

Las ondas: del sonido a los agujeros negros

J. Fernando Barbero G.

Instituto de Estructura de la Materia, CSIC.
Grupo de Teorías de Campos y Física Estadística,
Unidad Asociada CSIC-UC3M
Madrid, 14 de noviembre de 2018



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

¿Qué son las ondas?

[back](#)

Todos reconocemos una onda cuando la vemos

¿No es verdad?

Todos reconocemos una onda cuando la vemos... [back](#)



Todos reconocemos una onda cuando la vemos... [back](#)



Todos reconocemos una onda cuando la vemos... [back](#)



Todos reconocemos una onda cuando la vemos... [back](#)



Todos reconocemos una onda cuando la vemos... [back](#)



O quizá no...

[back](#)



O quizá no...

[back](#)



O quizá no...

[back](#)



O quizá no...

[back](#)



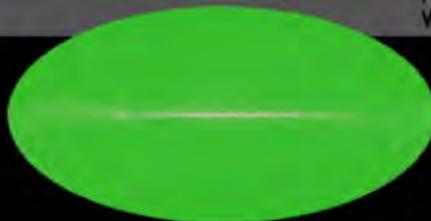
O quizá no...

[back](#)

1965



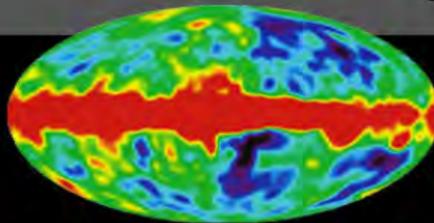
Penzias and
Wilson



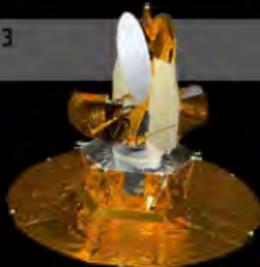
1992



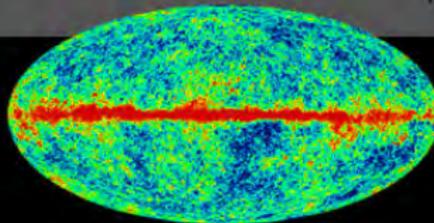
COBE



2003

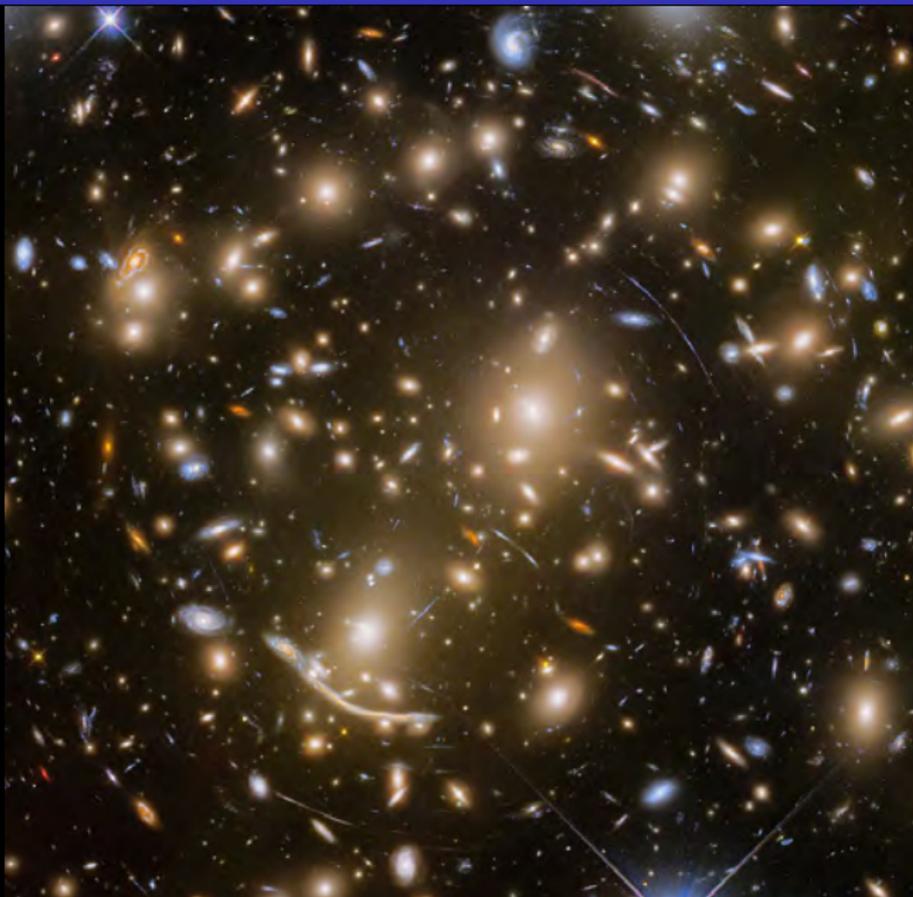


WMAP



O quizá no...

[back](#)



Veámoslo...

Según el Diccionario de la lengua española:

- «Cada una de las elevaciones que se forman al perturbar la superficie de un líquido» (¿?).
- «Cada una de las curvas, a manera de eses, que se forman natural o artificialmente en algunas cosas flexibles, como el pelo, las telas, etc.»

Según el Merriam-Webster:

- «A disturbance or variation that transfers energy progressively from point to point in a medium and that may take the form of an elastic deformation or of a variation of pressure, electric or magnetic intensity, electric potential, or temperature.»

Según mi profesor de física general de primero:

- «Una condición de fase que se propaga». (¿?)

¿Qué son las ondas?

[back](#)

Una «definición matemática»

Soluciones de ecuaciones diferenciales (EDP)

¿Qué son las ondas?

back

Una «definición matemática»
Soluciones de ecuaciones diferenciales (EDP)



Unos comentarios matemáticos (los físicos más adelante...)

