

# AGUJEROS NEGROS Y FÍSICA CONTEMPORÁNEA

**J. Fernando Barbero G.**

Instituto de Estructura de la Materia, CSIC.

Madrid, 11 de noviembre de 2011



**CSIC**

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

- 1 Un poco de historia.
- 2 Objetos compactos en el Universo.
- 3 ¿Qué son los agujeros negros?
- 4 Relatividad especial.
- 5 Relatividad especial y geometría.
- 6 Relatividad general.
- 7 Agujeros negros y relatividad general.

Una primera propuesta sobre la posible existencia de **estrellas oscuras**, debida al geólogo inglés **John Michell**, aparece en una carta suya dirigida a Cavendish en 1783:

If the semi-diameter of a sphere of the same density as the Sun were to exceed that of the Sun in the proportion of 500 to 1, a body falling from an infinite height towards it would have acquired at its surface greater velocity than that of light, and consequently supposing light to be attracted by the same force in proportion to its vis inertiae, with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity.



En 1796 Pierre-Simon Laplace propuso la misma idea en su *Exposition du système du Monde* (aunque, al parecer, **se eliminó** en ediciones posteriores).





En 1796 Pierre-Simon Laplace propuso la misma idea en su *Exposition du système du Monde* (aunque, al parecer, **se eliminó** en ediciones posteriores).

**Razón:** como se consideraba que la luz era una onda (¿sin masa?) no estaba claro que se viera influida por los campos gravitatorios. No se prestó demasiada atención a esta idea porque era demasiado especulativa.



En 1796 Pierre-Simon Laplace propuso la misma idea en su *Exposition du système du Monde* (aunque, al parecer, **se eliminó** en ediciones posteriores).

**Razón:** como se consideraba que la luz era una onda (¿sin masa?) no estaba claro que se viera influida por los campos gravitatorios. No se prestó demasiada atención a esta idea porque era demasiado especulativa.

En todo caso parece interesante **pensar** un poco en ello...

## Un poco de física elemental:

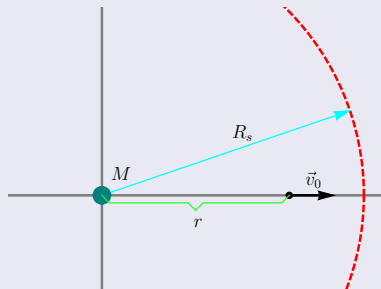
Una masa puntual  $M$  crea un campo gravitatorio.

Lanzamos radialmente hacia afuera una masa  $m$  con velocidad  $\vec{v}_0$  desde una distancia  $r$ .

¿Puede alejarse indefinidamente de  $M$ ?

**Respuesta:** Sí, siempre que la distancia  $r$  cumpla la condición

$$r > \frac{2G_N M}{v_0^2}$$



$$\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{G_N M m}{r} > 0, r > \frac{2G_N M}{v_0^2}$$

$$v_0 = c \Rightarrow r > \frac{2G_N M}{c^2} := R_s.$$

# UN POCO DE HISTORIA

- El razonamiento anterior sirve para una distribución esférica de masa  $M$ .
- Algunos valores para  $R_s$ .

① Tierra  $M_{\text{Tierra}} = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg.}$

② Sol  $M_{\text{Sol}} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg.}$

③ Galaxia  $M_G = 10^{12} M_{\text{Sol}}.$

•  $R_s = 8.84 \text{ mm.}$

•  $R_s = 2.95 \text{ km.}$

•  $R_s = 0.31 \text{ a.luz.}$

- Para que un objeto esférico de masa  $M$  y densidad uniforme  $\rho$  tenga un radio inferior a  $R_s$  se tiene que cumplir que

$$\rho M^2 > \frac{3c^6}{32\pi G_N^3} = 3.33 \times 10^{79} \text{ kg}^3/\text{m}^3.$$

- En los ejemplos anteriores los valores de densidad correspondientes serían

$$\rho_{\text{Tierra}} = 2.1 \times 10^{30} \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\rho_{\text{Sol}} = 1.9 \times 10^{19} \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\rho_G = 8.4 \times 10^{-6} \text{ kg}/\text{m}^3$$

- Serían objetos extremadamente **densos** y/o extremadamente **masivos**.

- Otras propiedades de estos objetos

- 1 Los rayos de luz **pueden salir** de la esfera de radio  $R_s$  y, de hecho, llegan hasta una distancia

$$r_{\max} = \frac{R_s}{\frac{R_s}{r} - 1} \quad \left( > R_s \text{ si } r > \frac{R_s}{2} \right).$$

- 2 Aunque no es posible ver estas **estrellas oscuras** “desde el infinito” podríamos verlas acercándonos lo suficiente (aun sin entrar en la esfera de radio  $R_s$ ).
  - 3 Si cuando la luz está fuera, “sufriera un empujoncito” (p. ej. interacción con materia) podría **no volver a caer** dentro de la esfera de radio  $R_s$ .
  - 4 Sería posible escapar de la región de radio  $R_s$  mediante un cohete y, en todo caso pasar del interior al exterior.
  - 5 Las estrellas oscuras estarían envueltas en un halo de radiación (un curioso análogo clásico de la **radiación de Hawking**).
- Por cierto,  $R_s$  recibe el nombre de **radio de Schwarzschild**.

# OBJETOS COMPACTOS EN EL UNIVERSO

- ¿Podrían existir **estrellas oscuras** como las de Michell y Laplace?
- ¿Tenemos, al menos, evidencia de la existencia de **objetos compactos** o **suficientemente masivos** en el universo?
- ¿Hay algún **proceso concebible de formación** lenta de estos objetos estelares compactos? (similar a la formación planetaria o estelar).
- ¿Qué procesos podrían **concentrar** la materia en regiones suficientemente pequeñas teniendo en cuenta la muy baja densidad media del Universo?
- ¿Podrían tener su origen en **procesos catastróficos**?
- ¿Qué procesos podrían **comprimir la materia** hasta las densidades necesarias para la creación de una estrella oscura si las masas involucradas son como las de los objetos estelares?
- **¿Podríamos detectarlas?**

# OBJETOS COMPACTOS EN EL UNIVERSO

- ¿Podrían existir **estrellas oscuras** como las de Michell y Laplace?
- ¿Tenemos, al menos, evidencia de la existencia de **objetos compactos** o **suficientemente masivos** en el universo?
- ¿Hay algún **proceso concebible de formación** lenta de estos objetos estelares compactos? (similar a la formación planetaria o estelar).
- ¿Qué procesos podrían **concentrar** la materia en regiones suficientemente pequeñas teniendo en cuenta la muy baja densidad media del Universo?
- ¿Podrían tener su origen en **procesos catastróficos**?
- ¿Qué procesos podrían **comprimir la materia** hasta las densidades necesarias para la creación de una estrella oscura si las masas involucradas son como las de los objetos estelares?
- **¿Podríamos detectarlas?**

