

PROBLEMAS CANDENTES DE LA CIENCIA ACTUAL

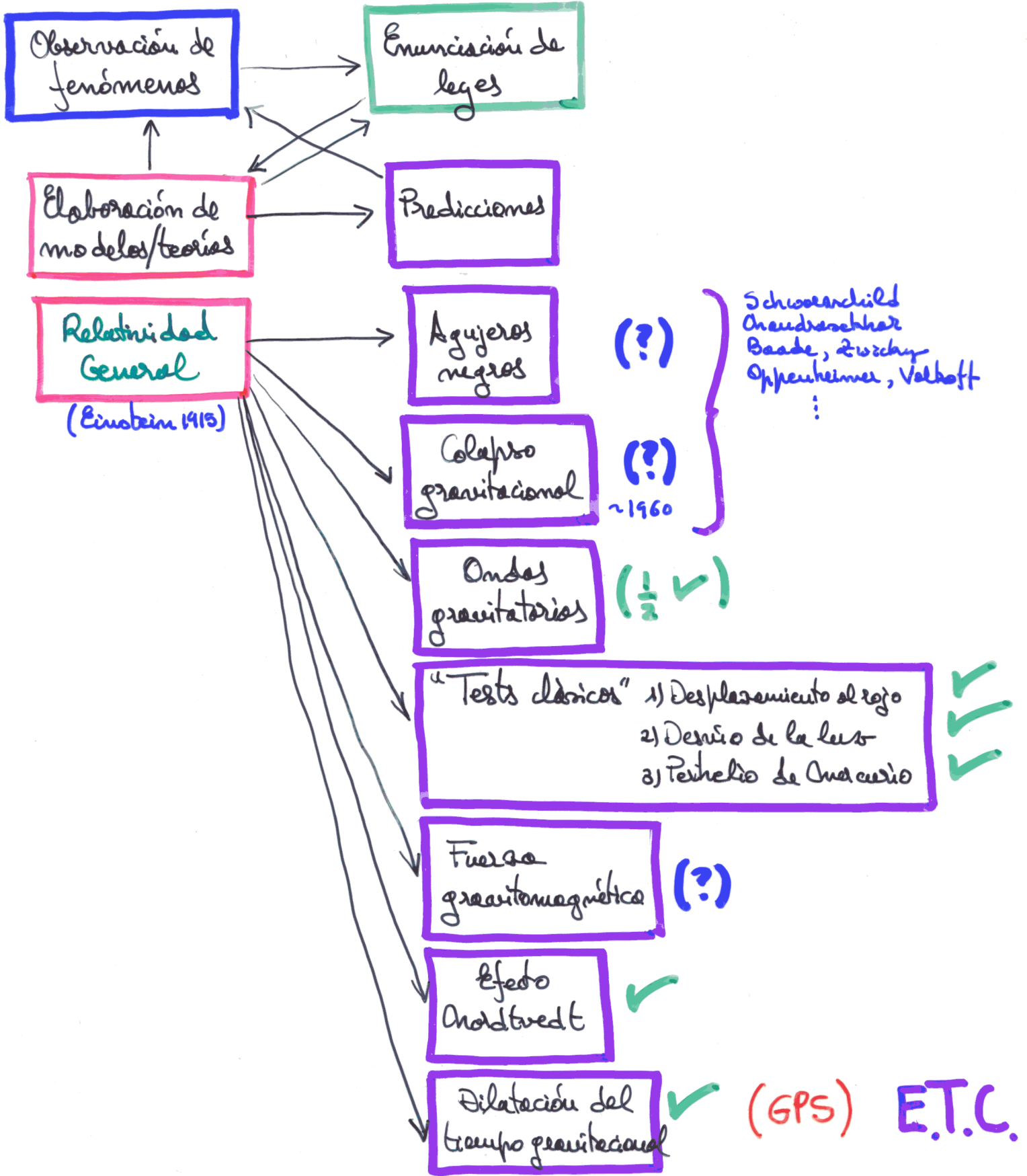
AGUJEROS

NEGROS

TOMÁS ORTÍN

Colegio Mayor "Empresa Pública", 3 de Noviembre de 1998

MÉTODO CIENTÍFICO



- "Black holes & time warps"
- "Was Einstein right?"

Kip S. Thorne
Clifford M. Will

(Hawking)

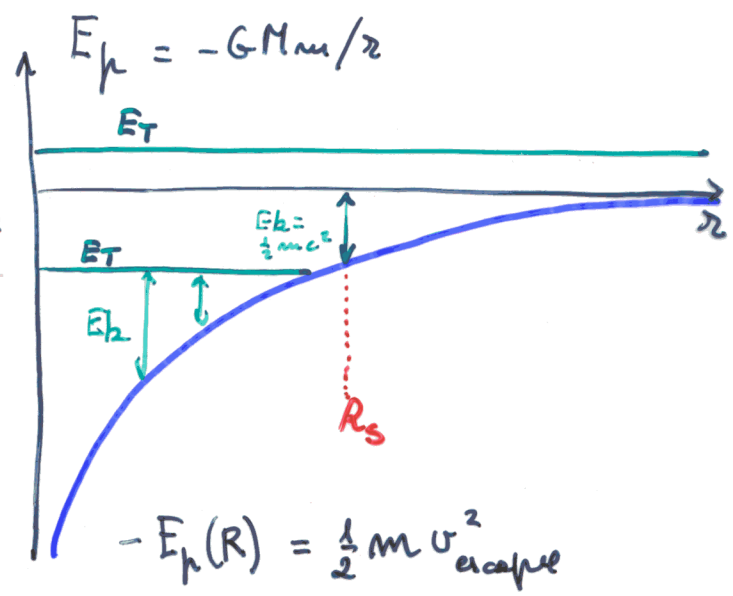
PREHISTORIA DEL CONCEPTO DE AGUJERO NEGRO:

