

Bing Bang Nucleosynthesis (BBN)

Αρχέγονη Πυρηνοσύνθεση

$$m_p = 938.3 \text{ MeV} ; m_n = 939.6 \text{ MeV} \rightarrow \Delta m = 1.3 \text{ MeV}$$

- Παράγει (D, ^3He , ^4He , ^7Li , ...)
- Ξεκινάει $T \approx 0.3\text{MeV}$
- Τελειώνει $T \approx 0.1\text{MeV}$

- **1946** Gamov προτείνει την BBN
- **1948** Alpher απαιτεί radiation dominance
- **1949** Turkevich, Fermi δείχνουν ότι σταματάει σε $A=7$
- **1953** Alpher, Herman, Follin σχηματοποιούν την BBN
- **1965-67** Peebles, Wagoner, Fowler, Hoyle γράφουν κώδικα
- **1973** Από D παίρνουμε $\Omega_B < 0.1$
- **1998** WMAP και άλλα πειράματα αλλάζουν σελίδα

- Αρχικές συνθήκες $t = 10^{-2}s, T = 10\text{MeV}$
- Μη σχετικιστικοί βαθμοί ελευθερίας e^{\pm}, ν_i, γ
- Ασθενείς πυρηνικές δυνάμεις διατηρούν ισορροπία

- ν αποχωρίζεται σε $T = 2.7 \text{ MeV}$
- Ισορροπία n/p παγώνει σε $T = 0.8 \text{ MeV}$

$$\frac{n}{p} = \frac{X_n}{X_p} = \exp\left(-\frac{m_n - m_p}{T} + \frac{\mu_e - \mu_\nu}{T}\right) \approx \exp\left(-\frac{m_n - m_p}{T}\right) \approx \frac{1}{6}$$

$$\Gamma \approx G_F^2 T^5$$

$$n \leftrightarrow p + e^- + \bar{\nu},$$

$$\nu + n \leftrightarrow p + e^-,$$

$$e^+ + n \leftrightarrow p + \bar{\nu}$$

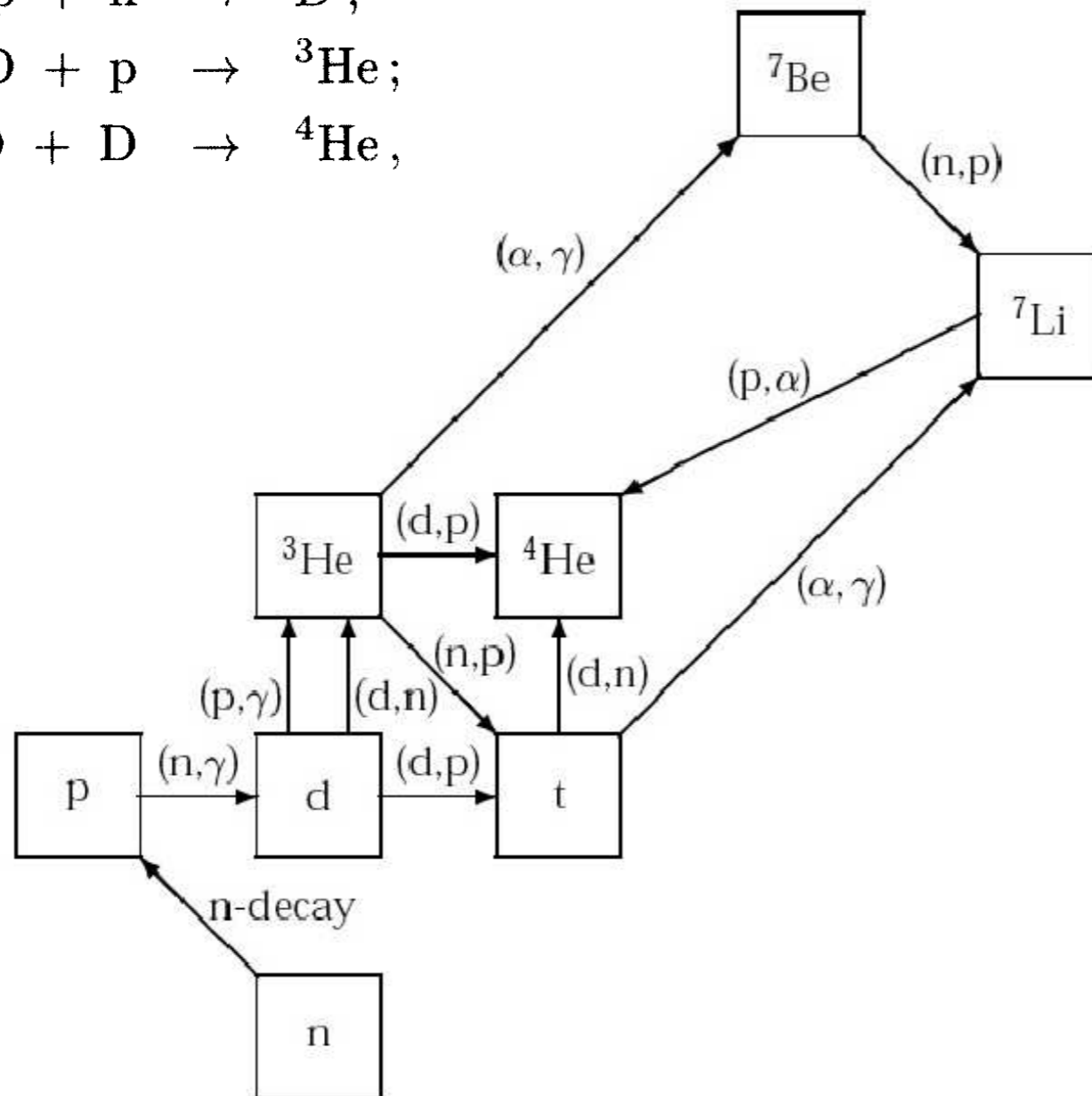
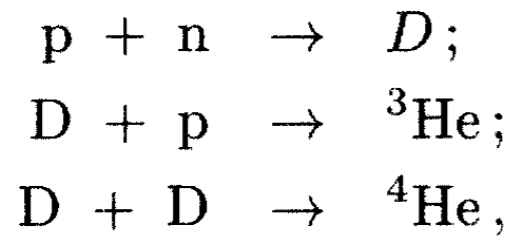
$$H \approx 1.66 g_*^{\frac{1}{2}} T^2 / m_{pl}$$

