



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Into the darkness : forging a stable path through the gravitational landscape

Papadomanolakis, G.

Citation

Papadomanolakis, G. (2019, September 19). *Into the darkness : forging a stable path through the gravitational landscape*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/78471>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/78471>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/78471> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Papadomanolakis, G.

Title: Into the darkness : forging a stable path through the gravitational landscape

Issue Date: 2019-09-19

Περίληψη

Η ανακάλυψη της επιταχυνόμενης διαστολής του σύμπαντος είναι μια από τις σημαντικότερες στην ιστορία της φυσικής και ως εκ τούτου άλλαξε της ισοροπίες στο πεδίο της κοσμολογίας. Σε συνδυασμό με την ανακάλυψη της μαύρης ύλης, η παραπάνω ανακάλυψη οδήγησε στην δημιουργία του κοσμολογικού μοντέλου ονομάτι Λ CDM . Το συγκεκριμένο μοντέλο υποθέτει την ύπαρξη μιας Κοσμολογικής Σταθεράς στη δράση της Γενικής Σχετικότητας. Η Κοσμολογική Σταθερά εισήχθη για πρώτη φορά απο το Άλμπερτ Άινσταιν και μπορεί να ερμηνευθεί ως την ενέργεια του κενού. Ο τομέας της Μαύρης Ύλης εκπροσωπείται απο ένα ρευστό χωρίς πίεση, το οποίο απαρτίζεται από αργά κινούμενα σωματίδια, ονομάτι Κρύα Μαύρη Ύλη. Έως σήμερα το μοντέλο Λ CDM έχει υπάρξει πολύ επιτυχημένο στην επεξήγηση των κοσμολογικών παρατηρήσεων, ένα αξιοσημείωτο γεγονός, λόγω της απλότητας του.

Παρά την επιτυχία του, το μοντέλο Λ CDM είναι προβληματικό από θεωρητικής άποψης. Συγκεκριμένα, η ερμηνεία της Κοσμολογικής Σταθεράς ως την ενέργεια του κενού παρουσιάζει ένα σημαντικό θεωρητικό πρόβλημα. Η παρατηρηθείσα τιμή, σε τιμές της μάζας Planck, ανέρχεται σε $\Lambda_{obs} \sim (10^{-30} M_{pl})^4$. Από την θεωρητική πλευρά, ο υπολογισμός της Κοσμολογικής Σταθεράς μέσω του Καθιερωμένου Σωματιδιακού Προτύπου, οδηγεί σε μια τιμή ανώτερη κατά 60 τάξεις μεγέθους. Η παραπάνω διαφορά οδήγησε σε μια εκτεταμένη έρευνα για εναλλακτικές λύσεις, που κατέληξε σε ένα τεράστιο βαρυτικό τοπίο απαρτιζόμενο από μοντέλα τα οποία εξηγούν την κοσμολογική διαστολή με διάφορους τρόπους.

Τα περισσότερα μοντέλα που δημιουργήθηκαν εισάγουν νεους βαθμούς ελευθερίας επάνω στη θεωρία της Γενικής Σχετικότητας, απο βαθμωτά έως τανιστικά πεδία. Αυτή η εξέλιξη οδήγησε σε ένα μεγάλο και δισεπίλυτο βαρυτικό τοπίο, κάνοντας κάθε προσπάθεια σύγκρισης με το Λ CDM, αναποτελεσματική μιας και κάθε νεο μοντέλο πρέπει να ελεγχθει ατομικά με τα διαθέσιμα κοσμολογικά δεδομένα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να διευκολυνθει με τη βοήθεια ενός συνόλου θεωρητικών προϋποθέσεων. Το συγκεκριμο σύνολο εξαλείφει ασταθή μοντέλα και ως εκ τούτου μειώνει δραστικά το χώρο παραμέτρου των μοντέλων που επεκτείνουν την θεωρία της Γενικής Σχετικότητας.