**Busquemos en el Universo...**



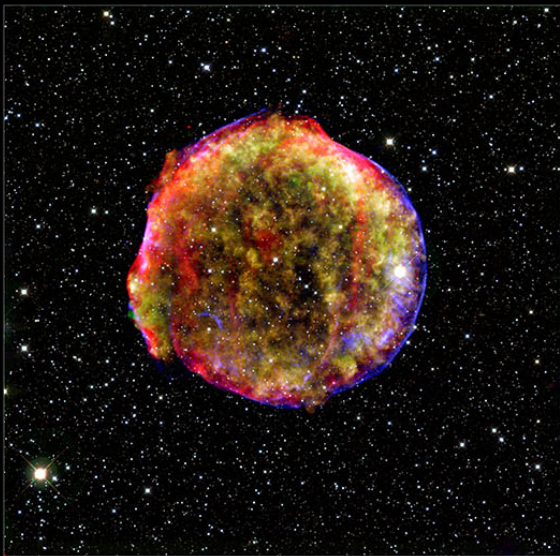
**M1, la Nebulosa del Cangrejo.** Imagen: NASA, ESA, J. Hester (Arizona State University)





Imagen: NASA/CXC/SAO/F.Seward et al.

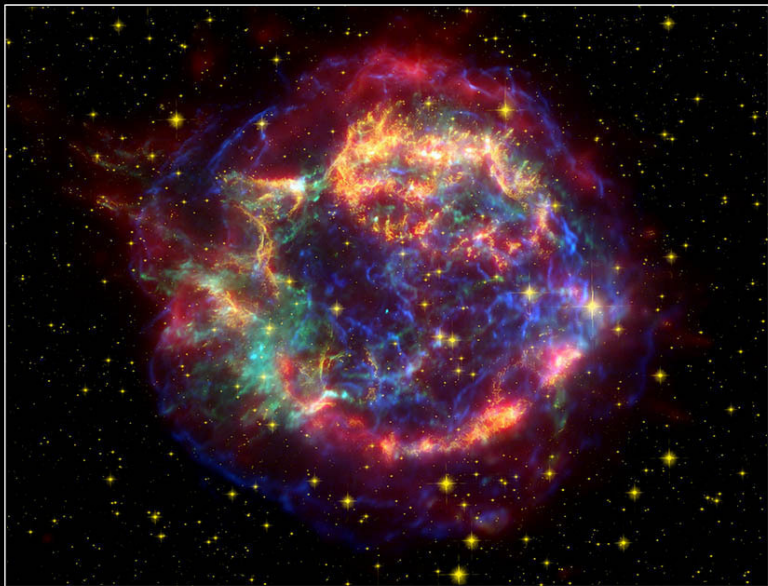
**M1, la Nebulosa del Cangrejo.** Imagen: NASA, ESA, J. Hester (Arizona State University)



**Vivid View of Tycho's Supernova Remnant**  
Spitzer Space Telescope / Chandra / Calar Alto

NASA/JPL-Caltech/CXC/Calar Alto O. Krause (Max Planck Institute for Astronomy)

sig08-016



## Cassiopeia A Supernova Remnant

NASA / JPL-Caltech / O. Krause (Steward Observatory)

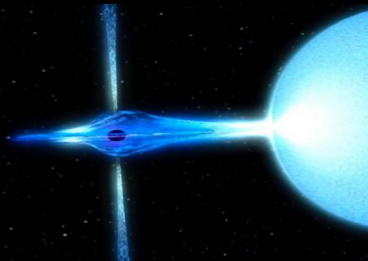
ssc2005-14c

Spitzer Space Telescope • MIPS

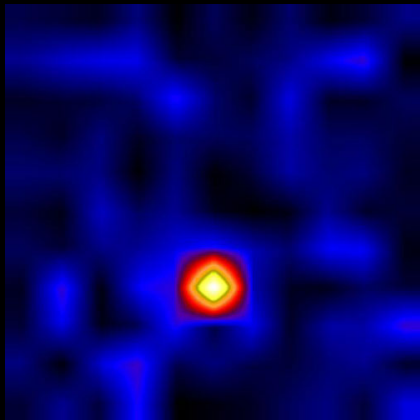
Hubble Space Telescope • ACS

Chandra X-Ray Observatory

# Un agujero negro estelar típico: Cygnus X-1

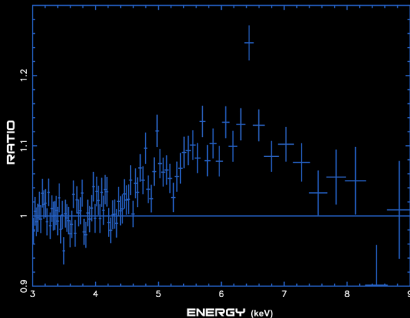


NASA / Honeywell Max-Q Digital Group / Dana Berry



NASA/Marshall Space Flight Center

**CYGNUS X-1**

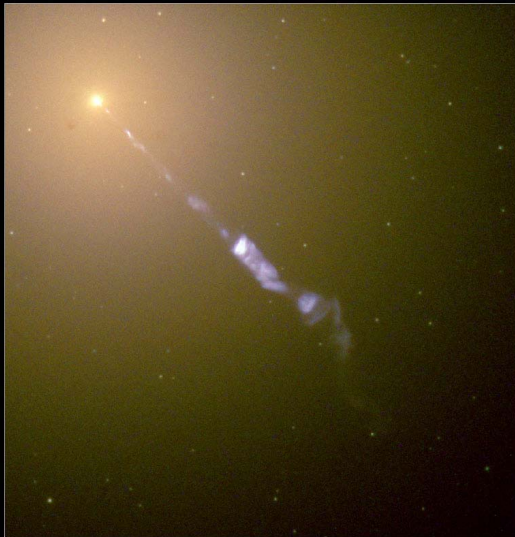


NASA/CXC/SAO/J.Miller et al.



**SN1994D**, Imagen: NASA/ESA, The Hubble Key Project Team, and The High-Z Supernova Search Team

The M87 Jet



Hubble  
Heritage

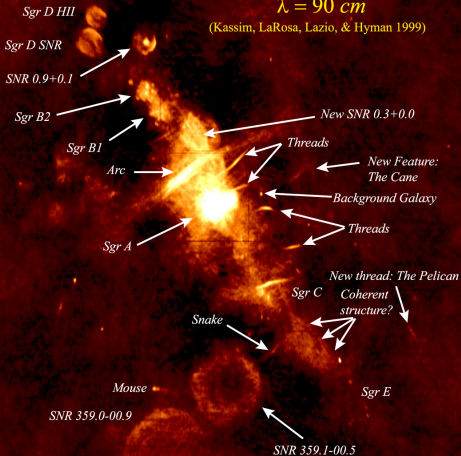
PRC00-20 • Space Telescope Science Institute • NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)



# Wide-Field Radio Image of the Galactic Center

$\lambda = 90 \text{ cm}$

(Kassim, LaRosa, Lazio, & Hyman 1999)



~0.5°  
 ~75 pc  
 ~240 light years

Tornado (SNR?)

