



Κοσμολογικοί παρατηρησιακοί περιορισμοί στις γενικευμένες θεωρίες βαρύτητας

Υποψηφία Διδάκτορας: **Φωτεινή Σκάρρα**

- Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή:
- Λέανδρος Περιβολαρόπουλος (επιβλέπων), Καθηγητής Τμήμα Φυσικής Π.Ι.
 - Γεώργιος Λεοντάρης, Καθηγητής Τμήμα Φυσικής Π.Ι
 - Παναγιώτα Καντή, Καθηγήτρια Τμήμα Φυσικής Π.Ι



Τμήμα Φυσικής
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων



Cosmological Observational Constraints on Modified Gravity Theories

Υποψηφία Διδάκτορας: **Φωτεινή Σκάρρα**

- Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή:
- Λέανδρος Περιβολαρόπουλος (επιβλέπων), Καθηγητής Τμήμα Φυσικής Π.Ι.
 - Γεώργιος Λεοντάρης, Καθηγητής Τμήμα Φυσικής Π.Ι.
 - Παναγιώτα Καντή, Καθηγήτρια Τμήμα Φυσικής Π.Ι.



Γενικοί Στόχοι

- Η μελέτη των γενικευμένων θεωριών βαρύτητας οι οποίες μπορούν να δώσουν ένα θεωρητικό πλαίσιο το οποίο θα συμπεριλάβει τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας (ΓΘΣ) και θα οδηγήσει στη κατανόηση των δομών του σύμπαντος.
- Η διερεύνηση της εγκυρότητας του κοσμολογικού μοντέλου Λ CDM το οποίο στηρίζεται στη ορθότητα της ΓΘΣ και στην κοσμολογική αρχή της ομοιογένειας και της ισοτροπίας σε ένα επίπεδο Σύμπαν.
- Η χρησιμοποίηση των σύγχρονων κοσμολογικών δεδομένων και των κοσμολογικών παρατηρησιακών περιορισμών που αυτά εισάγουν στις παραμέτρους των γενικευμένων θεωριών βαρύτητας.
- Η αναζήτηση ενδείξεων τροποποιημένης βαρύτητας στα κοσμολογικά δεδομένα.



Ερευνητικές εργασίες

Πραγματοποίηση επτά ερευνητικών εργασιών όπου συνέβαλα ως συν-συγγραφέας από τις οποίες οι έξι δημοσιεύτηκαν σε έγκριτο διεθνές περιοδικό με κριτές (Physical Review D) και η έβδομη που ολοκληρώθηκε στις 11/05/21 υποβλήθηκε για δημοσίευση.

- 1. Constraining power of cosmological observables: blind redshift spots and optimal ranges**
L. Kazantzidis, L. Perivolaropoulos, F. Skara (Ioannina U.) Published in **Phys.Rev. D99 (2019) no.6, 063537**
DOI: [10.1103/PhysRevD.99.063537](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.063537), arXiv:[1812.05356](https://arxiv.org/abs/1812.05356).
- 2. Reconstructing a Model for Gravity at Large Distances from Dark Matter Density Profiles**
L. Perivolaropoulos, F. Skara (Ioannina U.) Published in **Phys.Rev. D99 (2019) no.12, 124006**.
DOI: [10.1103/PhysRevD.99.124006](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.124006), arXiv:[1903.06554](https://arxiv.org/abs/1903.06554)
- 3. Primordial Power Spectra of Cosmological Fluctuations with Generalized Uncertainty Principle and Maximum Length Quantum Mechanics**
F. Skara, L. Perivolaropoulos (Ioannina U.) Published in **Phys.Rev. D100 (2019) no.12, 123527**
DOI: [10.1103/PhysRevD.100.123527](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.123527), arXiv: [1907.12594](https://arxiv.org/abs/1907.12594)
- 4. Tension of the E_G statistic and RSD data with Planck/ Λ CDM and implications for weakening gravity**
F. Skara, L. Perivolaropoulos (Ioannina U.) Published in **Phys.Rev. D101 (2020) 063521**
DOI: [10.1103/PhysRevD.101.063521](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.063521), arXiv:[1911.10609](https://arxiv.org/abs/1911.10609)



Ερευνητικές εργασίες

Πραγματοποίηση επτά ερευνητικών εργασιών όπου συνέβαλα ως συν-συγγραφέας από τις οποίες οι έξι δημοσιεύτηκαν σε έγκριτο διεθνές περιοδικό με κριτές (Physical Review D) και η έβδομη που ολοκληρώθηκε στις 11/05/21 υποβλήθηκε για δημοσίευση.

5. Scalar tachyonic instabilities in gravitational backgrounds: Existence and growth rate

L. Perivolaropoulos, F. Skara (Ioannina U.) Published in **Phys.Rev.D 102 (2020) 10, 104034**

DOI: [10.1103/PhysRevD.102.104034](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.104034), arXiv:2009.05640

6. Weak gravity on a Λ CDM background

L. Radouane Gannouji, Leandros Perivolaropoulos, David Polarski, Foteini Skara

Published in **Phys.Rev.D 103 (2021) 6, 063509**

DOI: [10.1103/PhysRevD.103.063509](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.063509), arXiv:2011.01517

7. Challenges for Λ CDM: An update

Leandros Perivolaropoulos, Foteini Skara (Ioannina U.)

arXiv: 2105.05208



Τίτλοι των 7 ερευνητικών εργασιών

1. Περιοριστική ισχύς των κοσμολογικών παρατηρήσεων: τυφλά σημεία ερυθής μετατόπισης και βέλτιστες περιοχές.
2. Ανασυγκρότηση ενός μοντέλου για τη βαρύτητα σε μεγάλες αποστάσεις από μία κατανομή πυκνότητας σκοτεινής ύλης.
3. Πρωταρχικό φάσμα ισχύος κοσμολογικών διακυμάνσεων με αρχή γενικευμένης αβεβαιότητας και κβαντική μηχανική του μέγιστου μήκους.
4. Η ασυμβατότητα των δεδομένων στατιστικής E_G και παραμορφώσεων στον χώρο ερυθής μετατόπισης (Redshift Space Distortion, RSD) με το Planck/ Λ CDM μοντέλο και επιπτώσεις για εξασθένιση της βαρύτητας.



Τίτλοι των 7 ερευνητικών εργασιών

5. Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Ύπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.
6. Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο.
7. Προκλήσεις για Λ CDM: Μια επικαιροποίηση.



5^η Ερευνητική εργασία

Scalar tachyonic instabilities in gravitational backgrounds: Existence and growth rate

L. Perivolaropoulos, F. Skara (Ioannina U.) Published in **Phys.Rev.D 102 (2020) 10, 104034**

DOI:[10.1103/PhysRevD.102.104034](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.104034), arXiv:2009.05640

Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Ύπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.



Βαθμωτή ταχυονική αστάθεια σε βαρυτικά υπόβαθρα: Ύπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.

Μελέτη των ταχυονικών ασταθειών στη δυναμική εξέλιξη ενός ελεύθερου μαζικού βαθμωτού πεδίου Φ με εξίσωση δυναμικού της μορφής

$$V(\Phi) = m^2 \Phi$$

Ειδικότερα ερευνήθηκε η ύπαρξη τους και ο ρυθμός ανάπτυξης τους σε μη επίπεδα (καμπύλα) βαρυτικά υπόβαθρα

- *Reissner-Nordstrom-deSitter (RN-dS) background*
- *Schwarzschild-deSitter (SdS) background*
- *Pure deSitter background*
- *Pure Schwarzschild background*



Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Υπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.

Lagrangian density

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial_\mu \Phi \partial^\mu \Phi - m^2 \Phi^2$$

Klein-Gordon equation

$$\square \Phi + m^2 \Phi = 0$$

Επίπεδο υπόβαθρο
(Minkowski background)

$$\ddot{\Phi} - \nabla^2 \Phi = -m^2 \Phi$$

Κύματα διάδοσης

$$\Phi(\vec{r}, t) = A(\vec{k}) e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} + B(\vec{k}) e^{-i(\omega t - \vec{k}\vec{r})}$$

Σχέση διασποράς

$$\omega^2 = k^2 + m^2$$

$m^2 > 0$ καλά συμπεριφερόμενα κύματα διάδοσης

$m^2 < 0$ $\omega = \pm \sqrt{k^2 - |m|^2}$ $k < |m|$ εκθετικά αυξανόμενες ταχυονικές αστάθειες



Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Ύπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.

Με δεδομένο την ύπαρξη ταχυονικών ασταθειών για $m^2 < 0$ στην παρουσία ενός επίπεδου υπόβαθρου (Minkowski background).

Βασικά ερωτήματα:

- Παραμένουν οι βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες για $m^2 < 0$ στην παρουσία ενός μη επίπεδου (καμπύλου) υποβάθρου;
- Αν ναι, πώς αλλάζει ο χρόνος αστάθειας και ο ρυθμός ανάπτυξης σε καμπύλο υπόβαθρο;
- Ποιες είναι οι τιμές παραμέτρων μιας μετρικής καμπύλου υποβάθρου που απαιτούνται για να αυξήσουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής της αστάθειας σε σύγκριση με την τιμή της σε ένα επίπεδο υπόβαθρο (Minkowski background);



Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Υπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.

Μετρική μη επίπεδου
(καμπύλου) υποβάθρου

$$ds^2 = f(r)dt^2 - \frac{1}{f(r)}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad f(r) \neq 1$$

- *Reissner-Nordstrom-deSitter (RN-dS) background* $f(r) = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2} - \frac{\Lambda}{3}r^2$
- *Shwarzschild-deSitter (SdS) background* $f(r) = 1 - \frac{2M}{r} - \frac{\Lambda}{3}r^2$
- *Pure deSitter background* $f(r) = 1 - \frac{\Lambda}{3}r^2$
- *Pure Schwarzschild background* $f(r) = 1 - \frac{2M}{r}$



Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Υπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.

