NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-8]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

SKALYAR-TENZOR GRAVITATSIYA NAZARIYASIDA SIMPSON-VISSER FAZO-VAQTLARINING KRITIK CHEGARALARI VA RADIAL BARQARORLIK MASALASINING QO‘ YILISHI

Badalov Qodir Abdumalik o‘ g‘ li
Samarqand davlat pedagogika instituti dotsenti
Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti kichik ilmiy xodimi
ORCID: 0009-0000-2758-3777
E-mail: *kr.badalov@samdpi.uz*
Ibadov Rustam Mustafayevich
Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti professori
ORCID: 0000-0003-3841-3575
E-mail: *ibrustam@samdu.uz*
Shoqosimov Ilyos Asliddin o‘ g‘ li
Samarqand davlat pedagogika instituti talabasi
ORCID: 0009-0000-9034-9713
E-mail: *ilyosshoqosimov02@gmail.com*

Annotatsiya. *Maqolada Simpson-Visser regulyarlashtirilgan qora tuynuk – yumronqoziq fazo-vaqtining Bergmann-Vagoner-Nordtvedt sinfiga mansub skalyar-tenzor gravitatsiya nazariyasidagi tasviri tahlil qilindi. Metrikaning gorizontlari, bo‘ g‘ izi va “black-bounce” sohasi b/m o‘ lchamsiz parametr orqali klassifikatsiya qilindi. Minimal bo‘ lmagan bog‘ lanish funksiyasini aniqlovchi rekonstruksiya tenglamasining kritik nuqtalari $x = 0$ va, $b < 3m$ bo‘ lganda, $x = \pm\sqrt{9m^2 - b^2}$ ekanligi ko‘ rsatildi. Bog‘ lanish funksiyasining bo‘ g‘ iz yaqinidagi asimptotikasi $lnf \sim -[3m/(3m-b)]ln|x|$ ko‘ rinishda topildi. Natijada geometrik jihatdan regulyar Simpson-Visser fazo-vaqti bitta skalyar maydonli regulyar skalyar-tenzor nazariyada butun radial oralig‘ ida yagona global yechim sifatida ifodalanmasligi aniqlandi. $b < 3m$ da to‘ rtta, $b \geq 3m$ da esa ikkita alohida skalyar-tenzor soha hosil bo‘ ladi. Olingan natijalar asosida radial g‘ alayonlanishlar uchun fizik chegaraviy shartlar va spektral barqarorlik mezoni shakllantirildi.*

Kalit so‘ zlar: *Simpson-Visser metrikasi, regulyar qora tuynuk, yumronqoziq ini, skalyar-tenzor gravitatsiya, radial g‘ alayonlanish, barqarorlik.*

КРИТИЧЕСКИЕ ГРАНИЦЫ ПРОСТРАНСТВ-ВРЕМЁН СИМПСОНА-ВИССЕРА В СКАЛЯРНО-ТЕНЗОРНОЙ ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАДИАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Аннотация. *В статье исследовано представление регуляризованного пространства-времени Симпсона-Виссера в скалярно-тензорной теории гравитации класса Бергмана-Вагонера-Нордтведта. Горизонты, горловина и область black bounce классифицированы с помощью безразмерного параметра b/m. Показано, что критическими точками уравнения реконструкции неминимальной связи являются $x = 0$ и, при $b < 3m$, $x = \pm\sqrt{9m^2 - b^2}$. Найдена асимптотика функции связи вблизи горловины: $lnf \sim -[3m/(3m-b)]ln|x|$. Установлено, что геометрически регулярное пространство-время Симпсона-Виссера не может быть представлено как единое глобальное решение регулярной односкалярной теории во всём радиальном диапазоне. При $b < 3m$ возникают четыре, а при $b \geq 3m$ – две отдельные скалярно-тензорные области. Сформулированы физические граничные условия и спектральный критерий радиальной устойчивости.*

Ключевые слова: *метрика Симпсона-Виссера, регулярная чёрная дыра, кротовая нора, скалярно-тензорная гравитация, радиальные возмущения, устойчивость.*

CRITICAL BOUNDARIES OF SIMPSON-VISSER SPACETIMES IN SCALAR-TENSOR GRAVITY AND THE FORMULATION OF THE RADIAL STABILITY PROBLEM

Abstract. *The scalar-tensor representation of the regularized Simpson-Visser black-bounce spacetime is investigated within the Bergmann-Wagoner-Nordtvedt class of gravitational theories. The horizons, throat and black-bounce sector are classified in terms of the dimensionless ratio b/m. The reconstruction equation for the nonminimal coupling is shown to possess critical surfaces at $x = 0$*

and, for $b < 3m$, at $x = \pm\sqrt{9m^2 - b^2}$. The near-throat behavior of the coupling is found to obey $lnf \sim -[3m/(3m-b)]ln|x|$. Consequently, although the Simpson-Visser geometry is curvature regular, its one-scalar scalar-tensor representation cannot form a single globally regular solution over the whole radial range. Four separate scalar-tensor patches arise for $b < 3m$ and two patches for $b \geq 3m$. Physical boundary conditions and a spectral criterion for radial stability are formulated on this basis.