$$\Gamma/H \approx \left(\frac{T}{0.8 \text{ MeV}}\right)^3$$

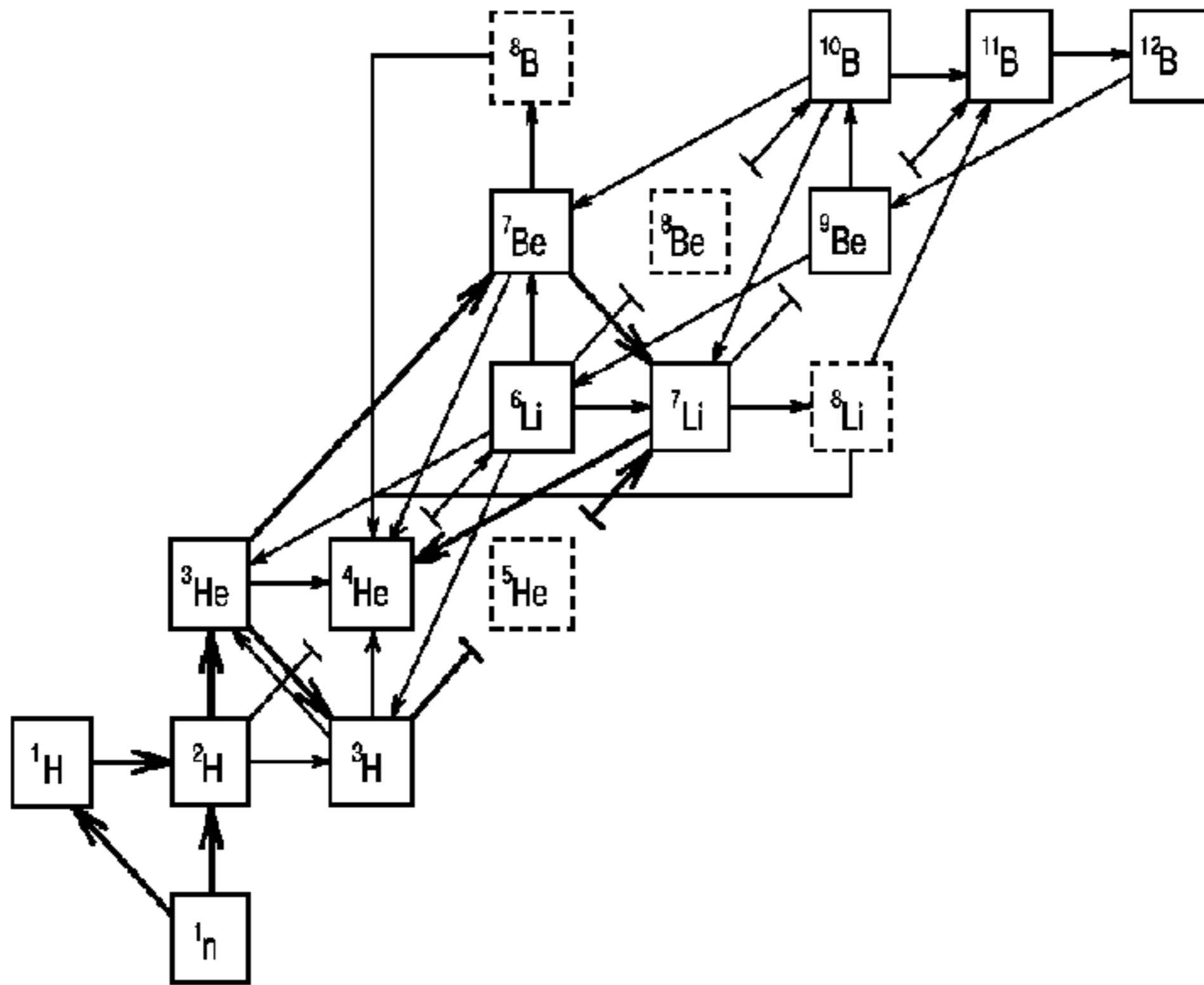
- Σε $T = 0.3 \text{ MeV}$ το d είναι πλέον σταθερό στην ακτινοβολία γ και έτσι ανοίγει το 'bottleneck' προς τα άλλα στοιχεία
- Τότε $\frac{n}{p} \rightarrow \frac{1}{7}$

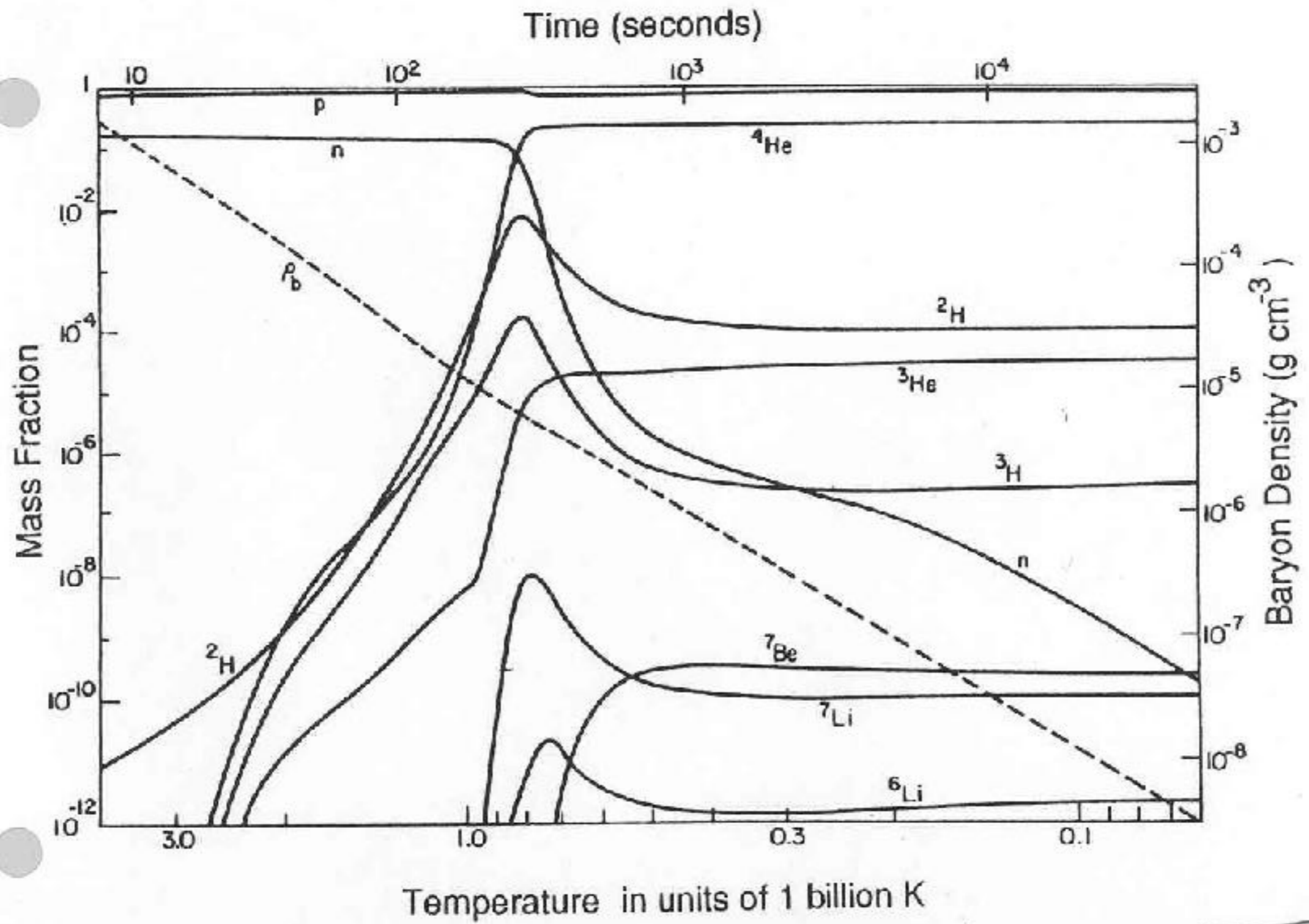
$$Y_p = \frac{4(n/2)}{n+p} \approx 0.25$$

