

تقارن پنهان سیاهچاله چرخان سه بعدی

سعیده صادقیان

گروه فیزیک نظری، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر

پست الکترونیکی: s.sadeghian@umz.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۵/۱۴)

چکیده:

در این پژوهش به تقارن‌های آشکار و پنهان فضا-زمان خمیده می‌پردازیم. این دو نوع تقارن آشکار و پنهان در این خاصیت که مولد آنها در فضای فاز پیمایش گر، همان ثوابت حرکتند، مشترک هستند. تفاوت آنها در این است که مولد تقارن پنهان از ادغام تانسور کیلینگ در دو یا تعدادی بیشتر از تکانه ذره به دست می‌آید، در حالی که برای تقارن آشکار، این مولد در تکانه ذره خطی است. بنابراین می‌توانیم از روی ثوابت حرکت پیمایش گر یک فضا-زمان خمیده به تانسورهای کیلینگ آن فضا-زمان پی ببریم. تانسورهای کیلینگ هندسه‌های چهاربعدی و همچنین با ابعاد بالاتر قبلاً مطالعه شده‌اند. در این کار، ما به این سؤال در مورد وجود تقارن پنهان در سیاهچاله چرخان سه بعدی، پاسخ می‌دهیم. برای این منظور، ما دو نوع پیمایش گر ذره آزاد و میدان نرده‌ای را مستقل از هم تحلیل می‌کنیم. با استفاده از ثوابت حرکت مربوط به آنها، نشان می‌دهیم که تانسور کیلینگ این سیاهچاله سه‌بعدی، بدیهی است.

واژه‌های کلیدی: تانسور کیلینگ، فضا-زمان خمیده، فضای فاز، میدان نرده‌ای

$$\nabla(\mu \xi^\nu) = 0, \quad (1)$$

۱. مقدمه

برای بردار μ^α به دست آورد. در اینجا منظور از پراتر دور شاخص‌ها این است که عبارت باید به صورت متقارن نسبت به آن شاخص‌های داخل پراتر نوشته شود. به وضوح، معادله ۰، یک معادله دیفرانسیل جزئی مرتبه اول است و جواب آن، تحت عنوان بردار کیلینگ شناخته می‌شود. با اعمال یک دیفیومورفیزم در راستای بردار کیلینگ، متریک فضا-زمان ناوردا باقی می‌ماند. به عنوان مثال، اگر برای یک فضا-زمان، بردار $\xi = \partial_t$ (که در پایه مختصاتی نوشته شده است) بردار کیلینگ باشد، متریک آن تقارن زمانی است. این هندسه‌ها را تحت عنوان هندسه پایا می‌شناسیم.

تقارن‌ها در فیزیک، به ساده‌سازی حل مسائل کمک می‌کنند. تعاریف مختلفی برای تقارن وجود دارد که در این کار، ما با این تعریف از تقارن سروکار خواهیم داشت: نگاهی در بین اعضای مجموعه جواب‌های یک معادله حرکت که یک جواب را به خودش یا به یک جواب دیگر می‌برد. در این صورت ناوردا تبدیل تقارنی، معادله حرکت حاکم بر آن جواب‌ها است.

در گرانش نسبیتی که به مطالعه هندسه فضا-زمان‌های خمیده، میدان‌های روی آن و دینامیک آنها می‌پردازد، تقارن‌های دقیق^۱ را می‌توان به‌طور مستقیم از حل معادله کیلینگ

تعمیم معادله ۰ برای تانسور مرتبه n -ام $K^{\mu_1 \dots \mu_n}$ ، به صورت

۱. تقارن دقیق در مقابل تقارن مجانبی به کار رفته است. برای تقارن مجانبی معادله کیلینگ به صورت تقریبی تا حدی که شرایط مرزی اجازه می‌دهند، برقرار است. در این کار به تقارن‌های مجانبی نمی‌پردازیم و در ادامه منظور ما از تقارن، تقارن دقیق است.