Image processing at the Naval Research Laboratory using DoD High Performance Computing Resources  
 Produced by N.E. Kassim, D.S. Briggs, T.J.W. Lazio, T.N. LaRosa, J. Iimamura, & S.D. Hyman  
 Original data from the NRAO Very Large Array courtesy of A. Poellig, K. Anantharamiah, M. Goss, & R. Ekers





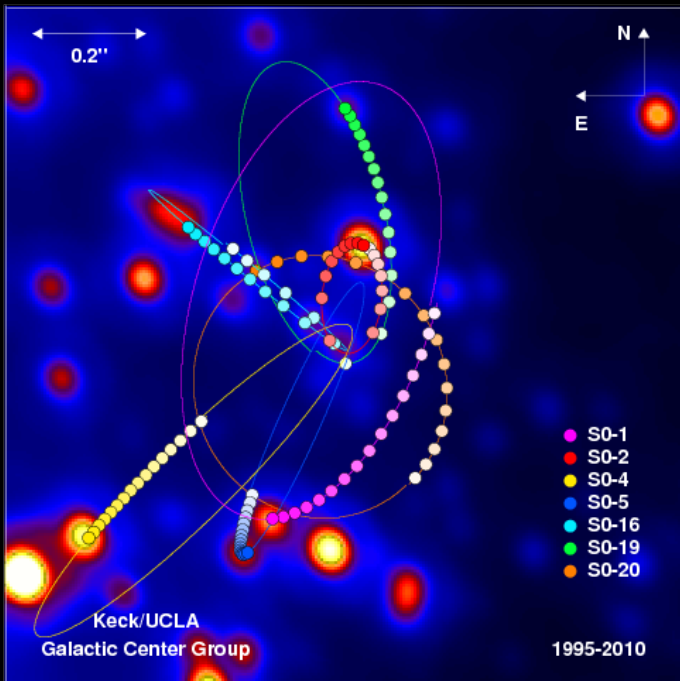
The Centre of the Milky Way  
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory









# ¿QUÉ SON LOS AGUJEROS NEGROS?

No hay ningún proceso físico conocido que permita explicar la existencia y **estabilidad** de las estrellas oscuras de Michell y Laplace pero hemos visto que en el universo hay objetos densos y compactos...

- Son el “estado final” de la evolución de estrellas de gran masa que se produce tras un fenómeno catastrófico de colapso.
  - Se manifiestan en las explosiones estelares conocidas como **supernovas** (e hipernovas.) En algunas situaciones tras el colapso queda un residuo denso y pequeño pero visible (una estrella de neutrones).
  - En otras, cuando la presión de degeneración de los neutrones no puede con la fuerza gravitatoria... **agujeros negros**.
- 1 Agujeros negros **estelares** (hasta una decena de masas solares).
  - 2 Agujeros negros **supermasivos** en el centro de las galaxias (de algunos millones a miles de millones de masas solares). Algunos son tan grandes como el Sistema Solar.
  - 3 ¿Agujeros negros de masa intermedia (miles de masas solares)?

# ¿QUÉ SON LOS AGUJEROS NEGROS?



Objeto astronómico que se forma en un proceso de acreción de materia, gas y polvo, alrededor de una estrella en formación o de una estrella joven.

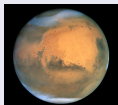


Objeto astronómico que forma por contracción gravitatoria de una nube molecular fría hasta dar lugar a una esfera de plasma incandescente.



Objeto astronómico que aparece como el estado final de algunos procesos de colapso gravitatorio explosivo especialmente violentos.

# ¿QUÉ SON LOS AGUJEROS NEGROS?



Objeto astronómico que se forma en un proceso de acreción de materia, gas y polvo, alrededor de una estrella en formación o de una estrella joven.

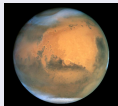


Objeto astronómico que forma por contracción gravitatoria de una nube molecular fría hasta dar lugar a una esfera de plasma incandescente.



Objeto astronómico que aparece como el estado final de algunos procesos de colapso gravitatorio explosivo especialmente violentos.

# ¿QUÉ SON LOS AGUJEROS NEGROS?



Objeto astronómico que se forma en un proceso de acreción de materia, gas y polvo, alrededor de una estrella en formación o de una estrella joven.



Objeto astronómico que forma por contracción gravitatoria de una nube molecular fría hasta dar lugar a una esfera de plasma incandescente.



Objeto astronómico que aparece como el estado final de algunos procesos de colapso gravitatorio explosivo especialmente violentos.

Entonces...

**¿Qué son los agujeros negros?**

**Entonces...**

**o mejor...**



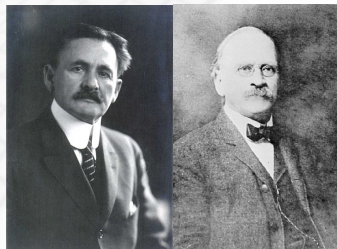
**Entonces...**

**¿Como los describe la física?**

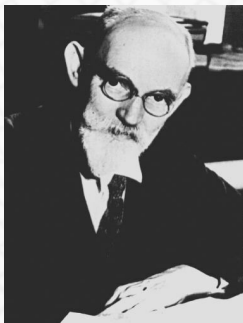
El universo no es galileano/newtoniano, en particular,

- 1 **la relatividad galileana** no proporciona descripción más adecuada del universo físico.
- 2 El espacio y el tiempo **no son absolutos** (son nociones que dependen del sistema de referencia utilizado).
- 3 La luz parece comportarse de forma extraña...

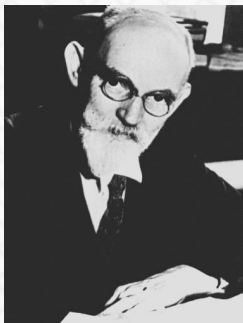
- Evidencia experimental de que algo falla en la relatividad galileana: **el experimento de Michelson y Morley.**
- La explicación de Einstein para el resultado nulo de este experimento: **la velocidad de la luz es la misma en cualquier sistema inercial.**



Evidencia observacional de que la velocidad de la luz es universal (de Sitter).  
No hay distorsión en la imagen que recibimos de los objetos en el universo.



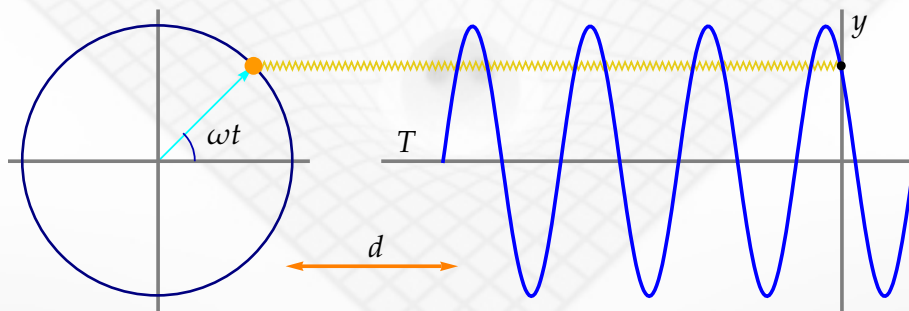
Evidencia observacional de que la velocidad de la luz es universal (de Sitter).  
No hay distorsión en la imagen que recibimos de los objetos en el universo.