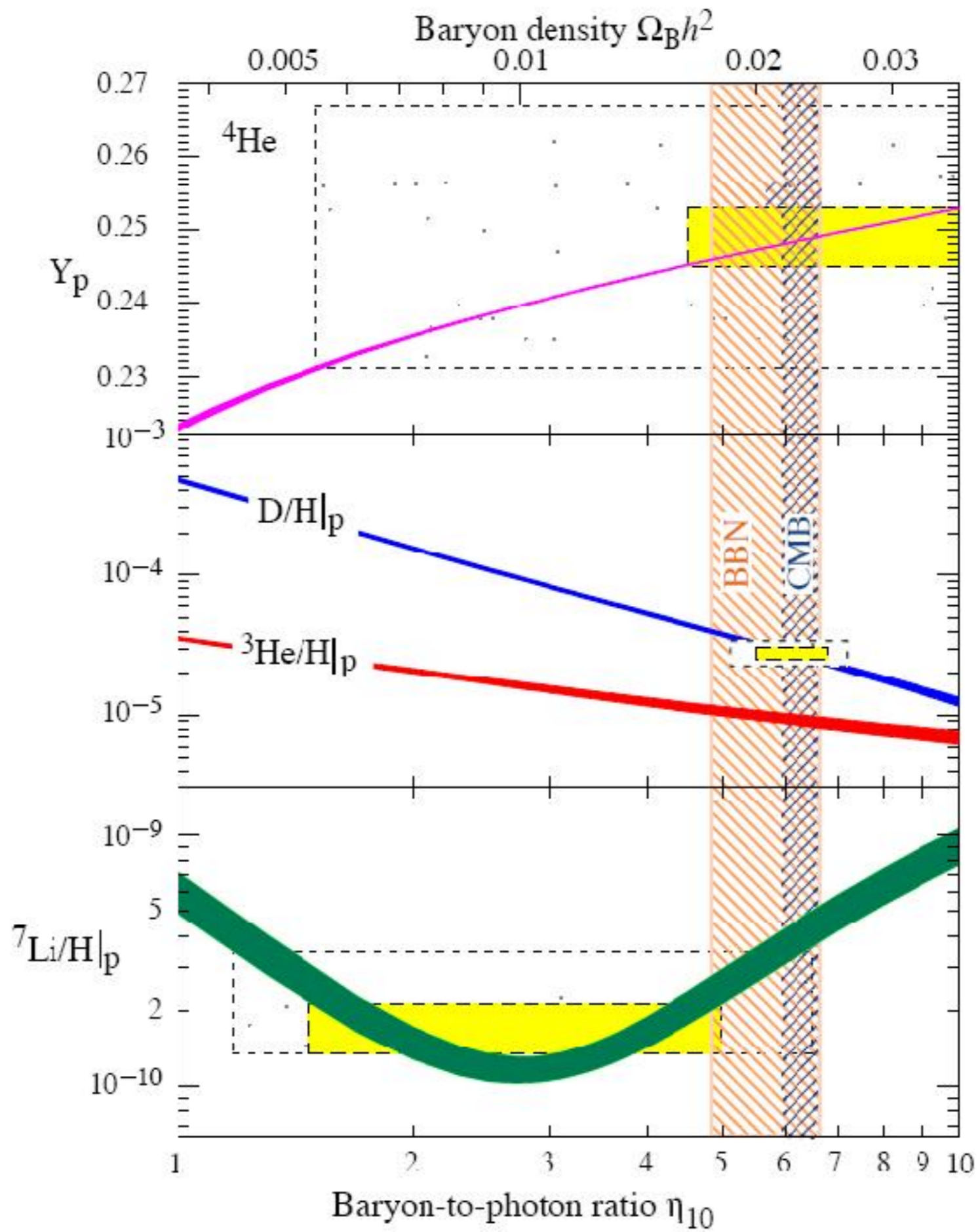
- Σε $T = 0.1 \text{ MeV}$ ή $t = 3 \text{ min}$ BBN σταματάει



