



The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

შავი ხვრელები თერმოდინამიკურ „კანონებს“ ემორჩილება — ახალი შედეგი მათ ძალადობრივად წონასწორობიდან შორს მყოფ შავ ხვრელებზეც ავრცელებს

1970-იანი წლებიდან ცნობილია, რომ შავი ხვრელები თერმოდინამიკის მსგავს კანონებს ემორჩილებიან, თუმცა მათი ყველაზე მკაფიო ფორმა მხოლოდ წონასწორობაში მშვიდად მყოფ შავ ხვრელებზე ვრცელდებოდა. *Physical Review Letters*-ში გამოქვეყნებული ახალი ნაშრომი პირველ და მეორე კანონებს კვაზილოკალური ჰორიზონტების იმ ნაწილებზე ავრცელებს, რომლებიც დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტებად კვალიფიცირდება და წონასწორობიდან ნებისმიერად შორს შეიძლება იყოს — აკრეციის, კოლაფსისა და შავი ხვრელების შერწყმის ეტაპების უმეტესობის დროს. სიმულაციები კვაზილოკალურ ჰორიზონტს მთელი შერწყმის განმავლობაში მისდევს, თუმცა კანონები ჯერ არ მოიცავს კოალესცენციის გარშემო არსებულ ხანმოკლე შუალედს, როცა ის დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტი არ არის. ძირითადი ხარჩო ზოგად ფარდობითობაშია, აღორთქლებზე კი ნახევრად კლასიკური გამოყენება აქვს; ეს არც ახალი კვანტური გრავიტაციაა, არც დაკვირვება და არც შავი ხვრელის ინფორმაციის თავსატეხის გადაწყვეტა.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium*, Abhay Ashtekar, Daniel E. Paraizo, Jonathan Shu, *Physical Review Letters* 136, 251405 (2026) · DOI: 10.1103/3c1r-v8f1

შავ ხვრელებს თერმოდინამიკის მსგავს „კანონები“ აქვს. მოწესრიგებული ვერსია მხოლოდ მაშინ მუშაობდა, როცა არაფერი ხდებოდა

ფიზიკის ერთ-ერთი ყველაზე უცნაური ფაქტია, რომ შავი ხვრელები ცხელ ობიექტებს ჰგავს. 1970-იანი წლების დასაწყისში Bekenstein-მა და Hawking-მა შენიშნეს, რომ შავი ხვრელების მმართველი განტოლებები წევრ-წევრად ემთხვევა თერმოდინამიკის კანონებს: შავ ხვრელს აქვს ენტროპია, რომელიც მისი ჰორიზონტის ფართობის პროპორციულია, და ტემპერატურა, რომელიც ზედაპირული გრაფიკაციის პროპორციულია. შემდეგ Hawking-მა აჩვენა, რომ ეს ტემპერატურა ყველაზე ღრმა მნიშვნელობით რეალურია — შავი ხვრელი მართლაც ძალიან სუსტად ანათებს თერმული გამოსხივებით.

რა არის Hawking-ის გამოსხივება?

კლასიკურად შავი ხვრელიდან არაფერი გამოდის, ამიტომ თითქოს ის იდეალურად შავი უნდა იყოს და საერთოდ არ ჰქონდეს ტემპერატურა. 1974 წელს Stephen Hawking-მა აჩვენა, რომ ჰორიზონტის მახლობლად კვანტური თეორიის გათვალისწინებისას ეს იცვლება: შავი ხვრელი სუსტ თერმულ გამოსხივებას უშვებს და ამიტომ ნელა კარგავს მასას, ანუ „ორთქლდება“. სპექტრი Hawking-ის ტემპერატურაზე თერმულია, თუმცა მრუდე სივრცე-დროში გავრცელება ცვლის იმას, რაც უსასრულობამდე აღწევს. გავრცელებულ ჰეურისტიკულ სურათში — რომელიც Hawking-ის ნამდვილი გამოყვანა არ არის — ჰორიზონტის გარეთ კვანტური ფლუქტუაციები წყვილებს ქმნის, რომელთაგან ერთი პარტნიორი გამოსხივებად გარბის, მეორე კი შიგნით ეცემა.

