

Información Astrofísica I

1

Información Astrofísica I

1. Conceptos generales

2. Astronomía Observacional

3. Portadores de la información

Bibliografía

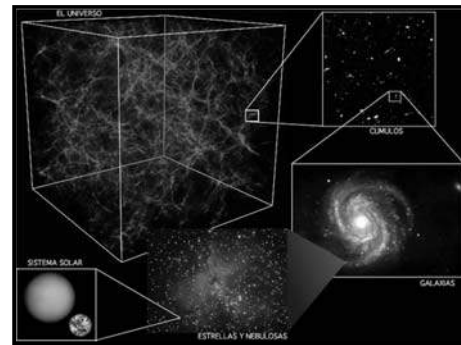
- **Observational Astrophysics (Chapter 1)**
P. Léna, D. Rouan, F. Lebrun, F. Mignard & D. Pelat
- **Electronic Imaging in Astronomy (Chapter 1)**
I.S. McLean

2

1. Conceptos generales

Objetivo de la Astrofísica

- *El objetivo general de la Astrofísica es el estudio de los diferentes procesos físicos que se producen en el Universo*



Objetos de estudio:

- Son aquellos que cumplen con las siguientes dos condiciones:
 - Se hallan fuera de la atmósfera terrestre
 - La información de ellos se obtiene en forma indirecta (por medio de portadores naturales)
- En base a las condiciones establecidas:
- Los objetos bajo estudio **NO** son manipulables como para experimentar con ellos
 - Esta es la **diferencia fundamental** que existe **entre Física y Astronomía**
 - En astronomía “**el observador es un elemento pasivo**” frente a sus objetos bajo estudio

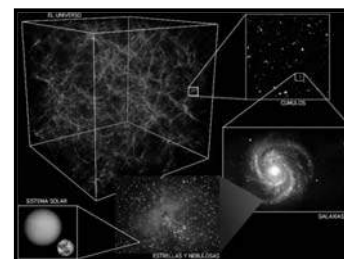
3

1. Conceptos generales

- Para alcanzar el objetivo general, se llevan a cabo las siguientes fases:

Descripción: Para investigar al Universo normalmente se procede de la siguiente forma::

- Se lo “**clasifica**” en categorías u objetos de una forma un poco arbitraria
 - Planetas
 - Estrellas
 - Cúmulos
 - Nebulosas
 - Galaxias, etc
- Se “**estudian**” dichos objetos en forma aislada y/o como se vinculan entre ellos



Entendimiento:

- Se elaboran distintos “**modelos físicos**” a partir de los “**datos obtenidos**” de los objetos indicados en la clasificación anterior

Predicción:

- A partir de los “**modelos físicos**” se trata de “**predecir**”
 - La historia y el comportamiento futuro de los objetos clasificados
 - Nuevos fenómenos no detectados

4

1. Conceptos generales

Definiciones:

Información Astrofísica

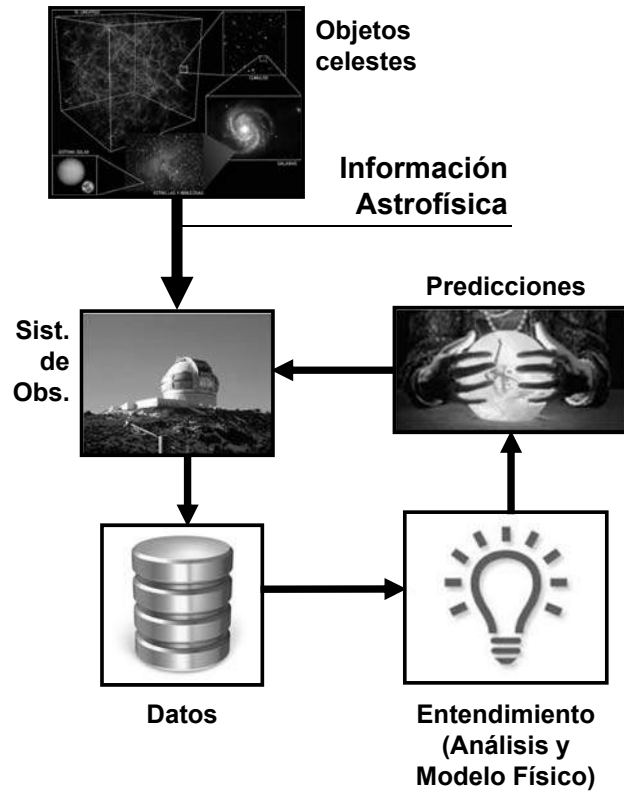
- Es el “**vínculo**” entre los objetos de estudio y el observador

Astronomía Observacional

- Es la parte de la astronomía que involucra la detección, el procesamiento y el análisis de la información astrofísica

Astronomía Teórica

- Es la parte de la astronomía que se encarga de desarrollar modelos físicos para interpretar datos observacionales y realizar predicciones



Información Astrofísica I

1. Conceptos generales

2. Astronomía Observacional

3. Portadores de la información

2. Astronomía Observacional

Fuente: <http://www.faculty.virginia.edu/rwooclass/astr511/lec1-f03.html>

- A lo largo de la historia se ha encontrado que:

El conocimiento en astronomía ha sido guiado principalmente por observaciones y no por interpretaciones (teorías)

- Solo unos pocos descubrimientos astronómicos fueron predichos, muchos de ellos fueron accidentales

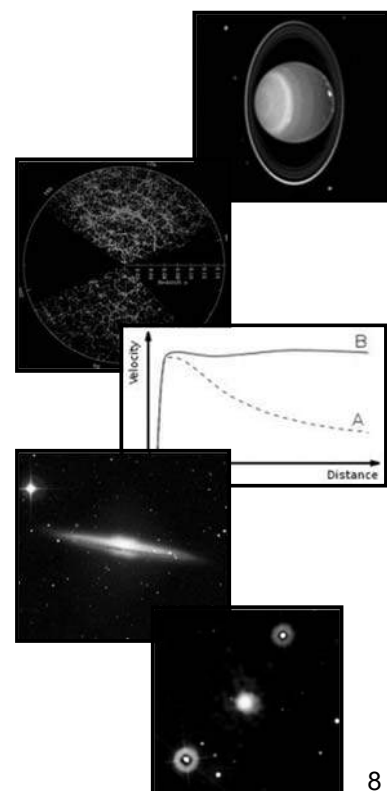


7

2. Astronomía Observacional

2.1. Descubrimientos observacionales (ejemplos)

- **Urano**
Relevamientos telescópicos del cielo a fines del siglo XVI
- **Pulsars**
Observaciones pulsantes en ondas de radio
- **Estructura a gran escala del universo**
Relevamientos de redshift y medidas de la función de luminosidad de las galaxias
- **Materia oscura en galaxias espirales**
Curvas de rotación planas obtenidas a partir de espectroscopía en óptico/radio
- **Emisión de rayos X del gas en cúmulos de galaxias**
Primeros relevamientos en rayos X
- **GRB = Gamma Ray Bursts**
Satélites militares buscando pruebas nucleares clandestinas



