

Ondas gravitacionales y gravedad fuerte

Gustavo Niz
Universidad de Guanajuato

Reunión Anual
División de Partículas y Campos - SMF
Puebla, Mayo 2016.

Septiembre de 2015

Antes sólo veíamos al Universo....

Ahora, por primera vez, lo escuchamos!



Ondas gravitacionales

Historia

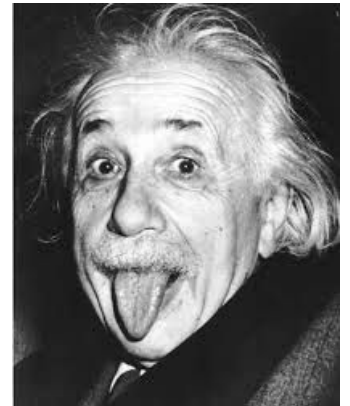
1916 Einstein las predice

1936 Einstein trata de publicar un artículo donde niega su existencia

1950-60 Argumentos teóricos en favor de su existencia

1960 Joe Weber comienza a construir detector

1969 Joe Weber anuncia primer detección

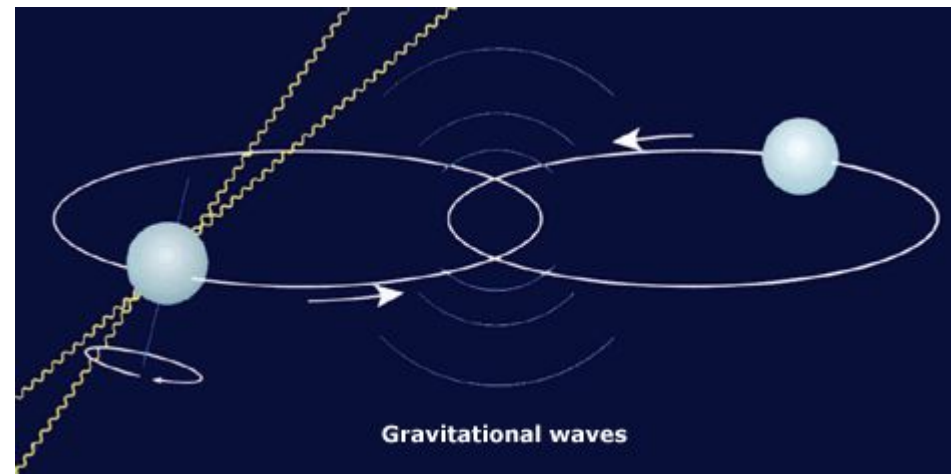
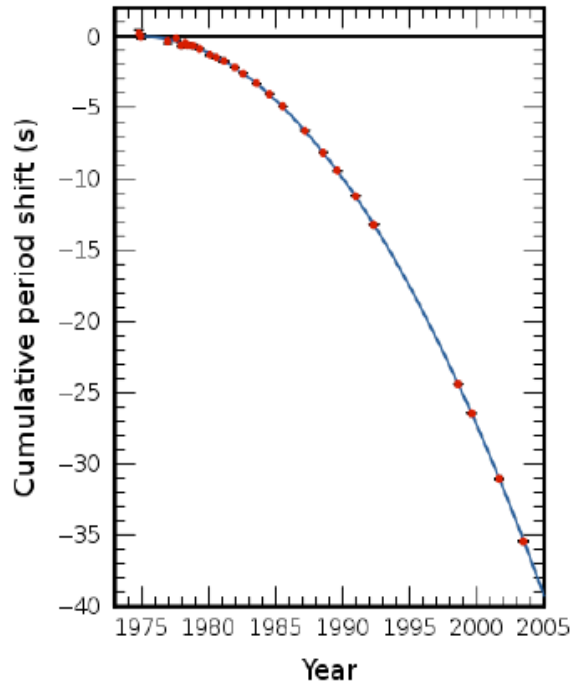


Ondas gravitacionales

Historia

1970 El experimento de Weber nunca se reproduce

1974-79 Pulsar de Hulse-Taylor



Ondas gravitacionales

Historia

1993 Nobel a Hulse y Taylor

1992 Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO)

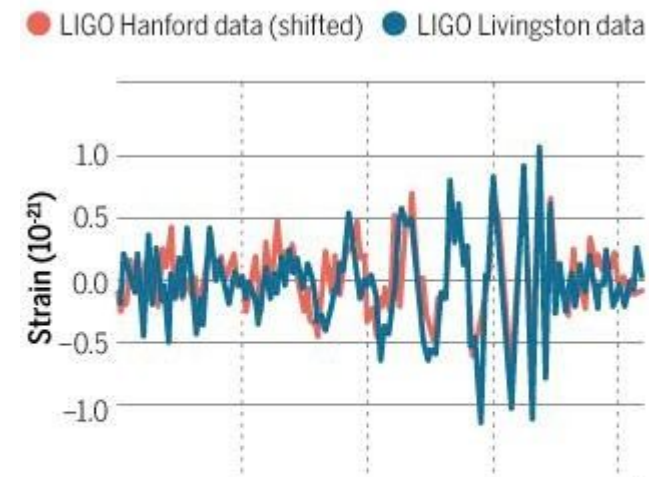
2013 Detección de modos B por BICEP 2

2014 Espectro de BICEP compatible con polvo

2015 Primera detección directa por LIGO

GW150914

2016 Nueva astronomía/cosmología?



Contenido de la plática

Teoría

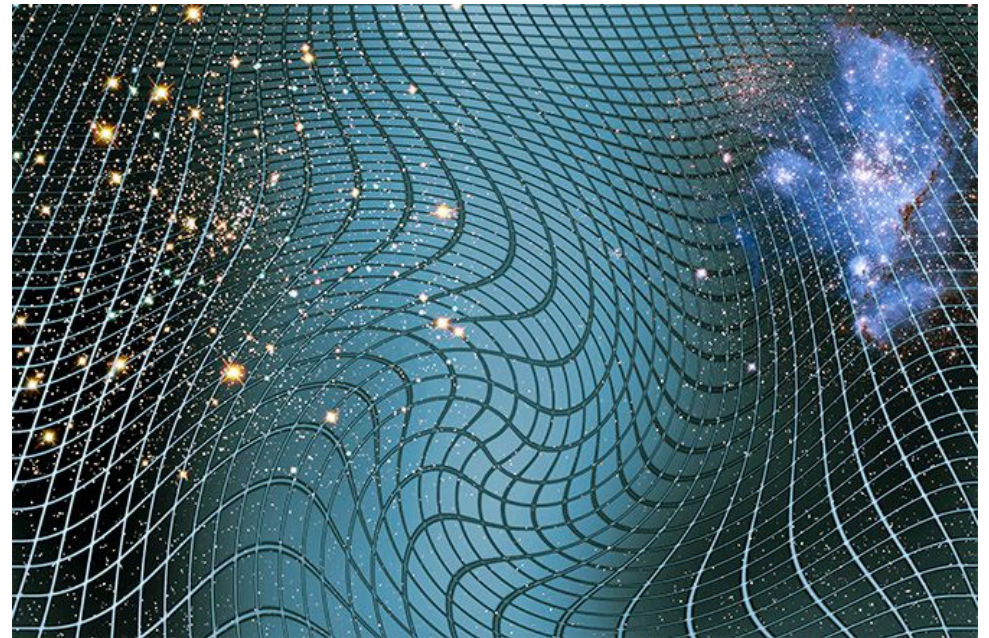
Detección indirecta

Pulsares

Radiación cósmica de fondo

Detección directa

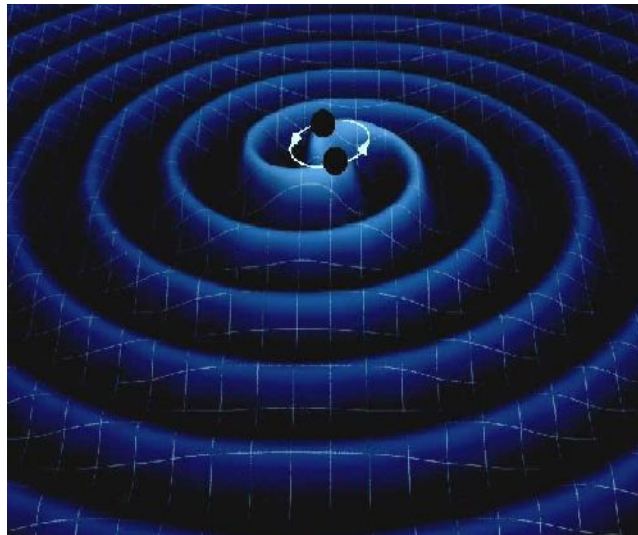
Futuro



Teoría

Si agitamos un electrón obtenemos LUZ

*Si agitamos un cuerpo masivo obtenemos
ondas gravitacionales*



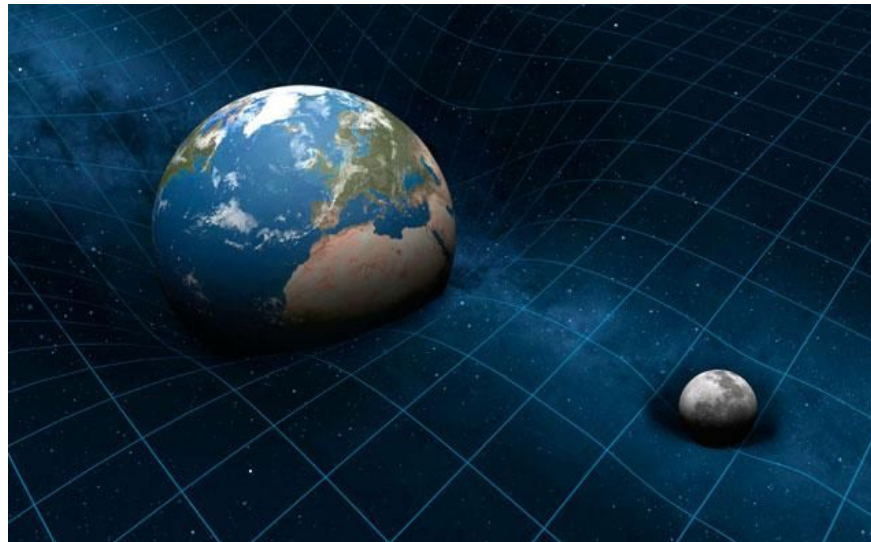
Teoría

Relatividad General – Einstein

*Geometría del
Espacio-tiempo*

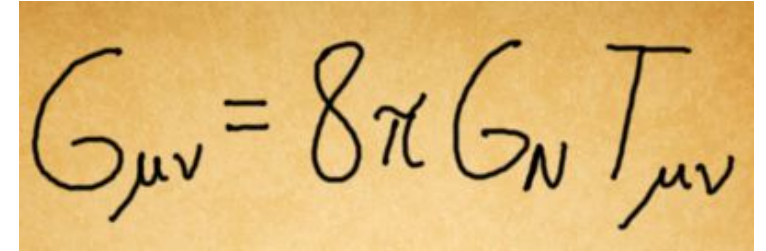
$$G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$

Materia/Energía



Teoría

Ecuaciones de campo de Einstein


$$G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$

- Ecs. diferenciales parciales de 2do orden en $g_{\mu\nu}$
 - **Lineales** en $\partial_\alpha \partial_\beta g_{\mu\nu}$
 - **No-lineales** en $\partial_\alpha g_{\mu\nu}$ y $g_{\mu\nu}$
- Consistente con partícula de espín 2 no masivo
- No renormalizable si ingenuamente se cuantiza

La onda

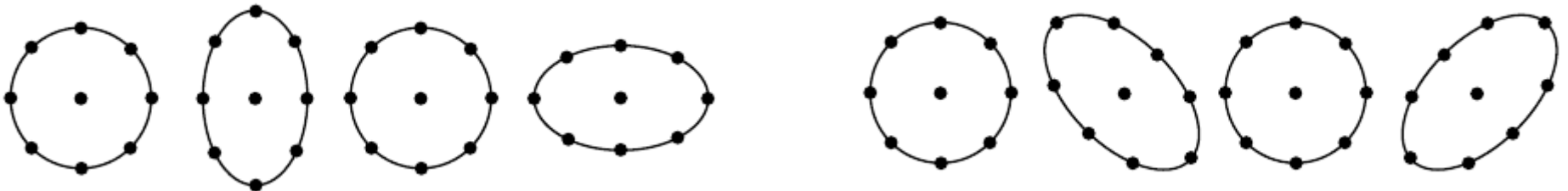
$$G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \epsilon h_{\mu\nu}$$

En vacío
Orden lineal

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = 0$$

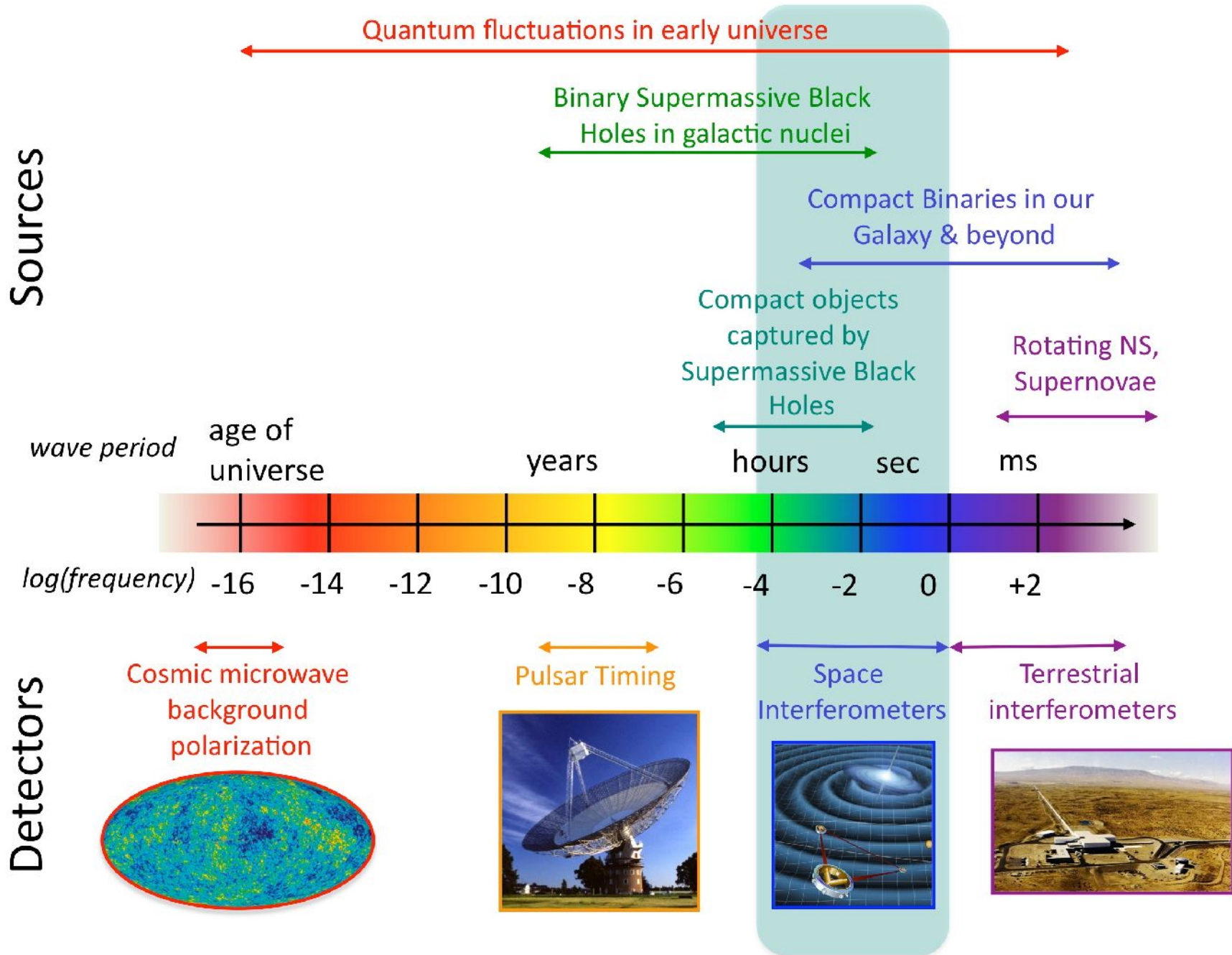
$$h_{\alpha\beta}(t, z) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_+(t-z) & f_\times(t-z) & 0 \\ 0 & f_\times(t-z) & -f_+(t-z) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



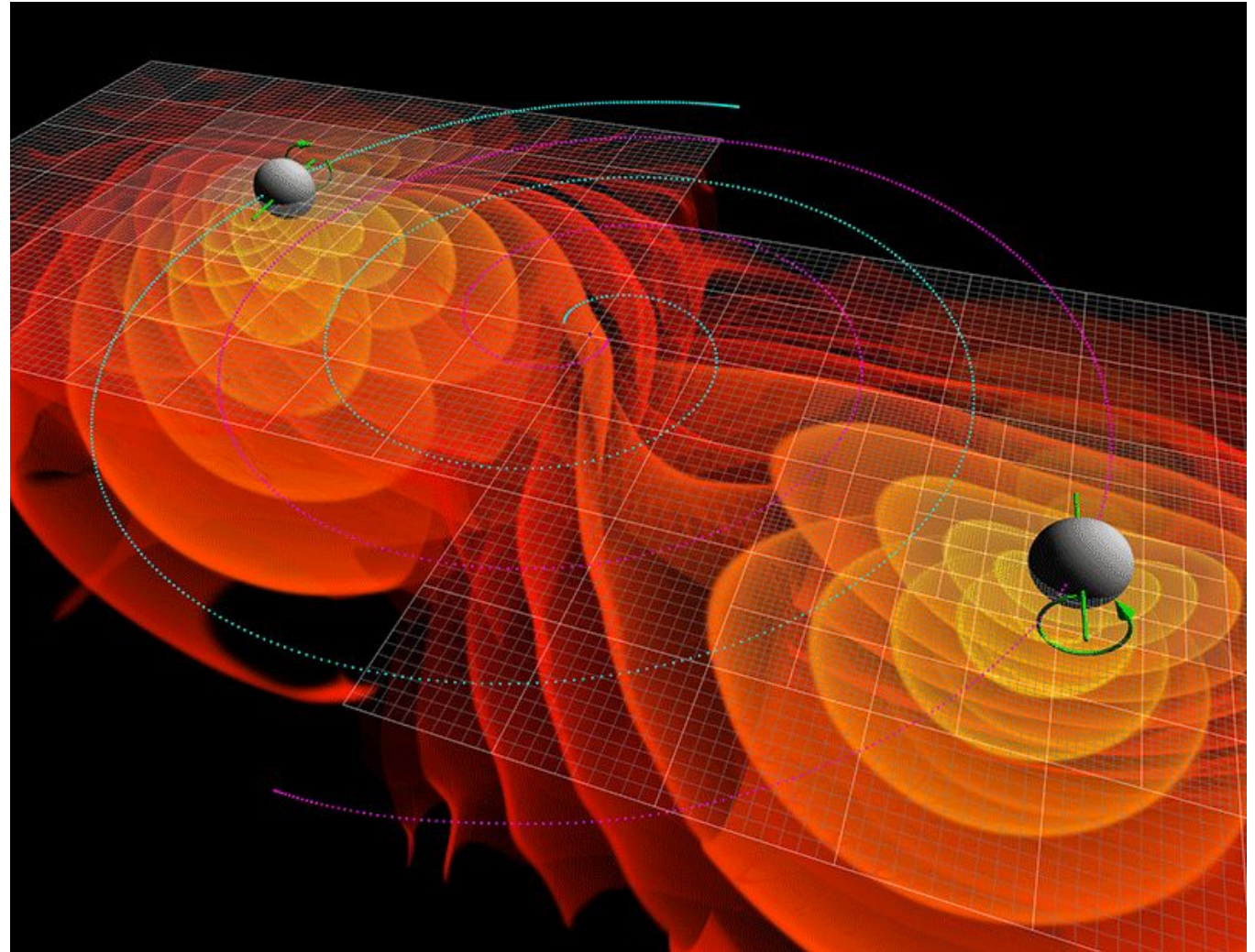
La onda

- Se propagan a la velocidad de la luz
- Transversales a dirección de movimiento
- Dos polarizaciones (x y +)
- Llevan energía
- Pequeña amplitud (detectabilidad?)
- Afectan la distancia relativa entre partículas de prueba (detectores!)