- El objeto matemático Φ contiene **información física**:
 - Distribución de presiones en el aire (y cómo cambian en el tiempo).
 - Distribución de velocidades en un fluido (*idem*).
 - Distribución de campos electromagnéticos (*idem*).
- La máquina representa un **conjunto de operaciones matemáticas** concretas que se hacen sobre Φ .
- Los **detalles físicos** del fenómeno ondulatorio que describamos **determinan esas operaciones**.
- En todo caso es interesante señalar que muchos fenómenos ondulatorios están bien descritos por **una ecuación concreta**:

La ecuación de ondas

¿Qué son las ondas?

back

$$(\partial_t^2 - v^2 \Delta)\Phi = 0$$

Algunos comentarios sobre esta ecuación

- ¿Qué hacemos con ella?...¡Resolverla! (como con todas las ecuaciones).
- Sus soluciones nos dicen cómo evoluciona una onda con el tiempo si conocemos su configuración inicial (¡podemos hacer **predicciones!**)
- Tiene una propiedad muy importante: **es lineal**.
- Esto hace que sea muy sencillo estudiar cómo se **superponen** (combinan) las ondas y explicar una serie de fenómenos típicamente ondulatorios muy importantes.
- A veces se escribe como $\square\Phi = 0$ (¡no tan diferente del dibujo de la máquina!).
- Hay ondas «especiales» descritas por otras ecuaciones.

- 1 Ondas mecánicas.
- 2 Ondas electromagnéticas.
- 3 Ondas gravitatorias.

En cierto sentido muchos más...

- Ondas químicas.
- Ondas sísmicas.
- Ondas en flujos de tráfico.
- Ondas en el agua («ondas de gravedad» en fluidos en general):
 - 1 Ondas capilares (tensión superficial).
 - 2 Ondas planetarias (Rossby).
 - 3 Ondas en aguas someras.
 - 4 Estela de barcos (aguas profundas).
 - 5 *Tsunamis*.
 - 6 ...

¿Qué son las ondas?

[back](#)

Algunas cosas que sabemos sobre ellas

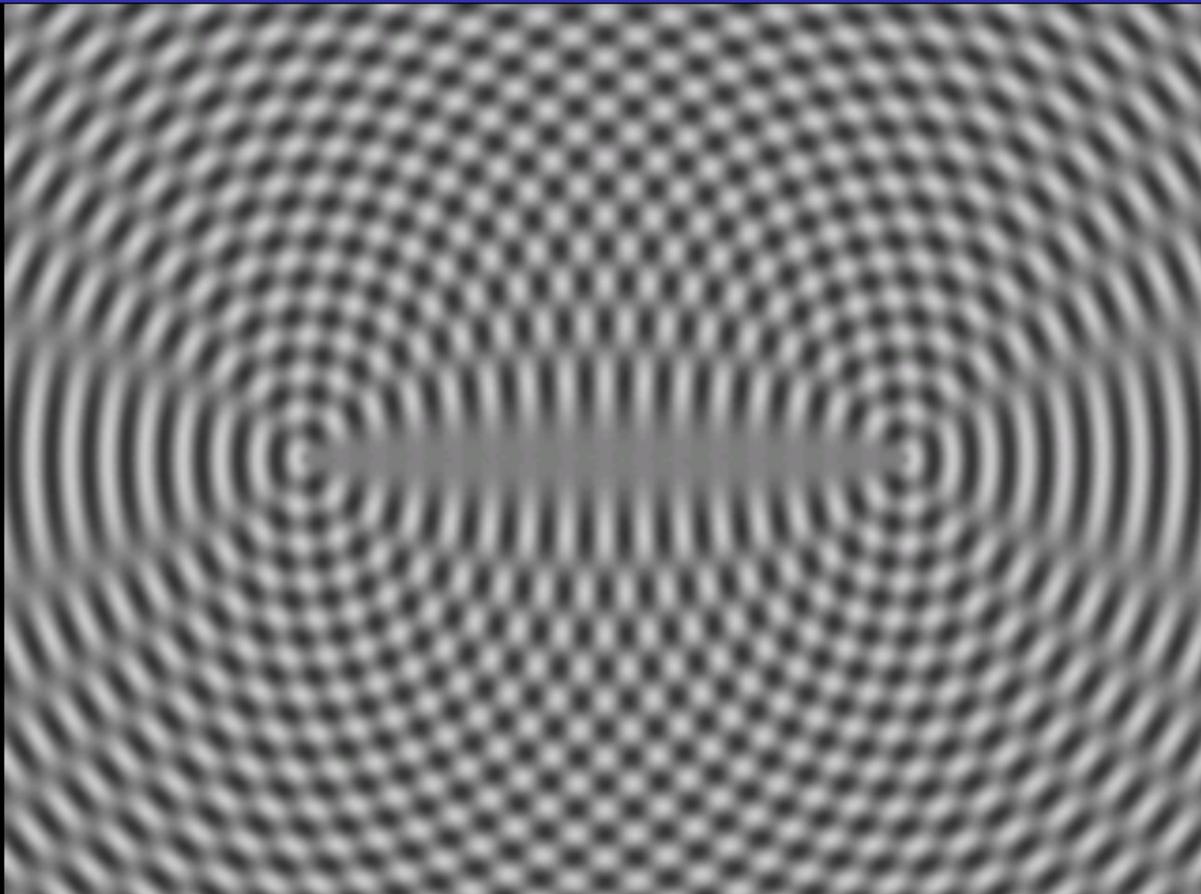
- Transmiten **energía** e **información** a través de un «medio» sin que haya transporte neto de materia.
- Se propagan con **velocidades finitas y propias** del medio que las transmite.
- Tienen cierta capacidad para **sortear obstáculos**.
- Dan lugar a fenómenos característicos:

interferencia, difracción, reflexión y refracción

La ecuación de ondas los describe correctamente

Interferencia

[back](#)



