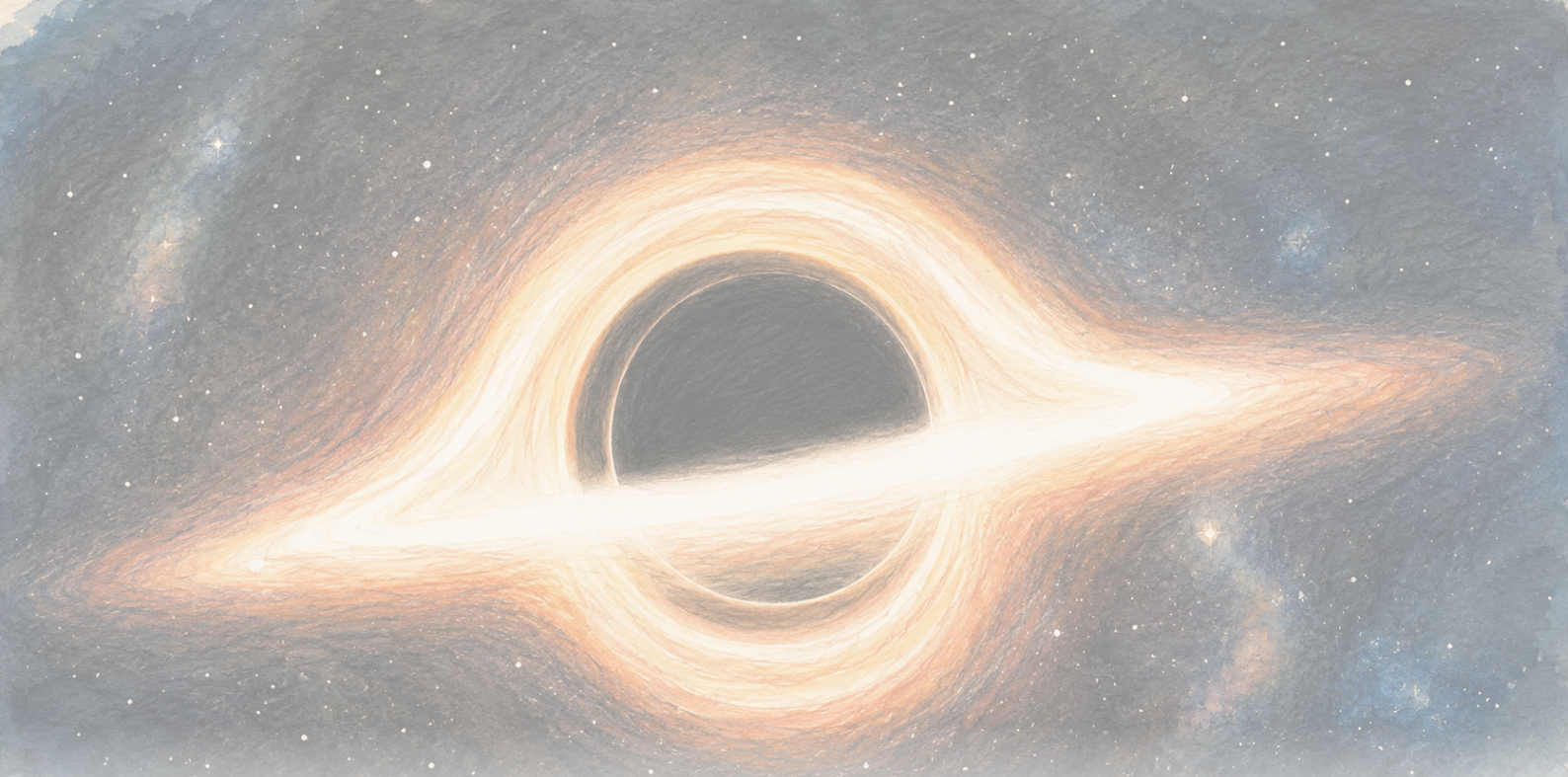




The CLEAN PAPER

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

Mashimo meusi hufuata ‘sheria’ za termodinamiki — tokeo jipya linazipanua hadi mashimo meusi yaliyo mbali sana na msawazo