8

2. Astronomía Observacional

2.2. Descubrimientos guiados por la teoría (Predicciones)

▪ Neptuno

Le Verrier predijo su existencia en base a perturbaciones detectadas en 1846 en el movimiento orbital de Urano y el uso de la teoría de la gravitación de Newton

▪ Distorsión del espacio-tiempo en los alrededores del Sol

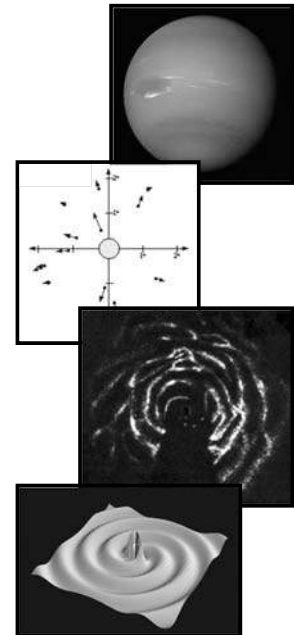
Predicción basada en la teoría general de la relatividad de Einstein

▪ Línea de 21 cm del hidrógeno neutro

- van de Hulst predijo en 1944 que el hidrógeno neutro podría producir radiación a 1420.4058 MHz (21 cm) debido a la existencia de dos niveles de energía estrechamente espaciados en el estado fundamental del átomo de hidrógeno.
- La línea de 21 cm fue detectada por primera vez en 1951 por Ewen y Purcell en la Universidad de Harvard,

▪ Ondas Gravitacionales

Predicción realizada a principios del siglo XX a partir de las ecuaciones de la teoría de la relatividad de Einstein



9

2. Astronomía Observacional

2.3. ¿ Descubrimiento observacional o predicción teórica ?

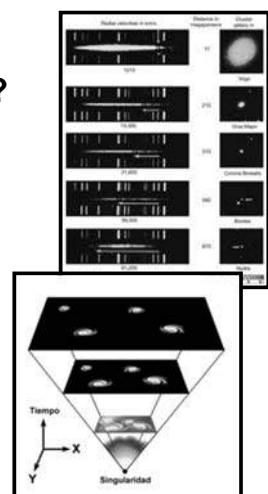
▪ Expansión del universo: Ley de Hubble- Lemaître

- En 1927, G. Lemaître encontró una solución a las ecuaciones de Friedmann sugiriendo la idea de un "átomo primitivo"
- En 1929, Hubble publicó su análisis de las velocidades radiales de galaxias basado en un relevamiento espectroscópico

https://www.iau.org/public/images/detail/IMG_1340-180830-CC/

▪ Agujeros negros supermasivos / AGNs

- Identificados en base a relevamientos en radio y relevamientos espectroscópicos en el óptico
- La actividad de los núcleos de las galaxias había sido considerada desde los años 40 (Seyfert), su significado no fue entendido hasta que se realizaron observaciones en radio en los años 50 y 60 (especialmente de quasars)



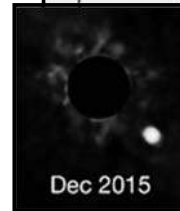
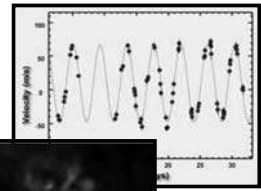
2. Astronomía Observacional

2.3. ¿ Descubrimiento observacional o predicción teórica ?

▪ Exoplanetas

- Identificación basada en el monitoreo espectroscópico en el óptico y en el estudio de curvas de luz
- Había una expectativa general relacionada con la existencia de los exoplanetas, basada en parte, en el principio copernicano.

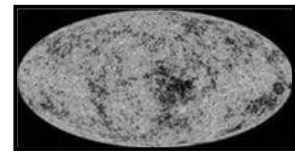
Las ideas teóricas predecían que los planetas masivos solo podrían existir a grandes distancias de sus respectivas estrellas, para lo que se necesitarían relevamientos de largo período (5 años o más) para localizarlos



▪ Radiación cósmica de fondo en microondas (CMR)

- La CMR fue predicha por Gamow, Alpher y Herman en 1948, incluso se pudo estimar que la temperatura correspondiente sería de unos 5 K
- La CMR fue descubierta 16 años luego de forma accidental por Penzias y Wilson midiendo una temperatura de ~ 3 K.

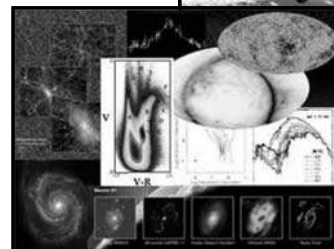
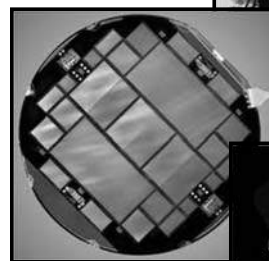
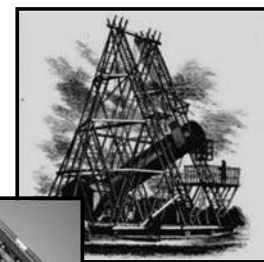
En esa época existía otro equipo preparado para su búsqueda y hubiese tenido éxito si se hubiese implementado antes del descubrimiento accidental



2. Astronomía Observacional

Grandes avances técnicos

- **Siglo XVII:** Telescopios
- **Siglo XIX:** Espectroscopía
Fotografía
Óptica de calidad
Ingeniería de grandes estructuras
- **Siglo XX:** Fabricación de espejos gigantes
Detectores electrónicos
Computadoras digitales
Astronomía desde el espacio
- **Siglo XXI:** Internet de uso masivo
Observatorios virtuales
Relevamientos celestes sistemáticos
Procesamiento masivo de datos
????



Información Astrofísica I

1. Conceptos generales

2. Astronomía Observacional

3. Portadores de la información

13

3. Portadores de la información: Conceptos



La información sufre los siguientes **PROCESOS**:

- Se **ORIGINA** en el objeto bajo estudio (fuente de investigación)
- Se **MODIFICA** a lo largo de su viaje a través del espacio (incertezas; correcciones)

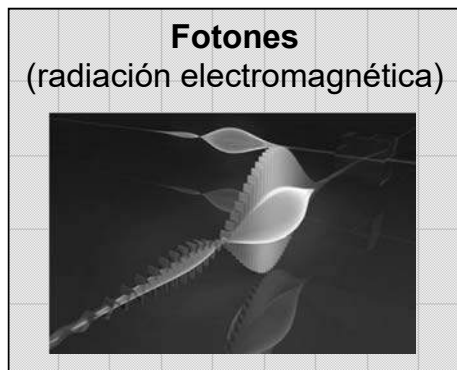


- Se **RECOLECTA** por un “sistema de observación” (muestreo, filtrado, etc.)
- Se **REFINA** (reducción, calibración)
- Se **ANALIZA**, tratando de no desperdiciarla ni sobreinterpretarla
- Se **ALMACENA**, permitiendo futuras investigaciones (propias o ajenas)

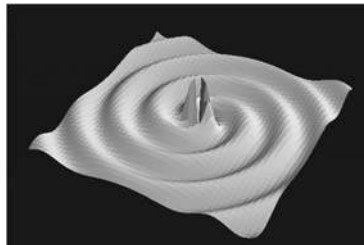
El **objetivo** del observador es planificar y realizar estos procesos