تانسور کیلینگ ساخته می‌شود، در فضای فاز ذره، تبدیل تقارنی ایجاد می‌کند. این درحالی است که اعمال این تبدیل در فضای فاز، تغییراتی در مختصات به وجود می‌آورد که با توان اول (یا بالاتر) تکانه متناسب است. در نتیجه در تصویر کردن اثر آن روی فضای پیکربندی که ذره در آن حرکت می‌کند، نمودی ندارد. از این جهت به این گونه تقارن‌ها، تقارن‌های پنهان گفته می‌شود. در مقابل به تقارن‌هایی که متناظر با بردار کیلینگ هستند، تقارن آشکار می‌گویند. از بحث بالا، کاملاً روشن است که از ضرب تانسوری دو بردار کیلینگ، یک تانسور مرتبه دوم کیلینگ به دست می‌آید. این نوع تانسورها را بدیهی می‌نامیم؛ زیرا به ثابت حرکت مستقلی از آن‌چه از بردار کیلینگ به دست می‌آید، منجر نمی‌شوند. یک تانسور کیلینگ بدیهی دیگر، خود متریک فضا-زمان است.

یادآوری می‌شود که اگر معادله پیمایش گر جداشدنی باشد، وجود ثوابت مستقل به تعداد کافی (یعنی برابر با بعد فضا-زمان)، آن مسئله را حل‌پذیر می‌کند [۱]. به همین جهت، برای شمارش دقیق ثوابت حرکت، مطالعه تانسورهای کیلینگ غیربدیهی اهمیت می‌یابد. به عنوان مثال، در سیاهچاله چرخان کر^۲ چهاربعدهی وجود تانسور کیلینگ غیربدیهی است که مسئله حرکت ذره آزاد را حل‌پذیر می‌کند [۲]. تانسورهای کیلینگ در سیاهچاله‌های با ابعاد بالاتر نیز مطالعه شده‌اند [۳]. در این کار، برای پی بردن به رفتارهای مشترک تقارن‌های پنهان در ابعاد مختلف، به مطالعه تقارن‌های پنهان در سه بعد می‌پردازیم تا درک بهتری از زوایای پنهان آن داشته باشیم. در سه بعد، تنها جواب سیاهچاله برای نظریه اینشتین خالص با ثابت کیهانی منفی، سیاهچاله BTZ نامیده می‌شود [۴]. آهنگ واپاشی این سیاهچاله به میدان نرده‌ایی که به صورت کمینه با آن برهم‌کنش دارد، در چارچوب گرانش و همچنین نظریه میدان همدیس دوگان مطالعه شده است [۵]. در اینجا، از دیدگاه تقارن‌های پنهان به این مسئله می‌پردازیم و وجود تانسور کیلینگ غیربدیهی برای این سیاهچاله چرخان سه‌بعدهی را تحقیق می‌کنیم. برای این منظور ابتدا پیمایش گر ذره آزاد را بررسی می‌کنیم. سپس میدان نرده‌ایی که در معادله کلاین-گوردون

$$\nabla^{\nu} ({}^{\nu} K^{\mu_1 \dots \mu_n}) = 0, \quad (2)$$

نوشته می‌شود. جواب این معادله را تحت عنوان تانسور کیلینگ می‌شناسیم. اگرچه هنوز اثر تقارنی تانسور کیلینگ روی هندسه به خوبی شناخته نشده است در ادامه، مفهوم تقارنی تانسور کیلینگ را شرح می‌دهیم.

