

# ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΡΙΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Γιώργος Κουτσούμπας

14 Ιουλίου 2017

Κ.Αναγνωστόπουλος  
Γ.Ζουπάνος  
Ν.Ήργες  
Α.Κεχαγιάς  
Γ.Κουτσούμπας  
Λ.Παπαντωνόπουλος  
Ν.Τράκας  
Κ.Φαράκος

# Μεταδιδακτορικοί Συνεργάτες:

Ι.Νταλιάνης

Κ.Ντρέκης

Γ.Πάσπρας

Μ.Σαριδάκης

Γ.Τσάμης

Μ.Τσουκαλάς

Μ.Αλεξίου  
Γ.Δούζας  
Δ.Γαβριήλ  
Α.Χατζηαγαπίου  
Φ.Κουτρούλης  
Γ.Μανωλάκος  
Γ.Μητσούλας  
Κ.Ντρέκης (τέλειωσε)  
Γ.Ορφανίδης  
Σ.Παπαδούδης  
Γρ.Πατέλης  
Ι.Σκλαβούνος  
Ι.Τοψής-Γιώτης (τέλειωσε)  
Γ.Τσάμης (τέλειωσε)

# Δημοσιεύσεις :

- 5 Διπλωματικές εργασίες
- 8 Μεταπτυχιακές εργασίες
- 3 Διδακτορικές Διατριβές

- 29 Δημοσιεύσεις σε περιοδικά
- 6 Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων
- 11 προδημοσιεύσεις

16th Hellenic School and Workshops on Elementary Particle Physics and Gravity (Corfu Summer Institute),  
31/8-23/9/2016. Γίνεται κάθε χρόνο. Το 2017, περιλαμβάνει δύο θερινά σχολεία και τέσσερα Workshop.

Workshop on Gravitational waves in Modified Gravity Theories,  
NTUA, 15-17 Σεπτέμβρη 2016.

9th Aegean Summer School on Einstein's Theory of Gravity and its Modifications: from Theory to Observations, Σίφνος, 18-23 Σεπτέμβρη 2017. Γίνεται κάθε δύο χρόνια.

Συμμετοχή στη συνάντηση του COST: The Early Universe as a Signature for Quantum Spacetime, ΕΜΠ, 27-29 Μάρτη 2017.

Κάθε εβδομάδα λειτουργεί το Journal Club της ομάδας, που είναι ενημερωτικές παρουσιάσεις και ερευνητικά σεμινάρια.



Οργανώθηκαν μια σειρά από ομιλίες προς τους σπουδαστές και τους συναδέλφους. Την τελευταία χρονιά είχαμε τις εξής:

I.Ηλιόπουλος (ENS, Παρίσι): From Rutherford to LHC, 100 Years Research in the infinitesimal Small

R. Brandenberger (McGill, Καναδάς): Testing Superstring Theory with Cosmological Observations?

D.Gross (Santa Barbara Un.): The discovery and understanding of the basic building blocks of all matter and the forces that act on them

K. Κόκκοτας (Tübingen, Γερμανία): Gravitational Waves, Observation and Prospects.

Μέλη της ομάδας συμμετέχουν, από το 2005, στην διοργάνωση International Master Classes in Particle Physics, που απευθύνεται σε μαθητές Λυκείου.

Στην Αθηναϊκή διοργάνωση συμμετέχουν περί τους 120 μαθητές, αλλά γίνονται και τοπικές εκδηλώσεις σε μεγάλες πόλεις της περιφέρειας όλο το χρόνο.

Γίνονται εκλαϊκευτικές ομιλίες σε Λύκεια της χώρας, μετά από πρόσκληση.

# Εξοπλισμός: Computer Cluster

Αποτελείται από 32 nodes (14 Intel i7 @ 3.4GHz, 1 Intel i7, 3.07GHz, 2 Intel Core2 Quad , 2.33GHz, 15 Intel Core2 Duo, 3.00GHz).

Εκεί γίνεται η υπολογιστική επεξεργασία σχετικά μικρής ή μεσαίας κλίμακας ερευνητικών και εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων, όπως Διπλωματικών και Μεταπτυχιακών Διατριβών.

Χρησιμοποιείται ακόμα για την ανάπτυξη κωδίκων υψηλών απαιτήσεων, που στηρίζουν τις διεθνείς συνεργασίες των μελών. Πολλές απ' αυτές τις εργασίες, όταν φτάσουν στο παραγωγικό στάδιο, δουλεύονται και σε υπερυπολογιστές όπως ο K Computer, RIKEN, Kobe και ο KEK cluster, Tsukuba στην Ιαπωνία.