Tangu miaka ya 1970, mashimo meusi yamejulikana kufuata sheria zinazofanana na termodinamiki, lakini toleo safi zaidi lilitumika tu kwa mashimo meusi yaliyotulia katika msawazo. Makala mpya katika Physical Review Letters inapanua sheria ya kwanza na ya pili hadi sehemu za upeo wa kieneo-takriban zinazotimiza masharti ya vipande vya upeo wenye mienendo na zinaweza kuwa mbali kadiri yoyote na msawazo — wakati wa ukuaji kwa kumeza maada, kuporomoka na hatua nyingi za kuungana kwa mashimo meusi. Uigaji hufuatilia upeo wa kieneo-takriban katika mchakato wote wa kuungana, lakini sheria bado hazishughulikii kipindi kifupi karibu na kuungana wakati ambapo si kipande cha upeo wenye mienendo. Mfumo wa msingi uko katika uhusiano wa jumla, ukiwa na matumizi ya nusu-klasiki kwa uvukizaji; si mvuto mpya wa kwanta, uchunguzi wala utatuzi wa kitendawili cha taarifa ya mashimo meusi.

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

Mashimo meusi yana “sheria” zinazofanana na termodinamiki. Toleo safi lilifanya kazi tu wakati hakuna jambo lililokuwa likitokea.

Mojawapo ya ukweli wa ajabu zaidi katika fizikia ni kwamba mashimo meusi hutenda kama vitu vyenye joto. Mwanzoni mwa miaka ya 1970, Bekenstein na Hawking waligundua kwamba milinganyo inayotawala mashimo meusi inalingana, neno kwa neno, na sheria za termodinamiki: shimo jeusi lina entropia inayolingana na eneo la upeo wake, na joto linalolingana na mvuto wa uso wake. Kisha Hawking akaonyesha kwamba joto hilo ni halisi kwa maana ya kina zaidi — shimo jeusi kweli hutoa mwanga hafifu sana wa mionzi ya joto.

Mionzi ya Hawking ni nini?

Katika fizikia ya kiklasiki hakuna kitu kinachoweza kutoroka shimo jeusi, kwa hiyo lingepaswa kuwa jeusi kabisa na lisikuwa na joto hata kidogo. Mwaka 1974 Stephen Hawking alionyesha kwamba hali hubadilika nadharia ya kwanta inapozingatiwa karibu na upeo: shimo jeusi hutoa mng’ao hafifu wa joto na hivyo polepole hupoteza misa, au “huvukiza.” Spektra ni ya joto katika joto la Hawking, huku kusambaa kwa mionzi kupitia anga-wakati uliopinda kukibadilisha mionzi inayofika mbali sana. Katika picha maarufu ya kusaidia kufikiria — ambayo si utoaji halisi wa Hawking — mitikisiko ya kwanta nje kidogo ya upeo huunda jozi ambapo mshirika mmoja hutoroka kama mionzi na mwingine huanguka ndani.

Sifa muhimu ni kwamba joto hili lina uhusiano wa *kinyume* na misa ya shimo jeusi: shimo likiwa dogo zaidi, huwa moto zaidi. Kwa shimo jeusi lolote ambalo darubini inaweza kuona, joto ni dogo kupita kiasi — chini sana kuliko hata nafasi inayolizunguka — kwa hiyo kwa vitendo mng’ao huo ni karibu kutokuwepo kabisa na haujawahi kupimwa moja kwa moja. Umuhimu wake ni wa kimawazo: mionzi ya Hawking ndiyo inayogeuzi *mlinganisho* kati ya mekanika ya mashimo meusi na termodinamiki kuwa jambo halisi. Kwa sababu shimo kweli lina joto, “joto” na “entropia” katika sheria hizi ni kiasi halisi za kitermodinamiki, si mfanano wa urasmi tu. (Huu ni muktadha wa makala ya sasa, si mojawapo ya matokeo yake.)

