

Una breve historia de los agujeros negros

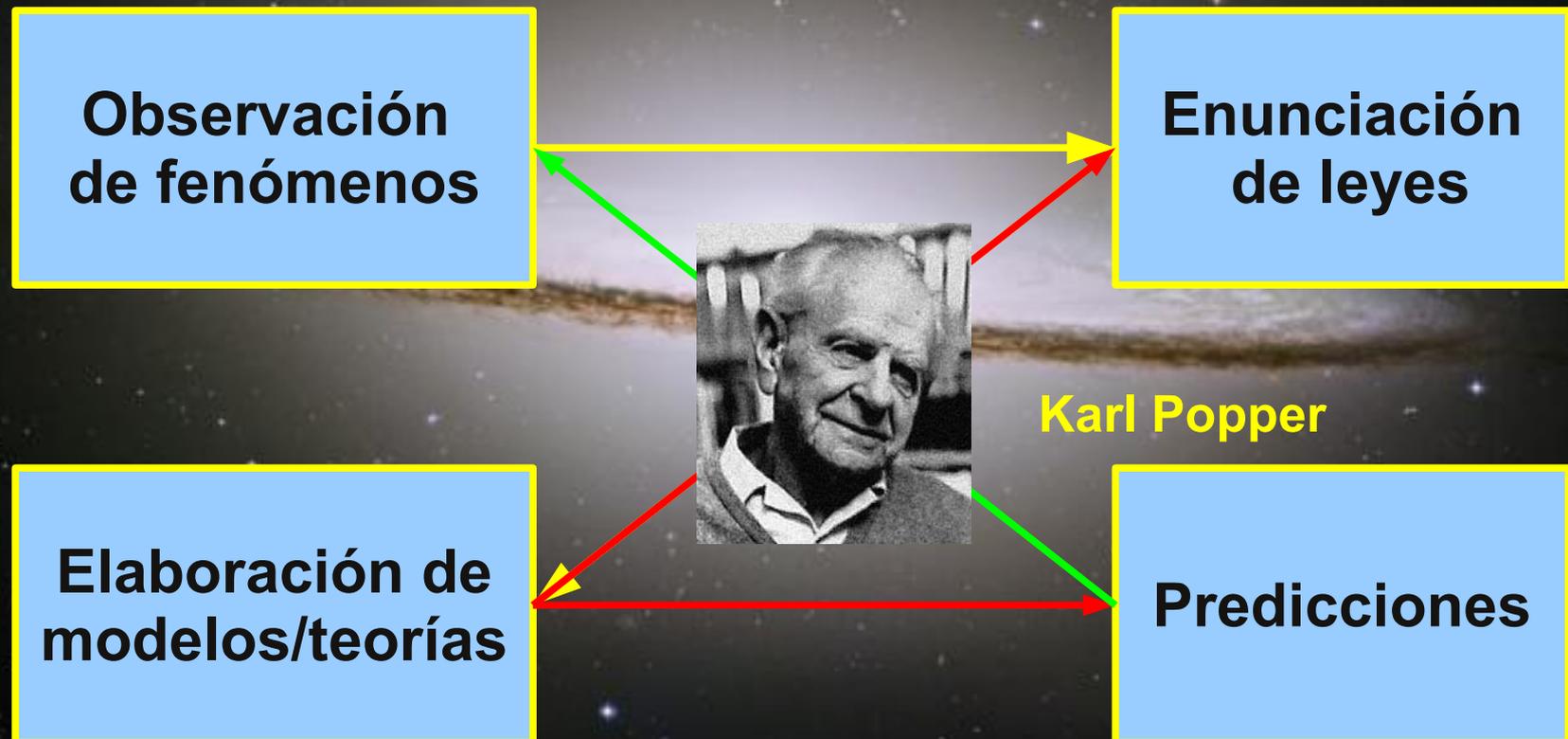
De las estrellas oscuras newtonianas

*a los agujeros negros supersimétricos de las **Teorías de Supercuerdas***

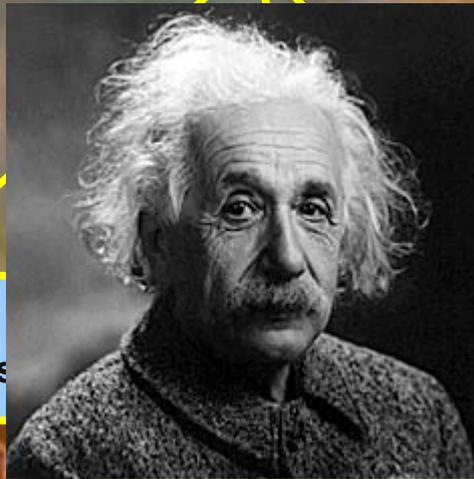
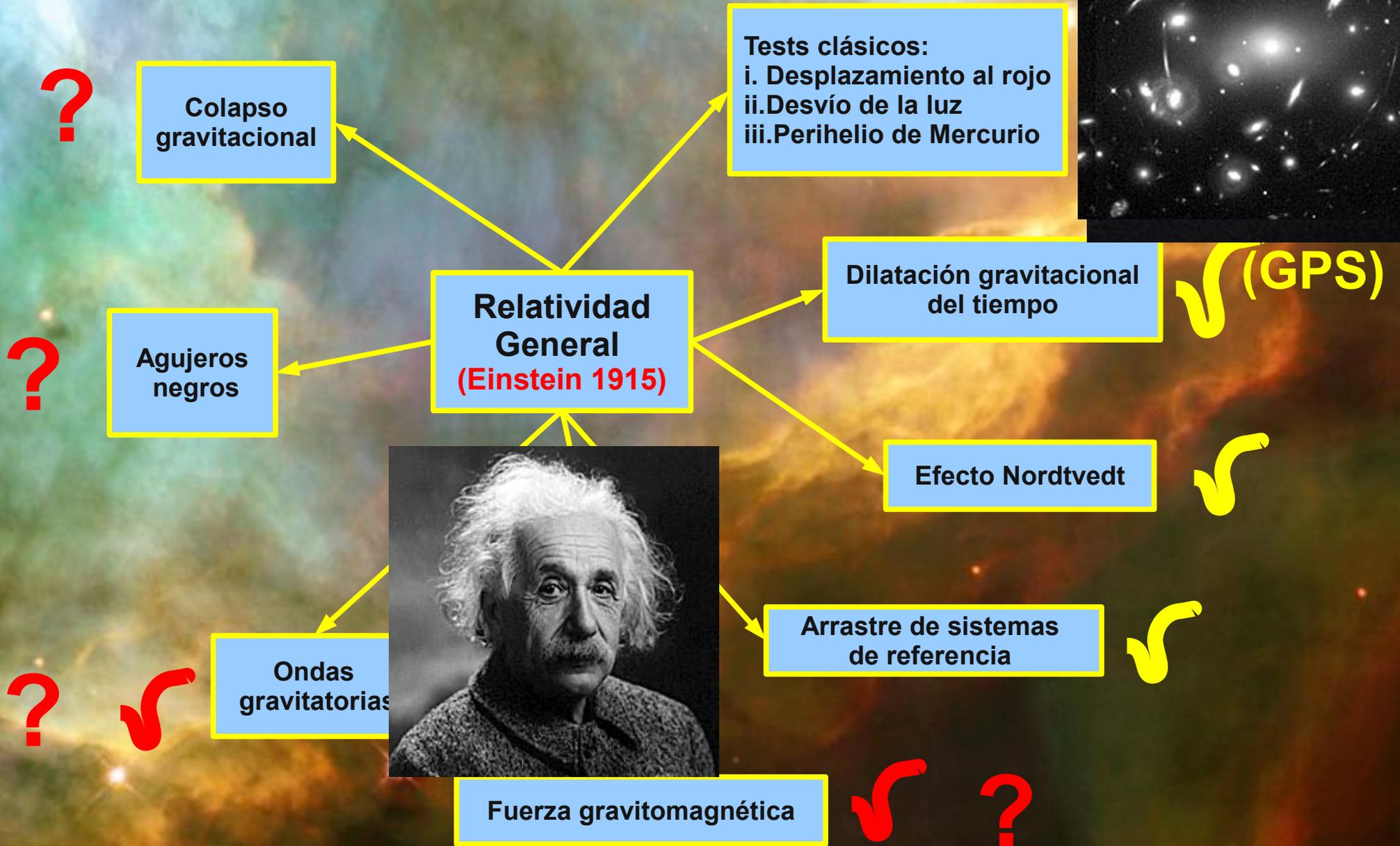
Tomás Ortín Miguel