**Θεωρητική, Μαθηματική και Υπολογιστική Φυσική**  
**Στοιχειωδών Σωματιδίων και Βαρύτητας** με έμφαση στα εξής:  
Διαταρακτικές και μη μέθοδοι κβάντωσης, πεπερασμένες θεωρίες, υπερσυμμετρία και υπερβαρύτητα, θεωρία (υπερ)χορδών, μη μεταθετική γεωμετρία, διαστατική ελάττωση, πλεγματικές θεωρίες βαθμίδας, μη διαταρακτική μελέτη κβαντικής βαρύτητας, γενικευμένες θεωρίες βαρύτητας, δυϊκότητα AdS/CFT και ολογραφικά πρότυπα, απειροδιάστατες συμμετρίες, γεωμετρική ανάλυση, φαινομενολογία.

**Θεωρητική και Υπολογιστική Φυσική Συμπυκνωμένης Ύλης**  
με έμφαση στα εξής: Κβαντομηχανικοί υπολογισμοί από πρώτες αρχές για ιδιότητες υλικών, όπως γραφένιο και άλλα δισδιάστατα συστήματα, οργανικοί ημιαγωγοί, ηλεκτρονικά υλικά, συστήματα πολλών σωματιδίων, σύνθετες μεταβάσεις φάσεων, υπεραγωγιμότητα, μαγνητισμός, συνύπαρξη φάσεων, κβαντικοί υπολογιστές, κβαντική οπτική, πλασματική, νανοφωτονική, τοπολογική φωτονική, μεταϋλικά, υγροί κρύσταλλοι, φωτονικά υλικά, μαγνητοηλεκτρονική (σπιντρονική) και φαινόμενα μεταφοράς σε χαμηλοδιάστατα συστήματα.

**Η ερευνητική δραστηριότητα του σπουδαστηρίου  
αναλυτικότερα...**

Σ' αυτό το κλίμα εντάσσονται δύο δραστηριότητες.

(A) Επιλέγονται υπερσυμμετρικές θεωρίες στοιχειωδών σωματιδίων με βάση το κριτήριο να είναι πεπερασμένες, δηλαδή απαλλαγμένες από απειρισμούς. Είναι ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό, το να μπορείς κανείς να απαλλαγεί από τους προβληματικούς απειρισμούς. Αυτή η απαίτηση ακριβώς δίνει συγκεκριμένες προβλέψεις, όπως η μάζα του σωματιδίου higgs, η οποία είναι αυθαίρετη στο πλαίσιο του Καθιερωμένου Προτύπου. Επίσης, δίνει μια εκτίμηση για την κλίμακα παραβίασης της Υπερσυμμετρίας.

Η ερευνητική δραστηριότητα έγκειται ειδικότερα στην συσχέτιση της σταθεράς σύζευξης τύπου Yukawa για το υψηλό κουάρκ, καθώς και της σταθεράς που καθορίζει την μάζα του σωματιδίου higgs, με αυτήν της ισχυρής αλληλεπίδρασης. Η μέθοδος επεκτείνεται και στο Ελάχιστο Υπερσυμμετρικό Καθιερωμένο Πρότυπο (MSSM) και δίνει αποτελέσματα συμβατά με τα ως τώρα πειραματικά αποτελέσματα.



(B) Ένας άλλος τομέας που με επιτυχία μπορεί να εφαρμοσθεί η μέθοδος είναι οι λεγόμενες Πεπερασμένες Θεωρίες Βαθμίδας όπου, το σωματιδιακό περιεχόμενο σε συνδυασμό με την ομαδοθεωρητική δομή του προτύπου, συντελούν ώστε να μην εμφανίζονται απειρίες σε προσεγγίσεις ανώτερης τάξης, δηλ. το πρότυπο δεν απαιτεί ανακανονικοποίηση. Έχει μελετηθεί ένα τέτοιο πρότυπο που στηρίζεται στην ομάδα  $SU(5)$  με πολύ καλή συμφωνία με πειραματικές τιμές και όρια/περιορισμούς.

# Πρότυπο higgs: μη διαταρακτική μελέτη

Το πρότυπο higgs λειτουργεί μεν και έδωσε πετυχημένες προβλέψεις, αλλά έχει κενά...

