიტაციული ტალღები მეცნიერთა ხელთ არსებულმა ინსტრუმენტებმა დააფიქსიროს.

მეცნიერები საკმარისად დიდ გრავიტაციულ ტალღებს მზის სისტემის გარეთ აკვირდებიან. სამყარო სავსეა ექსტრემალურად მასიური ობიექტებით, რომელთა სწრაფი აჩქარებაც გრავიტაციულ ტალღებს წარმოქმნის. ასეთ ობიექტებს შორის აღსანიშნავია ერთმანეთის გარშემო მოძრავი შავი ხვრელებისა თუ ნეიტრონული ვარსკვლავების წყვილები და შავი ხვრელისა და ნეიტრონული ვარსკვლავის ბინარული სისტემები. გრავიტაციული ტალღების წყაროს წარმოადგენენ გიგანტური ვარსკვლავებიც, რომლებიც სიცოცხლის ბოლოს ზეახალ ვარსკვლავებად ფეთქდებიან.

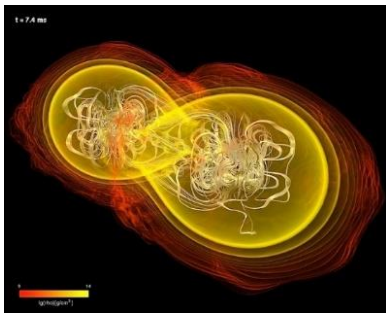
ასტრონომებმა განსაზღვრეს გრავიტაციული ტალღების ოთხი კატეგორია, იმის მიხედვით, თუ რომელი ობიექტი ან სისტემა წარმოქმნის მათ:

- კომპაქტური ბინარული სპირალური გრავიტაციული ტალღები;
- უწყვეტი გრავიტაციული ტალღები;

- სტოქსტური გრავიტაციული ტალღები;
- იმპულსური (Burst) გრავიტაციული ტალღები.

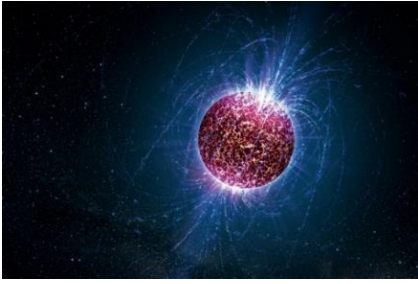
თითოეული კატეგორია წარმოქმნის გრავიტაციული ტალღების დამახასიათებელ სიგნალებს, რომელთა მოძიებაც მკვლევარებს შეუძლიათ LIGO-ს მონაცემებში.

გრავიტაციული ტალღების პირველი, ყველაზე კარგად დაკვირვებადი კლასია კომპაქტური ბინარული სპირალური სისტემების მიერ წარმოქმნილი ტალღები. LIGO-ს მიერ აღმოჩენილი ყველა გრავიტაციული ტალღა სწორედ ამ კატეგორიას მიეკუთვნება. ასეთი ტალღები წარმოიქმნება ორი ძალიან მასიური და მკვრივი ობიექტის - შავი ხვრელების და/ან ნეიტრონული ვარსკვლავების - ერთმანეთის გარშემო ბრუნვისას. ამ სისტემებში განასხვავებენ სამ ქვეკლასს: ორი ნეიტრონული ვარსკვლავის ბინარულ სისტემებს, ორი შავი ხვრელის ბინარულ სისტემებს და ნეიტრონული ვარსკვლავისა და შავი ხვრელის ბინარულ სისტემებს.