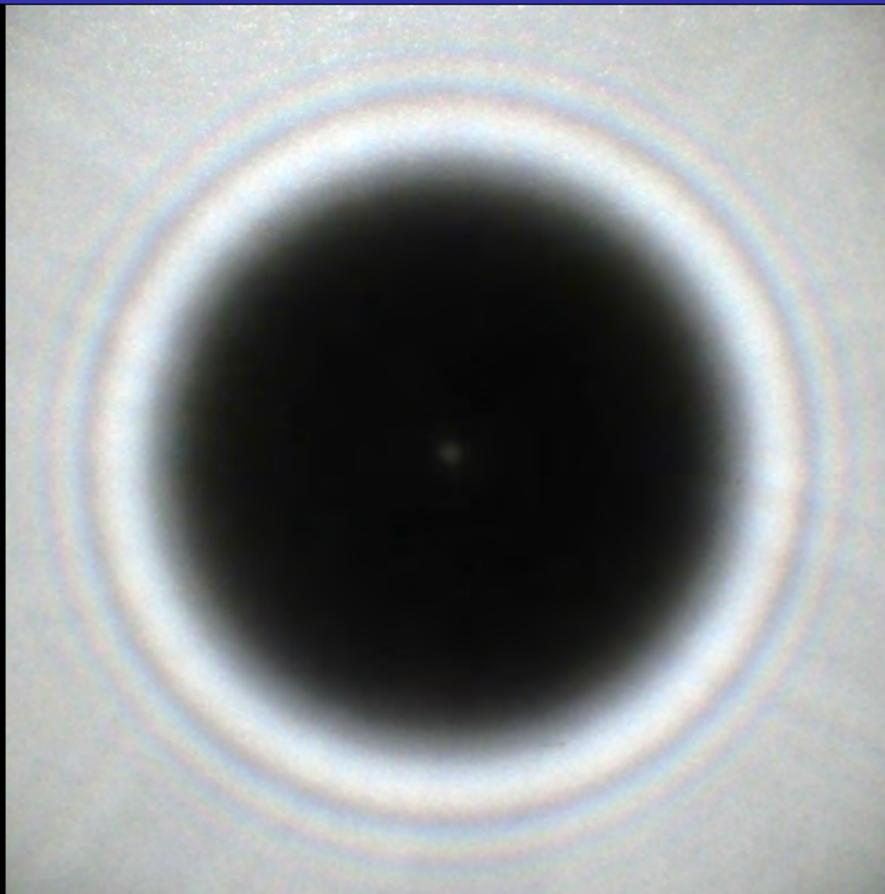
Interferencia

[back](#)



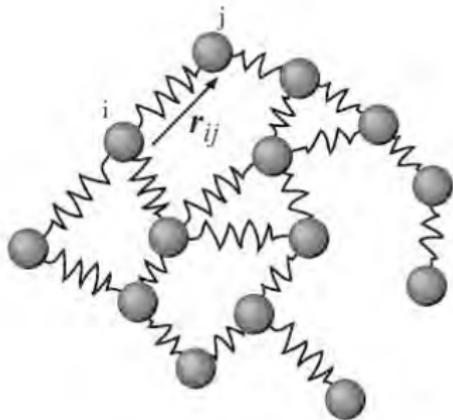
Difracción

[back](#)



Características principales

- Se producen en **medios elásticos** (hay una fuerza recuperadora).
- Las distintas partes del medio **tienden a volver a su posición de equilibrio** si han sido apartadas de ella en algún momento.
- Su **velocidad de propagación** depende de las propiedades del medio.



La magnitud que describe en un «límite continuo» cuánto se desvían las masas de su posición de equilibrio **sigue una ecuación de ondas**.

Electricidad

Magnetismo



Electromagnetismo

- Explica muchas de las **propiedades ópticas y mecánicas** de la materia.
- **La luz es un fenómeno electromagnético (¡una onda!).** ¡El valor de c es una **predicción** de esta teoría!

Tecnología

**Ecuaciones
de
Maxwell**

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{J}$$

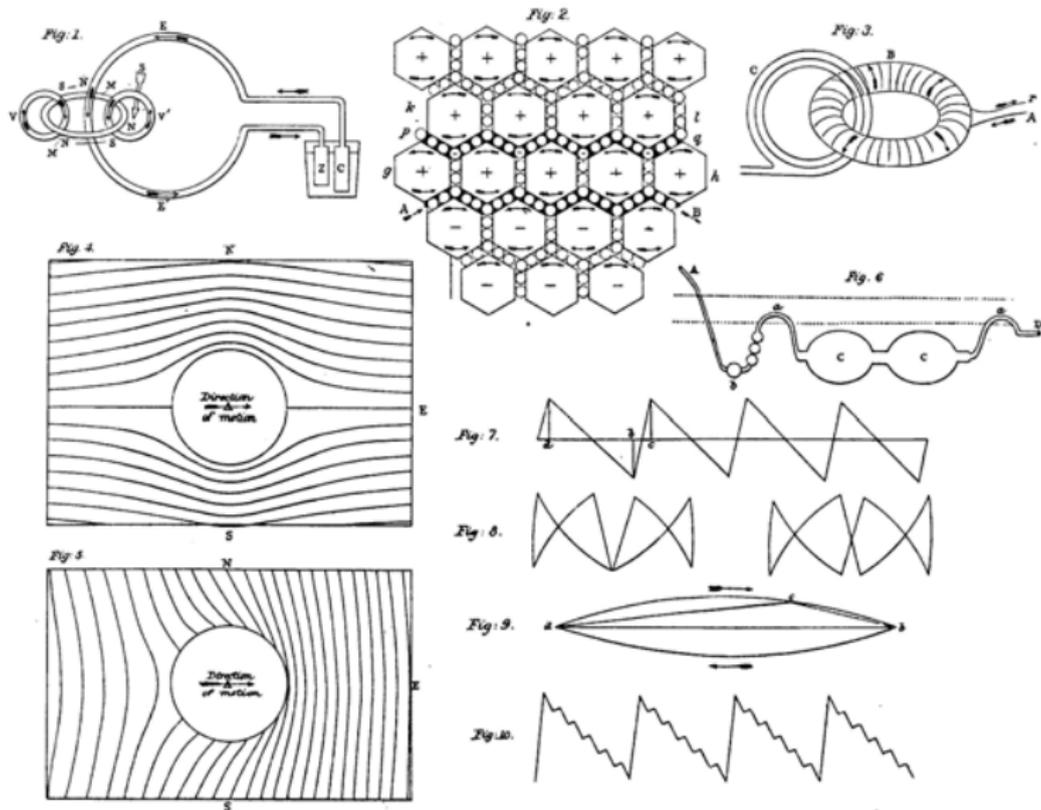
¿Son ondas elásticas?

- Era natural que los físicos intentaran interpretar las ondas electromagnéticas como **oscilaciones en un medio elástico** (*éter lumínico*).
- El propio Maxwell intentó construir un modelo «mecánico» (*vórtices moleculares* constituidos en parte por partículas materiales y el *éter*) para explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos.
- El estudio del hipotético éter y sus propiedades dio lugar a uno de los episodios más fascinantes de la historia de la física y llevó, tras muchas idas y venidas, a la formulación de la **relatividad especial**

▶ ¿Qué oscila EM?

¿Qué oscila en las ondas electromagnéticas?