Μετρική μη επίπεδου
(καμπύλου) υποβάθρου

$$ds^2 = f(r)dt^2 - \frac{1}{f(r)}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

$$f(r) \neq 1$$

$$f(r) = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2} - \frac{\Lambda}{3}r^2$$

Klein-Gordon equation

$$\square\Phi + m^2\Phi = 0$$

$$\frac{1}{f(r)}\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial r}f(r)\frac{\partial\Phi}{\partial r} - \frac{2f(r)}{r}\frac{\partial\Phi}{\partial r} - \frac{\Delta_{\theta\phi}\Phi}{r^2} + m^2\Phi = 0$$

$$\Delta_{\theta\phi} = \frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta} + \frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\phi^2}$$

$$\Phi(t, r, \theta, \phi) = \sum_{lm} \frac{\Psi_l(t, r)}{r} \Upsilon_{lm}(\theta, \phi)$$

$$dr_* \equiv \frac{dr}{f(r)}$$

Tortoise
συντεταγμένες

Σφαιρικές
αρμονικές

$$\Delta_{\theta\phi}\Upsilon_{lm}(\theta, \phi) = -l(l+1)\Upsilon_{lm}(\theta, \phi)$$

Regge-Wheeler δυναμικό

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial r_*^2} + V_l(r)\right)\Psi_l(t, r_*) = 0$$

$$V_l(r) = f(r)\left(\frac{l(l+1)}{r^2} + \frac{f'(r)}{r}(1-s) + m^2\right)$$



Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Υπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.

Regge-Wheeler δυναμικό

$$V_l(r) = f(r) \left(\frac{l(l+1)}{r^2} + \frac{f'(r)}{r} (1-s) + m^2 \right)$$

$$f(r) = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2} - \frac{\Lambda}{3} r^2$$

$$q \equiv \frac{Q}{M}$$

$$\xi = 9M^2 \Lambda$$

$$r_* = \int \frac{dr}{\sqrt{1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2} - \frac{\Lambda}{3} r^2}} \quad \begin{matrix} s = 0 \\ l = 0. \end{matrix}$$

$$M^2 V_{*0}(r(r_*)) = \left(1 - \frac{2}{r(r_*)} + \frac{q^2}{r(r_*)^2} - \frac{1}{27} \xi r(r_*)^2 \right) \left(\frac{2}{r(r_*)^3} - \frac{2q^2}{r(r_*)^4} - \frac{2}{27} \xi + m^2 M^2 \right)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial r_*^2} + V_l(r) \right) \Psi_l(t, r_*) = 0$$

Ρυθμός ανάπτυξης Ω

$$\Psi_l(t, r_*) = (C_1 e^{\Omega t} + C_2 e^{-\Omega t}) u_l(r_*)$$

$$\frac{du_l^2}{dr_*^2} - M^2 (\Omega^2 + V_{*l}(r_*)) u_l(r_*) = 0$$

**Schrödinger-like
Regge-Wheeler equation**



Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Υπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.

Schrödinger-like Regge-Wheeler equation

$$\frac{du_l^2}{dr_*^2} - M^2 (\Omega^2 + V_{*l}(r_*)) u_l(r_*) = 0$$

$$M^2 V_{*0}(r(r_*)) = \left(1 - \frac{2}{r(r_*)} + \frac{q^2}{r(r_*)^2} - \frac{1}{27}\xi r(r_*)^2\right) \left(\frac{2}{r(r_*)^3} - \frac{2q^2}{r(r_*)^4} - \frac{2}{27}\xi + m^2 M^2\right)$$

$$u_0(r_* \rightarrow -\infty) < +\infty \quad u_0(r_* \rightarrow \infty) < +\infty$$

$$V_*(r_* \rightarrow -\infty) = V_*(r_* \rightarrow +\infty) = 0$$

$$u_0(r_* \rightarrow \pm\infty) = Ae^{\Omega r_*} + Be^{-\Omega r_*}$$

Οριακές συνθήκες
φυσικώς αποδεκτές

$$\begin{aligned} u_0(r_* \rightarrow +\infty) &= Be^{-\Omega r_*} & u'_0(r_* \rightarrow +\infty) &= -\Omega Be^{-\Omega r_*} \\ u_0(r_* \rightarrow -\infty) &= Ae^{\Omega r_*} & u'_0(r_* \rightarrow -\infty) &= \Omega Ae^{\Omega r_*} \end{aligned}$$

$$m^2 = m_{cr}^2$$

$$\Omega = 0$$

zero mode

Όχι βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες
Μη δέσμιες καταστάσεις

$$m^2 > m_{cr}^2$$

Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες

Δέσμιες καταστάσεις

$$\Omega^2 > 0, \Omega \in \mathbb{R}$$

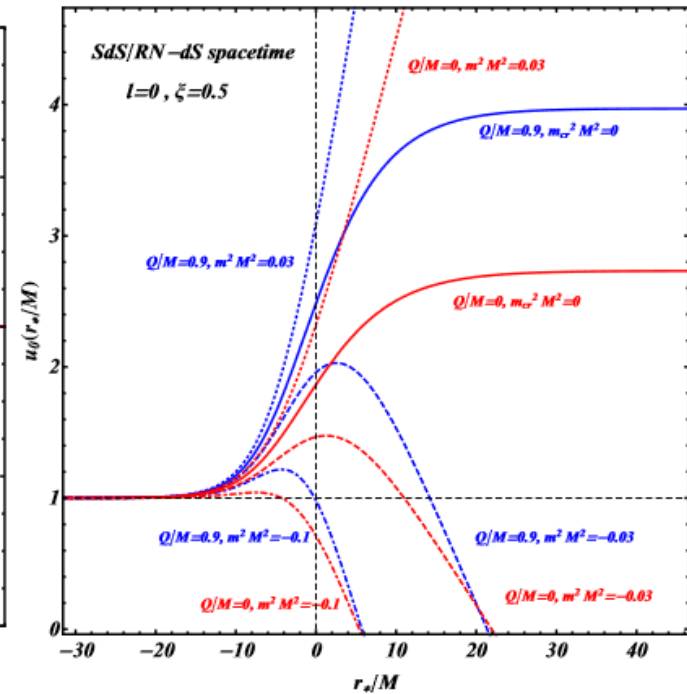
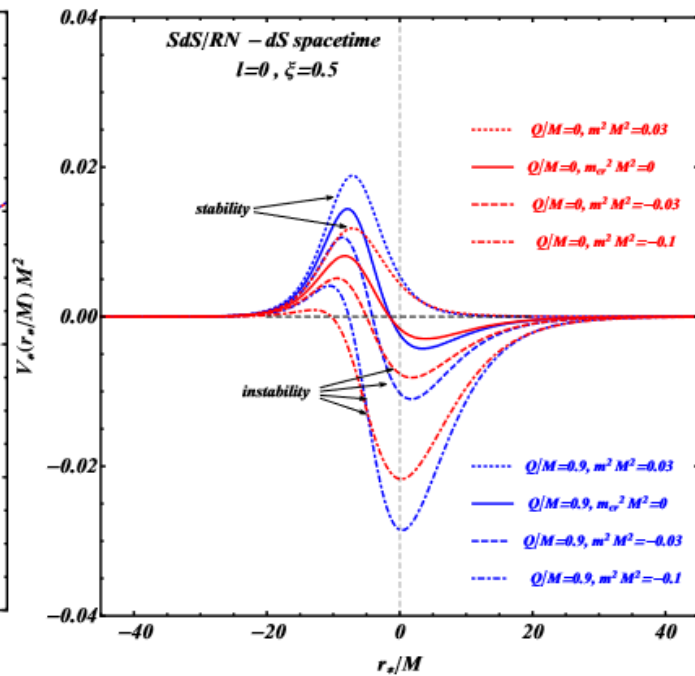
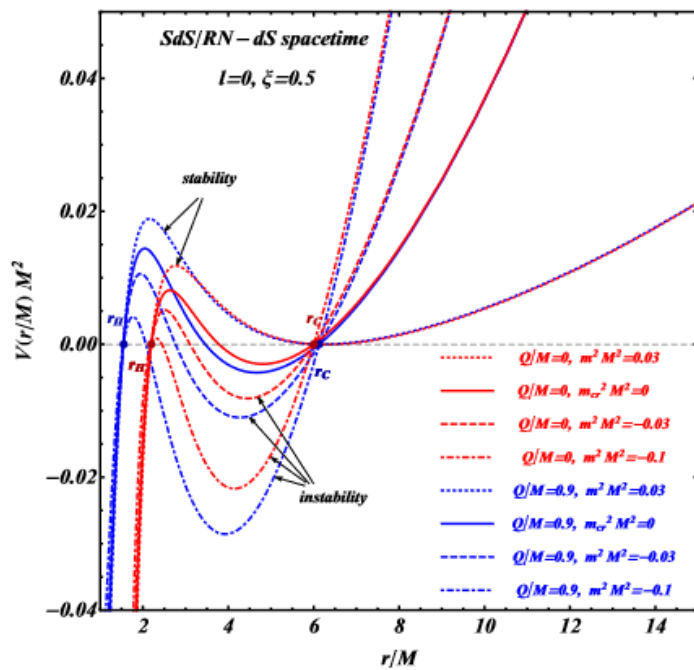
$$A = 1$$

$$\begin{aligned} u_0(r_* \rightarrow -\infty) &= 1 \\ u'_0(r_* \rightarrow -\infty) &= 0 \\ u_0(r_* \rightarrow +\infty) &= B \\ u'_0(r_* \rightarrow +\infty) &= 0 \end{aligned}$$

Μηδενικός ρυθμός ανάπτυξης
(άπειρος χρόνος ζωής)



Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Υπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.