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC

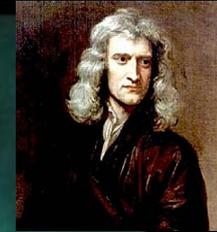
El método científico



Las predicciones de la Relatividad General



Prehistoria del concepto de agujero negro: las estrellas oscuras



De acuerdo con la Gravitación Universal de **Newton**

$$E = -\frac{GMm}{r_1} + \frac{1}{2}mv_1^2 = -\frac{GMm}{r_2} + \frac{1}{2}mv_2^2$$

v_{escape}

∞

0

$$-E_p(r) = \frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}mv_{\text{escape}}^2$$

De acuerdo con la teoría corpuscular de **Newton**, la luz está compuesta de partículas de masa m que se mueven con velocidad c . Para una masa dada M siempre hay un radio R_s tal que para radios menores la luz no puede llegar al infinito

$$v_{\text{escape}} = c$$

$$\frac{GMm}{R_s} = \frac{1}{2}mc^2$$

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Radio de **Schwarschild**



Si el radio **R** de una estrella es menor que el de **Schwarzschild** la luz no podrá escapar al infinito y volverá a caer a la estrella, que no se podrá ver a partir de cierta distancia: **estrella oscura** (**John Michell 1783, Pierre-Simon de Laplace 1793**).



Aunque este es el origen del concepto de **agujero negro**,

- En la teoría de Newton **c no** es una velocidad máxima y con una velocidad mayor se puede escapar.

- La luz llega a una distancia $\Delta = \frac{R^2}{R_s - R}$

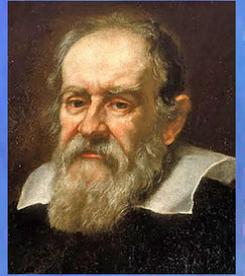
En la teoría ondulatoria de la luz (**Christiaan Huygens 16??, Thomas Young, 1803**) la situación deja de estar clara: la luz tiene energía y momento, pero ¿tiene masa inerte? ¿y masa gravitacional?



La Relatividad Especial

Principio de Relatividad Galileano: (Galileo Galilei, Isaac Newton)

Las leyes de la dinámica son las mismas en todos los **sistemas de referencia inerciales.**

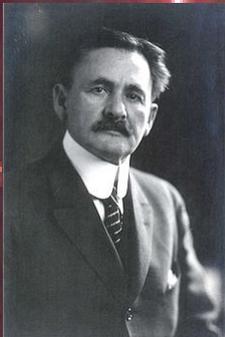


Principio de Relatividad Especial:

Todas las leyes de la Física son las mismas en todos los **sistemas de referencia inerciales.**



Las leyes de **Maxwell** del electromagnetismo son **relativistas** y en ellas **c** es la misma constante en todos los sistemas de referencia inerciales
(Albert Michelson, Edward Morley 1887).



Esto tiene importantísimas consecuencias...

Consecuencias

Getan Experiment: Supongamos que c fuese tan sólo 100 Kms/h. Una ciclista que se desplaza con una velocidad de $c/4$ (25 Kms/h) y un automóvil que se desplaza a una velocidad de $c/2$ (50 Kms/h) parten a la vez que un rayo de luz del semáforo, observados por un guardia. Al cabo de una hora del reloj del guardia, esto es lo que ve:



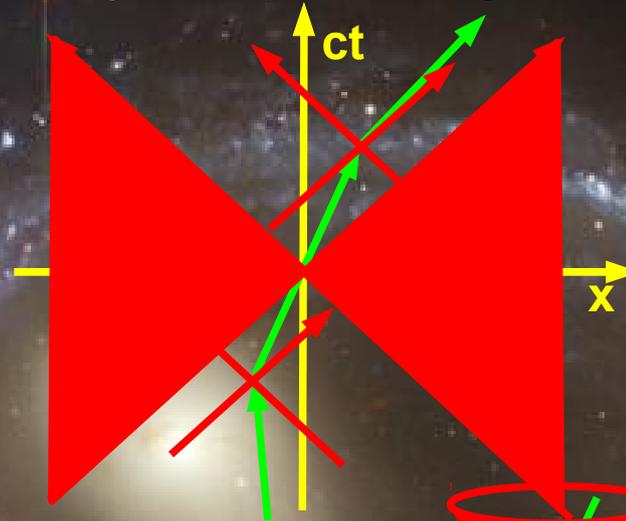
Los relojes (los tiempos propios) y las reglas del guardia, el ciclista y el automovilista son distintas (**relatividad**). La diferencia es mayor cuando la velocidad relativa es mayor. La velocidad relativa con respecto a la luz siempre ha de ser c por lo que no se puede alcanzar esa velocidad, que es **máxima**.