Ulinganifu huo umejikita katika tokeo linaloitwa **sheria ya kwanza ya mekanika ya mashimo meusi** (Bardeen, Carter na Hawking, 1973). Kwa maneno, inasema: ukilisogeza shimo jeusi kidogo kutoka hali moja tulivu hadi hali nyingine tulivu iliyo karibu, mabadiliko ya misa yake ni sawa na joto lake mara mabadiliko ya entropia yake, pamoja na neno la mzunguko wake. Ni toleo la shimo jeusi la wazo “joto linaloingia ni joto mara mabadiliko ya entropia.”

Lakini kuna tatizo lililofichwa katika maneno *hali tulivu iliyo karibu*. Sheria safi ya 1973 inalinganisha mashimo meusi mawili yaliyotulia katika msawazo, yakitofautiana kwa kiasi kidogo sana. Haielezi kwa kweli **mchakato** — shimo jeusi likimeza nyota, mashimo mawili meusi yakiungana, au shimo jipya likitetemeka na kutulia baada ya kuzaliwa kwa vurugu. Hizo ndizo hali tunazotaka zaidi kuelewa, na ni kinyume kabisa cha “kukaa kimya.” Sheria safi hunyamaza pale shimo jeusi linapokuwa la kuvutia zaidi.

Kwa nini suluhisho linaloonekana wazi halifanyi kazi

Unaweza kufikiri suluhisho ni rahisi: tazama tu upeo ukikua maada inapoanguka ndani. Tatizo ni *upeo gani*.

Upeo ambao watu wengi huwaza — **upeo wa matukio (event horizon)**, mpaka halisi wa kutorudi — una sifa ya hila na yenye usumbufu: unafafanuliwa na siku zijazo zote za ulimwengu. Ili kujua upeo wa matukio uko wapi *sasa hivi*, ungelazimika kujua kila kitu kitakachoanguka ndani ya shimo, milele. Hili si jambo dogo la kiufundi. Upeo wa matukio unaweza kuanza kukua katika eneo tupu kabisa na tambarare la nafasi *kabla* ya maada itakayolisha shimo kufika, kwa sababu tu maada hiyo imekusudiwa kufika baadaye. Eneo lake linaweza kuongezeka mahali ambapo, kwa taarifa za eneo hilo pekee, hakuna kinachotokea.

Upeo unaweza kukuaje kabla maada haijafika?

Jina la kisayansi la kitendawili hiki ni **tabia ya kiteleolojia ya upeo wa matukio**, pia huitwa **ufafanuzi wake wa kimataifa**. Hapa, “kiteleolojia” haimaanishi kwamba upeo una kusudi, unatabiri siku zijazo, au unatuma athari kurudi nyuma kwa muda. Inamaanisha kwamba kama tukio fulani liko ndani ya upeo inaweza kuamuliwa tu kwa kujua historia kamili ya baadaye ya anga-wakati.

Ufafanuzi rasmi unasema jambo lilelile kwa ufupi zaidi. Fikiria **future null infinity** — inayoitwa “I-plus” na kuandikwa $\mathcal{I}^+$ — kama mwisho unaofikiwa na mwanga unaotoroka milele kuelekea siku zijazo tupu na zilizo mbali bila kikomo. Upeo wa matukio ni mpaka kati ya matukio ambayo kutoka kwake ishara ya mwanga inayoelekea nje inaweza hatimaye kufika huko na matukio ambayo hakuna ishara kama hiyo itakayoweza kufika kamwe. Kwa alama sanifu za uhusiano wa jumla, ni mpaka wa zamani wa kisababishi wa future null infinity: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Kwa sababu neno *kamwe* limejengwa ndani ya ufafanuzi huo, hakuna kipimo kinachofanywa hapa na sasa pekee kinachoweza kuonyesha mahali halisi pa upeo wa matukio. Ganda la duara linaloporomoka linafanya hali ya ajabu ionekane wazi. Kabla ganda halijafika, eneo ndani yake linaweza kuwa tupu na tambarare kwa taarifa za eneo hilo. Tuma miale ya mwanga kuelekea nje kutoka katikati katika nyakati zinazofuatana: miale ya mapema hutoroka, huku ya baadaye ikikutana na ganda linaloporomoka katika jiometria ambayo haiwezi kutoka. Upeo wa matukio ni mpaka unaotenganisha matokeo hayo mawili. Ukiufuatilia kurudi nyuma, mpaka huo huanza katikati na kupanuka kupitia ndani ambayo bado ni tupu na tambarare kabla ganda halijafika. Kuongezeka kwa eneo lake hakuripoti mtiririko wowote wa maada wa eneo hilo; kunarekodi njia zipi za kutoroka hubaki wazi katika anga-wakati iliyokamilika.