## Ενδεικτικά ερωτήματα:

(A) Γιατί στο σχετικό δυναμικό

$$V = -\mu^2 H^2 + \lambda H^4, \quad \mu > 0, \quad \lambda > 0,$$

εμφανίζονται αντίθετα πρόσημα στους δύο όρους;

(B) Γιατί η μάζα του σωματιδίου higgs διατηρείται μικρή, κάτω από κβαντικές διαταραχές, σε σχέση με την υψηλότερη ενεργειακή κλίμακα που εμφανίζεται στην θεωρία, όπως η κλίμακα της ενοποίησης ή η κλίμακα του Planck;

# Πρότυπο higgs: μη διαταρακτική μελέτη

Και τα δύο αυτά ερωτήματα μπορούν να απαντηθούν ταυτόχρονα, αν κάνει κανείς την υπόθεση ότι το πεδίο higgs προέρχεται από την αναγωγή σε τέσσερις διαστάσεις ενός πενταδιάστατου πεδίου βαθμίδας.

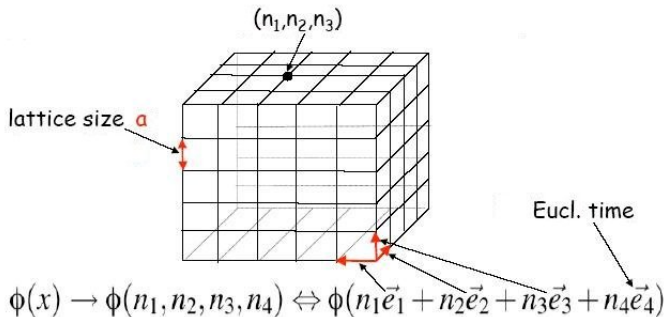
## Πρότυπο higgs: μη διαταρακτική μελέτη

Οι τέσσερις από τις διαστάσεις υποτίθενται μεγάλες, ενώ η πέμπτη να είναι ένα πεπερασμένο ευθύγραμμο τμήμα. Τότε στην τετραδιάστατη οριακή επιφάνεια εμφανίζεται ένα σύστημα που αντιστοιχεί στον τομέα higgs του ΚΠ, **αρκεί αυτή να αποσυζευχθεί από τον κύριο όγκο του όλου συστήματος.** Αυτό συμβαίνει μόνο κοντά σε μια κβαντική μεταβολή φάσης στο εσωτερικό του διαγράμματος φάσης.

Αναγκαία μια μή διαταρακτική μελέτη, π.χ. το χωροχρονικό πλέγμα.

# Πρότυπο higgs: μη διαταρακτική μελέτη

Το χωροχρονικό πλέγμα είναι μια διατύπωση, όπου ο χωροχρόνος προσεγγίζεται με μια διαμέριση. Η θεωρία μεταπίπτει σε ένα στατιστικό σύστημα, όπου μπορεί κανείς να συναντήσει φαινόμενα όπως π.χ. οι μετατροπές φάσης και να εκμεταλλευτεί εργαλεία Στατιστικής Φυσικής.



# Πρότυπο higgs: μη διαταρακτική μελέτη

**Εργαλεία:** Προσέγγιση Μέσου Πεδίου, προσομοιώσεις Monte Carlo, καμπύλες ροής της ομάδας επανακανονικοποίησης (RG flows), τεχνικές Ολογραφίας.

Η μη διαταρακτική μελέτη κβαντικών θεωριών βαθμίδας μπορεί να γίνει μια εξαιρετικά επίπονη διαδικασία. Στο παρελθόν με κύριο συνεργάτη τον F. Knechtli του Παν. του Wuppertal, Γερμανία, έχει εξεταστεί το σύστημα αυτό από διάφορες οπτικές γωνίες μέσω τεχνικών Πλέγματος. Πρόσφατα, έχει ξεκινήσει το διδακτορικό του σε αυτήν την κατεύθυνση ο Α. Χατζηγαπίου.

# Πρότυπο higgs: μη διαταρακτική μελέτη

Για την αναλυτική κατανόηση της δυναμικής και της κατανομής/συμπεριφοράς των συμμετριών χρειάζεται μια ενεργός δράση. Αυτή είναι και η αναγκαία γλώσσα επικοινωνίας μεταξύ του Διακριτού κόσμου του πλέγματος, δηλαδή της προσέγγισης μέσω της Στατιστικής Φυσικής (η και της Φυσικής Στερεάς Κατάστασης) και του κόσμου των Συνεχών, Σχετικιστικά Αναλλοίωτων Κβαντικών Θεωριών βαθμίδας. Πάνω σε αυτό δουλεύει επί του παρόντος ο Φ. Κουτρούλης.

# Πρότυπο higgs: μη διαταρακτική μελέτη

Συναφής με τα προηγούμενα είναι η μελέτη ανισότροπων πενταδιάστατων θεωριών βαθμίδας, που είναι, όμως, συζευγμένες με βαθμωτά πεδία.