Más consecuencias

Al ser **c** la velocidad máxima, las trayectorias de las partículas están siempre dentro del **cono de luz**

En una dimensión **x**

$$(c \Delta t)^2 = (\Delta x)^2$$



En dos dimensiones **x,y**

$$(c \Delta t)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2$$



Es decir: hay zonas del **espacio-tiempo** inaccesibles y zonas de las que no se puede salir, aunque todas las zonas del **espacio** son accesibles para todas las partículas en la Relatividad Especial.

En la Relatividad Especial la energía (total) de cualquier partícula cuya masa en reposo es m y su momento lineal es p viene dada por

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$

➔ En reposo $p=0$ y $E = m c^2$ (equivalencia masa-energía)

➔ Sin masa en reposo $E = pc$

Hay que **relativizar** la Gravitación Universal de **Newton** de forma que las leyes de la gravitación sean consistentes con el Principio de Relatividad Especial y la gravitación actúe sobre todas las partículas (energía) y no sólo sobre las que tienen masa en reposo.

N.B.: No hay ninguna observación que haga sentir la necesidad de una nueva teoría de la gravitación: sólo hay razones (prejuicios) teóricos.

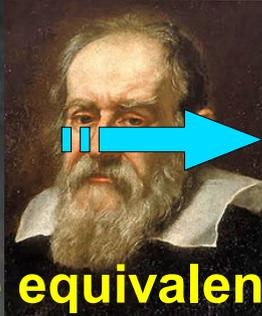
El electromagnetismo se puede relativizar a la **Maxwell**, añadiendo un

Hace falta un principio nuevo

El Principio de equivalencia

Observación: todos los cuerpos caen con la misma aceleración en un campo gravitacional (Galileo Galilei 1638, Loránd Eötvös, 1885, Robert H. Dicke 1964...)

$$\cancel{\frac{GMm}{r^2}} = \cancel{ma}$$



Masa inerte = masa gravitacional

Principio de equivalencia:
(Einstein 1907)

El efecto de estar sometido a un campo gravitacional es el mismo que el de estar en un **sistema de referencia acelerado**.

¿estrellas oscuras?

El campo gravitacional actúa sobre todo, incluso sobre la luz, que curva y desplaza al **rojo**.

La carga gravitacional es la energía (total). ¿Incluyendo la propia energía del campo gravitatorio?

Principio de equivalencia fuerte: **Sí**. En este caso la teoría será no-lineal.

La Relatividad General

Del Principio de equivalencia se pueden deducir muchos efectos físicos (p. ej. los tests clásicos) pero no es una teoría del campo gravitatorio. La **Relatividad General**, formulada por **Albert Einstein** (y **David Hilbert**) en **1915** es la más sencilla y satisfactoria de las que lo incorporan a través del



Principio de Relatividad **General**:

Todas las leyes de la Física tienen la misma forma en **todos los sistemas de referencia** (porque todos son localmente inerciales).

¿Cuáles son los elementos básicos de esta teoría?

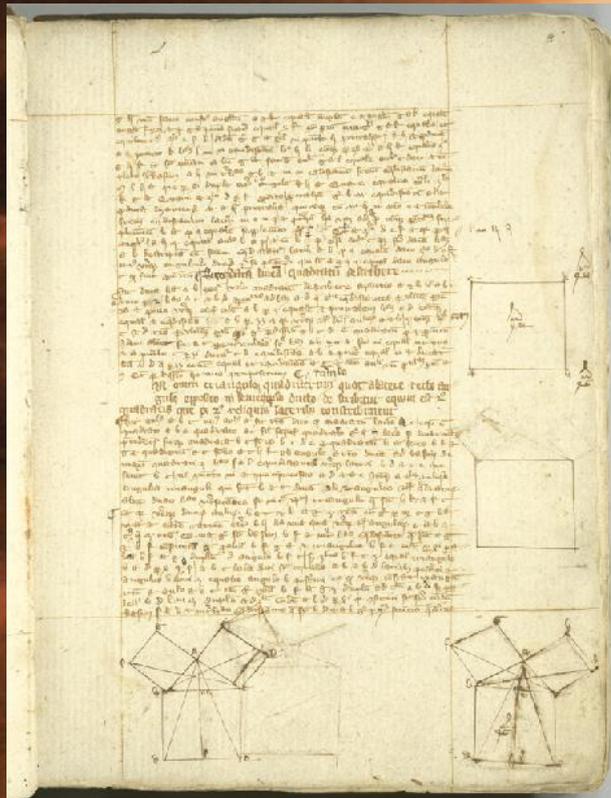
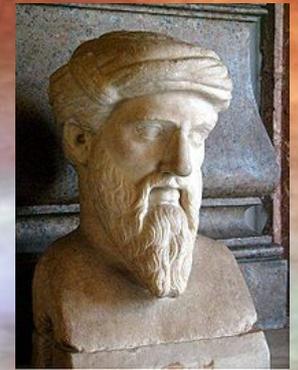
El Principio de equivalencia nos dice que la gravitación deforma los **conos de luz**. Describir esta deformación en cada punto es equivalente a describir el campo gravitatorio.