მთავარი თვისებაა, რომ ეს ტემპერატურა შავი ხვრელის მასის უკუპროპორციულია: რაც პატარაა ხვრელი, მით უფრო ცხელია. ნებისმიერ ტელესკოპით შესაძინებ შავ ხვრელს წარმოუდგენლად დაბალი ტემპერატურა ექნება — მის გარშემო ცარიელ სივრცეზეც გაცილებით ცივი — ამიტომ პრაქტიკაში გამოსხივება უმნიშვნელოა და პირდაპირ არასოდეს გაზომილა. მისი მნიშვნელობა კონცეფციურია: სწორედ Hawking-ის გამოსხივება აქცევს შავი ხვრელების მექანიკასა და თერმოდინამიკას შორის ანალოგიას ნამდვილ ფიზიკურ შესაბამისობად. რადგან ხვრელს რეალურად აქვს ტემპერატურა, ამ კანონებში „ტემპერატურა“ და „ენტროპია“ ნამდვილი თერმოდინამიკური სიდიდეებია და არა ფორმალური დამთხვევა. (ეს მიმდინარე ნაშრომის ფონი არის და არა მისი შედეგი.)

ამ შესაბამისობის საყრდენია შედეგი, რომელსაც შავი ხვრელების მექანიკის პირველი კანონი ეწოდება (Bardeen, Carter and Hawking, 1973). სიტყვიერად: თუ შავ ხვრელს ერთი სტაბილური მდგომარეობიდან მის მახლობელ სტაბილურ მდგომარეობამდე ოდნავ შეცვლი, მისი მასის ცვლილება უდრის ტემპერატურას გამრავლებულს ენტროპიის ცვლილებაზე, პლუს წევრს ბრუნვისთვის. ეს არის შავი ხვრელის ანალოგი ფრაზისა „შესული სითბო უდრის ტემპერატურას გამრავლებულს

ენტროპიის ცვლილებაზე“.

მაგრამ პრობლემა ფრაზაში *მახლობელი სტაბილური მდგომარეობა* იმალება. 1973 წლის სუფთა კანონი ერთმანეთს ადარებს ორ შავ ხვრელს, რომლებიც მშვიდად, წონასწორობაში იმყოფება და ერთმანეთისგან უსასრულოდ მცირე სხვაობით განსხვავდება. ის სინამდვილეში საერთოდ არ აღწერს **პროცესს** — ვარსკვლავის შთანთქმას, ორი შავი ხვრელის შერწყმას, ახლად დაბადებული ხვრელის ringdown-ის ძალადობრივი წარმოშობის შემდეგ. სწორედ ეს სიტუაციებია ყველაზე საინტერესო, და ისინი „მშვიდად ჯდომის“ სრული საპირისპიროა. მოწესრიგებული კანონი ჩუმდება ზუსტად მაშინ, როცა შავი ხვრელი საინტერესო ხდება.

რატომ არ მუშაობს აშკარა გამოსწორება

შეიძლება იფიქროთ, რომ გამოსწორება მარტივია: უბრალოდ ვუყუროთ, როგორ იზრდება ჰორიზონტი მასალის ჩავარდნისას. პრობლემა ისაა, რომელი ჰორიზონტი.

ჰორიზონტს, რომელსაც ადამიანების უმეტესობა წარმოიდგენს — **მოვლენათა ჰორიზონტს**, ნამდვილ უკან დაბრუნების შეუძლებელ საზღვარს — დახვეწილი და მოუხერხებელი თვისება აქვს: ის მთელი სამყაროს სრულ მომავალზე განსაზღვრული. იმის გასაგებად, სად არის მოვლენათა ჰორიზონტი ახლა, უნდა იცოდეთ ყველაფერი, რაც ოდესმე, მომავალში, ხვრელში ჩავარდება. ეს წვრილმანი ტექნიკური პრობლემა არ არის. მოვლენათა ჰორიზონტს შეუძლია ზრდა დაიწყოს სრულიად ცარიელ, ბრტყელ სივრცის რეგიონში *მანამდე*, სანამ მას კვებავი მატერია იქ მივა — უბრალოდ იმიტომ, რომ მომავალში მას ნამდვილად უნდა მიაღწიოს. მისი ფართობი შეიძლება გაიზარდოს იქ, სადაც ადგილობრივად საერთოდ არაფერი ხდება.

როგორ შეიძლება ჰორიზონტი მატერიის მისვლამდე გაიზარდოს?

ამ თავსატეხის სამეცნიერო სახელია **მოვლენათა ჰორიზონტის ტელეოლოგიური ბუნება**, რომელსაც ასევე მის **გლობალურ განსაზღვრებას** უწოდებენ. აქ „ტელეოლოგიური“ არ ნიშნავს, რომ ჰორიზონტს მიზანი აქვს, მომავალს წინასწარმეტყველებს ან გავლენას უკან, დროში აგზავნის. ის ნიშნავს, რომ კონკრეტული მოვლენა ჰორიზონტის შიგნითაა თუ არა, მხოლოდ სივრცე-დროის სრული მომავალი ისტორიის ცოდნით შეიძლება გადაწყდეს.