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή παρουσιάσαμε τον υπολογισμό, και τον επακόλουθο έλεγχο, ενός ολοκληρωμένου συνόλου προϋποθέσεων το οποίο πρέπει να ικανοποιει κάθε μοντέλο που επεκτείνει την θεωρία της Γενι-

κής Σχετικότητας, ώστε να θεωρηθεί ένα βιώσιμο κοσμολογικό μοντέλο. Στο έργο μας εστιάσαμε τη προσοχή στην υποκατηγορία μοντέλων που εισάγουν ένα βαθμωτό πεδίο, μιας και είναι η πιό κατοικημένη και ποίκιλη υποκατηγορία. Ένα παράδειγμα μιας βαθμωτής-τανυστικής θεωρίας είναι το μοντέλο Horndeski το οποίο, μέχρι προσφάτως, θεωρούνταν η πιο γενική θεωρία με εξισώσεις κίνησης δευτέρου βαθμού. Για να πετύχουμε το στόχο μας χρησιμοποιήσαμε το αποτελεσματικό και ενοποιητικό πλαίσιο της Αποτελεσματικής Πεδιακής Θεωρίας της Μαύρης Ενέργειας και της Μεταλλαγμένης Βαρύτητας (ΑΠΘτΜΕ/ΜΒ). Αυτή η επιλογή μας επέτρεψε να δημιουργήσουμε τις επιθυμητές προϋποθέσεις χωρίς να επιλέξουμε κάποιο συγκεκριμένο μοντέλο.

Το σύνολο των προϋποθέσεων που λάβαμε υπόψιν εγγυώνται την αποφυγή των ghost, gradient και ταχυονικών ασταθειών. Από τις παραπάνω, η ταχυονική αστάθεια έχει παραμεληθεί στην επιστημονική βιβλιογραφία και χρειάζεται εκτεταμένη μέριμνα. Στα τρία πρώτα Κεφάλαια υπολογίσαμε το σύνολο των προϋποθέσεων στο κενό, ύπο την επίρρεια δύο υλικών πεδίων, ακτινοβολία και κρύα μαύρη ύλη, και στο όριο de-Sitter.

Παρότι το σύνολο των προϋποθέσεων ύπο την επίρρεια υλικών πεδίων είναι η πιο ενδιαφέρουσα, ο βαθμός δυσκολίας του υπολογισμού τους συχνά οδηγεί στην παραμέλησή τους. Το έργο μας καλύπτει το συγκεκριμένο θεωρητικό κενό και μας επιτρέπει να αναλύσουμε εις βάθος την επιρροή των υλικών πεδίων. Στην περίπτωση των ghost και gradient ασταθειών βρήκαμε ότι, σε γενικές γραμμές, οι δύο περιπτώσεις δεν διαφέρουν και η παραμέληση των υλικών πεδίων είναι δεκτή. Η μοναδική εξαίρεση είναι η περίπτωση των beyond Horndeski μοντέλων μιας και η ταχύτητα διαδοχής τους εξαρτάται από το πεδίο ακτινοβολίας, ένα φαινόμενο που επηρεάζει την gradient αστάθεια. Η ταχυονική αστάθεια, από την άλλη, εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τα υλικά πεδία ανεξαρτήτως περίπτωσης. Συγκεκριμένα, κάθε υλικό πεδίο εισάγει μια νέα προϋπόθεση, αλλειώνοντας εις βάθος τα αποτελέσματα που υπολογίσαμε στο κενό. Αυτό είναι το άμεσο αποτέλεσμα της βαρυτικής αλληλοεπίδρασης μεταξύ των υλικών πεδίων και του νέου βαθμωτού πεδίου. Η νέες ταχυονικές προϋποθέσεις είναι το κυρίως καινοτόμο αποτέλεσμα στην συγκεκριμένη πτυχιακή με υψηλή μελλοντική επίδραση στο πεδίο της μαύρης ενέργειας και της μεταλλαγμένης βαρύτητας.