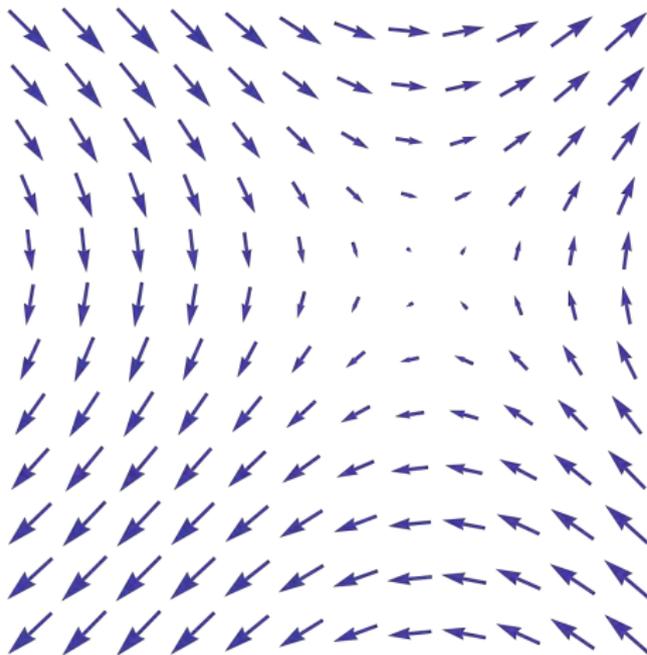
back



Los campos electromagnéticos

Por cierto, ¿qué es un campo?

- Un objeto matemático que nos dice cuánto vale una magnitud física en cada punto del espacio (o de un «espacio»). Ejemplos:
 - 1 Un **campo de temperaturas** nos dice cuál es la temperatura que hace en cada punto de una cierta región del espacio (si consideramos su evolución temporal, en el *espacio-tiempo*).
 - 2 Un **campo de deformaciones** nos dice cuánto se desvían de su posición de equilibrio las posiciones de los puntos de un sólido elástico sometido a esfuerzos externos.
 - 3 El **campo de las velocidades del viento** sobre la superficie terrestre nos dice hacia dónde sopla el viento y con qué velocidad.



Campos vectoriales

- Un vector (una flecha) en cada punto del espacio (en este caso el espacio es realmente un plano).
- Esos vectores pueden ser, por ejemplo, ternas de números reales (a, b, c) , pero podrían ser otros objetos matemáticos más complicados.

Emisión de radiación electromagnética

- **Cargas aceleradas.** Esto es lo que sucede, por ejemplo en las antenas de las emisoras de radio (y en cierto sentido en átomos y moléculas).

Detección de radiación electromagnética

- Al paso de las ondas electromagnéticas las partículas cargadas se mueven (**oscilan**).
- **Amplificando y rectificando** esas corrientes variables podemos, por ejemplo, escuchar los programas de las emisoras de radio.
- Para radiación electromagnéticas de otras longitudes de onda (por ejemplo la luz visible) la detección se realiza de otra manera (pigmentos retinales).

Campos electricos y magnéticos

- Podemos interpretar los campos eléctricos y magnéticos como **campos de vectores** en un espacio euclídeo tridimensional.
- Aún mejor como **un campo de 2-formas exactas** en el espacio-tiempo relativista de Minkowski...
- Al cambiar de sistema de referencia **¡se transforman entre sí!**
- El estudio de los fenómenos electromagnéticos por parte de Einstein jugó un papel muy importante en el nacimiento de la relatividad especial.

ya que hablamos de relatividad...

Relatividad: la física del espacio y del tiempo

- **¿Qué pasa cuando cambiamos de sistema de referencia?**
- La **relatividad general** es la **teoría relativista de la gravitación**.
- Explica la gravedad como un efecto de la **geometría del espacio-tiempo**.
- En el límite de bajas velocidades, campos gravitatorios no muy intensos y bajas presiones **se reduce a la gravitación newtoniana**.
- Explica multitud de observaciones sobre el universo (**¡predicciones!**):
 - 1 Rotación del **perihelio de Mercurio**.
 - 2 **Desviación de los rayos de luz** por el Sol.
 - 3 **Desplazamiento al rojo** gravitatorio.
 - 4 Nos dice cuál es la geometría del universo desde su comienzo (todo el espacio y todo el tiempo). Esto es uno de los ingredientes fundamentales del modelo cosmológico estándar (Big Bang).

Predice fenómenos sorprendentes:

- 1 Existencia de **agujeros negros**
- 2 **Lentes gravitatorias**
- 3 ¡Hasta tiene aplicaciones prácticas! como el **GPS**

Una predicción extraordinaria

La existencia de ondas gravitatorias

$$G = 8\pi G_N T$$

**La energía le dice a la materia como moverse
la materia le dice a la geometría cómo curvarse**

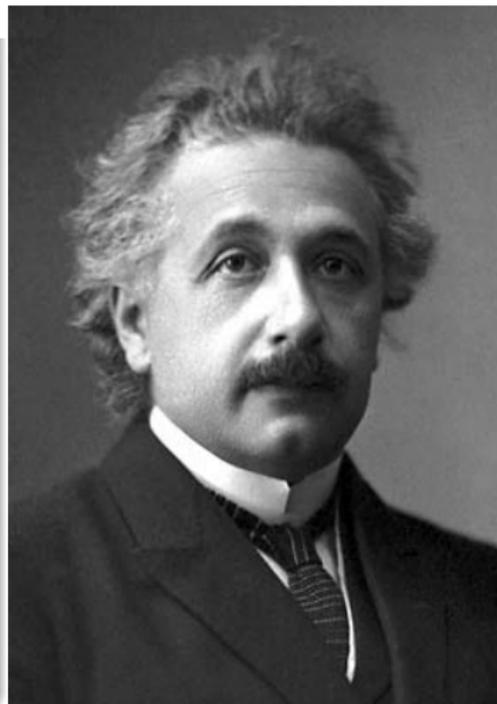
Una vieja y controvertida predicción

- Einstein predijo su existencia en 1916, poco después de formular la RG.
- El nombre de onda gravitatoria –*onde gravifique*– se debe realmente a Poincaré (1905)
- Un poco antes le había explicado a Schwarzschild que no existían (no hay «dipolos gravitatorios»)
- En 1936 volvió a las andadas y escribió un trabajo con N. Rosen en el que «demostraron» otra vez que no existían (una historia rocambolesca...).