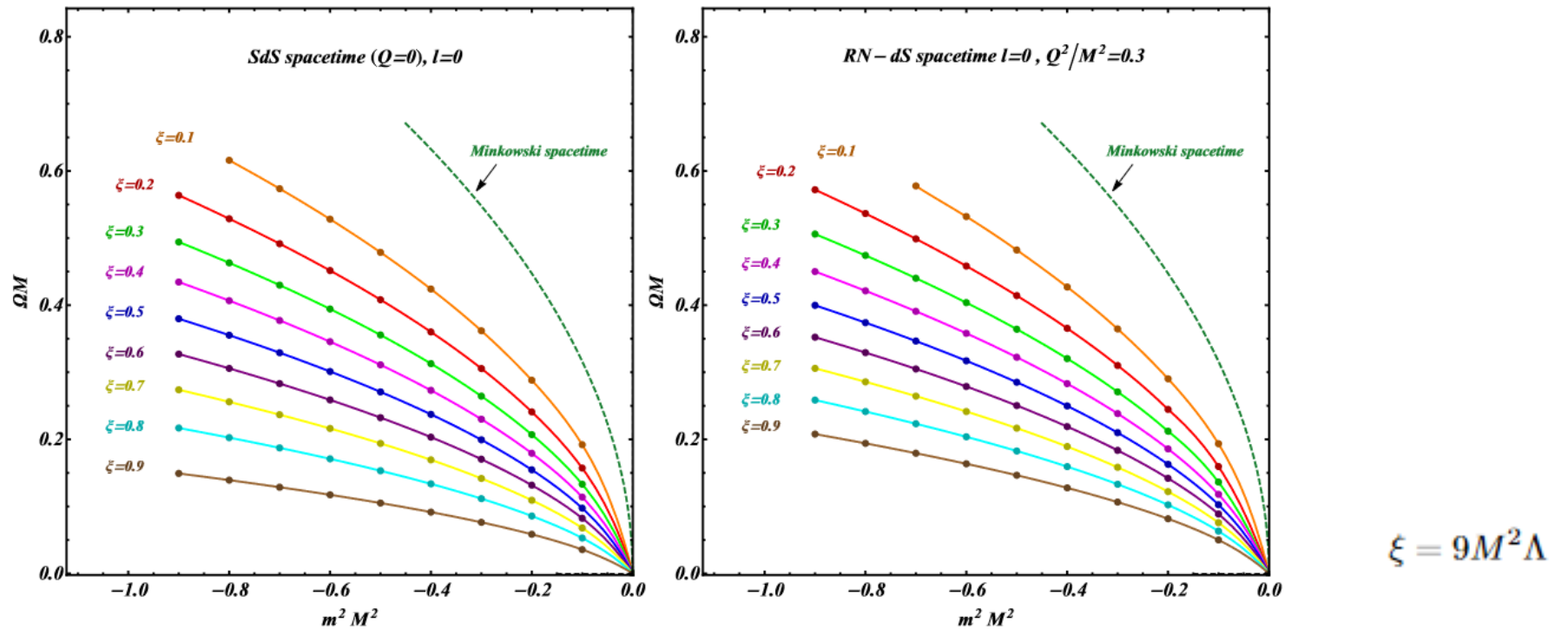
$$\xi = 9M^2\Lambda$$

Το Regge-Wheeler δυναμικό V ως συνάρτηση της ακτινικής συντεταγμένης r (αριστερό πλαίσιο) και της ακτινικής tortoise συντεταγμένης r_* (μεσαίο πλαίσιο) στις περιπτώσεις του υποβάθρου με $Q = 0$ SdS (κόκκινες καμπύλες) και υποβάθρου με $Q \neq 0$ RN-dS (μπλε καμπύλες) με $l = 0$ και παράμετρο $\xi = 0,5$. Οι συμπαγείς καμπύλες αντιστοιχούν στην κρίσιμη τιμή $m_{cr}^2 = 0$. Το δυναμικό γίνεται βαθύτερο και πιο αποδεκτό σε δέσμιες καταστάσεις (αστάθεια) καθώς το m^2 μειώνεται.

Το δεξί πλαίσιο δείχνει τη διαδικασία για τον προσδιορισμό της παραμέτρου m_{cr}^2 (η λύση της u_0 που ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες για $\Omega = 0$).



Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Υπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.



Ο ξ εξαρτώμενος ρυθμός αύξησης της αστάθειας Ω ως συνάρτηση της μάζας του βαθμωτού πεδίου m^2 με $m^2 < m_{cr}^2 = 0$ σε καμπύλο υπόβαθρο για $Q = 0$ (SdS χωροχρόνος) (αριστερό πλαίσιο) και $Q \neq 0$ (RN-dS χωροχρόνος) (δεξί πλαίσιο).

Οι πράσινες διακεκομμένες καμπύλες αντιστοιχούν ρυθμός αύξησης της αστάθειας Ω στην περίπτωση του επίπεδου υποβάθρου (Minkowski χωροχρόνος).

- Για μια δεδομένη μάζα πεδίου, ο ρυθμός ανάπτυξης Ω μειώνεται περισσότερο απουσία φορτίου και για υψηλότερες τιμές ξ .



Βαθμωτές ταχυονικές αστάθειες σε βαρυτικά υπόβαθρα: Υπαρξη και ρυθμός ανάπτυξης.

Βασικά συμπεράσματα:

- Η κρίσιμη τιμή της μάζας του βαθμωτού πεδίου m_{cr}^2 σε καμπύλο υπόβαθρο είναι $m_{cr}^2 = 0$ όπως στο επίπεδο υπόβαθρο (όπου για $m^2 < m_{cr}^2$ ταχυονική αστάθεια αναπτύσσεται).
- Η βαθμωτή ταχυονική αστάθεια της εξίσωσης Klein-Gordon έχει βραδύτερο ρυθμό ανάπτυξης στο καμπύλο υπόβαθρο σε σύγκριση με το επίπεδο χωρόχρονο για όλες τις μετρικές παραμέτρους όπου υπάρχει κοσμολογικός ορίζοντας.



6^η Ερευνητική εργασία

6. Weak gravity on a Λ CDM background

L. Radouane Gannouji, Leandros Perivolaropoulos, David Polarski, Foteini Skara

Published in **Phys.Rev.D 103 (2021) 6, 063509**

DOI: [10.1103/PhysRevD.103.063509](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.063509), arXiv:2011.01517

Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο.



6^η Ερευνητική εργασία

Μελέτη του Horndeski μοντέλου βαρύτητας που αποτελεί ένα γενικευμένο μοντέλο βαρύτητας που περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τροποποιημένων μοντέλων.

Η μελέτη έγινε σε Λ CDM υπόβαθρο με χρήση τεσσάρων ελεύθερων ανεξάρτητων συναρτήσεων του χρόνου, της α βάσης:

$$\alpha_i(t) \quad (i = M, K, B, T)$$

που περιγράφουν οποιαδήποτε απόκλιση από την Γενική Θεωρία Σχετικότητας (ΓΘΣ) όπου $\alpha_i(t)=0$.

- Οι συναρτήσεις α_i μαζί με τον ρυθμό διαστολής υπόβαθρου του σύμπαντος δηλαδή την Hubble παράμετρο $H(a) = \frac{\dot{a}}{a}$ (όπου a ο παράγοντας κλίμακας) καθορίζουν συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες του Horndeski μοντέλου βαρύτητας και τις αντίστοιχες παρατηρήσιμες ποσότητες.



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

Διερεύνηση σταθερών μοντέλων Horndeski, υποθέτοντας

- συμπεριφορά πρώιμου χρόνου που είναι σύμφωνη με την ΓΘΣ

$$\alpha_i(a \approx 0) = 0$$

- ταχύτητα βαρυτικών κυμάτων ίση με την ταχύτητα του φωτός

$$c_T = c$$

- ανεξαρτησία κλίμακας k των συναρτήσεων α_i σε κλίμακες κάτω από τον ορίζοντα του ήχου (subhorizon) του βαθμωτού πεδίου ($k \gg \frac{aH}{c_s}$) στην σχεδόν στατική προσέγγιση (quasi-static approximation (QSA)).
- ρυθμό διαστολής υπόβαθρου του σύμπαντος $H(z)$ που αντιστοιχεί σε μια επίπεδη κοσμολογία Λ CDM που δίνεται

$$H(z) = H_0 [\Omega_{m,0}(1+z)^3 + (1 - \Omega_{m,0})]^{1/2}$$

όπου $\Omega_{m,0}$ η παράμετρος πυκνότητας μάζας και z η ερυθρή μετατόπιση.

- εξάρτηση των συναρτήσεων α_i από τον παράγοντα κλίμακας a της μορφής

$$\alpha_i = \alpha_{i0} a^s$$

όπου οι σταθερές α_{i0} είναι σημερινές τιμές και το s είναι κάποιος θετικός εκθέτης που καθορίζει την χρονική εξέλιξη για το θεωρούμενο τροποποιημένο μοντέλο βαρύτητας.



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

Horndeski δράση

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\sum_{i=2}^5 \mathcal{L}_i [g_{\mu\nu}, \phi] + \mathcal{L}_m [g_{\mu\nu}, \psi_m] \right]$$

$$\mathcal{L}_2 = K(\phi, X),$$

$$\mathcal{L}_3 = -G_3(\phi, X) \square\phi,$$

$$\mathcal{L}_4 = G_4(\phi, X)R + G_{4X}(\phi, X) \left[(\square\phi)^2 - \nabla_\mu \nabla_\nu \phi \nabla^\mu \nabla^\nu \phi \right]$$

$$K(\phi, X) \equiv G_2(\phi, X) \quad X \equiv -\frac{1}{2} \nabla^\mu \phi \nabla_\mu \phi.$$

$$\begin{aligned} H^2 M_*^2 \alpha_K &= 2X(K_X + 2XK_{XX} - 2G_{3\phi} - 2XG_{3\phi X}) + \\ &+ 12\dot{\phi}XH(G_{3X} + XG_{3XX} - 3G_{4\phi X} - 2XG_{4\phi XX}) + \\ &+ 12XH^2(G_{4X} + 8XG_{4XX} + 4X^2G_{4XXX}) - \\ &- 12XH^2(G_{5\phi} + 5XG_{5\phi X} + 2X^2G_{5\phi XX}) + \\ &+ 4\dot{\phi}XH^3(3G_{5X} + 7XG_{5XX} + 2X^2G_{5XXX}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_5 &= G_5(\phi, X)G_{\mu\nu} \nabla^\mu \nabla^\nu \phi - \frac{1}{6}G_{5X}(\phi, X) \left[(\square\phi)^3 \right. \\ &- 3(\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)(\nabla^\mu \nabla^\nu \phi) \square\phi \\ &\left. + 2(\nabla_\mu \nabla^\nu \phi)(\nabla_\nu \nabla^\beta \phi)(\nabla_\beta \nabla^\mu \phi) \right], \end{aligned}$$

$$M_*^2 \equiv 2(G_4 - 2XG_{4X} + XG_{5\phi} - \dot{\phi}HXG_{5X})$$

$$\begin{aligned} HM_*^2 \alpha_B &= 2\dot{\phi}(XG_{3X} - G_{4\phi} - 2XG_{4\phi X}) + \\ &+ 8XH(G_{4X} + 2XG_{4XX} - G_{5\phi} - XG_{5\phi X}) + \\ &+ 2\dot{\phi}XH^2(3G_{5X} + 2XG_{5XX}) \end{aligned}$$

$$M_*^2 \alpha_T = 2X(2G_{4X} - 2G_{5\phi} - (\ddot{\phi} - \dot{\phi}H)XG_{5X})$$

$$\alpha_M \equiv H^{-1} \frac{d \ln M_*^2}{dt}$$



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

α_K παραμετροποιεί την κινητική ενέργεια των βαθμωτών διαταραχών

α_B περιγράφει την ανάμιξη των κινητικών όρων

α_T δείχνει πόσο η ταχύτητα των βαρυτικών κυμάτων (τανυστικών διαταραχών) αποκλίνει από την ταχύτητα του φωτός