یک روش دیگر برای یافتن تقارن‌های یک فضا-زمان خمیده، کمک گرفتن از پیمایش‌گرهای مختلف از جمله ذره آزاد، میدان نرده‌ای یا میدان‌های با اسپین بالاتر است که به‌طور کمینه با گرانش جفت شده‌اند؛ زیرا تقارن‌های فضا-زمان در دینامیک این پیمایش‌گرها نمود پیدا می‌کند. هر یک از این پیمایش‌گرها در معادله حرکت مخصوص به خود صدق می‌کند. در نتیجه برای هر پیمایش‌گر می‌توان فضای فاز جواب‌های معادله حرکت را ساخت. به عنوان مثال، فضای فاز برای ذره آزاد که روی فضا-زمان خمیده حرکت می‌کند، همان فضای کتانژانت مربوط به خمینه است. هر تبدیلی در این فضای فاز، یک تقارن است؛ زیرا جواب را به جواب می‌برد. تحول زمانی ذره نیز با هامیلتونی آن داده می‌شود. ثوابت حرکت ذره، یعنی توابعی که تحت تحول زمانی ثابت هستند، به تقارن‌های فضا-زمان مربوط می‌شوند. اگر بردار کیلینگ خمینه‌ای که ذره روی آن حرکت می‌کند ξ باشد، می‌توان نشان داد که تابع زیر یکی از ثوابت حرکت آن است:

$$C_{\xi} = \xi^{\mu} p_{\mu}. \quad (3)$$

در اینجا p_{μ} معرف تکانه ذره است. به عنوان نمونه، برای ذره‌ای که روی فضا-زمان پایا حرکت می‌کند، انرژی ذره، یک ثابت حرکت است.

ممکن است ثابت حرکت، از توان دوم تکانه (یا توان‌های بالاتر تکانه) ساخته شود. برای این‌که شاخص‌های این تعداد تکانه آزاد نباشد، باید آنها را با تانسور مرتبه دوم (یا مرتبه بالاتر) ادغام کنیم. در این صورت شرط این‌که تابع C_K که به صورت

$$C_K = K^{\mu_1 \dots \mu_n} p_{\mu_1} \dots p_{\mu_n}, \quad (4)$$

تعریف می‌شود، ثابت حرکت باشد، این است که در معادله کیلینگ 0 صدق کند. به عبارت دیگر، تابع C_K که از روی

¹ Probe

² Kerr

$$p_r = \sqrt{\frac{(C_T - \Omega C_\varphi)^2}{f^2} - \frac{P_\varphi^2}{r^2 f} - \frac{m_0^2}{f}} \quad (12)$$

بنابراین، معادله هامیلتون-ژاکوبی در فضا-زمان سه بعدی با متریک 0 به طور کامل جداشدنی است. از آنجایی که سه ثابت حرکت C_T و C_φ و m_0 در سه بعد برای حل این معادله کافی است، این مسئله، حل پذیر است.

۳. معادله کلاین-گوردون

اگر به جای یک ذره از یک میدان نرده ای $\Phi(t, r, \varphi)$ به جرم M ، که در معادله کلاین-گوردون

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{\sqrt{-g}} \partial_\mu (\sqrt{-g} g^{\mu\nu} \partial_\nu \Phi) = M^2 \Phi, \quad (13)$$

صدق می کند، برای پیمایش گر فضا-زمان خمیده استفاده کنیم، اثر تقارن های آشکار و پنهان هندسه را در فضای فاز جواب های این معادله، مشاهده خواهیم کرد.

لازم به ذکر است که منظور از $\sqrt{-g}$ ، جذر قدر مطلق دترمینان متریک 0 است و مقدار آن با یک محاسبه ساده به دست می آید $\sqrt{-g} = r$.