14

3. Portadores de la información: Identificación



Ondas Gravitacionales



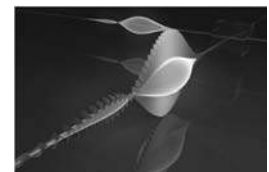
15

3. Portadores de la Información

3.1. Fotones

- Son los portadores de **casi toda** la información sobre la que se basa la Astrofísica
- Esto se debe, básicamente, a:
 - Su **facilidad de detección** en comparación con otras fuentes de información
 - El desarrollo histórico de la Astronomía se ha basado en la **observación a simple vista**
 - El ojo humano es un órgano que permite capturar información realmente muy lejana

Llegando a ~3/4 Mpc !!! (M31)



16

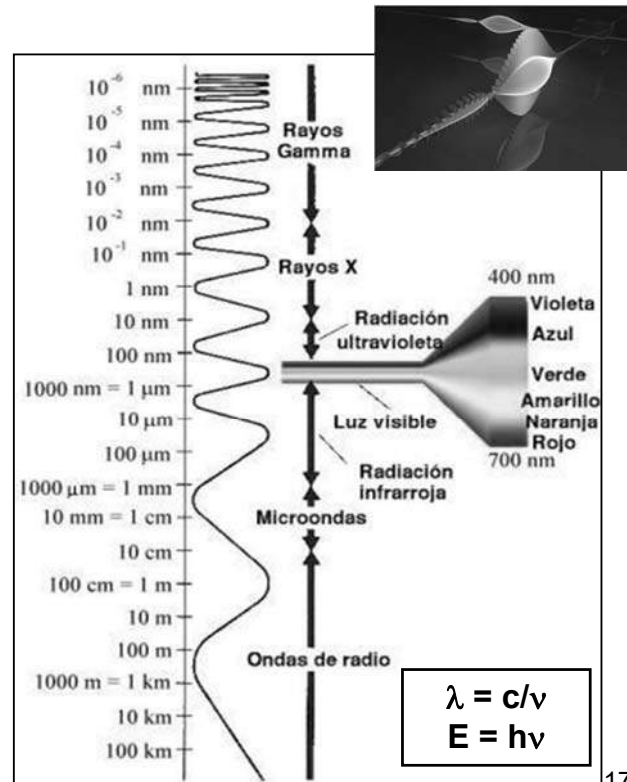
3. Portadores de la Información

3.1. Fotones

3.1.1. El Espectro Electromagnético:

La radiación EM adquiere diferentes nombres:

- **Las energías altas** ($E > 100 \text{ eV}$):
Se describen en términos de energía de los fotones (eV): Rayos X y Rayos γ
- **Las energías intermedias**
Se describen en términos de longitud de onda (\AA , nm , μm):
 - Visible ($\lambda \sim 320 - 700nm$);
 - IR ($\lambda \sim 0.8 - \sim 200\mu m$)
- **Las energías bajas** ($\lambda > 0.5mm$)
Se describen en términos de frecuencia o longitud de onda (mm , MHz , GHz):
 - Ondas submilimétricas;
 - Ondas de radio



3. Portadores de la Información

3.1. Fotones

3.1.2. Producción de fotones:

Se halla directamente relacionada con:

- Las condiciones físicas del **emisor**:
 - temperatura,
 - presión,
 - densidad,
 - presencia de campos magnéticos
- La naturaleza y movimientos de sus **partículas** (átomos, moléculas, granos de polvo):
 - Saltos electrónicos entre orbitales (óptico, rayos X)
 - Vibraciones moleculares (radio)
 - Tamaño y orientación de los granos de polvo (absorción, dispersión, emisión térmica, polarización)

**No existe un rango de longitudes de onda privilegiado
Todos son igualmente importantes**

3. Portadores de la Información

3.1. Fotones

3.1.3. Propagación de fotones:

Los fotones son afectados en su camino y con ello la información que transportan:

- Existe contaminación de la información original
- Existe información adicional sobre el camino recorrido



19

3. Portadores de la Información

3.1.3. Propagación de fotones:

Medio Interestelar / intergaláctico:

- Los diferentes componentes del ISM / IGM provocan
 - *Absorción*
 - *Dispersión*
 - *Extinción = Absorción + Dispersión*
- Su importancia depende de la longitud de onda

Polvo:

- Provoca extinción más importante en longitudes de onda más cortas (enrojecimiento)
- Provoca aumento del brillo del cielo por dispersión

Plasma:

- Absorbe las ondas de radio del orden de kilómetros y mayores

Hidrógeno neutro (HI):

- Absorbe, en principio, toda la radiación por debajo de límite de Lyman (91.3 nm)

Electrones libres:

- Provocan dispersión por efecto Compton directo e inverso



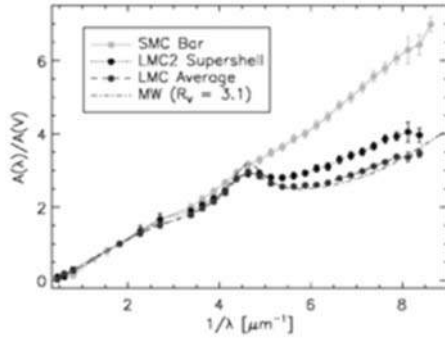
20

3. Portadores de la Información

3.1.3. Propagación de fotones:

Medio Interestelar / intergaláctico:

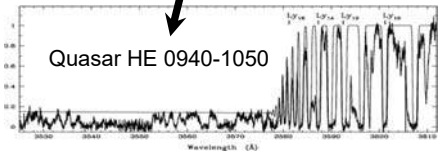
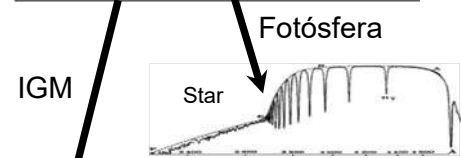
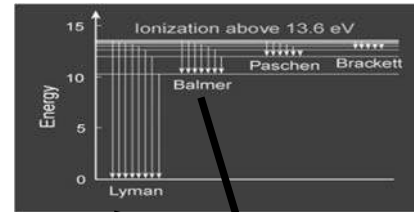
Polvo



- Curvas de extinción promedio para:
- la Vía Láctea (MW),
 - la Nube Mayor de Magallanes (LMC) y
 - la Nube Menor de Magallanes (SMC).
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Extinci%C3%B3n_\(astronom%C3%ADa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Extinci%C3%B3n_(astronom%C3%ADa))



H



VLT/UVES (Levshakov et al. 2003)

3. Portadores de la Información

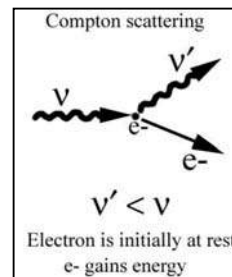
3.1.3. Propagación de fotones:

Medio Interestelar / intergaláctico:

Electrones libres

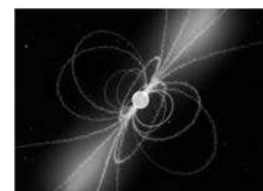
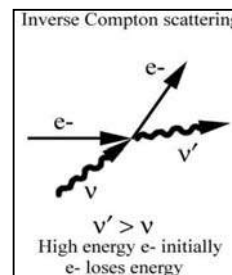
Efecto Compton directo:

- Se transforman fotones de alta energía (X, γ) en fotones de menor energía



Efecto Compton inverso:

- Se transforman fotones de baja energía y electrones relativistas en fotones de alta energía (rayos X y γ)



Magnetósferas de pulsars



Binarias de rayos X



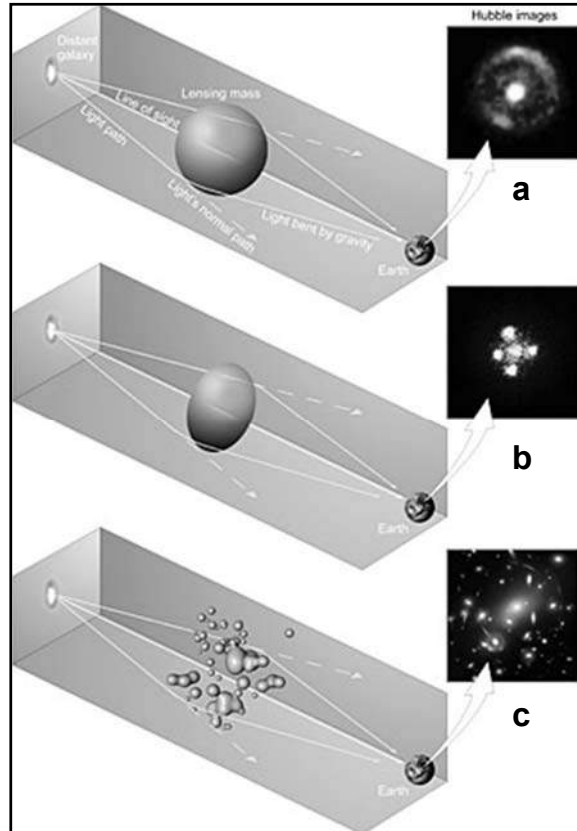
AGNs

3. Portadores de la Información

3.1.3. Propagación de fotones:

Lentes gravitatorias:

- La trayectoria depende de la curvatura del espacio por la presencia de materia produciéndose diferentes formas de imágenes dependiendo de la forma y posición del objeto que actúa como lente:
 - a. Si la lente es esférica, la imagen es un “anillo de Einstein”
 - b. Si la lente es elongada, la imagen es una “cruz de Einstein”
 - c. Si la lente es un cúmulo de galaxias (p.e. Abell 2218), aparecen diversos arcos de luz.



23

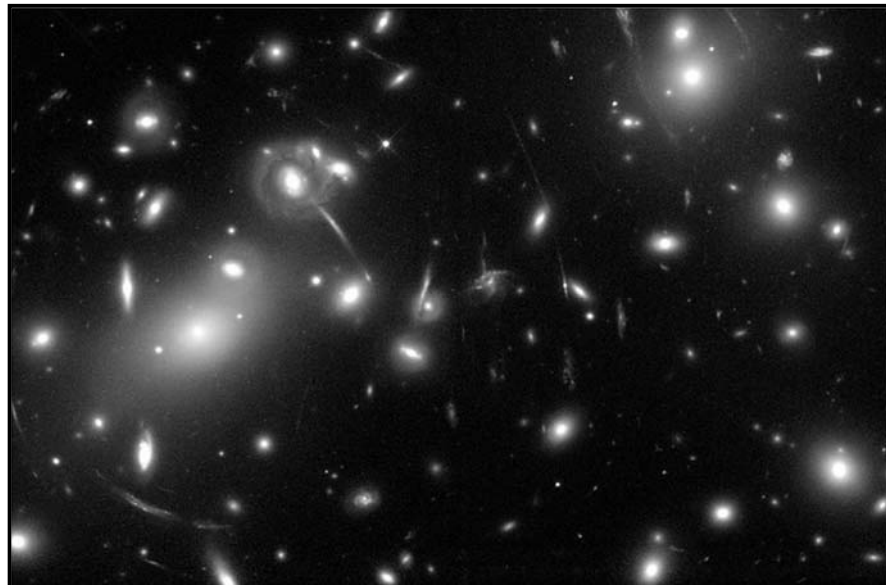
3. Portadores de la Información

3.1.3. Propagación de fotones:

Lentes gravitatorias

Ejemplo 1

**Cúmulo de galaxias
Abell 2218**
(Andrew Fruchter
(STScI) et al., WFPC2,
HST, NASA)



24

3. Portadores de la Información

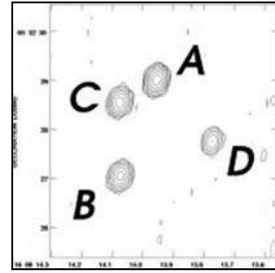
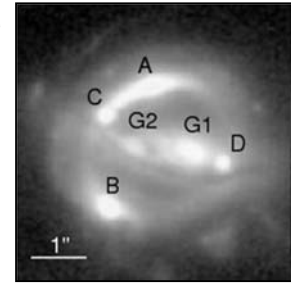
3.1.3. Propagación de fotones:

Lentes gravitatorias

Ejemplo 2: B1608+656

- Las cuatro fuentes A, B, C, D y E corresponden todas a un mismo objeto cuya imagen fue distorsionada por una lente gravitatoria.
- El estudio del desfase entre el cambio de brillo de las diferentes fuentes permite hacer una estimación de la constante de Hubble (Fassnacht et al. 1999)

HST image



VLA 8.4GHz image

<http://www.jb.man.ac.uk/research/gravlens/lensarch/B1608+656/B1608+656.html>

3. Portadores de la Información

3.1.3. Propagación de fotones:

Atmósfera Terrestre

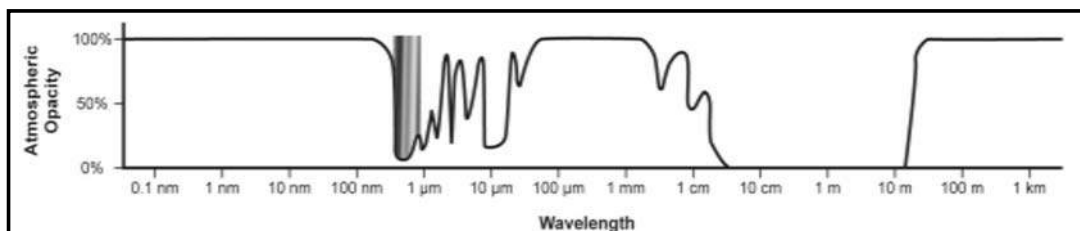
- Es la última barrera que deben superar los fotones, aunque es la que impone mayores limitaciones.
- Solo permite el paso de fotones en el "óptico" y en "radio"

óptico = visible + IR

$$3200 \text{ \AA} < \lambda < 10000 \text{ o } 20000 \text{ \AA}$$

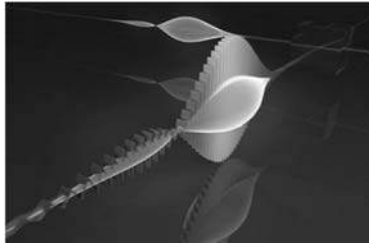
$$320 \text{ nm} < \lambda < 10 \text{ o } 20 \text{ \mu m}$$