El espectro de ondas gravitacionales



La fuente



Cuadrupolo

La fuente

Mediador

Distribución de carga (masa) para producir ondas grav.

$$\phi$$


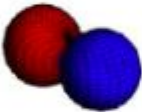
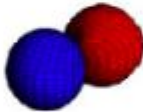
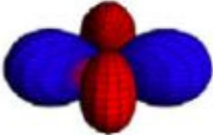


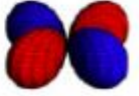
$s=0$

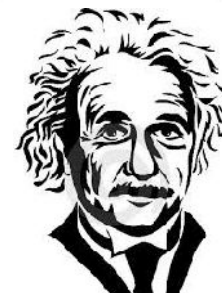
$$A^\mu$$

$s=1$

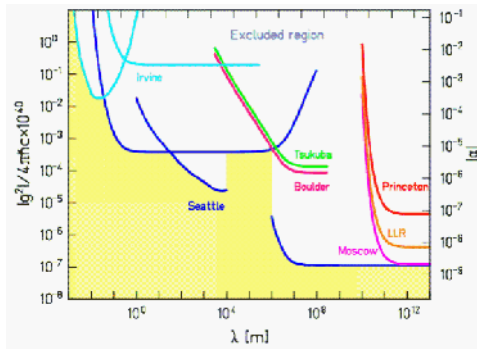
$$g_{\mu\nu}$$

$s=2$

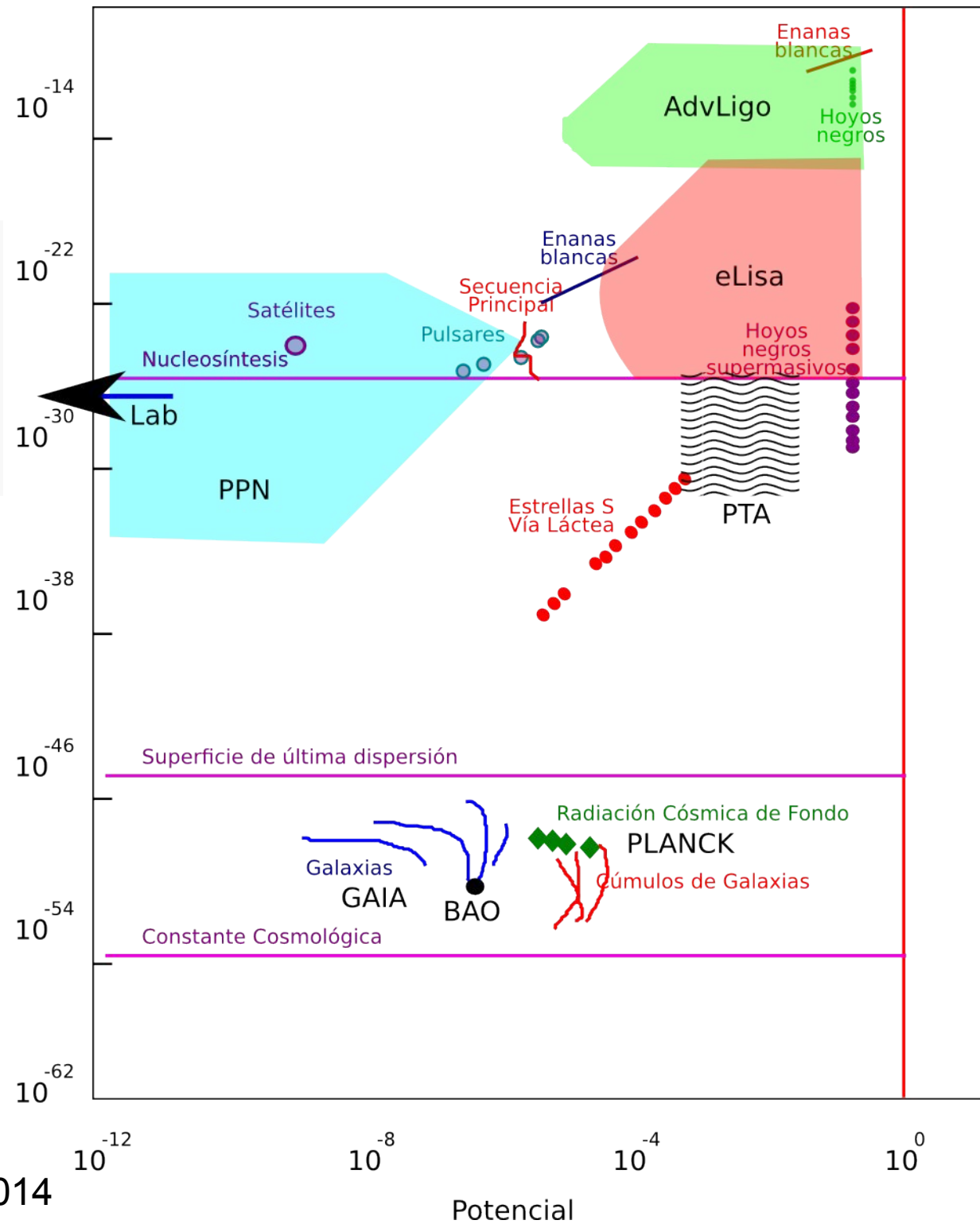
					
	$m=0$		$m=0$		
$m=0$				$m=0$	



¿Dónde buscarlas?



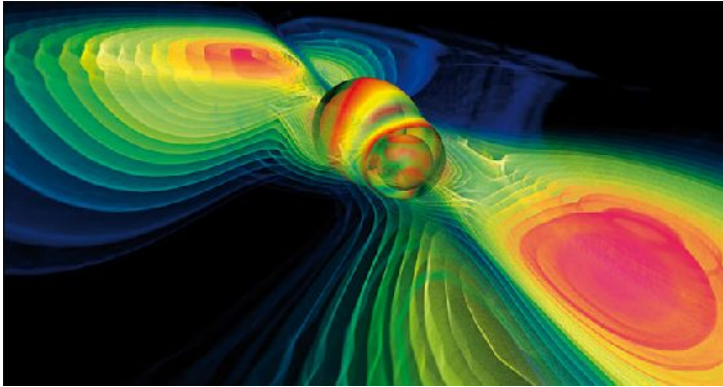
Curvatura (cm^{-2})



Psaltis et al, 2014

Potencial

Campo fuerte



Fuentes con campos gravitacionales **fuertes** producen ondas que pueden ser más fácilmente detectadas

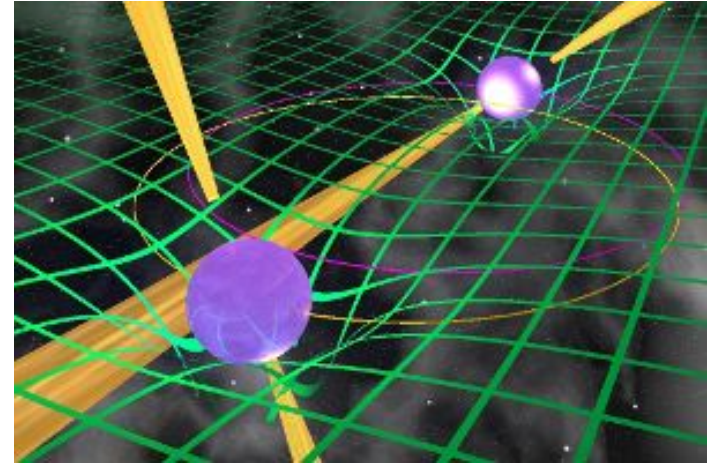
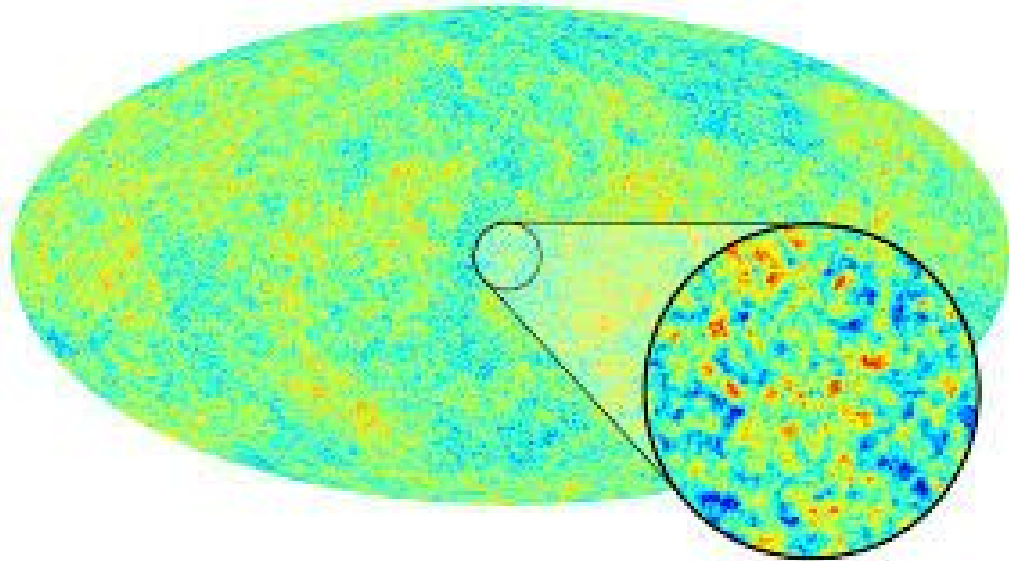
Puerta hacia las interacciones gravitacionales

Ejemplo $h = \kappa^{-1}(g - \eta), \Gamma$

$$L_{HE} = \kappa^{-2} \sqrt{-g} R(\Gamma)$$

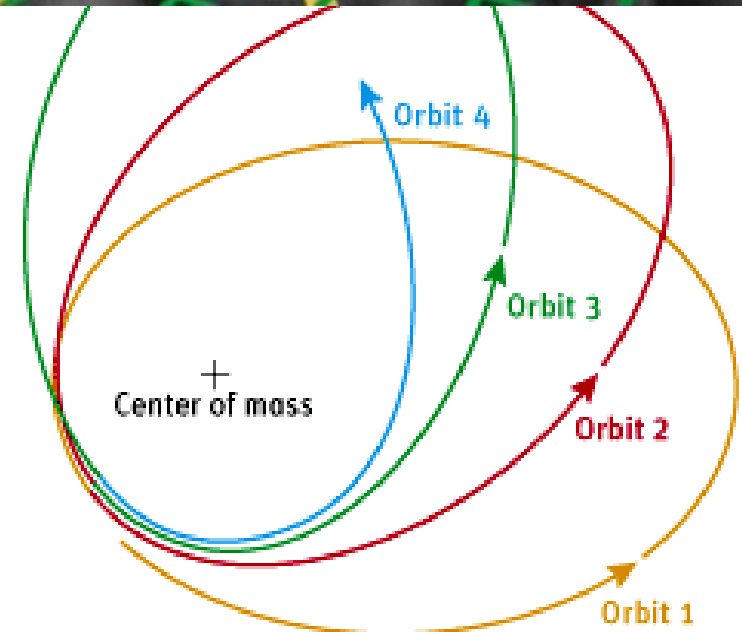
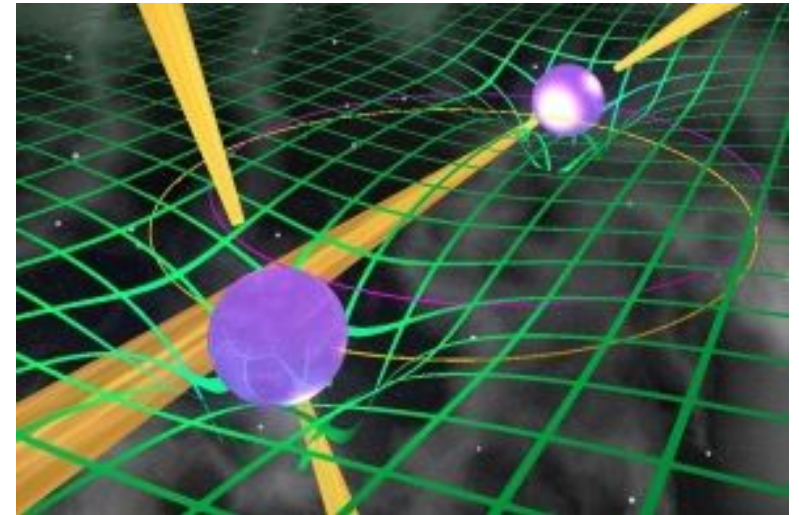
$$\sim \kappa^{-1} \eta \partial \bar{\Gamma} + (h \partial \bar{\Gamma} + \eta \bar{\Gamma} \bar{\Gamma}) + \kappa h \bar{\Gamma} \bar{\Gamma}$$

Detección indirecta



Pulsares binarios

- **Pulsares:** Estrellas de neutrones magnetizadas que rotan rápidamente
- Emiten pulsos desde milisegundos a segundos (faros)
- Campos gravitacional fuerte → Ondas
- Mediciones de precisión (ej. 30000 más preciso que la precesión de Mercury)

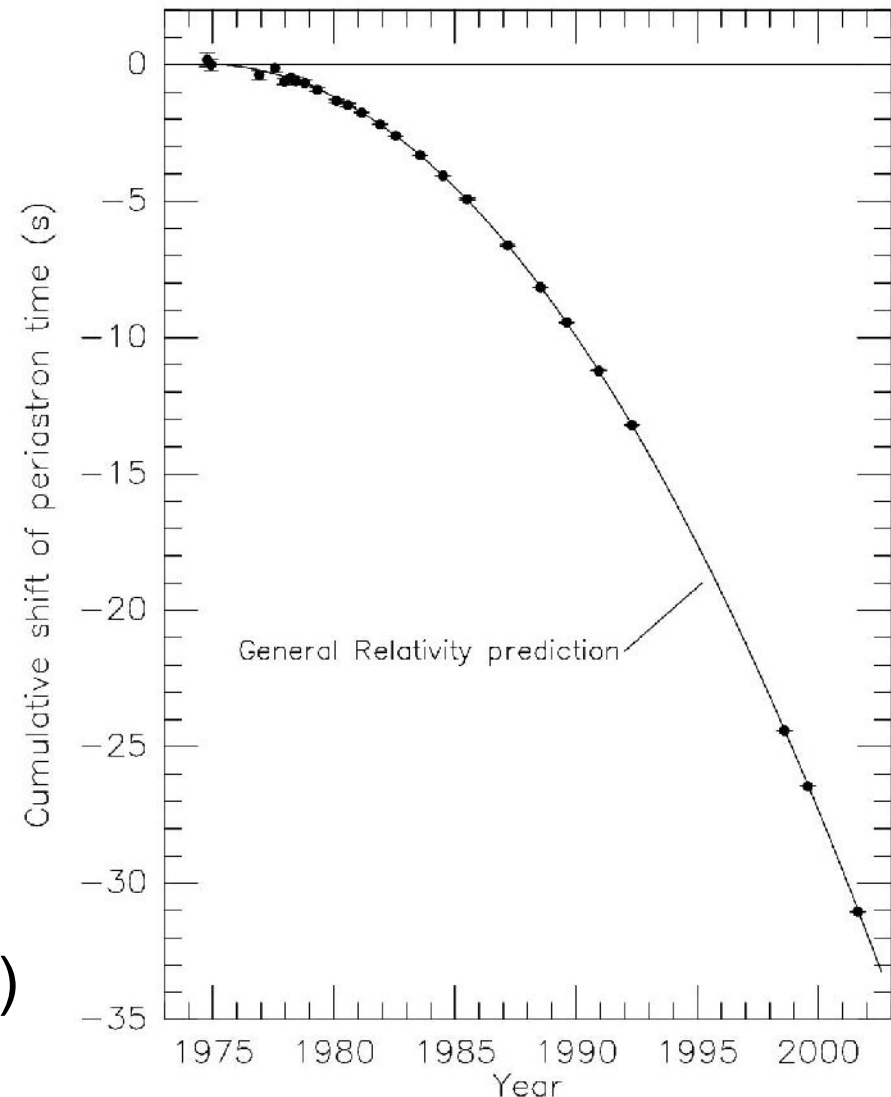


Pulsares binarios

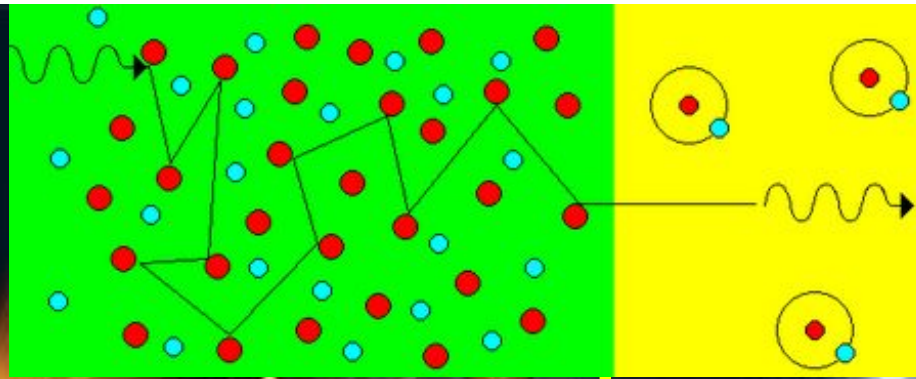
Russell Alan Hulse y
Joseph Hooton Taylor