LAS "ESTRELLAS OSCURAS"

Gravitación Universal (Newton)

$$E = -\frac{GMm}{R_1} + \frac{1}{2}m v_1^2 = -\frac{GMm}{R_2} + \frac{1}{2}m v_2^2$$

\downarrow v_{escape} \downarrow ∞ \downarrow 0



Teoría corpuscular de la luz: corpúsculos de masa m (?) y velocidad $c \Rightarrow$ energía cinética $\frac{1}{2} m c^2$

Para una masa dada M hay un radio R_s tal que $v_{\text{escape}} = c$

$$-\frac{GMm}{R_s} = \frac{1}{2} m c^2$$

\swarrow R_s \swarrow $\frac{1}{2} m c^2$
 masa gravitatoria masa inerte

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} = \text{Radio de Schwarzschild}$$

Si $R < R_s$ la luz no puede escapar \rightarrow "estrellas oscuras"
 (John Michell 1783)
 (Pierre Simon de Laplace 1796)

Sin embargo: i) c no es máxima

ii) la luz llega a una distancia $\Delta = \frac{R^3}{R_s - R}$

Teoría ondulatoria de la luz (Huygens, Young): la luz tiene momento y energía pero ¿masa inerte? ¿masa gravitatoria?

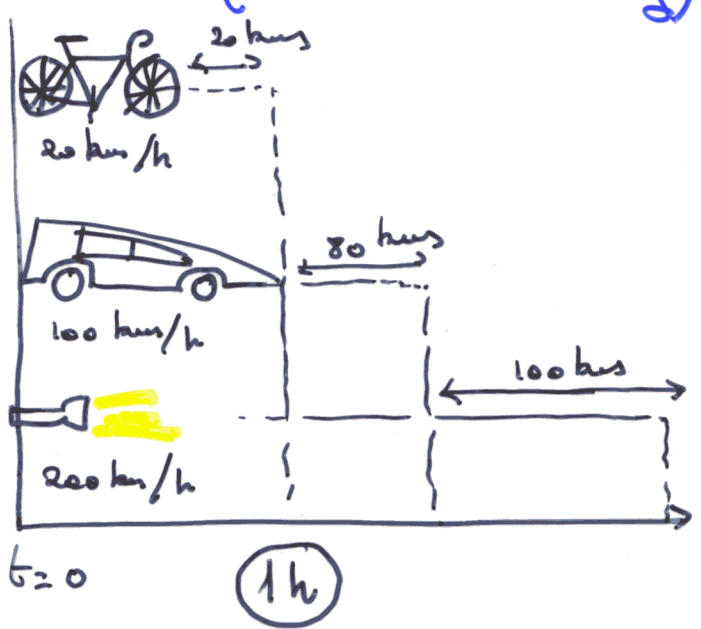
LA RELATIVIDAD ESPECIAL

(Einstein 1905)

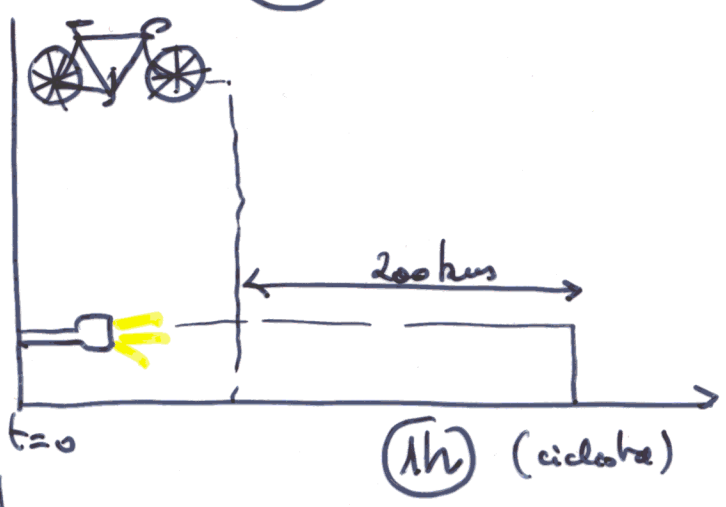
PRINCIPIO: "TODAS las leyes de la física tienen la misma forma en cualquier sistema de referencia inercial"

Las leyes de Maxwell del electromagnetismo son "relativistas" y en ellas c es la misma constante en todos los sistemas de referencia inerciales (Michelson-Morley)

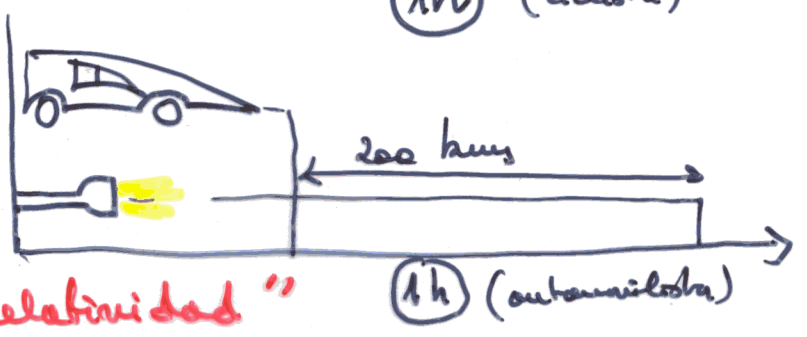
Si $c = 200 \text{ km/h}$, para un observador en la carretera \rightarrow



