

ترمودینامیک سیاه‌چاله RN-dS احاطه شده با انرژی تاریک

کمال قادری*

گروه فیزیک، واحد مریوان، دانشگاه آزاد اسلامی، مریوان، ایران

دریافت: ۹۹/۰۷/۱۱ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

چکیده

مشاهدات رصدی نشان می‌دهد که جهان دارای انبساطی شتابدار بوده که ناشی از وجود نوعی انرژی به نام انرژی تاریک، با فشار منفی می‌باشد. در این مقاله، به بررسی تأثیر وجود ماده کوپنتسنس به عنوان یکی از مقبول‌ترین مدل‌های انرژی تاریک، بر روی ترمودینامیک سیاه‌چاله RN-dS، خواهیم پرداخت. با استفاده از قوانین ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها و در نظر گرفتن ثابت کیهان‌شناسی به عنوان فشار ترمودینامیکی، کمیت‌های دما، آنتروپی، ظرفیت گرمایی، معادله حالت، آنتالپی و انرژی آزاد گیبس مربوط به این سیاه‌چاله را در حضور ماده کوپنتسنس، محاسبه نموده و سپس به تحلیل نتایج حاصل خواهیم پرداخت.

واژه‌های کلیدی: انرژی تاریک، سیاه‌چاله، کوپنتسنس، ترمودینامیک، RN-dS

مقدمه

مشاهدات رصدی نشان می‌دهد که جهان دارای انبساطی شتابدار بوده که ناشی از وجود نوعی انرژی به نام انرژی تاریک با فشار منفی می‌باشد و این انرژی حدود ۷۰ درصد چگالی عالم را تشکیل می‌دهد. این انبساط بر اساس داده‌های مشاهداتی از ابرنواخترهای نوع یک، تابش زمینه کیهانی و نیز نظریه ساختار مقیاس بزرگ که حاکم بر نحوه شکل‌گیری ساختار عالم است، تایید شده است [۱-۵].

امروزه مطالعات بسیاری جهت شناخت ماهیت انرژی تاریک صورت گرفته و یکی از کاندیدهای اصلی برای این انرژی، ماده کوپنتسنس^۱ می‌باشد که از مقبولیت بالایی برخوردار است. کوپنتسنس به وسیله یک میدان اسکالر دینامیک با پارامتر حالت $-\frac{1}{3} < \omega_q < -1$ تعریف می‌گردد که پتانسیل آن با افزایش بزرگی میدان اسکالر، کاهش می‌یابد [۶].

^۱ Quintessence

* نویسنده مسئول k.ghaderi.60@gmail.com

کیسلو^۲ سیاه‌چاله‌های احاطه شده با ماده کوپنتسنس را معرفی کرده و با استفاده از معادلات میدان اینشتین، برای حالت‌های باردار و بدون بار، راه حل‌های جدیدی را ارائه نموده است [۷].

ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها، یکی از جذاب‌ترین موضوعات کیهان‌شناسی مدرن بوده که به مطالعه قوانین ترمودینامیک در افق رویداد سیاه‌چاله پرداخته و به عنوان عرصه‌ای برای بررسی گرانش کوانتومی، مورد توجه افراد بسیاری قرار گرفته است. سیاه‌چاله‌ها همانند یک سیستم ترمودینامیکی عمل می‌کنند که طبق نظریه میدان‌های کوانتومی در فضا-زمان خمیده، تابشی از افق رویداد خود ساطع می‌کنند که تابش هاوکینگ نام دارد. این تابش، دارای دمای ویژه‌ای است که با گرانش سطحی در افق رویداد سیاه‌چاله متناسب است. همچنین سیاه‌چاله‌ها دارای آنتروپی برابر با یک چهارم مساحت سطح افق رویداد خود می‌باشند [۸].

یکی دیگر از موضوعات جالبی که امروزه مورد توجه قرار گرفته است، بررسی تأثیر وجود انرژی تاریک بر روی ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها می‌باشد [۹-۱۴]. در این تحقیق با استفاده از روش ارائه شده توسط کیسلو و قوانین ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها و با در نظر گرفتن ثابت کیهان‌شناسی به عنوان فشار ترمودینامیکی و برای حالت $\omega_q = -\frac{2}{3}$ ، به بررسی اثرات انرژی تاریک بر روی ترمودینامیک سیاه‌چاله RN-dS، پرداخته و کمیت‌های دما، آنتروپی، ظرفیت گرمایی، معادله حالت، آنتالپی و انرژی آزاد گیبس مربوط به این سیاه‌چاله را در حضور ماده کوپنتسنس، محاسبه نموده و به تحلیل نتایج حاصل خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است که سیاه‌چاله RN-dS در مقایسه با سیاه‌چاله‌های شوارتزشیلد، رایسنر-نوردستروم و شوارتزشیلد-دوسیته، که در مطالعات قبلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، دارای متریک و خواص متفاوتی می‌باشد که منجر به محاسبات و نتایج متمایزی خواهد شد.

