

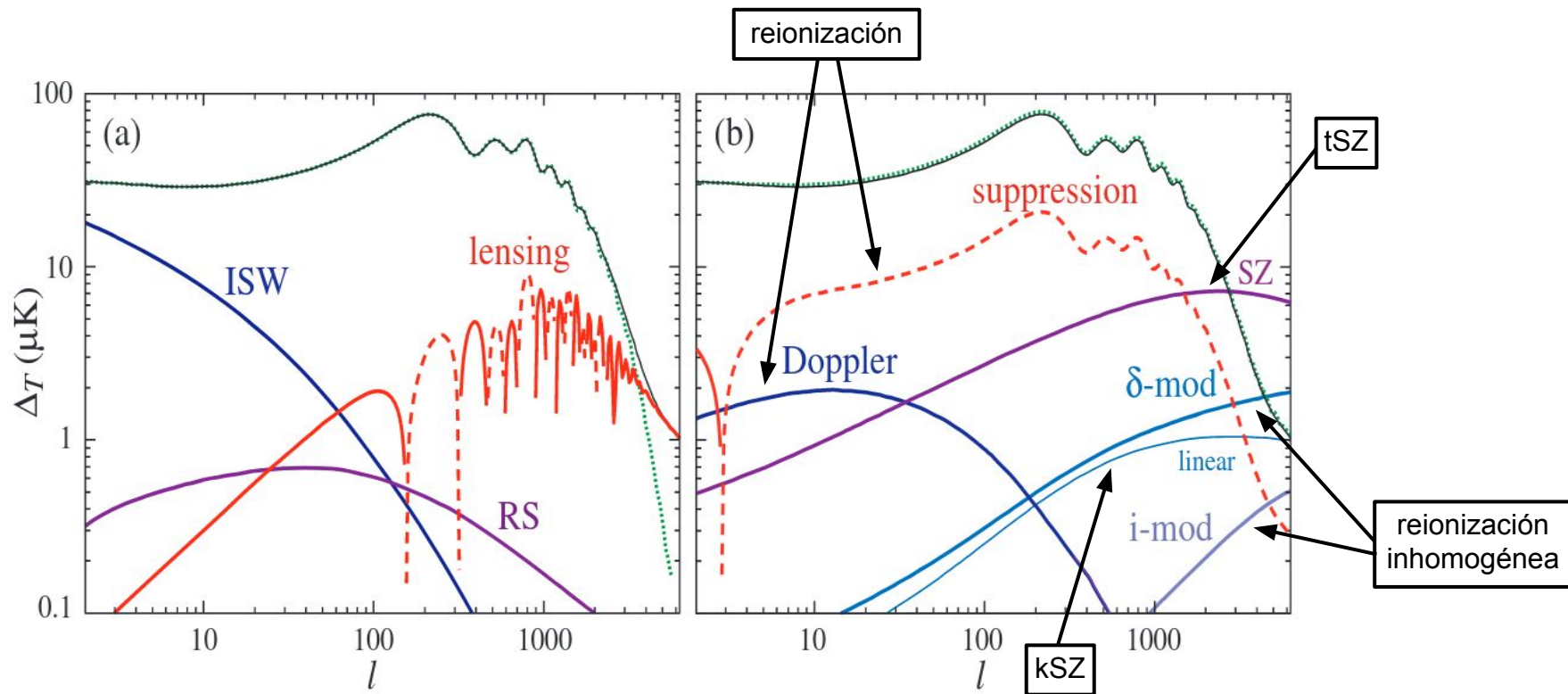
Unidad V.

Fondo Cósmico de Microondas

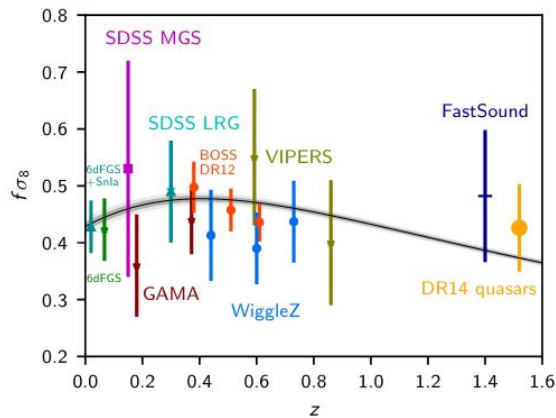
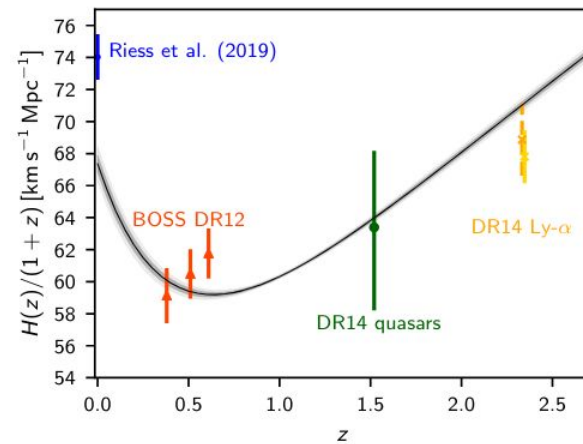
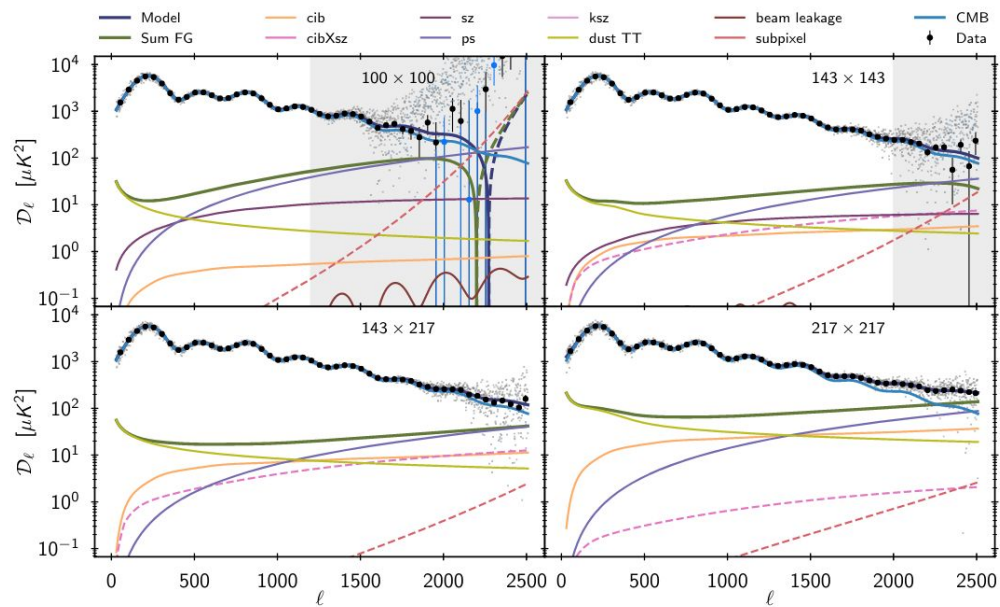
Parte 4: Extensiones a Λ CDM y Experimentos de alta resolución

Recordatorio...