Para el ciclista \rightarrow

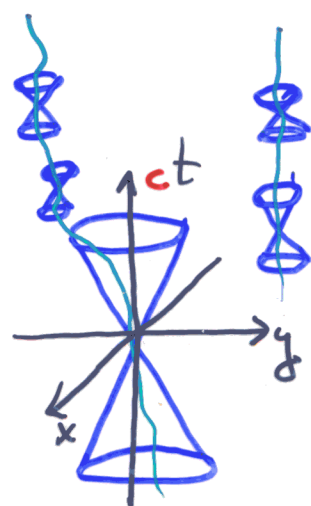
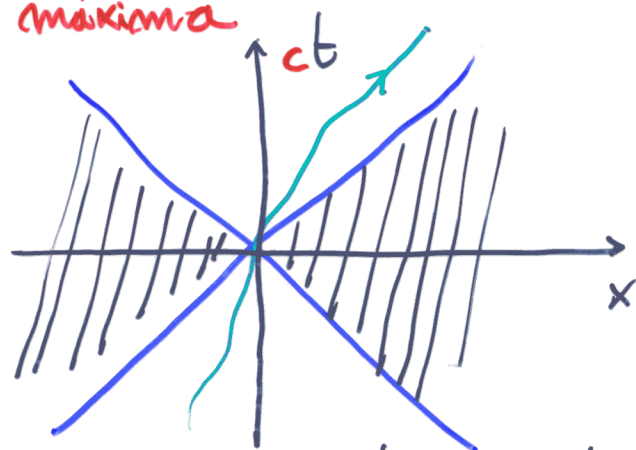


Para el automobilista \rightarrow



Consecuencias:

1.- c es máxima



Las trayectorias de partículas están siempre dentro de los **conos de luz** en el **espacio-tiempo**.

2.- $E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$

$m_0 \rightarrow$ masa en reposo
 $p \rightarrow$ momento lineal

i) $p=0 \Rightarrow E = m_0 c^2 \Rightarrow$ equivalencia de masa y energía

ii) Si $m_0=0$ $E = pc$

3.- Hay que "**relativizar**" la Gravitación Universal.

A la Maxwell (induyendo fuerza gravitomagnética) no funciona

¿Cómo, pues? Hace falta algún principio adicional.

Observación: Todos los cuerpos caen con la misma aceleración (trayectorias) en un campo gravitacional"

(Galileo, Eötvös, Dicke...)
(2/109)

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

⇒ masa inerte = masa gravitacional

PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA: "el efecto de un campo gravitacional es el mismo que el de estar en un sistema de referencia acelerado"
(Einstein 1907)

¿objetos oscuros?

⇒ Actúa sobre todo, incluso la luz a la que curva y desplaza al rojo.

⇒ la "carga gravitacional" es la energía E, no la masa m₀

¿También la propia energía del campo gravitatorio?

Principio de equivalencia fuerte sí ⇒ "no lineal"

De este principio se pueden deducir muchos efectos físicos (p.ej. todos los tests clásicos) pero no es una teoría. Hay muchas que lo incorporan. La de Einstein ("Relatividad General") es la más sencilla y satisfactoria.

RELATIVIDAD GENERAL

(Einstein 1915)
(Hilbert 1915)

Se basa en:

- i) El campo gravitatorio es una "métrica" g que nos dice cómo se deforman los conos de luz (y cómo se curva el espacio-tiempo)
- ii) Las partículas se mueven a lo largo de las líneas de distancia mínima, medida con la "métrica".
- i) y ii) implican el Principio de Equivalencia (ya)
- iii) La "métrica" depende de la distribución de energía a través de las ecuaciones de Einstein:

Geometría \rightarrow $G(g) = 8\pi G_N T$ \leftarrow Energía

{ no linealidad
 Campo gravitomagnético
 ...

Las leyes de la física tienen la misma forma en todos los sistemas de referencia (incluyendo acelerados, no inerciales).

Ahora hay que resolverlas en los casos más sencillos:

$T=0$ y simetría esférica ($\Rightarrow g = 0$)