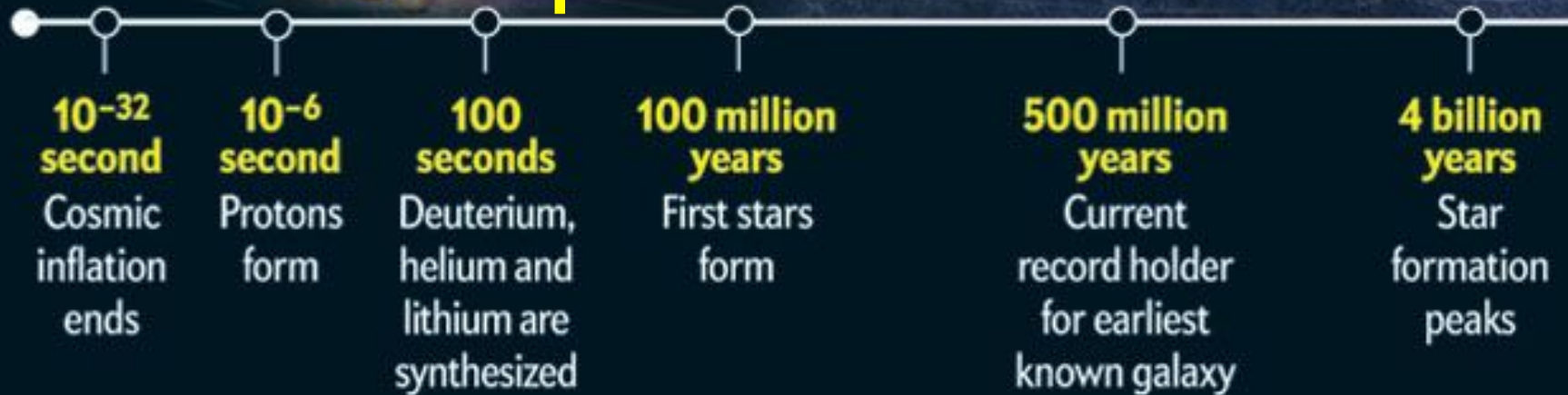
- **Asumiendo Relatividad General!**
 - Reducción de la órbita del pulsar binario PSR B1913+16 (desde 1970) es consistente con la emisión de ondas gravitacionales
- (Premio Nobel a Hulse y Taylor en 1993)
- No hay emisión mono o dipolar (de acuerdo con el cuadrupolo de RG)



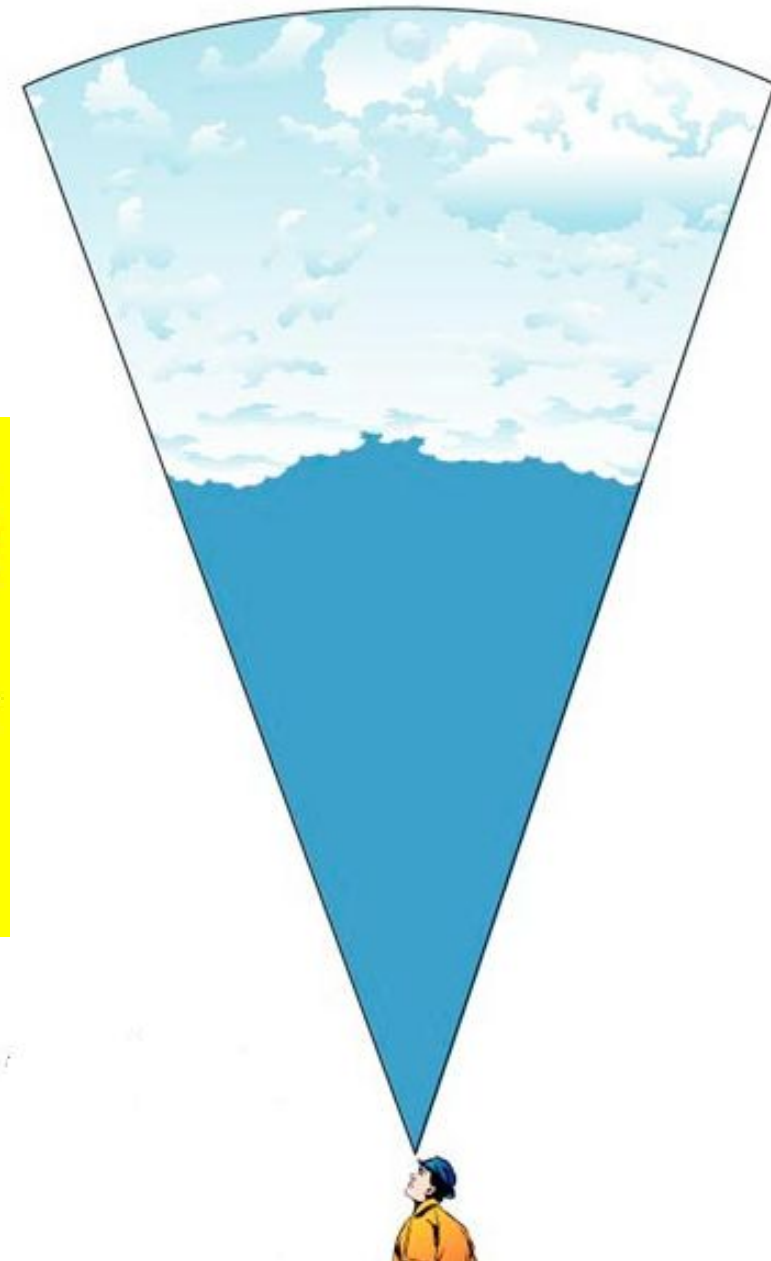
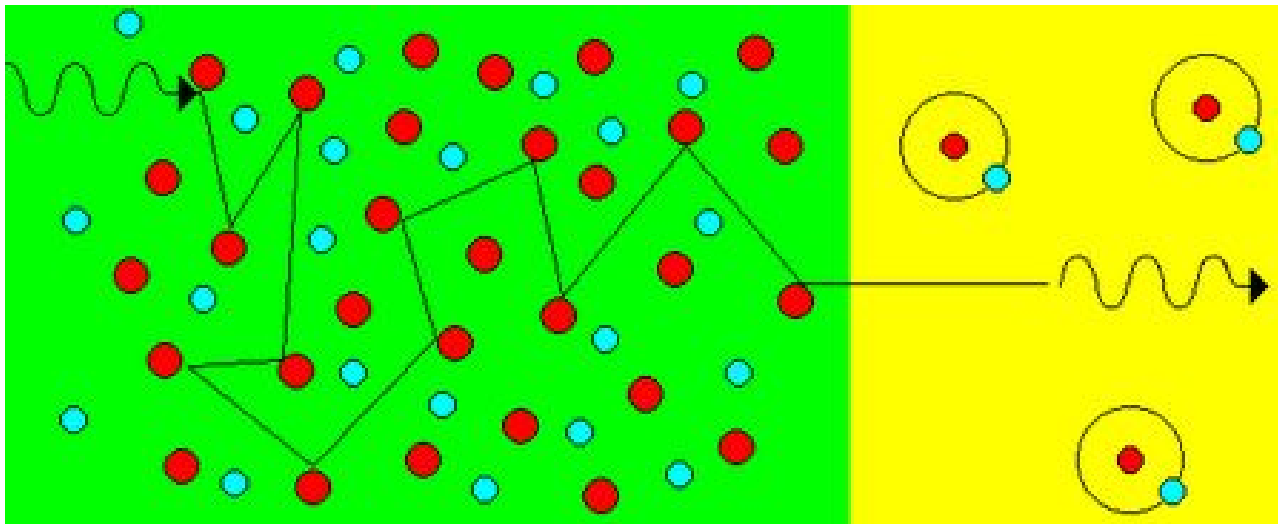
Radiación cósmica de fondo (CMB)



300,000 years



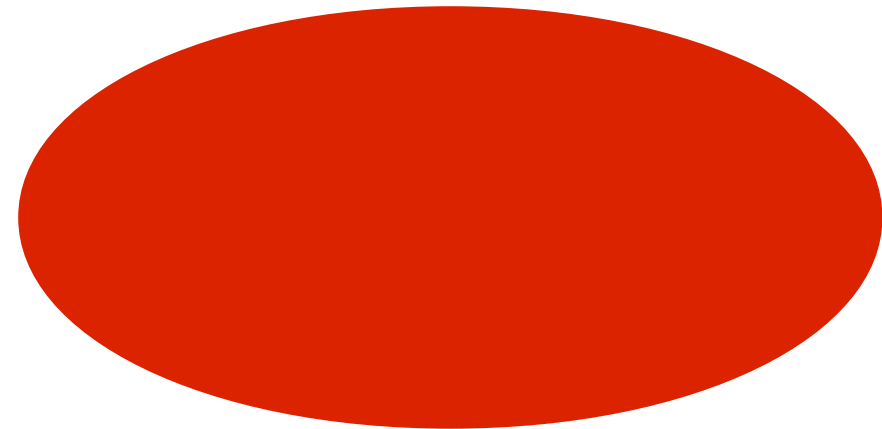
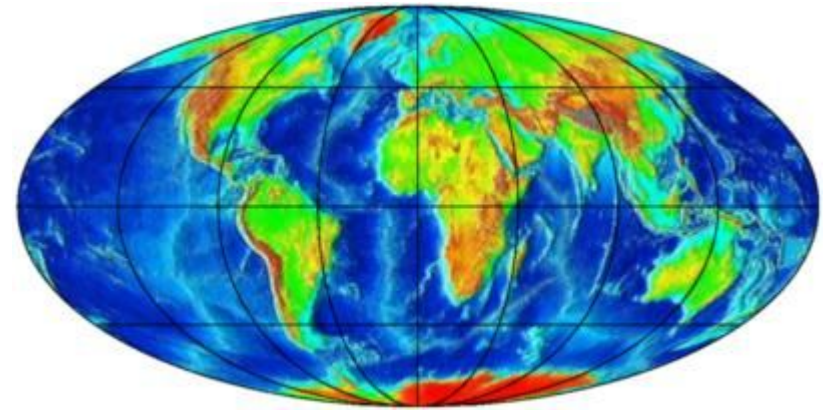
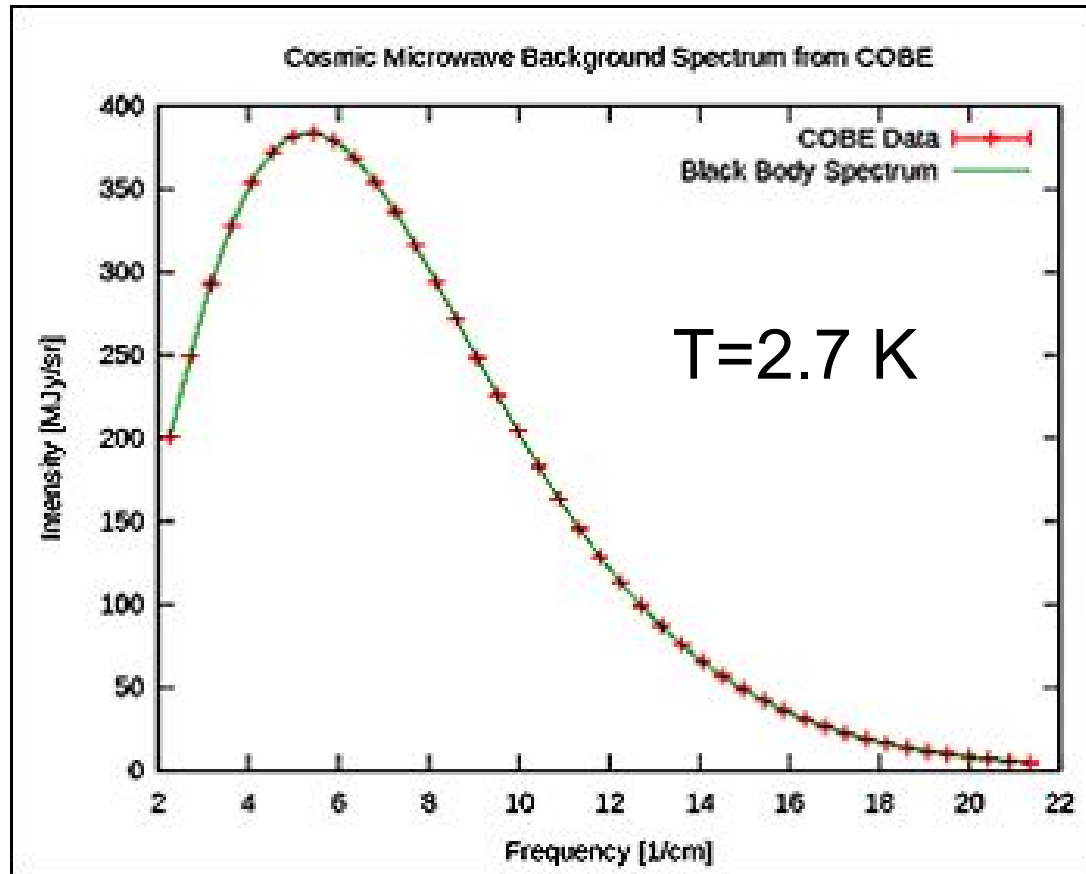
Radiación cósmica de fondo (CMB)



CMB

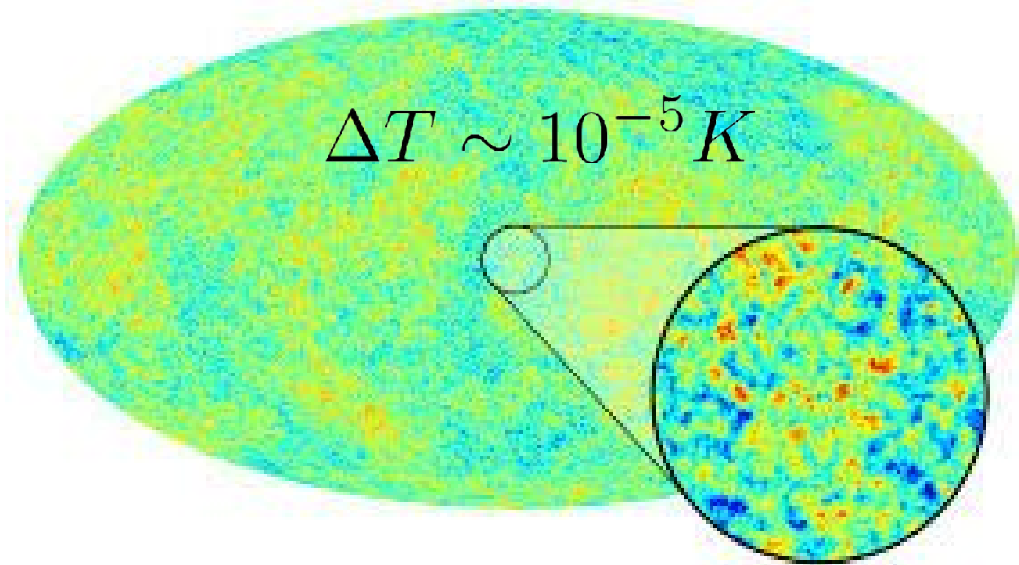
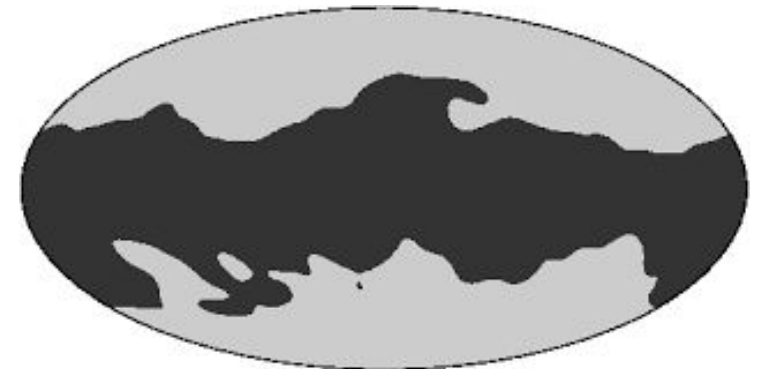
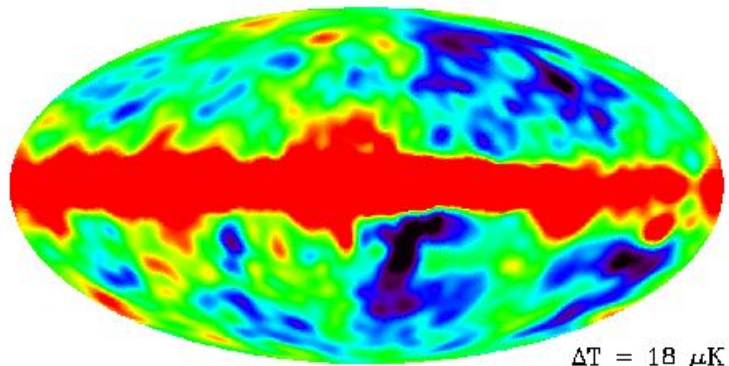
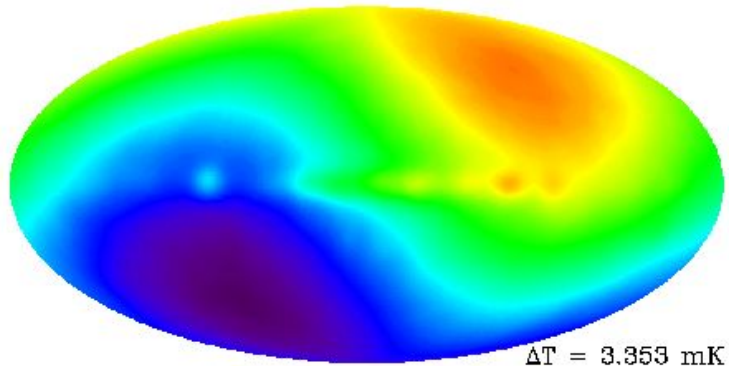
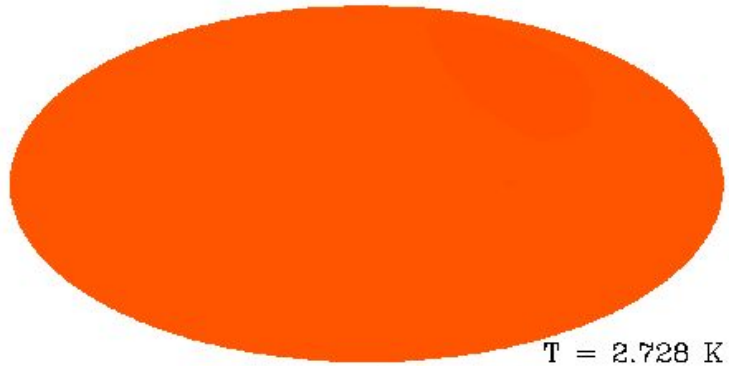
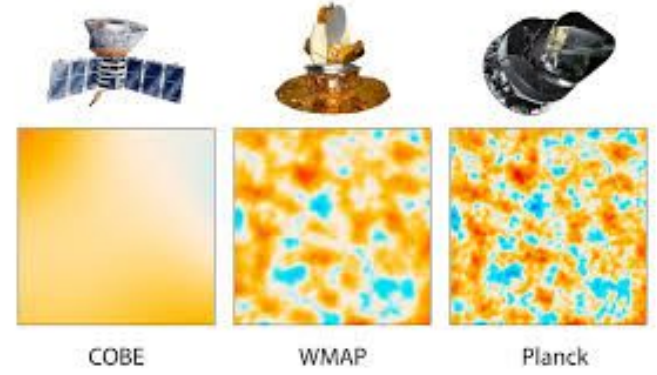