Keywords: *Simpson-Visser metric, regular black hole, wormhole, scalar-tensor gravity, radial perturbations, stability.*

Kirish

Umumiy nisbiylik nazariyasidagi qora tuynuk yechimlarining muhim muammolaridan biri fazo-vaqt egriligining markaziy singulyarligidir. Klassik nazariya doirasida singulyarlik geodeziklarning tugashi va fizik kattaliklarning cheksiz o‘ sishi bilan tavsiflanadi. Kvant gravitatsiyasi yakuniy nazariyasi mavjud bo‘ lmagan sharoitda singulyarlikni fenomenologik ravishda regulyarlashtiruvchi metrikalar kuchli gravitatsion maydon fizikasi uchun muhim model vazifasini bajaradi [1-3].

Simpson va Visser tomonidan taklif etilgan model Shvarsshild metrikasidagi sferik radiusni $\sqrt{x^2 + b^2}$ funksiya bilan almashtirishga asoslanadi [1]. Ushbu sodda almashtirish natijasida markaziy singulyarlik o‘ rnida chekli radiusli regulyar ikki o‘ lchamli sfera hosil bo‘ ladi. Regulyarlashtirish parametrining massaga nisbatiga qarab geometriya regulyar qora tuynuk, bir tomonlama ekstremal yumronqoziq ini yoki ikki tomonlama o‘ tkazuvchi yumronqoziq ini xususiyatlarini namoyon qiladi. Keyingi tadqiqotlarda ushbu geometriyaning sababiy tuzilishi, energiya shartlari, gravitatsion linzalanish, kvazinormal modalari va aylanuvchi umumlashmalari o‘ rganilgan [2, 3, 9-13].

Biroq berilgan regulyar metrikani ma’lum bir gravitatsiya nazariyasining aniq yechimi sifatida talqin qilish alohida masaladir. Avvalgi ishda ixtiyoriy statik, sferik-simmetrik metrikani ma’lum $f(\varphi)$, $h(\varphi)$ va $U(\varphi)$ funksiyalarga ega skalyar-tenzor nazariyaning vakuum yechimi sifatida bo‘ lakli rekonstruksiya qilish algoritmi ishlab chiqilgan [4]. Mazkur algoritm Reissner-Nordström va Simpson-Visser metrikalariga tatbiq qilingan. Shu bilan birga, rekonstruksiya funksiyalarining ayrim chegaralarda nolga yoki cheksizlikka intilishi fizik talqinni va g‘ alayonlanishlar uchun chegaraviy shartlarni murakkablashtiradi.

Skalyar-tenzor yechimlarning radial barqarorligini o‘ rganishda Jordan va Eynshteyn ifodasidagi g‘ alayonlanish tenglamalari bir-biriga konformal akslantirish orqali bog‘ lanadi. Lekin fizik chegaraviy shartlar konkret nazariya va fon yechimiga bog‘ liq bo‘ lib qoladi [5-8]. Shu sababli geometrik regulyarlikning o‘ zi dinamik barqarorlikni kafolatlamaydi. Maqolaning maqsadi Simpson-Visser fazo-vaqtining skalyar-tenzor rekonstruksiyasidagi kritik chegaralarni aniqlash, ularning parametrga bog‘ liq klassifikatsiyasini berish va radial barqarorlik masalasining matematik hamda fizik jihatdan to‘ g‘ ri qo‘ yilishini shakllantirishdan iborat.