*ბინარული ნეიტრონული ვარსკვლავის სპირალის სიმულაცია (ავტორი: ალბერტ აინშტაინის ინსტიტუტი (AEI))*

ბინარული კომპაქტური ობიექტები დიდხანს ბრუნავენ ერთმანეთის გარშემო და გრავიტაციული ტალღების გამოსხივების გამო თანდათან კარგავენ ენერგიას. შესაბამისად, მათი ორბიტა ნელ-ნელა მცირდება, ბრუნვა ჩქარდება და გამოსხივებული ტალღების სიხშირე და ამპლიტუდა იზრდება. ეს პროცესი ცნობილია როგორც სპირალური (ინსპირალური) მოძრაობა და საბოლოოდ ორი ობიექტის შერწყმით სრულდება. სხვადასხვა ბინარული სისტემის მიერ წარმოქმნილი გრავიტაციული ტალღები ერთმანეთისგან განსხვავდება სიგნალის ხანგრძლივობითა და ფორმით, რაც, უპირველეს ყოვლისა, ჩართული ობიექტების მასებზეა დამოკიდებული. შავი ხვრელების შერწყმის სიგნალები გაცილებით მოკლეა, ვიდრე ნეიტრონული ვარსკვლავების შემთხვევაში.

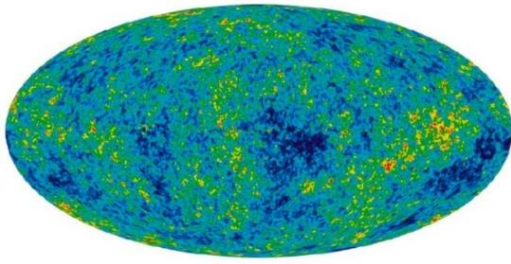


*ზემკვრივი და კომპაქტური ნეიტრონული ვარსკვლავის მხატვრისული გამოსახულება (ავტორი: კეისი რიდი, პენსილვანიის სახელმწიფო უნივერსიტეტი)*

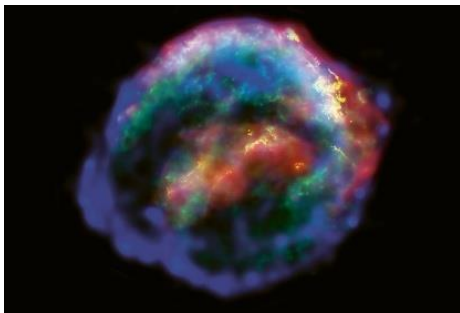
**უწყვეტი გრავიტაციული ტალღები** წარმოიქმნება ერთი მბრუნავი მასიური ობიექტისგან, მაგალითად, ნეიტრონული ვარსკვლავისგან. როდესაც ასეთი ობიექტის მასის განაწილება სრულიად სფერული არ არის. მისი ბრუნვა იწვევს გრავიტაციული ტალღების მუდმივ გამოსხივებას. თუ ბრუნვის სიჩქარე დროთა განმავლობაში მნიშვნელოვნად არ იცვლება, გამოსხივებული გრავიტაციული ტალღებიც პრაქტიკულად უცვლელი სიხშირისა და ამპლიტუდისაა. სწორედ ამ სტაბილური ხასიათის გამო უწოდებენ მათ უწყვეტ გრავიტაციულ ტალღებს.



**სტოქასტური გრავიტაციული ტალღები** წარმოადგენს მრავალი სუსტი გრავიტაციული ტალღის ერთობლიობას, რომლებიც სამყაროს სხვადასხვა წყაროდან ერთდროულად ვრცელდება და ერთმანეთში ირევა. მათი საერთო ეფექტი ქმნის ფონურ სიგნალს. ეს სიგნალი შემთხვევითი ხასიათისაა და მისი ზუსტი პროგნოზირება შეუძლებელია, თუმცა ხერხდება მისი სტატისტიკური ანალიზი. სტოქასტური გრავიტაციული ტალღების ფონური სიგნალი ერთ-ერთ ყველაზე სუსტ და ძნელად აღმოსაჩენ გრავიტაციულ ეფექტს წარმოადგენს. ვარაუდობენ, რომ მისი ნაწილი შესაძლოა ადრეული სამყაროდან, მათ შორის დიდი აფეთქების ეპოქიდან მოდიოდეს. ასეთი სიგნალის აღმოჩენა და დაფიქსირება საშუალებას მისცემს ფიზიკას, სამყაროს ევოლუცია იმ პერიოდამდე შეისწავლოს, რომელიც დღეისთვის ამოუცნობია.