- Las limitaciones han sido superadas solo en los últimos 30-40 años mediante el uso de:
 - globos
 - aviones
 - cohetes,
 - satélites artificiales

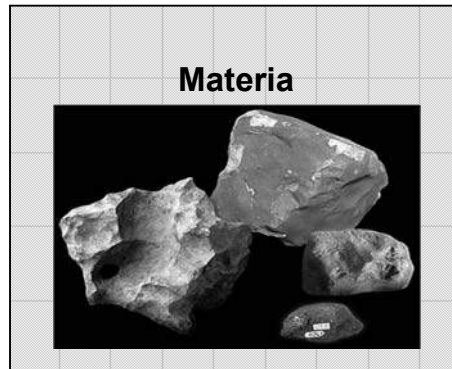


3. Portadores de la Información

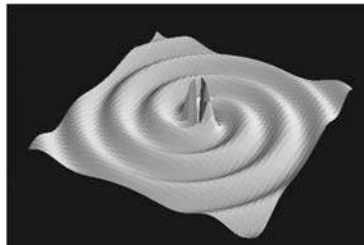
Fotones
(radiación electromagnética)



Materia



Ondas Gravitacionales

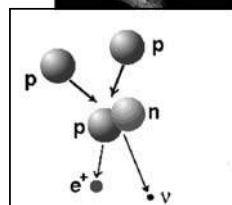
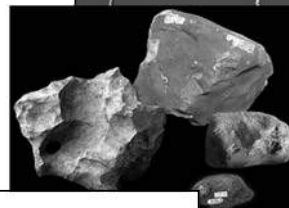
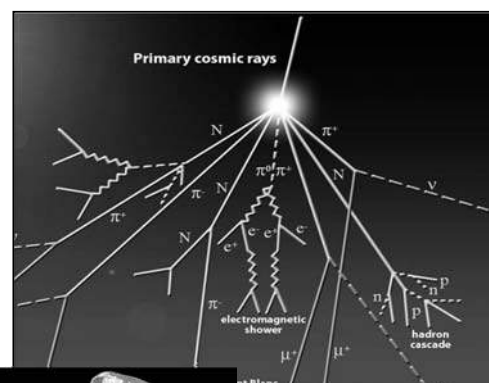


3. Portadores de la Información

3.2. Materia

La Tierra es bombardeada continuamente con materia desde el espacio cuya información no es despreciable:

- **Rayos cósmicos**
Se hallan compuestos por partículas subatómicas
- **Meteoritos**
- **Neutrinos**



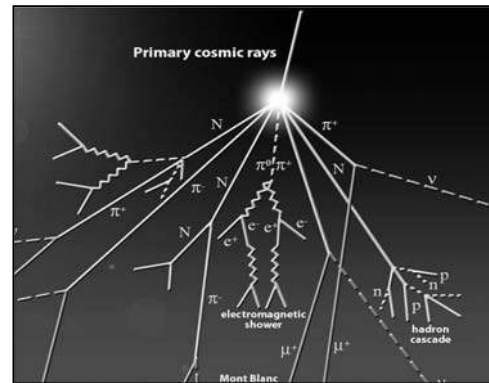
3. Portadores de la Información

3.2. Materia:

3.2.1. Rayos cósmicos: Clasificación

a) Rayos cósmicos primarios:

- Son principalmente:
 - núcleos de H (84%) y de He (14%).
 - El resto son núcleos pesados (llegando al Fe y superiores)
- Se originan en procesos de alta energía (supernovas, flares solares, etc.)
- Interactúan con los campos magnéticos de la Galaxia y de la Tierra por lo que no poseen trayectorias rectas



- Se reciben en la atmósfera superior con una **frecuencia** $\sim 6000 \text{ cr/m}^2\text{s}$
- Poseen **energías** entre 10^6 y 10^{20} eV con un **valor medio** $\sim 10^{10}$ eV = 10 GeV

Referencias:

$$E_{\text{proton}} = m_p c^2 = 0.93 \text{ GeV}$$

$$E_{\text{LCH(CERN)}} = 3.5 - 7 \text{ TeV}$$

3. Portadores de la Información

3.2. Materia:

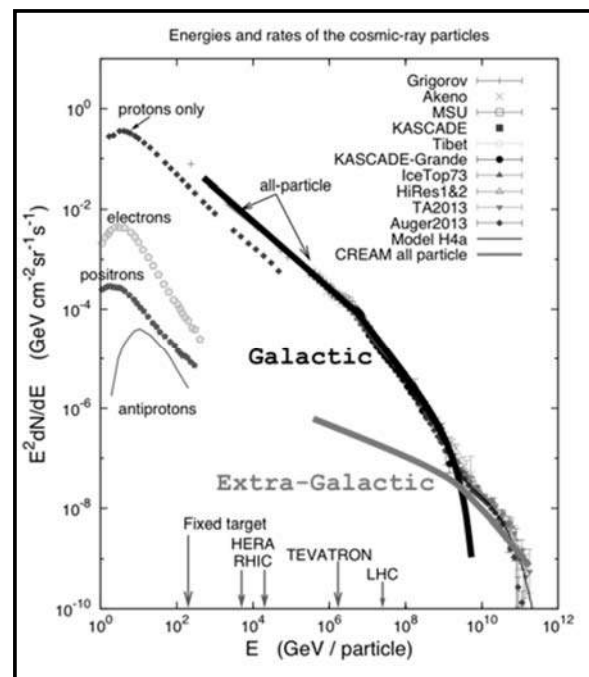
3.2.1. Rayos cósmicos: Clasificación

b) Rayos cósmicos secundarios:

- Son partículas producidas por la interacción de los rayos cósmicos primarios y partículas de la alta atmósfera (a mas de 50 km)
- Entre estos se incluyen fragmentos de núcleos atómicos y partículas de vida corta (kaones, piones, positrones, etc.)

Detección

- Se basa en métodos desarrollados en los laboratorios de física de partículas



<https://masterclass.icecube.wisc.edu/en/analyses/cosmic-ray-energy-spectrum>

3. Portadores de la Información

3.2. Materia:

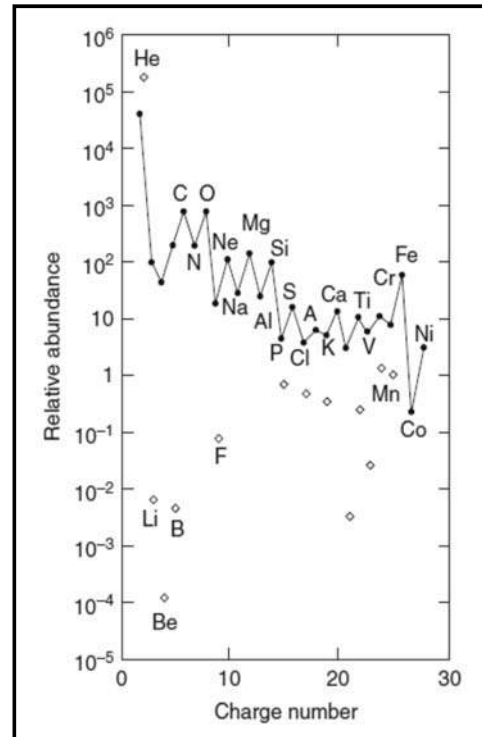
3.2.1. Rayos cósmicos: Abundancias

Ejemplo

Abundancia en los rayos cósmicos de los elementos respecto al silicio (Si = 100)