Simpson-Visser fazo-vaqtining geometriyasi

Statik, sferik-simmetrik fazo-vaqt kvaziglobal radial koordinatada quyidagicha yoziladi:

$$ds^2 = A(x)dt^2 - A(x)^{-1}dx^2 - r^2(x)(d\theta^2 + sin^2\theta\, d\varphi^2) \quad (1)$$

Simpson-Visser modeli uchun metrika funksiyalari

$$r(x) = \sqrt{x^2 + b^2},$$
$$A(x) = 1 - \frac{2m}{\sqrt{x^2 + b^2}} = 1 - \frac{2m}{r(x)} \quad (2)$$

ko‘ rinishga ega. Bu yerda $m > 0$ asimptotik Shvarsshild massasi, $b > 0$ esa singulyarlikni regulyarlashtiruvchi uzunlik parametridir. x koordinata $-\infty < x < \infty$ oraliqda o‘ zgaradi, sferik radius esa $r \geq b$ shartni qanoatlantiradi. Uning birinchi va ikkinchi hosilalari

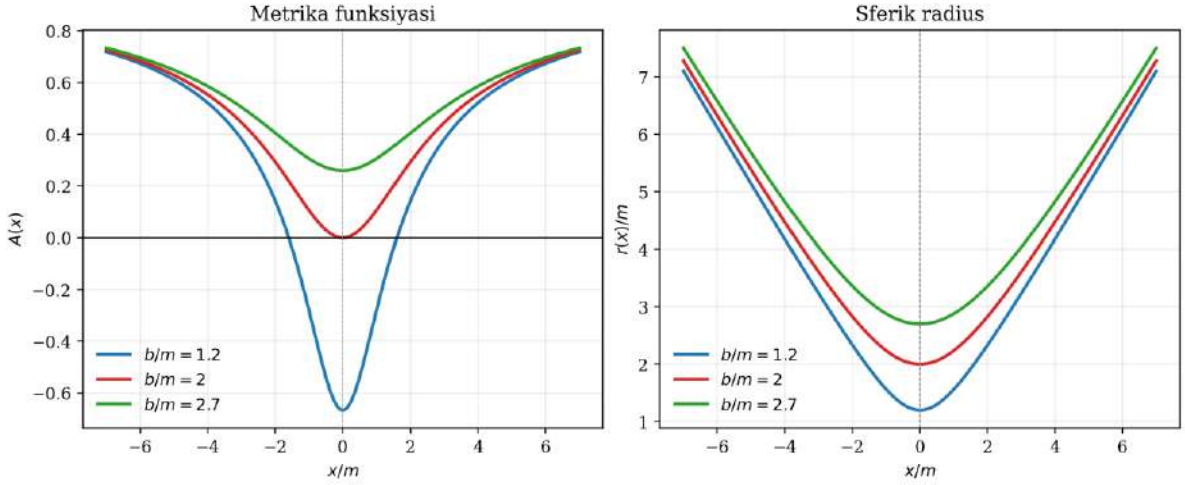
$$r' = \frac{x}{r}, \qquad r'' = \frac{b^2}{r^3} \quad (3)$$

bo‘ lib, $x = 0$ nuqtada $r(0) = b$, $r'(0) = 0$ va $r''(0) = \frac{1}{b} > 0$. Demak, $x = 0$ sferik radiusning regulyar minimumidir.

Gorizontlar $A(x⍰) = 0$ tenglamadan aniqlanadi:

$$x⍰^2 = 4m^2 - b^2 \quad (4)$$

Shuning uchun $0 < b < 2m$ da $x⍰ = \pm\sqrt{4m^2 - b^2}$ ikkita gorizont mavjud va $x = 0$ minimum $A(0) < 0$ bo‘ lgan dinamik sohada joylashadi. $b = 2m$ da minimum ikki karrali ekstremal gorizont bilan ustma-ust tushadi. $b > 2m$ da esa $A(x) > 0$ barcha x uchun bajariladi va $x = 0$ ikki asimptotik tekis sohani bog‘ lovchi o‘ tkazuvchi yumronqoziq ini bo‘ g‘ izidir.



1-rasm. *Simpson-Visser geometriyasining uchta talqinida A(x) va r(x) funksiyalari.*

1-jadval. *b/m parametriga bog‘ liq geometrik talqinlar.*

Parametr	Gorizontlar	$x = 0$ chegara	Geometrik talqin
$0 < b < 2m$	$x = \pm\sqrt{4m^2 - b^2}$	$A(0) < 0$	Ikki gorizontli regulyar qora tuynuk/black bounce
$b = 2m$	$x = 0$	$A(0) = 0$	Ekstremal bo‘ g‘ iz
$b > 2m$	Mavjud emas	$A(0) > 0$	O‘ tkazuvchi yumronqoziq ini