Μελετήθηκε το διάγραμμα φάσεων τέτοιων προτύπων με προσομοιώσεις Monte Carlo και εντοπίστηκαν οι φάσεις τους.



## Πρότυπο higgs: μη διαταρακτική μελέτη

Μία ενδιαφέρουσα νέα φάση είναι η στρωματική φάση, όπου ξεχωρίζει η συμπεριφορά του συστήματος στον τετραδιάστατο υπόχωρο (layer) από την συμπεριφορά στις επιπλέον διαστάσεις (bulk).

Μπορούμε να έχουμε λοιπόν την φάση higgs (παραβιασμένης συμμετρίας) στον τετραδιάστατο υπόχωρο και απαραβίαστη την συμμετρία βαθμίδας εκτός του τετραδιάστατου υπόχωρου.

Αυτό σημαίνει αφ' ενός μεν διαφορετικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων ανάλογα με το που βρίσκονται αλλά και περιορισμό των σωματιδίων μέσα στον τετραδιάστατο υπόχωρο για μικρές ενέργειες.

# Πρότυπο higgs: μη διαταρακτική μελέτη

Τα καίρια θέματα είναι τα ακόλουθα :

(A) Ακριβής προσδιορισμός των δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων στην στρωματική φάση, ώστε να διαπιστωθούν οι επιπτώσεις στις γνωστές δυνάμεις, λόγω της παρουσίας των επιπλέον διαστάσεων.

(B) Ακριβής προσδιορισμός της τάξης των αλλαγών φάσης που χωρίζουν τη στρωματική φάση από τις υπόλοιπες. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις αλλαγές φάσης δευτέρου είδους διότι μόνο εκεί μπορεί να οριστεί η αντίστοιχη θεωρία στο συνεχές και να αγνοηθεί η επίδραση της πεπερασμένης πλεγματικής σταθεράς.

# Πρότυπα Πινάκων-Συμπαγοποίηση

(Α) Εξετάζονται με μη διαταρακτικές μεθόδους πρότυπα θεωρίας υπερχορδών, που ονομάζονται πρότυπα πινάκων (matrix models).

(Β) Μελετώνται επίσης πρότυπα δυναμικής συμπαγοποίησης των επί πλέον διαστάσεων στις θεωρίες υπερχορδών.

(Γ) Μια τρίτη δραστηριότητα αφορά ένα πιο τεχνικό πρόβλημα: τη μιγαδική δράση στις προσομοιώσεις Μόντε Κάρλο θεωριών πεδίου.

Πραγματοποιούνται υπολογισμοί υψηλής απόδοσης με μεθόδους Μόντε Κάρλο με εφαρμογές στα πρότυπα πινάκων. Η παραπάνω έρευνα γίνεται σε συνεργασία με ερευνητικές ομάδες στην Ιαπωνία και με τη βοήθεια ενός ΥΔ του τομέα μας (Στράτου Παπαδούδη).

Η δραστηριότητα αυτή έχει να κάνει με τη μελέτη της θεωρίας του Einstein για τη βαρύτητα και των επεκτάσεών της. Το κίνητρο είναι διπλό:

(A) Τα τελευταία κοσμολογικά και αστροφυσικά δεδομένα αναφορικά με τη σκοτεινή ύλη, τη σκοτεινή ενέργεια και τα προσφάτως ανακαλυφθέντα βαρυτικά κύματα, επιβάλλουν την τροποποίηση της ΓΘΣ κυρίως για μεγάλες αποστάσεις.

(B) Η Φυσική και οι ιδιότητες των Μελανών Οπών μελετήθηκαν στο πλαίσιο της λεγόμενης αντιστοιχίας AdS/CFT, που κατέληξε στην αρχή του δυϊσμού, που επιτρέπει να μελετηθούν φαινόμενα με ισχυρή ζεύξη στην Κβαντική Θεωρία Πεδίου χρησιμοποιώντας αποτελέσματα από ασθενικά συζευγμένο βαρυτικό υπόβαθρο.

Αυτές οι εξελίξεις φέρνουν κοντά Φυσικούς από διαφορετικούς κλάδους της Θεωρητικής Φυσικής, όπως η Θεωρία Χορδών, η Κβαντική Θεωρία Πεδίου, η Βαρύτητα και η Φυσική Συμπυκνωμένης Ύλης.