Los conos de luz se pueden caracterizar por la ecuación

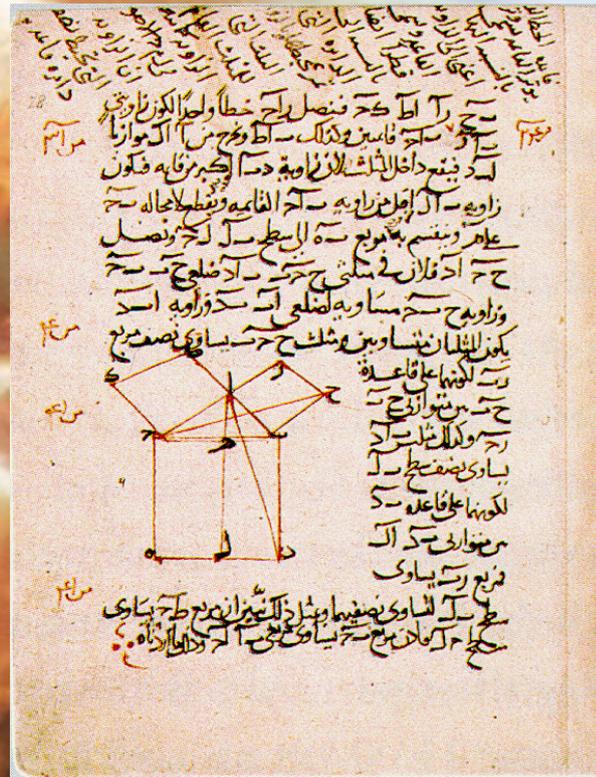
$$(\Delta s)^2 = (c \Delta t)^2 - (\Delta x)^2 = 0$$

que es una variación **espacio-temporal** del **Teorema de Pitágoras**.

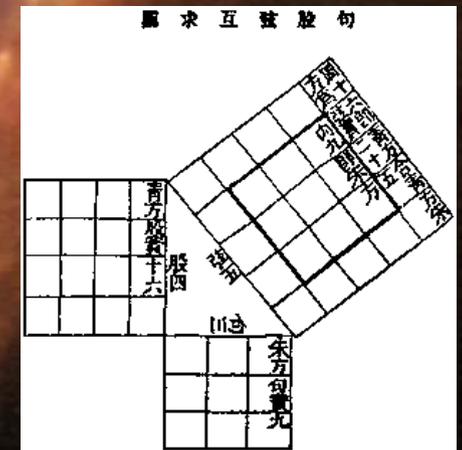
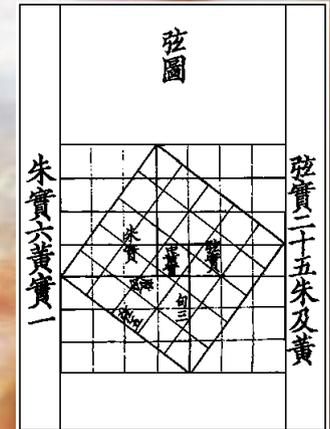
El Teorema de Pitágoras



Demostración de Euclides en un manuscrito medieval de los Elementos



Nasr al-Din al-Tusi



Chiu Chang Suan Shu

El Teorema de Pitágoras espacio-temporal

La cantidad que determina los conos de luz (intervalo espacio-temporal) se puede escribir así:

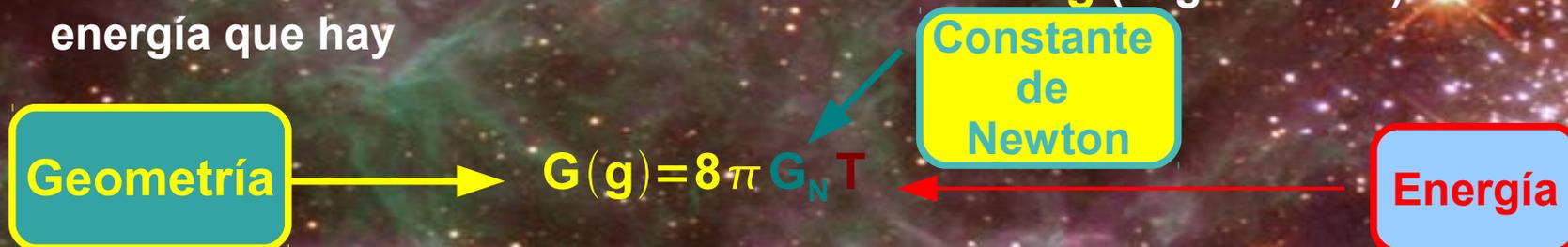
$$(\Delta s)^2 = (c \Delta t)^2 - (\Delta \mathbf{x})^2 = \begin{pmatrix} c \Delta t & c \Delta \mathbf{x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \Delta t \\ c \Delta \mathbf{x} \end{pmatrix}$$

La matriz $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ caracteriza los conos de luz rectos y la ausencia de **campo gravitatorio**.

Una matriz $\mathbf{g} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}(t, \mathbf{x}) & \mathbf{B}(t, \mathbf{x}) \\ \mathbf{C}(t, \mathbf{x}) & \mathbf{D}(t, \mathbf{x}) \end{pmatrix}$ caracterizará los conos de luz **curvos** y un campo gravitatorio general que toma un valor distinto en cada punto del espacio-tiempo.

La matriz \mathbf{g} se llama **métrica** (mide intervalos) y caracteriza la **geometría del espacio-tiempo**.

La **ecuación de Einstein** relaciona a la métrica \mathbf{g} (la geometría) con la energía que hay



La Relatividad General II

El último ingrediente de la teoría es la ley que nos dice cómo se mueven las partículas en un campo gravitacional con geometría dada por g o Δs

Las partículas libres siguen las trayectorias que minimizan s (geodésicas).

¡Esto es todo!

Ahora hay que ver cuáles son las predicciones de esta teoría.

La más inmediata es que $g = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ que es la **métrica de la Relatividad Especial** (Minkowski) resuelve la ecuación de **Einstein** en el vacío.



Necesitamos más soluciones.

La solución de Schwarzschild

En 1916 Karl Schwarzschild encontró la **solución estática con simetría esférica** de las ecuaciones de **Einstein** en el vacío (poco antes de morir en la Primera Guerra Mundial). Esta solución, análoga a la de **Coulomb** para el campo electrostático, debería describir el campo gravitacional externo a una estrella o planeta.



La métrica de **Schwarzschild** implica para los conos de luz

$r=0$

$$r=R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$r = \text{Radio estrella}$

$r = \infty$

A partir del **radio de Schwarzschild** los **conos de luz** están tan inclinados que todas las partículas se dirigen **forzosamente** hacia $r=0$, donde hay una singularidad.

El radio de Schwarzschild

Si la estrella tiene un radio mayor que el de **Schwarzschild**, no hay ningún problema: en el interior hay que utilizar otra solución, no de vacío, que es perfectamente regular, pero **¿qué pasa si es menor?**

- La **métrica** de **Schwarzschild** parece ser singular en el radio de **Schwarzschild**.
- Para un observador externo en reposo los objetos tardan un tiempo infinito en llegar al radio de **Schwarzschild**.