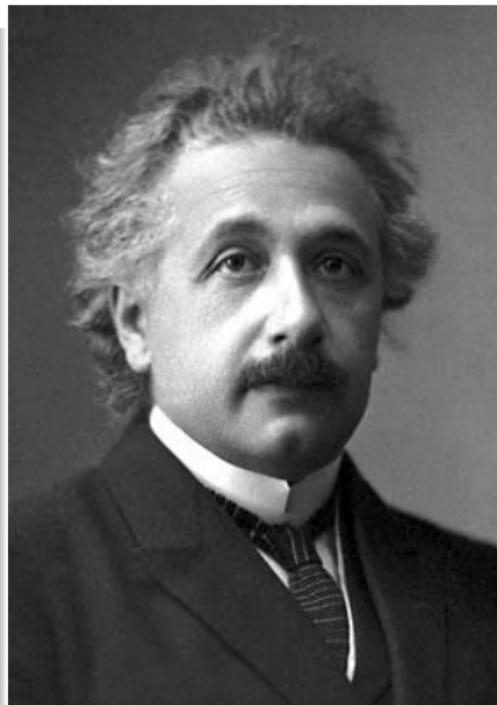
Una vieja y controvertida predicción

- Einstein predijo su existencia en 1916, poco después de formular la RG.
- El nombre de onda gravitatoria –*onde gravifique*– se debe realmente a Poincaré (1905)
- Un poco antes le había explicado a Schwarzschild que no existían (no hay «dipolos gravitatorios»)
- En 1936 volvió a las andadas y escribió un trabajo con N. Rosen en el que «demostraron» otra vez que no existían (una historia rocambolesca...).



Una vieja y controvertida predicción (II)

- Hasta finales de la década de los 50 no se llegó a un consenso real (basado en una mejor comprensión de la RG) sobre la existencia de las ondas gravitatorias (Pirani, Bondi, Feynman)
- Hay varias razones que explican la confusión que reinó entre los físicos:
 - 1 El **concepto de energía** es sorprendentemente **sutil** en relatividad general.
 - 2 Fue difícil desentrañar efectos espúrios asociados con **elecciones particulares de coordenadas** y los efectos físicos reales.



Relatividad: la física del espacio y del tiempo (cont.)

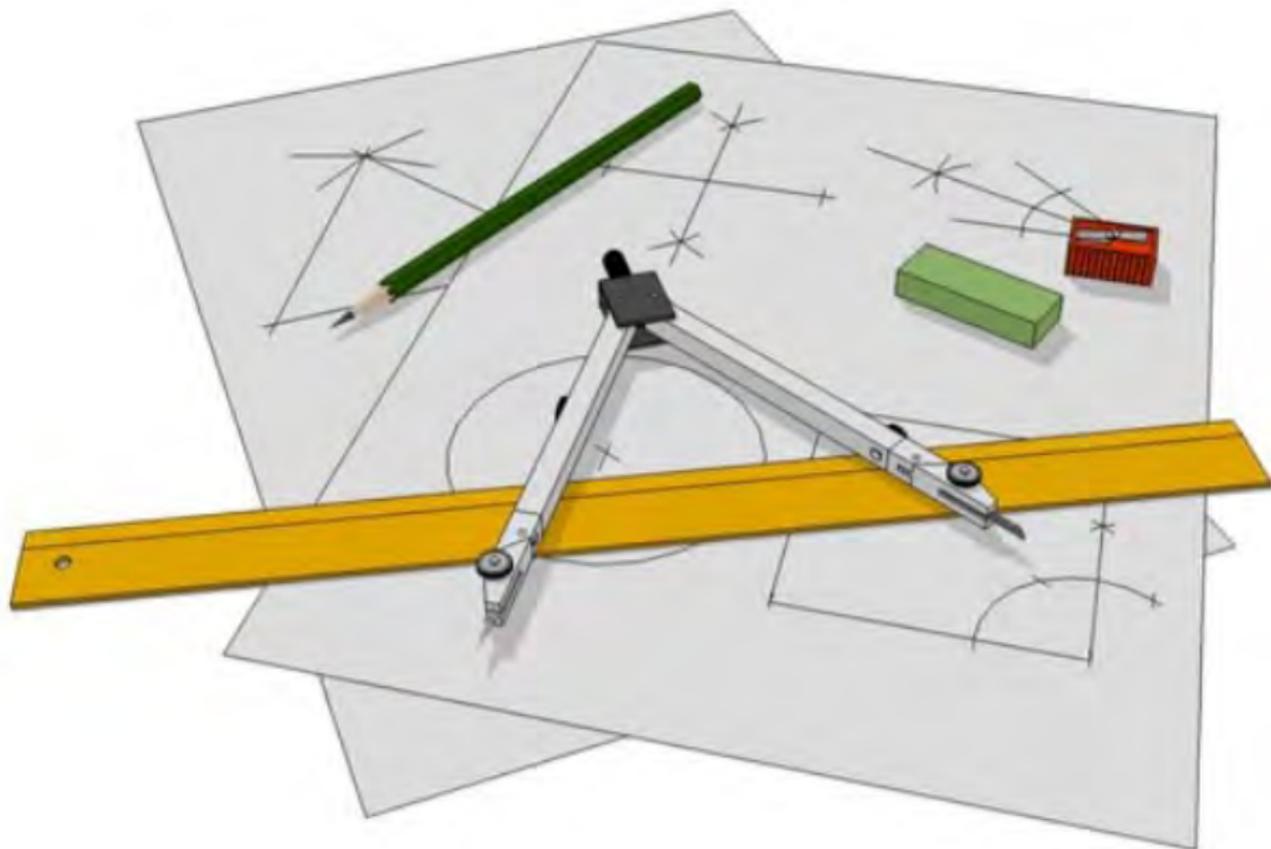
- El campo gravitatorio viene descrito por un objeto geométrico un poco más complicado que los vectores que hemos introducido para hablar del campo electromagnético: **el tensor métrico**.
- El tensor métrico nos dice la «distancia» (**intervalo espaciotemporal**) entre puntos cercanos del espacio-tiempo.
- Hay que tener cuidado al hablar de distancia en este contexto porque en relatividad **el espacio y el tiempo no son absolutos**.
- La métrica no se comporta como una regla material (esto dio lugar a mucha confusión entre los físicos)
- Se espera que el paso de una onda cause un cambio periódico en las distancias entre objetos situados, inicialmente, a una distancia constante.

¿Cómo podemos saber que cambian las distancias?
¿No cambian también las longitudes de las reglas?