- 11 Αντιδράσεις
- μη σταθεροί $A=5,8$
- Δύο κλάδη ${}^7\text{Li}$

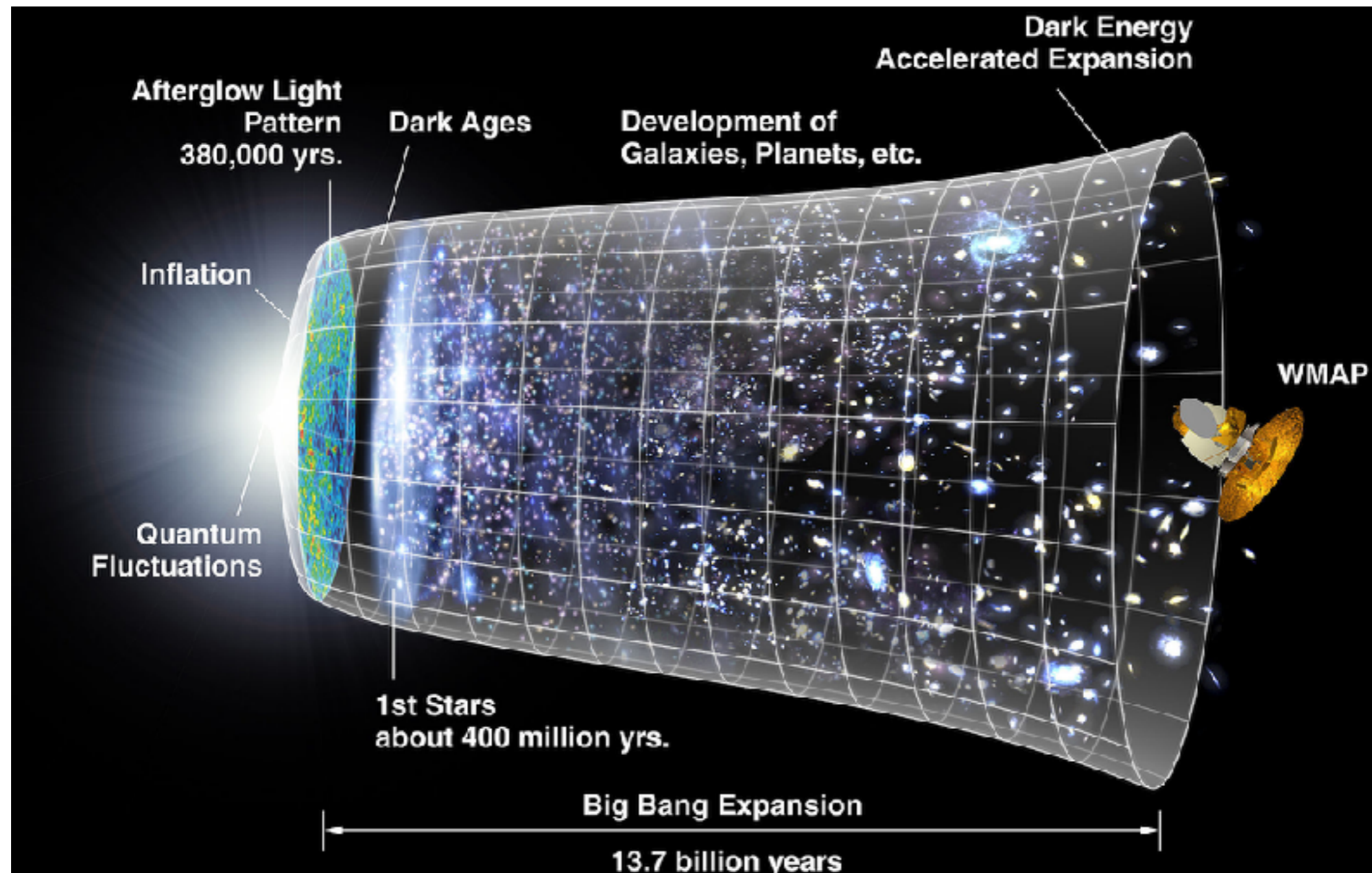






Cosmic Microwave Background (CMB)