**იმპულსური (Burst) გრავიტაციული ტალღები** შედეგია ხანმოკლე და მოულოდნელი ასტროფიზიკური მოვლენებისა, რომელთა ზუსტი ბუნება წინასწარ ცნობილი არ არის. ამ ტიპის სიგნალების ძიება მეცნიერებისგან სრულიად თავისუფალ მიდგომას მოითხოვს, რადგან მათი პროგნოზირება არსებული თეორიული მოდელებით ხშირად შეუძლებელია, აღმოჩენა კი განსაკუთრებით რთულია და მონაცემთა ანალიზის სპეციფიკურ მეთოდებს საჭიროებს. მსგავსი სიგნალები ჯერჯერობით არ დაფიქსირებულა, თუმცა ვარაუდობენ, რომ მათი აღნუსხვა მეცნიერებს აქამდე უცნობ ასტროფიზიკურ წყაროებთან ან ფუნდამენტურად ახალ ფიზიკურ პროცესებთან მიიყვანს.



### ინტერფერომეტრი და LIGO-ს მუშაობის ტექნოლოგია

**ინტერფერომეტრი** არის მაღალი სიზუსტის საზომი ხელსაწყო, რომელიც სინათლის ტალღების ინტერფერენციის პრინციპს ეფუძნება. მისი მუშაობის არსი მარტივია: ერთი წყაროდან წამოსული სინათლე იყოფა ორ ნაწილად, რომლებიც სხვადასხვა გზას გადიან, შემდეგ კი კვლავ ერთდებიან. მათი შეხვედრისას წარმოქმნილი სურათის მიხედვით მეცნიერებს შეუძლიათ, წარმოუდგენელი სიზუსტით გაზომონ მანძილის უმცირესი ცვლილება.

ინტერფერომეტრების მუშაობის თვალსაჩინოდ აღქმაში დაგვეხმარება ექსპერიმენტის ანიმაცია:

<https://rebrand.ly/lr5ipze>

სწორედ ეს ტექნოლოგიაა გამოყენებული LIGO-ში, რომელიც მსოფლიოში ყველაზე მგრძნობიარე ინტერფერომეტრია.

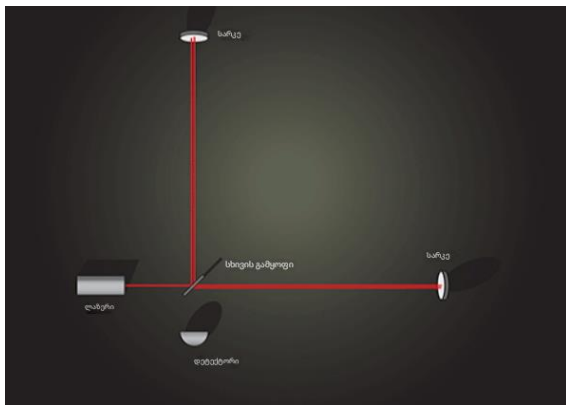
ამ პროცესის გასააზრებლად შეგვიძლია მოვიხმოთ მარტივი შედარება: წარმოვიდგინოთ რეზინის ზედაპირზე მონიშნული ორი წერტილი, რომელთა შორის

სივრცე პერიოდულად იწელება და იკუმშება. ვინაიდან სინათლის სიჩქარე უცვლელია, გაწევილ სივრცეში მას უფრო მეტი დრო დასჭირდება ერთი წერტილიდან მეორემდე მისასვლელად, ვიდრე შეკუმშულში. სივრცე-დროის ეს თვისება დაედო საფუძვლად LIGO-ს მუშაობის პრინციპს.