$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$



Error 1K

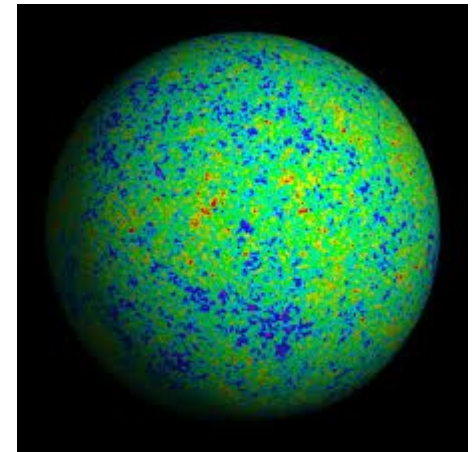
CMB



CMB

Conveniente escribir las anisotropias en esféricos armónicos

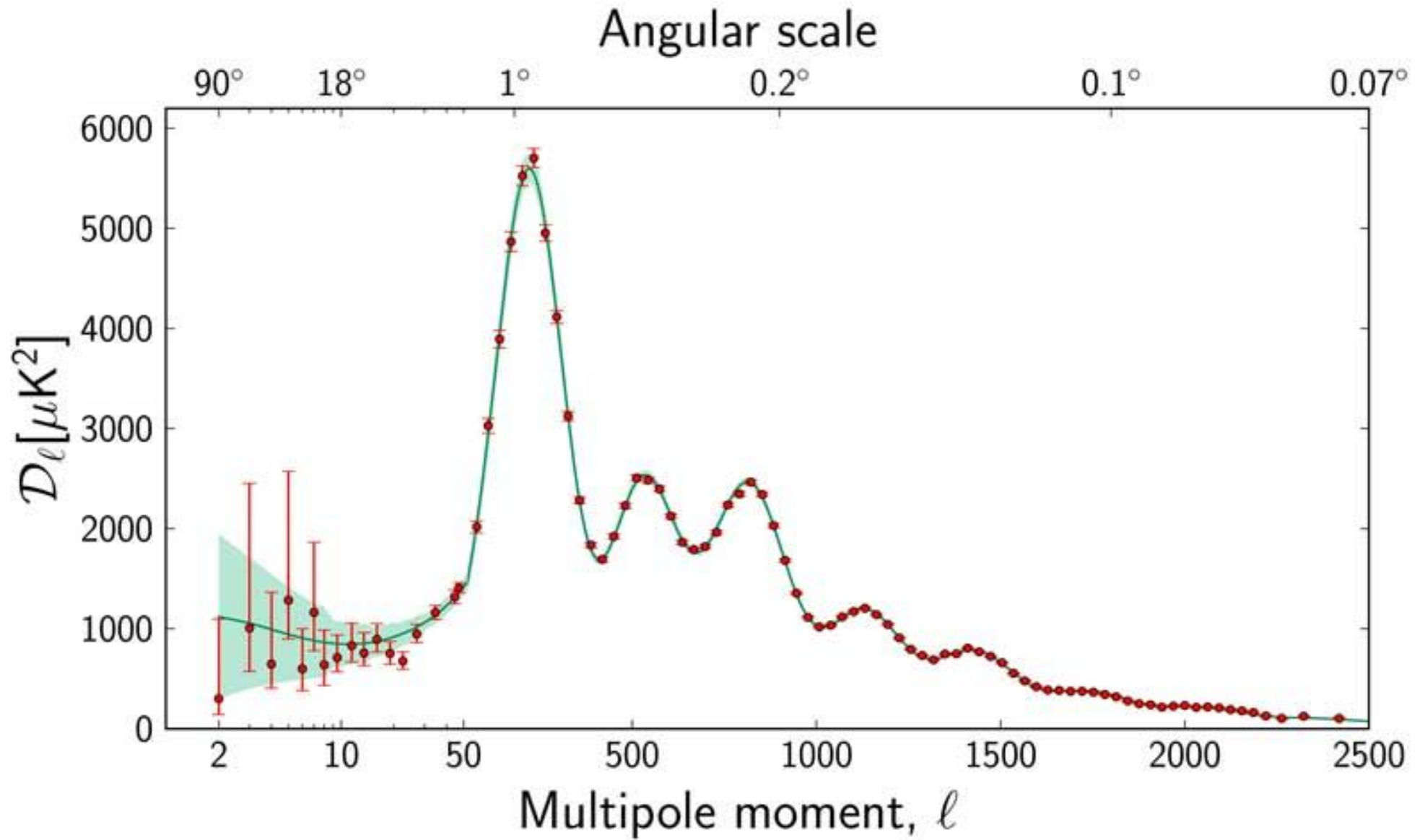
$$\frac{\Delta T}{\bar{T}} = \sum_{lm} T_{lm} Y_{lm}$$



El espectro de potencias \mathcal{D}_l se define

$$\langle T_{lm} T_{l'm'} \rangle = 2\pi \mathcal{D}_l \delta_{ll'} \delta_{mm'}$$