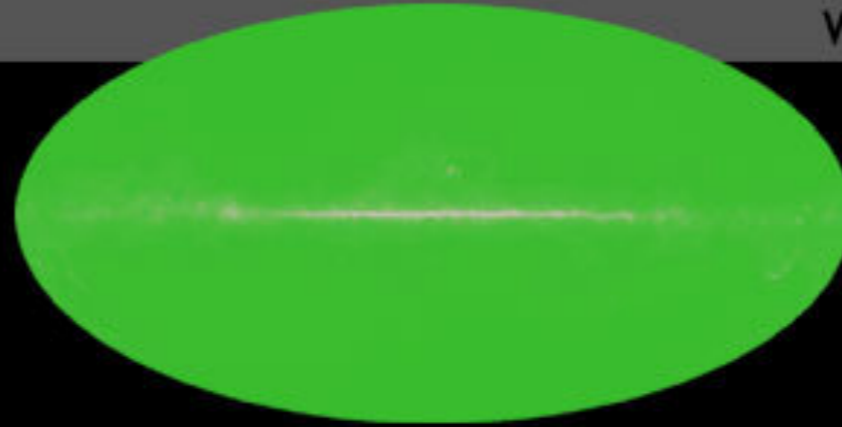
Ακτινοβολία κοσμικού υποβάθρου



1965



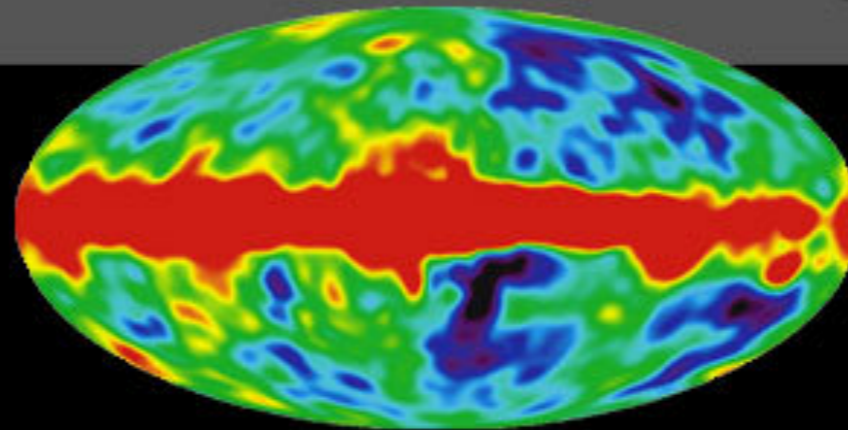
Penzias and Wilson



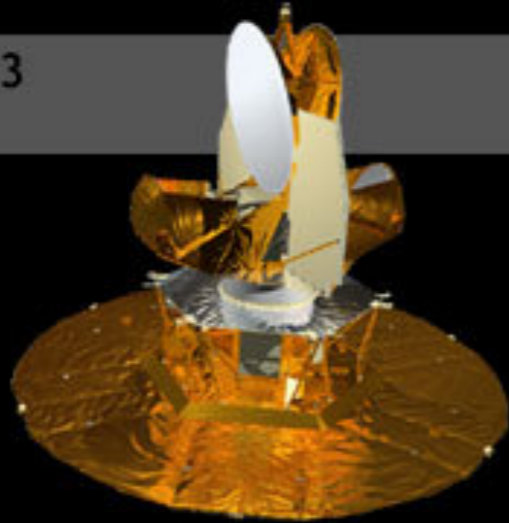
1992