LIGO-ს ობსერვატორია წარმოადგენს გიგანტურ ლაზერულ ინტერფერომეტრს, რომელიც ორი ურთიერთპერპენდიკულარული, 4 კილომეტრი სიგრძის „მკლავისგან“ შედგება. მუშაობის პროცესი მიმდინარეობს შემდეგნაირად:

- **ლაზერის სხივის გაყოფა:** ლაზერის სხივი სპეციალური გამყოფის საშუალებით ორ ნაწილად იყოფა, რომლებიც მკლავების ბოლოებში განთავსებული სარკეებისკენ მიემართება;
- **არეკვლა და დაბრუნება:** სხივები სარკეებიდან აირეკლება და საწყის წერტილს უბრუნდება;
- **ინტერფერენცია:** ჩვეულებრივ მდგომარეობაში სხივები უკან დაბრუნებისას ერთმანეთს აბათილებს, მაგრამ როდესაც დედამიწას გრავიტაციული ტალღა გადაკვეთს, ის ერთ „მკლავს“ ოდნავ ჭიმავს, მეორეს კი კუმშავს;
- **დეტექტირება:** „მკლავების“ სიგრძის ეს უმნიშვნელო ცვლილება (რომელიც ატომის ბირთვის ზომაზე მცირეა) არღვევს ლაზერის სხივების ბალანსს, რასაც მყისიერად აფიქსირებს ხელსაწყო.

<https://rebrand.ly/a6dd05>



შეჯამების სახით შეიძლება ითქვას, რომ გრავიტაციული ასტრონომია სამყაროს შესწავლის ახალ ეპოქის დასაწყისია. LIGO-ს მიერ დაფიქსირებულმა პირველმა სიგნალმა პრაქტიკულად დაამტკიცა გრავიტაციული ტალღების არსებობა და მეცნიერებს უნიკალური შესაძლებლობების სარკმელი გაუღო. „მრავალმაცნე“ (multi-messenger) მიდგომა, რომელიც გრავიტაციული და ელექტრომაგნიტური მონაცემების კომბინაციას ეფუძნება, საშუალებას გვაძლევს, კოსმოსში მიმდინარე დინამიკური პროცესები უფრო სრულყოფილად შევისწავლოთ და მივიღოთ

ინფორმაცია იქიდან, სადაც სინათლე ვერ აღწევს. გრავიტაციული ტალღების აღმოჩენა წარმოადგენს უდიდეს ტექნოლოგიურ გარღვევას, რომელიც საფუძველს უყრის მეცნიერებისა და კაცობრიობის ცოდნის თვისებრივ წინსვლას.

#### გამოყენებული ლიტერატურა:

1. <https://rebrand.ly/2ntvbcn>
2. <https://rebrand.ly/a3149c>
3. <https://rebrand.ly/bm8bj1>
4. <https://rebrand.ly/a59350>
5. <https://rebrand.ly/hy8djpf>
6. <https://rebrand.ly/5u8m9e2>
7. <https://rebrand.ly/fg7ggoc>
8. <https://rebrand.ly/e7522b>

#### გამოტანები:

გრავიტაციული ასტრონომია სამყაროს შესწავლის ახალ ეპოქის დასაწყისია. LIGO-ს მიერ დაფიქსირებულმა პირველმა სიგნალმა პრაქტიკულად დაამტკიცა გრავიტაციული ტალღების არსებობა და მეცნიერებს უნიკალური შესაძლებლობების სარკმელი გაუღო.

ჩვენ სამყაროს სხვადასხვა გრძნობით აღვიქვამთ: მხედველობით, შეხებით, გემოვნებით, სმენითა და ყნოსვით. მსგავსად ამისა, ასტრონომებიც ინფორმაციის სხვადასხვა წყაროს გამოყენებით იკვლევენ სამყაროს. ესენია სინათლე, ნაწილაკები და სივრცე-დროის რხევები, რომლებსაც გრავიტაციულ ტალღებს უწოდებენ.