En realidad es bastante más sutil

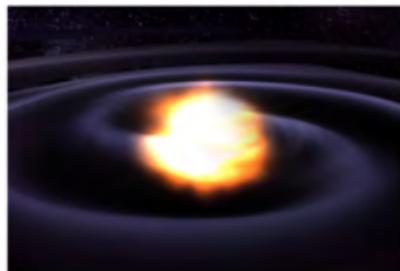
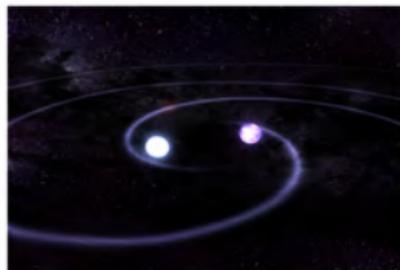
- Lo que miden los modernos detectores interferométricos son **cambios diminutos en los tiempos** que necesitan los rayos de luz para rebotar entre dos espejos en suspensión (que simula una «caída libre parcial»).
- Para convertir esos cambios de tiempo en cambios de longitud basta multiplicarlos por la velocidad de la luz. De ahí a poder interpretarlos como dimensiones de objetos físicos va un cierto trecho...
- Por cierto, ¿me he acordado de comentar que las ondas gravitatorias de propagan **exactamente a la misma velocidad** que las ondas electromagnéticas? (como confirman las observaciones).

¿Qué oscila cuando hablamos de ondas gravitatorias? [back](#)



Emisores de radiación gravitatoria

- **Masas aceleradas.**
- En la práctica masas enormes, por lo menos del orden de magnitud de las **masas de las estrellas.**
- La primera evidencia «indirecta» de su existencia se consiguió estudiando el comportamiento de las órbitas del **púlsar binario PSR1913+16**, en particular la rotación del periastro y el cambio en el periodo orbital. Este descubrimiento les valió a Hulse y Taylor el premio Nobel de física en 1993.
- El hecho de que sean «difíciles de emitir» tiene una contrapartida molesta: **son muy difíciles de detectar.**



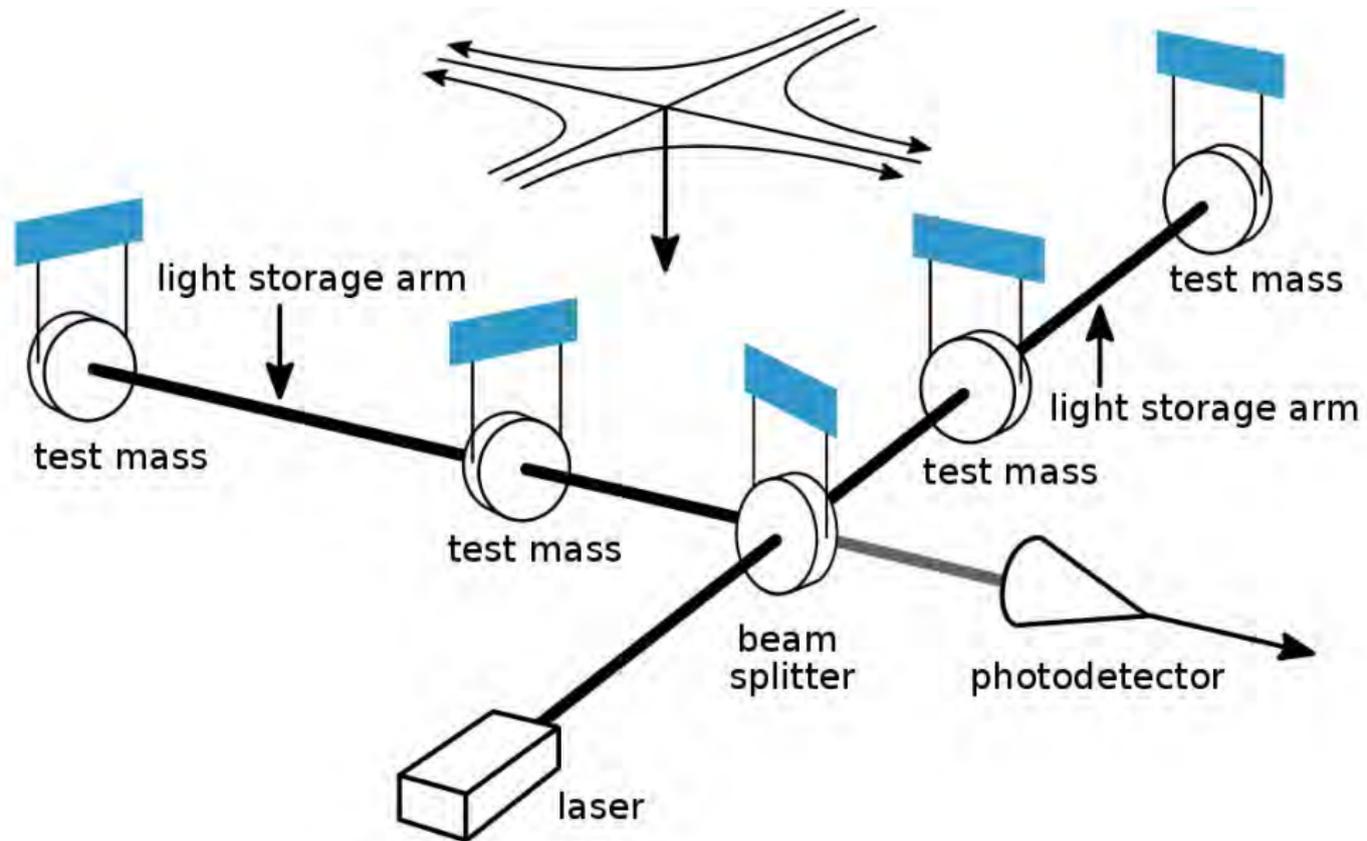
Primeros intentos de detección

- Joseph Weber intentó detectar en los primeros años sesenta las ondas gravitacionales con **detectores en forma de barra** que debían oscilar a su paso.
- Aunque en un cierto momento llegó a afirmar que las había detectado nadie pudo reproducir sus resultados.
- Más o menos en la misma época los físicos propusieron utilizar **detectores interferométricos** con espejos en suspensión.
- **¿Cómo son estos detectores?**



