


Curso intensivo de Cosmología Observacional

Claudia Scóccola

Profesora Asociada - Departamento de Física,
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile

The background of the slide is a reproduction of the painting 'The Starry Night' by Vincent van Gogh. The painting depicts a night scene with a turbulent, swirling blue sky filled with bright, glowing yellow stars and a large, luminous crescent moon. In the foreground, dark, silhouetted cypresses stand on the left, overlooking a small village with a prominent white church spire. The hills in the background are rendered in shades of blue and green, with a soft, hazy atmosphere. The overall style is characterized by visible, expressive brushstrokes and a rich, textured appearance.

Fondo Cósmico de Radiación

The background of the slide is a reproduction of the painting 'The Starry Night' by Vincent van Gogh. It features a swirling, turbulent blue sky filled with bright, glowing yellow stars and a large, luminous crescent moon. In the foreground, dark, silhouetted cypresses stand on the left, overlooking a small village with a prominent white church spire. The hills in the background are rendered in shades of blue and green, with a sense of movement and texture.

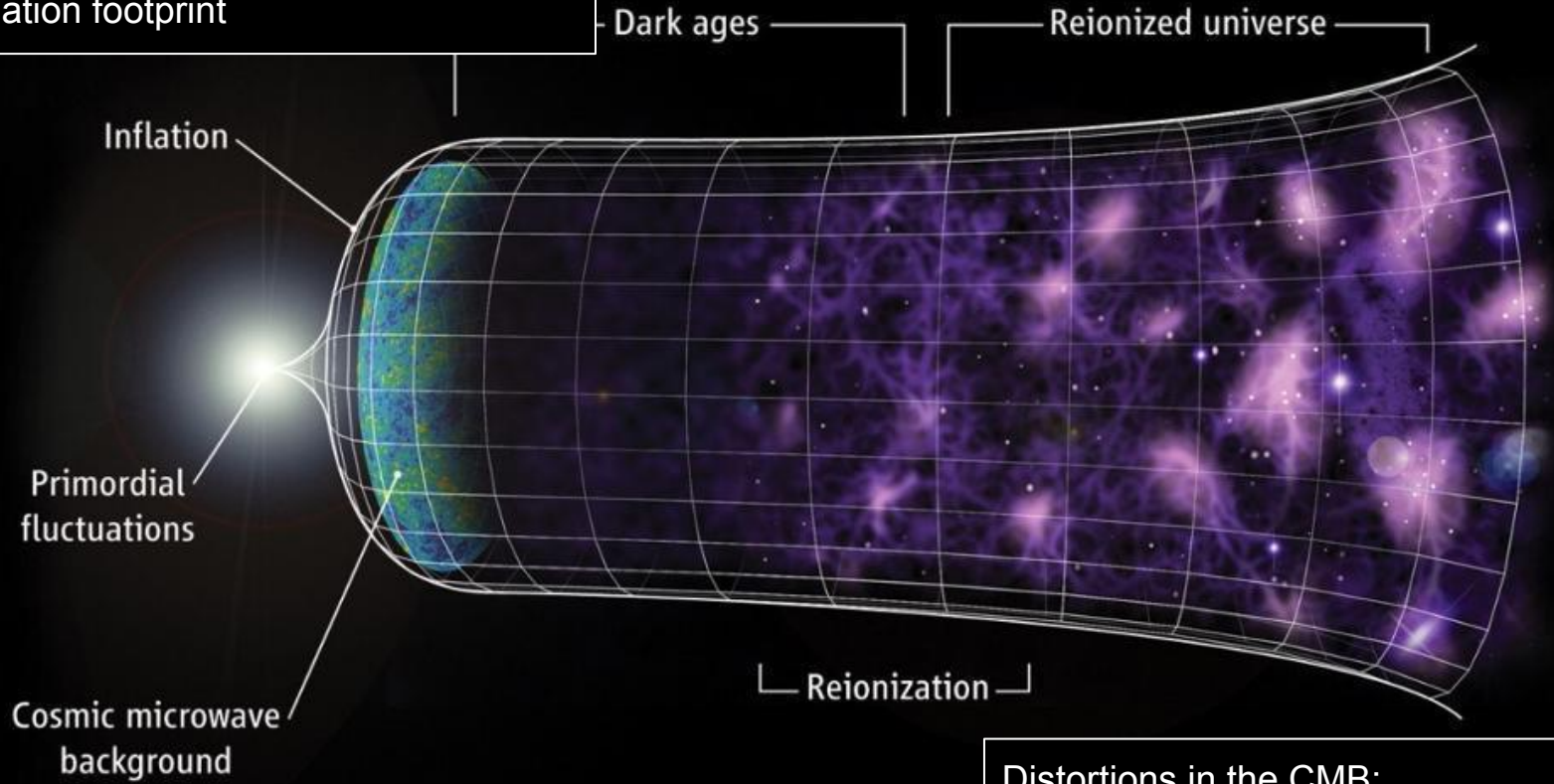
Clases del 26/03/2025

Clase 3: Polarización del CMB

- **Origen de la polarización:** Dispersión de Thomson con anisotropía cuadrupolar.
- **Modos E y B:**
 - Modos E: Proviene de perturbaciones de densidad.
 - Modos B: Pueden ser indicios de inflación primordial.
- **Fuentes de polarización B:**
 - Conversión de modos E en B por lente gravitacional.