Einstein y **Arthur S. Eddington**, entre otros, rechazaron la idea de que una estrella pudiese tener jamás un radio inferior al de **Schwarzschild**. Propusieron que debería de haber un principio que lo prohibiera para evitar situaciones **absurdas**.

Antes de proponer nuevos principios hay que entender mejor la naturaleza de la **singularidad de Schwarzschild** y la estructura de las estrellas.

En **1931** el Padre **Georg** **Schild** descubrió que el radio de **Schwarzschild** no es una superficie singular para un objeto en llegar a él, **medido en su propio tiempo propio** **finito**.

PERO NO SÍ!

Este tipo de superficie se llama **horizonte de eventos**.



La muerte de las estrellas

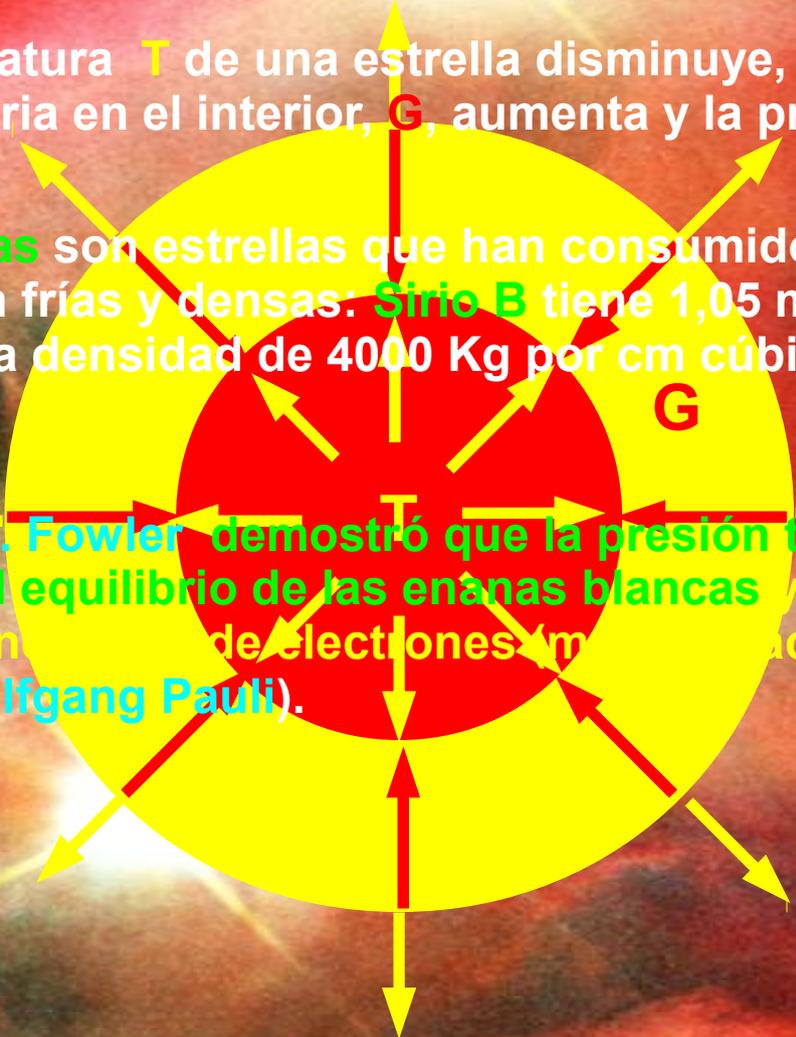
El radio del Sol es de 700.000 Kms, y su radio de **Schwarzschild** es de sólo 8 Kms. Hacen falta estrellas más densas para que su radio sea menor que su radio de **Schwarzschild**.

En las estrellas hay **equilibrio entre la gravitación G** y la presión térmica **T**

Cuando la temperatura **T** de una estrella disminuye, el volumen **V** disminuye, la fuerza gravitatoria en el interior, **G** , aumenta y la presión **P** también aumenta.

Las **enanas blancas** son estrellas que han consumido gran parte de su combustible y son frías y densas: **Sirio B** tiene 1,05 masas solares, un radio de 5000 Kms y una densidad de 4000 Kg por cm cúbico.

En 1926 **Ralph H. Fowler** demostró que la presión térmica no es suficiente para mantener el equilibrio de las enanas blancas y que lo que lo hace es la presión de degeneración de electrones (mencionado en la formulación del Principio de exclusión de **Wolfgang Pauli**).

A diagram of a star with a yellow outer layer and a red inner core. Yellow arrows point outwards from the center, representing thermal pressure (T). Red arrows point inwards towards the center, representing gravitational force (G). The letters 'G' and 'T' are placed near their respective arrows.

Las estrellas de neutrones



En 1933 Fritz Zwicky y W.H. Walter Baade proponen que las supernovas (como la 1987A) fenómenos en los que una estrella con una masa mayor que el límite de Chandrasekhar y que ha consumido casi todo su combustible implosiona, transformándose en una

ESTRELLA DE NEUTRONES



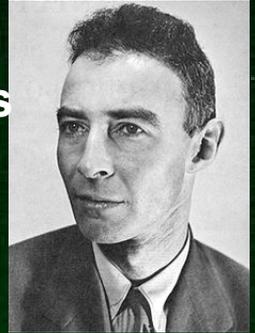
liberando enormes cantidades de energía (10^{10} la del Sol)

- ★ Landau (1937) Núcleos de estrellas de neutrones.
- ★ Duyvendek, Mayall and Oort (1942) La **Nebulosa del Cangrejo** corresponde a la supernova del 1054 a de C.
- ★ Hewish et al. (1967) Descubrimiento de los púlsares.
- ★ Gold (1968) Los púlsares son estrellas de neutrones.
- ★ Code, Diones and Taylor (1969) Púlsar en la **Nebulosa del Cangrejo**.

