



PROYECTO DE GRADO EN FÍSICA

Estudio de estrellas de Planck

Alejandro Hernández A.

Director:
Dr. Pedro Bargueño de Retes

9 de Marzo de 2016

Índice

1. Introducción	2
2. Preliminares	3
2.1. Condiciones de energía	3
2.2. Procedimiento General	3
3. Métricas relevantes	4
3.1. Métrica de Bardeen	4
3.2. Métrica de Vaidya	8
4. Métrica de Hayward	11
4.1. Métrica de Hayward estática	11
4.2. Métrica de Hayward dinámica	13
5. Métrica de Hayward modificada	13
6. Conclusiones	14
7. Anexos	14

1. Introducción

Desde la publicación del famoso artículo *The Foundation of the General Theory of Relativity* por Albert Einstein en el año de 1916, la búsqueda de soluciones exactas a sus ecuaciones de campo ha sido uno de los principales motores de investigación en relatividad general (GR). La primera solución matemática exacta de dichas ecuaciones fue la métrica de Schwarzschild, que describe la geometría generada en el exterior de un cuerpo esféricamente simétrico, sin carga y sin momento angular. Además de la anterior, otra métrica que presenta simetría esférica es la de Reissner Nordström (métrica RN), la cual describe un cuerpo cargado sin rotación. Estas métricas comparten una característica particular, a saber, ambas poseen una singularidad física en $r = 0$. Esto dificulta el tratamiento de ese punto tanto en el espaciotiempo de Schwarzschild como en el de Reissner Norström, puesto que la teoría no es aplicable en el susodicho punto singular.

Teniendo en cuenta lo anterior, los puntos singulares de un espaciotiempo dado dejan entrever fallas de la teoría general de la relatividad puesto que no permite describir las propiedades físicas de los mismos. Con el fin de evadir estas dificultades, se dice que un agujero es regular, o sin puntos singulares, cuando los invariantes de curvatura R , $R^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$, $R^{\mu\nu\rho\sigma}R_{\mu\nu\rho\sigma}$ son finitos en todos los puntos del espaciotiempo en cuestion. Dado esto, desde hace más de cincuenta años el estudio de espaciotiempos (agujeros negros) regulares ha sido de gran interés para múltiples físicos y matemáticos, entre ellos, James M. Bardeen.

En el año de 1968, Bardeen fue el primero en proponer una solución regular de las ecuaciones de campo de Einstein. Si bien el documento [1] en el que se propuso el modelo no está disponible, una revisión detallada de la métrica de Bardeen puede ser consultada en [2]. La importancia de esta métrica no solo se debe a que fue la primera de su estilo sino también a que fue crucial para orientar las futuras investigaciones sobre agujeros negros regulares. Al respecto, Ayón-Beato y García propusieron una interpretación física del modelo de Bardeen en términos de electrodinámica no lineal [3] y construyeron muchas otras métricas correspondientes a agujeros negros regulares [4, 5, 6, 7].

Ayende de lo anterior, trabajos más recientes [8, 9, 10] tratan de generalizar el modelo que propuso Bardeen de regularización de agujeros negros, de tal forma que se incluyan correcciones efectivas de teoría cuántica de campos en relatividad general. En estos modelos se definen el concepto de Estrella de Planck, que corresponde a un métrica regular, esféricamente simétrica, asintóticamente plana, que satisface la condición de energía débil y que no posee horizontes de Cauchy (¡OJO!).

Precisamente, el objetivo de este trabajo es entender el proceso mediante el cual se formulan las métricas correspondientes a estrellas de Planck, entender el mecanismo mediante el cual dichas métrica evaden la singularidad en $r = 0$ (¡OJO!), además de tratar de interpretar físicamente el tensor de energía-momento (SET) asociado a las mismas. Teniendo en cuenta lo previamente mencionado, la organización de este documento se da a continuación. En la Sec. 2 se establecen las condiciones de energía de forma usual en términos de SET y se establece la metodología general que se empleará para estudiar todas las métricas presentadas. En la Sec. 3 se estudian en detalle las métricas de Bardeen y de Vaidya, las cuales constituyen la base sobre la cual se definen las estrellas de Planck. Posteriormente, en la Sec. 4 se estudia a fondo la métrica que define las aludidas estrellas de Planck y se da la interpretación física de las mismas. Finalmente, en la sección 6 se resumen los resultados del trabajo y en la sección 7 se habla sobre las correcciones cuánticas que introducen las estrellas de Planck en relatividad general.

¡OJO! Teoremas de singularidad.

2. Preliminares

2.1. Condiciones de energía

De vital importancia para el estudio de las métricas a lo largo de todo este documento son las denominadas condiciones de energía. Si bien en la mayoría de los casos resulta útil estudiar las ecuaciones de campo sin especificar la fuente de materia $T_{\mu\nu}$ en el espacio-tiempo descrito, en algunas ocasiones resulta interesante estudiar las propiedades de dichas ecuaciones que son válidas para diversas fuentes de materia. En esta última situación es fundamental imponer condiciones de energía que limiten la arbitrariedad de $T_{\mu\nu}$ con el fin de que sean fuentes razonables de energía y momento [11].

Las formulaciones matemáticas de las múltiples condiciones de energía se establecen a continuación:

- **Condición de energía débil (WEC):** Para todo vector timelike t^μ se satisface $T_{\mu\nu}t^\mu t^\nu \geq 0$. Para el caso particular de un fluido perfecto esta condición se traduce en $\rho \geq 0$ y $\rho + p \geq 0$.
- **Condición de energía débil (NEC):** Como caso especial de WEC, se exige que para cualquier vector nulo l^μ se tenga $T_{\mu\nu}l^\mu l^\nu \geq 0$. En el caso de un fluido perfecto, esta condición exige $\rho + p \geq 0$.
- **Condición de energía dominante (DEC):** Esta condición incluye a WEC y se puede dividir en dos partes: la primera es exactamente igual a lo requerido por WEC; y la segunda exige que $T_{\mu\nu}T^\nu_\lambda t^\mu t^\lambda \geq 0$ para todo t^μ timelike. Para fluidos perfectos esta condición se traduce en $\rho \geq |p|$.
- **Condición de energía fuerte (SEC):** Esta última condición exige que $T_{\mu\nu}t^\mu t^\nu \geq \frac{1}{2}T^\lambda_\lambda t^\sigma t_\sigma$ para todo vector t^μ timelike. Equivalentemente, se demanda que $\rho + p \geq 0$ y que $\rho + 3p \geq 0$ en el caso de un fluido perfecto. Cabe mencionar que la SEC no implica a WEC pero sí implica a NEC.