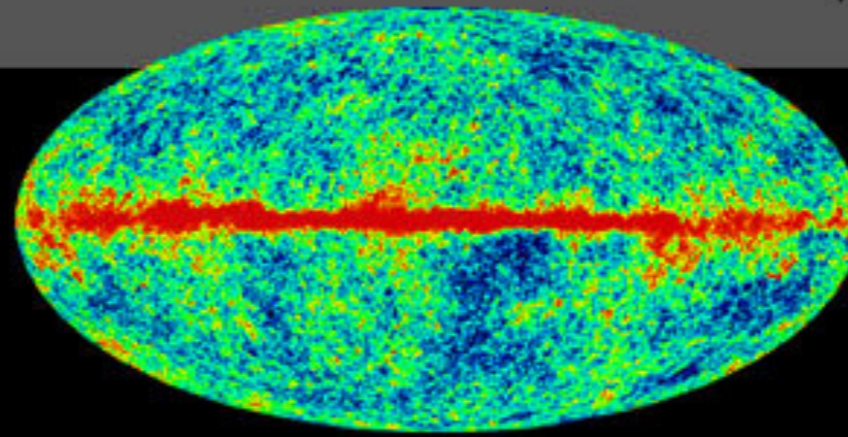
COBE

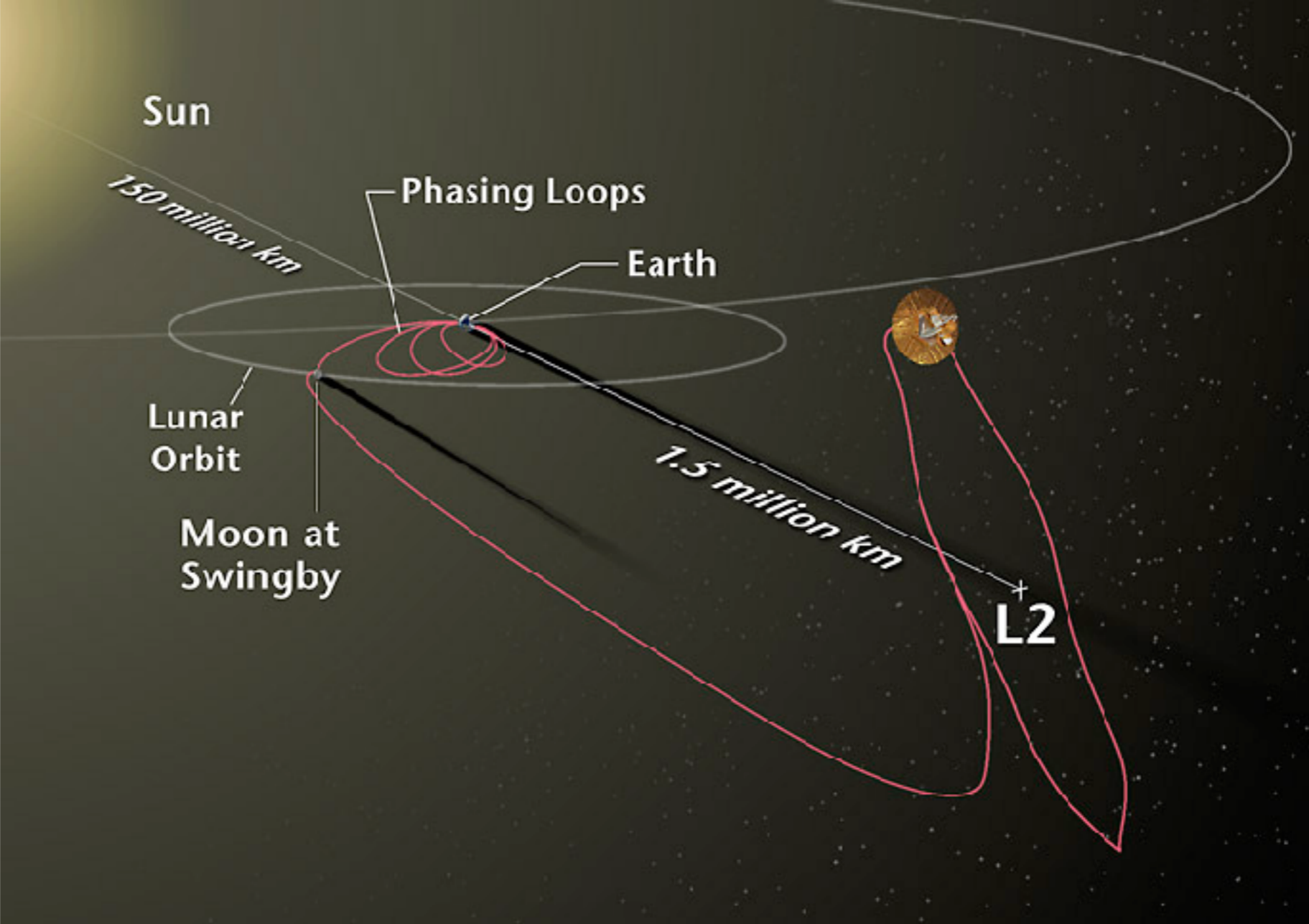


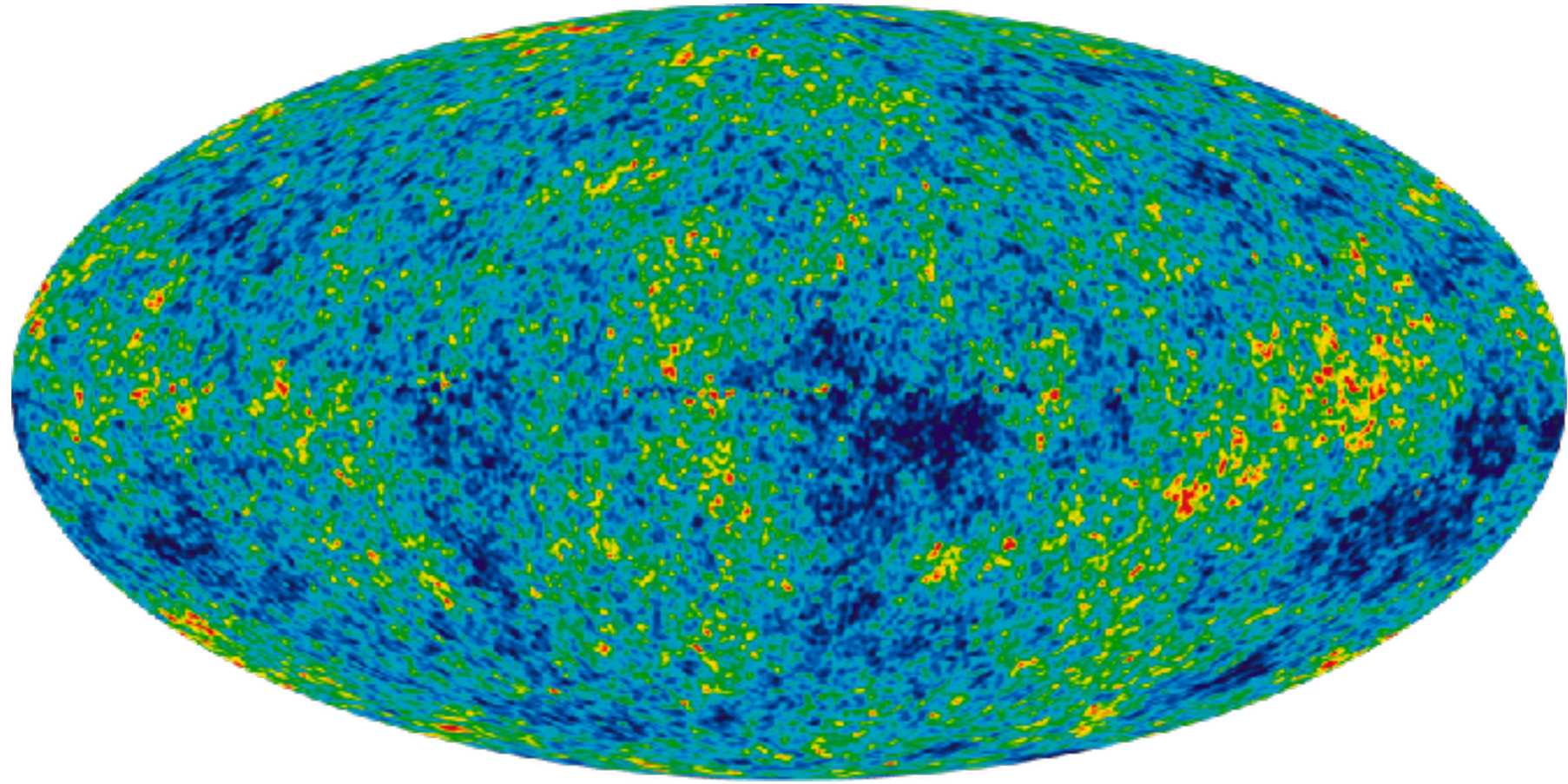
2003



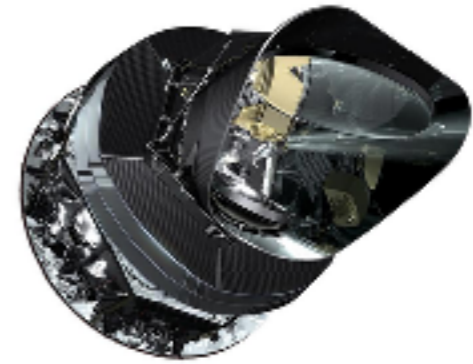
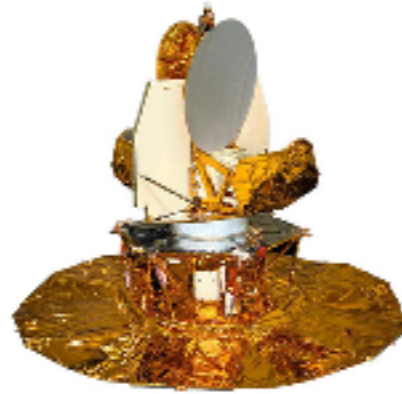
WMAP