Anisotropías secundarias



Cosmología con Planck

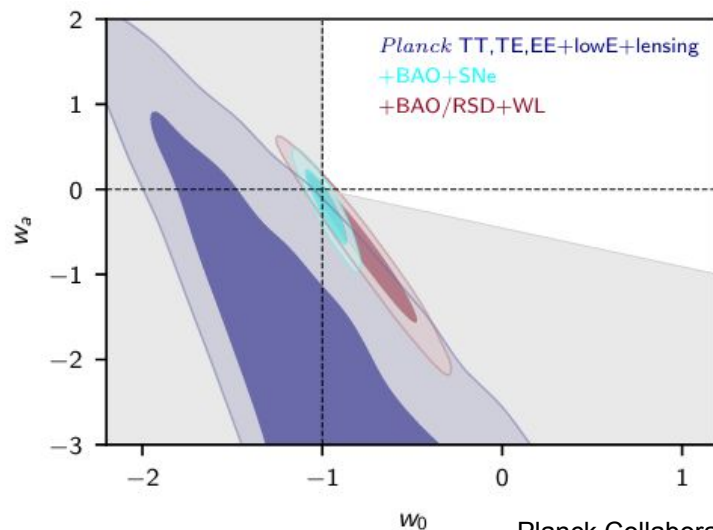
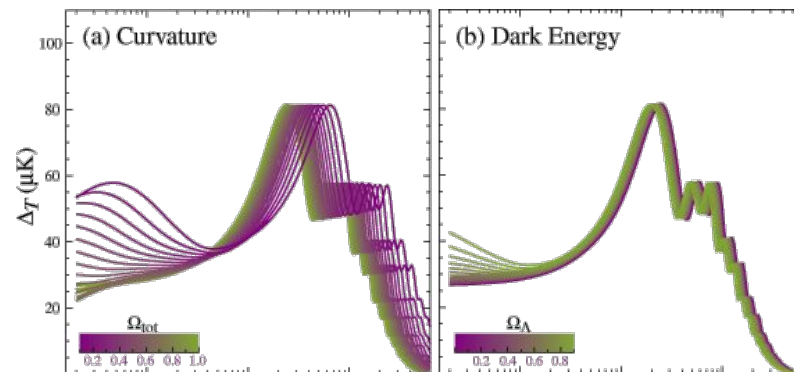
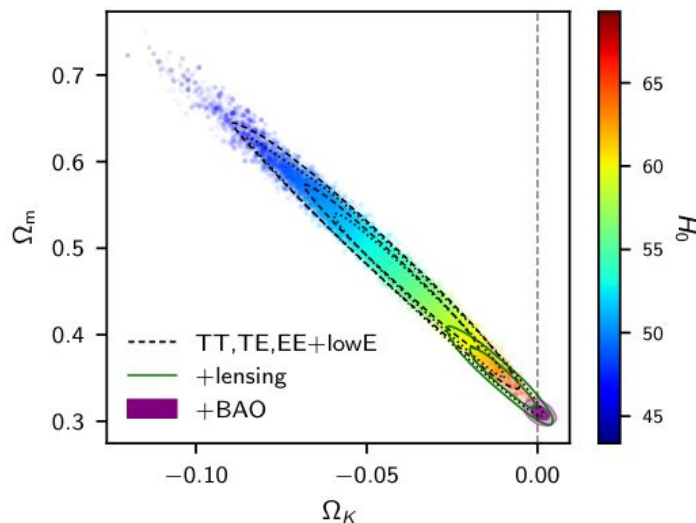


Sigamos!

Extensiones a Λ CDM

BAO resultan cruciales para romper degeneración curvatura- H_0

+SN la se puede restringir la ecuación de estado de energía oscura



Neutrinos

La cosmología observacional ofrece también la posibilidad de restringir el espacio de propiedades para algunas partículas fundamentales, particularmente los neutrinos (además de la hipotética partícula de materia oscura).

En el modelo estándar hay 3 especies de neutrinos. El CMB es sensible a la suma total de sus masas, y al “número efectivo” de partículas relativistas, que en Λ CDM con 3 neutrinos corresponde a $N_{\text{eff}}=3.045$. Las expresiones para estas dos cantidades están dadas por:

$$\frac{\rho_\nu}{\rho_\gamma} = \frac{7}{8} N_{\text{eff}} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} \qquad \Omega_\nu = \frac{\rho_\nu^0}{\rho_{\text{crit}}^0} = \frac{\sum m_\nu}{93.14 h^2 \text{ eV}}$$

Las restricciones experimentales a la suma de masa de neutrinos son

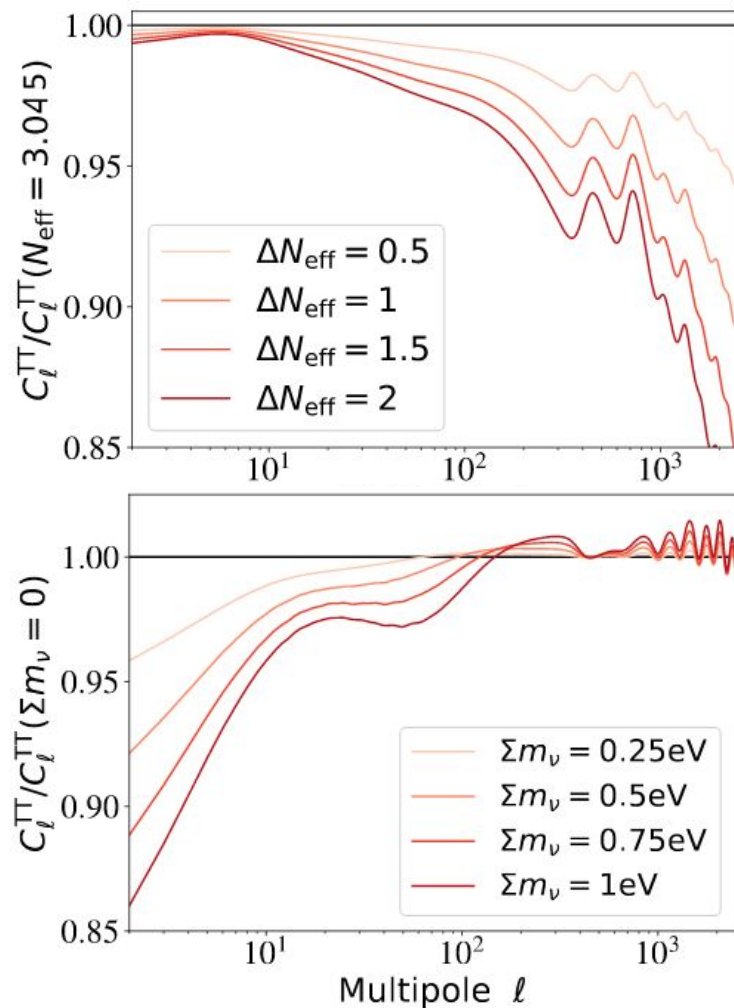
$$0.06 \text{ eV} \leq \sum m_\nu \leq 1.1 \text{ eV}$$

Los neutrinos son las únicas partículas del modelo estándar con la particularidad de ser relativistas durante la época de dominio de radiación y clásicos una vez adentrados en el dominio de la materia ($z \sim 100$).

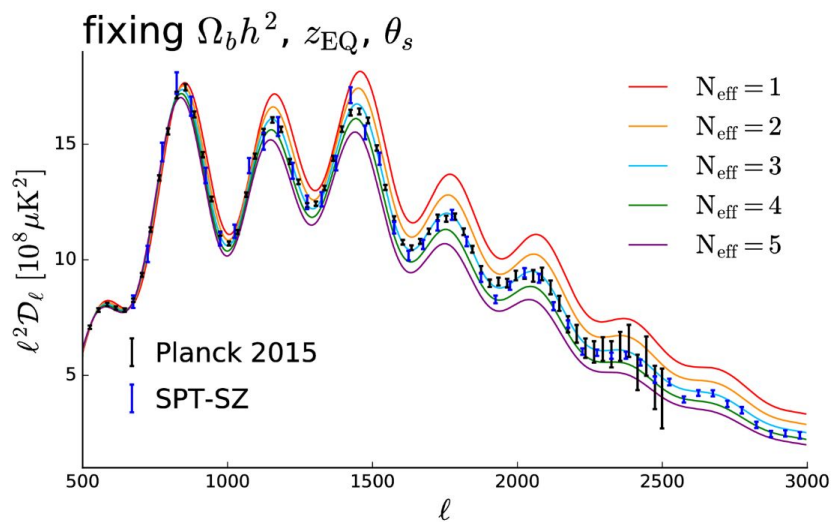
Neutrinos

El número de partículas relativistas en épocas tempranas hace aumentar la escala de difusión al momento de desacoplamiento, además de suavizar los picos acústicos y moverlos a escalas mayores.

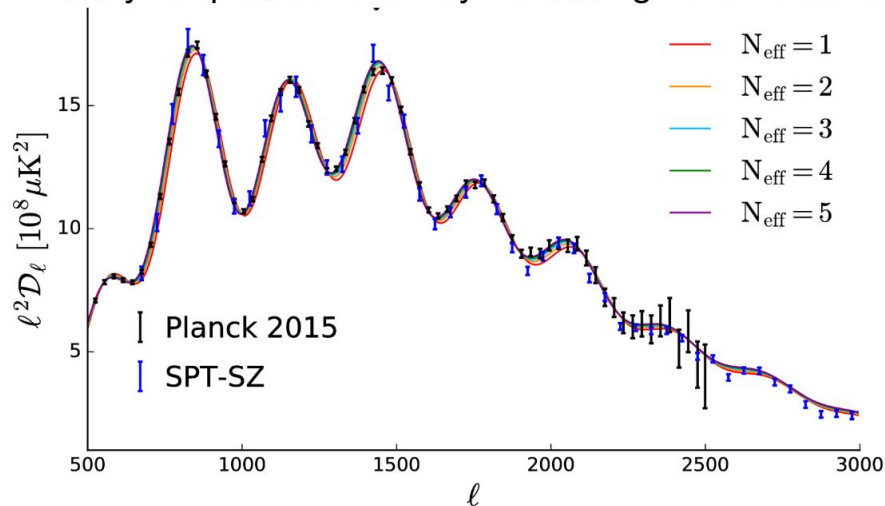
Por otra parte, la suma de la masa de los neutrinos reduce la amplitud del efecto ISW y el efecto de lente gravitacional. Diferencias en las masas de las tres especies hacen que se desacoplen en momentos distintos, afectando las perturbaciones de fotones a escalas pequeñas.