¿Qué quiero decir con esto?

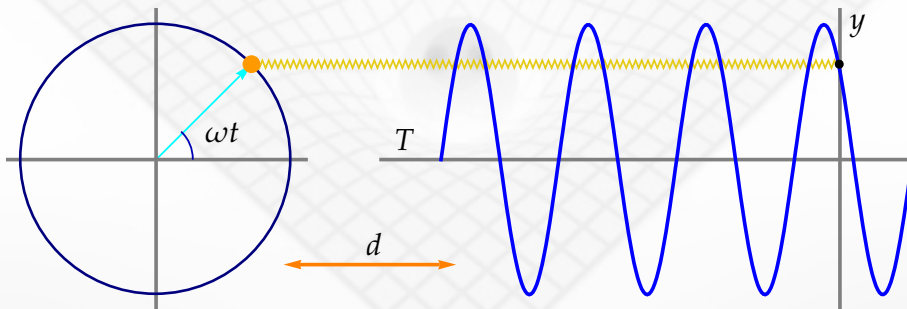
# RELATIVIDAD ESPECIAL

Supongamos que observamos por un telescopio una estrella componente de un sistema binario y representamos la posición de la imagen recibida y en función del tiempo de llegada  $T$ .



- Velocidad de la luz  $c$  infinita.

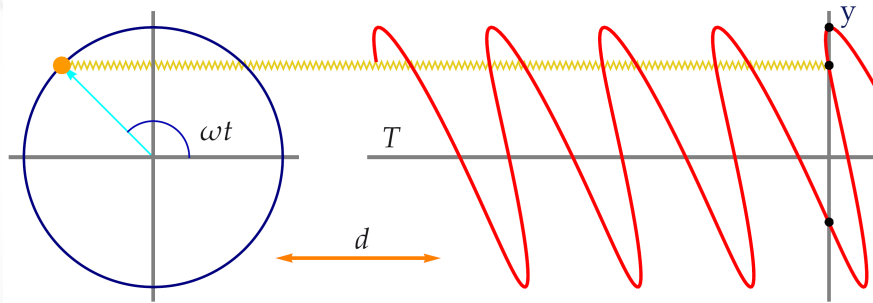
①  $T(t) = t, y(t) = R \sin \omega t$



# RELATIVIDAD ESPECIAL

- $c$  es la velocidad de la luz relativa con respecto al emisor.

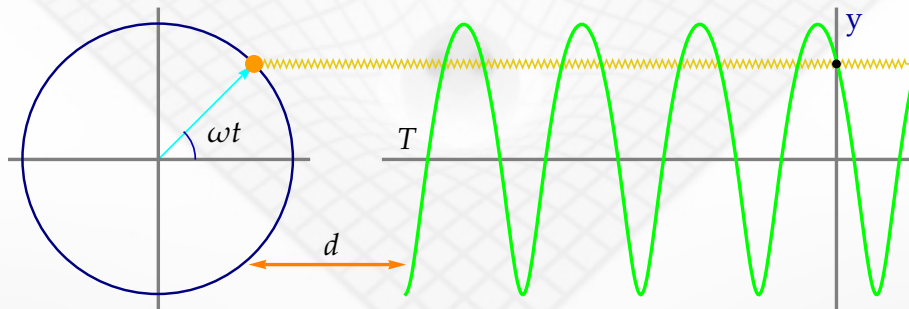
$$② \quad T(t) = t + \frac{d - R \cos \omega t}{\sqrt{c^2 - R^2 \omega^2 \cos^2 \omega t} - R \omega \sin \omega t}, \quad y(t) = R \sin \omega t$$



¡Imágenes múltiples!

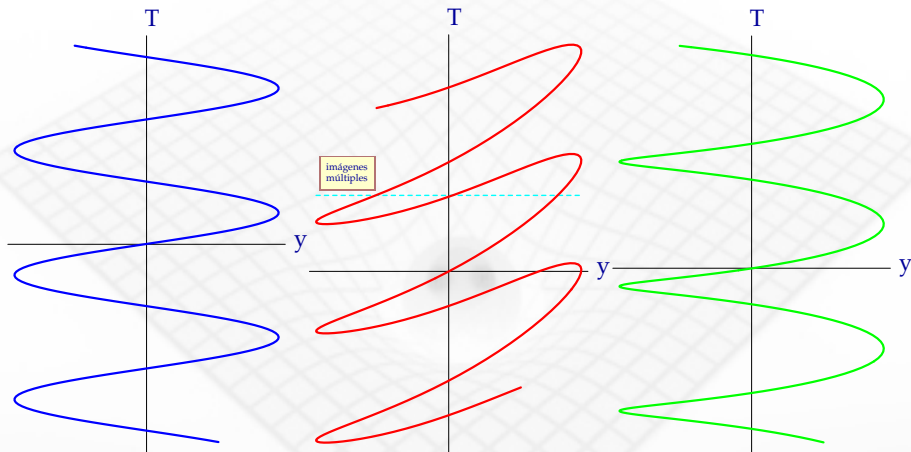
- $c$  independiente del estado de movimiento del emisor.

$$\textcircled{3} \quad T(t) = t + (d - R \cos \omega t)/c, \quad y(t) = R \sin \omega t$$





# RELATIVIDAD ESPECIAL



$c$  infinita.

Velocidad relativa con respecto al emisor igual a  $c$ .

$c$  independiente del estado de movimiento del emisor.



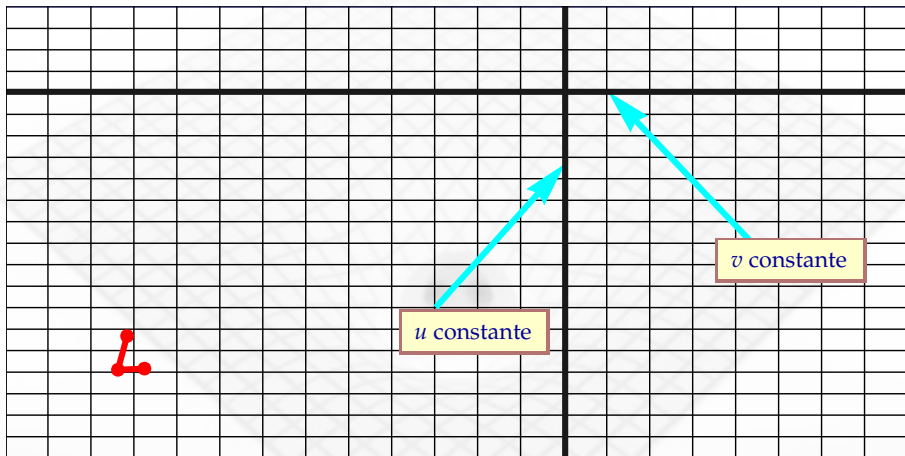
La relatividad especial en unas pocas palabras...