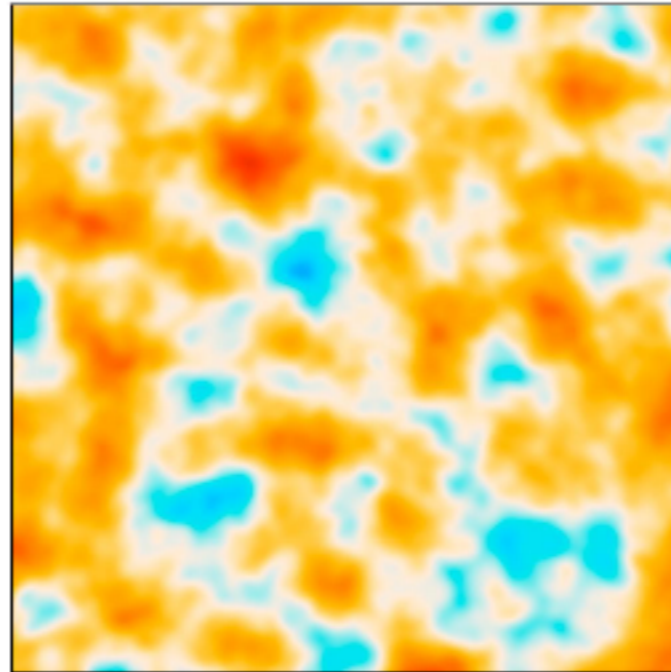




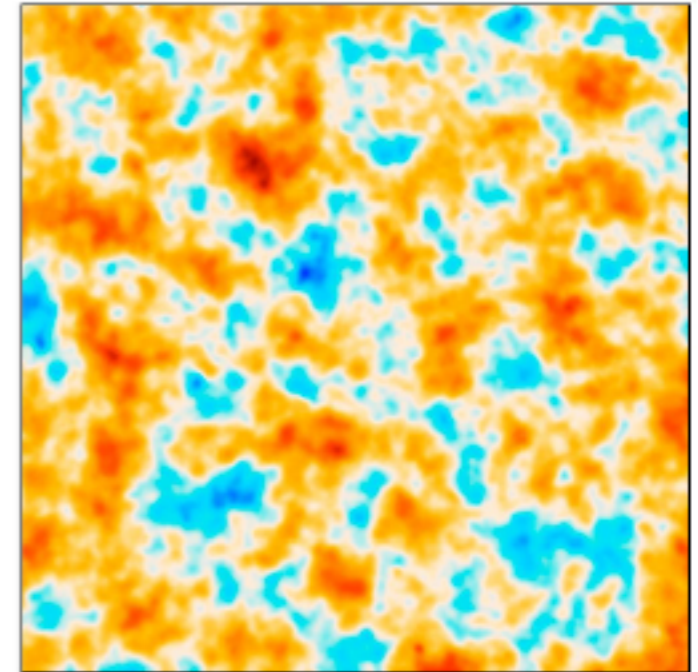
WMAP 2001-2010



COBE



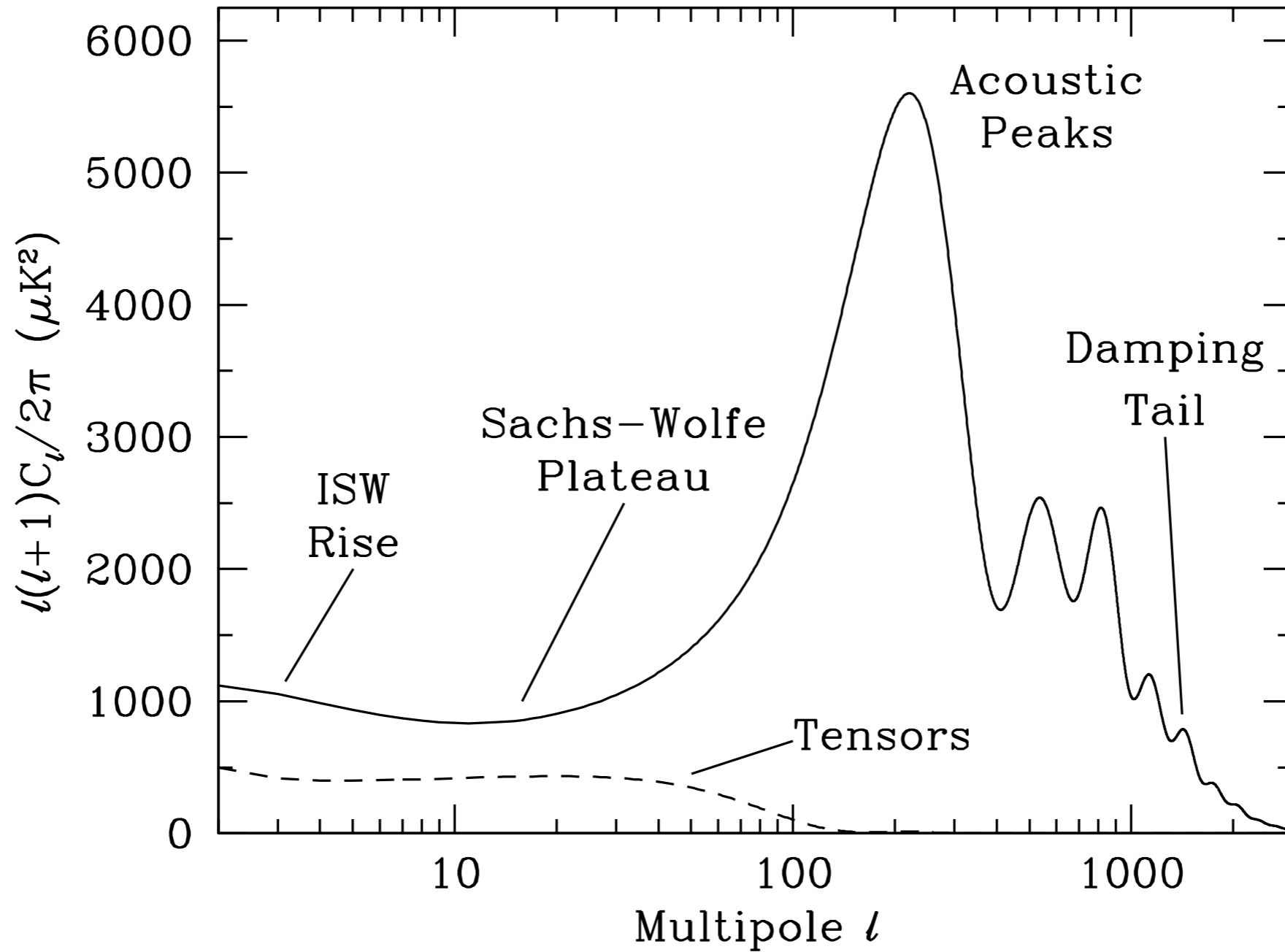
WMAP

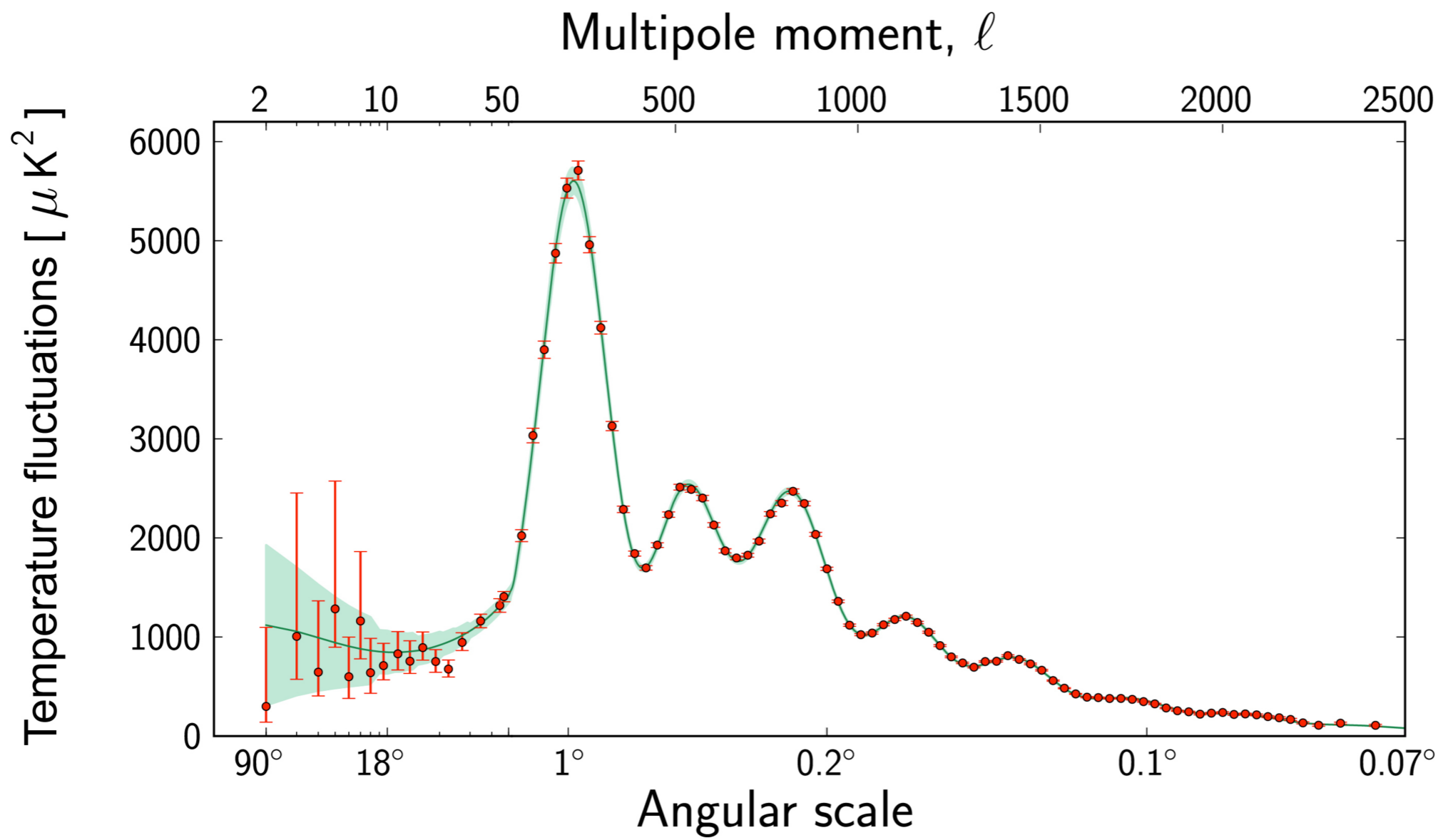