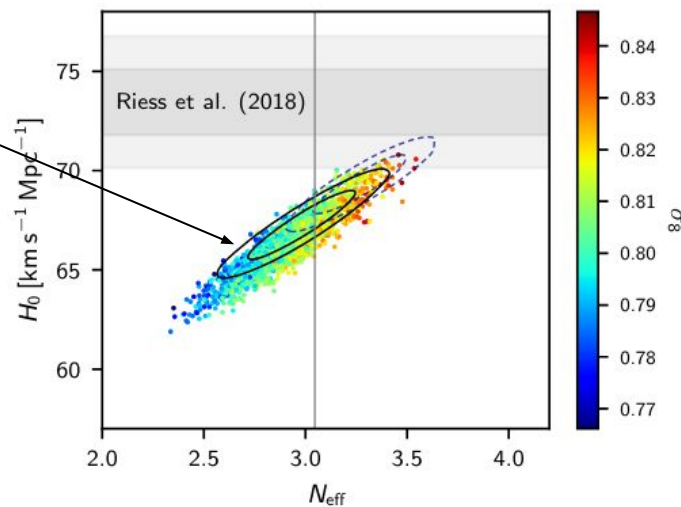
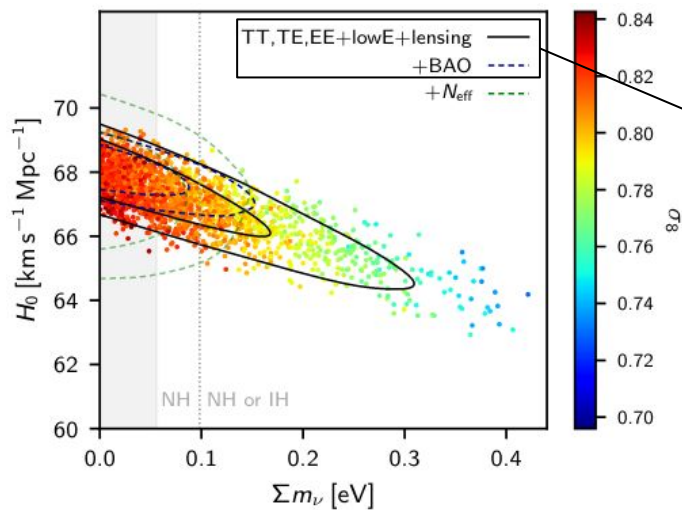
Impacto en el espectro angular de temperatura



Artificially keep θ_d constant by increasing helium fraction, Y_P



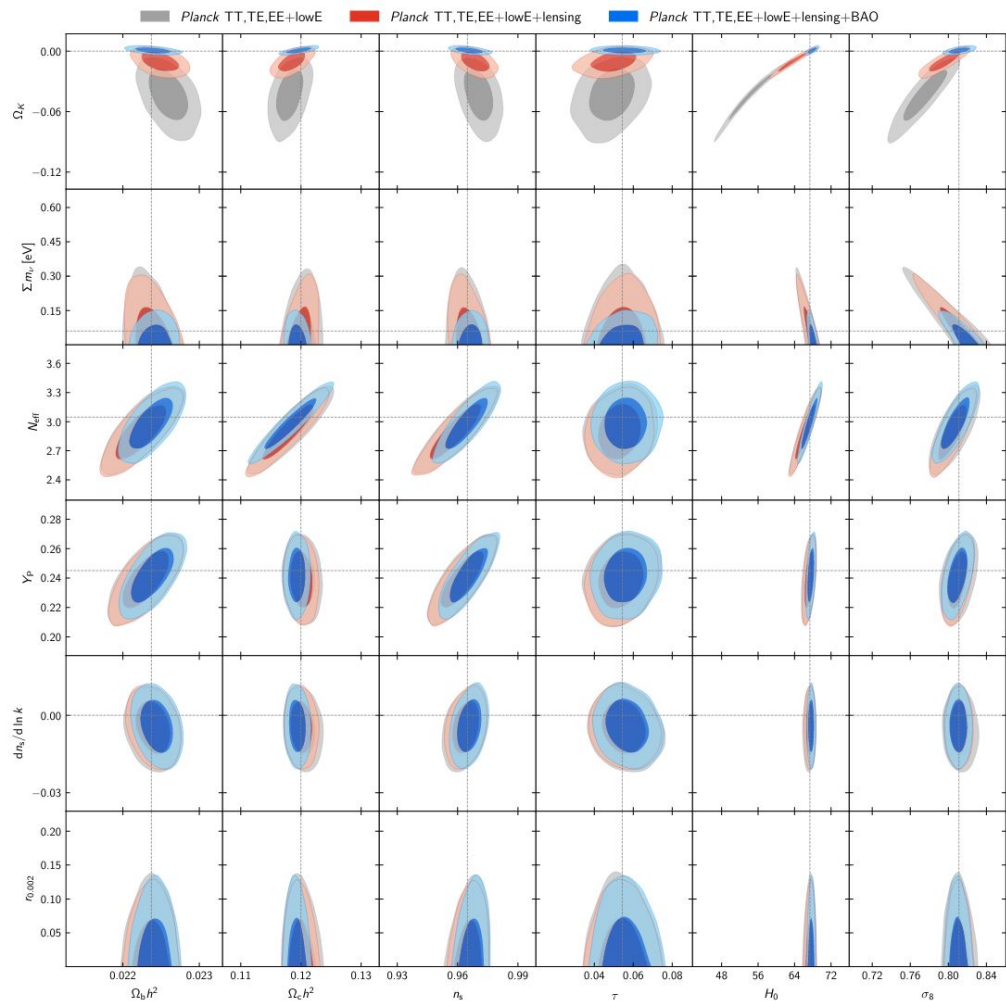
Restricciones con Planck



Planck Collaboration VI (2018)

Extensiones a Λ CDM según Planck

No hay evidencia de necesidad de extensiones al modelo base de 6 parámetros (más la temperatura establecida por COBE).



Experimentos de alta resolución en la Tierra

Con el objetivo de caracterizar las anisotropías secundarias en gran detalle para mejorar restricciones a parámetros cosmológicos (en Λ CDM y extensiones), han surgido en los últimos 15 años un gran número de experimentos que observan el CMB desde la Tierra. Estos se pueden dividir gruesamente en dos grupos:

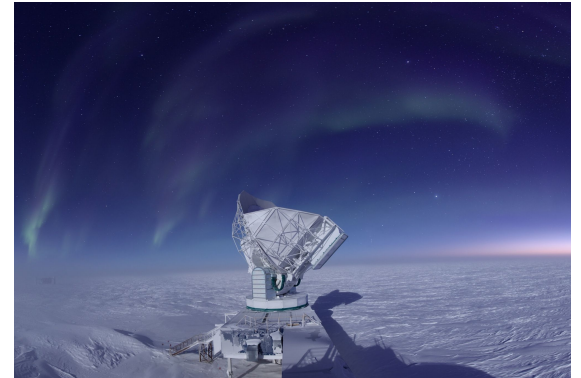
- Experimentos de alta resolución ($\sim 1'$), observando grandes zonas del cielo para caracterizar las anisotropías secundarias, particularmente los efectos Sunyaev-Zel'dovich y lentes gravitacionales producto de la estructura a gran escala; y
- Experimentos de baja resolución ($\sim 30'$), observando zonas más reducidas del cielo pero con mucha profundidad, con el objetivo de medir el efecto de lente gravitacional primordial, producido por las ondas gravitacionales generadas durante el Big Bang.