بازنویسی معادله 0، نتیجه می دهد

$$\partial_r (rf \partial_r \Phi) + \frac{1}{r^2} \partial_\varphi^2 \Phi - \frac{1}{f} (\partial_t - \Omega \partial_\varphi)^2 \Phi = M^2 \Phi. \quad (15)$$

همانند ذره آزاد، برای میدان نرده ای نیز دو ثابت حرکت متناظر با تقارن های زمانی و سمتی وجود دارد. آنها را به ترتیب معرفی می نامیم. سپس با پیشنهاد زیر برای میدان نرده ای

$$\Phi(t, r, \varphi) = e^{-i(\omega t - m\varphi)} R(r), \quad (16)$$

بخش زمانی و زاویه ای معادله 0 به راحتی از بخش شعاعی جدا می شوند و به صورت زیر درمی آید:

$$\partial_r (rf \partial_r R) + \left[\frac{(r^2 \omega + abm)^2}{r^2 f} - \frac{m^2}{r^2} \right] R = M^2 R. \quad (17)$$

این رابطه نیز یک معادله دیفرانسیل معمولی برای $R(r)$ و علی الاصول قابل حل است. بنابراین معادله کلاین-گوردون روی هندسه سه بعدی با متریک 0، حل پذیر است.

جرم دار صدق می کند را به عنوان پیمایش گر این فضا-زمان خمیده مطالعه می کنیم. ثوابت حرکت آنها، اطلاعات لازم در مورد تانسور کیلینگ و تقارن پنهان این سیاهچاله سه بعدی را در اختیار ما قرار می دهد.

۲. معادله هامیلتون-ژاکوبی

برای ذره آزادی به جرم m_0 که روی مسیر زمان گونه حرکت می کند، معادله هامیلتون-ژاکوبی به صورت

$$p^\alpha = g^{\mu\nu} p_\mu p_\nu = -m_0^2, \quad (5)$$

برقرار است (p_μ تکانه ذره است). در اینجا فضا-زمان خمیده ای را که ذره که روی آن حرکت می کند، سیاهچاله سه بعدی در نظر می گیریم [۴]. متریک این سیاهچاله به صورت

$$ds^2 = -f(r) dt^2 + \frac{dr^2}{f(r)} + r^2 (d\varphi + \Omega(r) dt)^2, \quad (6)$$

نوشته می شود که در آن، توابع $f(r)$ و $\Omega(r)$ به صورت زیر داده می شوند:

$$f(r) = \frac{(r^2 - a^2)(r^2 - b^2)}{\ell^2 r^2}, \quad (7)$$

$$\Omega(r) = -\frac{ab}{r^2 \ell}. \quad (8)$$

در اینجا، a و b به ترتیب شعاع افق های داخلی و خارجی و ℓ شعاع فضای پاد-دسته است. در ادامه فرض می کنیم $\ell = 1$. همچنین از نوشتن صریح تابعیت r در توابع متریک خودداری می کنیم. برای ساده سازی معادله 0، به معکوس متریک بالا، نیاز داریم که در اینجا آن را ارائه می دهیم

$$\left(\frac{\partial}{\partial s}\right)^2 = -\frac{1}{f} (\partial_t - \Omega \partial_\varphi)^2 + f \partial_r^2 + \frac{1}{r^2} \partial_\varphi^2. \quad (9)$$

با استفاده از این نتیجه در معادله 0 داریم،

$$-\frac{1}{f} (p_t - \Omega p_\varphi)^2 + f p_r^2 + \frac{1}{r^2} p_\varphi^2 = -m_0^2. \quad (10)$$

با توجه به این که فضا-زمان مورد بحث تقارن زمانی و سمتی دارد، بردارهای کیلینگ مربوط به تقارن های یاد شده یعنی ∂_t و ∂_φ به ترتیب، به ثوابت حرکت

$$C_T = p_t, \quad C_\varphi = p_\varphi, \quad (11)$$

که همان انرژی و تکانه زاویه ای ذره هستند، منجر می شوند.