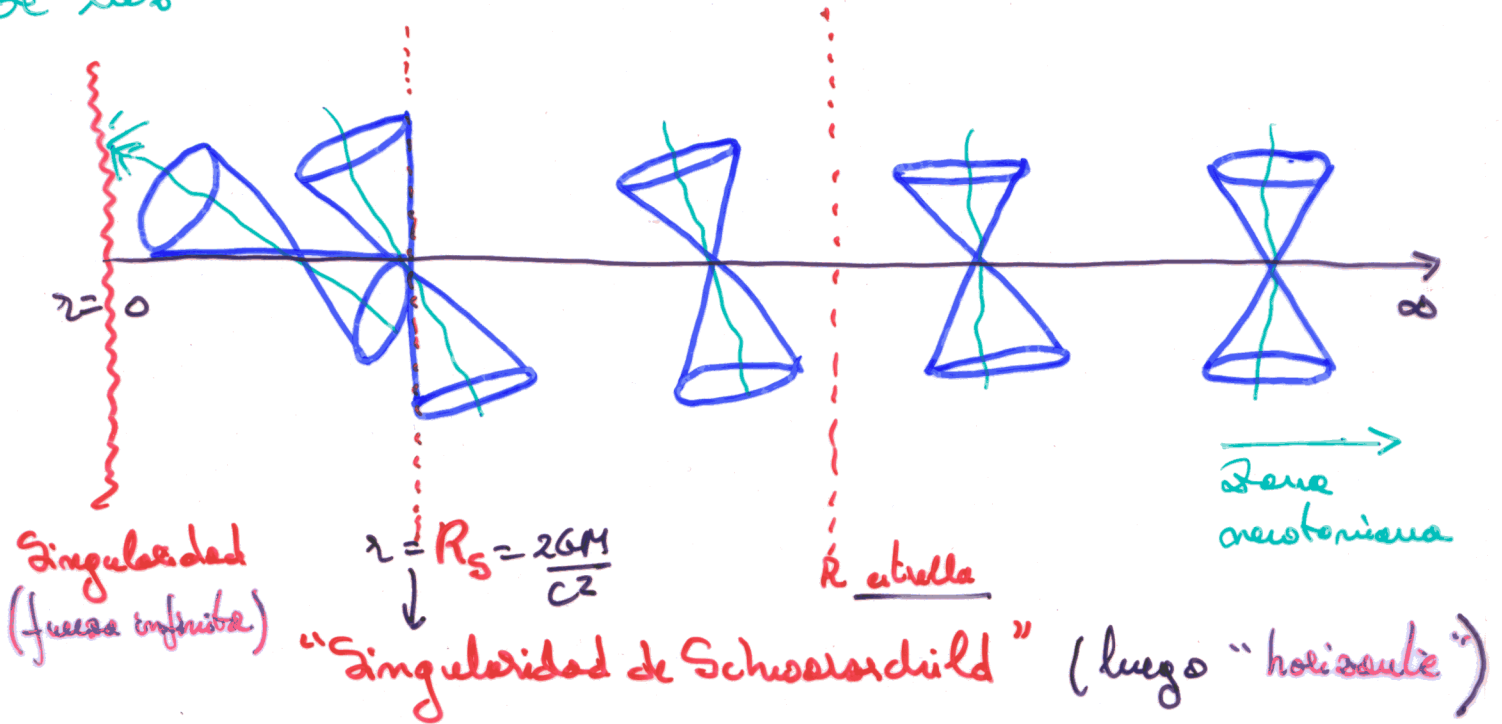
campo gravitatorio alrededor de una estrella o planeta

(Similar al campo de Coulomb $E_1 = \frac{q}{r^2}$ etc.)

SOLUCIÓN DE SCHWARZSCHILD

(Schwarzschild 1915)
(Birkhoff 1923)

La métrica de Schwarzschild implica para los conos de luz



Los conos de luz en la zona interior $r < R_s$ están tan inclinados que todas las trayectorias posibles llevan a $r=0$.
 ¡ r tiene carácter temporal! Hay una esfera de radio R_s en la que se podría entrar pero no salir. Pero

- i) R_s parece una “singularidad”: un objeto tarda infinito tiempo en llegar ahí.
- ii) Es una solución de vacío. La materia de la estrella debe empujarse mucho antes y hay que utilizar otra solución (que NO es singular) dentro. Einstein, Edington

En 1931 Lemaître se da cuenta de que en R_s no hay ninguna singularidad. Más aún: el tiempo que tarda un objeto en llegar a R_s MEDIDO EN SU SISTEMA DE REFERENCIA es FINITO \Rightarrow se puede entrar.

Efera de radio R_s : "horizonte de eventos" \rightarrow AN

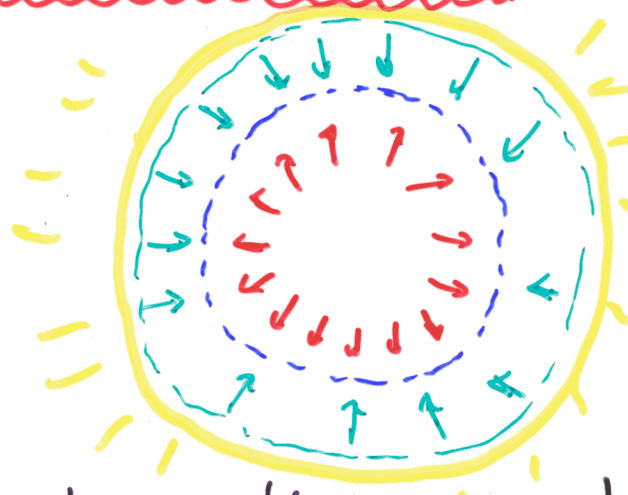
Sólo hace falta encontrar una estrella "comprimida" en $R < R_s$ (R_s en km para $M = M_\odot$, $R_\odot = 7 \times 10^5$ km)



"COLAPSO GRAVITACIONAL"

Estrellas

$R > R_s$



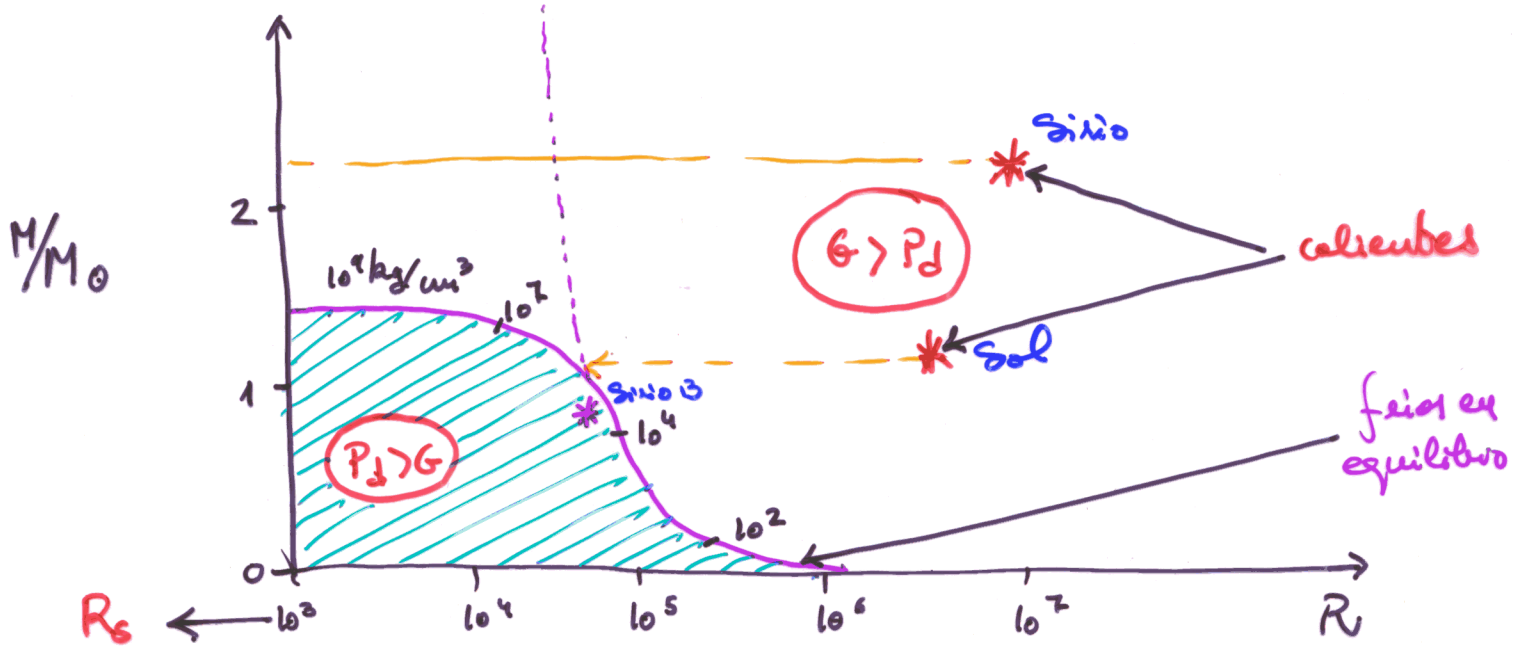
Equilibrio entre gravitación y presión térmica ($\frac{T}{V}$)

¿Qué pasa cuando se enfría? $\rightarrow T \downarrow \Rightarrow V \downarrow \Rightarrow \underline{G \uparrow} \Rightarrow \underline{P \uparrow}$

Enanas blancas: Sirius B $M = 1,05 M_\odot$, $R = 5000$ km $\Rightarrow \rho = 4000 \text{ kg/cm}^3$

R.H. Fowler (1928): la presión térmica **no es suficiente** para el equilibrio: presión de degeneración de electrones.

S. Chandrasekhar (1930) : las enanas blancas con $M > 1.4 M_{\odot}$ no pueden estar en equilibrio ($G \gg P$).



El destino final del Sol es el de enana blanca.

El destino final de Sirio no, a menos que pierda

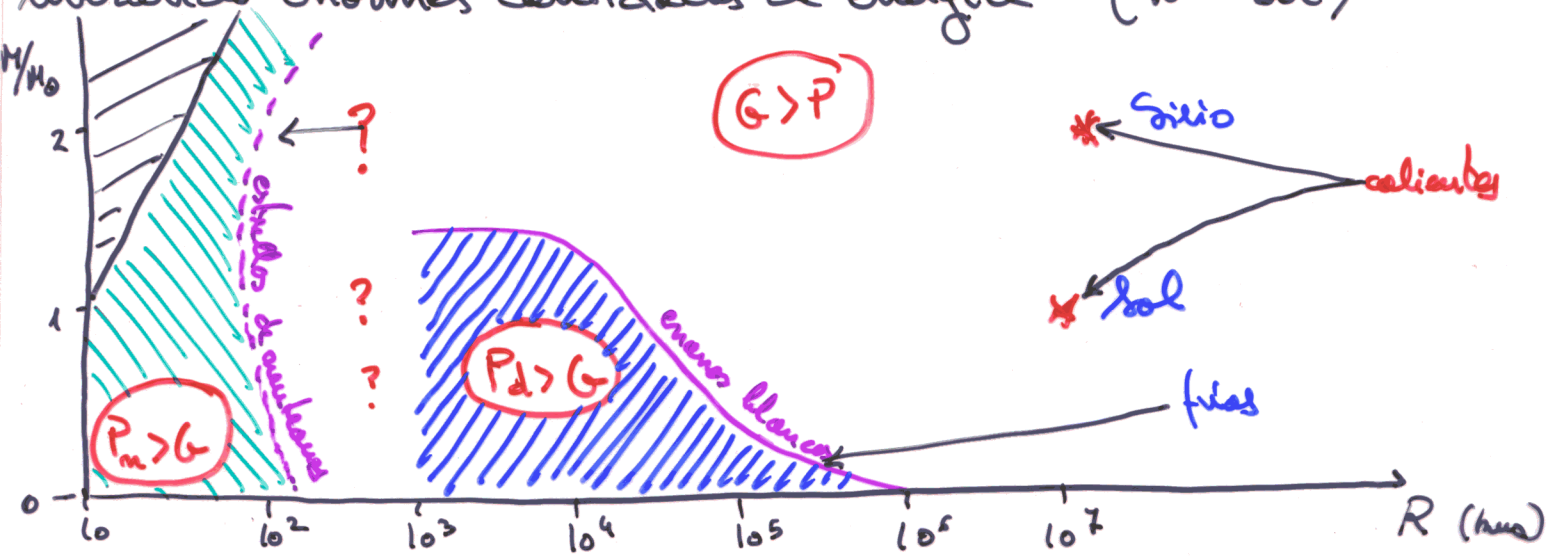
mucha masa (Eddington)