Como se verá más adelante, las únicas dos condiciones de energía que realmente interesan para el estudio de agujeros negros regulares son la WEC y la SEC, esto por el significado físico que hay detrás de estas condiciones, a saber, la WEC establece la no-negatividad de la densidad de energía para cualquier observador, mientras que la SEC alude al carácter atractivo de la fuerza gravitatoria.

2.2. Procedimiento General

Teniendo en cuenta el Teorema de Birkhoff [12] y la derivación hecha en [13, Cap. 7] de la métrica de Schwarzschild, la forma más general de una métrica estática y esféricamente simétrica es

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + \frac{1}{f(r)}dr^2 + r^2d\Omega^2, \quad (2.1)$$

donde la función $f(r)$ puede ser escrita como

$$f(r) = 1 - \frac{2m(r)}{r}. \quad (2.2)$$

Ahora bien, dado que nos interesa estudiar agujeros negros regulares, es preciso aclarar que la SEC se debe violar en algún lugar dentro del horizonte [14], a la vez que la WEC o la DEC pueden ser satisfechas en todo el espaciotiempo generado [15]. Al considerar el elemento de línea (2.1) junto con (2.2), es posible escribir los componente de SET como [16] OJO signatura y métrica ortogonal

$$\begin{aligned} T^t_t &= T^r_r = \frac{2}{8\pi r^2} \frac{dm(r)}{dr}, \\ T^\theta_\theta &= T^\phi_\phi = \frac{1}{8\pi r} \frac{d^2m(r)}{dr^2}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

y por ende, se concluye que la WEC puede expresarse de manera equivalente en términos de la función de masa $m(r)$ mediante las siguientes desigualdades

$$\begin{aligned}\frac{1}{r^2} \frac{dm(r)}{dr} &\geq 0, \\ \frac{2}{r} \frac{dm(r)}{dr} &\geq \frac{d^2m(r)}{dr^2}.\end{aligned}\tag{2.4}$$

Como se mencionó previamente, la DEC incluye por continuidad a la WEC. Esto permite argumentar que, por simplicidad, la única condición de energía que se va a exigir para los agujeros negros regulares presentados en secciones posteriores será la WEC.

3. Métricas relevantes

A continuación se realiza un estudio detallado de las métricas de Bardeen y de Vaidya, las cuales son cruciales para el estudio posterior de la métrica que describe el espaciotiempo generado por las estrellas de Planck.

3.1. Métrica de Bardeen

Como se mencionó en la introducción, la métrica de Bardeen [1] fue la primera en describir un espaciotiempo regular. En coordenadas esféricas (t, r, θ, ϕ) , la métrica de Bardeen se expresa como

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2mr^2}{(r^2 + g^2)^{3/2}} \right) dt^2 + \left(1 - \frac{2mr^2}{(r^2 + g^2)^{3/2}} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2,\tag{3.1}$$

con m y g parámetros no negativos, en algunos casos llamados parámetros de regularización. Claramente, para esta métrica tenemos que

$$m(r) = \frac{2mr^3}{(r^2 + g^2)^{3/2}},\tag{3.2}$$

por tanto, la WEC se satisface automáticamente en cualquier punto del espacio tiempo puesto que

$$\begin{aligned}\frac{1}{r^2} \frac{dm(r)}{dr} &= \frac{6mg^2}{(g^2 + r^2)^{5/2}}, \\ \frac{2}{r} \frac{dm(r)}{dr} &= \frac{12mg^2r}{(g^2 + r^2)^{5/2}}, \\ \frac{d^2m(r)}{dr^2} &= \frac{6m(2g^4r - 3g^2r^3)}{(g^2 + r^2)^{7/2}}.\end{aligned}\tag{3.3}$$

El carácter regular de la métrica de Bardeen es evidente a partir del hecho de que, por un lado

$$f_{bardeen}(r) \underset{r \rightarrow 0}{\sim} 1 - \frac{2mr^2}{g^3} + \mathcal{O}(r^4),\tag{3.4}$$

es decir, posee un comportamiento de de Sitter en la vecindad de $r = 0$, y por otro, los escalares de curvatura

$$\begin{aligned}R &= \frac{6g^2m(4g^2 - r^2)}{(g^2 + r^2)^{7/2}}, \\ R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} &= \frac{18g^4m^2(8g^4 - 4g^2r^2 + 13r^4)}{(g^2 + r^2)^7}, \\ R_{\mu\nu\sigma\rho}R^{\mu\nu\sigma\rho} &= \frac{12m^2(8g^8 - 4g^6r^2 + 47g^4r^4 - 12g^2r^6 + 4r^8)}{(g^2 + r^2)^7},\end{aligned}\tag{3.5}$$

son finitos en todo punto del espaciotiempo.

Ahora bien, debido a que el elemento de línea (3.1) es diagonal, es posible obtener los horizontes de eventos de esta métrica al solucionar

$$f_{bardeen}(r) = 1 - \frac{2mr^2}{(r^2 + g^2)^{3/2}} = 0. \quad (3.6)$$

Y analizar las condiciones para la existencia de soluciones reales se concluye que la métrica (3.1) describe un agujero negro (es decir, posee horizontes de eventos) para $g^2 \leq (16/27)m^2$: cuando $g^2 < (16/27)m^2$ existen dos horizontes de eventos r_+, r_- y cuando $g^2 = (16/27)m^2$ solo hay un horizonte de eventos degenerado $r_+ = r_-$. En este último caso se dice que el agujero negro es extremal, tal y como en la métrica RN, en tanto que posee un único horizonte de eventos. Es importante recalcar que en cualquier caso, los horizontes de eventos para el agujero negro de Bardeen tan solo constituyen singularidades debidas al sistema de coordenadas puesto que ya se mencionó que los invariantes de curvatura (??-??) son finitos en todo el espaciotiempo. La extensión de la métrica de Bardeen más allá de los horizontes de eventos se puede hacer al cambiar a las coordenadas de Eddington-Finkelstein salientes, en términos de las cuales la métrica es bien comportada incluso en el caso del agujero negro extremal.