 - Ondas gravitacionales primordiales como fuente directa de modos B.

In CMB temperature and polarization fluct:

- Recombination epoch
- Inflation footprint



Distortions in the CMB:
SZ - clusters of galaxies
Weak lensing - matter structures

Paradigma inflacionario:

- ❖ Resuelve problemas serios del modelo de Big Bang clásico:
 - “Problema de la “planaridad”
 - Homogeneidad a gran escala del Universo
 - Origen de la estructura cósmica (fluctuaciones primordiales)

Período inflacionario: Ocurre al “comienzo” del Universo, y esa época es inalcanzable para las observaciones.

Fluctuaciones de la métrica:

- ❖ **escalares**
 - fluctuaciones de densidad de materia: origen de la estructura cósmica
 - mayoría de las anisotropías en T y P del CMB
- ❖ **tensoriales** (ondas gravitatorias primordiales)
 - dejan una huella distintiva en la polarización del CMB (“**Modos B de polarización**”)

Una detección de los modos B primordiales constituirá la primera medida indirecta de la época inflacionaria.

Introducción

Fluctuaciones tensoriales & Inflación

Durante inflación se generan perturbaciones escalares y tensoriales.

La amplitud de las ondas gravitacionales h está relacionada con la escala de energía del potencial del inflatón.

$$\langle h^2 \rangle = \frac{V(\phi)}{M_{\text{Planck}}^4}$$

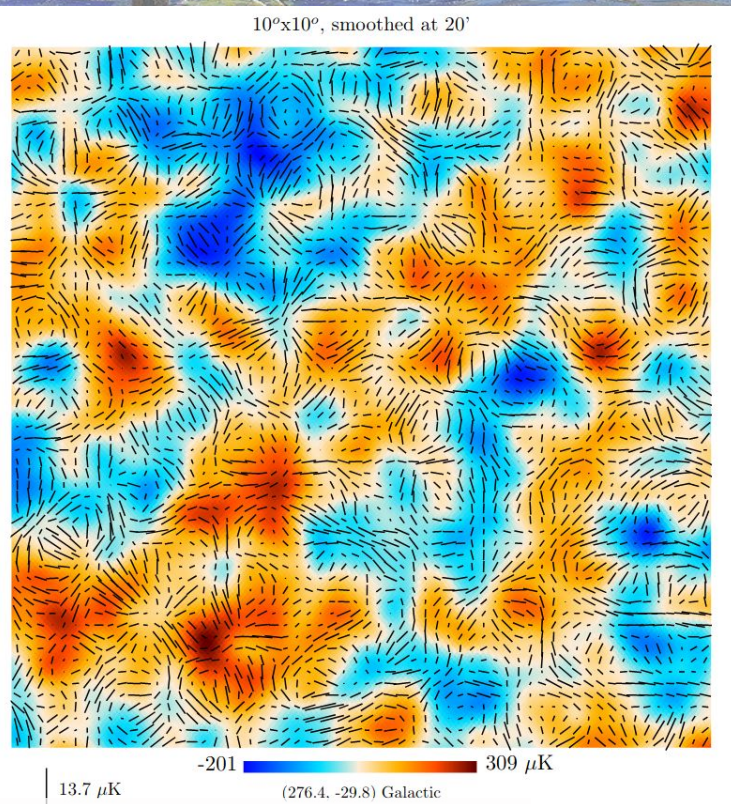
Tensor-to-scalar ratio:

$$r = \frac{\langle h^2 \rangle}{\langle (\delta\rho/\rho)^2 \rangle} = \frac{A_T}{A_S}$$

Una medición de r revelaría la presencia de ondas gravitacionales primordiales y podría determinar la escala de energía a la que ocurre la inflación.