Eddington
white

⋮

W. Baade & F. Zwicky (1933): las **supernovas** (p.ej. 1987A) son fenómenos en los que una estrella normal implodiona transformándose en una "ESTRELLA DE NEUTRONES" (*)

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



¿ Hay un límite análogo al de Chandrasekhar para estrellas de neutrones?

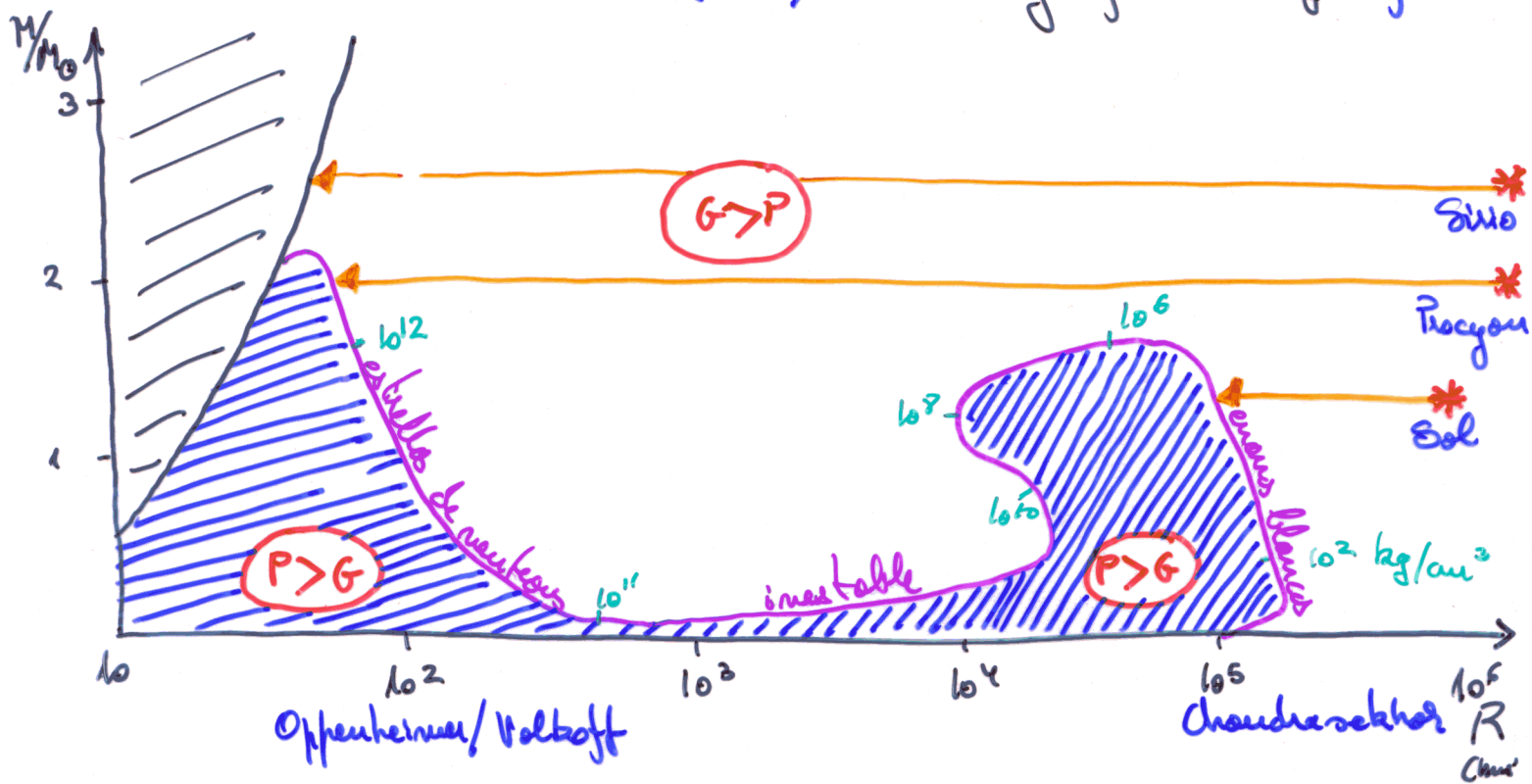
Es necesario conocer el comportamiento de la materia nuclear → expertos en física nuclear → bomba atómica