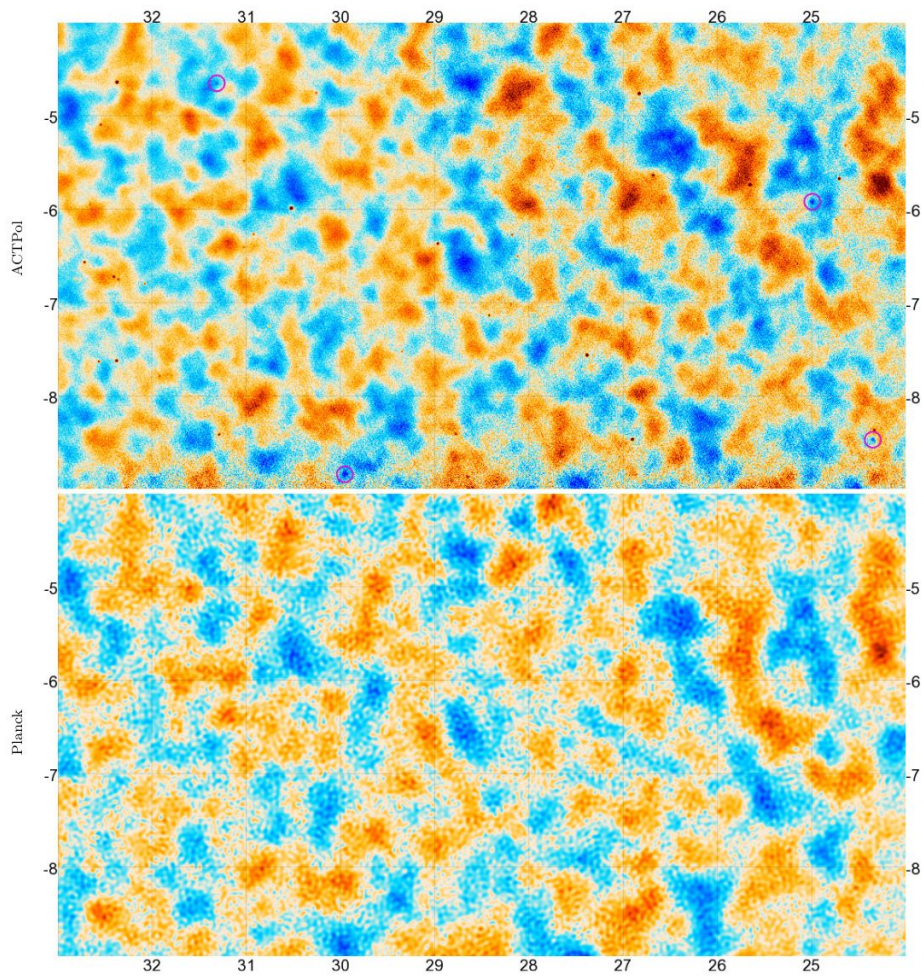
(Esta sección será muy bien complementada por el coloquio de este miércoles, por Rolando Dünner.)

Alta resolución: ACT y SPT

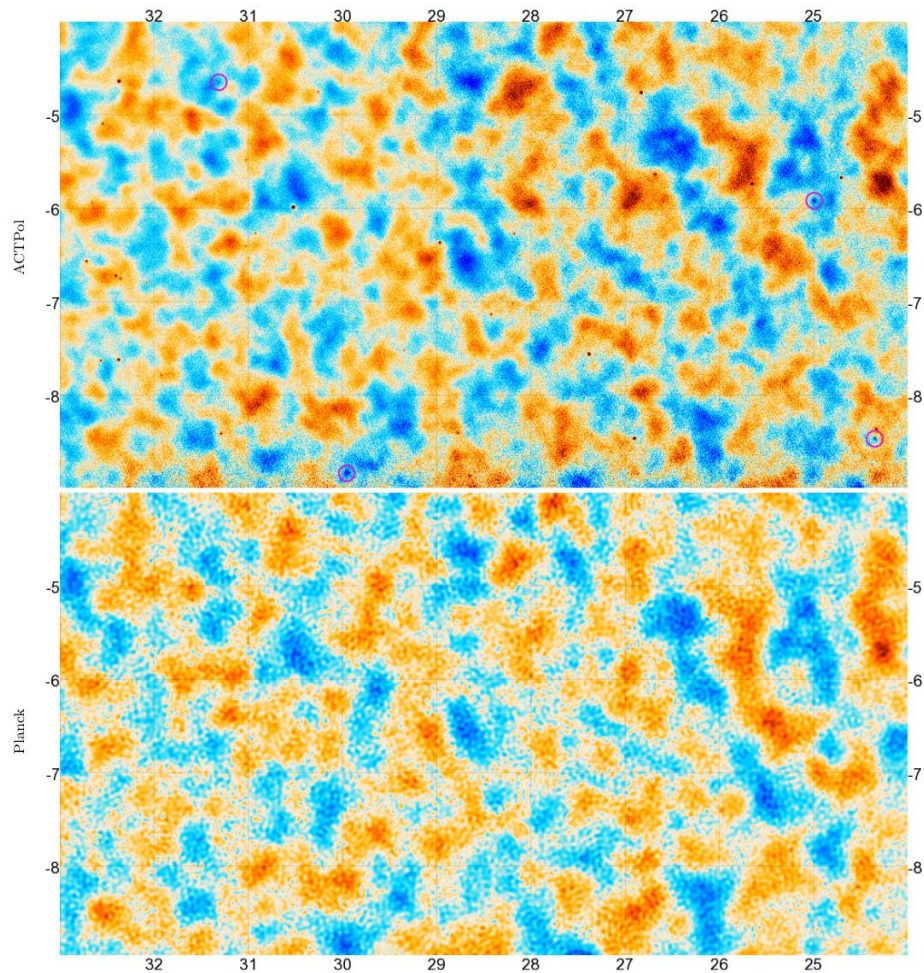
Los dos grandes telescopios de CMB a alta resolución son el **Atacama Cosmology Telescope** (Chile, 6 m diámetro) y el **South Pole Telescope** (10 m diámetro). Se dedican a observar fracciones importantes del cielo extragaláctico ($f_{\text{sky}} > 10\%$) con altas resoluciones ($\sim 1'$), para medir con precisión las fluctuaciones secundarias y la cola de amortiguamiento.

Entre otras cosas, han revolucionado el estudio de cúmulos de galaxias con el efecto tSZ y mediciones de lente gravitacional a escalas pequeñas en el fondo cósmico, aunque las restricciones de parámetros cosmológicos siguen, hasta la fecha, dominados por Planck.

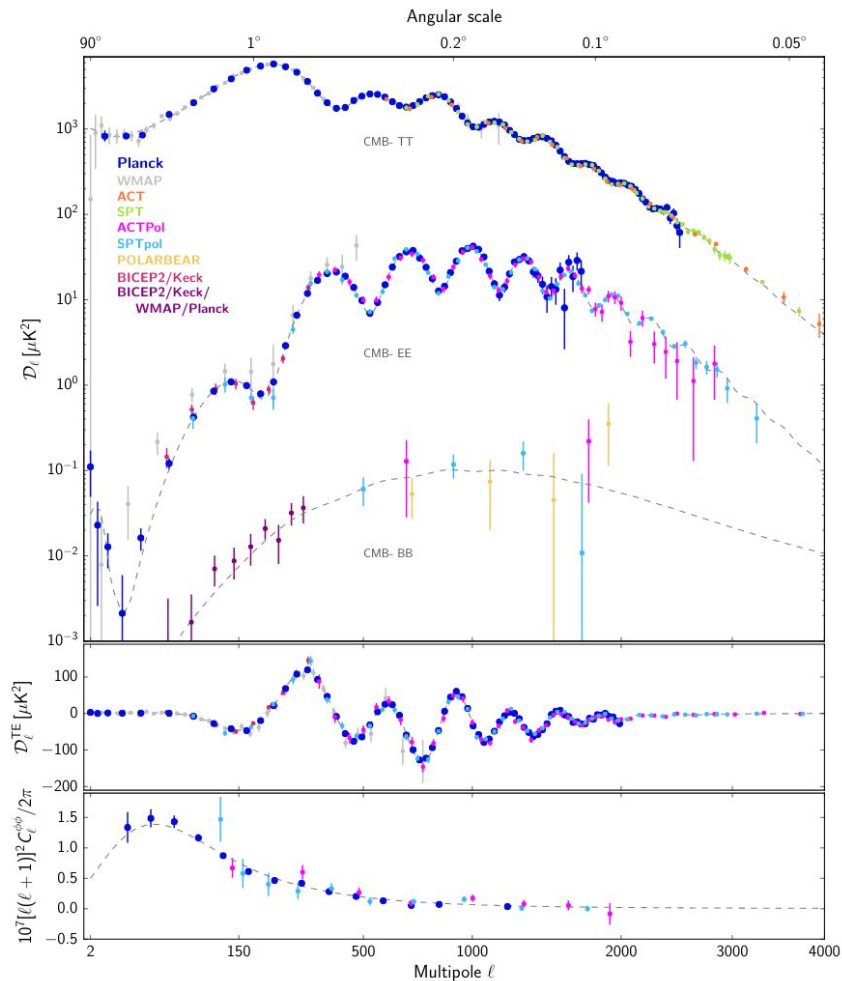




Louis et al. (2017)