Hakuna kitu katika picha hii kinachotenda kurudi nyuma kwa muda. Ikiwa ganda lingegeuzwa na shimo jeusi lisitokee, anga-wakati iliyokamilika ingekuwa tofauti na eneo hilo la awali lisingekuwa sehemu ya upeo wa matukio. Somo si kwamba siku zijazo hubadilisha yaliyopita, bali kwamba upeo wa matukio ni **mpaka wa kisababishi wa kimataifa**, si uso ambao mwan-galizi aliye karibu anaweza kuugundua katika muda mmoja. Hiyo ndiyo sababu wanafizikia hutumia upeo wa eneo la karibu au wenye mienendo wanapotaka kufuatilia shimo jeusi linapobadilika.

Hilo hufanya upeo wa matukio usifae kama taarifa inayoendelea ya “hali” ya shimo jeusi. Hata katika uigaji wa kompyuta huwezi kuutambua kwa usahihi mpaka uigaji umekwisha, na kwa hakika huwezi kuutumia kufuatilia joto au entropia dakika kwa dakika.

Hatua mpya: upeo unaoweza kufafanuliwa kwa taarifa ya eneo la karibu

Makala mpya, ya Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo na Jonathan Shu, inajenga matokeo yake juu ya dhana tofauti ya upeo — dhana ya **kieneo-takriban**, inayofafanuliwa tu na jimetri ya ujirani wake, bila kurejelea wakati ujao usio na kikomo. **Upeo huu wa kieneo-takriban** ndio nyuso ambazo wataalamu wa uhusiano wa jumla wa kinumeria tayari hutumia kutambua mahali pa mashimo meusi ya awali, kufuatilia kuungana, na kutambua mahali pa shimo jeusi linalobaki katika uigaji wote. Sheria za termodinamiki zilizotengenezwa hapa zinatumiwa kwa sehemu za upeo wa kieneo-takriban zinazotimiza masharti ya ziada ya **kipande cha upeo wenye mienendo**. Katika kila kipande kama hicho, eneo hubadilika moja kwa moja kulingana na mtiririko wa nishati wa eneo hilo, wala si kulingana na matukio ya wakati ujao wa mbali: huongezeka nishati chanya inapoingia na, kwa upeo wa aina ya wakati unaovukiza wenye mtiririko hasi wa nishati, hupungua.

Juu ya msingi huo, waandishi wanatatua nusu ngumu zaidi ya tatizo. Katika termodinamiki ya kawaida, mfumo ulio mbali na msawazo ni mgumu sana: huwezi kuupa kwa urahisi joto au shinikizo moja, kwa sababu kiasi hivyo hufafanuliwa vizuri mambo yanapotulia. Mashimo meusi yana tatizo hilo hilo — mpaka, waandishi wanaonyesha, utumie sifa maalumu ya uhusiano wa jumla. Shimo jeusi *katika* msawazo, yaani shimo jeusi la Kerr, hubainishwa na nambari mbili tu: ukubwa wake na mzunguko wake. Kwa hiyo waandishi wanajenga ramani inayochukua kila hali katika kipande cha upeo wenye mienendo na, katika kila sehemu-katizi ya kipande hicho, kusoma nambari mbili za shimo jeusi la msawazo ambalo hali hiyo inafanana nalo wakati huo. Kupitia ramani hiyo, shimo jeusi linalobadilika kwa vurugu linaweza kupewa **joto na mzunguko vinavyobadilika kwa muda** katika kipande hicho.