ფორმალური განსაზღვრება იმავს მოკლედ ამბობს. წარმოიდგინეთ **მომავალი ნულოვანი უსასრულობა** — „I-plus“, ანუ I^+ — როგორც დანიშნულების ადგილი, რომელსაც სინათლე აღწევს, თუ ის სამუდამოდ გარბის ცარიელი, უსასრულოდ შორეული მომავლისკენ. მოვლენათა ჰორიზონტი არის საზღვარი იმ მოვლენებს შორის, საიდანაც გარეთ მიმართულ სინათლის სიგნალს საბოლოოდ შეუძლია ამ დანიშნულებამდე მისვლა, და იმ მოვლენებს შორის, საიდანაც ვერასოდეს მივა. ზოგადი ფარდობითობის სტანდარტული ჩანაწერით ის მომავალი ნულოვანი უსასრულობის მიზეზობრივი წარსულის საზღვარია: $\partial J^-(I^+)$. რადგან სიტყვა *ოდესმე* თვით განსაზღვრებაშია ჩაშენებული, მხოლოდ აქ და ახლა ჩატარებული

არც ერთი გაზომვა მოვლენათა ჰორიზონტს ზუსტად ვერ ადგენს.

კოლაფსირებადი სფერული გარსი ამ უცნაურობას თვალსაჩინოვს ხდის. გარსის მოსვლამდე მისი შიგნით რეგიონი შეიძლება ცარიელი და ადგილობრივად ბრტყელი იყოს. ცენტრიდან თანდათან გვიან გავუშვათ გარეთ მიმართული სინათლის სხივები: ადრეული სხივები გარბის, გვიანები კი კოლაფსირებად გარსს ისეთ გეომეტრიაში ხვდება, საიდანაც გამოსვლა აღარ შეუძლია. მოვლენათა ჰორიზონტი ამ ორ შედეგს შორის საზღვარია. თუ ამ საზღვარს დროის მიმართულებით უკან მივყვებით, ის ცენტრიდან იწყება და ჯერ კიდევ ცარიელ, ბრტყელ ინტერიერში ფართოვდება მანამდე, სანამ გარსი მას მიაღწევს. მისი ზრდადი ფართობი იქ მატერიის ადგილობრივ ნაკადს არ აღწერს; ის ასახავს, საბოლოოდ დასრულებულ სივრცე-დროში რომელი გაქცევის გზები რჩება ღია.

ამ სურათში არაფერი მოქმედებს დროის საწინააღმდეგოდ. გარსი რომ გადაეხვიათ და შავი ხვრელი აღარ წარმოქმნილიყო, დასრულებული სივრცე-დრო სხვანაირი იქნებოდა და ადრინდელი რეგიონიც მოვლენათა ჰორიზონტის ნაწილი არ იქნებოდა. გაკვეთილი არა ისაა, რომ მომავალი წარსულს ცვლის, არამედ ის, რომ მოვლენათა ჰორიზონტი **გლობალური მიზეზობრივი საზღვარია**, და არა ზედაპირი, რომლის აღმოჩენაც ახლომდებარე დამკვირვებელს ერთ მომენტში შეუძლია. სწორედ ამიტომ იყენებენ ფიზიკოსები quasi-local ან dynamical horizons-ს, როცა შავი ხვრელის ცვლილების თვალყურის დევნება სურთ.

ამიტომ მოვლენათა ჰორიზონტი შავი ხვრელის „მდგომარეობის“ მიმდინარე აღრიცხვისთვის გამოუსადეგარია. კომპიუტერულ სიმულაციაშიც კი ზუსტად ვერ დაადგენთ მის ადგილს, სანამ სიმულაცია არ დასრულდება, და მით უმეტეს ვერ გამოიყენებთ მას ტემპერატურისა ან ენტროპიის მომენტიდან მომენტამდე მისადევნებლად.