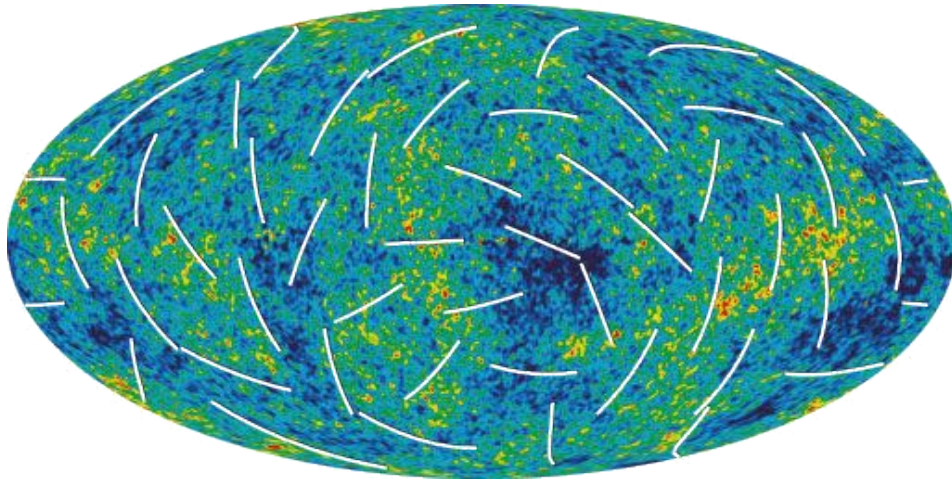
CMB



Modos E y B

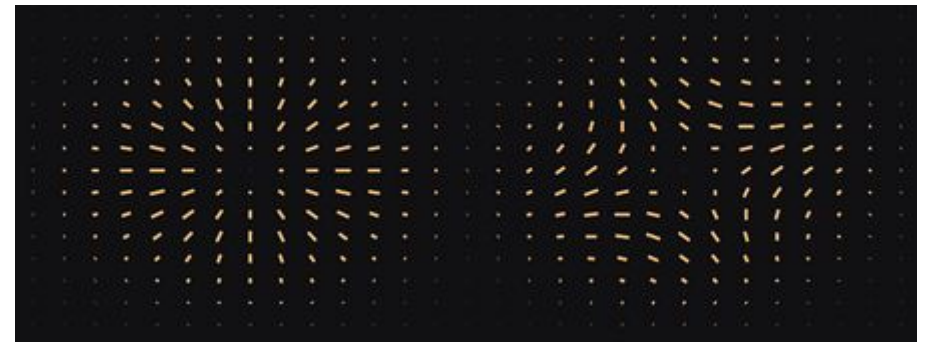
Polarización

Equivalentes al campo
Eléctrico y Magnético



E

B

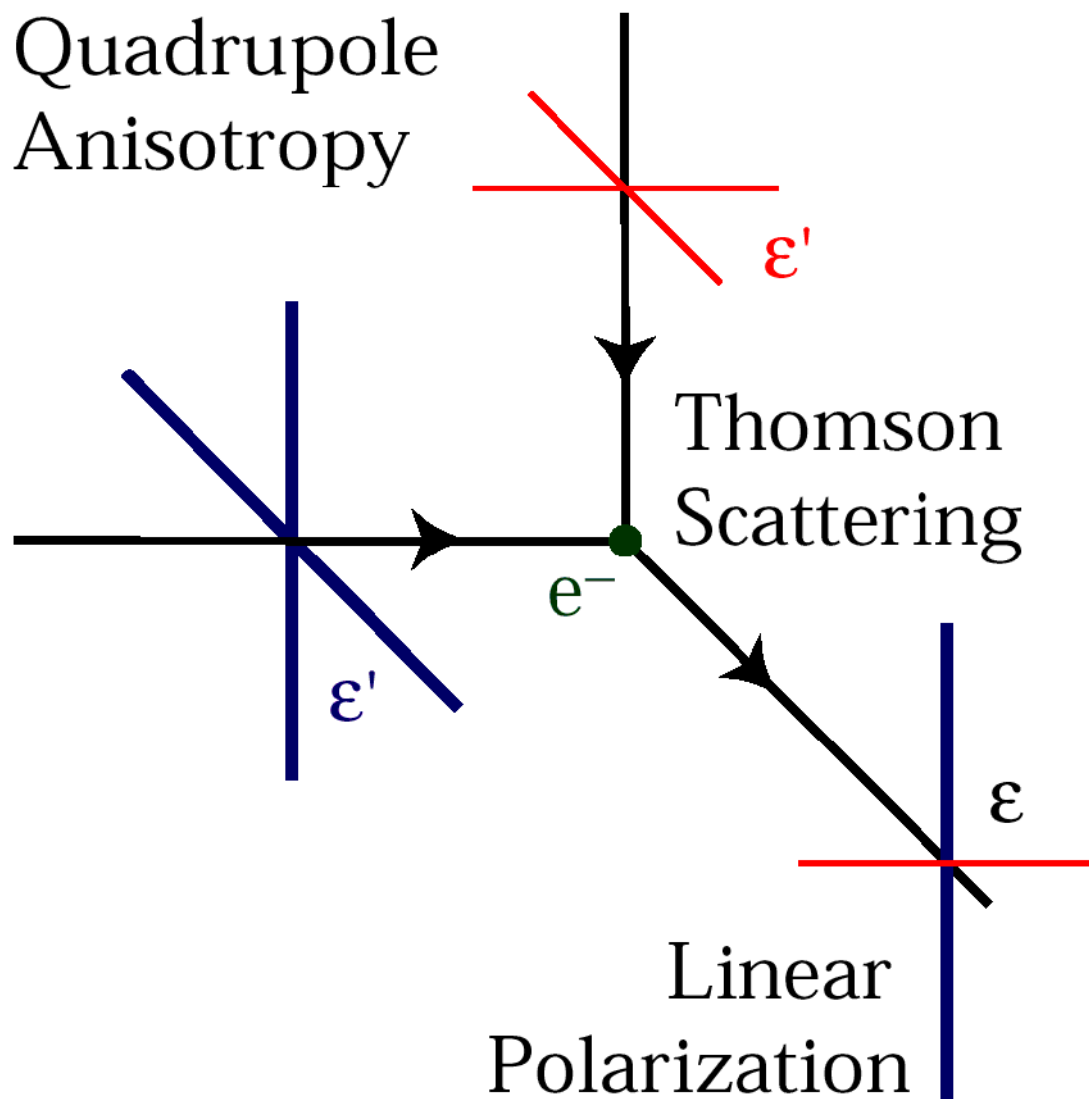


Divergencia



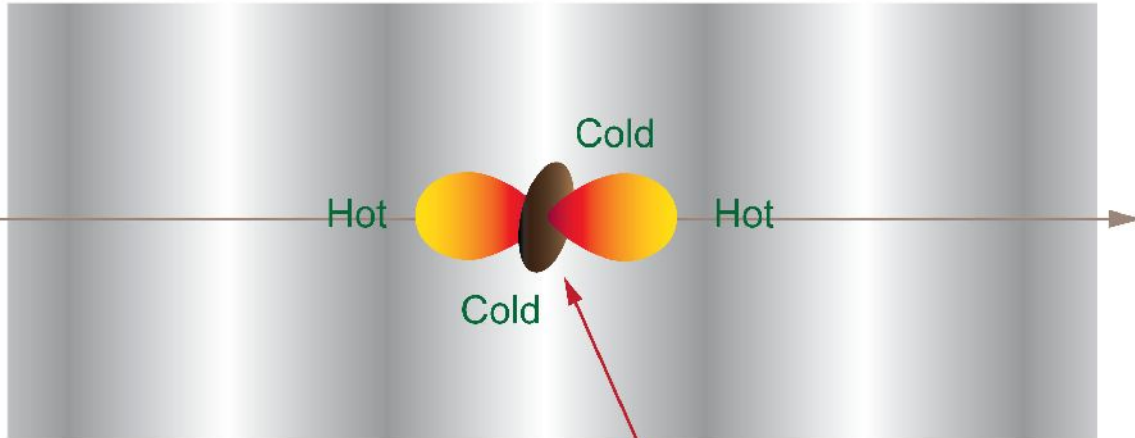
Rotacional

Modos E y B

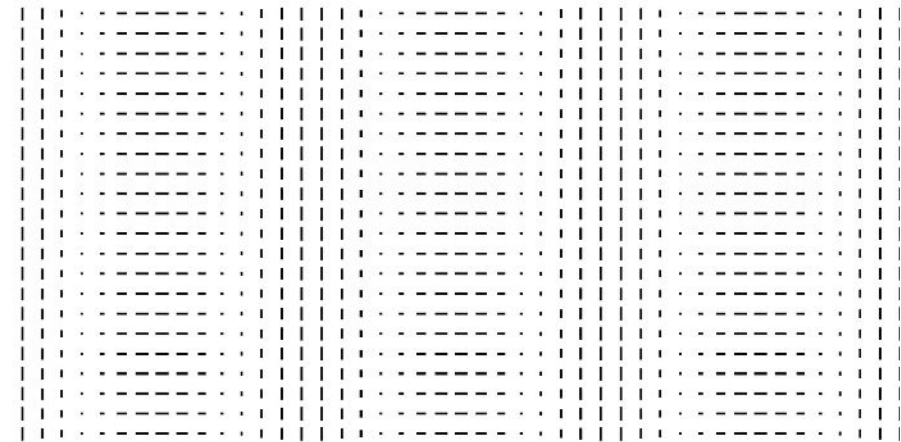


Modos E y B

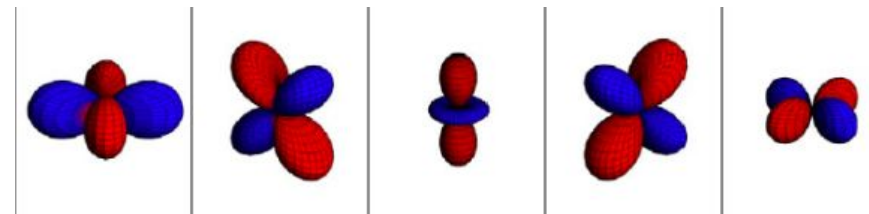
Density Wave



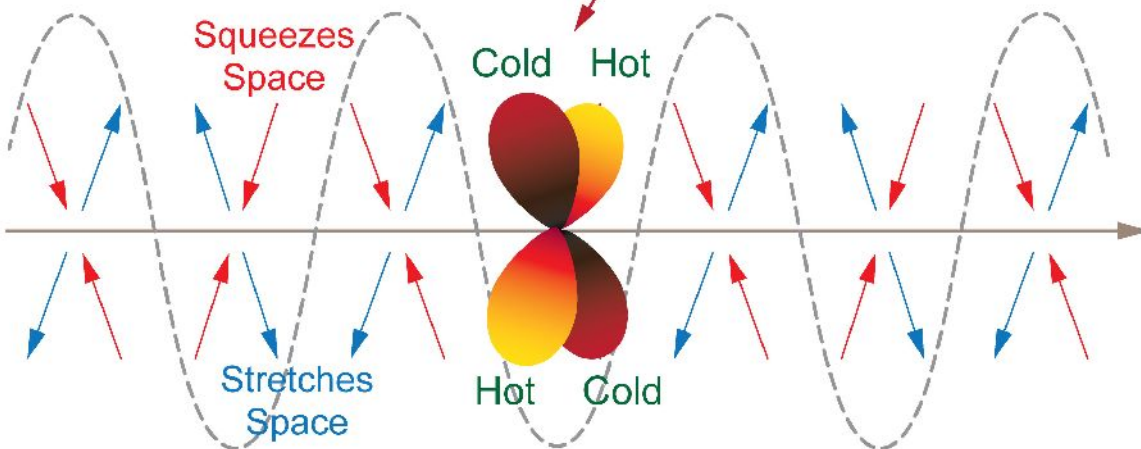
E-Mode Polarization Pattern



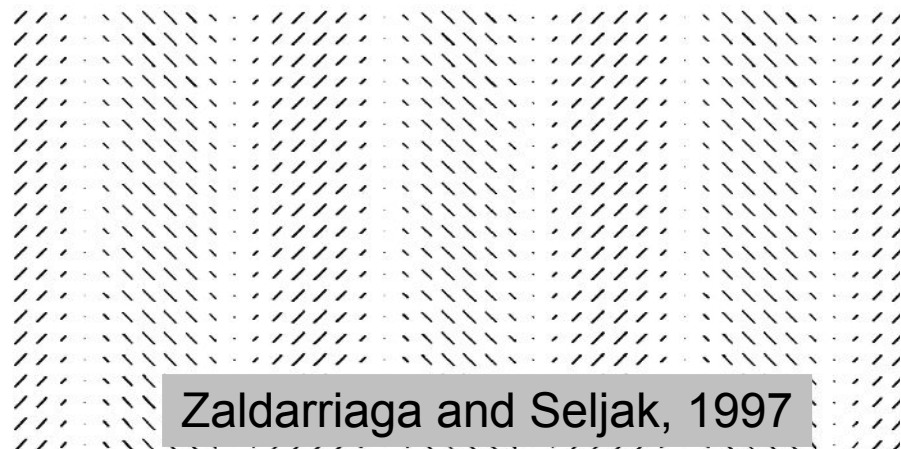
Temperature Pattern Seen by Electrons



Gravitational Wave



B-Mode Polarization Pattern

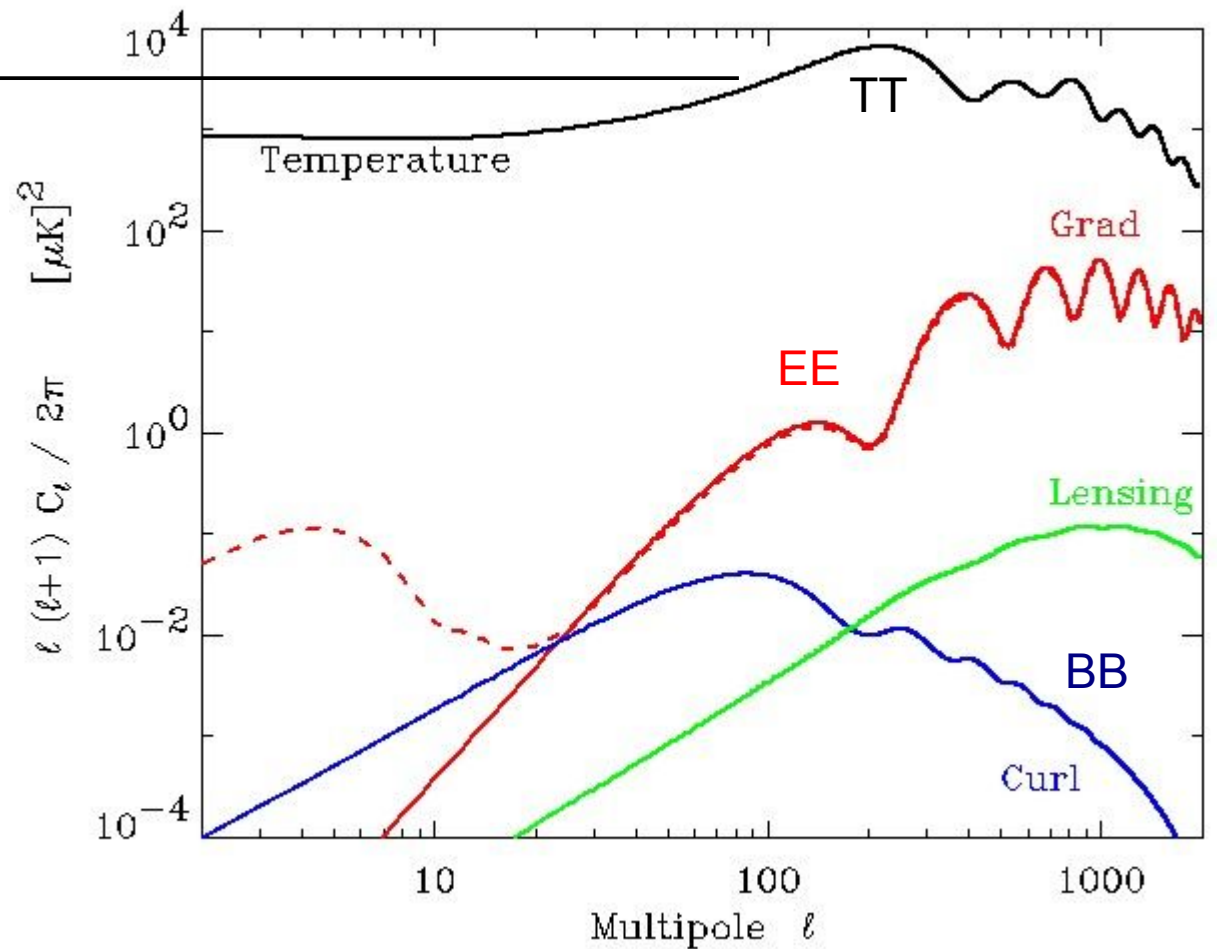
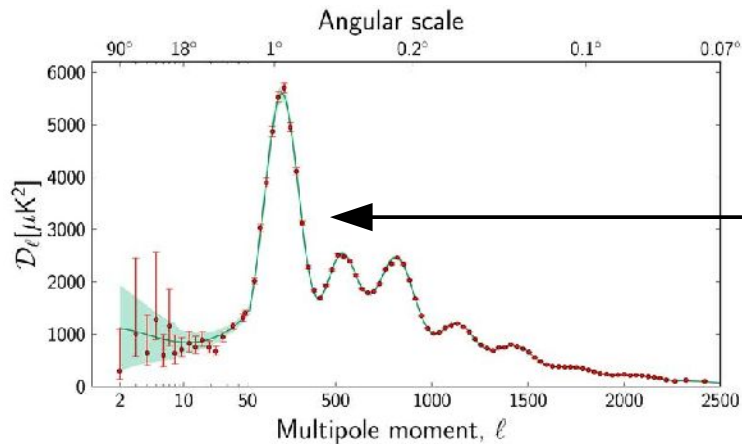


Zaldarriaga and Seljak, 1997

Modos E y B

$$\langle T_{lm} T_{l'm'} \rangle = 2\pi \mathcal{D}_l \delta_{ll'} \delta_{mm'}$$

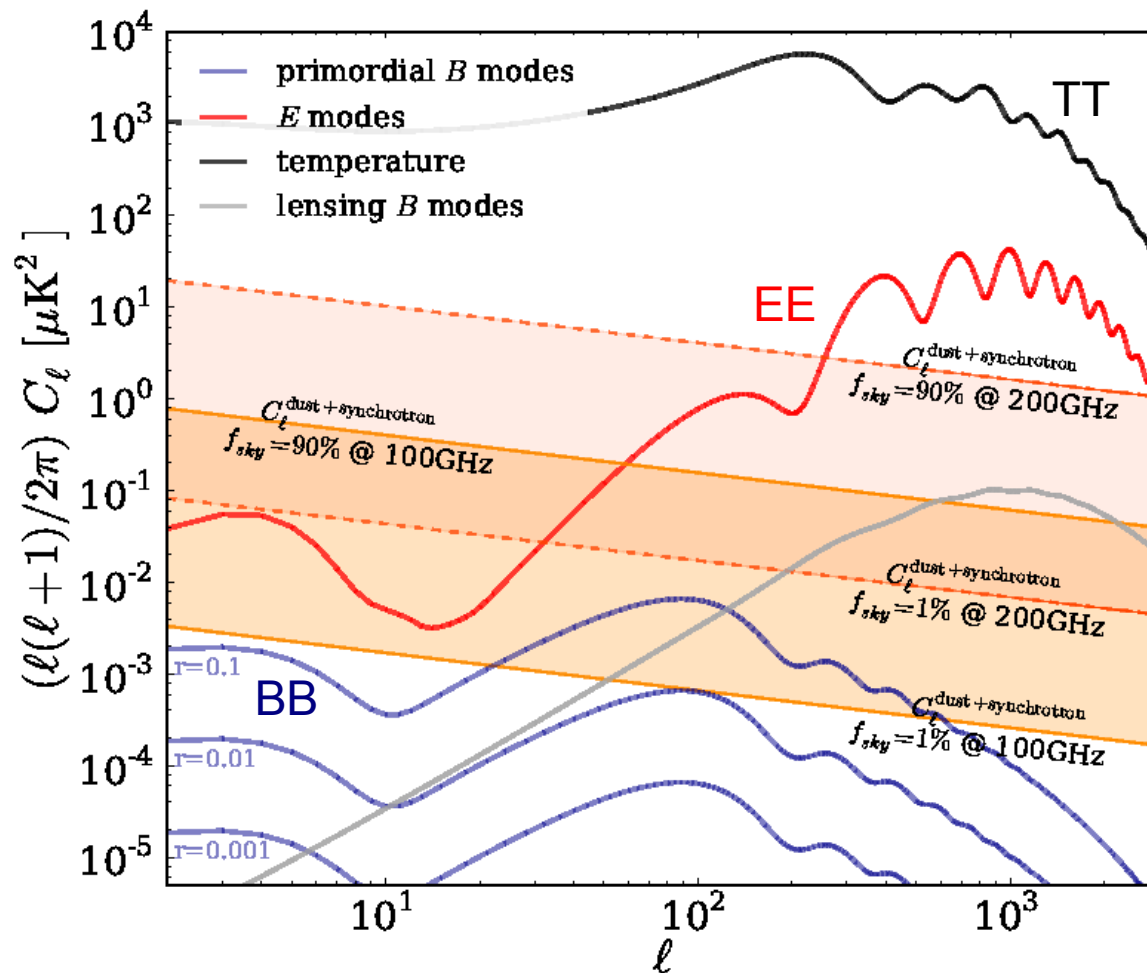
Minúscula señal!!!



Modos E y B

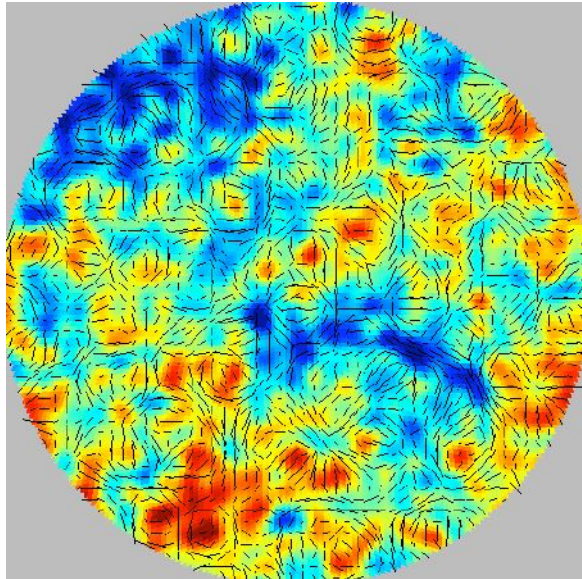
Amplitud depende en la “fracción primordial de ondas gravitacionales”

$$r = \frac{\text{Tensor}}{\text{Escalar}}$$

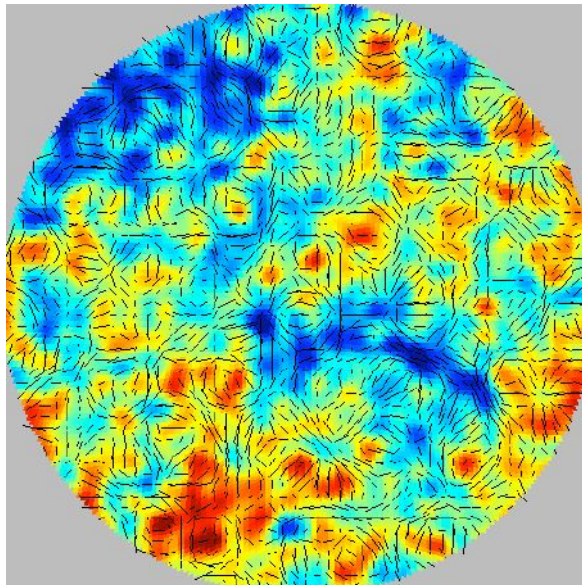


Modos E y B

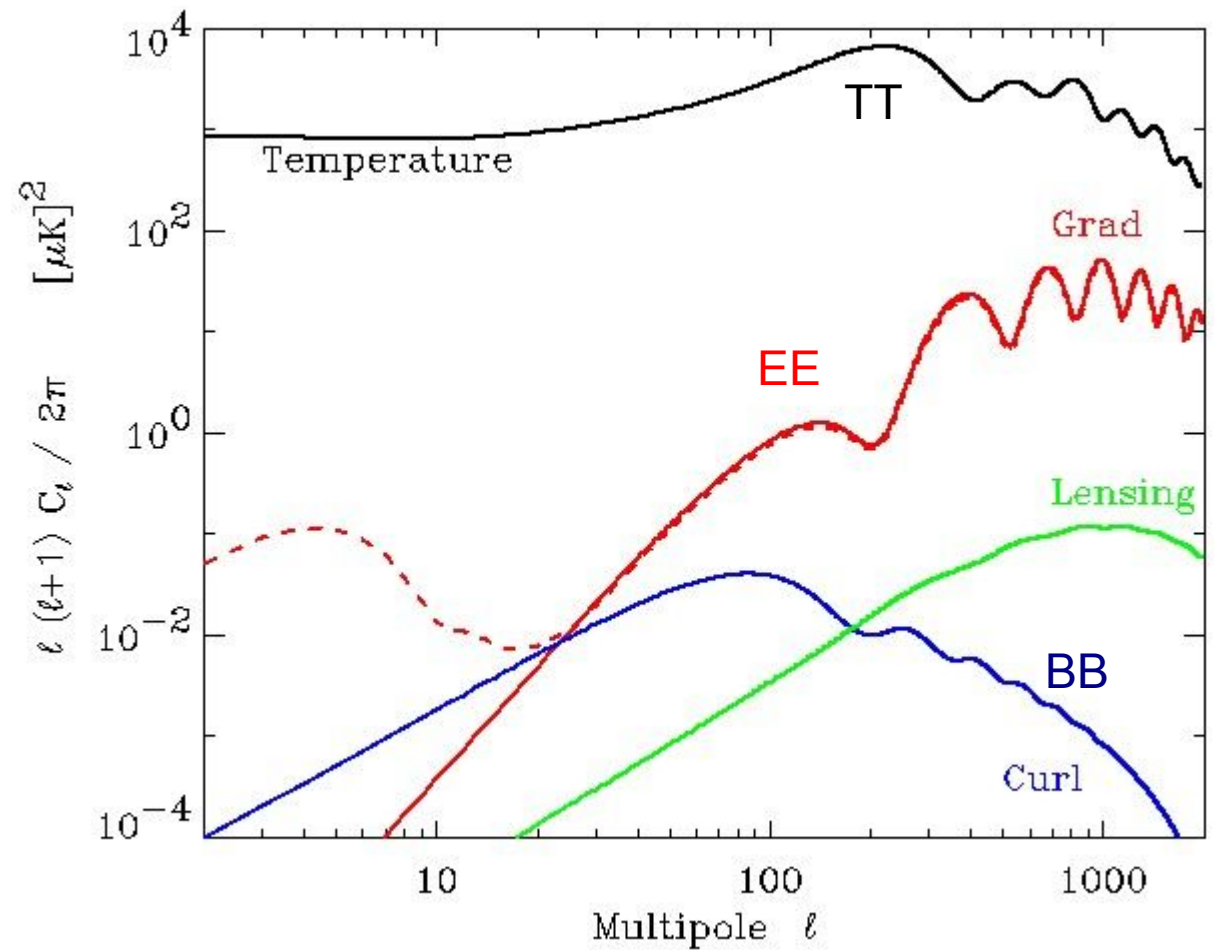
r=0



r=0.3



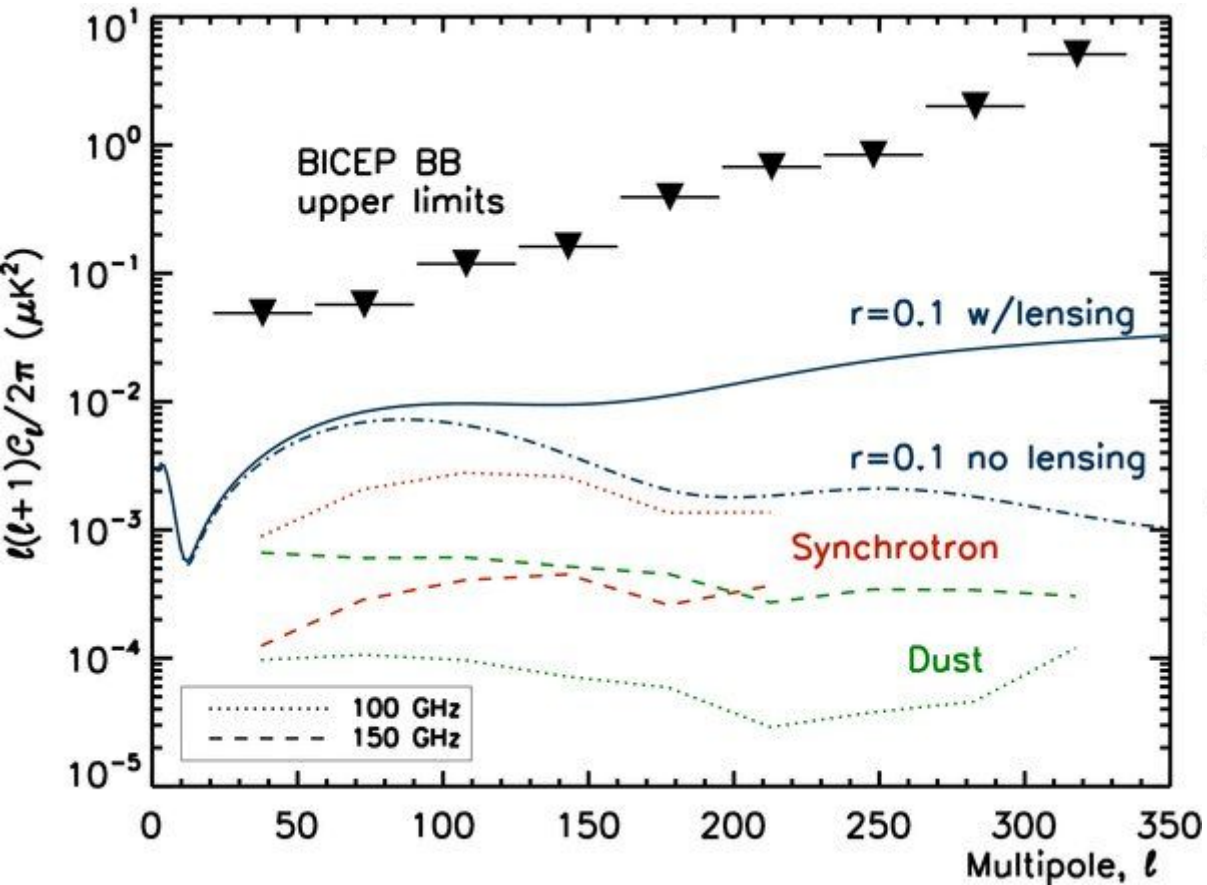
Minúscula señal!!!