$$V \approx \frac{r}{0.01} (10^{16} \text{ GeV})^4$$

el CMB está polarizado



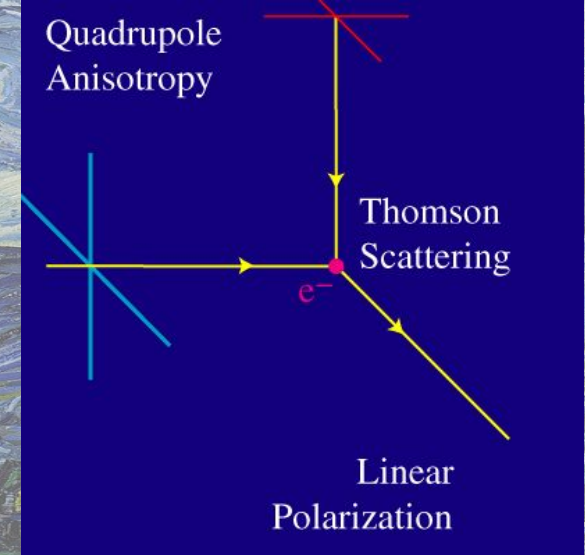
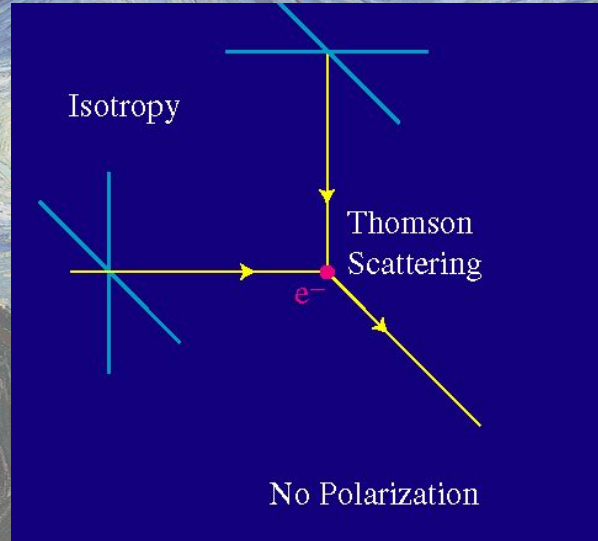
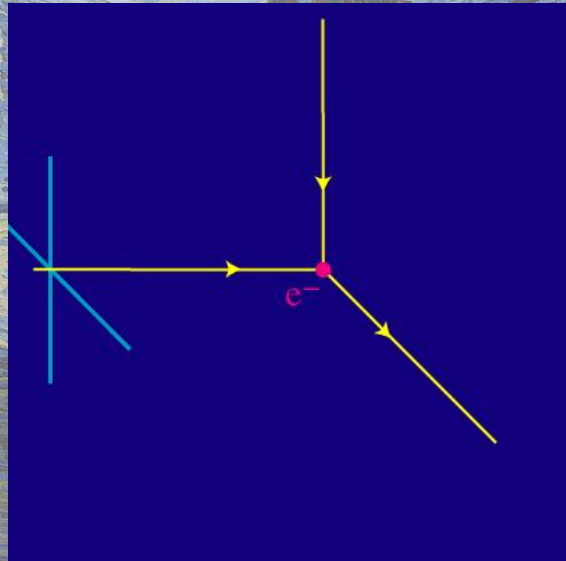
Planck 2018 results. I. arXiv:1807.06205

La mayor parte de la polarización es producida por perturbaciones escalares

Fluctuaciones de temperatura (color) y polarización (dibujadas por segmentos)

Por qué la anisotropía local genera polarización?

Una anisotropía cuadrupolar en el campo de radiación en la superficie de último scattering (desde donde viene el CMB) produce un cierto grado de **polarización lineal** debido a scattering de Thomson:



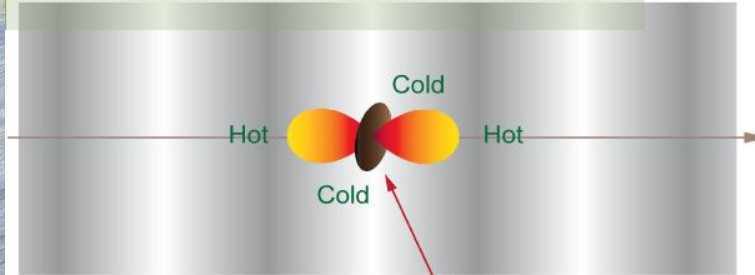
Credits: Wayne Hu's tutorials

La anisotropía cuadrupolar (escalar y tensorial) genera polarización.