- No es posible considerar espacio y tiempo por separado; hay que introducir un nuevo concepto que los une a los dos: **el espacio-tiempo**.
- El espacio-tiempo está constituido por **sucesos**. Entre ellos puede establecerse una relación geométrica: el **intervalo espacio-temporal** que generaliza el concepto de distancia.
- Es necesario definir cuidadosamente los **conceptos elementales** en los que se basa la cinemática: tiempos, distancias, velocidades,...
- Para ello contamos con “instrumentos elementales de medida”
  - 1 **Relojes** que miden el tiempo propio de cada observador.
  - 2 **Rayos de luz** que nos permiten explorar el espacio-tiempo circundante.
- La nueva cinemática predice fenómenos aparentemente sorprendentes como la **contracción de longitudes** o la **dilatación temporal** y una **nueva ley de composición de velocidades** ( $c$  es la máxima velocidad posible).
- Consecuencias dinámicas: equivalencia entre masa y energía.



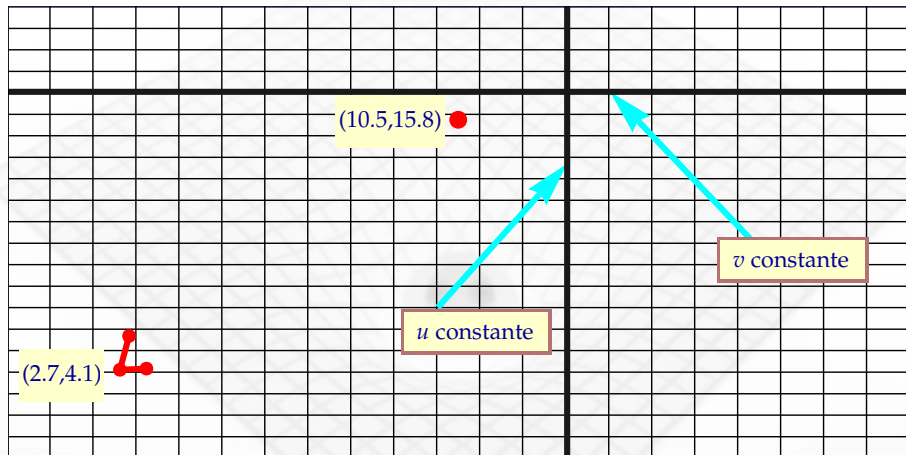
Puntos, segmentos y ángulos en una superficie.

# RELATIVIDAD ESPECIAL Y GEOMETRÍA.



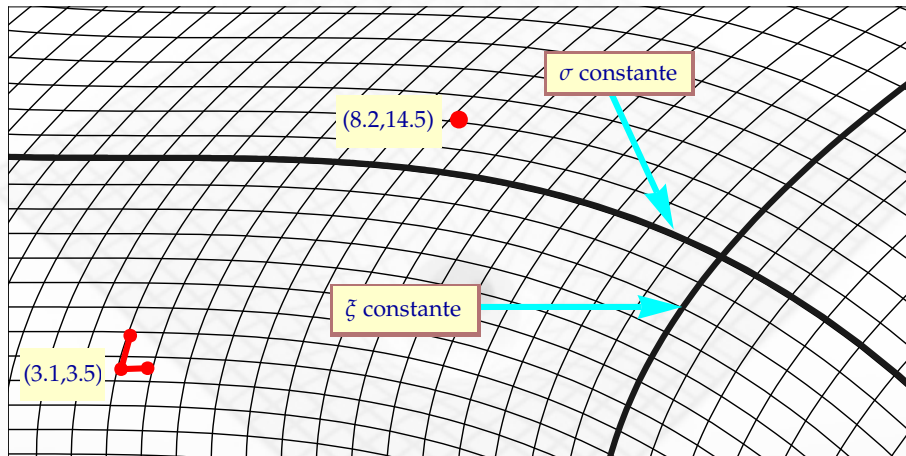
Una forma útil de dar nombre a los puntos: introducir coordenadas.

# RELATIVIDAD ESPECIAL Y GEOMETRÍA.



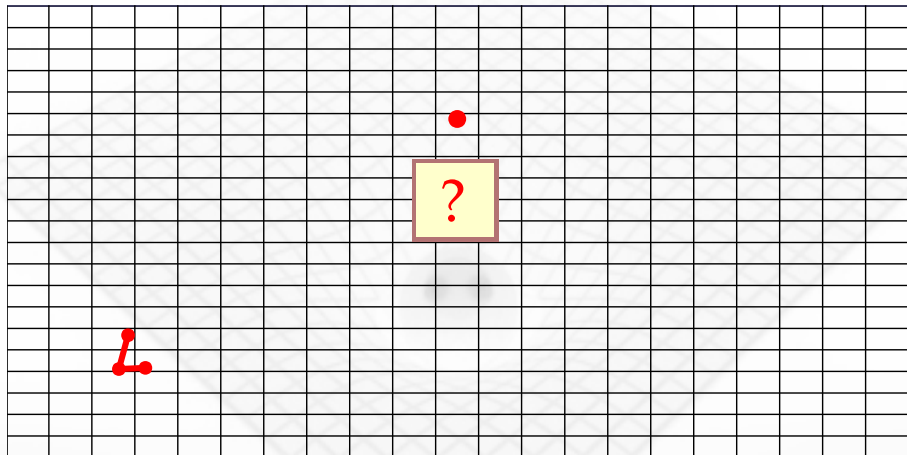
Una forma útil de dar nombre a los puntos: introducir coordenadas.

# RELATIVIDAD ESPECIAL Y GEOMETRÍA.



Tenemos mucha libertad para elegir los sistemas de coordenadas.

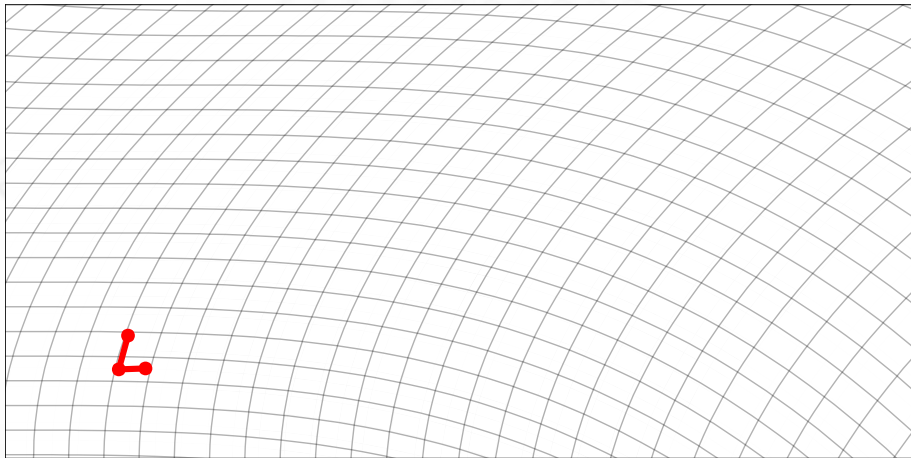
# RELATIVIDAD ESPECIAL Y GEOMETRÍA.