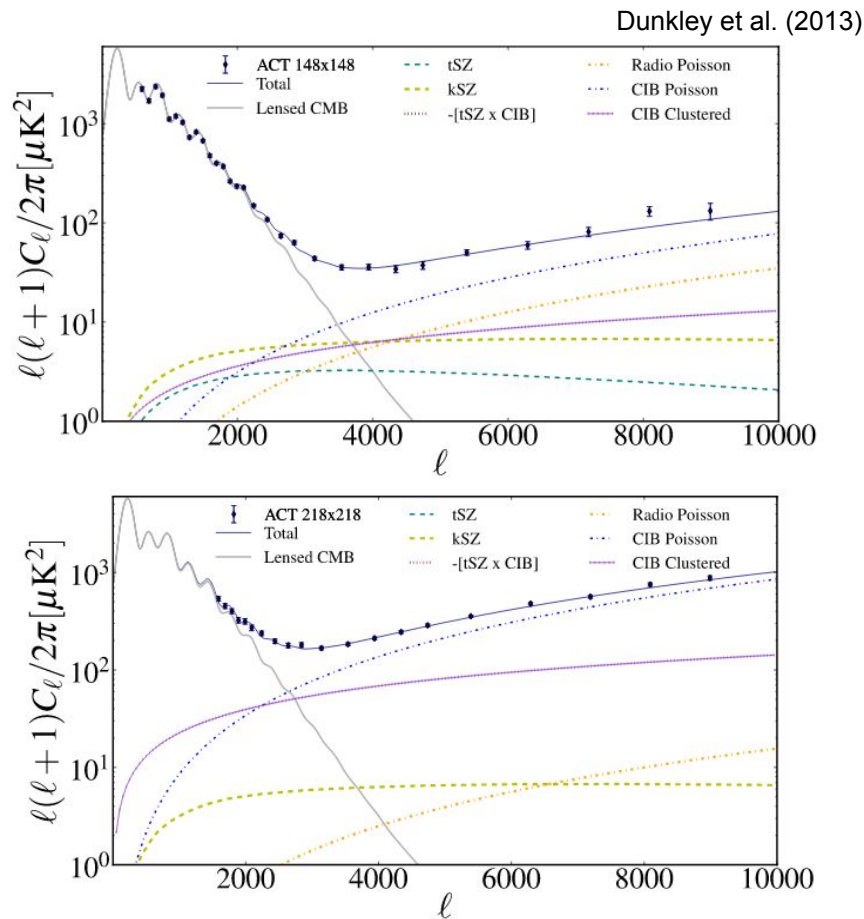
Louis et al. (2017)



Espectros de potencias

Pasado $l \sim 3000$, la señal deja de estar dominada por el fondo cósmico y en cambio está dominada por fuentes individuales.

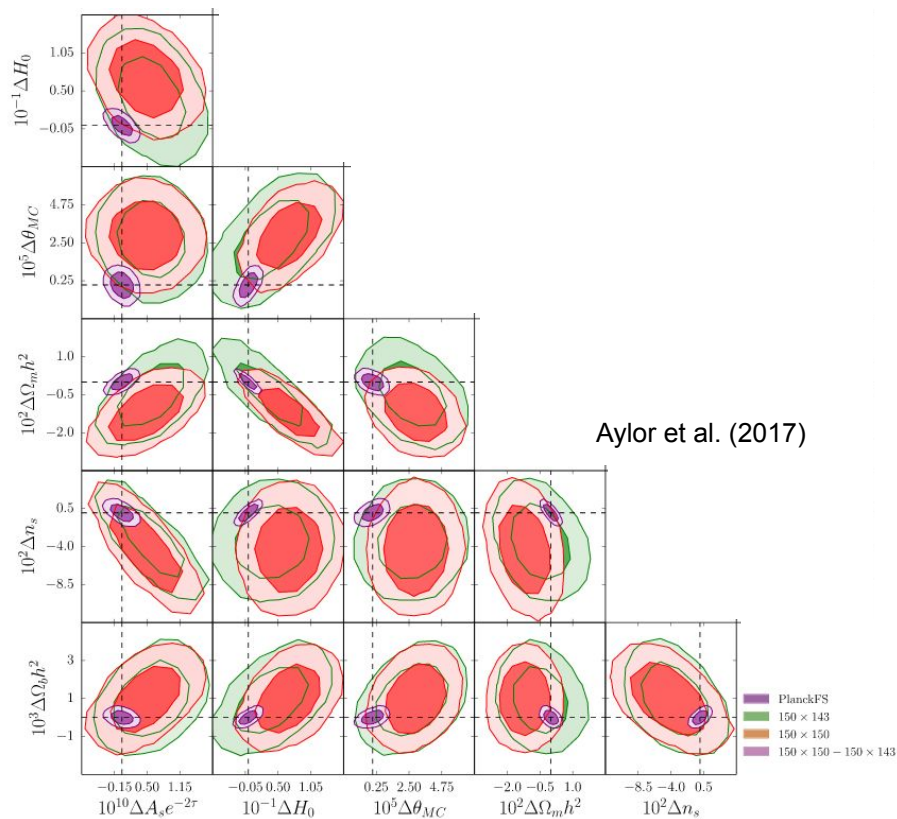
Como ya hemos visto durante el curso, son todos estos componentes los que ACT y SPT han logrado determinar con mayor precisión.



Parámetros cosmológicos con SPT

A la derecha, diferencias entre parámetros cosmológicos obtenidos con 2500 deg² observados a 150 GHz por SPT, con los obtenidos por Planck.

Los parámetros cosmológicos medidos con estos experimentos no son competitivos con Planck, todavía, pero ambos telescopios están en este momento operando con su tercera generación de detectores (AdvancedACT y SPT-3G), y prometen entregar resultados significativamente más precisos en el futuro cercano.



Baja resolución: BICEP/Keck Array

Para buscar polarización producida por ondas gravitacionales primordiales no es necesaria una resolución tan alta, y en cambio se gana mucho más optimizando la sensibilidad del experimento en escalas intermedias ($\sim 1\text{-}10^\circ$).

En 2014, el equipo del Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization (BICEP) reportó la detección de polarización producto de ondas gravitacionales primordiales, pero durante el proceso de revisión del artículo se descubrió que la totalidad de esta detección podía deberse a contribución de polvo Galáctico que había sido incorporado erróneamente al análisis.

Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization



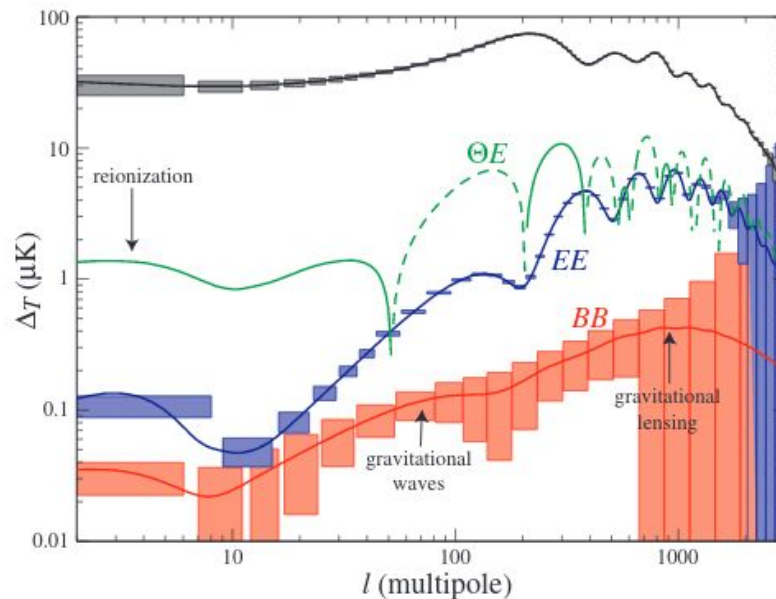
Keck Array



Razón tensor-escalar (y una historia de cautela)

El principal objetivo de experimentos como BICEP y Keck Array es detectar lentes gravitacionales producidos por ondas gravitacionales primordiales. De existir, este efecto sería más prominente en polarización, a través de los modos B generados únicamente por polarización*, a escalas de algunos grados en el cielo. Su amplitud es menor a 1% de la amplitud del espectro de temperatura a escalas similares.

La amplitud de estas ondas gravitacionales está codificada en la **razón tensor-escalar**, r , que depende de la escala energética de la inflación.