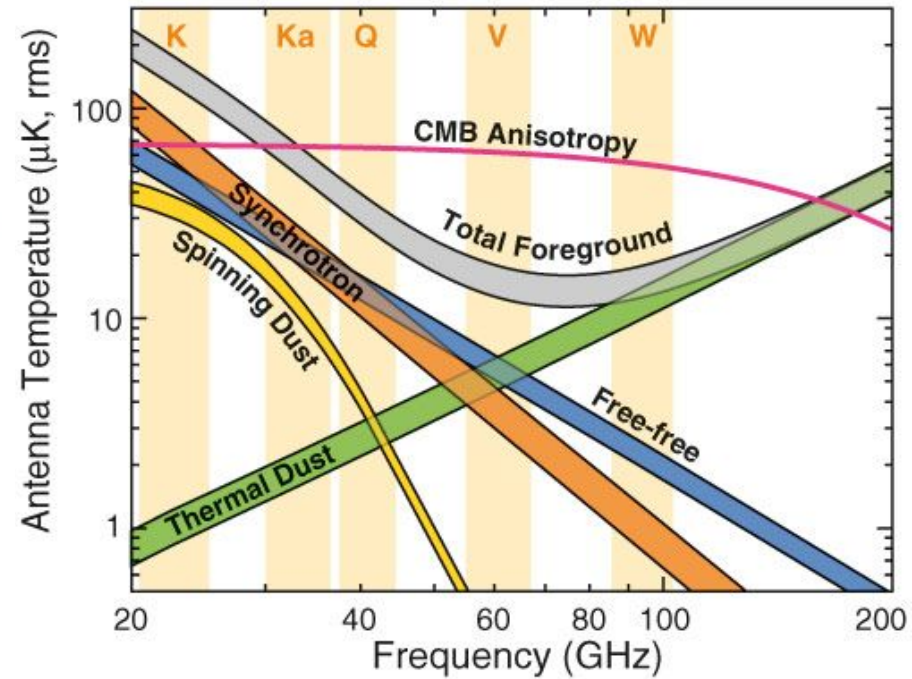
Modos E y B

Modos B

Antes de BICEP 2

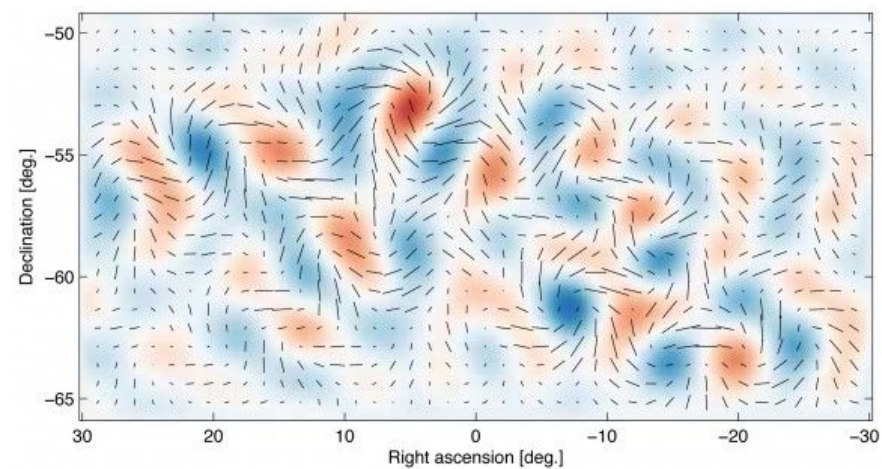
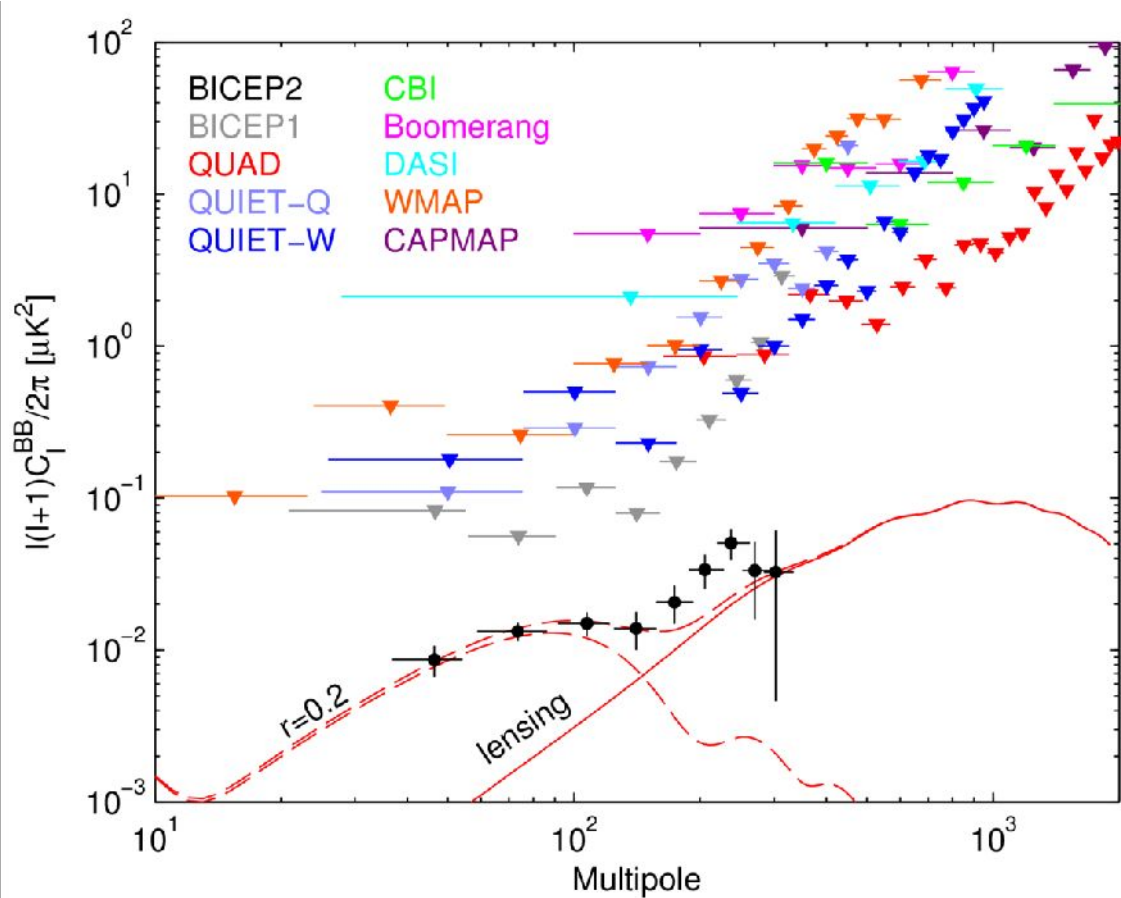


Contaminación



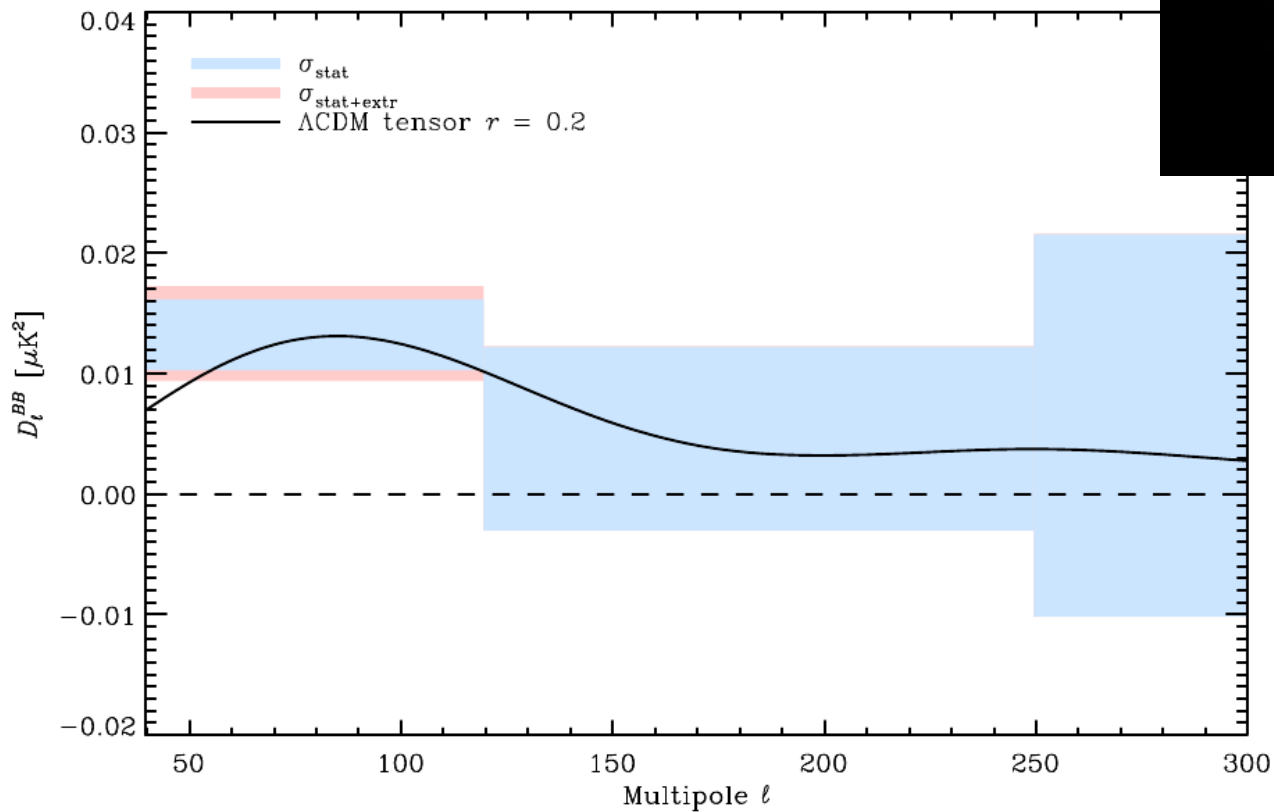
Modos E y B

BICEP 2, 2014



BICEP2 bites the dust...

Polvo visto por
Planck 2014

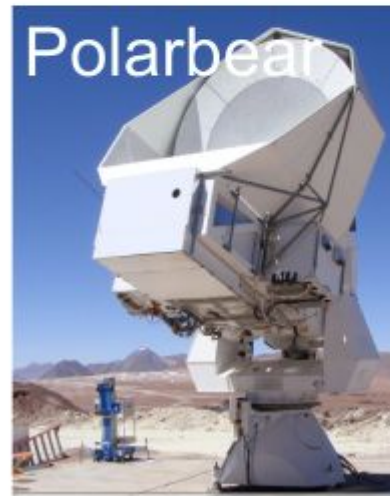
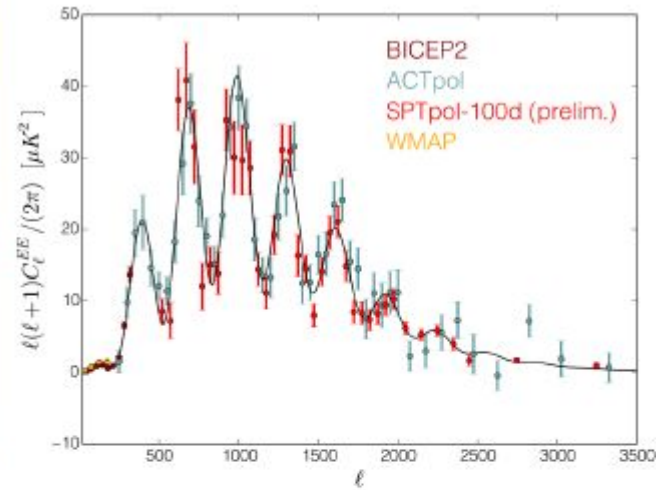
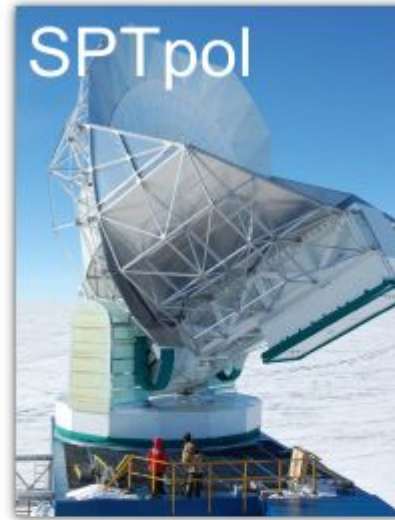


En un futuro

SPTpol
ACTpol
Polarbear
ABS
CLASS

Globos
EBEX
Spider
PIPER

$r=0.01$



Modos B

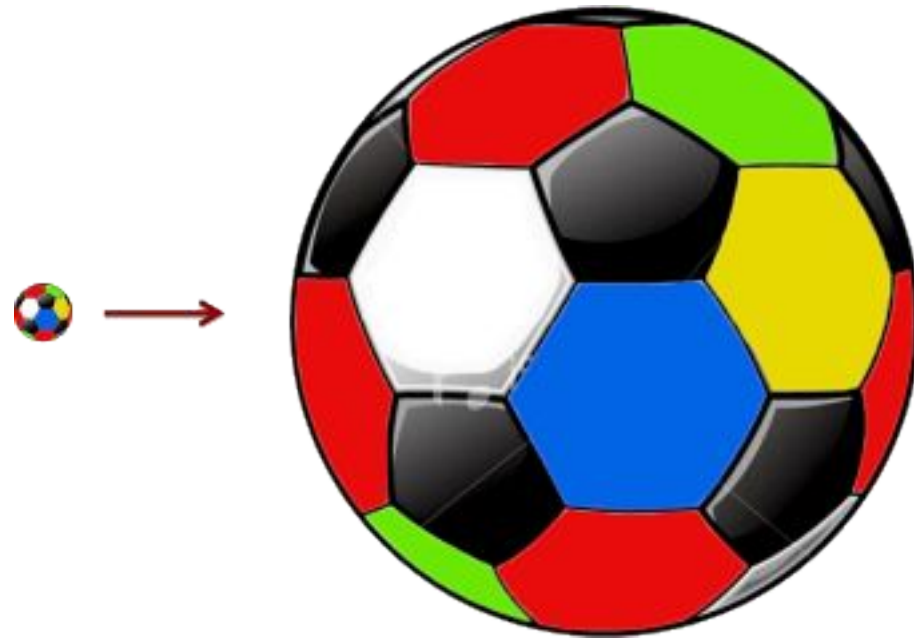


Puerta a
Gravedad cuántica

Inflación

“fase de aceleración exponencial” del Universo

$t=10^{-35}$ s

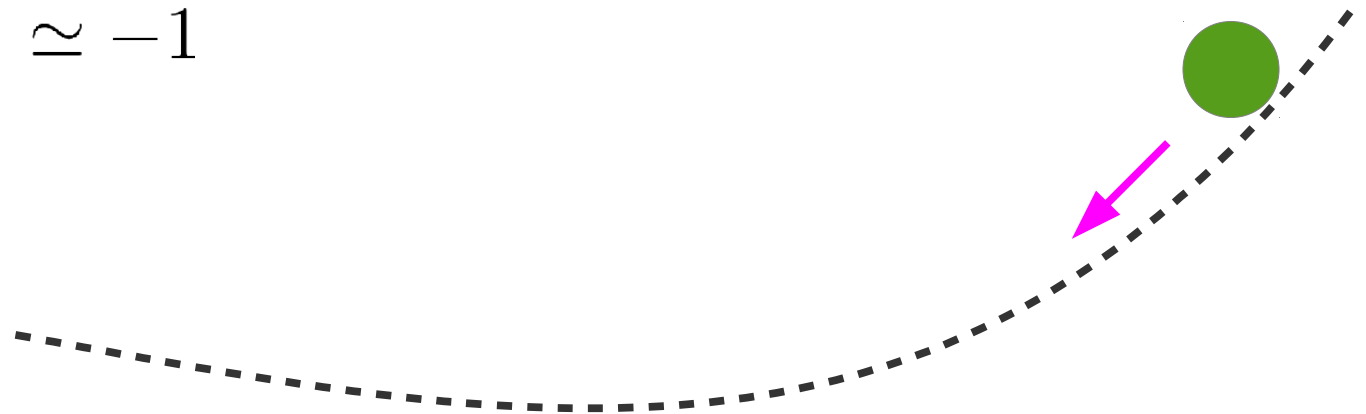


Inflación

*Realización simple: campo escalar canónico rodando
lento en un potencial*

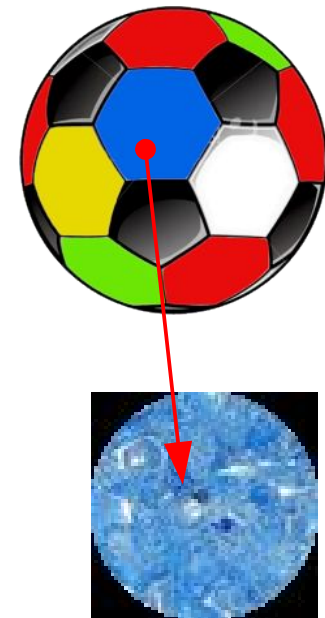
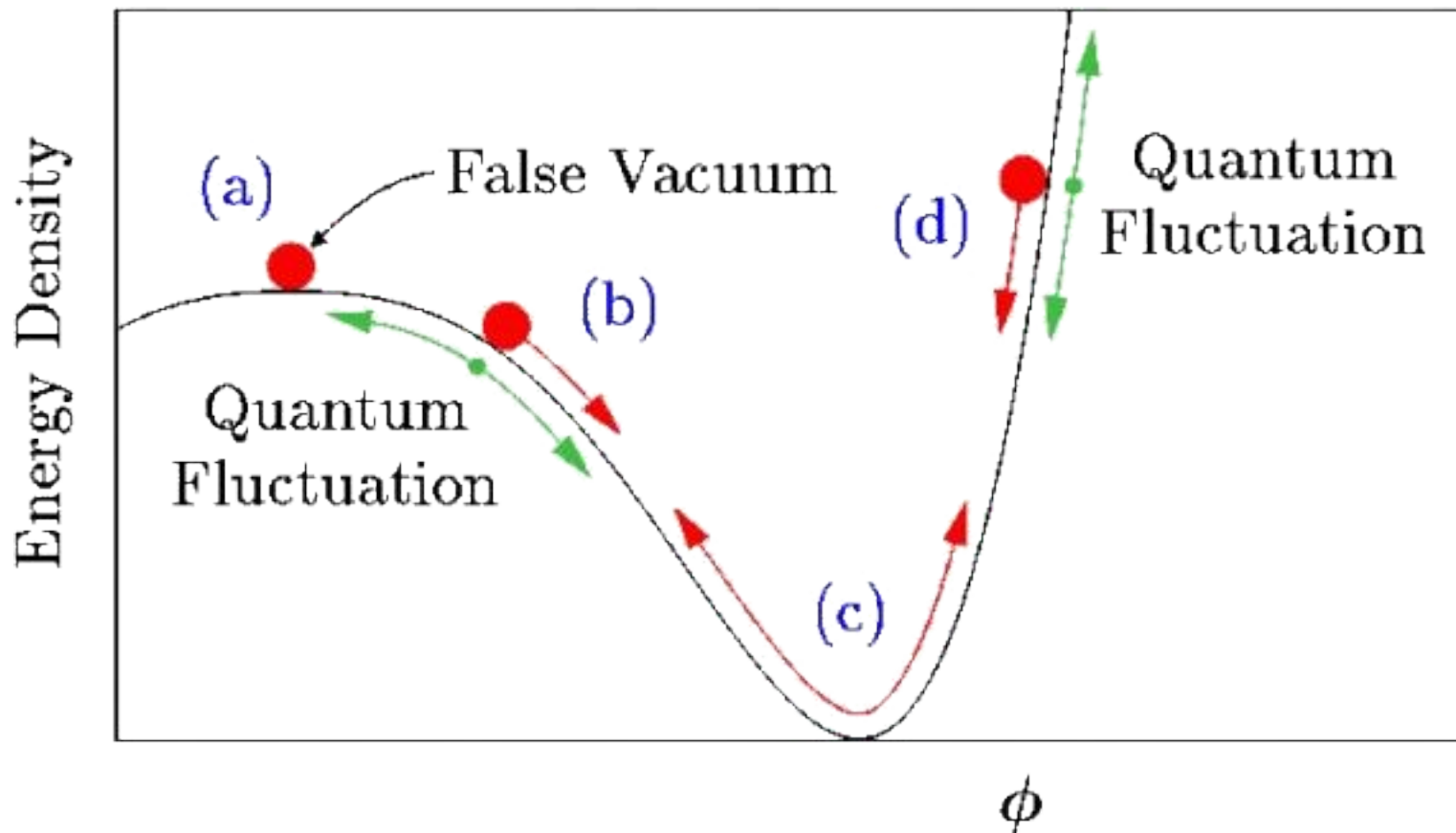
$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{m_{pl}^2}{2} R - \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) \right)$$

$$w = \frac{\cancel{\dot{\phi}^2} + V(\phi)}{\cancel{\dot{\phi}^2} - V(\phi)} \simeq -1$$