Skalyar-tenzor rekonstruksiya

Bergmann-Vagoner-Nordtvedt sinfidagi skalyar-tenzor nazariya ta’sir integrali [14-18]

$$S = \frac{1}{16\pi}\int d^4x\sqrt{-g}[f(\varphi)R + 2h(\varphi)g^{\mu\nu}\partial_\mu\varphi\partial_\nu\varphi - 2U(\varphi)] \quad (5)$$

ko‘ rinishda olinadi. $f(\varphi)$ skalyar maydonning egrilik bilan minimal bo‘ lmagan bog‘ lanishini, $h(\varphi)$ kinetik bog‘ lanishni, $U(\varphi)$ esa o‘ zaro ta’sir potensialini ifodalaydi. Fizik jihatdan odatiy gravitatsiya sohasi uchun $f(\varphi) > 0$ bo‘ lishi va u chekli qiymatga ega bo‘ lishi talab etiladi, chunki effektiv gravitatsion doimiy $G_{eff} \propto \frac{1}{f}$ munosabat bilan aniqlanadi. (1) metrika uchun tenglamalarning tegishli kombinatsiyasi minimal bo‘ lmagan bog‘ lanish funksiyasiga nisbatan birinchi tartibli tenglamani beradi [4]:

$$f(G^t{}_t - G^\theta{}_\theta) = f'\left[\frac{A'}{2} - \frac{Ar'}{r}\right]. \quad (6)$$

Bu tenglamada

$$F(x) = \frac{A'}{2} - \frac{Ar'}{r} \quad (7)$$

koeffitsiyent rekonstruksiyaning mavjudlik sohalarini belgilaydi. Simpson-Visser funksiyalarini qo‘ yib, quyidagi sodda natijani olamiz:

$$F(x) = \frac{x(3m-r)}{r^3}. \quad (8)$$

Shunday qilib, $x = 0$ har qanday $b > 0$ uchun kritik chegaradir. Agar $b < 3m$ bo‘ lsa, $r = 3m$ shartdan yana ikkita kritik chegara paydo bo‘ ladi:

$$x = \pm x_0, \qquad x_0 = \sqrt{9m^2 - b^2}. \quad (9)$$

Ushbu chegaralar metrika gorizontlari bilan ustma-ust tushmaydi. Masalan, gorizont $r = 2m$ da, qo‘ shimcha STN chegaralari esa $r = 3m$ da joylashadi. Demak, ular fazo-vaqt geometriyasining emas, aynan tanlangan skalyar-tenzor maydon tasvirining kritik chegaralaridir.

Minimal bo‘ lmagan bog‘ lanish funksiyasi va kritik asimptotikalar

$b \neq 3m$ holatda (6) tenglamaning integrali [4]

$$ln\left(\frac{f}{f_0}r\right) = -3m\frac{ln(r+b)}{[2(3m+b)]} - 3m\frac{ln(r-b)}{[2(3m-b)]} + \frac{b^2 ln|r-3m|}{9m^2-b^2} \quad (10)$$

ko‘ rinishga ega; $f_0 > 0$ integrallash doimiysi. Skalyar maydon parametrlarini

$$\varphi(x) = b^{-1}arctan\left(\frac{x}{b}\right), \qquad \varphi' = \frac{1}{x^2+b^2} = \frac{1}{r^2} \quad (11)$$

deb tanlash mumkin. Bunda $x = btan(b\varphi)$, $r = \frac{b}{cos(b\varphi)}$ va $-\frac{\pi}{2b} < \varphi < \frac{\pi}{2b}$. Ushbu belgilash skalyar maydonni har bir radial soha ichida monoton parametrga aylantiradi.

Bo‘ g‘ iz yaqinida $r - b = \frac{x^2}{2b} + O(x^4)$. (10) ifodaning qolgan ko‘ paytuvchilari $x = 0$ da nolga teng bo‘ lmagani uchun

$$lnf \sim -\left[\frac{3m}{3m-b}\right] ln|x|, \qquad x \to 0 \tag{12}$$

asimptotika kelib chiqadi. Bundan $b < 3m$ da $f \to \infty$, $b > 3m$ da $f \to 0$ ekanligi ko‘ rinadi. Maxsus $b = 3m$ holatda