در بخش دوم این مقاله، به معرفی سیاه‌چاله RN-dS احاطه شده با کوپنتسنس می‌پردازیم. در بخش سوم، کمیت‌های ترمودینامیکی این سیاه‌چاله در حضور کوپنتسنس مورد مطالعه قرار خواهند گرفت و در پایان، بحث و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

سیاه‌چاله RN-dS احاطه شده با کوپنتسنس

در این بخش با استفاده از روش ارائه شده توسط کیسلو [۷]، به بررسی سیاه‌چاله RN-dS احاطه شده با ماده کوپنتسنس خواهیم پرداخت. این سیاه‌چاله‌ها دارای هندسه‌ای با متریک زیر می‌باشد [۷]

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + f(r)^{-1}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (۱)$$

که $f(r)$ به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$f(r) = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2} - \frac{\Lambda r^2}{3} - \frac{c}{r^{3\omega_q+1}} \quad (۲)$$

^۲ Kiselev

در این جا M ، Q و Λ به ترتیب، جرم، بار الکتریکی و ثابت کیهان‌شناسی می‌باشند. ω_q نیز معرف پارامتر حالت ماده کوینتسنس می‌باشد که به صورت $-\frac{1}{3} < \omega_q < -1$ معرفی می‌گردد و C ضریب نرمالیزاسیون است. معادله حالت ماده کوینتسنس با رابطه زیر تعریف می‌شود

$$P_q = \omega_q \rho_q \quad (۳)$$

به طوری که ρ_q چگالی انرژی کوینتسنس می‌باشد که برابر است با [۷]

$$\rho_q = \frac{-c}{2} \frac{3\omega_q}{r^{3(1+\omega_q)}} \quad (۴)$$

و P_q معرف فشار ماده کوینتسنس است. برای داشتن انبساط شتابدار مثبت عالم، فشار ماده کوینتسنس باید منفی باشد. همچنین توجه داشته باشید که چگالی انرژی باید مثبت باشد، به همین دلیل برای ω_q منفی، پارامتر C باید مثبت باشد. در این پژوهش، به بررسی کمیت‌های ترمودینامیکی سیاه‌چاله RN-dS احاطه شده با کوینتسنس به ازای $\omega_q = -\frac{2}{3}$ می‌پردازیم. در این حالت متریک به صورت تابع درجه چهار ظاهر می‌شود که تعیین ریشه‌ها و محاسبه افق به صورت تحلیلی امکان پذیر بوده و بهتر می‌توان در مورد نتایج و رفتار کمیت‌های ترمودینامیکی این سیاه‌چاله در حضور انرژی تاریک بحث نمود. بنابراین $f(r)$ را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$f(r) = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2} - \frac{\Lambda r^2}{3} - cr \quad (۵)$$

بر اساس روابط صریح ریاضی برای محاسبه ریشه‌های معادله درجه چهار، می‌توان نشان داد که $f(r)$ دارای چهار ریشه می‌باشد که به ازای تمامی مقادیر M ، Q ، Λ و c دو تا از ریشه‌ها همواره مختلط و یکی منفی بوده و فقط یک ریشه حقیقی مثبت دارد و همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این ریشه به عنوان افق سیاه‌چاله (r_+) در نظر گرفته می‌شود. با جایگزین نمودن $\Lambda := a$ ، $b := 3c$ ، $g := -3$ ، $d := 6M$ و $e := -3Q^2$ می‌توان r_+ را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$r_+ = -\frac{b}{4a} - x + \frac{1}{2} \sqrt{-4x^2 - 2y + \frac{z}{x}} \quad (۶)$$

که در این جا

$$y = \frac{8ag - 3b^2}{8a^2} \quad (۷)$$

$$z = \frac{b^3 - 4abg + 8a^2d}{8a^3} \quad (۸)$$

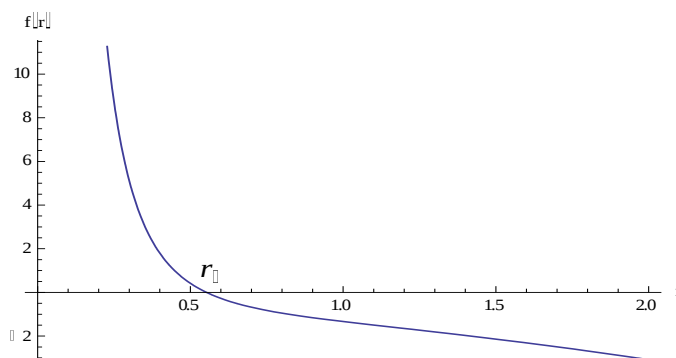
$$x = \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{2}{3}y + \frac{1}{3a} \left(k + \frac{\Delta_0}{k}\right)} \quad (۹)$$

$$k = \sqrt[3]{\frac{\Delta_1 + \sqrt{\Delta_1^2 - 4\Delta_0^3}}{2}} \quad (۱۰)$$

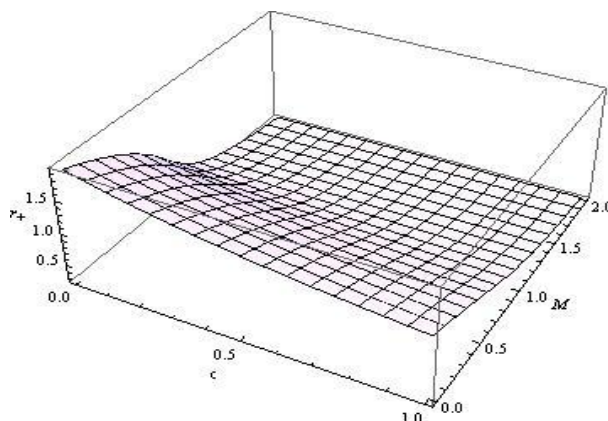
$$\Delta_0 = g^2 - 3bd + 12ae \quad (۱۱)$$

$$\Delta_1 = 2g^3 - 9bgd + 27b^2e + 27d^2a - 72age \quad (۱۲)$$

در شکل ۲، نمودار تغییرات r_+ بر حسب M و c رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که افزایش جرم و حضور ماده کوینتسنس، باعث کاهش مقدار افق این سیاه‌چاله می‌شود. از آنجایی که r_+ علاوه بر پارامتر c ، به پارامترهای Q و Λ نیز وابسته می‌باشد مشاهده می‌شود که افزایش جرم به تنهایی عامل اصلی برای افزایش شعاع افق نمی‌باشد.



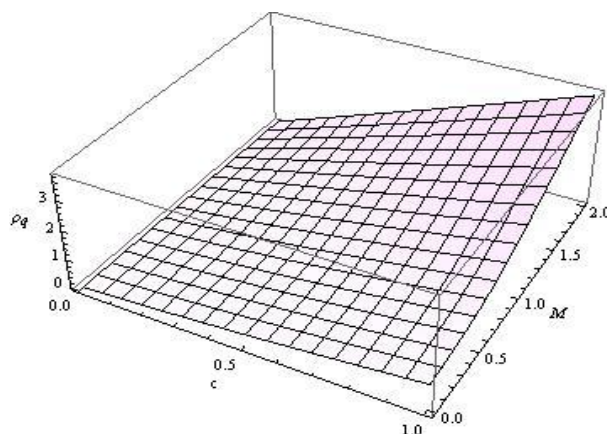
شکل ۱. افق سیاه‌چاله RN-dS احاطه شده با کوینتسنس به ازای $M = 1$ ، $Q = 1$ ، $\Lambda = 1$ و $c = 1$.



شکل ۲. نمودار تغییرات r_+ بر حسب M و c به ازای $Q = 1$ و $\Lambda = 1$.

با توجه به رابطه (۴)، چگالی کوینتسنس در افق رویداد سیاه‌چاله برای حالت $\omega_q = -\frac{2}{3}$ را می‌توان به صورت $\rho_q =$

$\frac{c}{r_+}$ نوشت. شکل ۳، نشان می‌دهد که مقدار ρ_q با افزایش M و c افزایش می‌یابد.



شکل ۳. نمودار تغییرات ρ_q بر حسب M و c به ازای $Q = 1$ و $\Lambda = 1$.

ترمودینامیک سیاه‌چاله RN-dS احاطه شده با کوینتسنس

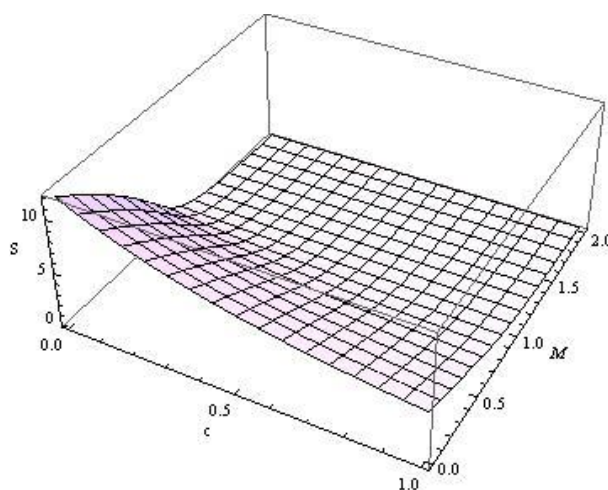
آنتروپی سیاه‌چاله، با یک چهارم مساحت سطح افق رویدادش برابر بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]

$$S = \frac{A}{4} = \pi r_+^2 \quad (13)$$

با استفاده از رابطه فوق، آنتروپی سیاه‌چاله RN-dS احاطه شده با کوینتسنس را محاسبه نموده و نمودار تغییرات آن بر

حسب M و c را رسم می‌نماییم. شکل ۴، نشان می‌دهد که افزایش جرم و حضور ماده کوینتسنس، باعث کاهش آنتروپی

این سیاه‌چاله می‌شود.