ნაბიჯი: ჰორიზონტი, რომლის განსაზღვრაც ადგილობრივად შეიძლება

Abhay Ashtekar-ის, Daniel Paraizo-სა და Jonathan Shu-ს ახალი ნაშრომი თავის შედეგს ჰორიზონტის განსხვავებულ ცნებაზე — **კვაზილოკალური ჰორიზონტზე** — აგებს, რომელიც მხოლოდ თავისივე მეზობლად არსებული გეომეტრიით განისაზღვრება და უსასრულო მომავალზე მითითებას არ საჭიროებს. ეს **კვაზილოკალური ჰორიზონტები** სწორედ ის ზედაპირებია, რომლებსაც რიცხვითი ფარდობითობის მკვლევრები მთელი სიმულაციის განმავლობაში უკვე იყენებენ წინამორბედი შავი ხვრელების ადგილმდებარეობის დასადგენად, შერწყმის მისადევნებლად და ნარჩენი შავი ხვრელის ადგილმდებარეობის დასადგენად. აქ შემუშავებული თერმოდინამიკური კანონები ვრცელდება კვაზილოკალური ჰორიზონტის იმ ნაწილებზე, რომლებიც **დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტისთვის** საჭირო დამატებით პირობებს აკმაყოფილებს. თითოეულ ასეთ სეგმენტზე ფართობი შორეულ მომავალში მომხდარ მოვლენებზე

კი არა, ადგილობრივ ენერგიის ნაკადზე უშუალო რეაქციით იცვლება: დადებითი შემოდინებისას ის იზრდება, ხოლო უარყოფითი ენერგიის ნაკადის მქონე, აორთქლებად დროით ჰორიზონტზე მცირდება.

ამაზე ავტორები პრობლემის უფრო რთულ ნახევარსაც წყვეტენ. ჩვეულებრივ თერმოდინამიკაში წონასწორობიდან შორს სისტემა რთულად აღსაწერია: მას ერთ ტემპერატურას ან წნევას მკაფიოდ ვერ მიაწვდის, რადგან ეს სიდიდეები მხოლოდ სისტემის დამშვიდების შემდეგ განისაზღვრება. შავ სხრელებსაც იგივე პრობლემა აქვს — სანამ, როგორც ავტორები აჩვენებენ, ზოგადი ფარდობითობის განსაკუთრებულ თვისებას არ გამოიყენებ. წონასწორობაში მყოფი შავი სხრელი — Kerr-ის შავი სხრელი — მხოლოდ ორი რიცხვითაა განსაზღვრული: ზომით და ბრუნვით. ამიტომ ავტორები აგებენ ასახვას, რომელიც დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტის გასწვრივ თითოეულ მდგომარეობას იღებს და ამ სეგმენტის თითოეულ განივ კვეთაზე კითხულობს იმ წონასწოვრული შავი სხრელის ორ რიცხვს, რომელსაც მდგომარეობა იმ წამს ჰგავს. ამ ასახვით სწრაფად ცვალებად შავ სხრელს სეგმენტის გასწვრივ შეიძლება მიენიჭოს **დროზე დამოკიდებული ტემპერატურა და ბრუნვა**.

ამ კომპონენტებით — ჰორიზონტზე გამავალი, ადგილობრივად განსაზღვრული ენერგიითა და მყისიერი ინტენსიური სიდიდეებით — ავტორები პირველ კანონს წონასწორობიდან ნებისმიერად შორს მყოფ შავ სხრელებზე ავრცელებენ. არსებითია, რომ ახალი კანონი აღწერს **რეალური ფიზიკური პროცესებით გამოწვეულ სასრულ ცვლილებებს** (მატერიისა და გრაფიკაციული ტალღების მიერ ჰორიზონტის გადაკვეთას) და არა უსასრულოდ მცირე ნაბიჯებს ორ გაყვნილ მდგომარეობას შორის. მას ისინი უთავსებენ შესაბამის მეორე კანონს, რომლის ფორმულირებაც ახლა *რაოდენობრივია*: ჰორიზონტის ფართობის ცვლილება უშუალოდ უკავშირდება ადგილობრივ ენერგიის ნაკადს — დადებითი შემოდინებისას ფართობი იზრდება, ხოლო უარყოფითი ნაკადის მქონე, აორთქლებად დროით ჰორიზონტზე მცირდება. პირველი და მეორე კანონები ერთად ერთ მკაფიო დასკვნაზე მიუთითებენ: დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტით წარმოდგენილი ნებისმიერი ფაზისთვის, რაოდენ მძაფრიც უნდა იყოს ის, ენტროპიის სწორი საზომი კვლავ მისი ჰორიზონტის ფართობია.

რას არ ამტკიცებს ეს

- ის **არ** წყვეტს კვანტური გრაფიკაციის პრობლემას. ძირითადი ჩარჩო ზოგად ფარდობითობაშია ჩამოყალიბებული; შავი სხრელის აორთქლებაზე მისი გამოყენება ეფუძნება ნახევრად კლასიკურ მიახლოებას, რომელშიც მატერიის კვანტური ველები კლასიკურ დრო-სივრცეზე მოქმედებენ. ამასთან, იგი კვლავ დაშვებად იღებს ჰორიზონტის ფართობის ენტროპიასთან სტანდარტულ გაიგივებას და ამ ენტროპიას უფრო ფუნდამენტური საფუძვლიდან არ გამოჰყავს.
- ის **არ** ითვლის მიკრომდგომარეობებს და არ ხსნის, *რისგან* შედგება შავი სხრელის ენტროპია. ის შავი სხრელის თერმოდინამიკის აღრიცხვას აფართოებს; მიკროსკოპულ თავისუფლების ხარისხებს ყუთიდან არ იღებს.
- ის **არ** წყვეტს შავი სხრელის ინფორმაციის პარადოქსს. ეს თავსატეხი კვანტურ თეორიაში ცხოვრობს; ეს ნაშრომი მას არ ეხება.

- ეს არც დაკვირვებაა და არც გაზომვა. აქ არც ტელესკოპი მონაწილეობს, არც მონაცემები და არც გრაფიკაციული ტალღის სიგნალი — ეს მათემატიკაა. შავი ხვრელის ევოლუციისას დინამიკური ჰორიზონტისთვის მინიჭებული „ტემპერატურა“ განტოლებებში ზუსტად განსაზღვრული სიდიდეა და არა რამე, რასაც თერმომეტრიდან წაიკითხავდით.
- ის ორი შავი ხვრელის მთელი კოალესცენციის უწყვეტ თერმოდინამიკურ აღწერას ჯერ არ იძლევა. რიცხვითი სიმულაციები კვანძოლოკალურ ჰორიზონტს მთელი ევოლუციის განმავლობაში — წინამორბედი შავი ხვრელებიდან შერწყმის გავლით ნარჩენ შავ ხვრელამდე — მისდევს, თუმცა უშუალოდ შერწყმასთან ძალიან ახლოს, ხანმოკლე შუალედში, ეს ჰორიზონტი დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტისთვის საჭირო პირობებს ვერ აკმაყოფილებს. თანმხლები ნაშრომის თანახმად, ამ შუალედის თერმოდინამიკური აღწერა ჯერ კიდევ დამუშავების პროცესშია.
- ის არ აუქმებს Bekenstein-სა და Hawking-ს. ის მათ სურათს აფართოებს დინამიკურ რეჟიმში, სადაც თავდაპირველ, მხოლოდ წონასწორულ კანონს არაფერი ჰქონდა სათქმელი.

რამდენად ძლიერია მტკიცებულება?

ძლიერი — იმ ტიპის შედეგისთვის, რასაც ეს ნაშრომი წარმოადგენს: დარგის წამყვანი ჯგუფის მიერ შესრულებული ფრთხილი და შინაგანად თანმიმდევრული მათემატიკური ფიზიკის კვლევა, რომელიც Physical Review Letters-ში *Editors' Suggestion*-ის სტატუსით გამოქვეყნდა. რეცენზირებული თანმხლები ნაშრომი უფრო ვრცელ გამოყვანებს გვთავაზობს და განიხილავს იმ შემთხვევებს, რომლებიც სიმოკლის გამო მოკლე Letter-იდან გამოტოვებულია.

პატიოსანი შეზღუდვები ხარისხს კი არა, ტიპს ეხება:

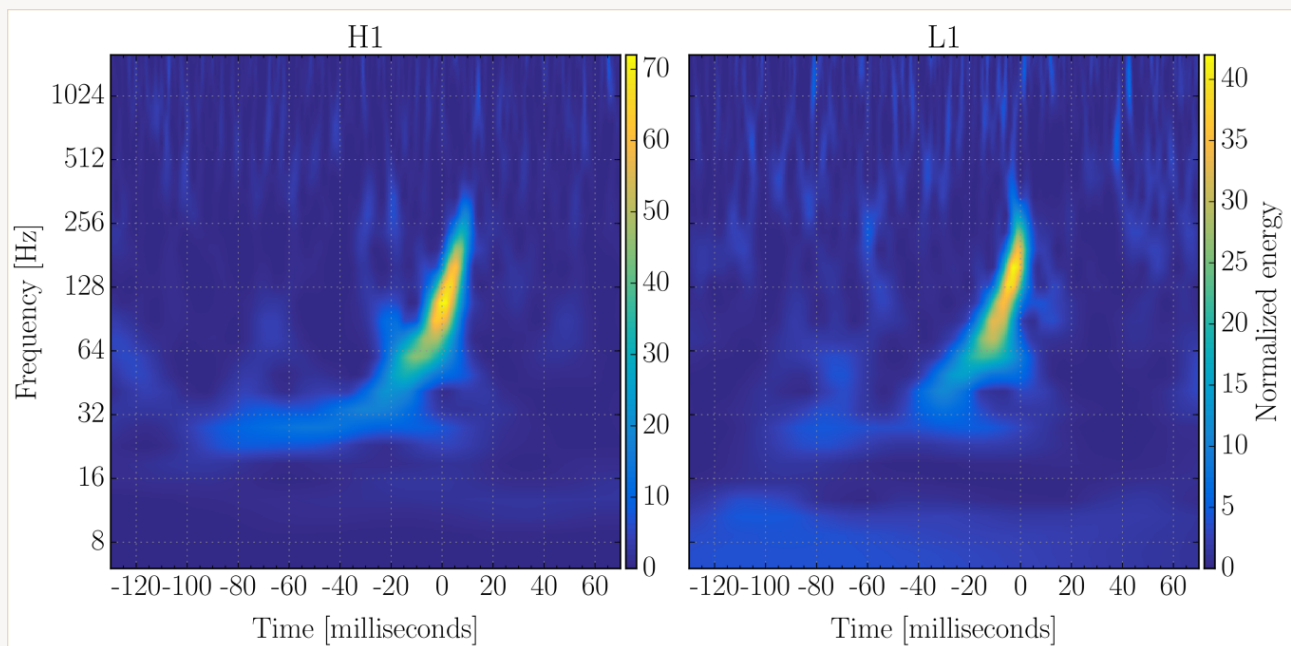
- შედეგი ეყრდნობა მიღებულ დაშვებას, რომ ჰორიზონტის ფართობი არის ენტროპია (ფართობი გაყოფილი ოთხჯერ Newton-ის მუდმივისა და Planck-ის მუდმივის კომბინაციაზე). თუ სრულმა კვანტურმა გრაფიკაციამ ეს იდენტიფიკაცია ოდესმე შეცვალა, ინტერპრეტაციაც მასთან ერთად შეიცვლება.
- სიმოკლისა და სიმარტივისთვის მოკლე Letter მთავარ გამოყვანას სივრცითი, ღერძულად სიმეტრიული დინამიკური ჰორიზონტების გამოყენებით წარმოადგენს. რეცენზირებული თანმხლები ნაშრომი ცალსახად აანალიზებს დროით დინამიკურ ჰორიზონტებს და კუთხურ იმპულსს ბრუნვითი Killing-ის ველის გარეშე აგებს. თუმცა, აორთქლებადი დროითი ჰორიზონტებისთვის უკურეაქციის ცხადი განხილვა სფერული სიმეტრიითაა შეზღუდული.
- „ენტროპია = ჰორიზონტის ფართობი, წონასწორობიდან შორსაც“ ახალი პირველი და მეორე კანონებით ძალიან ბუნებრივი იდენტიფიკაციაა, მაგრამ არა მიკროსკოპული სტატისტიკიდან მიღებული თეორემა.

ამიტომ: ორმოცდაათი წლის ჩარჩოს მკაცრი გაფართოება, და არა ექსპერიმენტული აღმოჩენა ან ბუნების ახალი კანონი, რომელიც ჯერ გამოცდას ელოდება.

რატომ არის ეს მნიშვნელოვანი

ორი მიზეზია — ერთი პრაქტიკული, მეორე კონცეფციური.

პრაქტიკული თვალსაზრისით, შავი ხვრელები, რომლებსაც დღეს რეალურად ვიკვლევთ — ისინი, რომელთა შერწყმასაც LIGO და Virgo „ისმენენ“ — თავიანთ უმნიშვნელოვანეს მომენტებს წონასწორობიდან შორს ატარებენ. სიმულაციები კვაზილოკალურ ჰორიზონტს წინამორბედი შავი ხვრელებიდან შერწყმის გავლით ნარჩენ შავ ხვრელამდე მისდევს. ამ ნაშრომში გამოყენებული სიდიდეები ამ ჰორიზონტის იმ ნაწილებს ეხება, რომლებიც დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტებად კვალიფიცირდება; ამიტომ ნაშრომი გვაძლევს პრინციპულ გზას, ვისაუბროთ შავი ხვრელის ენტროპიასა და ტემპერატურაზე შერწყმის ევოლუციის ეტაპების უმეტესობასა და კოლაფსის დროს და არა მხოლოდ მას შემდეგ, რაც ყველაფერი დამშვიდდება. უშუალოდ კოალესცენციის გარშემო არსებული ხანმოკლე შუალედის დროს კვაზილოკალური ჰორიზონტის მიდევნება გრძელდება, თუმცა ის ამჟამინდელი თერმოდინამიკური აღწერის ფარგლებს გარეთ რჩება.



GW150914, პირველი პირდაპირ აღმოჩენილი გრავიტაციული ტალღის სიგნალი, ორი შავი ხვრელის შერწყმიდან მოვიდა. ეს დრო-სიხშირის რუკები LIGO Hanford-ის (მარცხნივ) და LIGO Livingston-ის (მარჯვნივ) სიგნალს აჩვენებს: ორივე დეტექტორში ნათელი კვალი ზემოთ იხრება, რადგან შერწყმამდე სიგნალის სიხშირე იზრდება. ეს წონასწორობიდან შორს მყოფი შავი ხვრელების სისტემის რეალური მაგალითია; ახალი თერმოდინამიკური ჩარჩოს კონტექსტია და არა ამ ჩარჩოს დაკვირვებითი მტკიცებულება.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 3.0

კონცეფციურად შავი ხვრელების თერმოდინამიკური ქცევა ერთ-ერთი იმ მცირერიცხოვან კონკრეტულ მინიშნებათაგანია, რაც კვანტურ გრავიტაციაზე გვაქვს — ადგილი, სადაც გრავიტაცია, კვანტური თეორია და თერმოდინამიკა აშკარად ხვდება ერთმანეთს. ზუსტად იმის გამკაცრება, თუ რას ნიშნავს „ენტროპია“ და „ტემპერატურა“ ძალადობრივად ცვალებადი შავი ხვრელისთვის, უფრო მკაფიო სამიზნეს აძლევს მომავალ კვანტურ

თეორიას. ეს არ პასუხობს ღრმა კითხვას, სინამდვილეში რა არის შავი ხვრელის ენტროპია. უბრალოდ კითხვას უფრო ზუსტად სვამს — და ფიზიკის ამ კუთხეში ეს სამუშაოს დიდი ნაწილია.

სუფთა შეჯამება

შავი ხვრელები თერმოდინამიკის მსგავს კანონებს ემორჩილებიან, მაგრამ 1973 წლის მკაფიო „პირველი კანონი“ მხოლოდ წონასწორობაში უძრავად მყოფ შავ ხვრელებს ადარებდა და რეალურ პროცესს ვერ აღწერდა. Ashtekar, Paraizo და Shu პირველ და მეორე კანონებს წონასწორობიდან ნებისმიერად შორს მყოფ შავ ხვრელებზე ავრცელებენ — როცა ისინი მატერიას შთანთქავენ, კოლაფსს განიცდიან, რხევების ჩაქრობის ეტაპს გადიან და შერწყმის ეტაპების უმეტესობას გაივლიან — კვაზილოკალური ჰორიზონტების გამოყენებით, მათი დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტებისთვის თერმოდინამიკური კანონების მისადაგებით და ისეთი ასახვის აგებით, რომელიც ამ სეგმენტების გასწვრივ თითოეულ მდგომარეობას მყისიერ ტემპერატურასა და სპინს ანიჭებს. მთავარი შედეგია, რომ დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტით წარმოდგენილი ყველა ფაზისთვის ჰორიზონტის ფართობი ენტროპიის სწორ საზომად რჩება. კოალესცენციასთან ძალიან ახლოს არსებული ხანმოკლე შუალედი ამ თერმოდინამიკური აღწერით ჯერ არ არის მოცული, თუმცა სიმულაციები კვაზილოკალურ ჰორიზონტს კვლავ მისდევს. ძირითადი ჩარჩო ზოგად ფარდობითობაშია, აორთქლებაზე კი ნახევრად კლასიკური გამოყენება აქვს; ეს არც კვანტური გრაფიტაციაა, არც დაკვირვება, არც მიკრომდგომარეობების დათვლა და არც ინფორმაციის პარადოქსის გადაწყვეტა.

შელამაზების გარეშე შემოწმება

რას აჩვენებს ნაშრომი: შავი ხვრელების მექანიკის პირველი და მეორე კანონების მათემატიკურად თანმიმდევრულ გაფართოებას სრულად დინამიკურ, წონასწორობიდან შორს მყოფ შავ ხვრელებზე, რომელიც კვაზილოკალურ ჰორიზონტებსა და მათ იმ ნაწილებს ეფუძნება, რომლებიც დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტებისთვის საჭირო პირობებს აკმაყოფილებს. ის განსაზღვრავს სასრულ, პროცესზე დაფუძნებულ პირველ კანონს და რაოდენობრივ მეორე კანონს და ბუნებრივს ხდის დინამიკური შავი ხვრელის ენტროპიის ჰორიზონტის ფართობთან იდენტიფიკაციას.