Kwa kutumia vipengele hivyo — nishati inayofafanuliwa kieneo ikivuka upeo, pamoja na vigezo intensivu vya papo hapo — wanapanua sheria ya kwanza hadi mashimo meusi yaliyo mbali kadiri yoyote na msawazo. Jambo muhimu ni kwamba sheria hiyo mpya inaeleza **mabadiliko yenye ukubwa wenye kikomo yanayosababishwa na michakato halisi ya kimwili** (maada na mawimbi ya mvuto yakivuka upeo), si hatua ndogo mno kati ya hali mbili zilizogandishwa. Wanaiunganisha na sheria ya pili inayolingana, ambayo kauli yake sasa ni *ya kiasi*: badiliko la eneo la upeo linahusishwa moja kwa moja na mtiririko wa nishati wa eneo hilo — ukuaji nishati chanya inapoingia, au kupungua kwa upeo wa aina ya wakati unaovukiza chini ya mtiririko hasi. Kwa pamoja, sheria ya kwanza na ya pili zinaelekeza kwenye hitimisho moja dhahiri — kwa kila awamu inayowakilishwa na kipande cha upeo wenye mienendo, hata iwe na vurugu kiasi gani, eneo la upeo wake bado ndilo kipimo sahihi cha entropia.

Hili *halithibitishi* nini

- **Haitatui** mvuto wa kwanta. Mfumo wa msingi umeundwa katika uhusiano wa jumla; matumizi yake kwa uvukizaji wa mashimo meusi yanatumia ukadiriaji wa nusu-klasiki, ambamo nyuga za maada za kwanta huathiri wakati-nafasi wa klasiki. Bado unachukulia utambulisho wa kawaida wa eneo la upeo na entropia kuwa sahihi, badala ya kuitoa entropia hiyo kutoka katika kitu cha msingi zaidi.
- **Halihesabu** hali ndogo ndogo za ndani wala kueleza entropia ya shimo jeusi “imetengenezwa” na nini. Linapanua uhasibu wa termodinamiki ya mashimo meusi; halifungui kisanduku na kuonyesha viwango vya uhuru vya kiwango kidogo.
- **Halitatui** kitendawili cha taarifa ya shimo jeusi. Kitendawili hicho kiko katika nadharia ya kwanta; makala hii haikishughulikii.
- **Si** uchunguzi wala kipimo. Hakuna darubini, data wala ishara ya mawimbi ya mvuto inayohusika — hii ni hisabati. “Joto” linalohusishwa na upeo wenye mienendo wakati shimo jeusi linabadilika ni kiasi kilichofafanuliwa kwa usahihi katika milinganyo, si kitu kinachoweza kusomwa kwenye kipimajoto.
- **Bado haitoi** maelezo endelevu ya kitermodinamiki ya mchakato mzima wa mashimo meusi mawili kuungana. Ugaji wa kinumeria hufuatilia upeo wa kieneo-takriban katika mabadiliko yote — kutoka mashimo meusi ya awali, kupitia kuungana, hadi shimo linalobaki — lakini kwa kipindi kifupi karibu sana na wakati wa kuungana, upeo huo hautimizi masharti yanayohitajika kwa kipande cha upeo wenye mienendo. Makala mwenza inasema kuwa maelezo ya kitermodinamiki ya kipindi hicho bado yanaandaliwa.
- **Haliwapindui** Bekenstein na Hawking. *Linapanua* picha yao hadi katika hali yenye mienendo ambako sheria ya awali, iliyotumika kwa msawazo pekee, haikuwa na kitu cha kusema.

Ushahidi una nguvu kiasi gani?

Ni thabiti kwa kazi ya aina hii: utafiti makini na wenye uthabiti wa ndani wa fizikia ya hisabati kutoka kwa kundi linaloongoza katika fani hiyo, uliochapishwa kama *Editors’ Suggestion* katika *Physical Review Letters*. Makala mwenza iliyopitiwa na wataalamu inatoa utoaji mrefu zaidi na kushughulikia hali zilizofupishwa na kuachwa nje ya Letter hiyo.