α_M περιγράφει την εξέλιξη του M_*^2

$$\begin{aligned}
 H^2 M_*^2 \alpha_K &= 2X(K_X + 2XK_{XX} - 2G_{3\phi} - 2XG_{3\phi X}) + \\
 &+ 12\dot{\phi}XH(G_{3X} + XG_{3XX} - 3G_{4\phi X} - 2XG_{4\phi XX}) + \\
 &+ 12XH^2(G_{4X} + 8XG_{4XX} + 4X^2G_{4XXX}) - \\
 &- 12XH^2(G_{5\phi} + 5XG_{5\phi X} + 2X^2G_{5\phi XX}) + \\
 &+ 4\dot{\phi}XH^3(3G_{5X} + 7XG_{5XX} + 2X^2G_{5XXX})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 HM_*^2 \alpha_B &= 2\dot{\phi}(XG_{3X} - G_{4\phi} - 2XG_{4\phi X}) + \\
 &+ 8XH(G_{4X} + 2XG_{4XX} - G_{5\phi} - XG_{5\phi X}) + \\
 &+ 2\dot{\phi}XH^2(3G_{5X} + 2XG_{5XX})
 \end{aligned}$$

$$M_*^2 \alpha_T = 2X(2G_{4X} - 2G_{5\phi} - (\ddot{\phi} - \dot{\phi}H)XG_{5X})$$

$$\alpha_M \equiv H^{-1} \frac{d \ln M_*^2}{dt}$$



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

- α_K παραμετροποιεί την κινητική ενέργεια των βαθμωτών διαταραχών
- α_B περιγράφει την ανάμιξη των κινητικών όρων
- α_T ποσοτικοποιεί πόσο η ταχύτητα των βαρυτικών κυμάτων (τανυστικών διαταραχών) αποκλίνει από την ταχύτητα του φωτός
- α_M περιγράφει την εξέλιξη του M_*^2

Συνθήκες σταθερότητας

$$\alpha_K + \frac{3}{2}\alpha_B^2 \geq 0$$

$$c_s^2 > 0$$

c_s : ταχύτητα ήχου των διαταραχών

$$\left(\alpha_K + \frac{3}{2}\alpha_B^2\right) c_s^2 = \frac{\dot{\alpha}_B}{H} - \frac{\rho_m}{H^2 M_*^2}$$

$$- (2 - \alpha_B) \left[\frac{\dot{H}}{H^2} + \alpha_T - \alpha_M - \frac{\alpha_B}{2(1 + \alpha_T)} \right]$$



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker (FLRW) μετρική $ds^2 = -(1 + 2\Psi) dt^2 + a^2(1 - 2\Phi) d\vec{x}^2$

$$k^2(\Psi + \Phi) = -8\pi G \Sigma(a, k) a^2 \rho_m \Delta$$

Poisson equations

$$k^2\Psi = -4\pi G \mu(a, k) a^2 \rho_m \Delta$$

G : σταθερά του Newton

$$\mu(a, k) \equiv \frac{G_{\text{growth}}(a, k)}{G}$$

$$\xrightarrow{\alpha_T = 0}$$

$$\mu(a) = \frac{M_p^2}{M_*^2} \left[1 + \frac{2(\alpha_M + \frac{1}{2}\alpha_B)^2}{c_s^2(\alpha_K + \frac{3}{2}\alpha_B^2)} \right]$$

$$\Sigma(a, k) \equiv \frac{G_{\text{lensing}}(a, k)}{G}$$

$$\xrightarrow{\alpha_T = 0}$$

$$\Sigma(a) = \frac{M_p^2}{M_*^2} \left[1 + \frac{(\alpha_M + \frac{1}{2}\alpha_B)(\alpha_M + \alpha_B)}{c_s^2(\alpha_K + \frac{3}{2}\alpha_B^2)} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} 8\pi G \equiv 1/M_p^2 \\ M_p: \text{μάζα Planck} \end{array} \right]$$

Παραμετροποίηση της απόκλισης από την ΓΘΣ
 G_{growth} (πυκνότητα διαταραχών ύλης), G_{lensing}

($G_{\text{growth}} = G_{\text{lensing}} = G$ στη ΓΘΣ)
 (φαινόμενο φακού του φωτός)



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

Συνθήκες σταθερότητας

$$\alpha_K + \frac{3}{2}\alpha_B^2 \geq 0$$

$$c_s^2 > 0$$

G : σταθερά του Newton

$$\mu(a, k) \equiv \frac{G_{\text{growth}}(a, k)}{G}$$

$$\xrightarrow{\alpha_T = 0}$$

$$\mu(a) = \frac{M_p^2}{M_*^2} \left[1 + \frac{2(\alpha_M + \frac{1}{2}\alpha_B)^2}{c_s^2 (\alpha_K + \frac{3}{2}\alpha_B^2)} \right]$$

$$\mu > M_p^2/M_*^2$$

$$\Sigma(a, k) \equiv \frac{G_{\text{lensing}}(a, k)}{G}$$

$$\xrightarrow{\alpha_T = 0}$$

$$\Sigma(a) = \frac{M_p^2}{M_*^2} \left[1 + \frac{(\alpha_M + \frac{1}{2}\alpha_B)(\alpha_M + \alpha_B)}{c_s^2 (\alpha_K + \frac{3}{2}\alpha_B^2)} \right]$$

$$8\pi G \equiv 1/M_p^2$$

M_p : μάζα Planck

Παραμετροποίηση της απόκλισης από την ΓΘΣ
 G_{growth} (πυκνότητα διαταραχών ύλης), G_{lensing}

($G_{\text{growth}} = G_{\text{lensing}} = G$ στη ΓΘΣ)
 (φαινόμενο φακού του φωτός)



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

Συνθήκες σταθερότητας

$$\alpha_K + \frac{3}{2}\alpha_B^2 \geq 0$$

$$c_s^2 > 0$$

G : σταθερά του Newton

$$\mu(a, k) \equiv \frac{G_{\text{growth}}(a, k)}{G}$$

$$\xrightarrow{\alpha_T = 0}$$

$$\mu(a) = \frac{M_p^2}{M_*^2} \left[1 + \frac{2(\alpha_M + \frac{1}{2}\alpha_B)^2}{c_s^2(\alpha_K + \frac{3}{2}\alpha_B^2)} \right]$$

$$\mu > M_p^2/M_*^2$$

$$\Sigma(a, k) \equiv \frac{G_{\text{lensing}}(a, k)}{G}$$

$$\xrightarrow{\alpha_T = 0}$$

$$\Sigma(a) = \frac{M_p^2}{M_*^2} \left[1 + \frac{(\alpha_M + \frac{1}{2}\alpha_B)(\alpha_M + \alpha_B)}{c_s^2(\alpha_K + \frac{3}{2}\alpha_B^2)} \right]$$

$$8\pi G \equiv 1/M_p^2$$

M_p : μάζα Planck

Παραμετροποίηση

$$\alpha_i = \alpha_{i0} a^s, \quad s > 0$$

$$\rightarrow \alpha_{B0}(\alpha_{B0} + 2\alpha_{M0}) \leq 0$$

$$\rightarrow \alpha_{B0} \leq 0 \quad \text{και} \quad \alpha_{M0} \geq -\alpha_{B0}/2$$

$$\mu(a) \geq \Sigma(a)$$

περιορισμοί



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

Δυναμική διαταραχών ύλης

$$ds^2 = -(1 + 2\Psi)dt^2 + a^2(1 - 2\Phi)d\vec{x}^2$$

$$\mu(a, k) \equiv \frac{G_{\text{growth}}(a, k)}{G}$$

$$\Sigma(a, k) \equiv \frac{G_{\text{lensing}}(a, k)}{G}$$

$$k^2(\Psi + \Phi) = -8\pi G_N \Sigma(a, k) a^2 \rho \Delta$$

$$k^2\Psi = -4\pi G_N \mu(a, k) a^2 \rho \Delta$$

Συνάρτηση ανάπτυξης

$$f(a) \equiv \frac{d \ln \delta(a)}{d \ln a}$$

$$\sigma(a) \equiv \sigma_8 \frac{\delta(a)}{\delta(a=1)}$$

$$f\sigma_8(a) \equiv f(a) \cdot \sigma(a)$$

$$f = \Omega_m^{\gamma(z)}$$

Προβλεπόμενες θεωρητικές τιμές

$$f\sigma_8(a, \sigma_8, \Omega_{0m}, \mu) = \frac{\sigma_8}{\delta(a=1)} a \delta'(a, \Omega_{0m}, \mu)$$

$$E_G(a, \Omega_{0m}, \mu, \Sigma) = \frac{\Omega_{0m} \Sigma(a)}{f(a, \Omega_{0m}, \mu)}$$

Λ CDM – Γραμμική ανάπτυξη διαταραχών ύλης

$$H^2(z) = H_0^2 [\Omega_{0m}(1+z)^3 + (1 - \Omega_{0m})]$$

$$\delta''(a) + \left(\frac{3}{a} + \frac{H'(a)}{H(a)} \right) \delta'(a) - \frac{3}{2} \frac{\Omega_{0m} \mu(a, k)}{a^5 H(a)^2 / H_0^2} \delta(a) = 0$$