- 70-280 MeV por nucleón
- ◇ 1-2 GeV por nucleón

Abundancias de los elementos del Sistema Solar
Solo se indica aquellos que difieren de forma importante



- Las abundancias (relativas) de algunos elementos en los rayos cósmicos es bastante mayor a la encontrada en el Sistema Solar

31

3. Portadores de la Información

3.2. Materia:

3.2.2. Meteoritos

- Desde partículas microscópicas hasta meteoritos de varias toneladas
- Se obtiene información directa acerca de la abundancia de elementos en los sitios donde fue producida
- Proviene principalmente del cinturón de asteroides Algunos parecen provenir de la Luna, Marte o incluso Venus



Información astrofísica

- **Núcleos atómicos:** Reacciones de alta energía en estrellas o en el Universo temprano (abundancia de He)
- **Meteoritos:** Historia y origen del Sistema Solar (~ 4.56 Gyr)

32

3. Portadores de la Información

3.2. Materia:

3.2.3. Neutrinos

Hay tres clases de neutrinos (seis considerando sus antipartículas)

- ν_e : **neutrino electrón**
- ν_μ : **neutrino muón**
- ν_τ : **neutrino tauón**

a) Producción: Se debe a procesos de alta energía (aprox $> 100 \text{ MeV}$)

- Desexcitación de núcleos
- Captura de electrones por núcleos
- Aniquilaciones electrón-positrón

b) Propagación: Son estables, sin carga y casi no interactúan con la materia, entonces:

- Siguen trayectorias rectas
- El universo es prácticamente transparente a ellos,
- Retienen la "información" de la dirección y energía de su fuente

Interacción débil

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

Interacción fuerte

$$pp \rightarrow pn + \pi^+ \rightarrow pn + \mu^+ + \nu_\mu$$

$$nn \rightarrow np + \pi^- \rightarrow np + \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$pp \rightarrow pp + \pi^0$$

$$np \rightarrow np + \pi^0$$

Información adicional:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino>

3. Portadores de la Información

3.2. Materia:

3.2.3. Neutrinos:

c) Neutrinos emitidos (por estrellas)

- Las estrellas más brillantes en neutrinos son aquellas en las fases de:
 - Colapso del núcleo de Fe
 - Pulsos térmicos
 - Flash de He
- Son todas fases evolutivas muy cortas (a lo sumo unos meses)

Diagrama HR con luminosidad de fotones

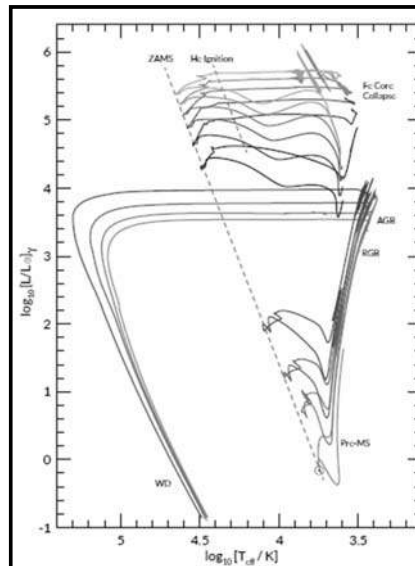
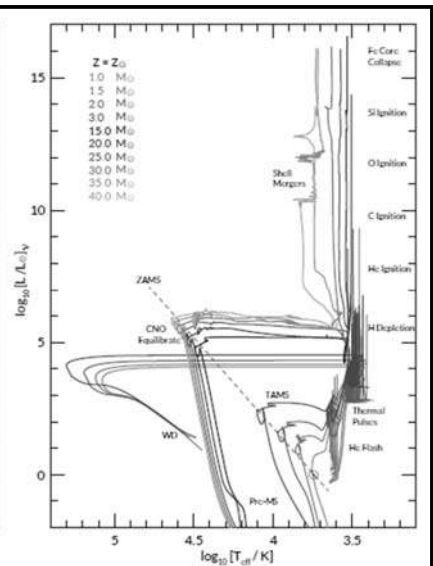


Diagrama HR con luminosidad de neutrinos



3. Portadores de la Información

3.2. Materia:

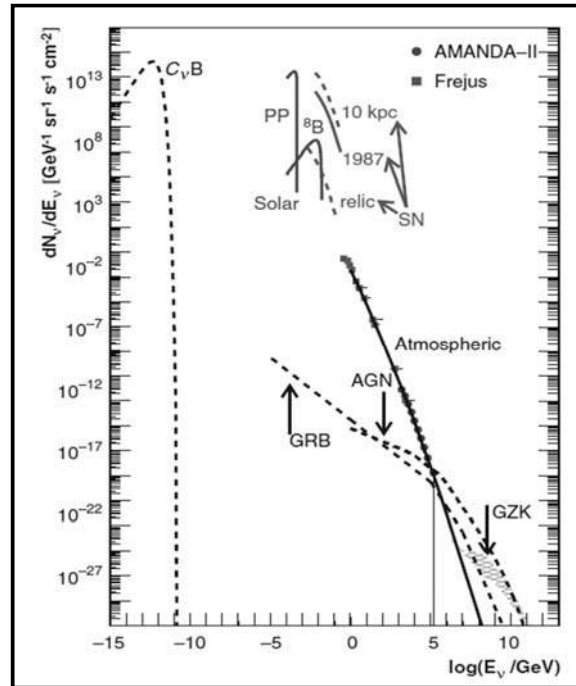
3.2.3. Neutrinos:

d) Espectro de energía recibida

La figura presenta el flujo de "ν_e" (neutrinos electrón) recibidos en la Tierra (teórico) debido a distintas fuentes:

- a) Fuentes estelares
 - El núcleo del Sol
 - Supernovas (llevadas a 10 kpc)
- b) Fuentes no estelares
 - La radiación de fondo a 2.7 K
 - Colisiones de rayos cósmicos con la atmósfera terrestre
 - Objetos muy energéticos (AGNs, GRBs, etc.)