Considere nuevamente la componente temporal g_{tt} de la métrica (3.1). Note que

$$f_{bardeen}(r) \underset{r \rightarrow \infty}{\sim} 1 - \frac{2m}{r} + \frac{3mg^2}{r^3} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{r^5}\right). \quad (3.7)$$

Los dos primeros términos de la expansión corresponden, como es de esperarse, al comportamiento asintóticamente plano de la métrica de Bardeen, y por tanto, es posible identificar al parámetro m como la masa de la configuración descrita por esta métrica. No obstante, el término $1/r^3$ impide asociar el parámetro de regularización g con algún tipo de carga de Coulomb, a diferencia de la métrica de Reisner Norström, en la que el parámetro q es automáticamente asociado a una carga eléctrica al comparar el SET de esta métrica con el del campo eléctrico para una carga puntual. Este hecho fue el principal obstáculo para la interpretación física del parámetro g en la métrica de Bardeen hasta que Ayón-Beato y García propusieron una interpretación en términos de electrodinámica no-lineal [3].

El modelo de Ayón-Beato y García parte la suposición de que la dinámica de la métrica de Bardeen está regida por

$$\mathcal{S} = \int dv \left(\frac{1}{16\pi} R - \frac{1}{4\pi} \mathcal{L}(F) \right), \quad (3.8)$$

donde R es el escalar de curvatura; \mathcal{L} es una función de $F = \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$, con $F_{\mu\nu} = 2\nabla_{[\mu} A_{\nu]}$ el tensor electromagnético; y v es la coordenada avanzada de Eddington-Finkelstein. Las ecuaciones de Einstein acopladas con electrodinámica no-lineal resultantes de la acción \mathcal{S} son (¡OJO!)

$$\begin{aligned} G_\mu^\nu &= 2(\mathcal{L}_F F_{\mu\lambda} F^{\nu\lambda} - \delta_\mu^\nu \mathcal{L}), \\ \nabla_\mu (\mathcal{L}_F F^{\alpha\mu}) &= 0, \end{aligned} \quad (3.9)$$

donde $\mathcal{L}_F \equiv \partial\mathcal{L}/\partial F$. La fuente electrodinámica no-lineal usada por los autores para derivar la métrica de Bardeen es (¡OJO! Formalismo P)

$$\mathcal{L}(F) = \frac{3}{2sg^2} \left(\frac{\sqrt{2g^2 F}}{1 + \sqrt{2g^2 F}} \right)^{5/2}, \quad (3.10)$$

donde $s \equiv |g|/2m$; m la masa de la configuración descrita; y g un parámetro de integración. Además, los autores consideran el ansatz para el campo electromagnético

$$F_{\mu\nu} = 2\delta_{[\mu}^{\theta} \delta_{\nu]}^{\varphi} B(r, \theta), \quad (3.11)$$

y al tener en cuenta todas las consideraciones previamente mencionadas, Ayón-Beato y García concluyen que el parámetro g corresponde a la carga de un monopolo magnético, esto es (¡OJO!)

$$\frac{1}{4\pi} \int_{S^\infty} \mathbf{F} = \frac{g}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin(\theta) d\theta d\varphi = g. \quad (3.12)$$

Todo lo anterior permite entender la métrica (3.1) como un acople de electrodinámica no-lineal a la relatividad general, que físicamente corresponde a un monopolo magnético autogravitante de carga g . Esta interpretación de la métrica de Bardeen hace eco de una de las características fundamentales de la métrica RN en tanto que las propiedades globales del espacio-tiempo descrito tanto por la métrica de Reissner-Nordström como por la métrica de Bardeen dependen fuertemente de las magnitudes relativas entre el parámetro de carga y el parámetro de masa.

Ahora bien, hasta el momento solo se ha lidiado con la interpretación física de la métrica de Bardeen (3.1) y se ha establecido el carácter regular de la misma en términos de la finitud de los invariantes de curvatura. No obstante, es preciso ahondar un poco más en el último aspecto mencionado, dado que es el principal motivo para estudiar dicha métrica en este trabajo.

En el año 1965, Roger Penrose publicó un famoso artículo [17] acerca de singularidades en el espaciotiempo. Una revisión más reciente del mismo puede ser consultada en [18]. La formulación precisa del teorema de singularidad de Penrose, junto con algunas definiciones preliminares al mismo, se establecen a continuación.

Definición 3.1. Sea \mathcal{M} un espaciotiempo. Sea $\mathcal{S} \subset \mathcal{M}$ una hipersuperficie de \mathcal{M} .

- I \mathcal{S} se llama hipersuperficie de Cauchy si es intersectada exactamente una vez por cualquier curva inextendible tipo tiempo. En otras palabras, \mathcal{S} representa todo el espacio en un instante de tiempo.
- II \mathcal{S} se llama futuramente atrapada si cualquier geodésica nula de tipo futuro que emana ortogonalmente de la misma tiene divergencia negativa ($\theta < 0$) en la superficie.
- III \mathcal{S} se llama eventualmente futuramente atrapada si la divergencia de cualquier geodésica nula tipo futuro se vuelve negativa en algún punto del futuro de la superficie.

Teorema 3.1 (Penrose, 1965). *Si un espaciotiempo satisface que*

- I *contiene una hipersuperficie de Cauchy Σ no-compacta y conexa (OJO),*
- II *contiene una superficie cerrada futuramente atrapada (future-trapped surface),*
- III *cumple con la condición de convergencia nula $R_{\mu\nu}u^\mu u^\nu \geq 0$ para cualquier vector nulo u^μ (o equivalentemente, cumple la NEC),*

entonces dicho espacio tiempo posee geodésicas incompletas de tipo nulo futuro.

En otras palabras, el teorema anterior establece que un espaciotiempo dado tiene una singularidad si las tres condiciones enunciadas previamente se satisfacen. En relación con lo anterior, y basado en las consideraciones hechas en [2, 19], la métrica de Bardeen es frecuentemente aludida como contraejemplo a la posibilidad de poder probar la existencia de singularidades en el interior de agujeros negros sin asumir la contención de una hipersuperficie de Cauchy o la condición de energía fuerte (condiciones I y III del teorema).

En tanto que la métrica de Bardeen está inspirada en la métrica RN, la pregunta evidente en este caso es: ¿cómo logra la métrica de Bardeen evitar la singularidad física en $r = 0$ de la métrica RN? La respuesta a esta pregunta fue establecida desde una perspectiva netamente matemática por Arvind Borde en [2, 19]. Con el fin de entender los planteamientos de Borde, es preciso considerar la extensión maximal de la métrica de Bardeen. En la fig. 1 está representada una parte de la extensión maximal del mencionado espaciotiempo.

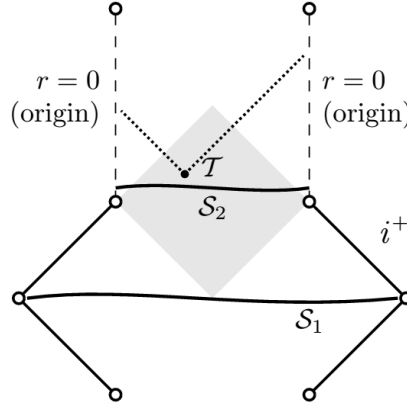


Figura 1: Estructura global de una porción del agujero negro de Bardeen. Imagen tomada de [2].

Como se ha mencionado previamente, las propiedades globales, y en particular, la estructura causal de la métrica de Bardeen es similar a la de la métrica de Reissner Nordström, de ahí la similitud entre los diagramas de Penrose-Carter correspondientes a ambas métricas. Cada punto en el interior del espaciotiempo representado en la fig. 1 es una 2-esfera, las líneas sólidas y los círculos representan regiones en el infinito, y las líneas punteadas representan el origen ($r = 0$) del sistema de coordenadas esféricas (Las dos líneas etiquetadas con $r = 0$ representan dos "patches" diferentes de coordenadas). La región sombreada representa parte del interior del agujero negro, de tal forma que señales enviadas desde esa región no pueden escapar al infinito futuro tipo nulo i^+ . Dado a que esa región, en particular, está dentro del horizonte de eventos del agujero, hay superficies atrapadas \mathcal{T} en la misma. De acuerdo a Borde, el carácter regular de la métrica de Bardeen se debe a que, en la región señalada, es posible que los rayos de luz se "envuelvan" alrededor del universo, en otras palabras, aunque los sistemas de geodésicas nulas salientes o entrantes de \mathcal{T} convergen, estas geodésicas convergen a puntos $r = 0$ de "patches" distintos. De hecho, la superficie atrapada \mathcal{T} y su cono de luz futuro $E^+(\mathcal{T})$ yacen en el desarrollo de Cauchy futuro (OJO) de la superficie S_2 y la singularidad en $r = 0$ se evita única y exclusivamente (OJO) debido a que S_2 es compacta.

En otras palabras, las secciones espaciales de un agujero negro de Bardeen evolucionan (OJO) desde una región en la que no son compactas (por ejemplo, la superficie S_1 de la fig. 1), hacia una región donde son compactas, y por ende, el universo cambia su topología de abierto a cerrado. Estos razonamientos son formalizados por Bardeen mediante el siguiente teorema, en el cual se establece que dicho cambio de topología es necesario para la existencia de agujeros negros regulares que obedecen la condición de energía débil.

Teorema 3.2 (Borde, 1996). *Suponga que un espaciotiempo \mathcal{M} satisface que*

- I *contiene una superficie eventualmente futuramente atrapada \mathcal{T} ,*
- II *obedece la condición de convergencia nula,*
- III *el conjunto de geodésicas nulas futuras es completo (OJO),*
- IV *su futuro causal es simple (OJO), con $E^+(X) \neq \emptyset, \forall X \subset \mathcal{M}$.*

Entonces hay una sección espacial compacta en el futuro de \mathcal{T} .

Una prueba (a simple vista, sencilla) de este teorema puede ser consultada en [19]. Es importante mencionar que, si bien no hay ninguna alusión a un cambio de topología en el teorema, es usual que un espaciotiempo de agujero negro contenga una región en infinito (OJO) y, por ende, es de esperar que “comience” con una sección espacial no compacta \mathcal{S} y por lo menos una superficie eventualmente futuramente atrapada en el futuro de la misma (OJO). En estos términos, el teorema de Borde muestra que, bajo condiciones muy generales, para que un agujero negro pueda ser regular se requiere que el espaciotiempo del cual hace parte desarrolle una sección espacial compacta en el futuro de \mathcal{S} , es decir, que la topología debe cambiar de abierta a cerrada. Una consecuencia inmediata de este cambio es que dicho espacio no puede ser globalmente hiperbólico.

¡OJO! Explicar cómo aplica el teorema para el caso de la métrica de Bardeen.

Para finalizar esta sección sobre la métrica de Bardeen es preciso mencionar que, si bien lo que hemos hecho hasta el momento es el primer paso para estudiar las estrellas de Planck, dichas estrellas son descritas por espaciotiempos que no son estáticos en absoluto. Por ende, es necesario desarrollar herramientas que permitan estudiar la evolución dinámica inminente de las susodichas estrellas. La forma en que se abordará espaciotiempos que varían con el tiempo será a través de la famosa métrica de Vaidya.

3.2. Métrica de Vaidya

La métrica de Vaidya [20] es una generalización de la métrica de Schwarzschild que puede ser interpretada como un espaciotiempo con una radiación saliente y esféricamente simétrica de partículas sin masa.