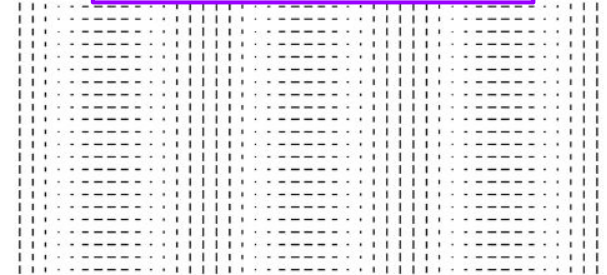
Anisotropía cuadrupolar
generada por
**fluctuaciones
escalares**

Genera solo **E modes**

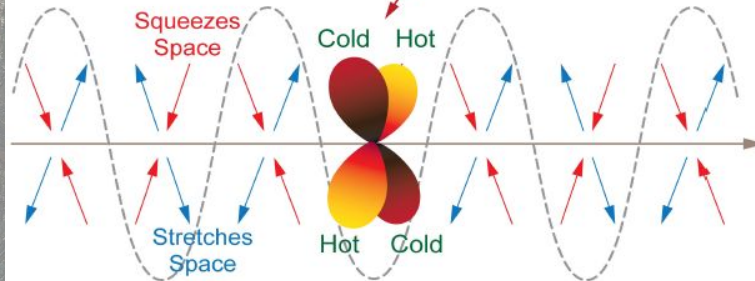
Density Wave



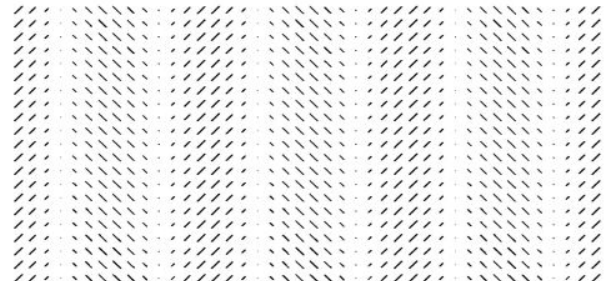
E-Mode Polarization Pattern



Gravitational Wave



B-Mode Polarization Pattern



Anisotropía cuadrupolar
generada por
**fluctuaciones
tensoriales**

Genera también **B modes**

Parámetros de Stokes - modos E y B de polarización

Polarization is typically described in terms of Stokes parameters Q and U , that can be expanded in **spherical harmonics with spin 2**:

$$(Q \pm iU) = \sum_{lm} a_{lm}^{(\pm 2)} Y_{lm}^{(\pm 2)} . \quad (1)$$

Alternatively, E and B modes are defined through the linear combinations

$$\begin{aligned} a_{lm}^E &= -(a_{lm}^{(+2)} + a_{lm}^{(-2)})/2 \\ a_{lm}^B &= -(a_{lm}^{(+2)} - a_{lm}^{(-2)})/2i . \end{aligned} \quad (2)$$

E modes are parity invariant (**scalar**), while B modes change sign under a parity transformation (**pseudo-scalar**).

These modes are non-local, and describe a polarization pattern around each point in the sky: E modes (curl free) and B modes (divergence free).