Nota: GZK = interacción entre rayos cósmicos y fotones de la radiación de fondo



Becker 2008, Phys. Rept. 458, 173

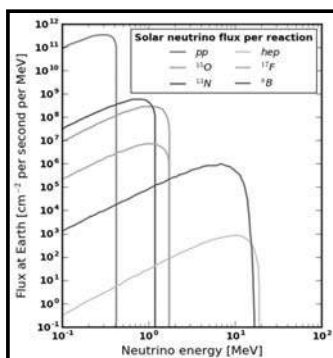
3. Portadores de la Información

3.2. Materia:

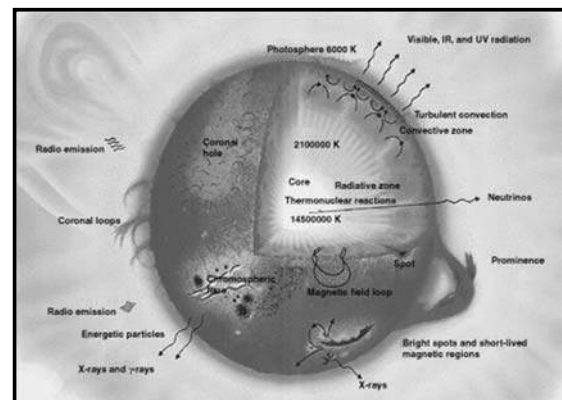
3.2.3. Neutrinos:

Ejemplo 1: Fenómeno permanente

Los neutrinos producidos en las reacciones nucleares en el interior del Sol son los detectados más fácilmente de un objeto astronómico



https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_neutrino



<http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>

- Los neutrinos permiten obtener información directa del interior del Sol
- Produjeron el "problema de los neutrinos solares « http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_neutrino_problem

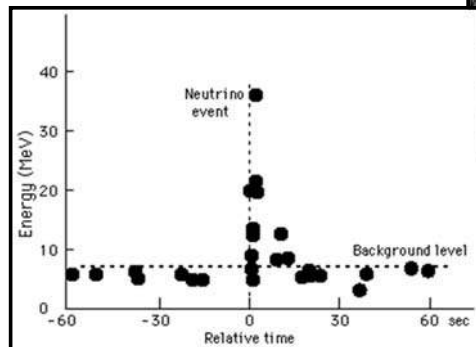
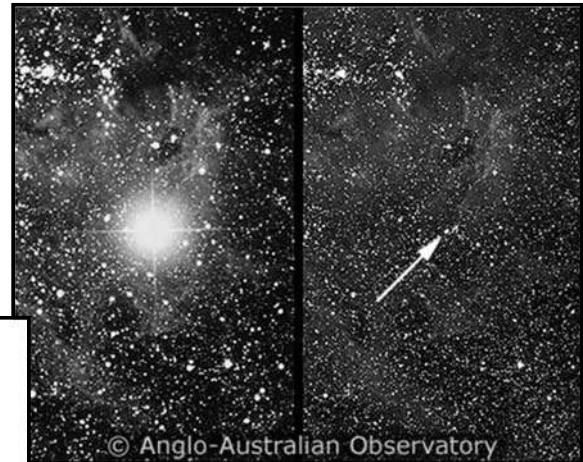
3. Portadores de la Información

3.2. Materia:

3.2.3. Neutrinos:

- Ejemplo 2: Fenómeno transitorio

La supernova SN1987A fue detectada en neutrinos (19 neutrinos con energías entre 10-30 MeV debidos al colapso de la estrella)



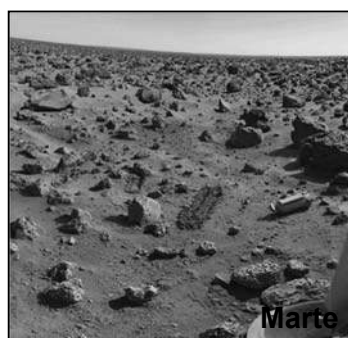
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Astro/sn87a.html>

3. Portadores de la Información

3.2. Materia:

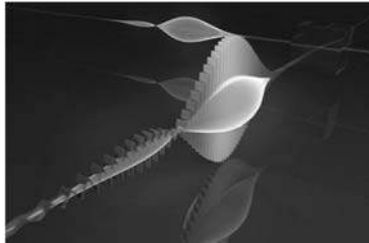
3.2.4. Exploración Espacial:

- Muestras y análisis “*in situ*” de la Luna, planetas, cometas, asteroides
- La astronomía se confunde con la geología o la meteorología planetaria

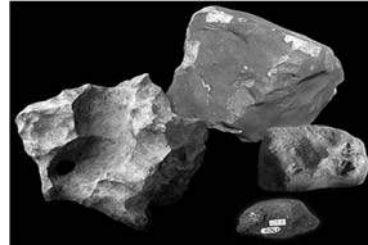


3. Portadores de la Información

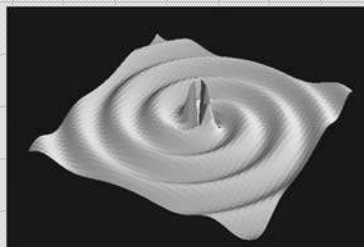
Fotones
(radiación electromagnética)



Materia



Ondas Gravitacionales



39

3. Portadores de la Información

3.3. Ondas gravitacionales:

a) Definiciones:

- **Onda gravitacional:** Es una fluctuación en el tejido del espacio-tiempo que se propaga como una onda, alejándose de un objeto o de un sistema de objetos en movimiento.
- **Radiación gravitacional:** Se denomina así a la energía transportada por las ondas gravitacional.

b) Producción:

Cuando la distribución espacial de masa de un sistema cambia con el tiempo.

Ejemplos: Sistemas binarios de objetos compactos

c) Propagación:

En el vacío se propagan a la velocidad de la luz y **NO** sufren prácticamente absorción debido a la materia:

**El Universo es transparente
a estas ondas!!!**

Información adicional:

http://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave

40

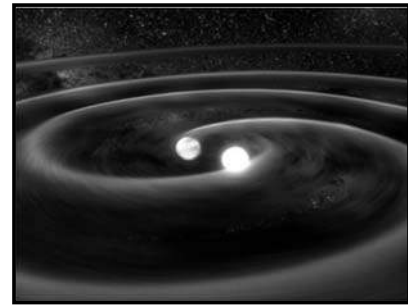
3. Portadores de la Información

3.3. Ondas gravitacionales:

d) Fuentes de ondas gravitacionales

- **Fuentes periódicas:**
(ondas de baja amplitud)
 - estrellas binarias
 - pulsars

- **Fuentes impulsivas (“burst”):**
 - Agujeros negros masivos (10^5 - $10^9 M_{\odot}$) como núcleos galácticos o cuasars
 - aprox. 1 cada 10 años
 - Colapso gravitatorio de estrellas en eventos supernova
 - 3-10 por siglo en la Vía Láctea o
 - 1-3 por mes en el cúmulo de Virgo



<http://www.nasa.gov>



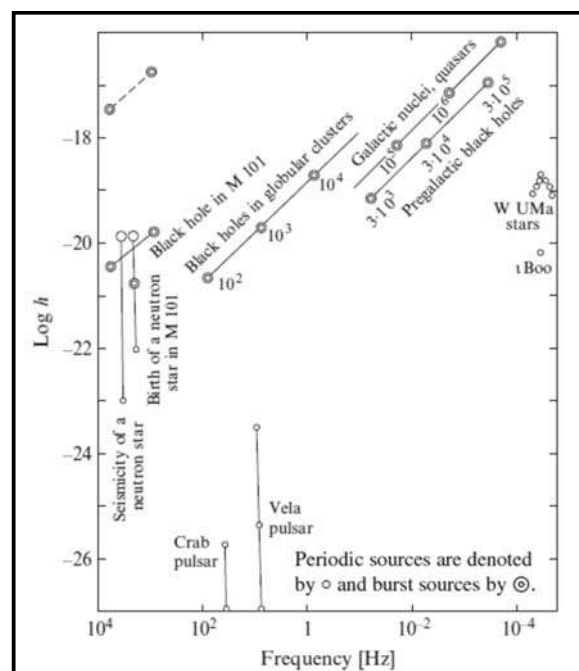
<http://www.spacetelescope.org>

3. Portadores de la Información

3.3. Ondas gravitacionales

e) Espectro de energía

La figura presenta la amplitud (h) de las ondas gravitacionales estimada a ser recibidas en la Tierra (teórica) debido a las distintas fuentes cuya ocurrencia sea mayor que una vez por mes