Esta métrica puede ser hallada a partir de la de Schwarzschild

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2m}{r}\right) + \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2, \quad (3.13)$$

y para ello es necesario pasar a coordenadas de Eddington-Finkelstein, en las que la coordenada temporal t es reemplazada por una nueva coordenada u que satisface

$$dt = du + \frac{dr}{(1 - 2m/r)}. \quad (3.14)$$

Para la interpretación física de esta nueva coordenada, note que $u = cte$ corresponde a curvas que satisfacen la ecuación $dr/dt = +(1 - 2m/r)$. Las líneas radiales nulas en el espaciotiempo de Schwarzschild corresponden a curvas con $d\theta = d\phi = ds = 0$ y en términos de r y t satisfacen $(dr/dt)^2 = (1 - 2m/r)^2$. La raíz positiva de esta ecuación representa líneas de tipo nulo dirigidas radialmente hacia afuera (la raíz negativa, a rayos dirigidos radialmente hacia adentro).

Con dicha transformación, el elemento de línea se convierte en

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2m}{r}\right) du^2 - 2dudr + r^2 d\Omega^2. \quad (3.15)$$

Dado que nos interesa llegar a una métrica debida a fotones dirigidos radialmente hacia afuera, podemos considerar una generalización de (3.15) a una métrica dinámica en la que m varía respecto a la nueva coordenada temporal u , esto es, $m = m(u)$. Por ende Teniendo en cuenta lo anterior, el tensor energía-momento que genera la métrica (3.15) tiene como única componente distinta de cero $T_{uu} = -(m'/4\pi r^2)$, con $m' = dm(u)/du$. Esto es exactamente igual al tensor que se obtendría para un rayo de fotones moviéndose radialmente hacia afuera con cuadrimomento $k_a = \nabla_a u$. El EMT en este caso es $T^{ab} = -(m'/4\pi r^2)k^a k^b$. Dado lo anterior, podemos interpretar la métrica de Vaidya como debida a una fuente esféricamente simétrica que pierde masa al emitir fotones en la dirección radial.

Con respecto a las condiciones de energía, es claro que por la forma del EMT para la métrica de Vaidya, la única condición que vale la pena estudiar es WEC, la cual requiere $T_{uu} \geq 0$ y en términos de r requiere que $m'(u) \leq 0$. Esta última condición coincide precisamente con la interpretación previamente mencionada sobre que la métrica de Vaidya describe una estrella pierde masa conforme pasa el tiempo mediante la emisión de radiación en forma de fotones.

Ahora bien, a parte de la presencia de radiación, la métrica de Vaidya posee una característica fundamental que la diferencia radicalmente de la métrica de Schwarzschild, y esto es el tipo de superficie (horizonte) en $r = 2m(u)$. En el espaciotiempo de Schwarzschild, $r = 2m$ representa una superficie de tipo nulo que denota el conocido horizonte de eventos. Por su parte, a continuación se verá que en el espaciotiempo de Vaidya la superficie $r = 2m(u)$ es de tipo espacio y por ende no puede ser asociada a un horizonte de eventos. De hecho, esta superficie conforma lo que usualmente es denominado en la literatura [21, 22, 23] como horizonte aparente.

Un horizonte aparente se define técnicamente como una hipersuperficie que separa las regiones que poseen superficies atrapadas de las regiones que no contienen este tipo de superficies. No obstante, en aras de dar una definición matemáticamente más concreta de horizontes aparentes es necesario formalizar matemáticamente la definición de hipersuperficies nulas y definir el concepto de divergencia de campos vectoriales.

Como es sabido, una hipersuperficie es una subvariedad Σ n -dimensional de una variedad M $n+1$ -dimensional [21]. Una descripción particularmente útil para estudiar la geometría de estas subvariedades se da a través de los embebimientos $\Phi : \Sigma \rightarrow M$. Si Σ es equipado con coordenadas y^α y M con coordenadas x^α , un embebimiento Φ está dado explícitamente al especificar el punto en M con coordenadas x^α que corresponde a un punto en Σ con coordenadas y^α , en otras palabras, un embebimiento está dado por las ecuaciones paramétricas

$$x^\alpha = x^\alpha(y^\alpha).$$

Hay dos condiciones que deben ser satisfechas para que un mapa Φ sea un embebimiento, a saber

- Φ debe ser inyectivo.
- El jacobiano de Φ , es decir, la matriz $(n+1) \times n$

$$E_a^\alpha = \frac{\partial x^\alpha}{\partial y^a},$$

tiene rango maximal n .

Dado que los vectores E_a^α son linealmente independientes y tangentes a la imagen de Σ en M , los vectores normales a Σ (es decir, orthonormales a Σ) están caracterizados por

$$g_{\alpha\beta} E_a^\alpha \xi^\alpha = E_a^\alpha \xi_\beta = 0,$$

con $g_{\alpha\beta}$ la métrica de M . Es importante notar que si ξ^α es un vector normal, entonces $f\xi^\alpha$ también es normal a Σ para cualquier función escalar f que es distinta de cero en Σ .

Teniendo en cuenta lo anterior, los vectores normales a Σ permiten establecer la siguiente caracterización de hipersuperficies

$$\Sigma \text{ es tipo } \begin{cases} \text{espacio} & \text{si } \xi^\alpha \xi_\alpha < 0, \\ \text{tiempo} & \text{si } \xi^\alpha \xi_\alpha > 0, \\ \text{nulo} & \text{si } \xi^\alpha \xi_\alpha = 0. \end{cases}$$

Cuando Σ no es nula, la libertad en la elección de f puede ser usada para normalizar el vector normal a un vector normal de longitud unitaria ± 1 . Esta codición de normalización determina el vector normal unitario N^α de forma única salvo una elección de signo, esto es

$$N^\alpha = \frac{\xi^\alpha}{|\xi^\alpha \xi_\alpha|^{1/2}} \Rightarrow N^\alpha N_\alpha = \begin{cases} -1 & \text{si } \Sigma \text{ es tipo espacio,} \\ +1 & \text{si } \Sigma \text{ es tipo tiempo.} \end{cases}$$

Evidentemente, esta normalización es imposible para las hipersuperficies tipo nulo. No obstante, una elección natural y conveniente de un vector normal a la hipersuperficie es

$$l_\alpha = -\partial_\alpha S,$$

donde el signo ha sido escogido de tal forma que l^α está orientado hacia el futuro para una función real-valuada S que aumenta hacia el futuro y en términos de la cual la hipersuperficie Σ se define como

$$\Sigma = \{x \in M : S(x) = 0\}.$$

De esta forma, los demás vectores normales a Σ son de la forma

$$\xi^\alpha = f l^\alpha,$$

para alguna función f que no se anula sobre Σ .