Polarización E y B. Espectro angular de potencias

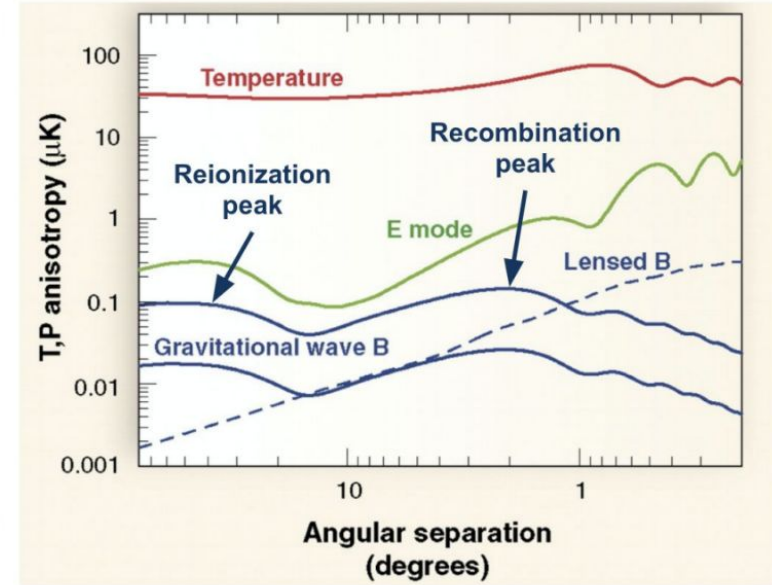
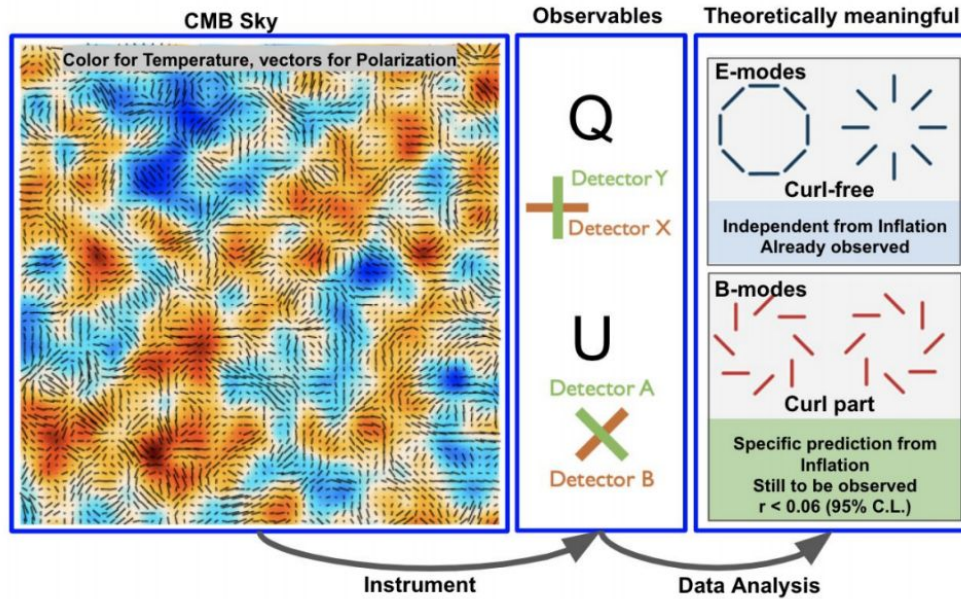
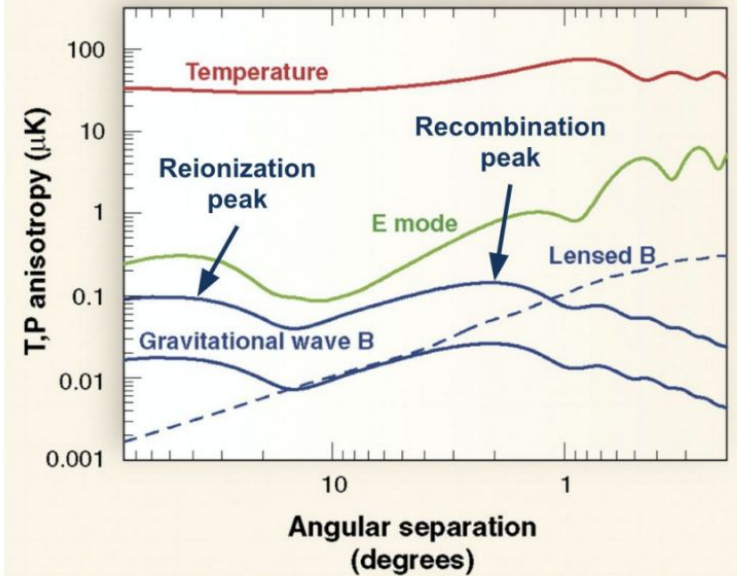


Figure 1. Left: Relationship between sky observables and E and B-modes. Right: Relative amplitude of Temperature (red), E (green) and B-modes (blue) for $r=0.1$ (excluded) and 0.01. The reionization and recombination peaks are shown with arrows. The lensing from E-mode to B-mode is shown as the dashed blue line.

Algunas observaciones y advertencias:

- ❖ Detection of B-modes peaking over angular scales of the order of one degree in the sky and independent of frequency would be a **footprint** of primordial gravitational waves.
- ❖ B-modes are also expected due to **lensing** of E-modes. It occurs at smaller angular scales.
- ❖ B-modes can be generated by **Faraday rotation** of E-modes in primordial magnetic fields, but depends on frequency.
- ❖ Density fluctuations can also generate B-modes through non-linear effects that generate **secondary** vector and tensor modes, but with a significantly reduced amplitude.

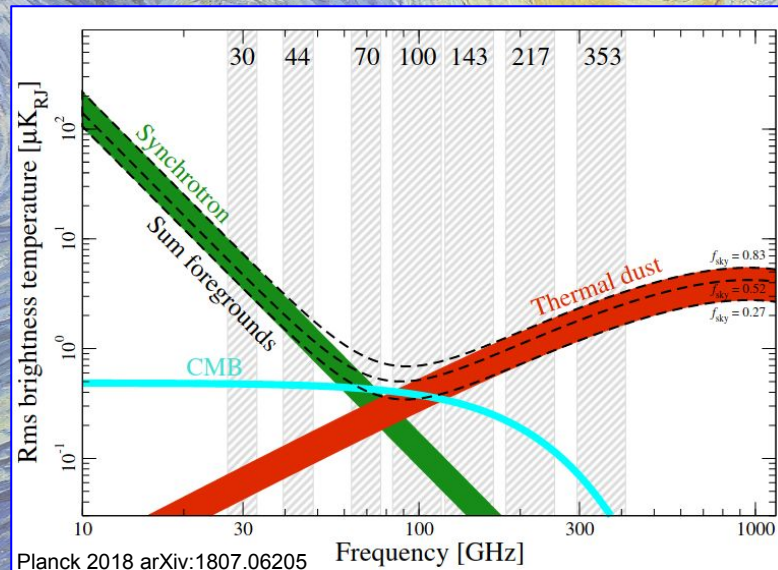


Primordial B modes - consideraciones finales

Primordial B modes **todavía no se han detectado**.

Sólo 10% del CMB está linealmente polarizado, y de eso, sólo el 10% (o menos) está causado por perturbaciones tensoriales que producen modo B: **es una señal muy débil**.

Además la señal está **contaminada por radiación polarizada de nuestra galaxia**, como synchrotron y polvo térmico (cuyas intensidades varían con la frecuencia).



Para poder detectar los modos B primordiales, necesitamos un instrumento con **alta sensibilidad**, buen **control de errores sistemáticos** y capaz de medir en **muchas frecuencias** para poder separar los contaminantes (foregrounds).

Si sobra tiempo de la clase teórica

Ir al CAMB y correr varios espectros con distintos parámetros cosmológicos, en particular, con distintos valores de r , y comparar los resultados.

Comparar también el espectro con lensing y sin lensing. Tanto en la temperatura, como en los modos E y B.

Hacer un mapa con el espectro de lensing, y otro mapa con la misma seed pero con el espectro sin lensing. Tomar una sección del mapa y comparar.

Chequear que aunque el espectro sea distinto, la realización es la misma, solo que a partir de distintos espectros. Se nota cuanto cambia la forma de las manchas de los mapas? Se distingue algo?

Clase 4: Análisis de datos e inferencia

El análisis de datos en cosmología se enfrenta a grandes desafíos debido al crecimiento de los volúmenes de datos de experimentos como DESI, Euclid y LSST.

A medida que los datos aumentan, también lo hace su precisión estadística, lo que pone en evidencia errores sistemáticos.

Técnicas como la matriz de Fisher y MCMC permiten manejar grandes datos y obtener parámetros cosmológicos con precisión, a pesar de la complejidad de los análisis.

Likelihood (función de máxima verosimilitud)

El bloque fundamental de los análisis contemporáneos es la **función de verosimilitud**. Esta se define como la probabilidad de que un experimento genere los datos observados dado una teoría. Aunque esta definición parece simple, es muy poderosa. Con la función de verosimilitud, podemos determinar los parámetros de la teoría junto con sus errores.

Figura 14.1 (siguiente página): [Resumen del proceso para obtener restricciones de parámetros](#). Los **datos crudos** (arriba a la izquierda) se comprimen en un **mapa**, del cual se estiman las **funciones de dos puntos**. Estas "funciones de dos puntos observadas" se combinan con una **matriz de covarianza** y las predicciones del modelo (teoría) para formar una verosimilitud para cualquier conjunto de parámetros. Un **muestreador** evalúa esta verosimilitud, multiplicada generalmente por los priors de los parámetros, para diferentes valores de parámetros y así encontrar la región preferida en el espacio de parámetros, representada en el gráfico de contorno a la derecha. El pronóstico de Fisher utiliza solo las funciones teóricas de dos puntos y la covarianza para calcular las aproximadas contornos de verosimilitud esperados.

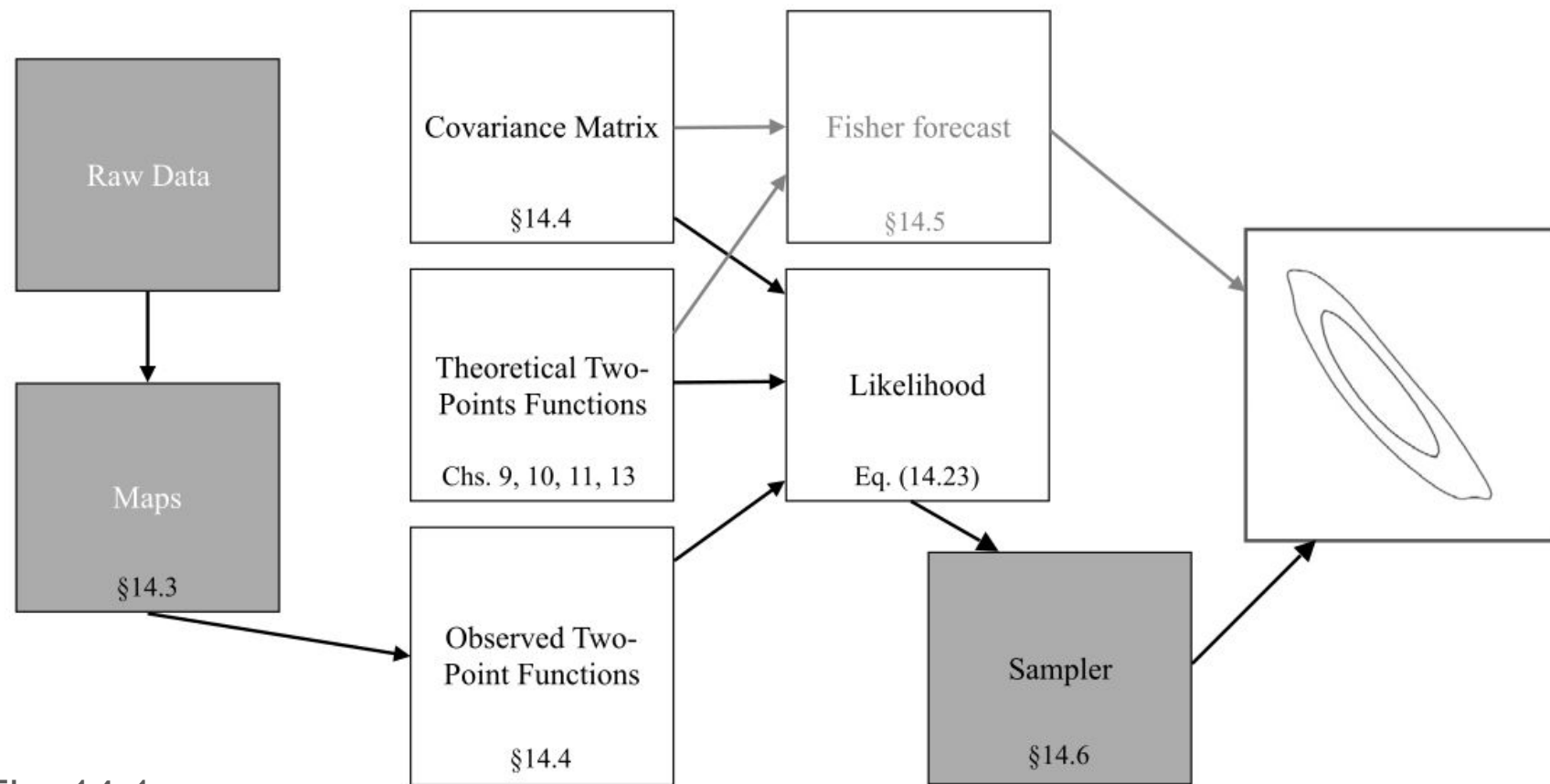
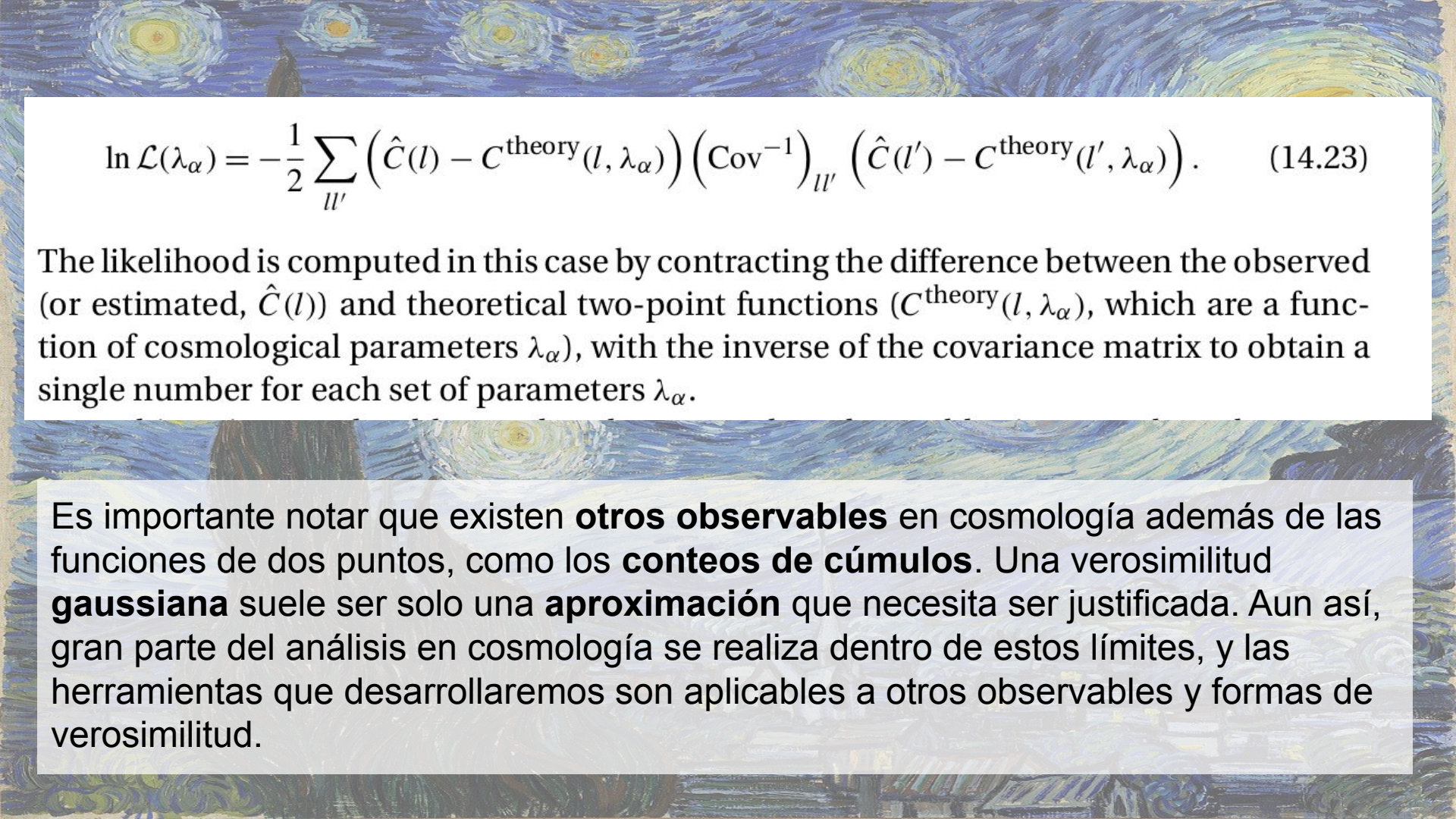