Δείκτης ανάπτυξης

$$\gamma(z) = \gamma_0 + \gamma_1 \frac{z}{1+z}$$

$$\gamma_0 \equiv \gamma(z=0)$$

$$\gamma_1 \equiv \gamma'(z=0)$$



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

$f\sigma_8(z)$ δεδομένα

Index	Dataset	z	$f\sigma_8(z)$	Refs.	Year	Fiducial Cosmology
1	2MRS	0.02	0.314 ± 0.048	[74], [75]	13 November 2010	$(\Omega_m, \Omega_K, \sigma_8) = (0.266, 0, 0.65)$
2	SDSS-LRG-200	0.25	0.3512 ± 0.0583	[76]	9 December 2011	$(\Omega_m, \Omega_K, \sigma_8) = (0.276, 0, 0.8)$
3	WiggleZ	0.44	0.413 ± 0.080	[77]	12 June 2012	$(\Omega_m, h, \sigma_8) = (0.27, 0.71, 0.8)$
4	WiggleZ	0.60	0.390 ± 0.063	[77]	12 June 2012	
5	WiggleZ	0.73	0.437 ± 0.072	[77]	12 June 2012	
6	GAMA	0.18	0.360 ± 0.090	[78]	22 September 2013	$(\Omega_m, \Omega_K, \sigma_8) = (0.27, 0, 0.8)$
7	SDSS-MGS	0.15	0.490 ± 0.145	[79]	30 January 2015	$(\Omega_m, h, \sigma_8) = (0.31, 0.67, 0.83)$
8	SDSS-veloc	0.10	0.370 ± 0.130	[80]	16 June 2015	$(\Omega_m, \Omega_K, \sigma_8) = (0.3, 0, 0.89)[?]$
9	FastSound	1.40	0.482 ± 0.116	[81]	25 November 2015	$(\Omega_m, \Omega_K, \sigma_8) = (0.27, 0, 0.82)[82]$
10	BOSS DR12	0.38	0.497 ± 0.045	[67]	11 July 2016	$(\Omega_m, \Omega_K, \sigma_8) = (0.31, 0, 0.8)$
11	BOSS DR12	0.51	0.458 ± 0.038	[67]	11 July 2016	
12	BOSS DR12	0.61	0.436 ± 0.034	[67]	11 July 2016	
13	VIPERS v7	1.05	0.280 ± 0.080	[83]	26 October 2016	
14	BOSS LOWZ	0.32	0.427 ± 0.056	[84]	26 October 2016	$(\Omega_m, \Omega_K, \sigma_8) = (0.31, 0, 0.8475)$
15	VIPERS	0.727	0.296 ± 0.0765	[85]	21 November 2016	$(\Omega_m, \Omega_K, \sigma_8) = (0.31, 0, 0.7)$
16	6dFGS+SnIa	0.02	0.428 ± 0.0465	[86]	29 November 2016	$(\Omega_m, h, \sigma_8) = (0.3, 0.683, 0.8)$
17	2MTF	0.001	0.505 ± 0.085	[87]	16 June 2017	$(\Omega_m, \sigma_8) = (0.3121, 0.815)$
18	BOSS DR12	0.31	0.384 ± 0.083	[88]	15 September 2017	$(\Omega_m, h, \sigma_8) = (0.307, 0.6777, 0.8288)$
19	BOSS DR12	0.36	0.409 ± 0.098	[88]	15 September 2017	
20	BOSS DR12	0.40	0.461 ± 0.086	[88]	15 September 2017	
21	BOSS DR12	0.44	0.426 ± 0.062	[88]	15 September 2017	
22	BOSS DR12	0.48	0.458 ± 0.063	[88]	15 September 2017	
23	BOSS DR12	0.52	0.483 ± 0.075	[88]	15 September 2017	
24	BOSS DR12	0.56	0.472 ± 0.063	[88]	15 September 2017	
25	BOSS DR12	0.59	0.452 ± 0.061	[88]	15 September 2017	
26	BOSS DR12	0.64	0.379 ± 0.054	[88]	15 September 2017	
27	SDSS-IV	0.978	0.379 ± 0.176	[89]	9 January 2018	$(\Omega_m, \sigma_8) = (0.31, 0.8)$
28	SDSS-IV	1.23	0.385 ± 0.099	[89]	9 January 2018	
29	SDSS-IV	1.526	0.342 ± 0.070	[89]	9 January 2018	
30	SDSS-IV	1.944	0.364 ± 0.106	[89]	9 January 2018	
31	VIPERS PDR2	0.60	0.49 ± 0.12	[90]	6 June 2018	$(\Omega_b, \Omega_m, h, \sigma_8) = (0.045, 0.31, 0.7, 0.8)$
32	VIPERS PDR2	0.86	0.46 ± 0.09	[90]	6 June 2018	
33	BOSS DR12 voids	0.57	0.501 ± 0.051	[91]	1 April 2019	$(\Omega_b, \Omega_m, h, \sigma_8) = (0.0482, 0.307, 0.6777, 0.8228)$
34	2MTF 6dFGSv	0.03	0.404 ± 0.0815	[92]	7 June 2019	$(\Omega_b, \Omega_m, h, \sigma_8) = (0.0491, 0.3121, 0.6571, 0.815)$
35	SDSS-IV	0.72	0.454 ± 0.139	[93]	17 September 2019	$(\Omega_m, \Omega_b h^2, \sigma_8) = (0.31, 0.022, 0.8)$

$E_G(z)$ δεδομένα

Index	Dataset	z	$E_G(z)$	σ_{E_G}	Scale [Mpc/h]	Reference
1	KiDS GAMA	0.267	0.43	0.13	$5 < R < 40$	[61]
2	KiDS 2dFLenS BOSS LOWZ 2dFLOZ	0.305	0.27	0.08	$5 < R < 60$	[61]
3	RCSLenS CFHTLenS WiggleZ BOSS WZLoZ LOWZ	0.32	0.40	0.09	$R > 3$	[94]
4	KiDS 2dFLenS BOSS CMASS 2dFHIZ	0.554	0.26	0.07	$5 < R < 60$	[61]
5	RCSLenS CFHTLenS WiggleZ BOSS WZHiZ CMASS	0.57	0.31	0.06	$R > 3$	[94]
6	RCSLenS CFHTLenS WiggleZ BOSS WZHiZ CMASS	0.57	0.30	0.07	$R > 10$	[94]
7	CFHTLenS VIPERS	0.60	0.16	0.09	$3 < R < 20$	[95]
8	CFHTLenS VIPERS	0.86	0.09	0.07	$3 < R < 20$	[95]

F. Skara and L. Perivolaropoulos, "Tension of the E_G statistic and redshift space distortion data with the Planck - Λ CDM model and implications for weakening gravity," *Phys. Rev. D* **101**, 063521 (2020), arXiv:1911.10609 [astro-ph.CO].

Ανάλυση μέγιστης πιθανότητας

$$V_{f\sigma_8}^i(z_i, p) \equiv f\sigma_{8,i}^{obs} - \frac{f\sigma_8^{th}(z_i, p)}{q(z_i, \Omega_{0m}, \Omega_{0m}^{fid})}$$

$$V_{E_G}^i(z_i, p) \equiv E_{G,i}^{obs} - E_G^{th}(z_i, p)$$

$$q(z_i, \Omega_{0m}, \Omega_{0m}^{fid}) = \frac{H(z_i)d_A(z_i)}{H^{fid}(z_i)d_A^{fid}(z_i)}$$

$$\chi_{f\sigma_8}^2(\Omega_{m,0}, \alpha_{B0}, \alpha_{M0}, s, \sigma_8) = V_{f\sigma_8}^i F_{f\sigma_8,ij} V_{f\sigma_8}^j$$

$$\chi_{E_G}^2(\Omega_{m,0}, \alpha_{B0}, \alpha_{M0}, s) = V_{E_G}^i F_{E_G,ij} V_{E_G}^j$$