Τελευταία επιτεύγματα σ' αυτήν την κατεύθυνση ήταν η κατασκευή νέων γεωμετρικών βαρυτικών μοντέλων με σαφείς πειραματικές προβλέψεις, καθώς και ενός γεωμετρικού ενοποιημένου προτύπου για την σκοτεινή ύλη και τη σκοτεινή ενέργεια, χωρίς την ανάγκη εισαγωγής ad hoc όρων.



# Διαστατική αναγωγή σε πολλαπλότητες Kähler

Η βασική αρχή είναι να αναχθούν θεωρίες βαθμίδας από κάποιες ανώτερες διαστάσεις στις τέσσερις, έτσι ώστε να δοθεί κάποια γεωμετρική ερμηνεία στην παραβίαση της συμμετρίας.

Παλιά ιδέα, η οποία, στην αρχική της μορφή περιοριζόταν σε συνηθισμένους χώρους-πηλίκια. Με τα χρόνια επεκτάθηκε και σε πιο εξωτικά μαθηματικά αντικείμενα, όπως οι πολλαπλότητες (σχεδόν) Kähler.

Η πρόσφατη ιδέα ήταν να αναχθεί μια ετερωτική υπερχορδή  $E_8$  από τις 10 διαστάσεις στις τέσσερις. Προέκυψε μία θεωρία  $SU(3) \times SU(3) \times SU(3)$ , η οποία, μετά την παραβίαση της συμμετρίας, οδήγησε σε μια επέκταση του Ελάχιστου Υπερσυμμετρικού Καθιερωμένου Προτύπου (MSSM), που μπορεί να ελεγχθεί πειραματικά στα προσεχή χρόνια.

Σ' αυτήν την ενότητα γίνεται προσπάθεια να κατασκευαστούν μοντέλα σε ασαφείς γεωμετρίες των επί πλέον διαστάσεων. Η μη μεταθετική Γεωμετρία παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο σ' αυτές τις απόπειρες. Η αναγωγή σε ασαφείς χώρους-πηλικά είναι μιά από τις αναγνωρίσιμες προσεγγίσεις στην κατασκευή προτύπων.

Μια πρόσφατη δημοσίευση της ομάδας δείχνει πώς μη μεταθετικές ασαφείς επί πλέον διαστάσεις μπορούν να προκύψουν από απλά μοντέλα θεωρίας πεδίου, τα οποία είναι χειραλικά και ανακανονικοποιησιμα. Είναι η πρώτη πετυχημένη σύζευξη ανακανονικοποιησιμότητας και μη μεταθετικής Γεωμετρίας.

# Πληθωρισμός-Χώροι de Sitter-Σκοτεινή ύλη και ενέργεια-αξίονια

(A) Κατά τη διάρκεια του πληθωρισμού το κοσμολογικό υπόβαθρο, που υφίσταται εκθετική διαστολή, περιγράφεται ικανοποιητικά από έναν χώρο de Sitter. Οι ισομετρίες αυτού του χώρου αντανακλώνονται σε ταυτότητες Ward για τους συσχετιστές των διακυμάνσεων πυκνότητας.

Το φάσμα μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια των αλγεβρών Lie. Επί πλέον οι συμμετρίες αυτές συνεπάγονται, μέσω της σύμμορφης θεωρίας πεδίου (CFT), τις λεγόμενες σχέσεις συνέπειας, οι οποίες είναι μη διαταρακτικές σχέσεις μεταξύ συσχετιστών.

# Πληθωρισμός-Χώροι de Sitter-Σκοτεινή ύλη και ενέργεια-αξίονια

Αυτές οι σχέσεις περιμένουμε ότι θα μπορούν να ελεγχθούν σε κάποιο σημείο πειραματικά και να δώσουν σημαντικότερη πληροφορία για το είδος και τη φυσική των πεδίων που δημιουργούν τον πληθωρισμό.

(B) Μία άλλη δραστηριότητα αφορά την μελέτη σκοτεινής ύλης στα πλαίσια της φυσικής υψηλών ενεργειών. Στα πλαίσια αυτά, μελετάται η πιθανότητα η σκοτεινή ύλη να αποτελείται από υπερ-ελαφρά αξίονια πολύ μικρής μάζας ( $10^{-23} eV$ ). Τα αξίονια αυτά κάνουν συμπύκνωση Bose-Einstein και αποτελούν την σκοτεινή ύλη που κυριαρχεί στο σύμπαν. Σε αυτό το πλαίσιο μελετάται η ρεαλιστικότητα μίας τέτοιας πρότασης και ιδιαίτερα η συνέπεια της με τα δεδομένα του Lyman- $\alpha$  forest.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΠΟΛΥ!