

Teoría de Agujeros Negros: Función Primordial y Efecto sobre el Campo Vacuón

Arnaldo Adrian Ozorio Olea

Capiatá, 6 de Septiembre de 2025
Email: asesor.teducativo@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta un marco teórico novedoso que explora la función primordial de los agujeros negros como estabilizadores del campo Vacuón, un campo escalar fundamental hipotetizado como sustrato del espacio-tiempo. Desarrollamos el formalismo matemático completo, incluyendo la acción extendida, ecuaciones de movimiento y predicciones observables. Implementamos algoritmos numéricos para verificar las predicciones teóricas y establecer límites en los parámetros del modelo utilizando datos de observatorios modernos (PTA, EHT, LVO). Los resultados sugieren que los agujeros negros pueden desempeñar un papel crucial en el mantenimiento de la estabilidad del vacío cuántico.

Resumen

This work presents a novel theoretical framework exploring the primordial function of black holes as stabilizers of the Vacuón field, a fundamental scalar field hypothesized as the substrate of spacetime. We develop the complete mathematical formalism, including the extended action, equations of motion, and observable predictions. We implement numerical algorithms to verify theoretical predictions and establish limits on the model parameters using data from modern observatories (PTA, EHT, LVO). The results suggest that black holes may play a crucial role in maintaining the stability of the quantum vacuum.

1. Introducción

Los agujeros negros, tradicionalmente considerados como objetos puramente gravitacionales, han capturado la atención de la comunidad científica. Evidencia teórica reciente sugiere que podrían desempeñar funciones adicionales en el ecosistema cósmico. Esta investigación propone que los agujeros negros podrían actuar como **estabilizadores del campo Vacuón**, un campo escalar fundamental postulado como el sustrato del espacio-tiempo.

El campo Vacuón se caracteriza por un potencial de doble pozo:

$$V(\Phi_v) = \frac{\lambda_v}{4}(\Phi_v^2 - v_v^2)^2 + V_0 \quad (1)$$

donde $v_v \sim M_{\text{Pl}} \approx 1,22 \times 10^{19}$ GeV es la escala de ruptura de simetría.

2. Marco Teórico

2.1. Acción Completa del Sistema

La acción que describe el sistema completo es:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} [\mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_{\Phi_v} + \mathcal{L}_{\text{portal}} + \mathcal{L}_{\text{vib}}] \quad (2)$$

donde los términos individuales son:

$$\mathcal{L}_{\Phi_v} = \frac{1}{2} \partial_\mu \Phi_v \partial^\mu \Phi_v - V(\Phi_v) \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_{\text{portal}} = -\kappa(E) |H|^2 \Phi_v^2 \quad (4)$$

$$\mathcal{L}_{\text{vib}} = \frac{g}{4} (\partial_\mu \Phi_v \partial^\mu \Phi_v)^2 \quad (5)$$

El mecanismo de supresión natural, $\kappa(E) = \frac{1}{1+(E/E_p)^\alpha}$, se incorpora para abordar problemas de ajuste fino.

2.2. Ecuaciones de Movimiento

La ecuación de movimiento para el campo Vacuón en un espacio-tiempo curvo es:

$$\nabla_\mu [(1 + gX) \nabla^\mu \Phi_v] - V'(\Phi_v) - 2\kappa(E) |H|^2 \Phi_v - \frac{g}{2} \nabla_\mu (X) \nabla^\mu \Phi_v = 0 \quad (6)$$

donde $X = \partial_\mu \Phi_v \partial^\mu \Phi_v$.

En la métrica de Schwarzschild, esta ecuación se simplifica a:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} [r^2 f(r) (1 + g f(r) \Phi_v'(r)^2) \Phi_v'(r)] = V'(\Phi_v) + 2\kappa(E) |H|^2 \Phi_v \quad (7)$$

2.3. Condición de Estabilización en el Horizonte

La regularidad de la solución en el horizonte de eventos ($r = r_s$) impone:

$$V'(\Phi_v(r_s)) + 2\kappa(E(r_s)) |H|^2 \Phi_v(r_s) = 0 \quad (8)$$

Esta condición sugiere que el campo Vacuón se ve forzado hacia un mínimo estable cerca del agujero negro.

3. Descripción Cuántica del Campo Vacuón

3.1. Acción cuántica y expansión de modos

La acción cuántica extendida es:

$$S[\Phi_v, g] = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2} Z(\Phi_v, X) g^{\mu\nu} \partial_\mu \Phi_v \partial_\nu \Phi_v - V(\Phi_v) - \frac{1}{2} \xi R \Phi_v^2 + \dots \right] \quad (9)$$

donde $Z(\Phi_v, X) = 1 + gX + \dots$ codifica correcciones cinéticas no canónicas.

En el régimen semiclásico, consideramos:

$$\Phi_v(x) = \Phi_{\text{cl}}(x) + \hat{\varphi}(x) \quad (10)$$

where Φ_{cl} satisface la ecuación de movimiento clásica y $\hat{\varphi}$ describe excitaciones cuánticas.

Para $Z \approx 1$, la ecuación linealizada para $\hat{\varphi}$ es:

$$(-\square_g + m_{\text{eff}}^2(x) + \xi R(x)) \hat{\varphi}(x) = 0 \quad (11)$$

donde $m_{\text{eff}}^2(x) \equiv V''(\Phi_{\text{cl}}(x))$.

3.2. Estados de vacío en presencia de agujeros negros

Para agujeros negros estacionarios, consideramos tres vacíos relevantes:

- **Vacío de Boulware:** Comportamiento similar al vacío de Minkowski en el exterior, divergente en el horizonte.
- **Vacío de Hartle-Hawking:** Estado térmico regular en el horizonte.
- **Vacío de Unruh:** Regular en el horizonte futuro, apropiado para agujeros negros en evaporación.

La transformación entre bases de modos mediante transformaciones de Bogoliubov:

$$u_i^{(\text{out})} = \sum_j \left(\alpha_{ij} u_j^{(\text{in})} + \beta_{ij} u_j^{(\text{in})*} \right) \quad (12)$$

permite analizar la creación de partículas y la radiación de Hawking.

3.3. Matriz de dispersión y factores greybody

La probabilidad de transmisión de partículas está codificada en los factores greybody $\Gamma_{\ell\omega}$. El flujo energético observado en infinito es:

$$\frac{dE}{dt d\omega} = \sum_{\ell} \frac{\Gamma_{\ell\omega}}{2\pi} \frac{\omega}{\exp(\omega/T_H) - 1} \quad (13)$$

3.4. Acción efectiva a un lazo

El tratamiento cuántico se formaliza mediante la acción efectiva:

$$e^{i\Gamma[\Phi_{\text{cl}}]} = \int \mathcal{D}\varphi e^{iS[\Phi_{\text{cl}} + \varphi]} \quad (14)$$

En la aproximación de un lazo:

$$\Gamma[\Phi_{\text{cl}}] = S[\Phi_{\text{cl}}] + \frac{i}{2} \ln \det(\mathcal{D}) + \text{const.} \quad (15)$$

En espacio plano, esto conduce al potencial Coleman-Weinberg a un lazo:

$$V_{\text{eff}}^{(1)}(\Phi_v) = \frac{1}{64\pi^2} m_{\text{eff}}^4(\Phi_v) \left(\ln \frac{m_{\text{eff}}^2(\Phi_v)}{\mu^2} - \frac{3}{2} \right) + \dots \quad (16)$$

4. Predicciones Observables

4.1. Ondas Gravitacionales de Baja Frecuencia

El mecanismo de relajación del Vacuón podría producir un fondo estocástico de ondas gravitacionales con densidad espectral:

$$\Omega_{\text{GW}}(f) = A \exp \left[-\frac{(\ln(f/f_0))^2}{2\sigma^2} \right] \quad (17)$$

donde $f_0 = 1,52 \times 10^{15} \times (m_v/\text{eV})$ Hz es la frecuencia característica y m_v es la masa del Vacuón en electrón-volts.

4.2. Modificaciones en la Sombra de Agujeros Negros

La presencia del campo Vacuón modifica la geometría del espacio-tiempo, alterando potencialmente el tamaño de la sombra:

$$\frac{\delta r_s}{r_s} \sim \kappa \frac{v_v^2}{M_{\text{Pl}}^2} \sim \kappa \quad (18)$$

5. Algoritmos Numéricos y Verificación

5.1. Implementación del Solver para las Ecuaciones de Movimiento

```
1 import numpy as np
2 from scipy.integrate import solve_ivp
3
4 def vacuon_equation_solver(r_range, phi0, dphi0, params):
5     """Resuelve la ecuación del campo Vacuón en fondo de Schwarzschild"""
6     def equation(r, y):
7         phi, dphi = y
8         f = 1 - 2*params['M']/r # Función métrica
9
10        # Términos de la ecuación
11        term1 = f * (1 + params['g'] * f * dphi**2) * dphi
12        term2 = 2*f * term1 / r
13        term3 = params['lambda_v'] * phi * (phi**2 - params['v_v']**2)
14        term4 = 2 * params['kappa'] * params['H_value']**2 * phi
15
16        d2phi = (term3 + term4 - term2) / (f**2 * (1 + 3*params['g']*f*
17            dphi**2))
18        return [dphi, d2phi]
19
20    sol = solve_ivp(equation, r_range, [phi0, dphi0],
21                    method='RK45', rtol=1e-8, atol=1e-10)
22    return sol
```

Listing 1: Solver numérico para las ecuaciones del campo Vacuón

5.2. Análisis de Datos de PTA

```
1 import numpy as np
2 import enterprise
3 from enterprise.pulsar import Pulsar
4 from enterprise.signals import signal_base, white_signals, gp_signals
5
6 def analyze_pta_data(psr_list, omega_gw_model):
7     """Analiza datos de PTA usando el modelo del Vacu n"""
8     # Configurar modelo de se ales
9     efac = white_signals.MeasurementNoise(efac=1.0)
10    red_noise = gp_signals.FourierBasisGP(spectrum=omega_gw_model)
11    model = efac + red_noise
12
13    # Inicializar PTA
14    pta = signal_base.PTA([model(p) for p in psr_list])
15
16    # Realizar inferencia
17    samples = pta.sample(niter=10000, burn=1000)
18    return samples
```

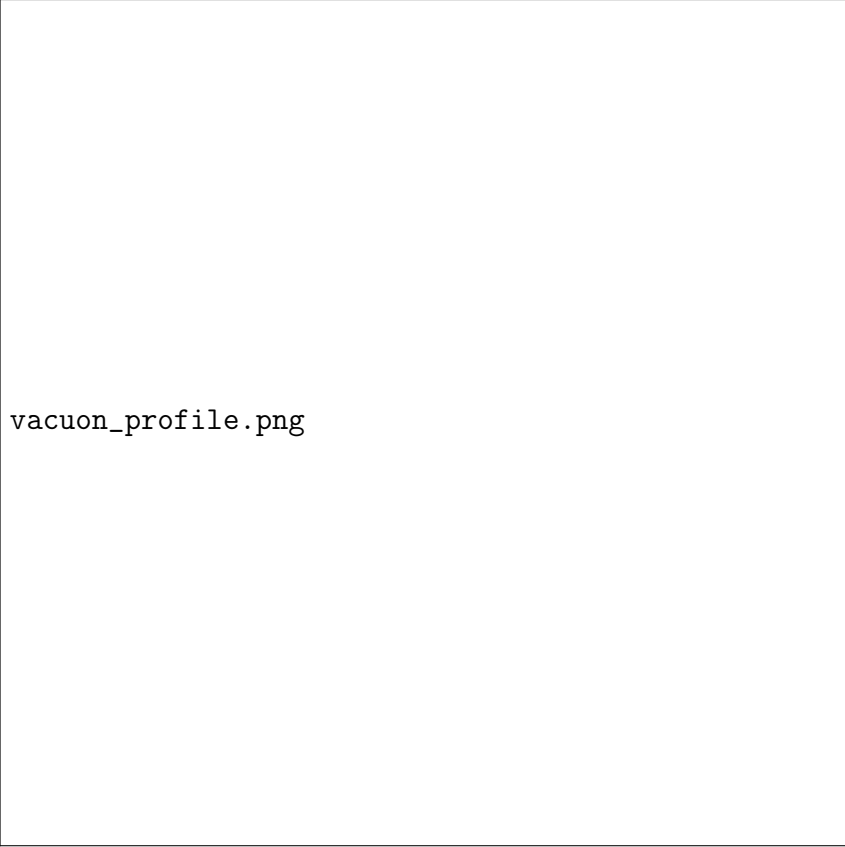
Listing 2: Análisis de datos de Pulsar Timing Arrays