$$\chi_{tot}^2 = \chi_{f\sigma_8}^2 + \chi_{E_G}^2$$

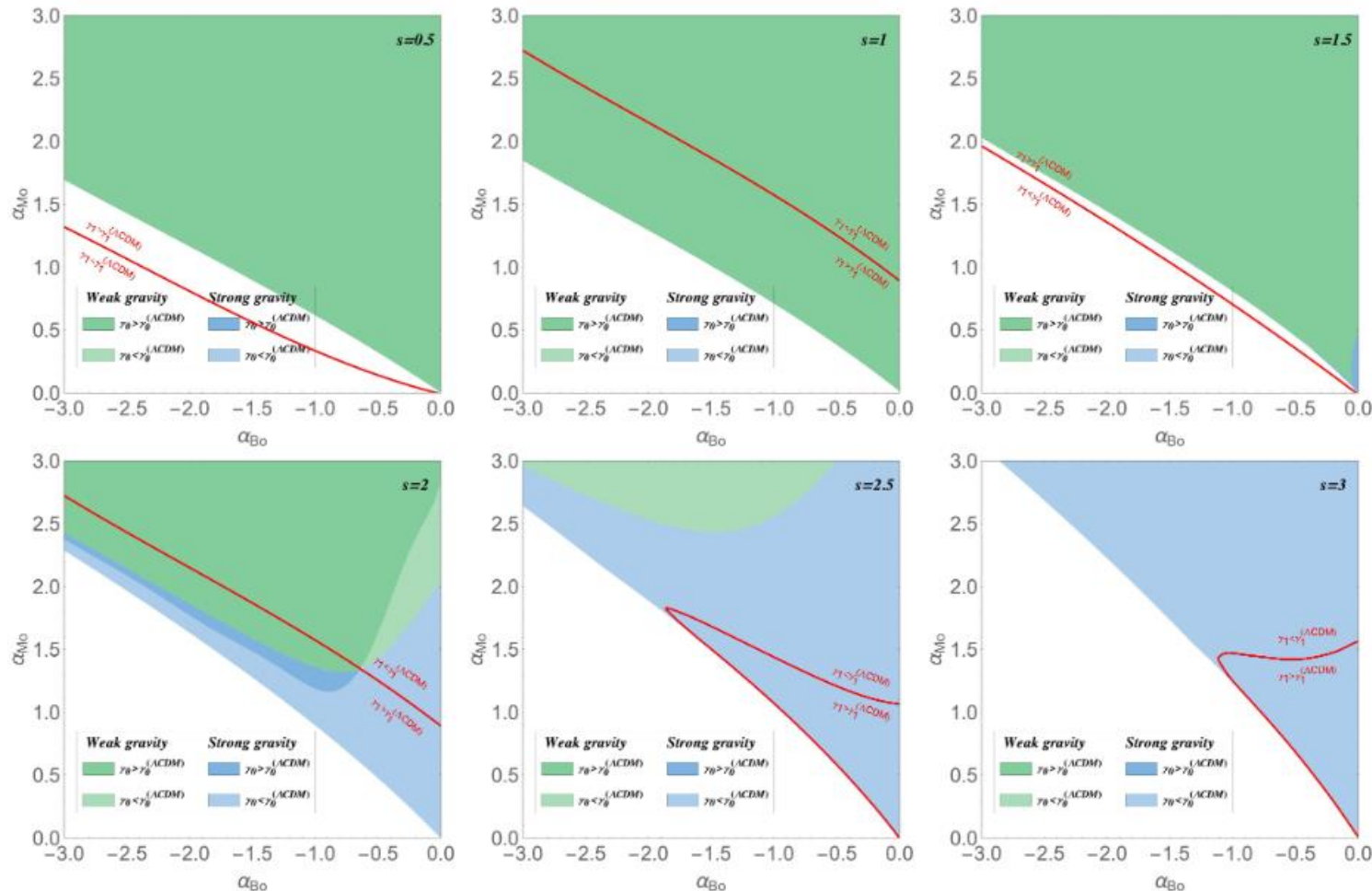
$$\text{Planck}/\Lambda\text{CDM}$$

$$\Omega_{m,0} = 0.315$$

$$\sigma_8 = 0.811$$



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

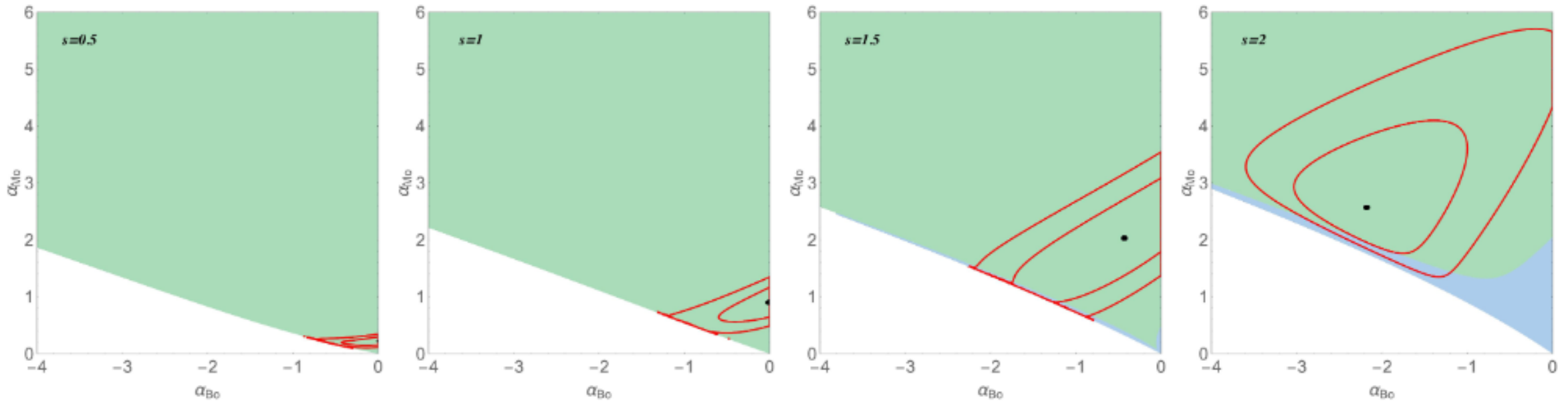


Η περιοχή σταθερότητας στο χώρο παραμέτρων α_{M0} - α_{B0} για τις τιμές $s = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3$.

- Περιοχή αδύναμης βαρύτητας σήμερα, $\mu_0 \equiv \mu(z=0) < 1$ (πράσινη περιοχή)
 - Περιοχή ισχυρής βαρύτητας σήμερα, $\mu_0 > 1$ (μπλε περιοχή)
 - Οι σκούρες μπλε και σκούρες πράσινες περιοχές υποδηλώνουν $\gamma_0 > \gamma_0^{\Lambda\text{CDM}}$
 - Οι ανοικτές μπλε και ανοικτές πράσινες περιοχές αντιστοιχούν σε $\gamma_0 < \gamma_0^{\Lambda\text{CDM}}$.
 - Τέλος, η κόκκινη καμπύλη καθορίζει τις περιοχές όπου είτε $\gamma_1 > \gamma_1^{\Lambda\text{CDM}}$ είτε $\gamma_1 < \gamma_1^{\Lambda\text{CDM}}$.
- Για $s \leq 2$, επιλέγεται σήμερα το καθεστώς αδύναμης βαρύτητας.



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο



Οι τιμές βέλτιστης προσαρμογής των α_{B0} και α_{M0} για $s = 0.5, 1, 1.5, 2$.

- Οι περιοχές εμπιστοσύνης 1σ και 2σ (κόκκινες καμπύλες).
 - Η πράσινη περιοχή αντιστοιχεί σήμερα σε ασθενή βαρύτητα.
 - Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει σήμερα ισχυρή βαρύτητα.
- Για τιμές $s > 2$, η καλύτερη εφαρμογή κινείται εκτός της έγχρωμης περιοχής και επομένως αποκλείεται.



Αδύναμη βαρύτητα σε Λ CDM υπόβαθρο

Βασικά συμπεράσματα:

- Οι αδιάστατοι παράμετροι φακών και ανάπτυξης Σ και μ αντίστοιχα εμφανίζουν τις ακόλουθες γενικές ιδιότητες σήμερα:
 - $\Sigma_0 < 1$ για όλες τις βιώσιμες παραμέτρους και
 - προτιμάται $\mu_0 < 1$ (ασθενής βαρύτητα σήμερα) για μικρά s ενώ $\mu_0 > 1$ για μεγάλα s .
- Ισχύει η σχέση $\mu \geq \Sigma$ σε όλες τις χρονικές στιγμές.
- Τα $f\sigma_8(z)$ και $E_G(z)$ δεδομένα επιλέγουν ουσιαστικά το καθεστώς αδύναμης βαρύτητας σήμερα $\mu_0 < 1$ όταν το $s < 2$, ενώ το $\mu_0 > 1$ υπάρχει μόνο οριακά για το $s \approx 2$.
- Οι συνθήκες σταθερότητας, τα $f\sigma_8(z)$ και $E_G(z)$ δεδομένα και το Λ CDM υπόβαθρο επιτρέπουν $s \lesssim 2$.
- Τα δεδομένα επιλέγουν ουσιαστικά ένα αδύναμο καθεστώς βαρύτητας σήμερα $\mu_0 < 1$ οπότε και $\Sigma_0 \leq 1$.
- Τα δεδομένα δίνουν $\gamma_0 > \gamma_0^{\Lambda\text{CDM}}$ για $s < 2$ στην επιλεγμένη περιοχή ασθενής βαρύτητας.



7^η Ερευνητική εργασία

Challenges for Λ CDM: An update

Leandros Perivolaropoulos, Foteini Skara (Ioannina U.)

arXiv: 2105.05208

Προκλήσεις για Λ CDM: Μια επικαιροποίηση

Επισκόπηση με ενοποιημένο τρόπο πολλών υπαρχόντων σημάτων σε κοσμολογικά και αστροφυσικά δεδομένα που φαίνεται να είναι σε κάποια ασυμβατότητας (2σ ή μεγαλύτερη) με το τυπικό κοσμολογικό μοντέλο Λ CDM όπως ορίζεται από τις τιμές των παραμέτρων από Planck18.

Ο στόχος αυτής της παιδαγωγικής επισκόπησης ήταν να παρουσιάσει συλλογικά την τρέχουσα κατάσταση αυτών των σημάτων και το επίπεδο ασυμβατότητας τους, με έμφαση στην κρίση της σταθεράς του Hubble και η αναφορά σε πρόσφατες πηγές όπου μπορούν να βρεθούν περισσότερες λεπτομέρειες για κάθε σήμα.

Έγινε επίσης συζήτηση πιθανών θεωρητικών προσεγγίσεων που μπορεί δυνητικά να εξηγήσουν τη μη τυπική φύση ορισμένων από αυτά τα σήματα.



Προκλήσεις για Λ CDM: Μια επικαιροποίηση

Ασυμβατότητες με το τυπικό μοντέλο Λ CDM

- Η κρίση της σταθεράς του Hubble ($> 4\sigma$):** Χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση κλιμακωτής απόστασης, οι τοπικές άμεσες (μικρής ερυθρής μετατόπισης) μετρήσεις της σταθεράς Hubble H_0 δίνουν τιμές που είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές που συνάγονται χρησιμοποιώντας τη γωνιακή κλίμακα των διακυμάνσεων της Κοσμικής Μικροκυματικής Ακτινοβολίας Υποβάθρου (Cosmic Microwave Background, (CMB)) στο πλαίσιο του μοντέλου Λ CDM (έμμεσες μετρήσεις).
- Η ασυμβατότητα ανάπτυξης ($2-3\sigma$):** Άμεσες μετρήσεις του ρυθμού ανάπτυξης των κοσμολογικών διαταραχών (Weak Lensing, Redshift Space Distortions (peculiar velocities), Cluster Counts) υποδεικνύουν χαμηλότερο ρυθμό ανάπτυξης από αυτόν που υποδεικνύεται από τις τιμές παραμέτρων Planck/ Λ CDM σε επίπεδο περίπου $2-3\sigma$. Στο πλαίσιο της Γενικής Σχετικότητας, ένας τέτοιος χαμηλότερος ρυθμός ανάπτυξης συνεπάγεται χαμηλότερη πυκνότητα ύλης και / ή χαμηλότερο πλάτος του αρχέγονου φάσματος διακύμανσης από αυτό που υποδεικνύεται από τον Planck / Λ CDM.
- Οι ανωμαλίες ανισotropίας CMB ($2-3\sigma$):** Οι ανωμαλίες αυτές περιλαμβάνουν έλλειψη ισχύος σε μεγάλες γωνιακές κλίμακες, ασυμβατότητα μικρών έναντι μεγάλων κλιμάκων (διαφορετικές τιμές βέλτιστης προσαρμογής κοσμολογικών παραμέτρων), ανωμαλία ψυχρού σημείου, ενδείξεις για ένα κλειστό σύμπαν (CMB vs BAO), ανωμαλία σε κλίμακες υπερ-ορίζοντα, ευθυγράμμιση τετράπολων-οκταπόλων, ανωμαλία ισχυρής επίδρασης ISW, ασυμμετρία κοσμικής ημισφαιρικής ισχύος, ανωμαλία φακού, προτίμηση για συσχετισμούς περιττής ισοτιμίας, ισοτιμία παραβίασης της περιστροφής της CMB γραμμικής πόλωσης κλπ.



Προκλήσεις για Λ CDM: Μια επικαιροποίηση

Ασυμβατότητες με το τυπικό μοντέλο Λ CDM

- Κοσμικά δίπολα ($2-4\sigma$)
- Προβλήματα των βαρυονικών ακουστικών ταλαντώσεων ($2.5-3\sigma$)
- Προβλήματα μικρής κλίμακας
- Η ηλικία του Σύμπαντος
- Το πρόβλημα του Λιθίου
- Hubble διάγραμμα από κβάζαρς ($\sim 4\sigma$)
- Ταλαντούμενα σήματα σε πειράματα βαρύτητας μικρής εμβέλειας
- Ανώμαλη χαμηλή βαρυονική θερμοκρασία
- Συγκρούσιμα συγκροτήματα γαλαξιών με υψηλή ταχύτητα ($\sim 6\sigma$)



Προκλήσεις για Λ CDM: Μια επικαιροποίηση

Μοντέλο Λ CDM - Παραδοχές

- Η ΓΩΣ είναι η σωστή θεωρία που περιγράφει τη βαρύτητα σε κοσμολογικές κλίμακες.