Una métrica  $ds^2 = dv^2 + \sin^2 v du^2$ , es un “Teorema de Pitágoras local”

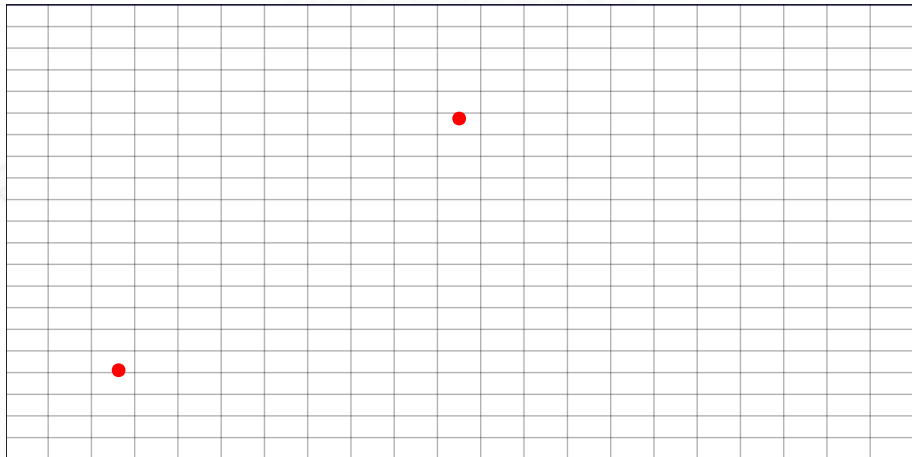


# RELATIVIDAD ESPECIAL Y GEOMETRÍA.

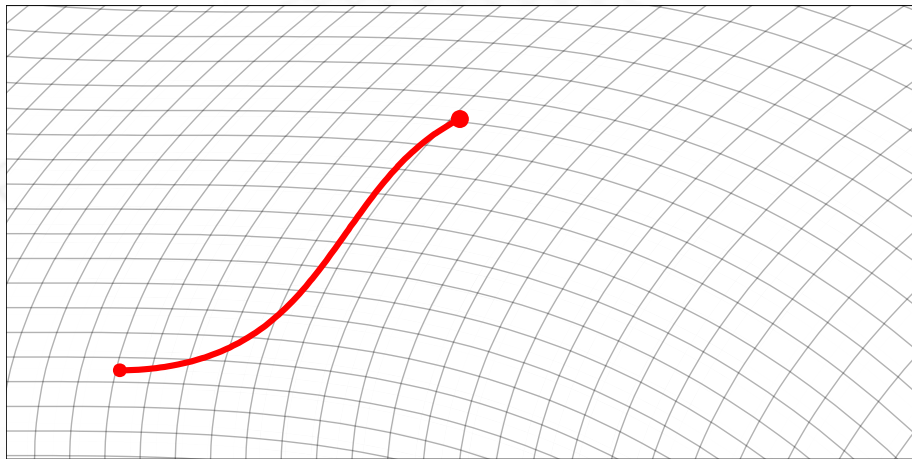


$$ds^2 = \left( \frac{9}{10000} \xi^4 + \sin^2 \left( \sigma - \frac{\xi^3}{100} \right) \right) d\xi^2 + \left( 1 + \frac{4}{25} \sigma^2 \sin^2 \left( \sigma - \frac{\xi^3}{100} \right) \right) d\sigma^2 + \left( \frac{4}{5} \sigma \sin^2 \left( \sigma - \frac{\xi^3}{100} \right) - \frac{3}{50} \xi^2 \right) d\sigma d\xi$$

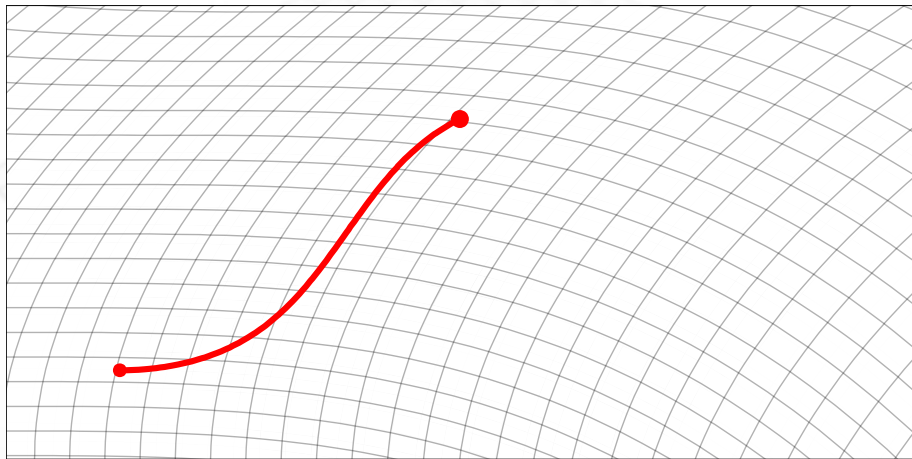
# RELATIVIDAD ESPECIAL Y GEOMETRÍA.



¿Cuál es la trayectoria más corta entre dos puntos?

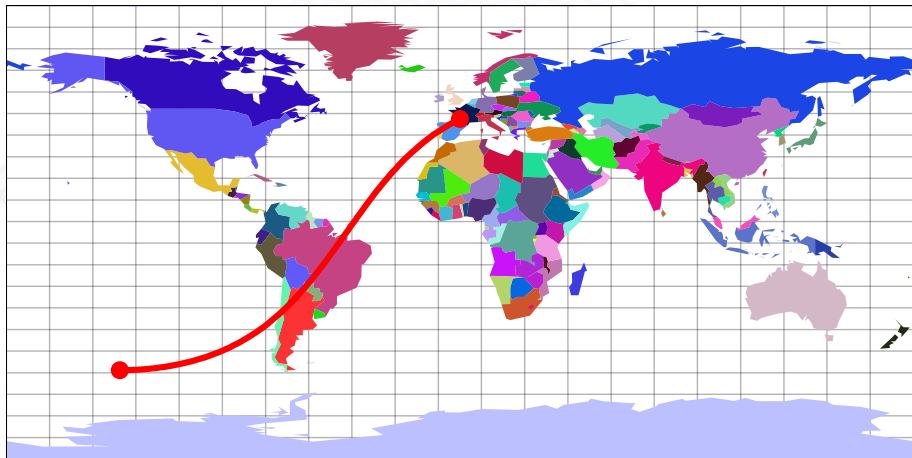


Una curva geodésica.