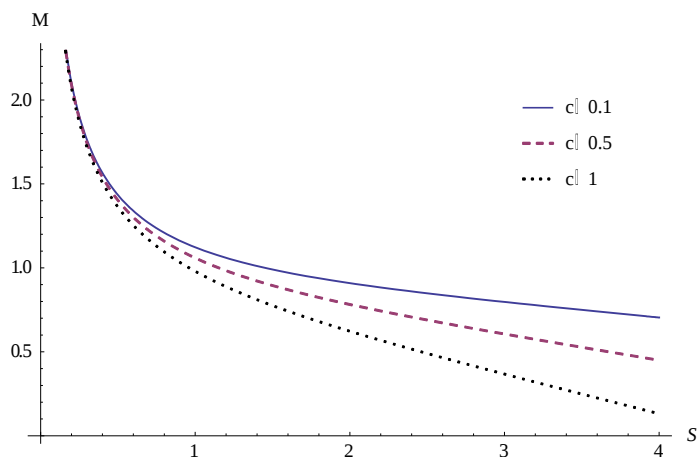
شکل ۴. نمودار تغییرات آنتروپی بر حسب M و c به ازای $Q = 1$ و $\Lambda = 1$.

با استفاده از رابطه (۱۳) و اینکه $f(r_+) = 0$ می‌باشد، می‌توان جرم این سیاه‌چاله در حضور کوینتسنس را به صورت

زیر نوشت

$$M = \frac{3\pi^2 Q^2 + 3\pi S - 3c\sqrt{\pi} S^{\frac{3}{2}} - S^2 \Lambda}{6\sqrt{S} \pi^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

نمودار تغییرات جرم این سیاه‌چاله بر حسب آنترופی و به ازای مقادیر مختلف C ، در شکل ۵ رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که به ازای مقادیر بزرگتر پارامتر C و با افزایش آنترופی، جرم سیاه‌چاله با شیب بیشتری کاهش می‌یابد.



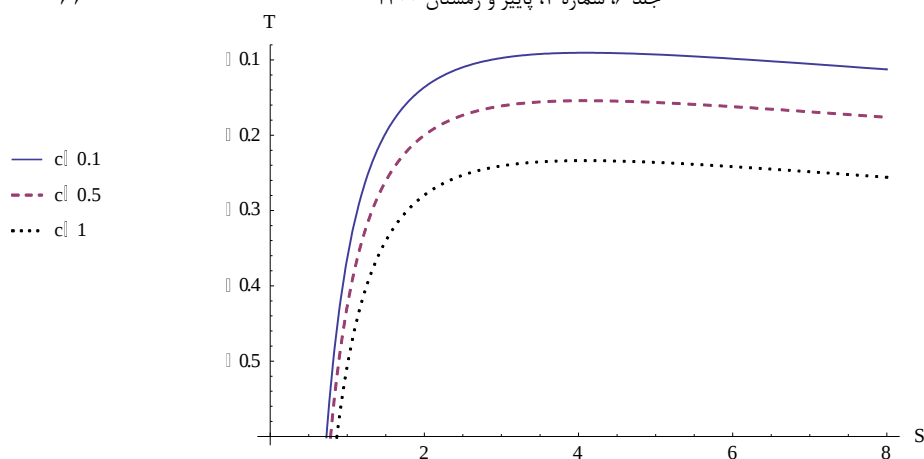
شکل ۵. نمودار تغییرات جرم بر حسب آنترופی به ازای مقادیر مختلف C و $Q = 1$ ، $\Lambda = 1$

با استفاده از قوانین ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها، می‌توان دما T و ظرفیت گرمایی C این سیاه‌چاله را به صورت زیر محاسبه نمود

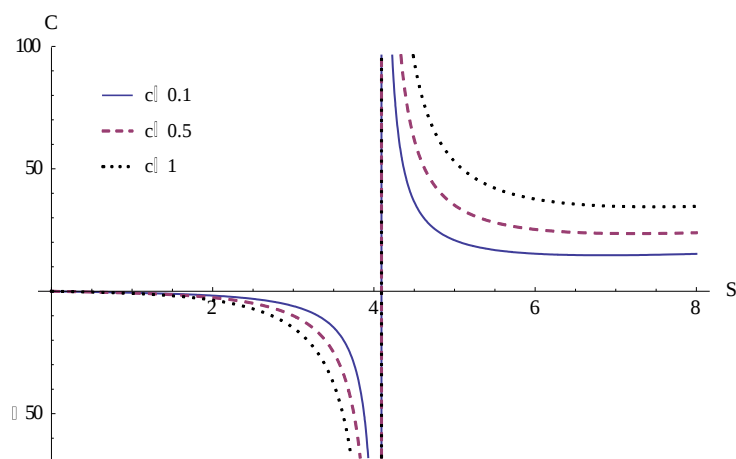
$$T = \frac{\partial M}{\partial S} = \frac{-\pi^2 Q^2 + \pi S - 2c\sqrt{\pi} S^{\frac{3}{2}} - S^2 \Lambda}{4\pi^{\frac{3}{2}} S^{\frac{3}{2}}} \quad (15)$$

$$C = T \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{2S(\pi^2 Q^2 - \pi S + 2c\sqrt{\pi} S^{\frac{3}{2}} + S^2 \Lambda)}{-3\pi^2 Q^2 + \pi S + S^2 \Lambda} \quad (16)$$

پایایی و پایداری سیاه‌چاله را می‌توان بر اساس ظرفیت گرمایی تعیین نمود. ظرفیت گرمایی منفی، یک سیستم ناپایای ترمودینامیکی و ظرفیت گرمایی مثبت، یک سیستم پایای موضعی را نشان می‌دهد [۹]. شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب، نمودار تغییرات دما و ظرفیت گرمایی بر حسب آنترופی به ازای مقادیر مختلف C ، را نشان می‌دهند. از این شکل‌ها می‌توان دریافت که با افزایش آنترופی و به ازای مقادیر کوچکتر C ، دما بیشتر افزایش می‌یابد در حالی که ظرفیت گرمایی در نواحی مثبت که سیستم پایاست کاهش بیشتری داشته و در نواحی منفی که نشان دهنده ناپایایی سیستم می‌باشد، کاهش کمتری خواهد داشت. مشاهده می‌شود که گرمای ویژه ناپیوسته است و بنابراین سیستم یک گذار فاز را تجربه می‌کند.



شکل ۶. نمودار تغییرات دما بر حسب آنترופی به ازای مقادیر مختلف c و $Q = 1$ ، $\Lambda = 1$.



شکل ۷. نمودار تغییرات ظرفیت گرمایی بر حسب آنترופی به ازای مقادیر مختلف c و $Q = 1$ ، $\Lambda = 1$.

با توجه به اینکه ثابت کیهان‌شناسی همانند فشار ترمودینامیکی عمل می‌کند، می‌توان رابطه بین فشار P و Λ را به صورت زیر نوشت [۱۵-۱۶]

$$\Lambda = -8\pi P \quad (17)$$

با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۷)، آنتالپی این سیاه‌چاله به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$M = H(S, P) = \frac{3\pi^2 Q^2 + 3\pi S - 3c\sqrt{\pi} S^{\frac{3}{2}} + 8\pi P S^2}{6\sqrt{S} \pi^{\frac{3}{2}}} \quad (18)$$

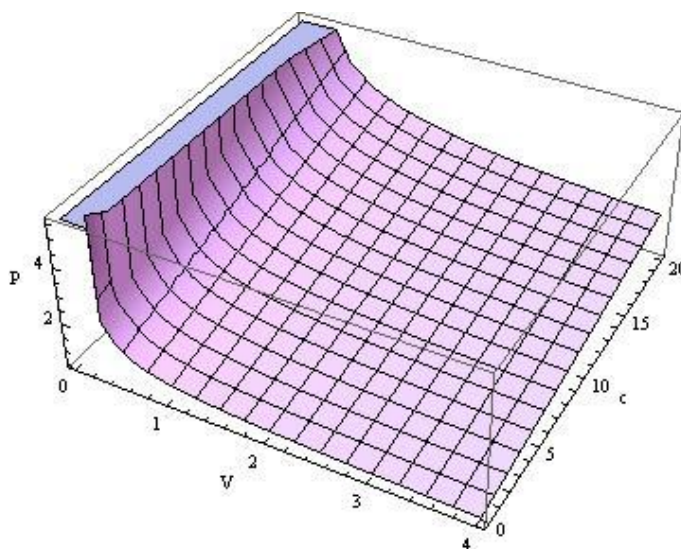
در مباحث مربوط به ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها، حجم به عنوان یک متغیر ترمودینامیکی در نظر گرفته شده که برای سیاه‌چاله RN-dS احاطه شده با کوینتسنس، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$V = \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_S = \frac{4 S^{\frac{3}{2}}}{3\sqrt{\pi}} \quad (19)$$

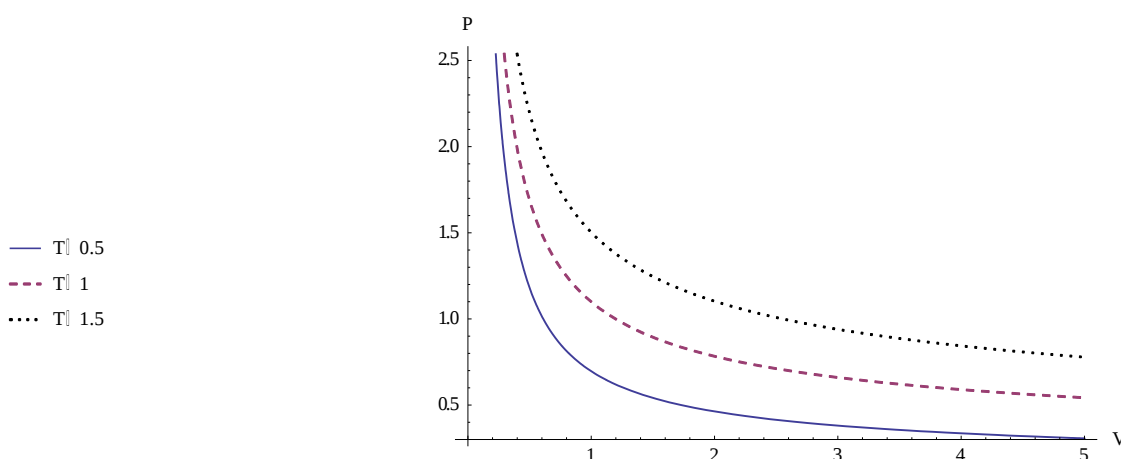
با استفاده از روابط (۱۵)، (۱۷) و (۱۹) معادله حالت این سیاهچاله به صورت زیر تعیین می‌شود

$$T = \frac{-4\pi Q^2 + (6V)^{\frac{2}{3}}\pi^{\frac{1}{3}} - 6cV + 126^{\frac{1}{3}}P\pi^{\frac{2}{3}}V^{\frac{4}{3}}}{12\pi V} \quad (20)$$

نمودار همدمای $P - V$ مربوط به این سیاهچاله در دماهای مختلف و همچنین تغییرات آن بر حسب پارامتر c ، در شکل‌های ۸ و ۹ رسم شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که سیاهچاله در حضور ماده کوینتسنس، همانند یک گاز ایده‌آل رفتار می‌نماید که در دمای ثابت با افزایش حجم، فشار آن کاهش می‌یابد.



شکل ۸. نمودار همدمای $P - V$ در دماهای مختلف به ازای $Q = 1$ و $c = 1$.



شکل ۹. تغییرات نمودار همدمای $P - V$ بر حسب c به ازای $Q = 1$ و $T = 1$.

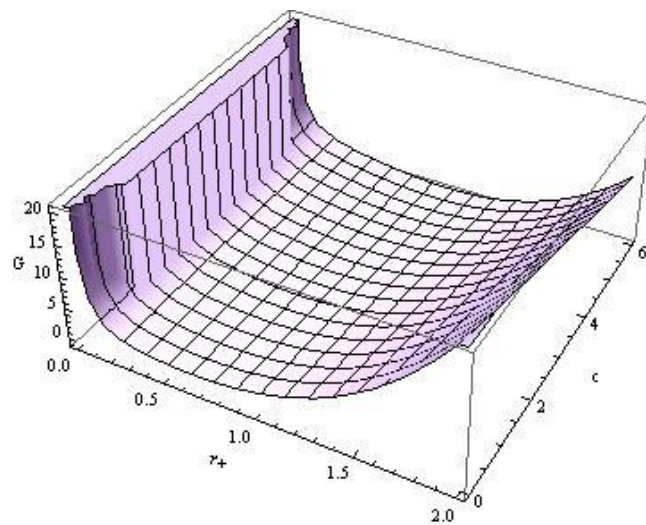
همچنین با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۸) می‌توان انرژی آزاد گیبس مربوط به این سیاهچاله را به صورت زیر تعیین نمود

$$G = H - TS = \frac{3Q^2 + 3r_+^2 + 8\pi P r_+^4 - 3r_+^3(c + 2\pi T)}{6r_+} \quad (21)$$

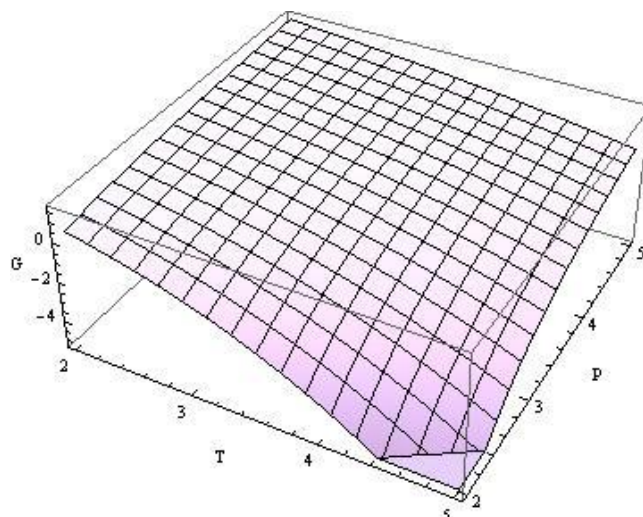
شکل ۱۰، نمودار تغییرات انرژی آزاد گیبس سیاه‌چاله RN-dS احاطه شده با کوینتسنس را برحسب r_+ و c نشان می‌دهد. معادله (۲۱) را با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۹) به صورت زیر بازنویسی می‌نماییم

$$G = \frac{4\pi Q^2 + (6V)^{\frac{2}{3}}\pi^{\frac{1}{3}} - 3cV - 6\pi TV + 4(6^{\frac{1}{3}})P\pi^{\frac{2}{3}}V^{\frac{4}{3}}}{4(6^{\frac{1}{3}})\pi^{\frac{2}{3}}V^{\frac{1}{3}}} \quad (22)$$

اکنون با استفاده از رابطه (۲۰) و نوشتن حجم برحسب دما و فشار، می‌توان رابطه (۲۲) را دوباره بازنویسی نموده و نمودار تغییرات انرژی آزاد گیبس برحسب دما و فشار را برای این سیاه‌چاله ترسیم نمود. این نمودار در شکل ۱۱، رسم شده است. لازم به ذکر است که با توجه به پیچیدگی و طولانی بودن این رابطه، از نوشتن عبارت مذکور خودداری می‌نماییم. اگر انرژی آزاد گیبس یک سیاه‌چاله به حداقل مقدار خود برسد در این حالت سیستم به تعادل خواهد رسید. پس اگر یک مینم برای G داشته باشیم در آن نقطه حالت پایداری از سیستم خواهیم داشت. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهند که چون انرژی گیبس دارای یک مقدار مینم است پس حالت پایداری برای این سیستم وجود دارد.



شکل ۱۰. تغییرات انرژی آزاد گیبس برحسب r_+ و c به ازای $Q = 1$ و $P = 1$ و $T = 1$.



شکل ۱۱. تغییرات انرژی آزاد گیبس بر حسب دما و فشار به ازای $Q = 1$ و $c = 1$.

نتیجه گیری

در این مقاله، ترمودینامیک سیاه چاله RN-dS احاطه شده با کوپنتسنس، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت و به بررسی تأثیر وجود انرژی تاریک بر روی کمیت‌های ترمودینامیکی این سیاه چاله پرداختیم و با استفاده از قوانین ترمودینامیک سیاه چاله‌ها، برخی از خصوصیات فیزیکی مربوط به آن را استخراج نمودیم. به این منظور، بعد از ارائه یک مقدمه کوتاه و معرفی این سیاه چاله، با استفاده از روش ارائه شده توسط کیسلو و قوانین ترمودینامیک سیاه چاله‌ها و با در نظر گرفتن ثابت کیهان شناسی به عنوان فشار ترمودینامیکی، کمیت‌های دما، آنتروپی، ظرفیت گرمایی، معادله حالت، آنتالپی و انرژی آزاد گیبس مربوط به این سیاه چاله را در حضور ماده کوپنتسنس، محاسبه نمودیم و به تحلیل نتایج حاصل پرداختیم.

در ابتدا افق این سیاه چاله را تعیین نمودیم و نشان دادیم که افزایش M و c ، باعث کاهش مقدار افق، افزایش چگالی کوپنتسنس در افق رویداد و کاهش آنتروپی می‌شود. همچنین نشان دادیم که به ازای مقادیر بزرگتر از پارامتر C و با افزایش آنتروپی، جرم سیاه چاله با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. دما و ظرفیت گرمایی را محاسبه کرده و نمودار تغییرات آنها بر حسب آنتروپی و به ازای مقادیر مختلف C را رسم نمودیم. نشان دادیم که با افزایش آنتروپی و به ازای مقادیر کوچکتر C ، دما بیشتر افزایش می‌یابد در حالی که ظرفیت گرمایی در نواحی مثبت که سیستم پایاست کاهش بیشتری داشته و در نواحی منفی که نشان دهنده ناپایایی سیستم می‌باشد، کاهش کمتری خواهد داشت. مشاهده شد که گرمای ویژه ناپیوسته است و بنابراین سیستم یک گذار فاز را تجربه می‌کند.