Fig. 14.1


$$\ln \mathcal{L}(\lambda_\alpha) = -\frac{1}{2} \sum_{ll'} \left(\hat{C}(l) - C^{\text{theory}}(l, \lambda_\alpha) \right) \left(\text{Cov}^{-1} \right)_{ll'} \left(\hat{C}(l') - C^{\text{theory}}(l', \lambda_\alpha) \right). \quad (14.23)$$

The likelihood is computed in this case by contracting the difference between the observed (or estimated, $\hat{C}(l)$) and theoretical two-point functions ($C^{\text{theory}}(l, \lambda_\alpha)$), which are a function of cosmological parameters λ_α , with the inverse of the covariance matrix to obtain a single number for each set of parameters λ_α .

Es importante notar que existen **otros observables** en cosmología además de las funciones de dos puntos, como los **conteos de cúmulos**. Una verosimilitud **gaussiana** suele ser solo una **aproximación** que necesita ser justificada. Aun así, gran parte del análisis en cosmología se realiza dentro de estos límites, y las herramientas que desarrollaremos son aplicables a otros observables y formas de verosimilitud.

The background of the slide is a reproduction of the painting 'The Starry Night' by Vincent van Gogh. It features a swirling blue sky with bright yellow stars and a crescent moon, a dark, silhouetted cypress tree in the foreground, and a small village with a church spire in the distance.

Pasemos al tutorial de CosmoMC by Antonio Cuestas (ver el otro pdf)

Sobre cómo instalar el CosmoMC:
<https://arxiv.org/pdf/1808.05080>