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{16\pi G} (R - 2\Lambda) + \frac{1}{4\alpha} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \mathcal{L}_m(\psi, A) \right]$$

- Το Σύμπαν αποτελείται από ακτινοβολία (φωτόνια, νετρίνα), συνηθισμένη ύλη (βαρυόνια και λεπτόνια), ψυχρή (μη σχετικιστική) σκοτεινή ύλη (CDM) που είναι υπεύθυνη για το σχηματισμό δομής και την κοσμολογικά σταθερά Λ .
- Η Κοσμολογική Αρχή δηλώνει ότι το Σύμπαν είναι στατιστικά ομοιογενές και ισοτροπικό στο χώρο σε αρκετά μεγάλες κλίμακες (>100 Mpc).
- Το χωρικό μέρος της κοσμικής μετρικής θεωρείται επίπεδο που περιγράφεται από τη μετρική Friedmann-Lemaitre-Roberson-Walker (FLRW)

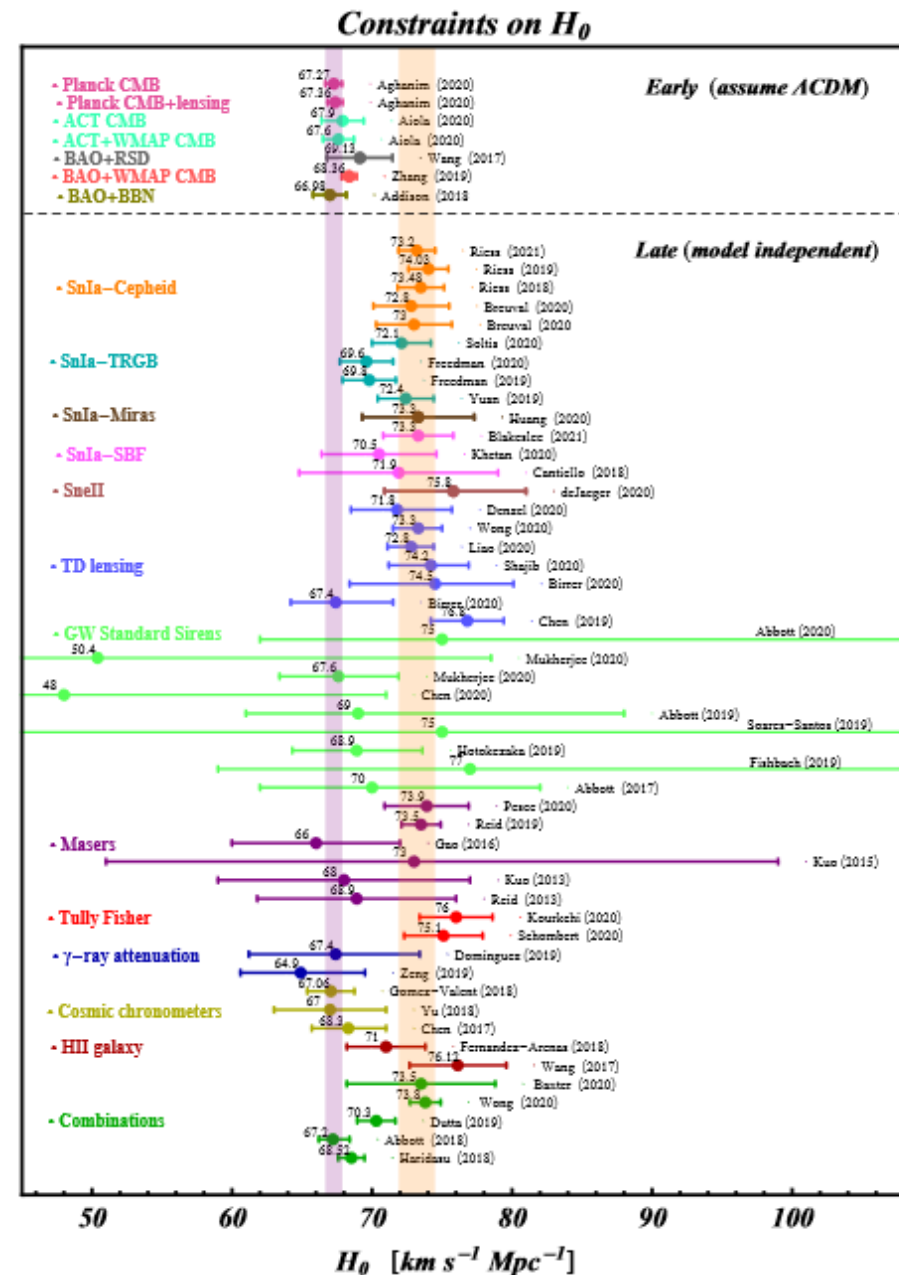
$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 (dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\phi^2)$$

και ισχύουν οι εξισώσεις Friedmann

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3} \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

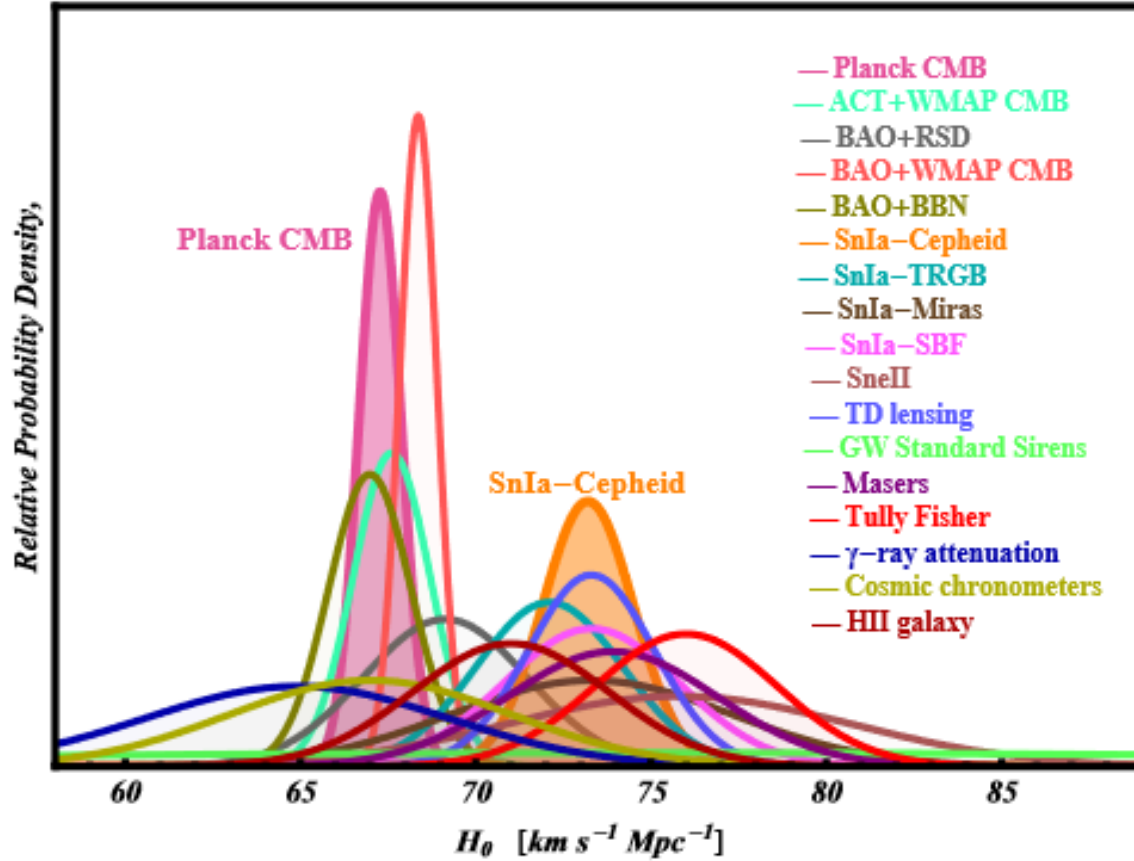
- Θεωρείται επίσης μια αρχέγονη φάση του κοσμικού πληθωρισμού (μια περίοδος γρήγορης επιταχυνόμενης διαστολής) προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα του ορίζοντα και της επιπεδότητας.
- Περιγράφεται από έξι ανεξάρτητες (ελεύθερες) παραμέτρους.

Dataset	H_0 [$\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$]	Year	Refs.
Planck CMB	67.27 ± 0.60	2020	[53]
Planck CMB+lensing	67.36 ± 0.54	2020	[53]
ACT CMB	67.9 ± 1.5	2020	[284]
ACT+WMAP CMB	67.6 ± 1.1	2020	[284]
BAO+RSD	69.13 ± 2.34	2017	[309]
BAO+WMAP CMB	68.36 ^{+0.53} _{-0.52}	2019	[311]
BAO+BBN	66.98 ± 1.18	2018	[86]
SuIa-Cepheid	73.20 ± 1.30	2021	[270]
SuIa-Cepheid	74.03 ± 1.42	2019	[57]
SuIa-Cepheid	73.48 ± 1.66	2018	[277]
SuIa-Cepheid	72.80 ± 2.70	2020	[278]
SuIa-Cepheid	73.00 ± 2.70	2020	[278]
SuIa-TRGB	72.10 ± 2.10	2020	[282]
SuIa-TRGB	69.60 ± 1.90	2020	[109]
SuIa-TRGB	69.80 ± 1.90	2019	[280]
SuIa-TRGB	72.40 ± 2.00	2019	[281]
SuIa-Miras	73.30 ± 4.00	2020	[111]
SuIa-SBF	73.30 ± 2.50	2021	[117]
SuIa-SBF	70.50 ± 4.10	2020	[116]
SuIa-SBF	71.90 ± 7.10	2018	[115]
SuII	75.8 ^{+5.2} _{-4.9}	2020	[125]
Time-delay (TD) lensing	71.8 ^{+3.9} _{-3.3}	2021	[312]
TD lensing	73.3 ^{+1.7} _{-1.6}	2020	[58]
TD lensing	72.8 ^{+1.6} _{-1.7}	2020	[313]
TD lensing	74.2 ^{+2.7} _{-3.0}	2020	[193]
TD lensing	74.5 ^{+5.6} _{-6.1}	2020	[194]
TD lensing+SLACS	67.4 ^{+4.1} _{-3.2}	2020	[194]
TD lensing+SLACS	76.8 ± 2.6	2019	[314]
GW Standard Sirens	75 ⁺¹³ ₋₁₃	2020	[315]
GW Standard Sirens	50.4 ^{+28.1} _{-19.5}	2020	[316]
GW Standard Sirens	67.6 ^{+4.3} _{-4.2}	2020	[316]
GW Standard Sirens	48 ⁺²³ ₋₁₈	2020	[317]
GW Standard Sirens	69.0 ^{+16.0} _{-8.0}	2019	[318]
GW Standard Sirens	75 ⁺⁴⁰ ₋₃₂	2019	[319]
GW Standard Sirens	68.9 ^{+14.7} _{-4.6}	2019	[320]
GW Standard Sirens	77.00 ^{+37.00} _{-18.00}	2019	[219]
GW Standard Sirens	70.0 ^{+13.0} _{-8.0}	2017	[218]
Masers	73.90 ± 3.00	2020	[227]
Masers	73.50 ± 1.40	2019	[321]
Masers	66.0 ± 6.0	2016	[322]
Masers	73.0 ^{+26.0} _{-22.0}	2015	[323]
Masers	68.0 ± 9.0	2013	[324]
Masers	68.9 ± 7.1	2013	[225]
Tully Fisher	76.00 ± 2.60	2020	[325]
Tully Fisher	75.1 ± 2.80	2020	[241]
γ -ray attenuation	67.4 ^{+6.0} _{-6.2}	2019	[247]
γ -ray attenuation	64.9 ^{+4.6} _{-4.3}	2019	[248]
Cosmic chronometers	67.06 ± 1.68	2018	[256]
Cosmic chronometers	67.00 ± 4.00	2018	[255]
Cosmic chronometers	68.3 ^{+2.7} _{-3.6}	2017	[253]
HII galaxy	71.00 ± 2.8	2018	[326]
HII galaxy	76.12 ^{+3.47} _{-3.44}	2017	[327]
CMB (r_s -independent) + lensing + Pantheon	73.5 ± 5.3	2021	[328]
SuIa-Cepheid and TD lensing	73.8 ± 1.1	2020	[58]
SuIa+BAO+TD lensing+cosmic chronometers+ LSS	70.30 ^{+1.36} _{-1.35}	2019	[329]
BAO+BBN+WL-CC	67.20 ^{+1.2} _{-1.9}	2018	[330]
SuIa+BAO+CC	68.52 ^{+0.94} _{-0.94} (+2.51) (sys)	2018	[331]