რა არის რეალური, მაგრამ ინტერპრეტაციული: „ენტროპია = ჰორიზონტის ფართობი“ წონასწორობიდან შორს. ახალი კანონები ამას ძალიან დამაჯერებელს ხდის, მაგრამ ეს იდენტიფიკაცია სტანდარტული კლასიკური area-entropy დაშვებიდან მემკვიდრეობს და იქიდან არ არის გამოყვანილი.

რას არ აჩვენებს: კვანტური გრაფიტაციის თეორიას; შავი ხვრელის ენტროპიის მიკროსკოპულ წარმოშობას ან „დათვლას“; ინფორმაციის პარადოქსის გადაწყვეტას;

დაკვირვებით ან ექსპერიმენტულ შედეგს; ფიზიკურად გაზომვად ტემპერატურას.

მთავარი შეზღუდვები: ძირითადი გამოყვანა ზოგად ფარდობითობაშია შესრულებული, ხოლო დროითი ჰორიზონტის აორთქლებებზე გამოყენება ნახევრად კლასიკურ მიახლოებას ეყრდნობა; ბინარულ კოალესცენციასთან ძალიან ახლოს არსებული ხანმოკლე შუალედი დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტით არ არის წარმოდგენილი და მისი თერმოდინამიკური აღწერა ჯერ კიდევ დამუშავების პროცესშია, თუმცა რიცხვითი სიმულაციები კვაზილოკალურ ჰორიზონტს კვლავ მისდევს; აორთქლებადი დროითი ჰორიზონტების უკურეაქციის ცხადი განხილვა სფერული სიმეტრიითაა შეზღუდული; ფართობისა და ენტროპიის გაიგივება დაშვებაა და არა სტატისტიკური მექანიკიდან მიღებული მტკიცებულება.

რამდენად უნდა ენდოს ამას ზოგადი მკითხველი? მაღალი ნდობა, რომ ეს მყარი და კარგად შეფასებული თეორიული წინსვლაა, რომელიც შავი ხვრელების თერმოდინამიკას ნამდვილად აფართოებს დინამიკურ რეჟიმში. თანაბრად მაღალი ნდობა, რომ ეს არ არის ახალი დაკვირვება, არ არის კვანტური გრავიტაცია და არ წყვეტს ცნობილ ინფორმაციის თავსატეხს. სწორი დამოკიდებულება: რეალური ნაბიჯი გაგებაში, გადადგმული ცარცით და არა ტელესკოპით.

გამოქვეყნების შემდეგი განახლებები

• შესწორება • 2026-08-27

კორესპონდენტი ავტორის, Abhay Ashtekar-ის, გამოხმაურების შემდეგ შევასწორეთ ორი დებულება, რომლებშიც ეწერა, რომ დროითი და არადერძულად სიმეტრიული შემთხვევები რეცენზირებულ თანმხლებ ნაშრომში მხოლოდ არგუმენტირებული იყო და არა ცალსახად განხილული. გადახედვისას ასევე დავაზუსტეთ, რომ ჩარჩო ჯერ არ მოიცავს ბინარულ კოალესცენციასთან ძალიან ახლოს არსებულ ხანმოკლე შუალედს, როდესაც კვაზილოკალური ჰორიზონტი დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტისთვის საჭირო პირობებს ვეღარ აკმაყოფილებს.

• შესწორება • 2026-08-28

კორესპონდენტი ავტორის, Abhay Ashtekar-ის, დამატებითი განმარტების შემდეგ ერთმანეთისგან განვასხვავეთ კვაზილოკალური ჰორიზონტები, რომლებსაც რიცხვითი სიმულაციები წინამორბედი შავი ხვრელებიდან შერწყმის გავლით ნარჩენამდე მისდევს, და მათი ის ნაწილები, რომლებიც დინამიკური ჰორიზონტის სეგმენტებისთვის საჭირო დამატებით პირობებს აკმაყოფილებს და რომლებზეც თერმოდინამიკური კანონები ვრცელდება.

წყაროები

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)
<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of dynamical black holes beyond perturbation theory, Gen. Relativ. Gravit. 58, 91 (2026)

<https://doi.org/10.1007/s10714-026-03585-4>