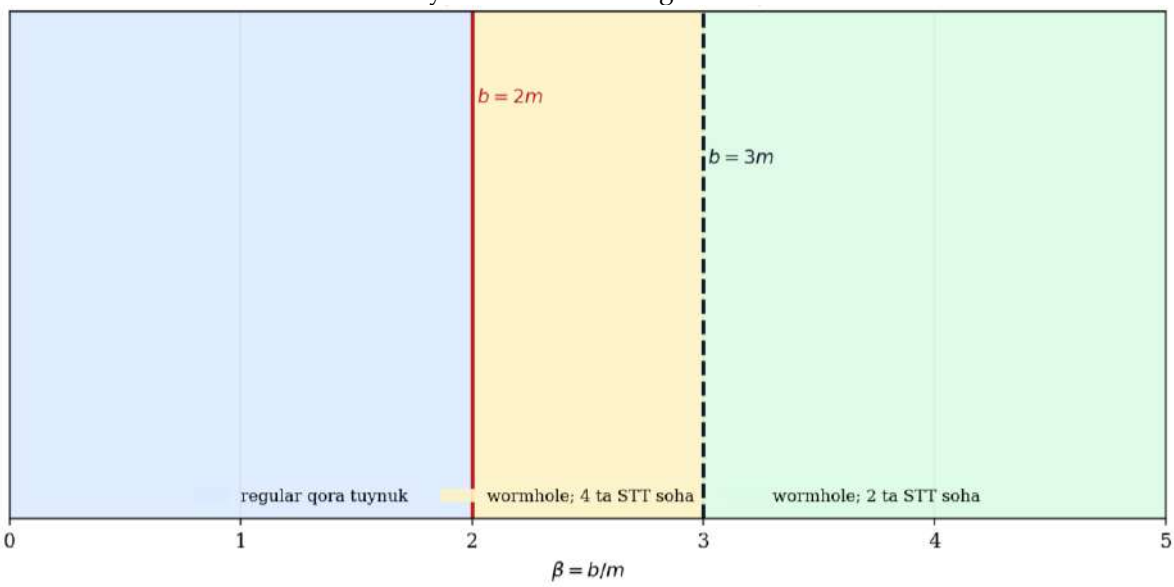
$$ln\left(\frac{f}{f_0}r\right) = -\left(\frac{1}{4}\right) ln(r+b) - \left(\frac{3}{4}\right) ln(r-b) - \frac{b}{2r-2b} \tag{13}$$

bo‘ lib, eksponensial ko‘ paytuvchi sababli $x \to 0$ da $f \to 0$. Shunday qilib, b ning hech bir qiymatida f bo‘ g‘ izda chekli, noldan farqli musbat qiymatni saqlamaydi.

$b < 3m$ bo‘ lganda $r = 3m$ yaqinida (10) ifodadagi daraja musbat:

$$\frac{b^2}{9m^2 - b^2} > 0 \tag{14}$$

Shu sababli $x \to \pm x_0$ da $f \to 0$. Natijada $b < 3m$ uchun to‘ rtta alohida STN sohasi, $b \geq 3m$ uchun esa $x = 0$ bilan ajratilgan ikkita soha hosil bo‘ ladi. Bu klassifikatsiya 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. *Geometrik holatlar va STN-rekonstruksiya sohasining tuzilishi.*

Radial g‘ alayonlanish masalasining qo‘ yilishi

Statik ifoda ustidagi sferik-simmetrik g‘ alayonlanishlarni umumiy holda

$$A \to A + \delta A(t,x), \quad r \to r + \delta r(t,x), \quad \varphi \to \varphi + \delta\varphi(t,x) \tag{15}$$

ko‘ rinishda kiritamiz. Sferik simmetriyada gravitatsion maydon mustaqil erkinlik darajasiga ega emas. Metrika g‘ alayonlanishlari bog‘ lanish tenglamalari orqali skalyar g‘ alayonlanish bilan ifodalanadi. Mos kalibrlash tanlangandan so‘ ng sistema yagona universal o‘ zgaruvchi $\Psi(t,x)$ uchun to‘ lqin tenglamasiga keltirilishi kerak [5-8]:

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2} + V_{eff}(z)\Psi = 0, \qquad \frac{dz}{dx} = \frac{1}{A(x)}. \tag{16}$$

Normal holatlar $\Psi = e^{i\omega t}Y(z)$ ko‘ rinishda ajratilsa, spektral masala

$$-\frac{d^2Y}{dz^2} + V_{eff}(z)\, Y = \omega^2 Y. \tag{17}$$

hosil bo‘ ladi. $\omega^2 < 0$ xos qiymat mavjud bo‘ lsa, $\omega = i\Omega$ ($\Omega > 0$) deb yozish mumkin va g‘ alayonlanish $e^{\Omega t}$ qonun bo‘ yicha o‘ sadi. Bu ifodalanish yechimining chiziqli radial beqarorligini bildiradi. Barcha xos qiymatlar $\omega^2 \geq 0$ bo‘ lsa, tegishli chegaraviy shartlar sinfida eksponensial o‘ suvchi radial holat mavjud emas.