(*)
 Landaau (1937) núcleo de estrellas de neutrones
 Dug vendak, Mayall & Oort (1942) nebulosa del Cangrejo → Supernova 1054 a de C
 Baade & Amikowshii (1942) estrella en " "
 Hewish et al. (1967) Descubrimiento de los púlsares
 Gold (1968) los púlsares son estrellas de neutrones
 Code, Dioneu, Taylor (1969) Púlsar en la nebulosa del Cangrejo

Oppenheimer & Volkoff (1938): "Las estrellas de neutrones no pueden estar en equilibrio para $M > \frac{3}{1.5} M_{\odot}$ "

WWII

Harrison, Nakano & Wheeler (1956): catálogo final de objetos fríos



CUANDO UNA ESTRELLA CON $M > 2M_{\odot}$ SE ENFRÍA, NO HAY NINGÚN ESTADO DE EQUILIBRIO EN EL QUE DETENER SU CONTRACCIÓN, SINO ELIMINA MASA POR RADIACIÓN ($M < 2M_{\odot}$)

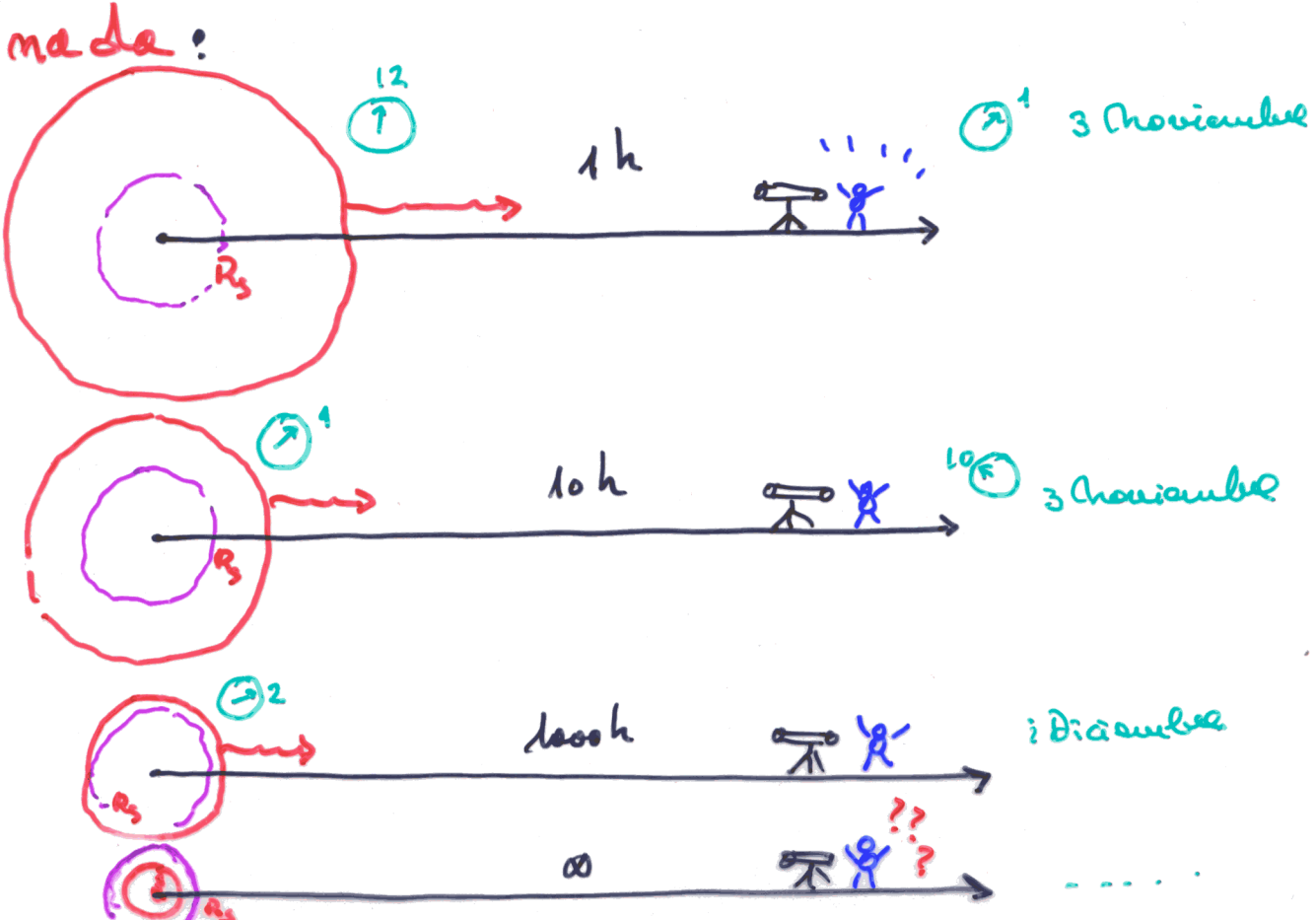
¿Qué le pasa?

Oppenheimer & Snyder (1939)
 (WWII)
 Edgote, White & May (1960)

El resultado del colapso gravitacional es un agujero negro.

Ninguna fuerza conocida es capaz de sobreponerse a la fuerza gravitacional. La estrella se contrae y cuando $R < R_s$ se desacopla del mundo exterior.

Para los observadores externos la implosión se ralentiza hasta congelarse en $R = R_s$ (la luz recorre un camino mucho más largo cada vez) y después ya no se ve nada:



(12)

50 años después de ser inicialmente "descubiertos", los agujeros negros fueron aceptados como una predicción inevitable de la Relatividad General

¿CÓMO SON LOS AGUJEROS NEGROS?