Ο πρωταρχικός στόχος, μετά την ολοκλήρωση του υπολογισμού των προϋποθέσεων που εγγυώνται την έλλειψη ταχυονικών ασταθειών, είναι ο έλεγχος και η προβολή της επιρροής τους στο βαρυτικό τοπίο. Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιήσαμε το συγκεκριμένο στόχο με την βοήθεια του προγράμματος EFTCAMB, ένα patch του Boltzmann κώδικα CAMB, που ενσωματώνει την ΑΠΘτΜΕ/ΜΒ. Μέχρι προσφάτως, για να εγγυηθεί η σταθερότητα των κοσμολογικών μοντέλων, ένα σύνολο ad-hoc μαθηματικών προϋποθέσεων είχαν προστεθεί στις ghost και gradi-

ent προϋποθέσεις. Οι συγκεκριμένες ad-hoc προϋποθέσεις ήταν αποτελεσματικές αλλά βασίζονταν σε προβληματικές υποθέσεις. Ο τελικός στοχος είναι η αντικαταστασή τους με τις ταχυονικές προϋποθέσεις και την ανάλυση της διαφοράς. Η ανάλυση έδειξε ότι οι δυο επιλογές έχουν παρόμοια δύναμη περιορισμού του βαρυτικού τοπίου με τις ταχυονικές προϋποθέσεις ελαφρώς πιο ισχυρές. Στη συνέχεια αναλύσαμε την επιρροή στο χώρο παραμέτρου (μ, Σ) το οποίο κωδικοποιεί την απόκλιση από τη Γενική Σχετικότητα στις εξισώσεις Poisson και βαρυτικής εστίασης, αντιστοίχως. Αυτό οδήγησε στον ενοτισμό μιας σημαντικής απόκλισης στα μοντέλα μη ελάχιστης σύζευξης με κανονικό κινετικό όρο, ονομάτι Generalised Brans Dicke (GBD). Είναι ξεκάθαρο ότι οι ταχυονικές προϋποθέσεις, μιας και είναι θεωρητικά πιο αποδεκτές, αξίζουν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τις γηροστ και γραδιεντ.

Παράλληλα με την αποπάνω εργασία πάνω στη θεωρητική σταθερότητα προχωρήσαμε σε μερικές βελτιώσεις του πλαισίου της ΑΠΘτΜΕ/ΜΒ. Στο πρώτο Κεφάλαιο παρουσιάσαμε μια επέκταση της ΑΠΘτΜΕ/ΜΒ ώστε να συμπεριληφθεί το βαρυτικό μοντέλο Hořava. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι υποψήφιο για την κβαντική βαρύτητα και την κοσμική διαστολή. Στη συνέχεια δημιουργήσαμε ένα «λεξικό» το οποίο παρουσιάζει την μορφή συγκεκριμένων βαρυτικών μοντέλων μέσα στο πλαίσιο της ΑΠΘτΜΕ/ΜΒ. Συγκεκριμένα συμπεριλαμβάνουμε όλα τις γνωστές βαθμωτές ταυσιτικές θεωρίες με εξαίρεση τη θεωρία DHOST που χρειάζεται ένα παραπάνω τελεστή που δεν συμπεριλάβαμε. Στο τέλος παρουσιάσαμε μια νέα βάση για τους τελεστές, βασισμένη στη βάση ReParametrized Horndeski ή άλφα που προσπαθεί να ξεκαθαρίσει τη φυσική σημασία του κάθε τελεστή.

Το έργο το οποίο παρουσιάζει η συγκεκριμένη πτυχιακή καλύπτει μια γραμμή έρευνας που έφτασε στο τέλος της. Στο πέμπτο Κεφάλαιο κάναμε μια επίδειξη των πιθανών εφαρμογών των αποτελεσμάτων. Στο μέλλον οι εφαρμογές θα επεκταθούν, καθώς όλο και περισσότερα κοσμολογικά δεδομένα γίνονται διαθέσιμα και η δυνατότητα περιορισμού του βαρυτικού τοπίου γίνεται πιο εφικτή. Επιπλέον, τα νέα κοσμολογικά δεδομένα κάνουν εφικτή την ανακατεσκευή των συναρτήσεων της ΑΠΘτΜΕ/ΜΒ με μεθόδους που δεν χρειάζονται την επιλογή ενός μοντέλου. Οι συγκεκριμένες ανακατεσκευές θα χρησιμοποιήσουν τις θεωρητικές προϋποθέσεις ώστε να αποφύγουν περιοχές των χωρών παραμέτρου που δεν επιτρέπουν βιώσιμα κοσμολογικά μοντέλα. Ως εκ τούτου ελπίζουμε το έργο μας να παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην τρέχον χρυσή εποχή της κοσμολογίας.