Crédito: Wayne Hu

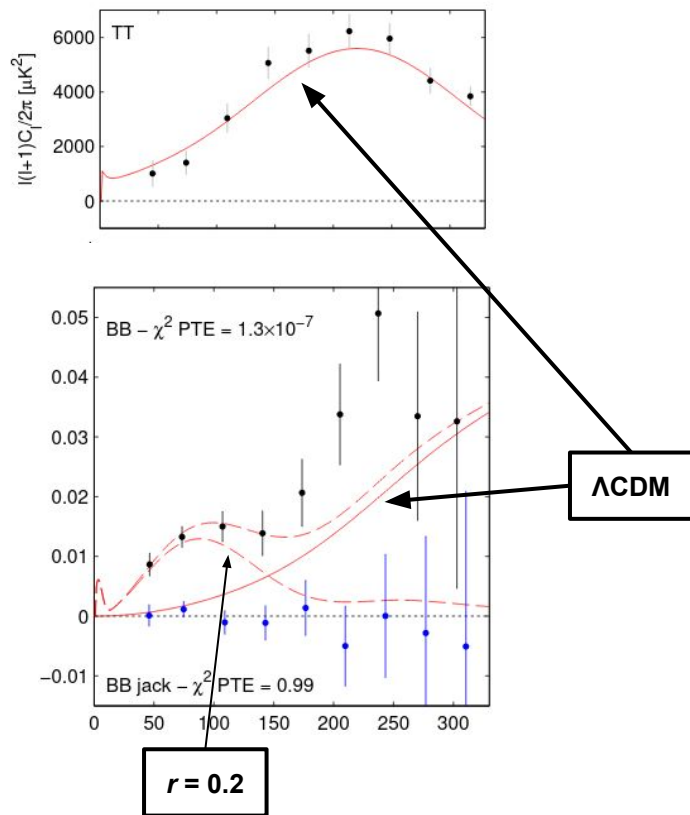
BICEP2 I: DETECTION OF B -mode POLARIZATION AT DEGREE ANGULAR SCALES

BICEP2 COLLABORATION - P. A. R. ADE¹, R. W. AIKIN², D. BARKATS³, S. J. BENTON⁴, C. A. BISCHOFF⁵, J. J. BOCK^{2,6}, J. A. BREVIK², I. BUDER⁵, E. BULLOCK⁷, C. D. DOWELL⁶, L. DUBAND⁸, J. P. FILIPPINI², S. FLIESCHER⁹, S. R. GOLWALA², M. HALPERN¹⁰, M. HASSELFIELD¹⁰, S. R. HILDEBRANDT^{2,6}, G. C. HILTON¹¹, V. V. HRISTOV², K. D. IRWIN^{12,13,11}, K. S. KARKARE⁵, J. P. KAUFMAN¹⁴, B. G. KEATING¹⁴, S. A. KERNASOVSKIY¹², J. M. KOVAC^{5,16}, C. L. KUO^{12,13}, E. M. LEITCH¹⁵, M. LUEKER², P. MASON², C. B. NETTERFIELD⁴, H. T. NGUYEN⁶, R. O'BRIENT⁶, R. W. OGBURN IV^{12,13}, A. ORLANDO¹⁴, C. PRYKE^{9,7,16}, C. D. REINTSEMA¹¹, S. RICHTER⁵, R. SCHWARZ⁹, C. D. SHEEHY^{9,15}, Z. K. STANISZEWSKI^{2,6}, R. V. SUDIWALA¹, G. P. TEPLY², J. E. TOLAN¹², A. D. TURNER⁶, A. G. VIEREGG^{5,15}, C. L. WONG⁵, AND K. W. YOON^{12,13}

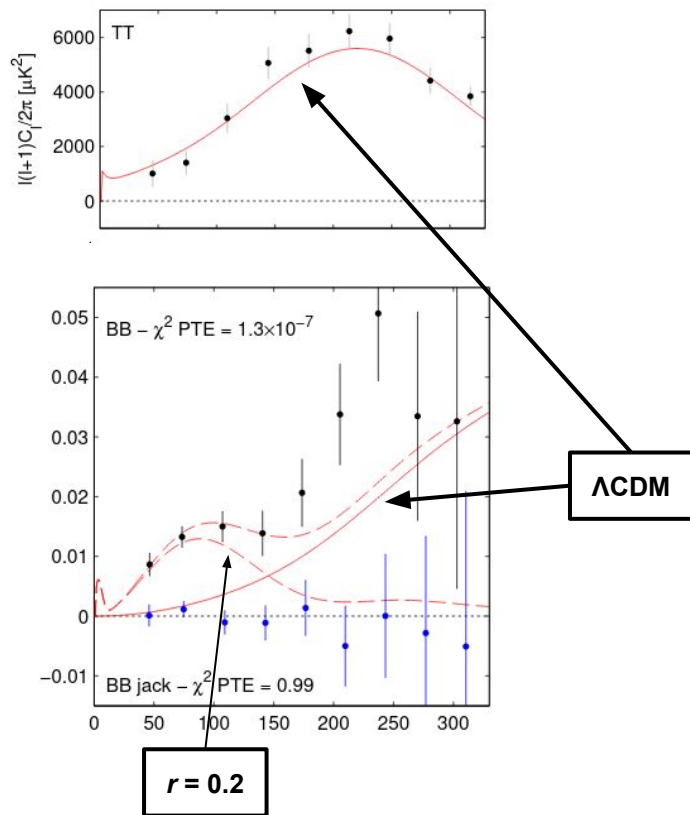
to be submitted to a journal TBD

We report results from the BICEP2 experiment, a Cosmic Microwave Background (CMB) polarimeter specifically designed to search for the signal of inflationary gravitational waves in the B -mode power spectrum around $\ell \sim 80$. The telescope comprised a 26 cm aperture all-cold refracting optical system equipped with a focal plane

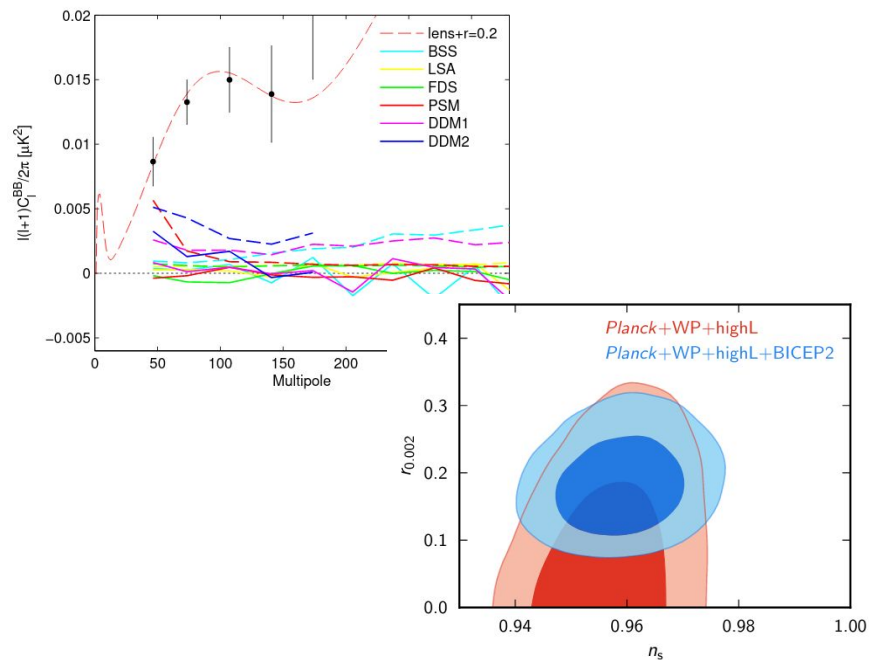
El equipo BICEP encontró un exceso de señal en BB
justo a las escalas que esperaríamos la señal
producida por ondas gravitacionales primordiales.



El equipo BICEP encontró un exceso de señal en BB justo a las escalas que esperaríamos la señal producida por ondas gravitacionales primordiales.



Argumentaron que ninguno de los modelos de polarización Galáctica (por polvo, sincrotrón, etc.) podía explicar los resultados, y que por lo tanto su señal era confirmación experimental de ondas gravitacionales producidas durante la inflación.



BICEP2 I: DETECTION OF B -mode POLARIZATION AT DEGREE ANGULAR SCALES

BICEP2 COLLABORATION - P. A. R. ADE¹, R. W. AIKIN², D. BARKATS³, S. J. BENTON⁴, C. A. BISCHOFF⁵, J. J. BOCK^{2,6}, J. A. BREVIK², I. BUDER⁵, E. BULLOCK⁷, C. D. DOWELL⁶, L. DUBAND⁸, J. P. FILIPPINI², S. FLIESCHER⁹, S. R. GOLWALA², M. HALPERN¹⁰, M. HASSELFIELD¹⁰, S. R. HILDEBRANDT^{2,6}, G. C. HILTON¹¹, V. V. HRISTOV², K. D. IRWIN^{12,13,11}, K. S. KARKARE⁵, J. P. KAUFMAN¹⁴, B. G. KEATING¹⁴, S. A. KERNASOVSKIY¹², J. M. KOVAC^{5,16}, C. L. KUO^{12,13}, E. M. LEITCH¹⁵, M. LUEKER², P. MASON², C. B. NETTERFIELD⁴, H. T. NGUYEN⁶, R. O'BRIENT⁶, R. W. OGBURN IV^{12,13}, A. ORLANDO¹⁴, C. PRYKE^{9,7,16}, C. D. REINTSEMA¹¹, S. RICHTER⁵, R. SCHWARZ⁹, C. D. SHEEHY^{9,15}, Z. K. STANISZEWSKI^{2,6}, R. V. SUDIWALA¹, G. P. TEPLY², J. E. TOLAN¹², A. D. TURNER⁶, A. G. VIEREGG^{5,15}, C. L. WONG⁵, AND K. W. YOON^{12,13}