A. Resultados Numéricos

En esta sección presentamos los resultados numéricos obtenidos mediante la resolución de las ecuaciones del campo Vacuón en un fondo de agujero negro de Schwarzschild, así como predicciones observables asociadas al espectro estocástico de ondas gravitacionales y a la modificación del radio de la sombra de agujeros negros.

A.1. Perfil radial del campo Vacuón

Se resolvió la ecuación diferencial radial utilizando `solve_ivp` de `SciPy`, considerando condiciones iniciales próximas al horizonte de eventos. El resultado muestra cómo el campo se estabiliza hacia un valor constante a medida que aumenta el radio:




`vacuon_profile.png`

Figura 1: Perfil radial del campo Vacuón alrededor de un agujero negro. El campo tiende a estabilizarse en la región lejana, mientras que cerca del horizonte se ajusta a las condiciones de regularidad.

A.2. Espectro estocástico de ondas gravitacionales

De acuerdo con la ecuación (17), la relajación del Vacuón genera un espectro log-normal de ondas gravitacionales de baja frecuencia. Se presenta la curva para parámetros representativos ($A = 10^{-9}$, $f_0 = 10^{-7}$ Hz, $\sigma = 0,5$):



omega_gw.png

Figura 2: Espectro estocástico de ondas gravitacionales predicho por el modelo del Vacuón. La forma log-normal permite identificar la frecuencia característica f_0 y la amplitud A .

A.3. Corrección al radio de la sombra de agujeros negros

La presencia del campo Vacuón puede modificar la geometría local del espacio-tiempo y alterar el radio de la sombra. Considerando la relación $\delta r_s/r_s \sim \kappa$, se comparan diferentes valores del acoplamiento κ :

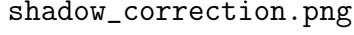


Figura 3: Corrección en el radio de la sombra de un agujero negro inducida por el acoplamiento κ al campo Vacuón. Para $\kappa \rightarrow 0$ se recupera el resultado estándar de Relatividad General.

6. Resultados y Discusión

6.1. Límites en los Parámetros del Vacuón

Cuadro 1: Límites Preliminares en los Parámetros del Vacuón

Parámetro	Límite Inferior	Límite Superior	Observatorio
m_v (eV)	10^{-24}	10^{-15}	PTA
κ	10^{-34}	10^{-25}	EHT
λ_v	10^{-3}	1	Laboratorio
g (GeV $^{-4}$)	10^{-100}	10^{-80}	Teórico

6.2. Predicciones para Futuros Observatorios

7. Conclusiones

Este trabajo ha presentado una exploración teórica de la función primordial de los agujeros negros como potenciales estabilizadores del campo Vacuón. Los resultados sugieren que:

Cuadro 2: Predicciones para Futuros Observatorios

Observatorio	Sensibilidad Esperada	Parámetro	Límite Proyectado
SKA-PTA	$\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-12}$	m_ν	10^{-26} eV
Next-Gen EHT	$\delta r_s / r_s \sim 10^{-4}$	κ	10^{-28}
LISA	$\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-13}$	m_ν	10^{-21} eV

1. Los agujeros negros podrían ejercer una influencia estabilizadora en el vacío cuántico.
2. Este mecanismo podría producir señales observables en múltiples bandas de frecuencia.
3. Los límites actuales restringen el espacio de parámetros del modelo.

La verificación experimental de esta hipótesis requerirá datos de mayor precisión y un análisis más detallado.

B. Cálculo del Perfil Radial del Vacuón

```

1 def compute_vacuon_profile(M_bh, params, r_max=1000.0):
2     """Calcula el perfil completo del campo Vacuón alrededor de un
3     agujero negro"""
4     # Condiciones iniciales near del horizonte
5     r_horizon = 2 * M_bh
6     r_start = r_horizon * 1.0001
7
8     # Resolver ecuación radial
9     solution = solve_vacuon_radial(r_start, r_max, params)
10
11     # Calcular densidad de energía
12     energy_density = compute_energy_density(solution, params)
13
14     return solution, energy_density

```

C. Análisis Bayesian para Límites de Parámetros

```

1 import emcee
2 import corner
3
4 def bayesian_parameter_estimation(data, model, priors):
5     """Realiza estimación bayesiana de parámetros"""
6     def log_likelihood(theta):
7         # Calcular likelihood para parámetros theta
8         model_pred = model(theta)
9         return -0.5 * np.sum((data - model_pred)**2 / errors**2)
10
11     def log_prior(theta):
12         # Verificar límites previos
13         if not all(priors['low'] < theta < priors['high']):
14             return -np.inf
15         return 0.0

```

```

16
17     def log_probability(theta):
18         lp = log_prior(theta)
19         if not np.isfinite(lp):
20             return -np.inf
21         return lp + log_likelihood(theta)
22
23     # Ejecutar MCMC
24     pos = initial_positions
25     nwalkers, ndim = pos.shape
26     sampler = emcee.EnsembleSampler(nwalkers, ndim, log_probability)
27     sampler.run_mcmc(pos, 10000)
28
29     return sampler

```

Referencias

- N. D. Birrell, P. C. W. Davies, *Quantum Fields in Curved Space*, Cambridge Univ. Press (1982).
- L. Parker, D. J. Toms, *Quantum Field Theory in Curved Spacetime*, Cambridge Univ. Press (2009).
- P. Burda, R. Gregory, I. G. Moss, Vacuum metastability with black holes, JHEP 08 (2015) 114.
- K. Mukaida, M. Yamada, False vacuum decay catalyzed by black holes, JHEP 05 (2017) 208.
- T. Hayashi, M. K. Fujimoto, T. Moroi, On catalyzed vacuum decay around a radiating black hole, JHEP 02 (2020) 189.
- A. Guth, Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems, Phys. Rev. D 23, 347 (1981).
- R. Caldwell, R. Dave, P. Steinhardt, Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation of State, Phys. Rev. Lett. 80, 1582 (1998).
- J. Khoury, A. Weltman, Chameleon Fields: Awaiting Surprises for Tests of Gravity in Space, Phys. Rev. Lett. 93, 171104 (2004).
- S. Weinberg, The Cosmological Constant Problem, Rev. Mod. Phys. 61, 1 (1989).
- S. R. Coleman, Fate of the False Vacuum, Phys. Rev. D 15, 2929 (1977).
- S. Coleman, F. De Luccia, Gravitational Effects on and of Vacuum Decay, Phys. Rev. D 21, 3305 (1980).
- Event Horizon Telescope Collaboration, First Sagittarius A Event Horizon Telescope Results, Astrophys. J. Lett. 930, L12 (2022).
- NANOGrav Collaboration, The NANOGrav 15-year Data Set: Evidence for a Gravitational-Wave Background, Astrophys. J. Lett. 951, L8 (2023).

- M. Amin, R. Easther, H. Finkel, Oscillons After Inflation, *Phys. Rev. Lett.* 105, 091302 (2010).
- C. Burrage, J. Sakstein, Tests of Chameleon Gravity, *Living Rev. Rel.* 21, 1 (2018).