Ahora bien, con las herramientas anteriores es posible definir la métrica inducida h_{ab} en una hipersuperficie (nula), y la utilidad de h_{ab} recae en que a partir de la misma, la identificación del tipo al cual pertenece una hipersuperficie dada es automático, permitiéndonos diferenciar fácilmente entre horizontes de eventos y horizontes aparentes.

Dado que en general las geodésicas nulas que son los generadores de una hipersuperficie nula están naturalmente asociados a dicha hipersuperficie, es conveniente adaptar las coordenadas y^α en Σ a l^α al escoger las coordenadas de tal forma que

$$y^\alpha = (v = \lambda, y^k),$$

donde λ es el parámetro (no necesariamente afín) a lo largo de las geodésicas y y^k corresponde a las coordenadas espaciales que denotan las geodésicas nulas individuales. En estas coordenadas, los vectores tangentes E_α a la hipersuperficie nula están dados por

$$E_v^\alpha = \frac{\partial x^\alpha}{\partial \lambda} = l^\alpha \quad , \quad E_k^\alpha = \frac{\partial x^\alpha}{\partial y^k},$$

y por ende la métrica inducida

$$h_{ab} = g_{\alpha\beta} E_a^\alpha E_b^\beta,$$

tiene los componentes

$$h_{vv} = g_{\alpha\beta} l^\alpha l^\beta = 0 \quad , \quad h_{vk} = g_{\alpha\beta} l^\alpha E_k^\beta = 0, \quad , \quad h_{km} \equiv s_{km} = g_{\alpha\beta} E_k^\alpha E_m^\beta,$$

donde $h_{vk} = 0$ se sigue puesto que por construcción los vectores E_k^α son tangentes a la superficie mientras que por definición l^α es normal a la hipersuperficie y en particular normal a los vectores tangentes a la misma.

Dado lo anterior, la métrica es degenerada (lo cual es característico para las hipersuperficies nulas) y el elemento de línea toma la forma

$$ds^2|_\Sigma = s_{km} dy^k dy^m = g_{\alpha\beta} E_k^\alpha E_m^\beta dy^k dy^m.$$

Es importante notar que esta forma de la métrica es independiente de si el parámetro λ es o no el parámetro afín de las geodésicas nulas, puesto que la escogencia de este parámetro puede ser tomada

en cuenta al cambiar $l^\alpha \rightarrow \xi^\alpha = fl^\alpha$ para alguna elección apropiada de f , de tal forma que siempre se tiene $h_{vv} = h_{vk} = 0$.

Con la finalidad de acercarnos a la definición de divergencia de un campo vectorial, la última herramienta requerida para la diferenciación entre horizontes de eventos y horizontes aparentes es el vector auxiliar n que satisface las siguientes propiedades

$$n_\alpha n^\alpha = n_\alpha n^\alpha \quad , \quad n_\alpha E_k^\alpha = n_\alpha E_k^\alpha = 0 \quad , \quad n_\alpha l^\alpha = -1,$$

que corresponde a un vector normal en Σ pero no tangente, que es linealmente independiente tanto a E_k^α como a l^α .

4. Métrica de Hayward

Teniendo todas las herramientas estudiadas en las secciones anteriores, es posible comenzar a estudiar el tema de interés para este trabajo, a saber, la métrica correspondiente a las estrellas de Planck.

4.1. Métrica de Hayward estática

Si bien es posible encontrar métricas como la de Bardeen, es decir, esféricamente simétricas, estáticas, asintóticamente planas, con centros regulares, cuyos EMT es físicamente razonable, en particular que satisface la WEC. No obstante, dichos espaciotiempos típicamente son considerados como no-físicos en tanto que poseen horizontes de Cauchy (OJO). No obstante, si consideramos la evaporación de uno de esos agujeros negros, el horizonte de cauchy pasa a ser tan real como el horizonte de eventos. Precisamente, las estrellas de Planck son descritas por métricas regulares dno estáticas (dinámicas) que satisfacen todas las propiedades anteriormente mencionadas, y que además poseen la característica adicional de incluir correcciones de teoría cuántica de campos en relatividad general.

Con el fin de entender paulatinamente el concepto de estrella de Planck, es preciso dividir su estudio entre la parte estática y la parte dinámica. La parte estática es descrita por la métrica de Hayward, la cual está dada por

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{mr^2}{r^3 + 2ml^2} \right) dt^2 + \left(1 - \frac{mr^2}{r^3 + 2ml^2} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2, \quad (4.1)$$

donde m y l son parámetros cuya interpretación física se explicará más adelante. Claramente, para esta métrica tenemos que

$$m(r) = \frac{mr^3}{r^3 + 2ml^2}. \quad (4.2)$$

Por ende, la métrica de Hayward satisface inmediatamente la WEC en tanto que

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} \frac{dm(r)}{dr} &= \frac{12l^2 m^2}{(2l^2 m + r^3)^2}, \\ \frac{2}{r} \frac{dm(r)}{dr} &= \frac{24l^2 m^2 r}{(2l^2 m + r^3)^2}, \\ \frac{d^2 m(r)}{dr^2} &= \frac{48m^2 (l^4 m r - l^2 r^4)}{(2l^2 m + r^3)^3}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Como en el caso de Bardeen, la métrica de Hayward describe un espaciotiempo regular puesto que, por un lado,

$$f_{hayward}(r) \underset{r \rightarrow 0}{\sim} 1 - \frac{r^2}{l^2} + \mathcal{O}(r^5), \quad (4.4)$$

es decir, es de Sitter en la vecindad de $r = 0$, y por otro, sus invariantes de curvatura

$$\begin{aligned}
R &= \frac{24l^2m^2(4l^2m - r^3)}{(2l^2m + r^3)^3}, \\
R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} &= \frac{288m^4(8l^8m^2 - 4l^6mr^3 + 5l^4r^6)}{(2l^2m + r^3)^6}, \\
R_{\mu\nu\sigma\rho}R^{\mu\nu\sigma\rho} &= \frac{48m^2(32l^8m^4 - 16l^6m^3r^3 + 72l^4m^2r^6 - 8l^2mr^9 + r^{12})}{(2l^2m + r^3)^6},
\end{aligned} \tag{4.5}$$

permanecen finitos en todo el espaciotiempo.