to be submitted to a journal TBD

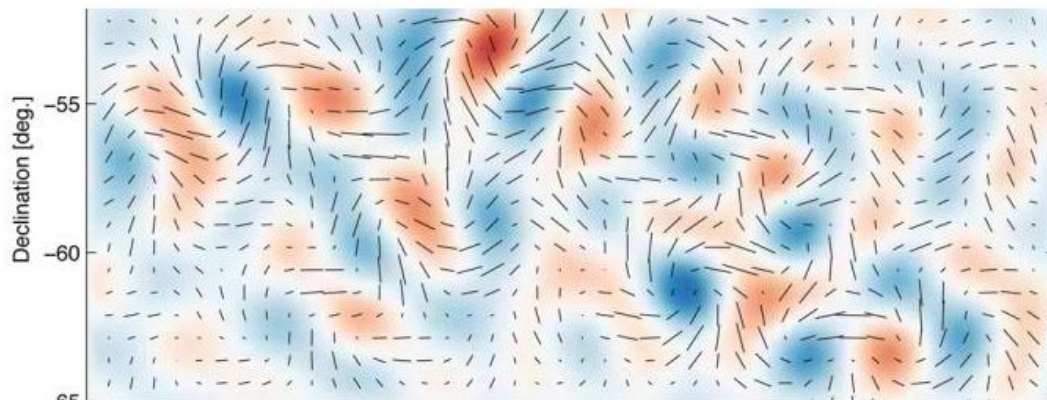
We report results from the BICEP2 experiment, a Cosmic Microwave Background (CMB) polarimeter specifically designed to search for the signal of inflationary gravitational waves in the B -mode power spectrum around $\ell \sim 80$. The telescope comprised a 26 cm aperture all-cold refracting optical system equipped with a focal plane

disfavoring synchrotron or dust at 2.3σ and 2.2σ , respectively. The observed B -mode power spectrum is well-fit by a lensed- Λ CDM + tensor theoretical model with tensor/scalar ratio $r = 0.20^{+0.07}_{-0.05}$, with $r = 0$ disfavored at 7.0σ . Subtracting the best available estimate for foreground dust modifies the likelihood slightly so that $r = 0$ is disfavored at 5.9σ .

First Direct Evidence of Cosmic Inflation

Release No.: 2014-05

For Release: Monday, March 17, 2014 - 10:45am



BICEP2 I: DETECTION OF B -mode POLARIZATION AT DEGREE ANGULAR SCALES

BICEP2 COLLABORATION - P. A. R. ADE¹, R. W. AIKIN², D. BARKATS³, S. J. BENTON⁴, C. A. BISCHOFF⁵, J. J. BOCK^{2,6}, J. A. BREVIK², I. BUDER⁵, E. BULLOCK⁷, C. D. DOWELL⁶, L. DUBAND⁸, J. P. FILIPPINI², S. FLIESCHER⁹, S. R. GOLWALA², M. HALPERN¹⁰, M. HASSELFIELD¹⁰, S. R. HILDEBRANDT^{2,6}, G. C. HILTON¹¹, V. V. HRISTOV², K. D. IRWIN^{12,13,11}, K. S. KARKARE⁵, J. P. KAUFMAN¹⁴, B. G. KEATING¹⁴, S. A. KERNASOVSKIY¹², J. M. KOVAC^{5,16}, C. L. KUO^{12,13}, E. M. LEITCH¹⁵, M. LUEKER², P. MASON², C. B. NETTERFIELD⁴, H. T. NGUYEN⁶, R. O'BRIENT⁶, R. W. OGBURN IV^{12,13}, A. ORLANDO¹⁴, C. PRYKE^{9,7,16}, C. D. REINTSEMA¹¹, S. RICHTER⁵, R. SCHWARZ⁹, C. D. SHEEHY^{9,15}, Z. K. STANISZEWSKI^{2,6}, R. V. SUDIWALA¹, G. P. TEPLY², J. E. TOLAN¹², A. D. TURNER⁶, A. G. VIEREKG^{5,15}, C. L. WONG⁵, AND K. W. YOON^{12,13}

to be submitted to a journal TBD

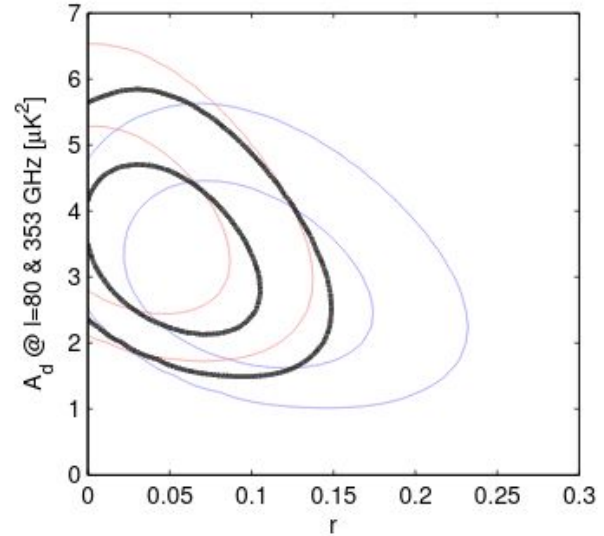
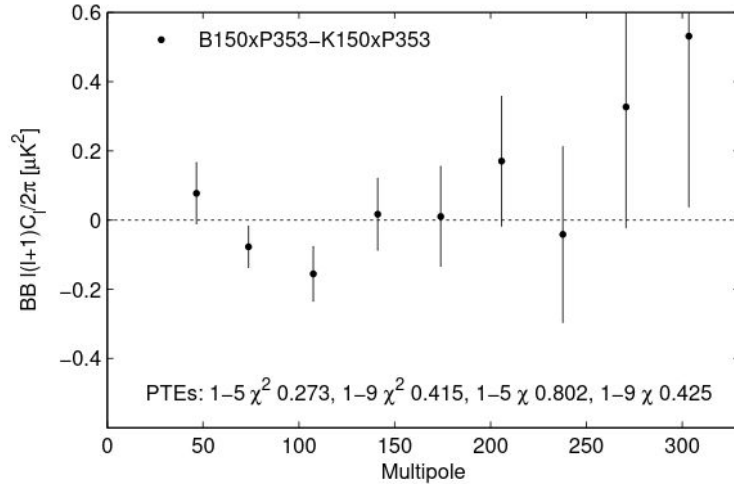
We report results from the BICEP2 experiment, a Cosmic Microwave Background (CMB) polarimeter specifically designed to search for the signal of inflationary gravitational waves in the B -mode power spectrum around $\ell \sim 80$. The telescope comprised a 26 cm aperture all-cold refracting optical system equipped with a focal plane

~~disfavoring synchrotron or dust at 2.3σ and 2.2σ , respectively. The observed B -mode power spectrum is well-fit by a lensed- Λ CDM + tensor theoretical model with tensor-to-scalar ratio $r = 0.20^{+0.07}_{-0.05}$, with $r = 0$ disfavored at 7.0σ . Subtracting the best available estimate for foreground dust modifies the likelihood slightly so that $r = 0$ is disfavored at 5.9σ .~~

at 1.7σ . The observed B -mode power spectrum is well fit by a lensed- Λ CDM + tensor theoretical model with tensor-to-scalar ratio $r = 0.20^{+0.07}_{-0.05}$, with $r = 0$ disfavored at 7.0σ . Accounting for the contribution of foreground dust will shift this value downward by an amount which will be better constrained with upcoming datasets.

A Joint Analysis of BICEP2/*Keck* Array and *Planck* Data

BICEP2/*Keck* and *Planck* Collaborations: P. A. R. Ade,¹ N. Aghanim,² Z. Ahmed,³ R. W. Aikin,⁴



Espectros de Planck y BICEP consistentes es inconsistente con detección de ondas gravitacionales por BICEP (Planck detecta sólo polvo!).

A Joint Analysis of BICEP2/*Keck Array* and *Planck* Data

BICEP2/*Keck* and *Planck* Collaborations: P. A. R. Ade,¹ N. Aghanim,² Z. Ahmed,³ R. W. Aikin,⁴

(Draft April 16, 2015)

We report the results of a joint analysis of data from BICEP2/*Keck Array* and *Planck*. BICEP2 and *Keck Array* have observed the same approximately 400 deg^2 patch of sky centered on RA 0h, Dec. -57.5° . The combined maps reach a depth of 57 nK deg in Stokes Q and U in a band centered at 150 GHz. *Planck* has observed the full sky in polarization at seven frequencies from 30 to 353 GHz, but much less deeply in any given region ($1.2 \mu\text{K deg}$ in Q and U at 143 GHz). We detect 150×353 cross-correlation in B -modes at high significance. We fit the single- and cross-frequency power spectra at frequencies $\geq 150 \text{ GHz}$ to a lensed- ΛCDM model that includes dust and a possible contribution from inflationary gravitational waves (as parameterized by the tensor-to-scalar ratio r), using a prior on the frequency spectral behavior of polarized dust emission from previous *Planck* analysis of other regions of the sky. We find strong evidence for dust and no statistically significant evidence for tensor modes. We probe various model variations and extensions, including adding a synchrotron component in combination with lower frequency data, and find that these make little difference to the r constraint. Finally we present an alternative analysis which is similar to a map-based cleaning of the dust contribution, and show that this gives similar constraints. The final result is expressed as a likelihood curve for r , and yields an upper limit $r_{0.05} < 0.12$ at 95% confidence. Marginalizing over dust and r , lensing B -modes are detected at 7.0σ significance.