Simpson-Visser STN-rekonstruksiyasida asosiy qiyinchilik V_{eff} ni hisoblashning o‘ zi emas, balki uning aniqlanish sohasi va fizik chegaraviy shartlardir. Chunki (12)-(14) natijalarga ko‘ ra f kritik chegaralarda nolga yoki cheksizlikka intiladi. Eynshteyn ifodasiga o‘ tish $\bar{g}_{\mathrm{uv}} = f g_{\mathrm{uv}}$ konformal almashtirish orqali bajarilganda, Jordan ifodasidagi regulyar chegara Eynshteyn ifodasida singulyar chegaraga aylanishi mumkin [7, 19]. Shuning uchun butun $-\infty < x < \infty$ oraliq uchun bitta oddiy Shturm-Liuvill masalasini yozish fizik jihatdan asoslanmagan.

Fizik chegaraviy shartlar

Asimptotik tekis sohada $r \sim |x|$ va $A \to 1$ bo‘ ladi. Lokal g‘ alayonlanish energiyasining chekliligi uchun $Y \to 0$ yoki kamida Y ning normallanuvchi bo‘ lishi talab etiladi. Qora tuynuk holatida tashqi gorizontda odatiy kiruvchi to‘ lqin sharti

qo‘ yiladi. Biroq STN sohasi chegaralarida asosiy invariant talab minimal bo‘ lmagan bog‘ lanishning nisbiy g‘ alayonlanishi orqali ifodalanadi:

$$\left|\frac{\delta f}{f}\right| < \infty. \qquad (18)$$

$\delta f = f_{\varphi}\delta\varphi$ bo‘ lganligi sababli (18) shart aniq asimptotikasidan $\delta\varphi$ va universal funksiya Y uchun chegaraviy shartga aylantiriladi. $f \to 0$ bo‘ lgan chegaralarda g‘ alayonlanish ifodasi bog‘ lanishidan tezroq o‘ smasligi, odatda $\delta f \to 0$ bo‘ lishi talab etiladi. $f \to \infty$ bo‘ lgan chegaralarda esa $\delta f/f$ ning chekliligi bilan birga g‘ alayonlanish ta’sirining ikkinchi variatsiyasi chekli ekanligi tekshirilishi kerak.

$b < 3m$ holatida masala $(-\infty, -x_0)$, $(-x_0, 0)$, $(0,\ x_0)$ va (x_0, ∞) oraliqlarda alohida qo‘ yiladi. $b \geq 3m$ da esa ikkita yarim fazo $(-\infty, 0)$ va $(0, \infty)$ mavjud. $x \to -x$ simmetriya tufayli soha funksiyalari juft bo‘ lsa ham, kritik chegara orqali oddiy uzluksizlik sharti avtomatik ravishda kelib chiqmaydi. Bunday shart faqat ta’sirning variatsion prinsipidan hosil qilingan chegara hadi yoki regulyarlashtirilgan fundamental model orqali asoslanishi mumkin.

Natijalar va muhokama

O‘ tkazilgan tahlil Simpson-Visser metrikasining geometrik regulyarligi va uning bir skalyar maydonli STN manbasining regulyarligi bir xil tushuncha emasligini ko‘ rsatdi. Metrikaning egrilik invariantlari $b > 0$ da chekli bo‘ lsada, rekonstruksiya tenglamasidagi $F(x)$ koeffitsiyent bo‘ g‘ izda nolga teng. Natijada minimal bo‘ lmagan bog‘ lanish funksiyasi bo‘ g‘ izda yoki cheksiz ortadi, yoki nolga intiladi. Bu holat effektiv gravitatsion doimiy $G_{eff} \propto \frac{1}{f}$ ning mos ravishda nolga yoki cheksizlikka intilishiga olib keladi. Ikkinchi muhim natija $b = 2m$ geometrik o‘ tish nuqtasi bilan $b = 3m$ maydoni rekonstruksiya o‘ tish nuqtasining farqlanishidir. $b = 2m$ qora tuynuk/yumronqoziq ini o‘ tishini belgilaydi. $b = 3m$ esa qo‘ shimcha $r = 3m$ kritik chegaralarning yo‘ qolishi va bo‘ g‘ izdagi f asimptotikasining o‘ zgarishini belgilaydi. Shunday qilib, parametrlar fazosida geometrik va maydoniy ikki xil bifurkatsiya mavjud. Uchinchi natija radial barqarorlik masalasiga taalluqlidir. Global regulyar STN fon mavjud bo‘ lmagani sababli alohida sohada topilgan ω^2 spektrini avtomatik ravishda butun yumronqoziq ini yoki black-bounce geometriyasining global barqarorligi sifatida talqin qilib bo‘ lmaydi. Spektral natija faqat tanlangan soha, chegaraviy shartlar va kritik chegaraning fizik talqini bilan birgalikda ma’noga ega. Mazkur xulosa konformal davom ettirishga ega skalyar-tenzor yumronqoziq inlari uchun chegaraviy shartlarning hal qiluvchi rol o‘ ynashi haqidagi natijalar bilan mos keladi [5-8, 19].