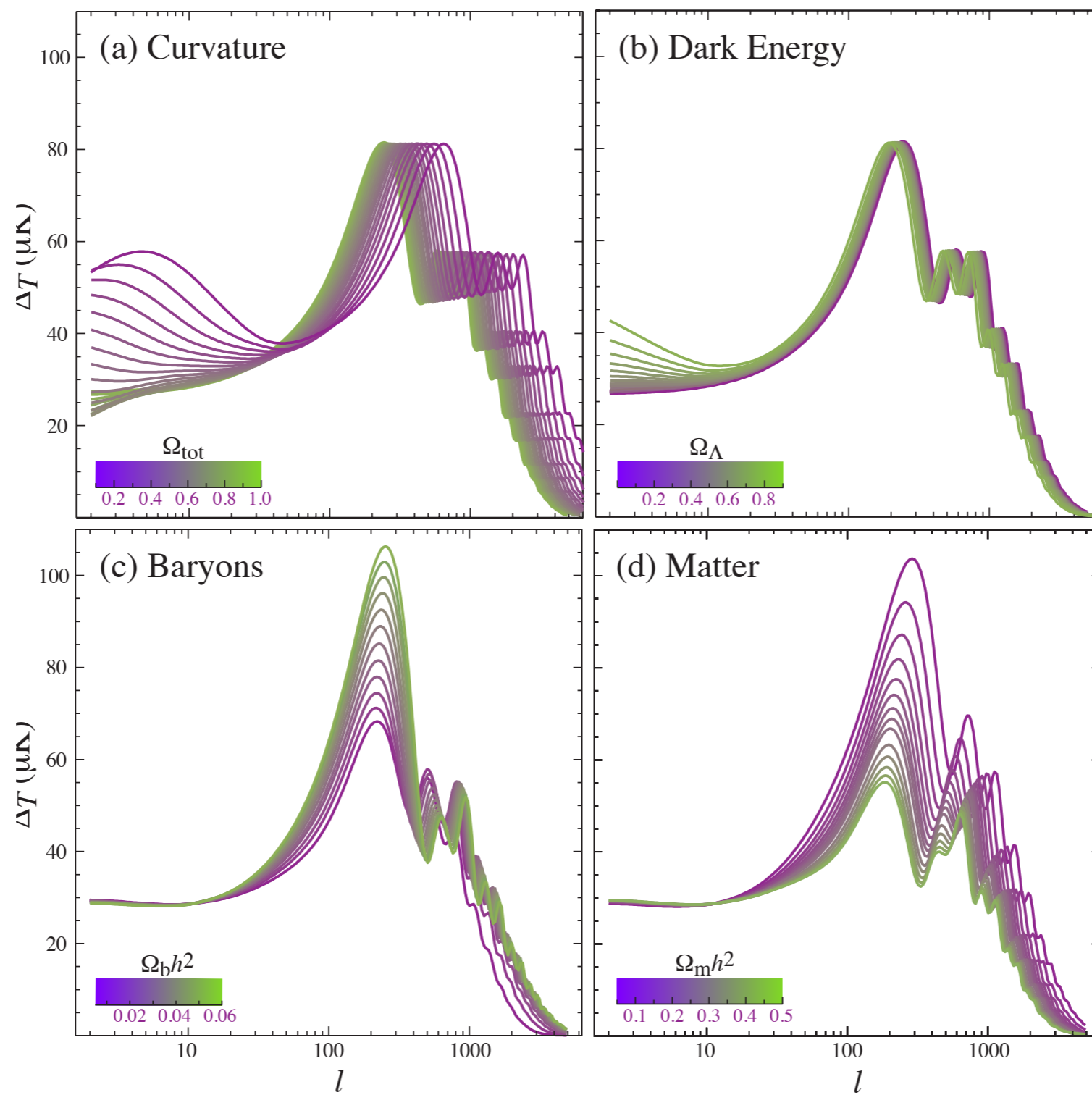
Planck

2009 - 2013 (2016)

$$T(\theta, \phi) = \sum_{\ell m} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi).$$







Πυλώνες της Κοσμολογίας

- Κοσμική διαστολή
- BBN
- CMB