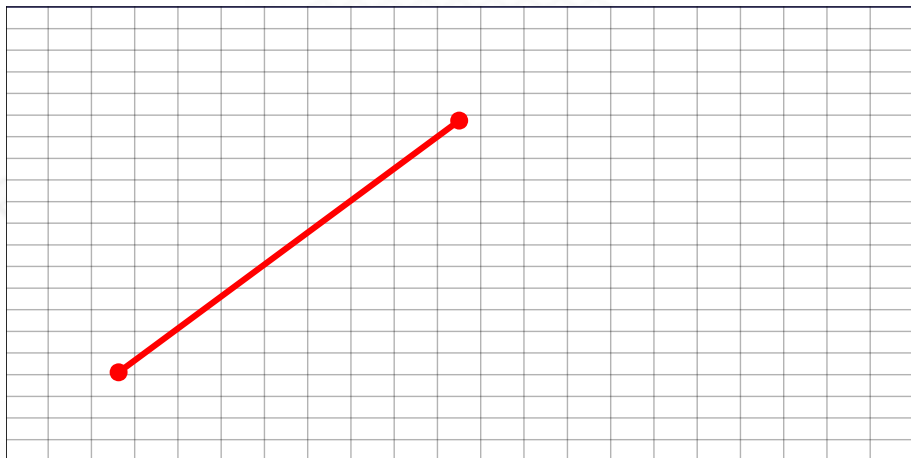


¿Cómo puede ser esto posible?

# RELATIVIDAD ESPECIAL Y GEOMETRÍA



La métrica contiene toda la información relevante sobre la **geometría** de una superficie en **cualquier sistema de coordenadas** que utilicemos.



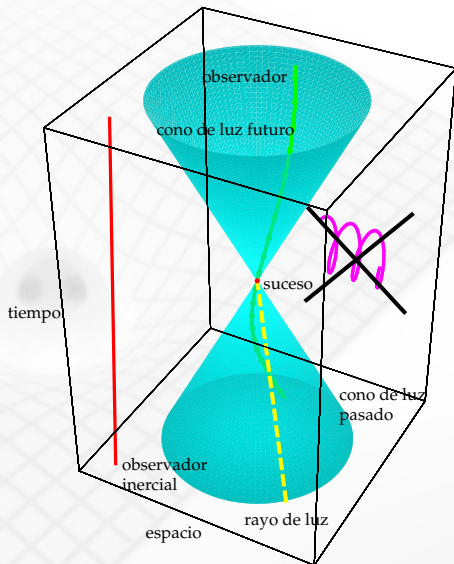
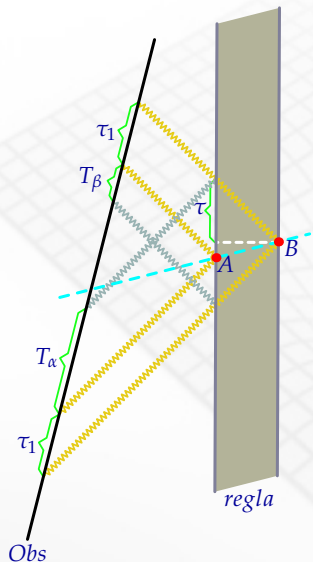
Otra métrica  $ds^2 = du^2 + dv^2/4$ . En última instancia tenemos que entender cada geometría definiendo objetos de manera independiente de las coordenadas (“operacional”) y calculando sus propiedades (ángulos, áreas, volúmenes,...).

- La relatividad especial admite una **interpretación geométrica**.
  - ① Espacio-tiempo  $\mathbb{R}^4$ .
  - ② **Métrica de Minkowski**  $c^2 d\tau^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$ .
  - ③ Los sistemas inerciales vienen dados por isometrías de esta métrica.
  - ④ Varios tipos de trayectorias en el espacio-tiempo (“historias”): curvas de tipo **temporal**, **nulo** o **espacial**.
- Las partículas materiales siguen curvas de tipo tiempo, pueden llevar relojes que miden el **tiempo propio**.
- El tiempo propio viene dado por  $d\tau^2$ .
- Las **geodésicas** de tipo tiempo de esta métrica describen el movimiento de las **partículas libres** (relojes).
- Las **geodésicas nulas** de esta métrica describen el movimiento de los **rayos de luz**.



**Toda la cinemática de la relatividad especial está descrita por la métrica de Minkowski.**

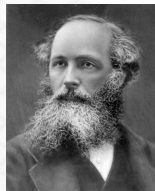
# RELATIVIDAD ESPECIAL





- Una teoría relativista: el **electromagnetismo** de Maxwell
  - 1 Campos eléctricos y magnéticos son manifestaciones de un mismo objeto: el **campo electromagnético**  $F$ .
  - 2 La dinámica de  $F$  viene dada por las **ecuaciones de Maxwell**

$$\begin{aligned}dF &= 0 \\ *d * F &= J \quad \text{con} \quad d * J = 0\end{aligned}$$



- 3 Tienen soluciones en forma de **ondas** que se propagan a una velocidad universal definida por propiedades eléctricas y magnéticas del “vacío” ( $\epsilon_0$  y  $\mu_0$ ). De hecho  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$
- 4 ¡**La luz es un fenómeno electromagnético!**
- 5 Las ecuaciones del electromagnetismo son **invariantes** bajo **transformaciones de Lorentz** (compatibles con la relatividad).

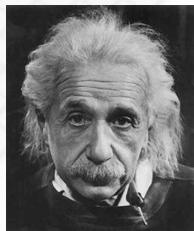
En realidad **TODA** la física ha de ser compatible con la **relatividad**.

**¿Cuál es la teoría relativista de la gravitación?**

## Respuesta: la relatividad general

- **Idea clave:** la geometría del espacio-tiempo, descrita por una **métrica espacio-temporal**  $g$ , es **dinámica** y viene determinada por el **contenido de materia y energía**.
- Las ecuaciones de Einstein

$$\underbrace{G(g)}_{\text{geometría}} = \frac{8\pi G_N}{c^4} \underbrace{T(g, \phi)}_{\text{materia}}$$



- *La materia le dice a la geometría como curvarse y la geometría le dice a la materia como moverse (Wheeler).*

- Las **trayectorias de las partículas libres son geodésicas** definidas por la métrica espacio-temporal.
- Las curvas se clasifican como **temporales, nulas o espaciales**. Los objetos físicos (relojes) siempre siguen curvas temporales.
- La gravedad se manifiesta al estudiar el movimiento a lo largo de estas geodésicas en un espacio-tiempo dado por una métrica con **curvatura** (¡como en la superficie de la Tierra!).
- Las definiciones de distancias, velocidades,... son **las mismas** que en relatividad especial y se miden, de manera idealizada, mediante los mismos procedimientos operacionales.
- La relatividad general **extiende la relatividad especial** de manera sutil, localmente cualquier métrica “se parece” a la de Minkowski.
- La **gravitación newtoniana** aparece también en un límite apropiado.
- Aparecen correcciones a la gravitación newtoniana. **Tests clásicos:**
  - 1 Rotación del perihelio de Mercurio.
  - 2 Desviación gravitatoria de rayos de luz.
  - 3 Corrimiento al rojo gravitatorio.

- Un agujero negro **no es un objeto material**, tampoco es una **región del espacio**, es una región del espacio-tiempo o mejor aún, un cierto tipo de espacio-tiempo, **solución de las ecuaciones de Einstein**.
- Algunos ejemplos importantes: **Schwarzschild y Kerr**

## Schwarzschild (sin rotación)

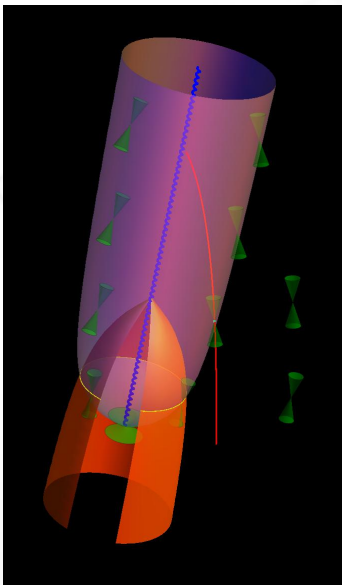
$$c^2 d\tau^2 = -\left(1 - \frac{R_s}{r}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{R_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

## Kerr (con rotación)

$$c^2 d\tau^2 = -\left(1 - \frac{R_s r}{\rho^2}\right) c^2 dt^2 + \frac{\rho^2}{\Delta} dr^2 + \rho^2 d\theta^2 \\ + \left(r^2 + \alpha^2 + \frac{R_s r \alpha^2}{\rho^2} \sin^2 \theta\right) \sin^2 \theta d\phi^2 - \frac{2R_s r \alpha \sin^2 \theta}{\rho^2} c dt d\phi$$

donde  $\alpha = J/(Mc)$ ,  $\rho^2 = r^2 + \alpha^2 \cos^2 \theta$ ,  $\Delta = r^2 - R_s r + \alpha^2$ .

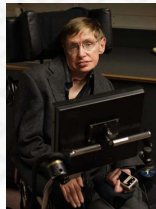
# RELATIVIDAD GENERAL Y AGUJEROS NEGROS



- 1 Hay una singularidad, pero ¡no se ve!
- 2 Se encuentra en el futuro de todos los observadores que caigan en el agujero negro.)
- 3 La curvatura crece sin límite cerca de la singularidad. Esto da lugar a “desagradables” fuerzas de marea.
- 4 La singularidad está rodeada por un horizonte de sucesos (recordar las estrellas oscuras).
- 5 Es imposible salir de la región definida por el horizonte.
- 6 Una vez dentro del horizonte cualquier observador alcanza la singularidad en un tiempo finito.
- 7 Suficientemente lejos el campo gravitatorio es como el de cualquier objeto esférico.
- 8 Desde fuera del horizonte es imposible ver lo que sucede dentro.

**Epílogo:** los agujeros negros como “laboratorio” para la gravedad cuántica.

- Las singularidades que aparecen en relatividad general señalan el límite de aplicabilidad de la propia teoría.
- Para eliminarlas se piensa que es necesaria una **teoría de gravedad cuántica**.
- No hay ninguna que funcione de forma completamente satisfactoria.
- Dos propuestas populares
  - ① **Las teorías de cuerdas y supercuerdas.**
  - ② **La gravedad cuántica de lazos.**
- Un campo de pruebas de estas teorías: el estudio de la **entropía de los agujeros negros** y de la **radiación de Hawking**.



**El estudio de los agujeros negros puede llevarnos hasta la teoría cuántica del espacio-tiempo.**

**Epílogo:** los agujeros negros como “laboratorio” para la gravedad cuántica.

- Las singularidades que aparecen en relatividad general señalan el límite de aplicabilidad de la propia teoría.
- Para eliminarlas se piensa que es necesaria una **teoría de gravedad cuántica**.
- No hay ninguna que funcione de forma completamente satisfactoria.
- Dos propuestas populares
  - 1 Las teorías de cuerdas y supercuerdas.
  - 2 La gravedad cuántica de lazos.
- Un campo de pruebas de estas teorías: el estudio de la **entropía de los agujeros negros** y de la **radiación de Hawking**.



**El estudio de los agujeros negros puede llevarnos hasta la teoría cuántica del espacio-tiempo.**



Image: Ute Kraus, physics education group (Kraus), Universitt Hildesheim, Space Time Travel

(<http://www.spacetimetravel.org/>)



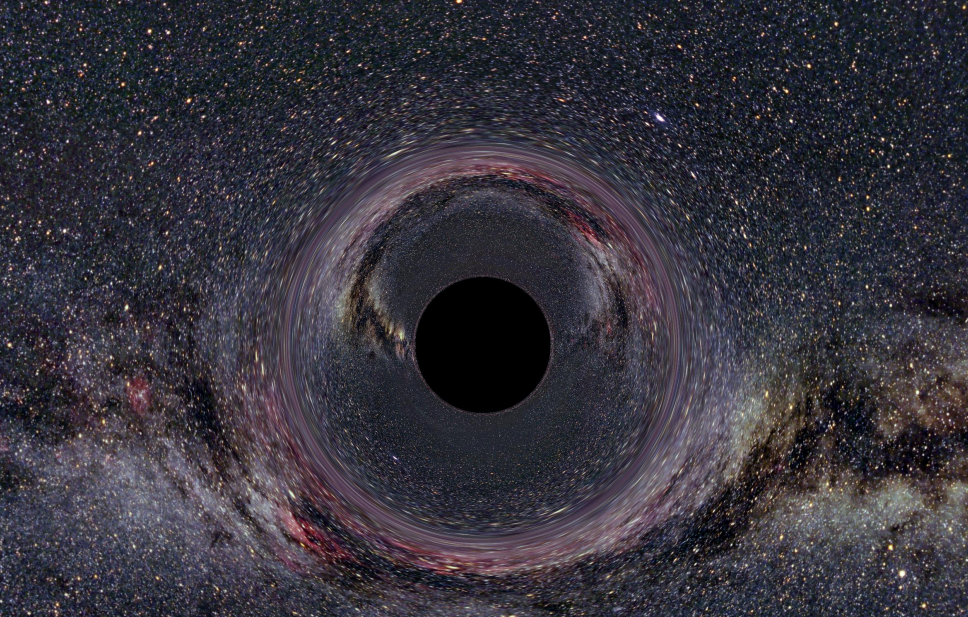


Image: Ute Kraus, physics education group (Kraus), Universität Hildesheim, Space Time Travel

(<http://www.spacetime-travel.org/>)