Natijalar Simpson-Visser geometriyasining boshqa global manbalarini ham ko‘ rib chiqish zarurligini ko‘ rsatadi. Umumiy nisbiylikda fantom skalyar maydon va nochiziqli elektrodinamika kombinatsiyasi ushbu metrikani regulyar manba bilan hosil qilishi mumkin [12, 13, 20]. Bunday modelda radial g‘ alayonlanishlar skalyar va elektromagnit erkinlik darajalarining bog‘ langan sistemasi sifatida o‘ rganiladi [21]. Bu bir maydonli STN rekonstruksiyasiga muqobil, ammo matematik jihatdan murakkabroq global barqarorlik masalasidir.

Xulosa

Tadqiqot natijalari Simpson-Visser fazo-vaqtining geometrik va skalyar-tenzor xususiyatlari b/m o‘ lchamsiz parametrga sezilarli darajada bog‘ liq ekanligini ko‘ rsatdi. Mazkur parametrning qiymatiga qarab fazo-vaqt regulyar qora tuynuk, ekstremal bo‘ g‘ iz yoki o‘ tkazuvchi yumronqoziq ini geometriyasini hosil qiladi. Shunday qilib, Simpson-Visser modeli yagona matematik ifoda doirasida bir-biridan sababiy va topologik jihatdan farqlanuvchi fazo-vaqt konfiguratsiyalari o‘ rtasidagi uzluksiz o‘ tishni tavsiflash imkonini beradi. Skalyar-tensor nazariya doirasidagi rekonstruksiya jarayonida asosiy koeffitsiyent $F = x(3m - r)/r^3$ ko‘ rinishda aniqlanadi. Ushbu koeffitsiyent $x = 0$ nuqtada, shuningdek, $b < 3m$ da $x = \pm\sqrt{9m^2 - b^2}$ kritik chegaralarni hosil qilishi aniqlandi.

Bo‘ g‘ iz yaqinida $ln\, f \sim -[3m/(3m - b)]ln|x|$ asimptotika olindi. Shuning uchun $b < 3m$ da $f \to \infty$, $b \geq 3m$ da $f \to 0$ ekanligi kelib chiqadi. Demak, skalyar-tenzor bog‘ lanish funksiyasi bo‘ g‘ izda yoki cheksiz kattalashadi, yoki nolga intiladi. Bu hol Simpson-Visser geometriyasini bitta skalyar maydonga asoslangan global regulyar skalyar-tenzor model yordamida to‘ liq tavsiflash mumkin emasligini ko‘ rsatadi.

Kritik sirtlarning mavjudligi fazo-vaqtning mustaqil skalyar-tenzor sohalarga ajralishiga olib keladi. Xususan, $b < 3m$ holdada to‘ rtta, $b \geq 3m$ holda esa ikkita mustaqil STN sohasi hosil bo‘ ladi. Shuning uchun radial g‘ alayonlanishlar uchun masalani butun fazo-vaqt bo‘ yicha yagona shaklda emas, balki har bir sohada alohida qo‘ yish lozim. Bunda g‘ alayonlanishlarning fizik mohiyatinini ta’minlovchi $|\delta f/f| < \infty$ chegaraviy shart bajarilishi talab etiladi.

Keyingi tadqiqotlarda skalyar-tenzor ta’sir integralining ikkinchi variatsiyasini hisoblash asosida radial g‘ alayonlanishlarning to‘ liq V_{eff} effektiv potensialini chiqarish maqsadga muvofiq. Ushbu potensial yordamida har bir mustaqil soha uchun kattaliklarning xos qiymatlarini sonli usullarda aniqlash, beqaror sohalar mavjudligini tekshirish va barqarorlik chegaralarini belgilash mumkin bo‘ ladi. Olingan natijalarni Simpson-Visser fazo-vaqtini global regulyar tavsiflaydigan skalyar maydon va nochiziqli elektrodinamikaga asoslangan model natijalari bilan taqqoslash esa turli maydonlarning geometrik hamda dinamik xususiyatlarini baholash imkonini beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Simpson, Alex & Visser, Matt. (2019). Black-bounce to traversable wormhole. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2019. 042-042. 10.1088/1475-7516/2019/02/042.