Inflación

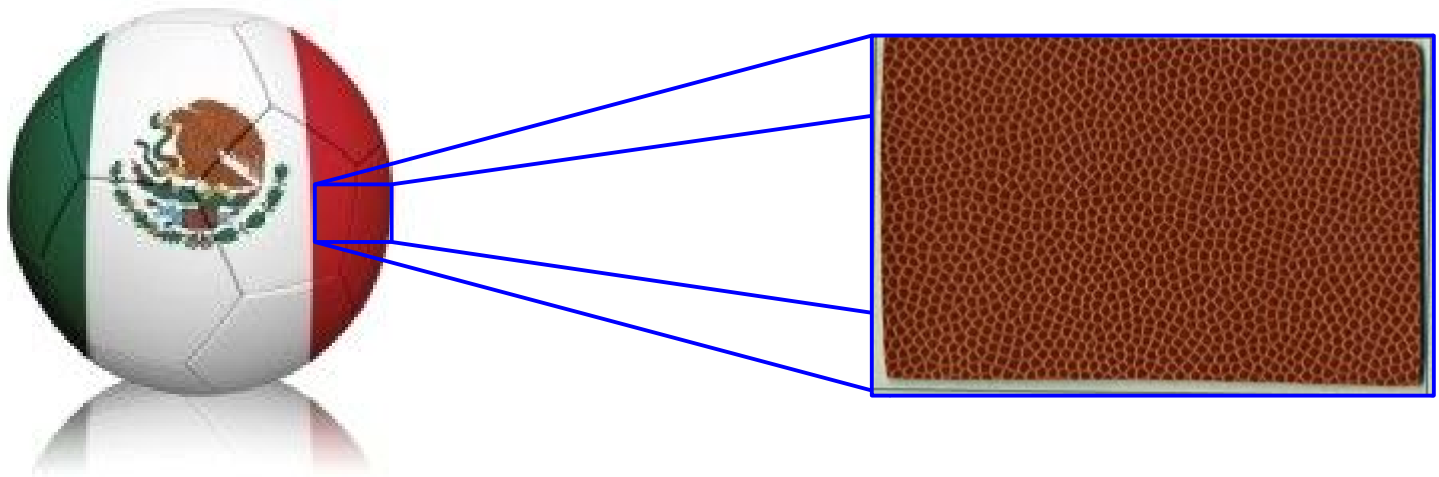
Fluctuaciones “cuánticas”



Son consistentes con las anisotropías de la CMB

Inflación

Perturbaciones tensoriales = ondas gravitacionales

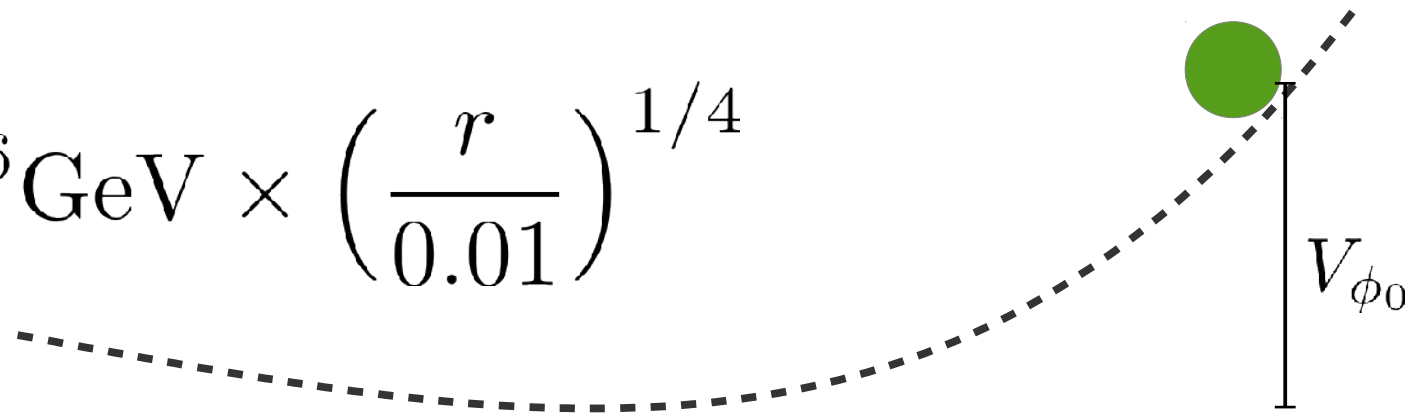


Inflación

Perturbaciones tensoriales = ondas gravitacionales

Otra forma de escribir el potencial es

$$V_{\phi_0}^{1/4} \simeq 10^{16} \text{GeV} \times \left(\frac{r}{0.01} \right)^{1/4}$$



$r=0.01$ resulta en la escala de GUT para inflación

Inflación

Perturbaciones tensoriales = ondas gravitacionales

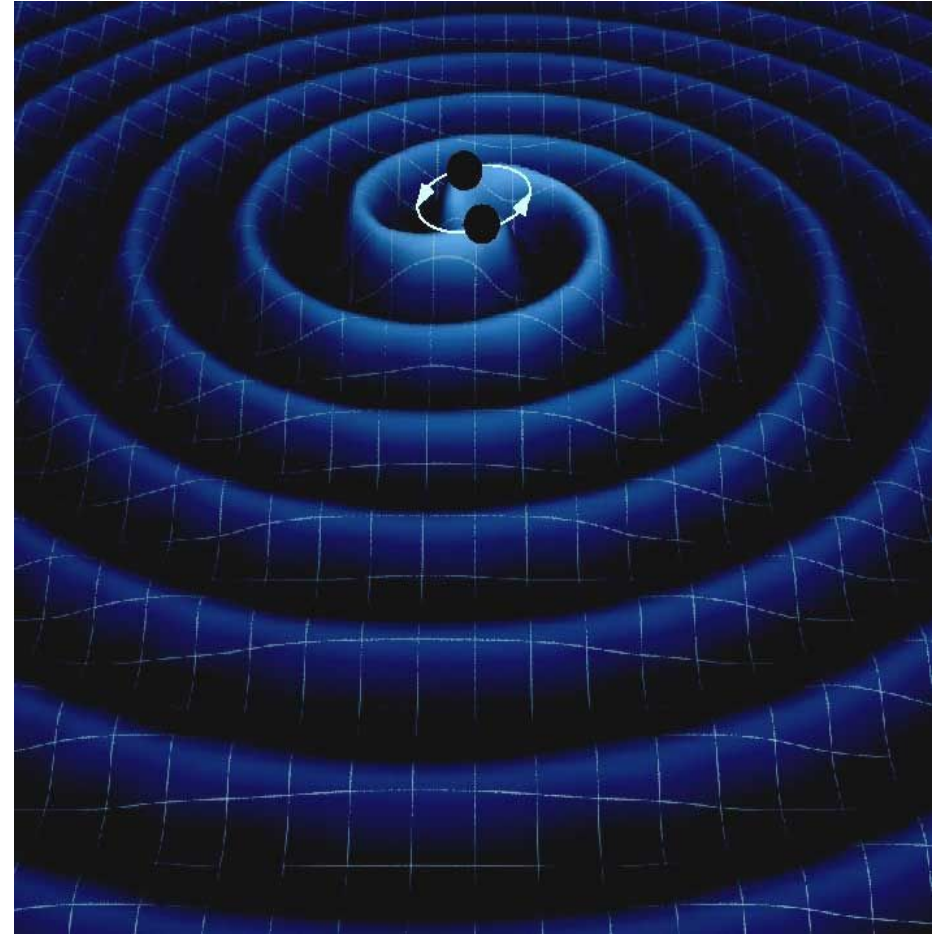
Genericamente, uno obtiene la cota (Lyth)

$$\frac{\Delta\phi}{M_{pl}} \geq \mathcal{O}(1) \left(\frac{r}{0.01} \right)^{1/2}$$

Si $r \sim 0.01$ el campo se mueve más de una unidad de Planck (modelo de campo largo)

La teoría de perturbaciones ya no es válida y uno tiene que entender las correcciones de gravedad cuántica

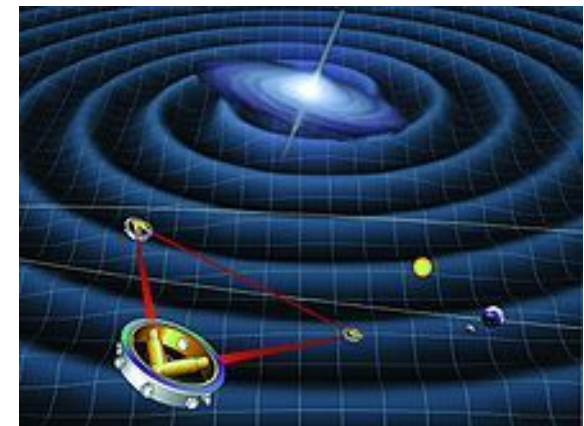
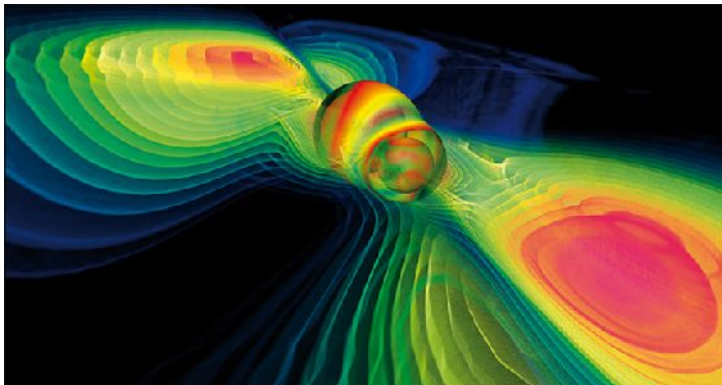
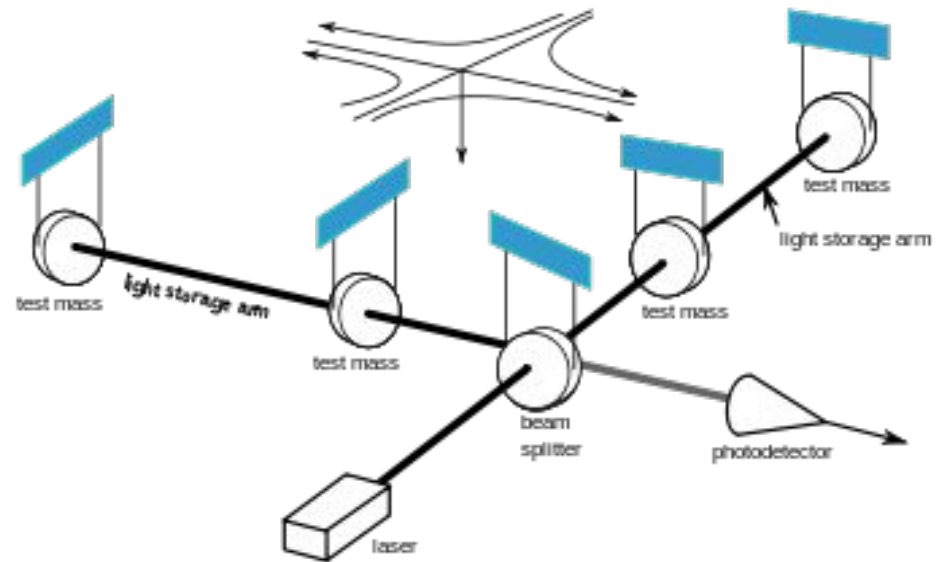
Detección directa



Detección directa

Interferómetros

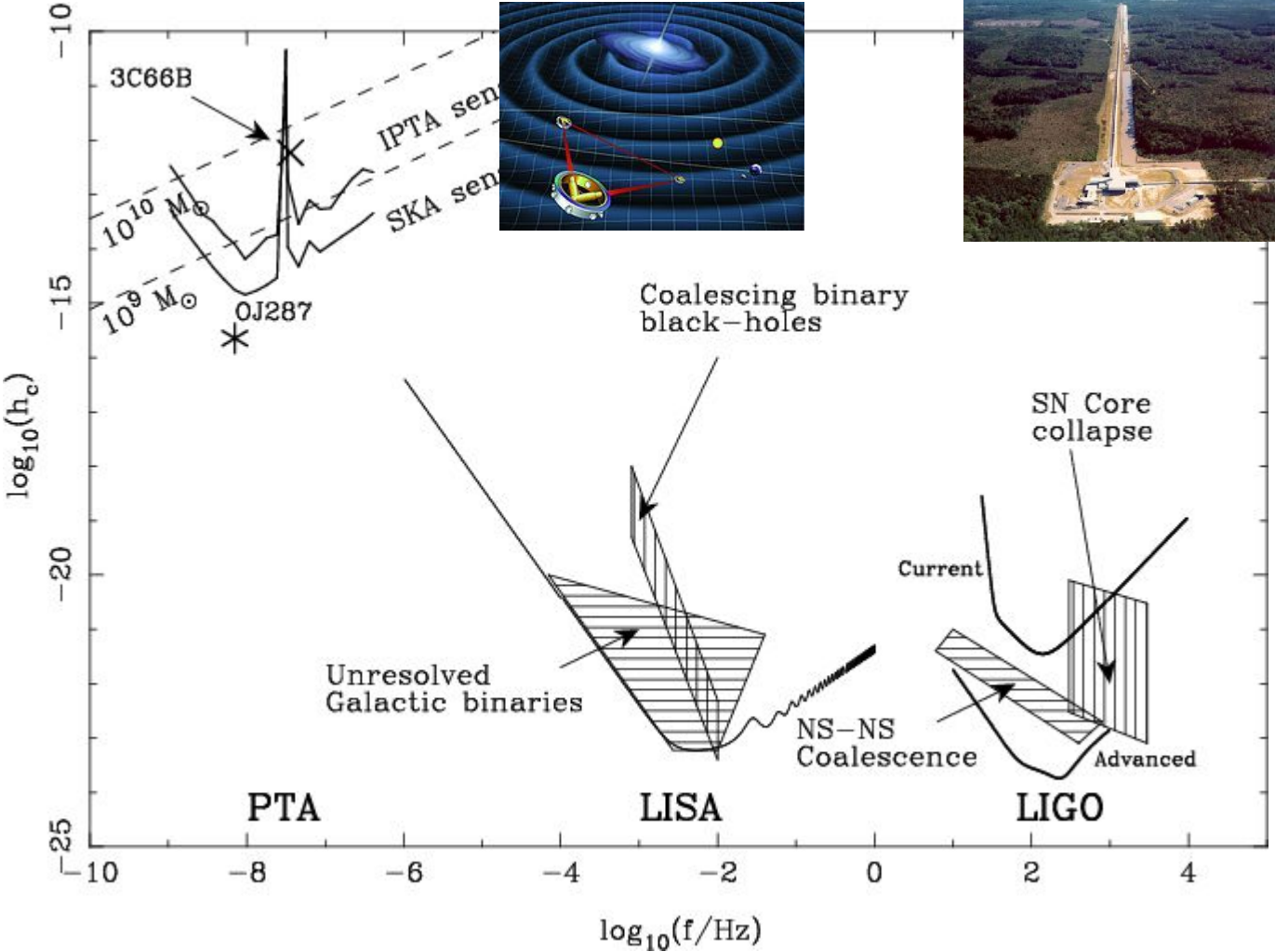
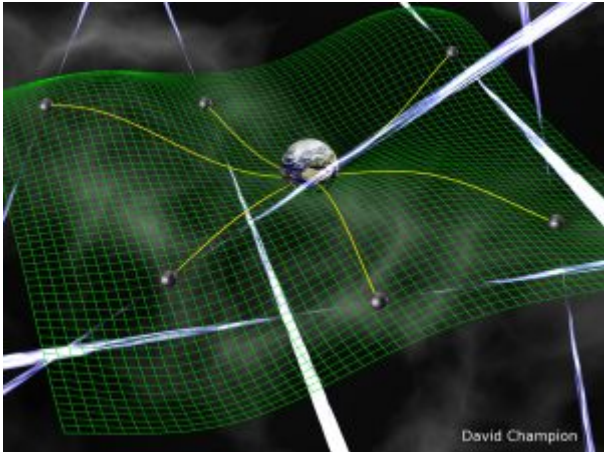
LIGO, AdvLIGO
eLISA, IPTA



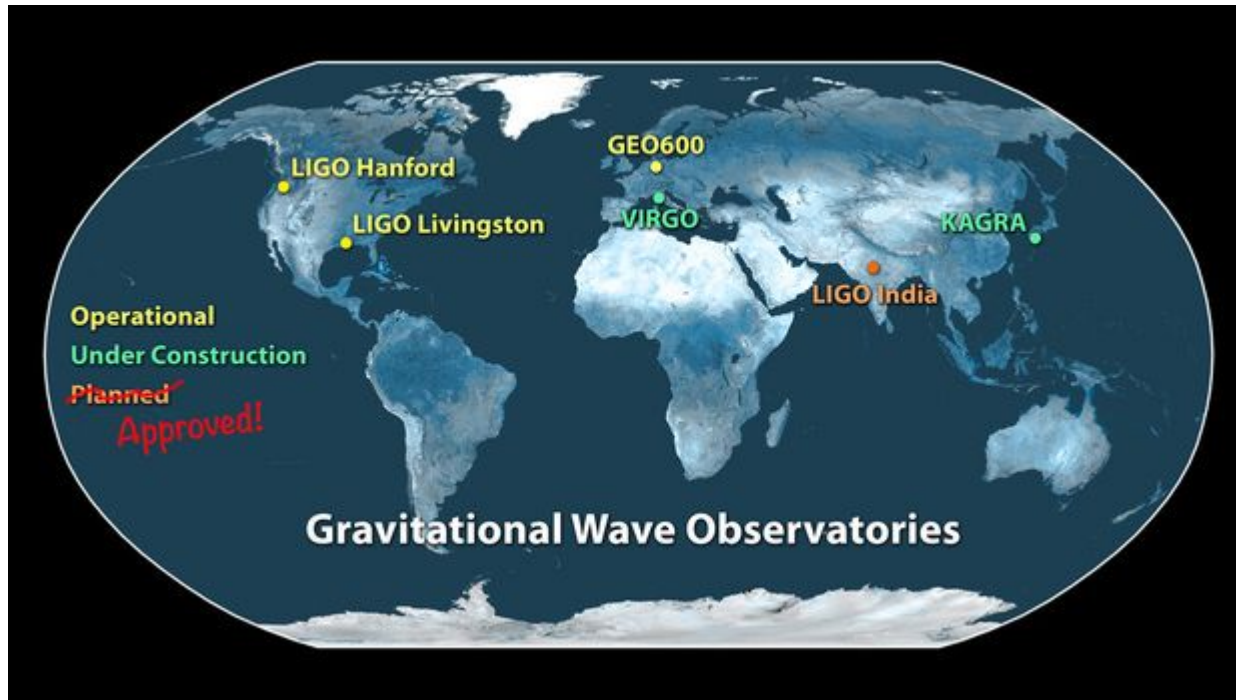
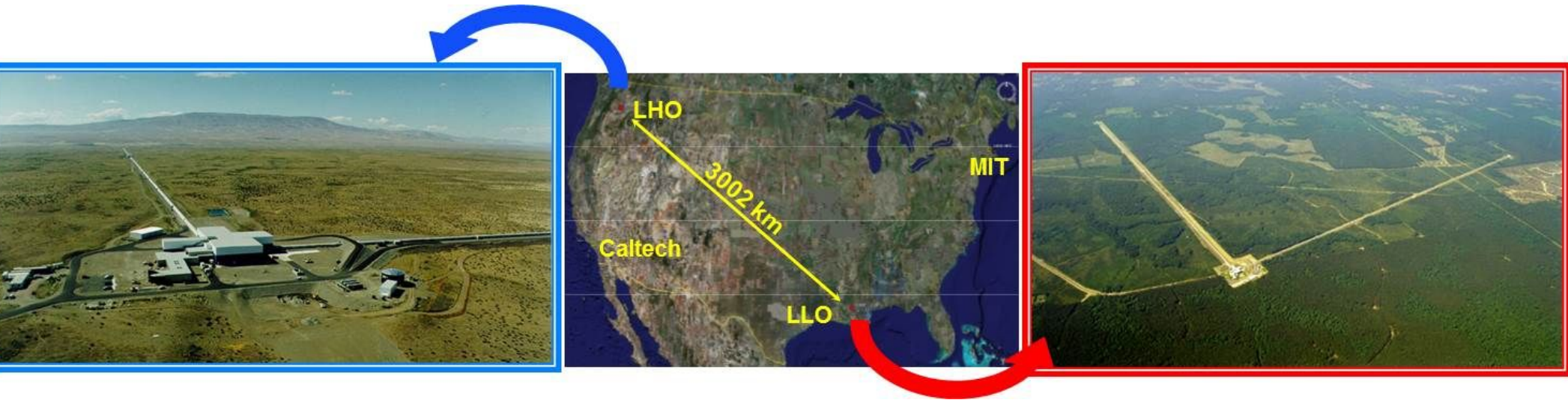
Gravity waves

Interferómetros

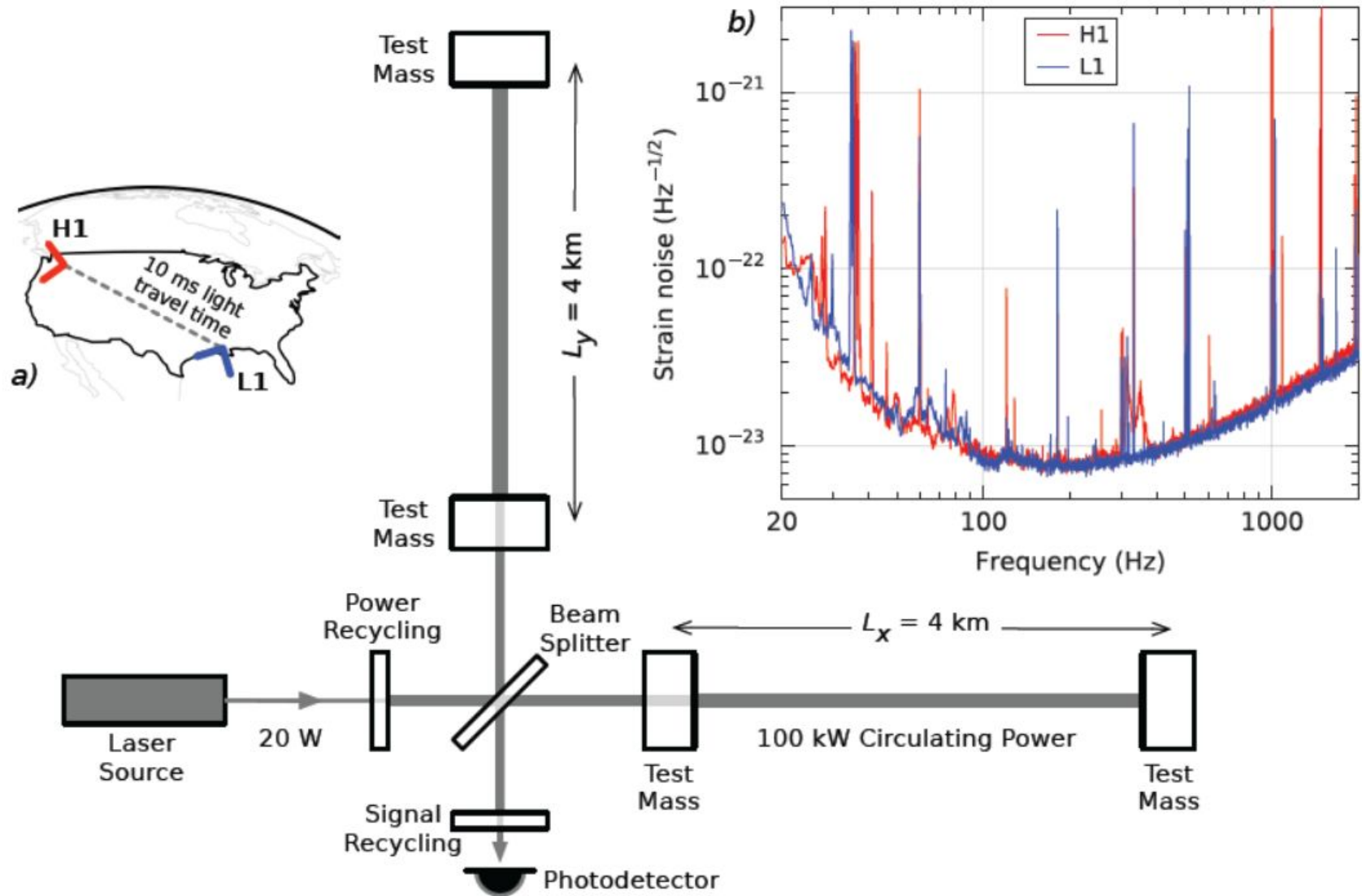
LIGO, AdvLIGO
eLISA, IPTA



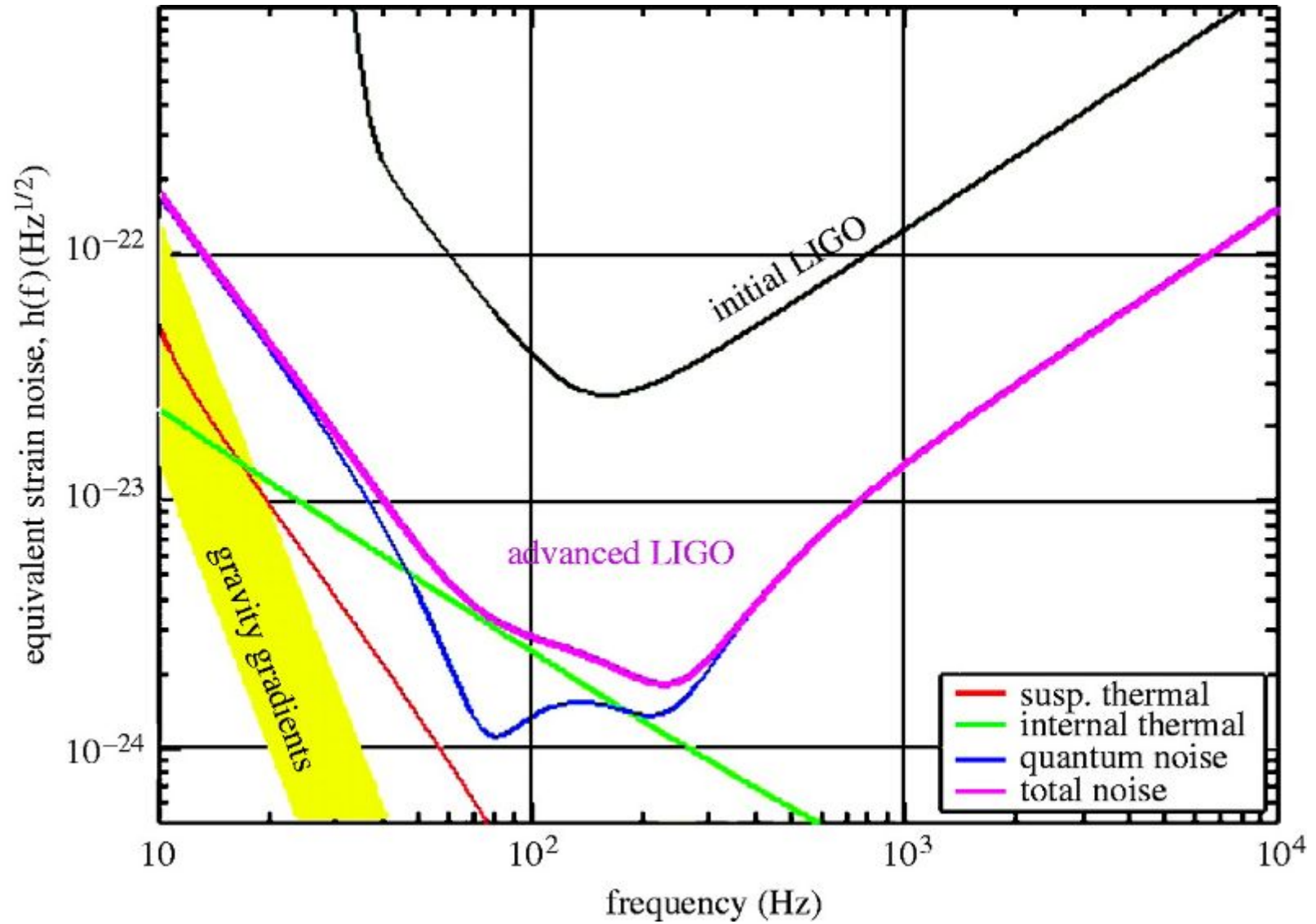
LIGO



LIGO



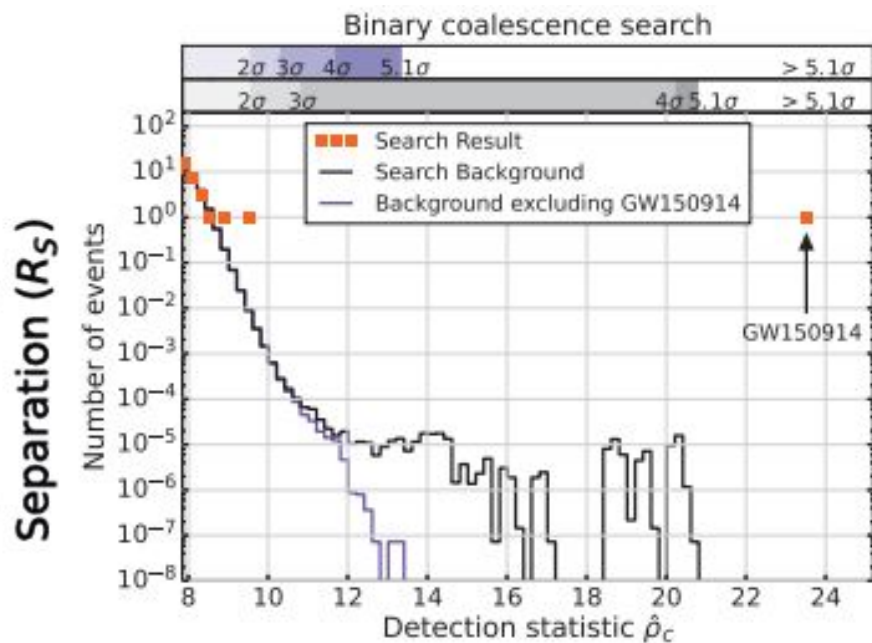
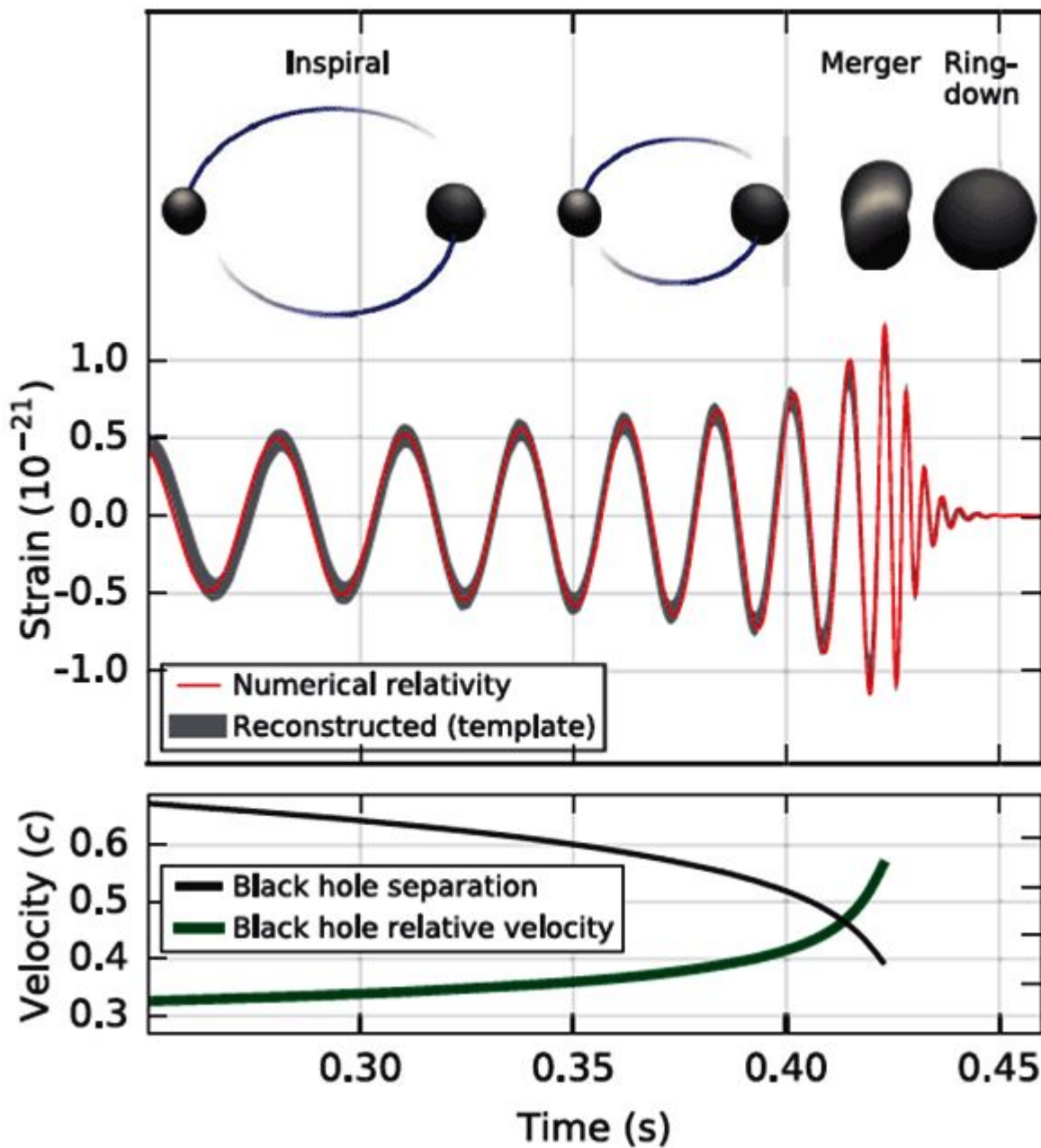
LIGO



LIGO

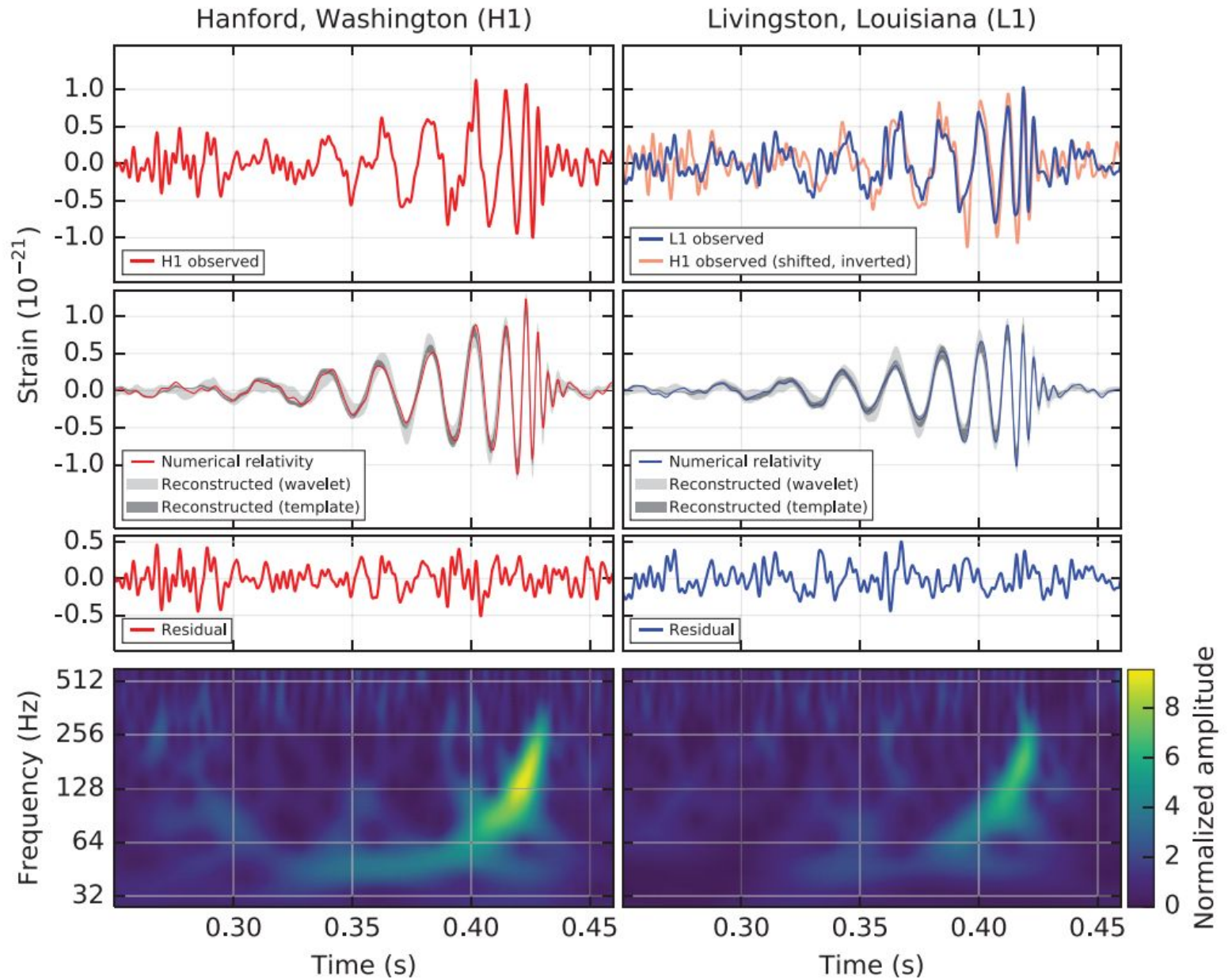
250 000 formas predefinidas
“templates” son usadas

GW150914
1 en 203 000 años
(5.1 sigmas)



Detección de LIGO

14 Sept. 2015



Detección de LIGO

14 Sept. 2015 detección

11 Feb. 2016 anuncio

Dos hoyos negros de

Hoyo negro primario

$$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$$

Hoyo negro secundario

$$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$$

Hoyo negro final

$$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$$

Espín final

$$0.67^{+0.05}_{-0.07}$$

Distancia Luminosa

$$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$$

“Redshift” al objeto z

$$0.09^{+0.03}_{-0.04}$$

Energía liberada ~ 50 x luz del Universo

Futuro con las ondas gravitacionales

- Propiedades de hoyos negros (interacciones)
- Velocidad de propagación (Relatividad General?)
- Sirenas estándares (distancias -> Cosmología)
- El Universo temprano (inflación, gravedad cuántica, etc.)
- Exóticos (cuerdas cósmicas, etc.)