Tahadhari za uaminifu zinahusu *aina* ya dai, si ubora wake:

- Inategemea dhana ya kawaida kwamba eneo la upeo *ndilo* entropia (eneo likigawanywa kwa mara nne ya mara kwa mara ya Newton na ya Planck). Ikiwa utambulisho huo ungearekebisha siku moja na nadharia kamili ya mvuto wa kwanta, tafsiri ingebadilika pamoja nao.
- Kwa ajili ya ufupi na urahisi, Letter hiyo fupi inawasilisha utoaji mkuu kwa kutumia upeo wenye mienendo wa aina ya nafasi wenye ulinganifu wa mhimili. Makala mwenza iliyopitiwa na wataalamu inachanganua waziwazi upeo wenye mienendo wa aina ya wakati na kuunda momentamu ya pembe bila uga wa Killing wa mzunguko. Hata hivyo, kwa upeo wa aina ya wakati unaovukiza, ushughulikiaji wa wazi wa athari mrejesho unaishia kwenye ulinganifu wa tufe.

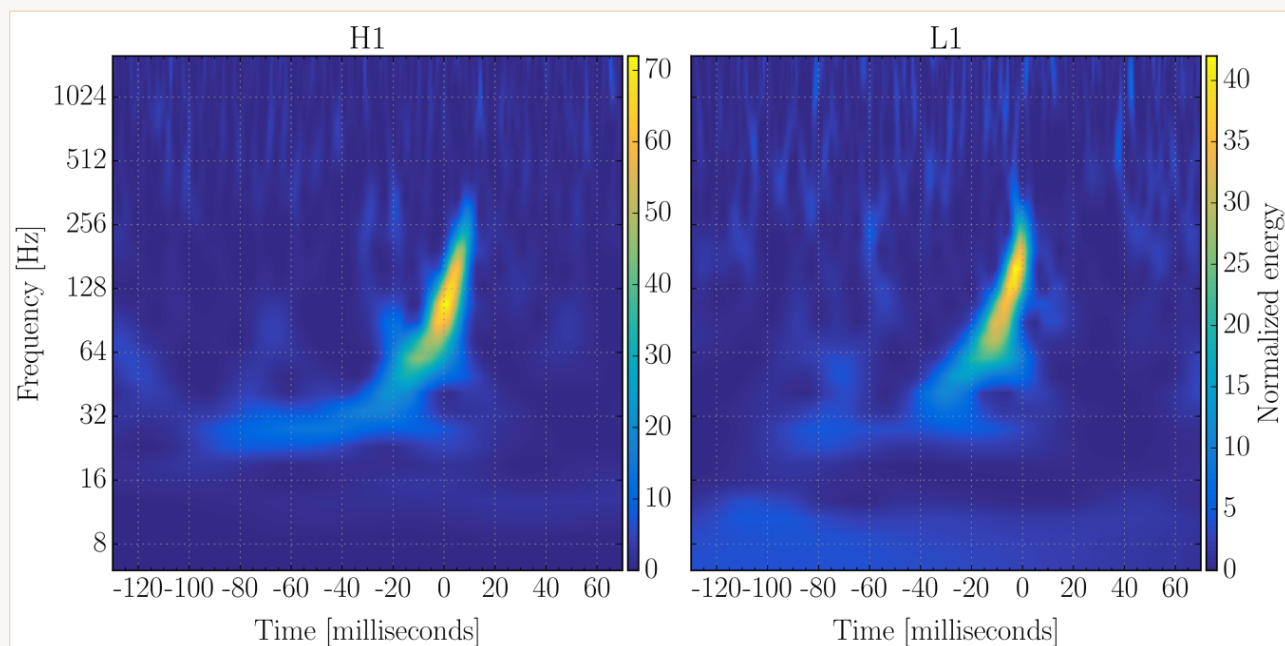
- “Entropia ni sawa na eneo la upeo, hata nje ya msawazo” ni *utambulisho* wenye ushawishi unao-fanywa kuwa wa asili na sheria mpya ya kwanza na ya pili — si theorem iliyotolewa kutoka takwimu za kiwango kidogo.