1.- Esféricos y completamente caracterizados por M, J, Q

⇒ ¿Qué pasa con toda la información que cae dentro?

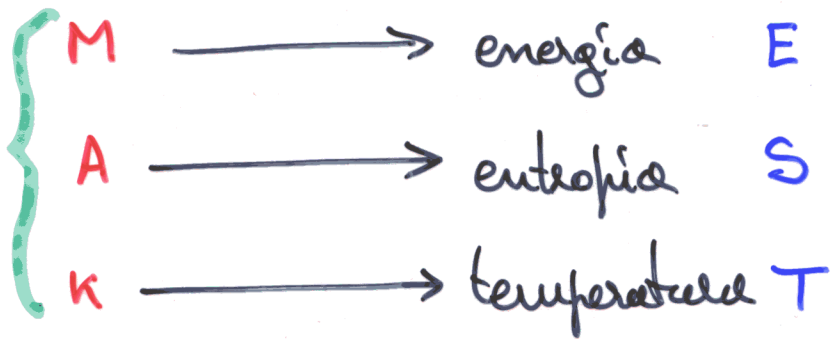
"Los agujeros negros no tienen pelos"

2.- El interior del horizonte está completamente desconectado del exterior: no se pueden emitir señales. Todos los objetos se dirigen a $r=0$ donde se destruyen ? y nada puede detenerlos (r es el tiempo).

3.- A mucha distancia su campo gravitacional es como el de una estrella: pueden tener materia en órbitas asociarse a otras estrellas etc.

¿Cómo se comportan?

Sorprendentemente, se comportan como un **sistema termodinámico en equilibrio** (Bordeen, Carter, Hawking)



(A: área del horizonte de eventos
 κ : gravedad en el horizonte de eventos)

- 0 → κ es constante y positiva sobre el horizonte.
- 1 → $dM = \frac{1}{8\pi} \kappa dA + \text{work term}$.
- 2 → $\Delta A \geq 0$ en cualquier proceso.
- 3 → Es imposible llegar a $\kappa = 0$ a través de procesos físicos.

¿Es esto algo más que una analogía?

Si (Bekenstein) → Si no, la entropía del universo decrecería.

No (Hawking) →

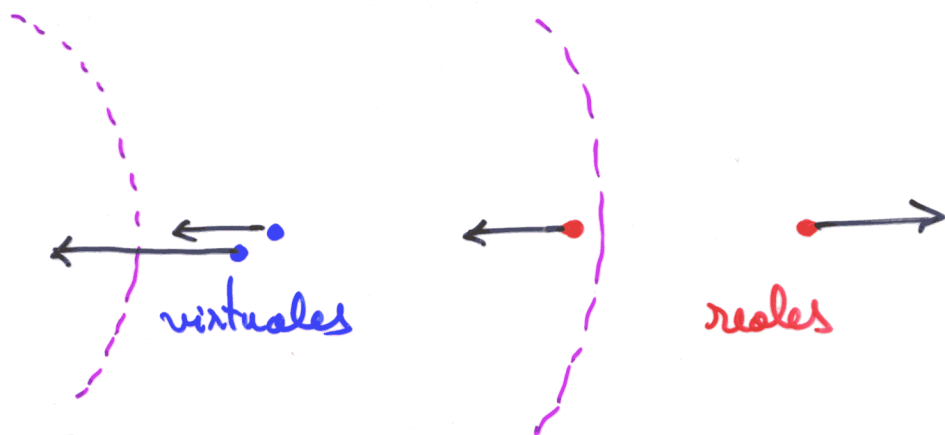
- un cuerpo caliente irradia. Un AN no.
- la termodinámica se aplica a sistemas con muchas componentes ($N \sim 6 \times 10^{23}$)

LA RADIACIÓN DE HAWKING Y LA GRAVITACIÓN CUÁNTICA

Aproximación: mecánica cuántica en un espacio-tiempo curvo que NO es cuántico.

S.W. Hawking (1975) : un agujero negro emite radiación
(Ya. B. Zel'dovich (1971)) (de todas las bifas) con el mismo
espectro que un cuerpo negro con $T = \frac{\kappa}{2\pi} = \frac{6 \times 10^{-8}}{M/M_{\odot}} \text{ K}$

¿CÓMO? Se puede entender en términos de creación de pares virtuales partícula-antipartícula en el "vacío" cerca del horizonte (similar al efecto Casimir)



La analogía con la termodinámica parece total.

PERO

¿qué es la entropía del agujero negro?

RETORNO AL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

Observadores en **caída libre** no ven el horizonte y no ven radiación (sólo oscilaciones del vacío: pares que se crean y destruyen)

Observadores **en reposo** fuera del agujero sienten la gravedad (que deben contrarrestar con cohetes) y ven radiación real.

⇒ El concepto de partícula "real" no es absoluto

Esto está relacionado con el hecho de que

no hay conservación local de la energía

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

CONCLUSIÓN:

El concepto de agujero negro tiene una larga (y espero que interesante) historia. En su forma actual es radicalmente nuevo y está destinado a jugar un papel tan relevante en 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.

El mayor problema (del que no he hablado) es detectar. Hoy por hoy siguen siendo una de las más fascinantes predicciones de la Relatividad General que hasta ahora siempre ha funcionado. Este ha sido el siglo de la Mecánica Cuántica. Quizá el que viene será el de la Relatividad General.

FIN