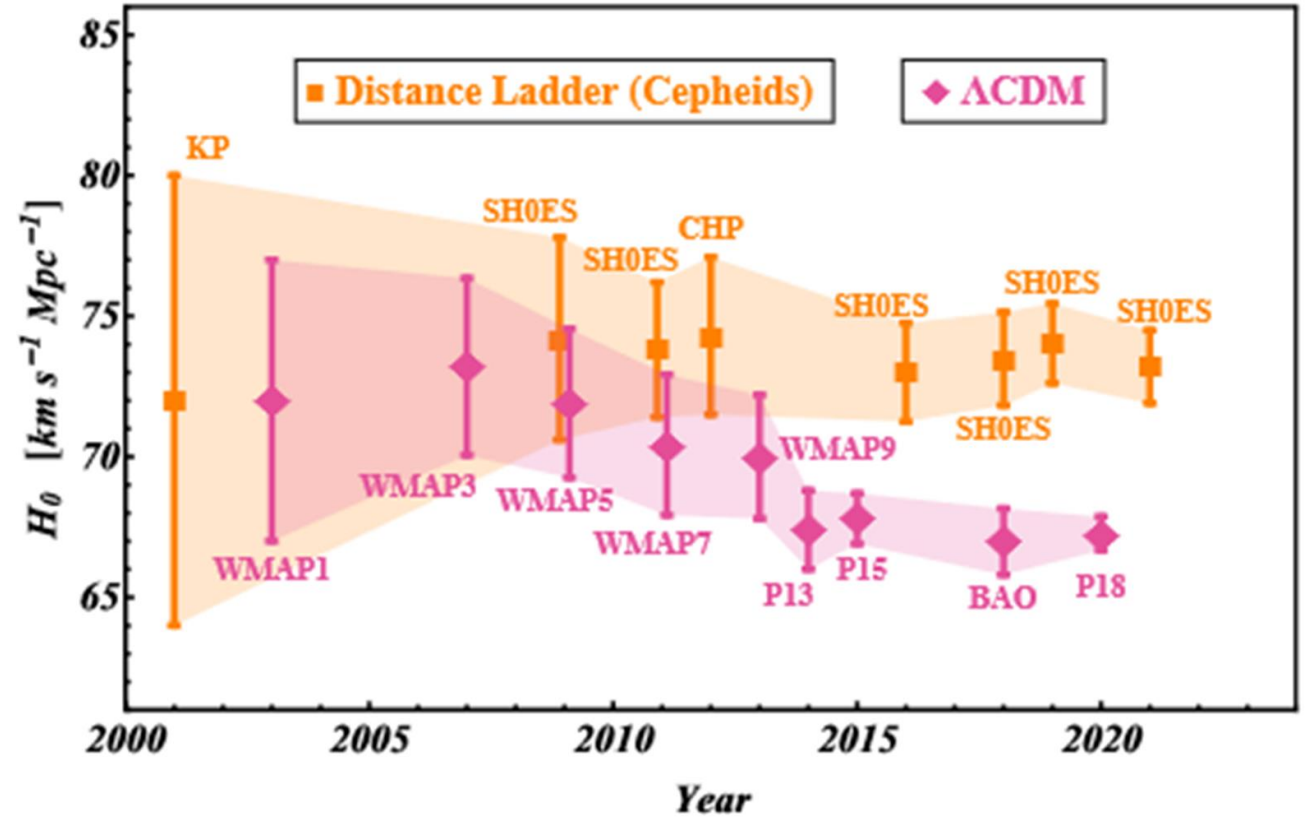


Η κρίση της σταθεράς του Hubble (> 4 σ)

H_0 Measurements (most do not assume Λ CDM)



Η κρίση της σταθεράς του Hubble (> 4 σ)



Ιστορική Εξέλιξη



Προκλήσεις για Λ CDM: Μια επικαιροποίηση

- Η κρίση της σταθεράς του Hubble είναι η πιο σημαντική ένδειξη παρατήρησης ότι το τρέχον πρότυπο (Λ CDM) μπορεί να χρειαστεί να τροποποιηθεί μετά από περισσότερα από 20 χρόνια.
- Βελτίωση της ποιότητας και της ποσότητας των νέων δεδομένων από υπάρχουσες και επερχόμενες αποστολές όπως Euclid, Gaia, James Webb Space Telescope, CMB-S4, Vera C. Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time, Simons Observatory, Einstein Telescope κλπ.

Experiments	Type	Probes	Redshift	Wavelengths	Operator	Duration	Refs.
Euclid	Space	WL, BAO	$z \lesssim 6$	550 nm – 2 μ m	ESA	> 2022	[1364]
Vera C. Rubin Observatory	Ground	WL, BAO	$z \lesssim 7.5$	320 – 1060 nm	LSTT	> 2022	[1365, 1366]
Gaia	Space	Astrometry	$z \approx 0$	320 – 1000 nm	ESA	> 2013	[1286, 1287]
James Webb Space Telescope	Space	WL	$z \lesssim 15$	0.6 – 28.3 μ m	NASA-ESA-CSA	> 2021	[1367, 1368]
GAUSS	Space	WL 3 \times 2pt	$z \lesssim 5$	0.5 – 5 nm		> 2035	[1369]

Ορισμένες υπάρχουσες και επικείμενες αποστολές / πειράματα μεγάλης κλίμακας

Experiments	Type	Detectors	Frequencies ^a (GHz)	Resolution ^b (arcmin)	Sensitivity ^c (μ K arcmin)	Sky Cover	Duration	Refs.
Planck	Space	74	25 – 1000	5 – 33	~ 30	All	2009-2013	[544]
CMB S4	Ground	500 · 10 ³	30 – 270	0.8 – 11	~ 1	70%	> 2027	[1370–1372]
SO LAT ^d	Ground	30 · 10 ³	27 – 280	0.1	~ 6	40%	> 2021	[1373–1375]
SO SATs	Ground	30 · 10 ³	90 – 280	0.5	~ 2	10%	> 2021	[1373–1375]

Ορισμένες υπάρχουσες και επικείμενες αποστολές / πειράματα CMB

Experiments	Type	Detectors	Arms	Frequencies ^a (Hz)	Location	Duration	Refs.
Advanced LIGO	Ground	Laser interferometer	2 \times 4 km	10 – 10 ³	Hanford, USA	> 2015	[335]
Advanced LIGO	Ground	Laser interferometer	2 \times 4 km	10 – 10 ³	Livingston, USA	> 2015	[335]
Advanced Virgo	Ground	Laser interferometer	2 \times 3 km	10 – 10 ³	Pisa, Italy	> 2016	[336]
KAGRA	Undergr.	Laser interferometer	2 \times 3 km	10 – 10 ³	Kamioka, Japan	> 2020	[1385, 1386]
CE	Ground	Laser interferometer	2 \times 40 km	5 – 4 · 10 ³	USA	> 2030	[1387–1389]
LISA	Space	Laser interferometer	3 \times 2.5 Gm	10 ⁻⁴ – 10 ⁻¹	Heliocentric orbit	> 2034	[1390]
Taiji	Space	Laser interferometer	3 \times 2 Gm	10 ⁻⁴ – 10 ⁻¹	Heliocentric orbit	> 2033	[1391, 1392]
TianQin	Space	Laser interferometer	3 \times 0.1 Gm	10 ⁻⁴ – 1	Geocentric orbit	> 2035	[1393, 1394]
DECIGO	Space	Laser interferometer	4 clusters 3 \times 1 Mm	1 – 10	Heliocentric orbit	> 2027	[1395, 1396]
ET	Undergr.	Laser interferometer	3 \times 2 \times 10 km	1 – 10 ⁴		> 2035	[1397, 1398]

Μερικά υπάρχοντα και επερχόμενα πειράματα GW / παρατηρητήρια





Η κοσμολογία μπαίνει σε μια ακόμη πιο συναρπαστική εποχή!

Ο συνδυασμός των υπάρχοντων προβληματικών σημάτων παρατήρησης που συζητήθηκαν σε αυτήν την ανασκόπηση, μαζί με την επερχόμενη επαναστατική βελτίωση της ποιότητας και της ποσότητας δεδομένων δημιουργεί προσδοκία για συναρπαστικά νέα αποτελέσματα και νέες ανακαλύψεις φυσικής τις επόμενες δύο δεκαετίες.

Τέλος



Ευχαριστώ