Kwa hiyo: ni upanuzi wenye ukali wa kihesabu wa mfumo wenye umri wa miaka hamsini, si ugunduzi wa majaribio wala sheria mpya ya asili inayosubiri kupimwa.

Kwa nini ni muhimu

Kuna sababu mbili, moja ya vitendo na moja ya kimawazo.

Kwa vitendo, mashimo meusi tunayoyachunguza sasa — yale ambayo LIGO na Virgo husikia yakiungana — huwa mbali na msawazo katika nyakati zao muhimu zaidi. Ugaji hufuatilia upeo wa kieneo-takriban kutoka mashimo meusi ya awali, kupitia kuungana, hadi shimo linalobaki. Kiasi katika makala hii vinatumika kwa sehemu za upeo huo zinazotimiza masharti ya vipande vya upeo wenye mienendo, kwa hiyo kazi hii inatoa njia yenye msingi wa kuzungumzia entropia na joto la shimo jeusi katika hatua nyingi za mabadiliko ya kuungana na wakati wa kuporomoka, si baada tu ya kila kitu kutulia. Katika kipindi kifupi kilicho karibu kabisa na kuungana, upeo wa kieneo-takriban unaendelea kufuatiliwa lakini unabaki nje ya maelezo ya sasa ya kitermodinamiki.



GW150914, ishara ya kwanza ya mawimbi ya mvuto kugunduliwa moja kwa moja, ilitoka kwa mashimo mawili meusi yaliyoungana. Ramani hizi za muda na marudio zinaonyesha ishara katika LIGO Hanford (kushoto) na LIGO Livingston (kulia): katika vigunduzi vyote viwili, mstari angavu unapanda kadiri marudio ya ishara yanavyoongezeka kuelekea kuungana. Huu ni mfano halisi wa mfumo wa mashimo meusi ulio mbali na msawazo; ni muktadha wa mfumo mpya wa termodinamiki, si ushahidi wa uchunguzi wa mfumo huo.

Kimawazo, tabia ya kitermodinamiki ya mashimo meusi ni mojawapo ya dalili chache madhubuti tulizo nazo kuhusu mvuto wa kwanta — ni mahali ambapo mvuto, nadharia ya kwanta na termodinamiki hukutana kwa wazi. Kufanya maana ya “entropia” na “joto” iwe sahihi zaidi kwa shimo jeusi linalobadilika kwa vurugu kunafanya lengo ambalo nadharia yoyote ya baadaye ya kwanta inapaswa kufikia liwe kali zaidi. Haliijibu swali la kina la entropia ya shimo jeusi ni nini hasa. Inaliweka swali hilo kwa usahihi zaidi — na katika kona hii ya fizikia, hilo ni sehemu kubwa ya kazi.

Muhtasari safi

Mashimo meusi hufuata sheria zinazofanana na termodinamiki, lakini “sheria ya kwanza” safi ya 1973 ililinganisha tu mashimo meusi yaliyotulia katika msawazo na haikuweza kueleza mchakato halisi. Ashtekar, Paraizo na Shu wanapanua sheria ya kwanza na ya pili hadi mashimo meusi yaliyo mbali kadiri yoyote na msawazo — yakipokea maada, yakiporomoka, yakitulia baada ya mtetemo na kupitia hatua nyingi za kuungana — kwa kutumia upeo wa kieneo-takriban, kutumia sheria za termodinamiki kwenye vipande vyake vya upeo wenye mienendo, na kujenga ramani inayopa kila hali katika vipande hivyo joto na spin ya papo hapo. Hitimisho ni kwamba eneo la upeo linaendelea kuwa kipimo sahihi cha entropia kwa kila awamu inayowakilishwa na kipande cha upeo wenye mienendo. Kipindi kifupi kilicho karibu sana na kuungana bado hakijashughulikiwa na maelezo hayo ya kitermodinamiki, ingawa uigaji unaendelea kufuatilia upeo wa kieneo-takriban. Mfumo wa msingi uko katika uhusiano wa jumla, ukiwa na matumizi ya nusu-klasiki kwa uvukizaji; si mvuto wa kwanta, uchunguzi, hesabu ya hali ndogo wala suluhisho la kitendawili cha taarifa.