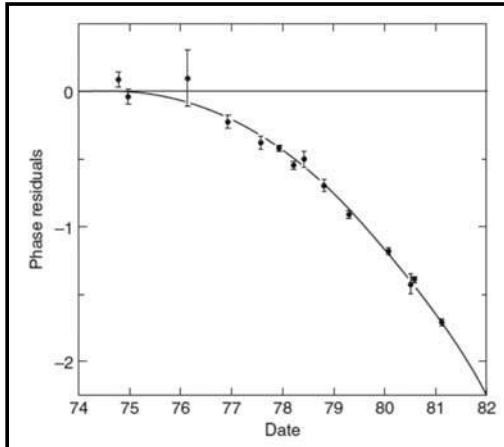
Brillet et al. 1985, Ann. Phys. 10, 201

3. Portadores de la Información

3.3. Ondas gravitacionales:

f) Detección Indirecta

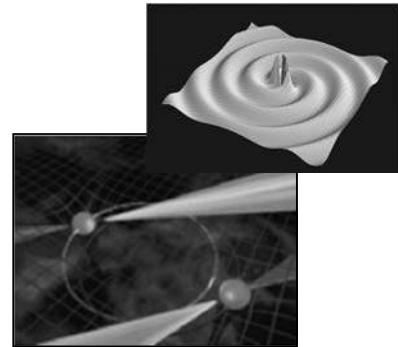
- Decaimiento del período de la órbita de un pulsar binario. El caso clásico es **PSR 1913+16**



http://en.wikipedia.org/wiki/Binary_pulsar

Variación del período a partir de la radiación emitida en 430 y 410 MHz. Los valores observados se representan con barras de error. La parábola describe la variación del período predicho por la relatividad general.

Taylor et al. 1982 ApJ. 253, 908

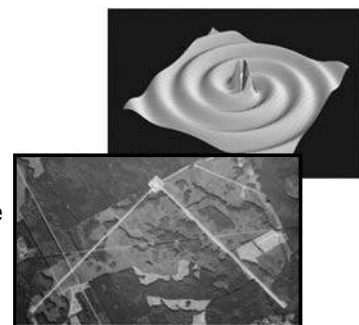
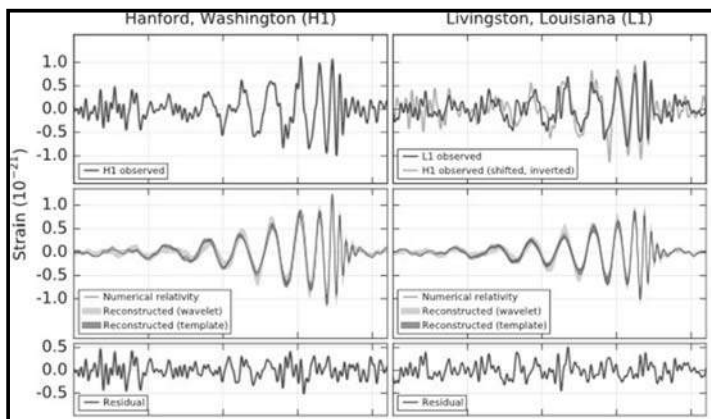


3. Portadores de la Información

3.3. Ondas gravitacionales:

f) Detección Directa

- El observatorio LIGO confirmó la primer detección de ondas gravitacionales ocurrida el **14 / 09 / 2015**



LIGO (USA)
Interferómetro de ~ 3km
El **11/02/16** anuncia la detección

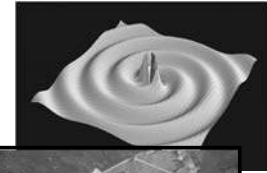
By B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46987868>

3. Portadores de la Información

3.3. Ondas gravitacionales:

f) Detección Directa

- La fuente detectada en 2015 parece ser el colapso de un par de agujeros negros de 29 y $36 M_{\odot}$ y localizados a una distancia de $400 \pm 180 Mpc$
- La energía liberada parece ser $\sim 3 M_{\odot} !!!!$
- La señal fue detectada en los dos instrumentos de LIGO con una diferencia de $6.9 ms$, lo que permite localizar la fuente en de una forma aproximada en un arco sobre la esfera celeste
- No se halló ninguna contraparte con otro instrumento



LIGO (USA)

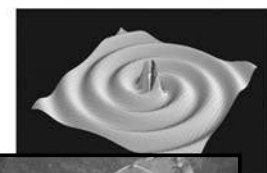
45

3. Portadores de la Información

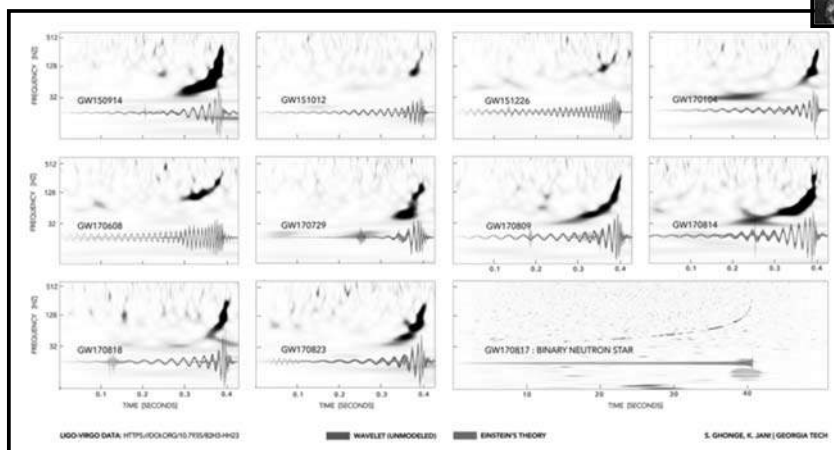
3.3. Ondas gravitacionales:

f) Detección Directa

- Actualmente existen detecciones de otros eventos, aunque ninguno tan relevante como el primero. Ver: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_gravitational_wave_observations



LIGO (USA)



Información Astrofísica I

- 1. Conceptos generales**
- 2. Astronomía Observacional**
 - 2.1. Descubrimientos observacionales**
 - 2.2. Descubrimientos guiados por la teoría**
- 3. Portadores de la Información**
 - 3.1. Fotones**
 - 2.1.1. El espectro electromagnético
 - 2.1.2. Producción
 - 2.1.3. Propagación
 - 3.2. Materia**
 - 3.3. Ondas Gravitacionales**