به این ترتیب، معادله 0 را می توان ساده کرد

۴. نتیجه گیری

داده می شوند. این مولدها بخشی از بردارهای کیلینگ موضعی متریک 0 هستند و در جبر زیر صدق می کنند:

$$[A_+, A_-] = A_+, [A_-, A_+] = -A_-, [A_+, A_+] = 2A_+. \quad (18)$$

بخش دیگر تقارن های آشکار فضا- زمان مورد بحث، گروه $SL(2, R)$ دیگری است که مولدهای آن عبارتند از:

$$B_{\pm} = \frac{1}{2(a-b)} (\partial_t + \partial_{\phi}),$$

$$B_{\pm} = e^{\mp(a-b)(t+\phi)} \left(-\frac{(a^{\pm} + b^{\pm} - ab - r^{\pm})}{2(a-b)\sqrt{r^{\pm}f}} \partial_{\phi} \right. \\ \left. \pm \frac{\sqrt{f}}{2} \partial_r - \left[\frac{ab - r^{\pm}}{2(a-b)\sqrt{r^{\pm}f}} \right] \partial_t \right),$$

این مولدها نیز جبری مشابه 0 دارند و با تمام A_{\pm} جابه جا می شوند. نکته جالب اینجاست که کازیمیر مرتبه دوم هر دو گروه $SL(2, R)$ با هم مساوی

$$C_{\mp} = A_{\mp}^{\pm} - A_{(\mp)} A_{\pm} = B_{\mp}^{\pm} - B_{(\mp)} B_{\pm}, \quad (19)$$

و برابر عملگر لاپلاسی هستند که روی میدان نرده ای اثر می کند. در نتیجه جرم میدان نرده ای نیز که ویژه مقدار این عملگر است، ثابت حرکتی است که از تانسور کیلینگ بدیهی حاصل شده است.

در بخش های قبل، دو پیمایش گر ذره آزاد و میدان نرده ای را روی فضا-زمان سه بعدی سیاهچاله چرخان مطالعه کردیم و مشاهده کردیم که معادله حرکت هر دوی آنها حل پذیر است. در مورد ذره آزاد این حل پذیری با وجود ثوابت حرکت انرژی و تکانه زاویه ای و جرم، واقع شد. دو ثابت اول از بردارهای کیلینگ مربوطه، از رابطه 0 به دست می آیند. در حالی که در مورد جرم وضعیت کمی متفاوت است، طبق رابطه 0 این ثابت حرکت متناظر با تانسور متریک است. در نتیجه هیچ یک از ثوابت حرکت از تانسور مرتبه دوم غیربدیهی به دست نمی آیند. در مورد میدان نرده ای نیز وضعیت به همین ترتیب است. بنابراین، این هندسه تانسور کیلینگ مرتبه دوم غیربدیهی ندارد. از طرفی می توان این بدیهی بودن تانسور کیلینگ مرتبه دوم را به گونه دیگری نیز مشاهده کرد. معادله 0 را می توان برحسب کازیمیر مرتبه دوم گروه $SL(2, R)$ نوشت. مولدهای این گروه به این صورت

$$A_{\pm} = \frac{1}{2(a+b)} (-\partial_t + \partial_{\phi}),$$

$$A_{\pm} = e^{\pm(a+b)(t-\phi)} \left(-\frac{(a^{\pm} + b^{\pm} + ab - r^{\pm})}{2(a+b)\sqrt{r^{\pm}f(r)}} \partial_{\phi} \right. \\ \left. \pm \frac{\sqrt{f}}{2} \partial_r - \left[\frac{ab + r^{\pm}}{2(a+b)\sqrt{r^{\pm}f}} \right] \partial_t \right),$$

مراجع

1. V Arnold, "Mathematical Methods of Classical Mechanics", Graduate Texts in Mathematics. Vol. 60. Translated by K Vogtmann, A D Weinstein, (2nd ed.), New York: Springer-Verlag (1978).
2. B Carter, *Phys. Rev.* **174** (1968) 1559.
3. V Frolov, P Krtous, and D Kubiznak, *Living Rev. Rel.* **20**, 1 (2017) 6.
4. M Banados, C Teitelboim, and J Zanelli, *Phys. Rev. Lett.* **69** (1992) 1849.
5. D Birmingham, I Sachs, and S Sen, *Phys. Lett. B* **413** (1997) 281.