معادله حالت این سیاه‌چاله را تعیین نموده و نمودار هم‌دمای $P - V$ آن در دماهای مختلف و همچنین تغییرات آن بر حسب پارامتر C را ترسیم نمودیم. نشان دادیم که این سیاه‌چاله در حضور ماده کوینتسنس، همانند یک گاز ایده‌آل رفتار می‌نماید که در دمای ثابت با افزایش حجم، فشار آن کاهش می‌یابد.

در نهایت انرژی آزاد گیبس مربوط به این سیاه‌چاله را محاسبه کرده و نمودار تغییرات آن را بر حسب r_+ ، C ، دما و فشار رسم نمودیم. مشاهده شد چون انرژی گیبس دارای یک مقدار مینم است پس حالت پایداری برای این سیستم وجود دارد.

مراجع

1. Perlmutter S. et al., "Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae", *Astrophys. J.*, **517** (1999) 565-586.
2. Riess A.G. et al., "Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant", *Astron. J.*, **116** (1998) 1009-1038; Riess A.G. et al., "BVRI light curves for 22 type Ia supernovae", *Astron. J.*, **117** (1999) 707-724.
3. Spergel D.N. et al., "Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) three year results: implications for cosmology", *Astrophys. J., Suppl.*, **170** (2007) 377-408.
4. Tegmark M. et al., "Cosmological parameters from SDSS and WMAP", *Phys. Rev. D*, **69** (2004) 103501.
5. Seljak U. et al., "Constraints on the primordial spectrum of fluctuations, neutrino mass, and dark energy", *Phys. Rev. D*, **71** (2005) 103515.
6. Carroll S. M., "Quintessence and the rest of the world: suppressing long-range interactions", *Phys. Rev. Lett.*, **81** (1998) 3067-3070.
7. Kiselev V. V., "Quintessence and black holes", *Class. Quantum Grav.*, **20** (2003) 1187-1198.
8. Hawking S.W., "Particle creation by black holes", *Commun. Math. Phys.*, **43** (1975) 199-220; Bekenstein J.D., "Black holes and entropy", *Phys. Rev. D*, **7** (1973) 2333-2346; Bardeen J.M., Carter B., Hawking S.W., "The four laws of black hole mechanics", *Commun. Math. Phys.*, **31** (1973) 161-170.
9. Tharanath R., Varghese N. and Kuriakose V. C., "Phase transition, quasinormal modes and Hawking radiation of Schwarzschild black hole in quintessence field", *Mod. Phys. Lett. A*, **29** (2014) 1450057-1450058.
10. Ghaderi K. and Malakolkalami B., "Effects of quintessence on thermodynamics of the black holes", *Astrophys. Space Sci.*, **361** (2016) 161.

11. Ghaderi K. and Malakolkalami B., “Thermodynamics of the Schwarzschild and the Reissner–Nordström black holes with quintessence”, Nucl. Phys. B., **903** (2016) 10-18.
12. Ma M. S., Zhao R. and Ma Y. Q., “Thermodynamic stability of black holes surrounded by quintessence”, Gen. Rel. and Grav., **49** (2017) 79.
13. Kumar A., Singh D. V. and Ghosh S. G., “*D*-dimensional Bardeen–AdS black holes in Einstein–Gauss–Bonnet theory”, Eur. Phys. J. C, **79** (2019) 275.
14. J. M. Toledo and V. B. Bezerra, “[The Reissner–Nordström black hole surrounded by quintessence and a cloud of strings: Thermodynamics and quasinormal modes](#)”, Int. J. Mod. Phys. D, **28** (2019) 1950023.
15. Dolan B. P., “The cosmological constant and black hole thermodynamic potentials “, Class. Quant. Grav. **28** (2011) 125020.
16. Cvetič M., Gibbons G. W., Kubiznak D. and Pope C. N., “Black Hole Enthalpy and an Entropy Inequality for the Thermodynamic Volume “, Phys. Rev. D, **84** (2011) 024037.

Thermodynamics of RN-dS black hole surrounded by dark energy

Kamal Ghaderi

Department of Physics, Marivan Branch, Islamic Azad University, Marivan, Iran

Abstract

Recent astronomical observations, show that the universe has an accelerated expansion due to the presence of a kind of energy called dark energy. In this paper, we investigate the effects of quintessence as one of the most acceptable models of dark energy on thermodynamics of the RN-dS black hole. By using the thermodynamical laws of the black holes and cosmological constant as thermodynamic pressure, we calculate the quantities of temperature, entropy, heat capacity, equation of state, enthalpy and Gibbs free energy associated with this black hole in the presence of quintessence matter and analyze the results.

Keywords: Dark energy, Black holes, Quintessence, Thermodynamic, RN-dS.