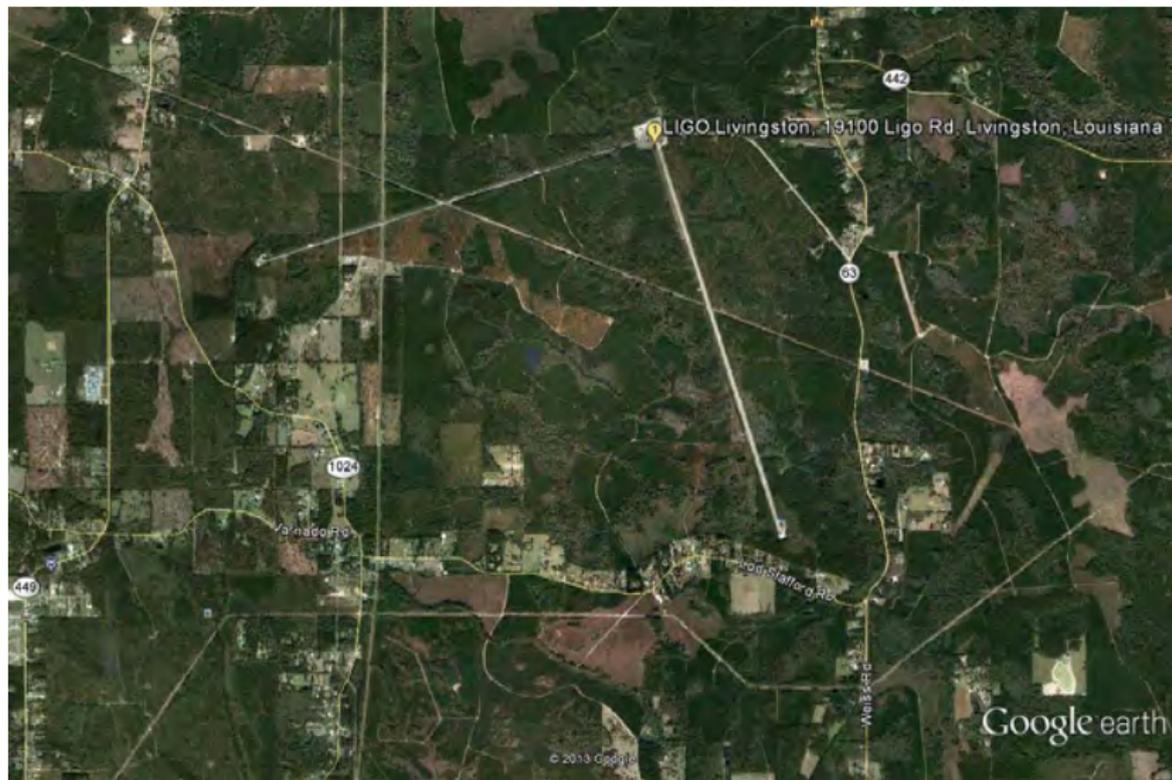
Detectores interferométricos

[back](#)



Detectores interferométricos

back



Google earth

millas
km



Unos cuantos comentarios sobre LIGO y VIRGO

- **LIGO**, dos instalaciones en Hanford WA y Livingston LA, **VIRGO** un detector en Pisa.
- Algunos datos sobre LIGO
 - Los brazos miden **cuatro kilómetros**. Cada uno de ellos contiene un tubo de un metro de diámetro (**ultra-alto vacío**).
 - Los haces del laser IR rebotan 280 veces entre los espejos de cada brazo consiguiendo que su longitud efectiva sea de algo más de 1000km.
 - Los espejos (40kg) son de cuarzo ultrapuro (para evitar impurezas que absorban en el IR).
 - Cuelgan de un complejo **sistema de suspensión** de varias etapas para aislarlos de todo tipo de ruido sísmico, vibraciones, etc...
- Permiten apreciar «**cambios de longitud relativos**» de $h = 10^{-21}$.

¡Una maravilla de la física y de la ingeniería!

Ondas mecánicas, electromagnéticas y **gravitatorias**

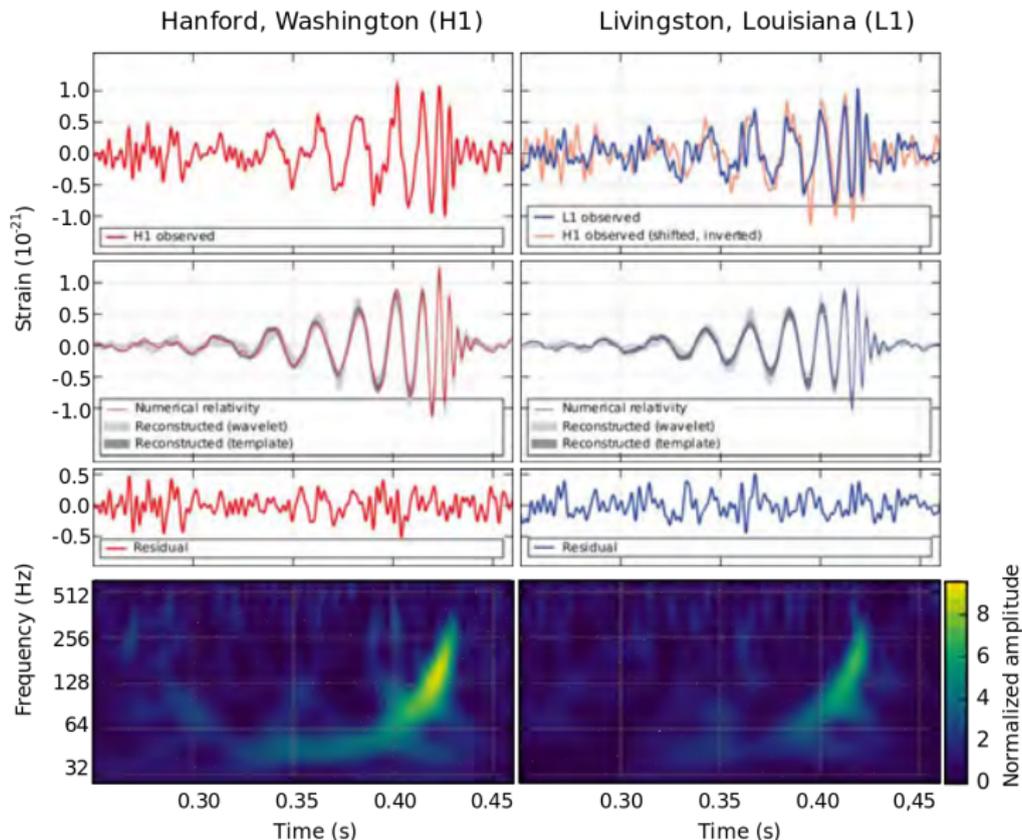
- Se **propagan a la velocidad de la luz** (como las ondas EM pero no el sonido).
- **No necesitan un medio** para propagarse (como las ondas EM pero no el sonido).
- **Nada es completamente transparente** a las ondas gravitatorias (como el sonido, sin embargo solo las partículas cargadas sienten la presencia de las ondas electromagnéticas).
- Los detectores de ondas gravitatorias **se parecen más a unas orejas que a unos ojos** (por ejemplo por su forma de localizar la procedencia de las señales).
- La frecuencia de las ondas gravitatorias que podemos detectar en la actualidad es similar a la de los sonidos audibles.