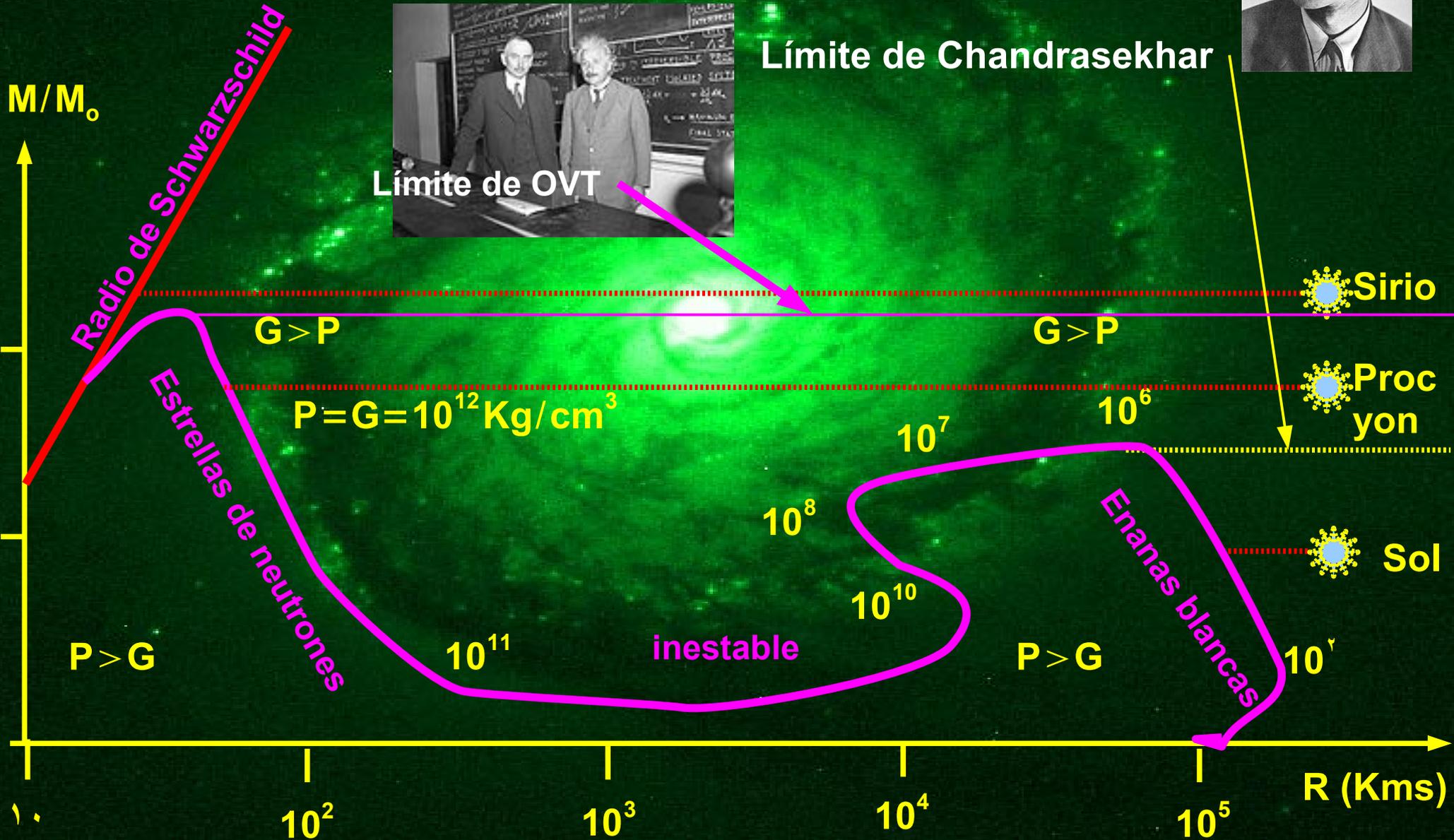
Las estrellas de neutrones son núcleos atómicos gigantes y tienen su densidad:
 $2 \times 10^{11} \text{ Kg/cm}^3$.

¿Hay algún límite similar al de Chandrasekhar para ellas?

En 1938 Robert Oppenheimer y Michael Volkoff, basándose en los trabajos de Richard G. Tolman, demuestran que no pueden haber estrellas de neutrones de más de 1,5-3 masas solares porque la presión nuclear no puede contrarrestar la fuerza gravitatoria.



Límite de Chandrasekhar



El colapso gravitacional

Cuando una estrella de más de (aproximadamente) 2 masas solares se enfría sin perder mucha masa, no hay ningún estado de equilibrio en el se pueda detener su contracción por la fuerza gravitatoria.

El 1939 Robert Oppenheimer y Hartland Snyder (y des pués de la WWII, Colgate, White y May en 1960) demuestran que tal estrella sufrirá un **colapso gravitacional** contrayéndose hasta que su radio es menor que el radio de Schwarzschild, **desacoplándose del mundo exterior**.

Para los observadores **externos**, la implosión se ralentiza hasta congelarse cuando se alcanza el radio de **Schwarzschild**.