Ukaguzi bila chumvi

Makala inaonyesha nini: Upanuzi wenye uthabiti wa kihesabu wa sheria ya kwanza na ya pili ya mekanika ya mashimo meusi hadi mashimo meusi yenye mienendo kamili na yaliyo mbali na msawazo, uliojengwa juu ya upeo wa kieneo-takriban na sehemu zake zinazotimiza masharti ya vipande vya upeo wenye mienendo. Inafafanua sheria ya kwanza ya mabadiliko yenye ukubwa wa mwisho inayotokana na mchakato halisi na sheria ya pili ya kiasi, na inafanya iwe ya asili kuhusisha entropia ya shimo jeusi lenye mienendo na eneo la upeo wake.

Ni nini halisi lakini ni tafsiri: Utambulisho “entropia = eneo la upeo” nje ya msawazo. Sheria mpya zinaufanya uwe wenye ushawishi, lakini unarithi dhana ya kawaida ya kiklasiki ya eneo na entropia badala ya kuutoa kutoka msingi wa takwimu.

Haionyeshi nini: Nadharia ya kwanta ya mvuto; asili ya kiwango kidogo au “hesabu” ya entropia ya shimo jeusi; suluhisho la kitendawili cha taarifa; tokeo lolote la uchunguzi au majaribio; au joto ambalo ungeweza kupima kimwili kwa kipimajoto.

Mapungufu makuu: Utoaji wa msingi uko katika uhusiano wa jumla, ilhali matumizi kwa uvukizaji wa aina ya wakati yanatumia ukadiriaji wa nusu-klasiki; kipindi kifupi kilicho karibu sana na kuungana kwa mashimo mawili hakiwakilishwi na kipande cha upeo wenye mienendo, na maelezo yake

ya kitermodinamiki bado yanaandaliwa, ingawa uigaji wa kinumeria unaendelea kufuatilia upeo wa kieneo-takriban; ushughulikiaji wa wazi wa athari mrejesho kwa upeo wa aina ya wakati unaovukiza unaishia kwenye ulinganifu wa tufe; utambulisho wa eneo na entropia unachukuliwa kuwa sahihi, wala haujathibitishwa kutoka kwa mekanika ya takwimu.

Msomaji wa kawaida anapaswa kuwa na imani kiasi gani? Imani kubwa kwamba huu ni maendeleo thabiti na yanayoheshimika ya kinadharia ambayo kweli yanapanua termodinamiki ya mashimo meusi hadi hali yenye mienendo. Na imani kubwa vilevile kwamba *si* dai kuhusu uchunguzi mpya, si mvuto wa kwanta, na si suluhisho la kitendawili maarufu cha taarifa. Msimamo unaofaa: ni hatua halisi ya kuelewa, iliyopigwa kwa chaki badala ya darubini.

Masasisho baada ya kuchapishwa

• Marekebisho · 2026-08-27

Baada ya maoni kutoka kwa mwandishi wa mawasiliano Abhay Ashtekar, tulisahisha kauli mbili zilizokuwa zimeeleza kuwa hali za aina ya wakati na zisizo na ulinganifu wa mhimili zilikuwa zimetolewa hoja tu, badala ya kushughulikiwa waziwazi katika makala mwenza iliyopitiwa na wataalamu. Wakati wa mapitio hayo, tulifanua pia kwamba mfumo bado haushughulikii kipindi kifupi kilicho karibu sana na kuungana kwa mashimo mawili, ambapo upeo wa kieneo-takriban hautimizi masharti ya kuwa kipande cha upeo wenye mienendo.

• Marekebisho · 2026-08-28

Baada ya ufafanuzi zaidi kutoka kwa mwandishi wa mawasiliano Abhay Ashtekar, tulitofautisha upeo wa kieneo-takriban, ambao uigaji wa kinumeria hufuatilia kutoka mashimo meusi ya awali, kupitia kuungana, hadi shimo linalobaki, na sehemu zinazotimiza masharti ya ziada ya vipande vya upeo wenye mienendo, ambako sheria za termodinamiki zinatumika.

Vyanzo

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>