Ondas mecánicas, electromagnéticas y gravitatorias

- Tanto las ondas gravitatorias como el sonido proceden de objetos «grandes» (de tamaño astronómico en el primer caso).
- Por esta razón no hacemos «imágenes gravitatorias» sino que extraemos la información física que llevan en su amplitud y frecuencia.
- Con la luz visible podemos hacer imágenes porque **su longitud de onda es muy pequeña** (en todo caso solo de objetos que sean sensiblemente más grandes que esta longitud de onda).
- Hay objetos muy pequeños que, sin embargo, emiten radiación detectable.

La primera detección: GW150914

[back](#)



Seis detecciones hasta la fecha

GW150914: Una colisión de agujeros negros

- Colisiones de **agujeros negros estelares** de masas bastante grandes. Por ejemplo, la primera detección corresponde a una colisión de dos agujeros negros de **36 y 29 masas solares** para dar lugar a otro de **62 masas solares**.
- Las **tres masas solares que faltan se convirtieron en energía** [¡recor- dad que $E = mc^2$!]. La potencia emitida en los instantes inmediatamente anteriores a la colisión fue varias mayor que **la de todas las estrellas del universo observable juntas**.
- Se ha podido determinar la distancia (unos 1300 *millones* de años luz).
- ¡La **forma** de la onda contiene información sobre su **distancia!** (porque contiene información sobre la energía emitida).

GW170817: Una colisión de estrellas de neutrones

- Se observaron *contrapartidas* de muchos tipos: un GRB, en rayos X, en el visible, radio e infrarrojo (*multimessenger astronomy*).
- Una *kilonova*.
- La detección de *contrapartidas ópticas* (sabemos en qué galaxia se produjo la colisión) ha permitido a los astrónomos determinar el *redshift* que combinado con la **determinación directa de la distancia** a la galaxia nos da la constante de Hubble **sin apoyarnos en la escalera de distancias** cósmicas.
- Ahora sabemos que las **colisiones de estrellas de neutrones** son la **fuelle de los elementos más pesados**, como el oro o el uranio.
- Este tipo de colisiones nos permitirá determinar la **ecuación de estado de la materia nuclear** (cómo se comporta a altas presiones y temperaturas).

Una nueva ventana al universo

Una revolución en la astrofísica

Un futuro muy brillante

... buenos libros

- **R. Emparan**, *Iluminando el lado oscuro del universo: Agujeros negros, ondas gravitatorias y otras melodías de Einstein*, Ariel (2018).
- **H. Bondi**, *Relativity and common sense*, Dover (1980).
- **J. M. Sánchez Ron**, *El origen y desarrollo de la relatividad*, Alianza Editorial (1983).
- **R. Geroch**, *La relatividad general de la A a la B*, Alianza Editorial (1986).
- **K. S. Thorne**, *Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy*, W. W. Norton & company (1995).

Página 4 [[2006-01-14_Surface_waves]]

By Roger McLassus, CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=513043>

Página 5 [[Bodensee_at_Lindau_-_DSC06962]]

Public domain

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bodensee_at_Lindau_-_DSC06962.JPG

Página 6 [[Fjordn_surface_wave_boat]]

By Edmont - Own work, CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6920796>

Página 7 [[Waves_in_pacifica.1]]

By Brocken Inaglory - Own work, CC BY-SA 4.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3379848>

Página 8 [[1280px-Wea00816]]

By NOAA - <http://www.photolib.noaa.gov/big5/wea00816.jpg>, Public Domain,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3530986>

Página 9 [[Ile_de_re]]

By Michel Griffon - Own work, CC BY 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12598928>

Página 10 By User:Frinck51 - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59307>

Página 11 By Jebulon - Derivative work of File: Monasterio de Santa Cruz, Coímbra, Portugal, 2012-05-10, DD 09.JPG by User:Poco a poco, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20092906>

Página 13 By CSIRO, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35481714>

Página 14 By NASA - map.gsfc.nasa.gov/mig/030644/030644.html, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24942>

Página 15 By ESA/Hubble, CC BY 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=58535689>

Página 18 Máquina PDE's, Catalina Barbero Ozaita

Página 23 By AndreaPersephone at the English language Wikipedia, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12469305>

Página 24 By Brocken Inaglory - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2109768>

Créditos (a cada uno lo suyo...)

[back](#)

Página 26 By Aleksandr Berdnikov - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=53008370>

Página 27 By User:S - Own work, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10242710>

Página 30 Vortices Maxwell, Public domain

Página 32 By Jim.belk - Own work, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8008790>

Página 37 By YouTube - <http://th.physik.uni-frankfurt.de/jr/physpiceinstein.html>,
Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1821347>

Página 38-39 By Unknown - Official 1921 Nobel Prize in Physics photograph, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=458521>

Página 42 By Teodomiro - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=39642728>

Página 43 By Dana Berry, Public Domain

http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/collide_whitedwarf.html,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3423897>

Página 44 Weber, public domain

Página 45 By Ligo.gif: The original uploader was MOble at English Wikipedia.derivative work: Malyszczlanguage-switch: RothwildChinese: YinweichenGerman: MfbMacedonian: B. Jankuloski-Russian: ??Polish: MbejgerUkrainian: Kirsim-This file was derived from: Ligo.gif:, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18325956>

Página 46 F. Barbero.

Página 50 By B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
—full list at the end of the article

<http://physics.aps.org/featured-article-pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

This vector image was created with Matplotlib., CC BY 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46987868>

Créditos (a cada uno lo suyo...)

[back](#)

Página 43 By Dana Berry, Public Domain

http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/collide_whitedwarf.html

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3423897>

Página 44 Weber, public domain

Página 45 By Ligo.gif: The original uploader was MOble at English Wikipedia.derivative work: Malyszczlanguage-switch: RothwildChinese: YinweichenGerman: MfbMacedonian: B. Jankuloski-Russian: ??Polish: MbejgerUkrainian: Kirsim-This file was derived from: Ligo.gif:, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18325956>

Página 46 F. Barbero.

Página 50 By B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
—full list at the end of the article

<http://physics.aps.org/featured-article-pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

This vector image was created with Matplotlib., CC BY 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46987868>

¡Muchas gracias!