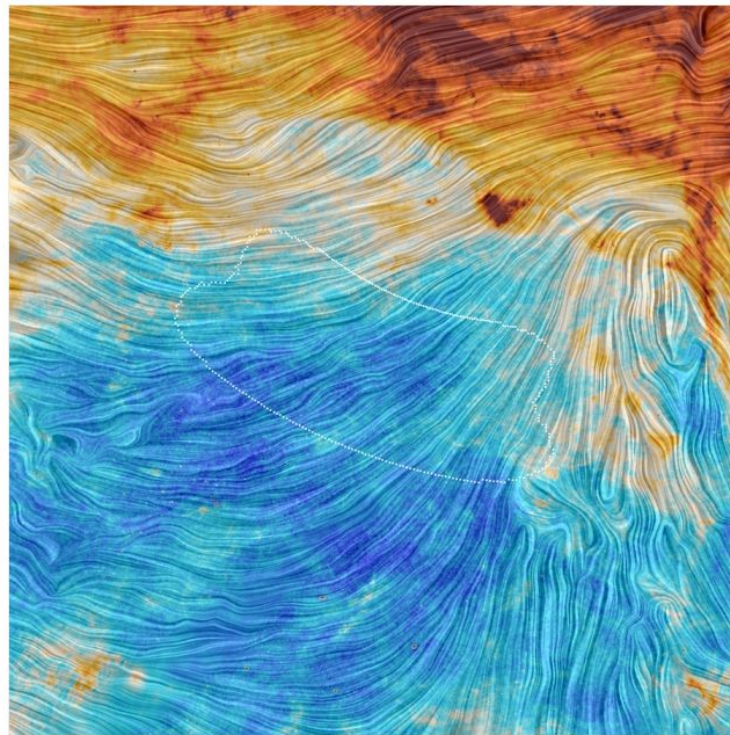
Gravitational waves discovery now officially dead

Combined data from South Pole experiment BICEP2 and Planck probe point to Galactic dust as confounding signal.

Ron Cowen

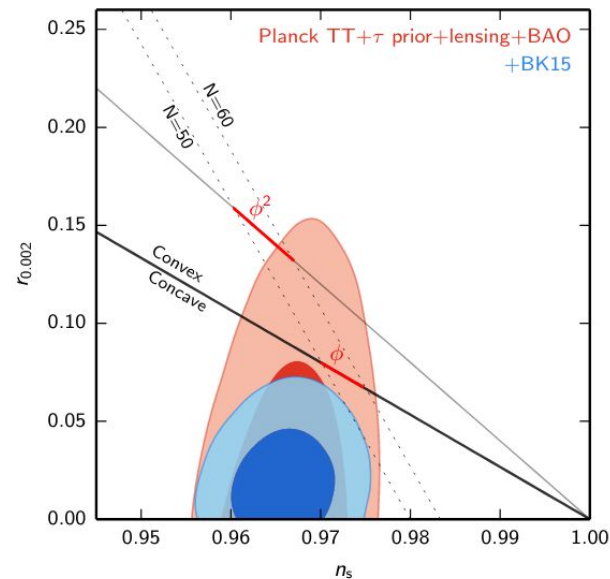
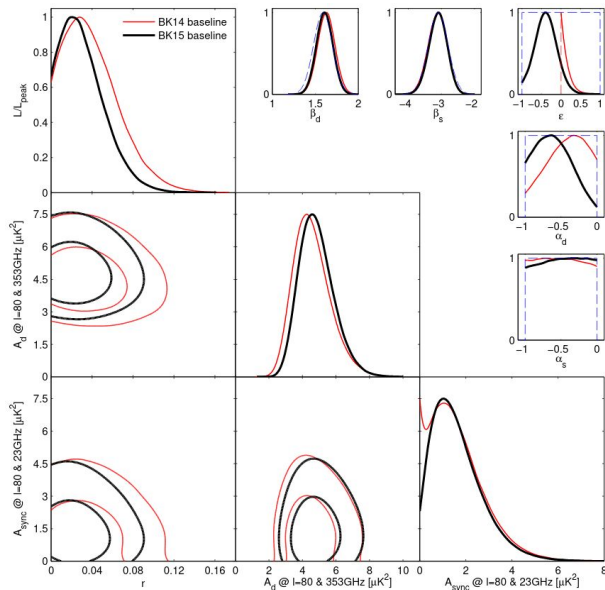
30 January 2015

 [Rights & Permissions](#)



Adelantando hasta 2018...

BICEP2 / *Keck* Array X: Constraints on Primordial Gravitational Waves using *Planck*, WMAP, and New BICEP2/*Keck* Observations through the 2015 Season



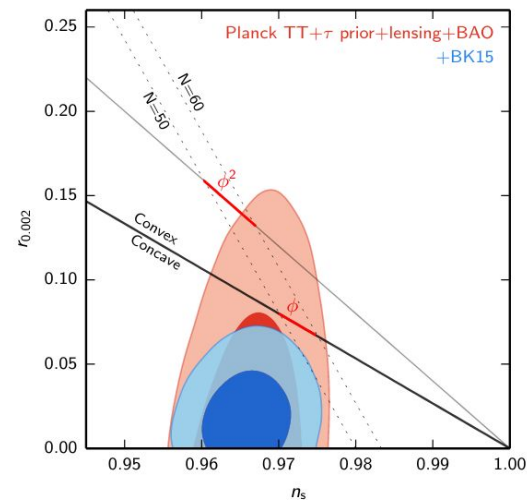
Adelantando hasta 2018...

BICEP2 / *Keck* Array X: Constraints on Primordial Gravitational Waves using *Planck*, WMAP, and New BICEP2/*Keck* Observations through the 2015 Season

The foreground model has seven parameters, and we impose priors on some of these using external information from *Planck* and WMAP derived from larger regions of sky. The model is shown to be an adequate description of the data at the current noise levels. The likelihood analysis yields the constraint $r_{0.05} < 0.07$ at 95% confidence, which tightens to $r_{0.05} < 0.06$ in conjunction with *Planck* temperature measurements and other data. The lensing signal is detected at 8.8σ significance. Running maximum likelihood search on simulations we obtain unbiased results and find that $\sigma(r) = 0.020$. These are the strongest constraints to date on primordial gravitational waves.

En resumen, aún no hay detección de ondas gravitacionales primordiales. La determinación más precisa de la razón tensor-escalar a la fecha, combinando Planck 2018 con BICEP/Keck Array implica $r < 0.056$ (95%), lo que permite descartar con cierta confianza clases de modelos inflacionarios, particularmente aquéllos con potenciales cóncavos ($V'' < 0$).

Sobre todo, hay que tener cuidado con entusiasmarse demasiado con resultados nuevos (especialmente los propios!) sin tener total certeza que se están considerando todas las posibilidades, e idealmente esperar a confirmación independiente. Pero estos descubrimientos están esperándonos!



Referencias

- Abazajian, K., et al., 2015. *Neutrino physics from the cosmic microwave background and large scale structure*. [APh, 63, 66](#)
- Aylor, K., et al., 2017. *A Comparison of Cosmological Parameters Determined from CMB Temperature Power Spectra from the South Pole Telescope and the Planck Satellite*. [ApJ, 850, 101](#)
- BICEP2 Collaboration, 2014. *Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2*. [PhRvL, 112, 1101](#)
- BICEP2/Keck Collaboration & Planck Collaboration, 2015. *Joint Analysis of BICEP2/Keck Array and Planck Data*. [PhRvL, 114, 1301](#)
- Dunkley, J., et al., 2013. *The Atacama Cosmology Telescope: likelihood for small-scale CMB data*. [JCAP, 07, 025](#)
- Keck Array and BICEP2 Collaborations, 2018. *Constraints on Primordial Gravitational Waves Using Planck, WMAP, and New BICEP2/Keck Observations through the 2015 Season*. [PhRvL, 121, 1301](#)
- Lesgourges, J., & Verde, L., 2019. *Neutrinos in Cosmology*. In [2020 Review of Particle Physics, P.A. Zyla et al.](#)
- Louis, T., et al., 2017. *The Atacama Cosmology Telescope: two-season ACTPol spectra and parameters*. [JCAP, 06, 031](#)
- Planck Collaboration, 2019. *Planck 2018 results. V, CMB power spectra and likelihoods*. [arXiv:1907.12875](#)
- Planck Collaboration, 2018. *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*. [arXiv:1807.06209](#)