2. Lobo, F. S. N., Rodrigues, M. E., Silva, M. V. D. S., Simpson, A., & Visser, M. (2021). Novel black-bounce spacetimes: Wormholes, regularity, energy conditions, and causal structure. Physical Review D, 103(8), Article 084052. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.084052

3. Franzin, Edgardo & Liberati, Stefano & Mazza, Jacopo & Simpson, Alex & Visser, Matt. (2021). Charged black-bounce spacetimes. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2021. 036. 10.1088/1475-7516/2021/07/036.

4. Bronnikov, K.A., Badalov, K. & Ibadov, R. Arbitrary Static, Spherically Symmetric Space-Times as Solutions of Scalar-Tensor Gravity. Gravit. Cosmol. 29, 43–49 (2023). https://doi.org/10.1134/S0202289323010036 .

5. Bronnikov, K.A., Bolokhov, S.V., Skvortsova, M.V. et al. On the Stability of Spherically Symmetric Space-Times in Scalar-Tensor Gravity. Gravit. Cosmol. 29, 374–386 (2023). https://doi.org/10.1134/S0202289323040059 .

6. Bronnikov, K.A., Bolokhov, S.V., Skvortsova, M.V. et al. On the stability of electrovacuum space-times in scalar–tensor gravity. Eur. Phys. J. C 84, 1027 (2024). https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13420-2

7. K. A. Bronnikov; Scalar-tensor gravity and conformal continuations. J. Math. Phys. 1 December 2002; 43 (12): 6096–6115. https://doi.org/10.1063/1.1519667

8. Bronnikov, K.A., Fabris, J.C. & Zhidenko, A. On the stability of scalar-vacuum space-times. Eur. Phys. J. C 71, 1791 (2011). https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1791-2

9. Churilova, Mariia & Stuchlik, Z. (2020). Ringing of the regular black-hole/wormhole transition. Classical and Quantum Gravity. 37. 10.1088/1361-6382/ab7717.

10. Yang Y., Liu D., Xu Z., Xing Y., Wu S., Long Z.W. Echoes of novel black-bounce spacetimes // Physical Review D. – 2021. – Vol. 104. – Art. 104021.

11. Mazza, Jacopo & Franzin, Edgardo & Liberati, Stefano. (2021). A novel family of rotating black hole mimickers. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2021. 082. 10.1088/1475-7516/2021/04/082.

12. Cañate Casseres, Pedro. (2022). Black-bounces as magnetically charged phantom regular black holes in Einstein-nonlinear electrodynamics gravity coupled to a self-interacting scalar field. 10.48550/arXiv.2202.02303.

13. Bronnikov, K. A. "Black bounces, wormholes, and partly phantom scalar fields." Physical Review D 106.6 (2022): 064029.

14. Bergmann, P.G. Comments on the scalar-tensor theory. Int J Theor Phys 1, 25–36 (1968). https://doi.org/10.1007/BF00668828

15. R.V. Wagoner, “Scalar-Tensor Theory and Gravitational Waves”, Physical Review D, Vol. 1, No. 2, 1970, pp. 3209-3216.

16. Nordtvedt K. Post-Newtonian metric for a general class of scalar-tensor gravitational theories and observational consequences // Astrophysical Journal. – 1970. – Vol. 161. – P. 1059-1067.

17. Brans C., Dicke R.H. Mach’s principle and a relativistic theory of gravitation // Physical Review. – 1961. – Vol. 124. – P. 925-935.

18. Fisher I.Z. Scalar mesostatic field with regard for gravitational effects // Zhurnal Eksperimental’noy i Teoreticheskoy Fiziki. – 1948. – Vol. 18. – P. 636-640.

19. Bronnikov K.A., Grinyok S.V. Conformal continuations and wormhole instability in scalar-tensor gravity // Gravitation and Cosmology. – 2004. – Vol. 10. – P. 237-242.

20. Karakasis T. et al. Thermodynamically massless Simpson-Visser black holes. – 2026. – arXiv:2603.10429.

21. Bronnikov, K. A., Ibadov, R., Shaymanova, F. Y., & Shukurullokhon, N. M. (2026). Nonlinear electrodynamics and stability of spherically symmetric space-times in scalar-tensor gravity. arXiv preprint arXiv:2607.10718.