Ahora bien, al analizar los ceros de $f_{\text{hayward}}(r)$ revela una masa crítica de $m_* = (3\sqrt{3}/4)l$ y un radio crítico de $r = \sqrt{3}l$. Dado lo anterior, si $m < m_*$, la métrica 4.1 describe un espaciotiempo regular con la misma estructura causal que cualquier espaciotiempo plano; si $m = m_*$ tenemos un agujero negro regular con un único horizonte de eventos degenerado; y si $m > m_*$ tenemos un agujero negro con dos horizontes de eventos. Esto se ve reflejado en la fig. 2.

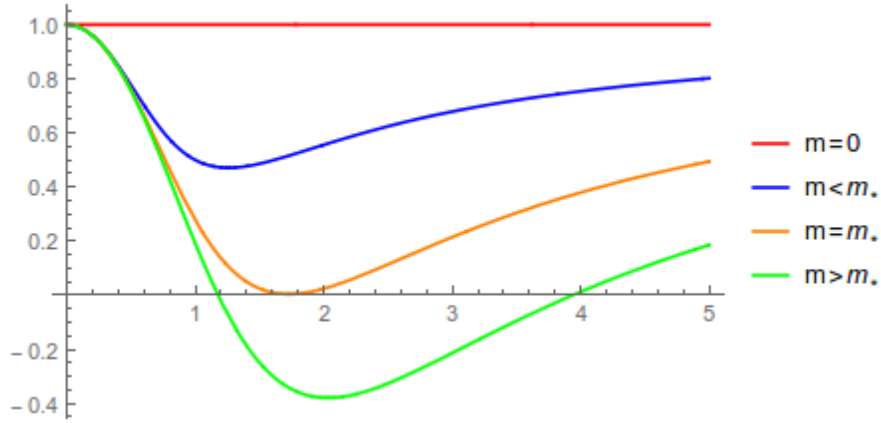


Figura 2: Posibles casos de agujeros negros para la métrica de Hayward con para un valor fijo del parámetro l y diferentes valores del parámetro m . La estructura causal de este espaciotiempo es similar a la de Reissner Norström.

Evidentemente, la pregunta natural con respecto a las anteriores consideraciones es cuál es la fuente física que da origen a esta métrica. Para contestarla, note que

$$f_{\text{hayward}}(r) \underset{r \rightarrow \infty}{\sim} 1 - \frac{2m}{r} + \frac{4l^2m^2}{r^4} + \mathcal{O}(r^{-5}), \tag{4.6}$$

luego, al igual que en el caso de Bardeen, podemos interpretar el parámetro m como la masa de la distribución que genera el elemento de línea (4.1). No obstante, dada la presencia del término r^{-4} , es imposible interpretar el parámetro l en términos de una carga coulombiana. De hecho, Hayward plantea que l da aproximadamente la escala de longitud debajo de la cual los efectos de cuánticos en gravedad comienzan a ser dominantes, razón por la cual es de esperar que l sea la longitud de Planck o del mismo orden de magnitud, aunque longitudes mayores no son excluidas. Cabe mencionar que sería interesante hallar una interpretación física para el parámetro l tal como se mostró para el parámetro g en el caso de Bardeen, es decir, hallando una fuente de electrodinámica no-lineal para la función de masa (4.2), y por ende, para el elemento de línea (4.1). Si hay suficiente tiempo, dicha interpretación se colocará en la sección de anexos.

4.2. Métrica de Hayward dinámica

Para la parte dinámica de las estrellas de Planck es preciso considerar la coordenada avanzada de Eddington-Finkelstein entrantes, las cuales se obtienen a partir de

$$dt = dv - \frac{dr}{(1 - 2m/r)}. \quad (4.7)$$

En términos de la nueva coordenada, el elemento de línea (4.1) se transforma en

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{mr^2}{r^3 + 2ml^2} \right) dv^2 + 2dvdr + r^2 d\Omega^2, \quad (4.8)$$

y al generalizar la función de masa a $m = m(v)$ tenemos que el EMT asociado a (4.8) es

$$\begin{aligned} T_t^t &= T_r^r = - \frac{12l^2 m^2}{(2l^2 m + r^3)^2}, \\ T_\theta^\theta &= T_\phi^\phi = - \frac{24l^2 m^2 (l^2 m - r^3)}{(2l^2 m + r^3)^3}, \\ T_v^r &= \frac{2r^4 m'}{(r^3 + 2l^2 m)^2}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

donde $m' = dm/dv$. Las componentes $T_t^t, T_r^r, T_\theta^\theta, T_\phi^\phi$ son iguales a los de la métrica de Hayward estática, la única novedad es la componente T_v^r , la cual describe puramente la radiación entrante que fue incorporada al modelo al considerar $m = m(v)$.

¡OJO! $1/8\pi$ en los EMT

5. Métrica de Hayward modificada

Con respecto a lo mencionado sobre la escala de Planck, estudios posteriores al artículo de Hayward (véase [9]) han hecho explícito el hecho de que la presencia del parámetro de longitud l en la métrica de Hayward necesariamente refleja la inclusión de correcciones efectivas de teoría cuántica de campos en relatividad general. Al respecto, De Lorenzo *et al.* plantean que, para que las métricas que describen espaciotiempos regulares a partir de modificaciones de la métrica de Schwarzschild sean físicamente plausibles, se requieren dos condiciones: que dichas métricas incorporen las correcciones efectivas de teoría cuántica de campos al potencial Newtoniano, y una dilatación temporal no trivial entre un observador en $r \rightarrow \infty$ y un observador en $r = 0$. Precisamente, esta sección se encarga de estudiar con más detalle estos aspectos.