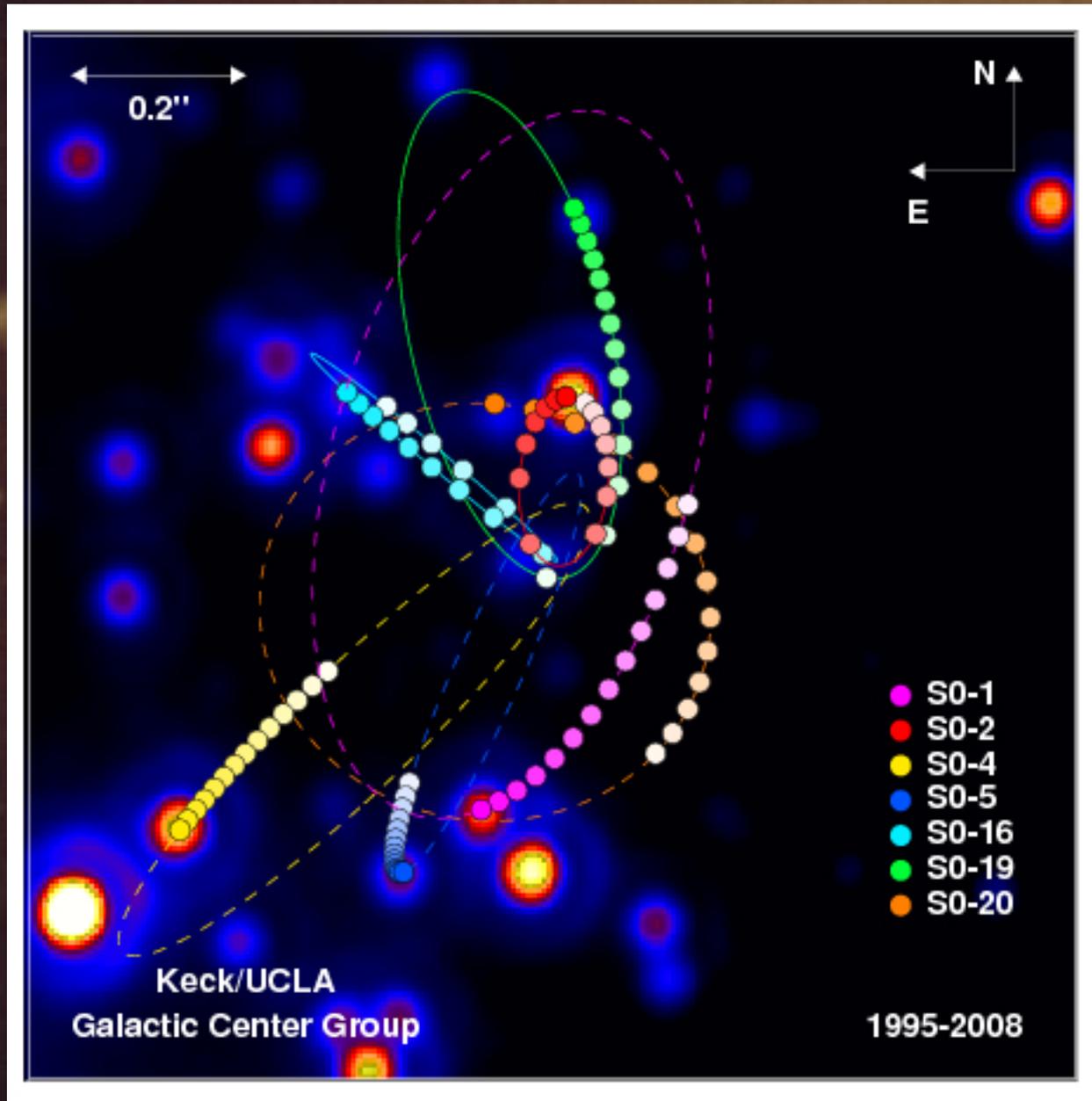
Para los observadores **que estuvieran sobre la superficie de la estrella** no pasa nada especial al cruzar el radio de **Schwarzschild**.

Tras el inevitable colapso gravitacional lo que queda, descrito por la solución que descubrió **Karl Schwarzschild en 1916**, fue aceptado y llamado (**Wheeler**)

agujero negro

...¡50 años más tarde!

Resultados de las observaciones del grupo Keck/UCLA en la misma región de la Vía Láctea



¿Cómo son los agujeros negros?

1.- Son (topológicamente) esféricos y están completamente caracterizados por su masa **M**, su momento angular **J**, y su carga **Q**.

“**Los agujeros negros no tienen pelos**”. (**Wheeler**)

Entonces, ¿qué pasa con toda la información que cae dentro?

2.- El interior del horizonte está **causalmente** desconectado del exterior. Todos los objetos se dirigen hacia $r=0$, donde se destruyen (?) y nada puede detenerlos (r es el **tiempo**).

3.- A mucha distancia, su campo gravitacional es como el de otra estrella o planeta y pueden tener materia en órbita a su alrededor, asociarse a otras estrellas etc.

¿Y cómo se comportan?

En 1973 John Bardeen, Brandon Carter y Stephen W. Hawking demuestran que los agujeros negros se comportan como si fueran sistemas termodinámicos y como si

La masa **M** fuese la **energía E**

El área del *horizonte* **A** fuese la **entropía S**

La *gravedad superficial* **K** fuese la **temperatura T**

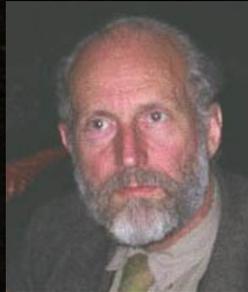
Las leyes de la dinámica de los agujeros negros son como las de la Termodinámica:

K es constante y positiva sobre todo el horizonte.

II. $dM = \frac{1}{8\pi} K dA + \text{términos de trabajo}$

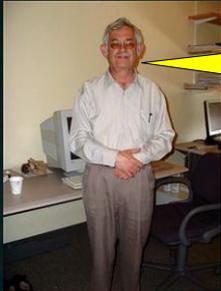
III. $\Delta A \geq 0$

IV. No se puede llegar a **K=0** a través de procesos físicos.



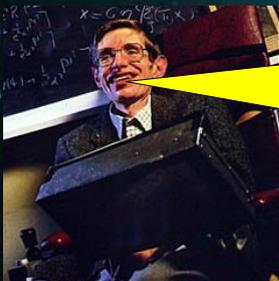
¿Es la analogía termodinámica de los agujeros negros algo más?

Jacob Bekenstein:



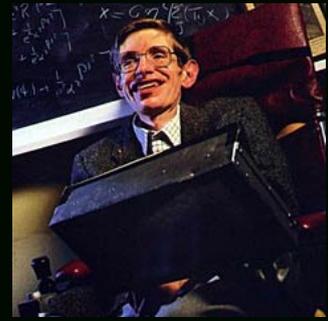
Sí, porque si no la entropía total del Universo podría disminuir

Stephen W. Hawking



No, porque un cuerpo caliente irradia energía. Además, la termodinámica sólo se aplica a sistemas con muchos componentes.

La radiación de Hawking



Dos años después de que **BCH** enuncien las leyes de la termodinámica de los agujeros negros, en **1975**, **Stephen Hawking** demuestra que en realidad **los agujeros negros sí que emiten radiación.**

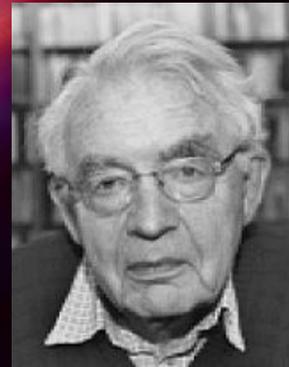
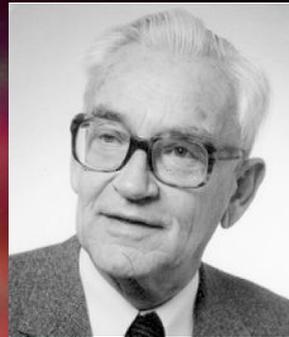
(Esto había sido ya propuesto por **Yakov Borisovich Zel'dovich** en **1971**)



Los agujeros negros emiten **radiación de todos los tipos** con el mismo espectro que un cuerpo negro con temperatura $T = \frac{K}{2\pi} = \frac{6 \times 10^{-8}}{M/M_0} \text{ Kelvin}$

Si nada puede salir de un agujero negro...