De acuerdo a De Lorenzo *et al.*, la mayoría de las métricas correspondientes a modelos de agujeros negros regulares poseen dos características que carecen de sentido físico, a saber, que un reloj en el centro regular no presenta ningún retraso con respecto a un reloj en el infinito, y que no reproducen las correcciones efectivas de teoría cuántica de campos al potencial Newtoniano [9]. Por estos motivos, los autores proponen una modificación a la métrica de interés, en este caso la de Hayward, que corrige estos “defectos” de dicha métrica.

La corrección efectiva de teoría cuántica de campos al potencial Newtoniano es

$$\Phi(r) = - \frac{M}{r} \left(1 + \beta \frac{l_p^2}{r^2} \right) + \mathcal{O}(r^{-4}), \quad (5.1)$$

donde l_p es la longitud de Planck.

La métrica de Hayward modificada está dada por

$$ds^2 = -G(r)F(r)dt^2 + \frac{1}{F(r)}dr^2 + r^2d\Omega^2 \quad (5.2)$$

donde

$$F(r) = 1 - \frac{Mr^2}{r^3 + 2ML^2} \quad (5.3)$$

$$G(r) = 1 - \frac{\beta M \alpha}{\alpha r^3 + \beta M} \quad (5.4)$$

6. Conclusiones

7. Anexos

¡OJO! Correcciones cuánticas

Referencias

- [1] J. M. Bardeen. Non-singular general-relativistic gravitational collapse. In *Proceedings of International Conference GR5*, page 174, Tbilisi, 1968.
- [2] A. Borde. Open and closed universes, initial singularities, and inflation. *Phys. Rev. D*, 50:3692–3702, September 1994.
- [3] Ayón-Beato, E. and García, A. The Bardeen model as a nonlinear magnetic monopole. *Physics Letters B*, 493:149–152, November 2000.
- [4] Ayón-Beato, E. and García, A. Four-parametric regular black hole solution. *General Relativity and Gravitation*, 37:635–641, April 2005.
- [5] Ayón-Beato, E. and García, A. Regular Black Hole in General Relativity Coupled to Nonlinear Electrodynamics. *Physical Review Letters*, 80:5056–5059, June 1998.
- [6] Ayón-Beato, E. and García, A. Non-Singular Charged Black Hole Solution for Non-Linear Source. *General Relativity and Gravitation*, 31:629, May 1999.
- [7] Ayón-Beato, E. and García, A. New regular black hole solution from nonlinear electrodynamics. *Physics Letters B*, 464:25–29, October 1999.
- [8] S. A. Hayward. Formation and Evaporation of Nonsingular Black Holes. *Physical Review Letters*, 96(3):031103, January 2006.
- [9] T. De Lorenzo, C. Pacilio, C. Rovelli, and S. Speziale. On the effective metric of a Planck star. *General Relativity and Gravitation*, 47:41, April 2015.
- [10] C. Rovelli and F. Vidotto. Planck stars. *International Journal of Modern Physics D*, 23:1442026, December 2014.
- [11] Sean M Carroll. *Spacetime and geometry: An introduction to general relativity*, volume 1. Addison Wesley, 1st edition, 2004.
- [12] Kip S. Thorne, John Archibald Wheeler, and Charles W. Misner. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1st. edition, 1973.
- [13] S. M. Carroll. *Lecture Notes on General Relativity*. December 1997.
- [14] O. B. Zaslavskii. Regular black holes and energy conditions. *Physics Letters B*, 688:278–280, May 2010.
- [15] I. Dymnikova. Regular electrically charged vacuum structures with de Sitter centre in nonlinear electrodynamics coupled to general relativity. *Classical and Quantum Gravity*, 21:4417–4428, September 2004.
- [16] L. Balart and E. C. Vagenas. Regular black hole metrics and the weak energy condition. *Physics Letters B*, 730:14–17, March 2014.
- [17] Roger Penrose. Gravitational collapse and space-time singularities. *Phys. Rev. Lett.*, 14:57–59, Jan 1965.
- [18] J. M. M. Senovilla and D. Garfinkle. The 1965 Penrose singularity theorem. *Classical and Quantum Gravity*, 32(12):124008, June 2015.
- [19] A. Borde. Regular black holes and topology change. *Phys. Rev. D*, 55:7615–7617, June 1997.
- [20] Thanu Padmanabhan. *Gravitation: foundations and frontiers*. Cambridge University Press, 2010.
- [21] Matthias Blau. *Lecture Notes on General Relativity*. Albert Einstein Center for Fundamental Physics, 2015.

- [22] J.B. Griffiths and J. Podolský. *Exact Space-Times in Einstein's General Relativity*. Cambridge Monographs on Mathematical Physics. Cambridge University Press, 2009.
- [23] R.M. Wald. *General Relativity*. University of Chicago Press, 2010.
- [24] Ray D'Inverno. *Introducing Einstein's relativity*. Clarendon press, 1992.
- [25] S.W. Hawking and G.F.R. Ellis. *The Large Scale Structure of Space-time*, volume 1. Cambridge University Press, 20th edition, 1973.
- [26] L. Balart and E. C. Vagenas. Regular black holes with a nonlinear electrodynamics source. *Phys. Rev. D*, 90(12):124045, December 2014.
- [27] A. Einstein. Die grundlage der allgemeinen relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354(7):769–822, 1916.
- [28] S. Ansoldi. Spherical black holes with regular center: a review of existing models including a recent realization with Gaussian sources. *ArXiv e-prints*, February 2008.
- [29] R. W. Lindquist, R. A. Schwartz, and C. W. Misner. Vaidya's radiating schwarzschild metric. *Phys. Rev.*, 137:B1364–B1368, Mar 1965.
- [30] Sean A. Hayward. General laws of black-hole dynamics. *Phys. Rev. D*, 49:6467–6474, Jun 1994.