¿de dónde viene la radiación de Hawking?



La radiación de **Hawking** se puede ver como una versión gravitacional del efecto **Schwinger** en el campo electromagnético (una manifestación más de cómo las condiciones de contorno afectan al vacío, como en el más conocido efecto (**Polder-**) **Casimir**):

La presencia de un horizonte de eventos introduce una “frontera” natural en el espacio-tiempo y las condiciones que han de satisfacer los campos cuánticos allí alteran el vacío.

De forma intuitiva en términos de creación espontánea de pares virtuales partícula-antipartícula en el vacío en el entorno del horizonte.



En condiciones normales, ambas se aniquilan mutuamente en **muy poco tiempo**. Si hay un horizonte cerca y la gravedad de superficie **K** es suficientemente intensa, una de ambas puede cruzar el horizonte con lo que ya no se pueden aniquilar. La que queda en el exterior **parece surgir del agujero negro** y es un constituyente de la radiación de **Hawking**.

La evaporación de los agujeros negros

La existencia de la **radiación de Hawking** implica que los agujeros negros aislados pierden energía (masa) continuamente (se **evaporan**).

$$T_H \sim \frac{1}{M}$$



Los agujeros negros, en vez de enfriarse, se **calientan al radiar**.

¡La evaporación se aceleraría hasta acabar de forma explosiva!

Dado que la **radiación de Hawking** no porta información, toda la información que entró en el agujero se ha perdido en la evaporación (**Hawking et al.**)

la Teoría Cuántica de la Gravitación no es unitaria.

Sin embargo, en el cálculo de **Hawking** la geometría (el agujero negro) está fija. Para saber cómo afecta la radiación a la geometría hay que cuantizarla también.

No se pueden sacar conclusiones sin una auténtica

Teoría Cuántica de la Gravitación

Retorno al Principio de equivalencia

Las leyes de la Física han de ser las mismas para todos los observadores, pero distintos observadores ven distintas radiaciones de Hawking:

Los observadores en caída libre no ven el horizonte y no ven radiación (tan sólo pares que se crean y se destruyen).

Los observadores en reposo (fuera) sienten la gravedad (que deben de contrarrestar con cohetes) y ven radiación *real*.

El concepto de partícula *real* no es absoluto, no es un concepto físico invariante.

Esto está relacionado con el hecho de que en la Relatividad General no hay una ley de conservación **local** de la energía.

Sin agujero negro, en un sistema acelerado, también se ve radiación.

La entropía de los agujeros negros

La analogía de la dinámica de los agujeros negros con termodinámica parece total. Pero,

¿qué es la entropía de un agujero negro?

En los sistemas termodinámicos ordinarios la entropía es una medida del número de **microestados** accesibles al sistema.

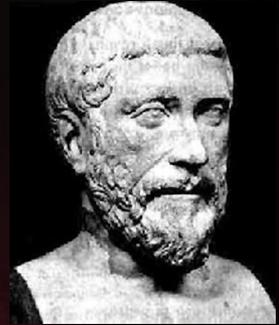
Para conocer los microestados de un agujero negro, hace falta cuantizarlo, es decir, hace falta una

Teoría Cuántica de la Gravitación

NB: en el cálculo de **Hawking** no se cuantiza la gravedad ni la geometría sino tan sólo los demás campos. Es simplemente *Teoría Cuántica de Campos en espacios curvos*.

Si la **Gravedad** es **Geometría**, ¿qué hay que cuantizar? ¿Cuáles son los grados de libertad fundamentales, los estados de la **Teoría Cuántica de la Gravitación**?

Supercuerdas y agujeros negros



Las **Teorías de supercuerdas** son una de las propuestas de **Teorías Cuánticas de la Gravitación** que hay en el **mercado**.

Las dos hipótesis de partida son

- 1.- que todas las partículas elementales no son sino distintos **estados vibracionales** de una **“cuerda”** elemental (¡**Pitágoras de Samos** ataca de nuevo!). Una de estas partículas es el **gravitón**, intermediario de la gravitación.
- 2.- El único tipo de **interacción entre cuerdas es partirse y combinarse por sus extremos (cuando los tienen)**. Esta única interacción se manifiesta de formas distintas entre distintos **estados vibracionales** (partículas) dando lugar a las **4 interacciones fundamentales** conocidas.

La **Mecánica Cuántica** no permite que las **supercuerdas** se propaguen en cualquier espacio-tiempo:

¡Sólo en aquéllos que satisfacen las ecuaciones de **Einstein** de la **Relatividad General**!

A cada espacio-tiempo en el que se pueden propagar las cuerdas se le puede asociar una **Teoría Cuántica de Campos**. Esta correspondencia está relacionada con varias propiedades de las **Teorías de Supercuerdas**:

El juego consiste ahora en :

- 1.- Encontrar espacio-tiempos que describan agujeros negros.
- 2.- Buscar la **Teoría Cuántica de Campos** asociada.
- 3.- Contar los estados de la misma.



En 1996, **Andrew Strominger** y **Cumrun Vafa** obtuvieron por este método y **de forma exacta** la entropía de un agujero negro. Es el primer éxito de las **Teorías de Supercuerdas**.



Juan Martín Maldacena

Dualidad
Holografía
Correspondencia AdS/CFT

Conclusiones

El concepto de **agujero negro** tiene una larga (y espero que interesante) historia.

En su forma actual está destinado a jugar un papel tan relevante para el desarrollo de la **Gravedad (Cuántica)** como el **átomo de hidrógeno** lo jugó en el de la **Mecánica Cuántica** o el **problema de Kepler** en el de la **Mecánica Newtoniana**, porque nos hace plantearnos los problemas esenciales de la misma.

Estamos viviendo un cambio en el método científico tal y como se enseña en las escuelas: hay pocas observaciones espontáneas de nuevos fenómenos y para avanzar es forzoso proponer nuevas teorías que predigan nuevos fenómenos a escalas no estudiadas.

Gracias a los avances técnicos estamos empezando a poder comprobar predicciones de la **Relatividad General** hechas hace mucho tiempo (la teoría ha precedido a la observación) mientras que los avances teóricos nos permiten **entenderlas**.

El siglo XX ha sido el siglo de la Mecánica Cuántica.

¿Será el XXI de la Gravedad?