ePublishing

Open Schools Journal for Open Science

Vol 6, No 1 (2023)

Open Schools Journal for Open Science - Special Issue -Πρακτικά του «3ου Μαθητικού Συνεδρίου Έρευνας και Επιστήμης»

Κβαντική βαρύτητα

Matthaios Koukleris, Παναγιώτης Τσουμάκης

doi: 10.12681/osj.31941

Copyright © 2023, Matthaios Koukleris, Παναγιώτης Τσουμάκης

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

To cite this article:

Koukleris, M., & Τσουμάκης Π. (2023). Κβαντική βαρύτητα: Ένα ταξίδι στις απαρχές του σύμπαντος και μια πτώση σε μια μαύρη τρύπα. *Open Schools Journal for Open Science*, *6*(1). https://doi.org/10.12681/osj.31941

https://epublishing.ekt.gr | **e-Publisher:** EKT | **Downloaded at:** 01/01/2026 11:03:25

https://epublishing.ekt.gr | **e-Publisher:** EKT | **Downloaded at:** 01/01/2026 11:03:25

Κβαντική βαρύτητα

Ένα ταξίδι στις απαρχές του σύμπαντος και μια πτώση σε μια μαύρη τρύπα

Ματθαίος Κουκλέρης

Ελληνογερμανική Αγωγή
matthaioskoukleris@gmail.com

Επιβλέπων καθηγητής: Παναγιώτης Τσουμάκης, Φυσικός, Ελληνογερμανική Αγωγή
ptsoum@ea.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια εισαγωγή σε ένα από τα κυριότερα ζητήματα της σύγχρονης θεωρητικής Φυσικής, το πρόβλημα της κβαντικής βαρύτητας. Μετά από μία σύντομη ανασκόπηση των βασικών αρχών της κβαντικής μηχανικής και της Γενικής σχετικότητας, εξετάζεται το ερώτημα της ενοποίησης των δύο αυτών θεωριών, διερευνώνται τα αίτια της ασυμβατότητας τους και αναφέρονται παραδείγματα ριζοσπαστικών προσεγγίσεων κβαντικής περιγραφής της βαρυτικής αλληλεπίδρασης όπως η θεωρία χορδών και η κβαντική βαρύτητα βρόχων. Παρά την παραδοχή της εξαιρετικά ασθενούς επίδρασης της βαρύτητας σε υποατομικές κλίμακες, εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους η πλήρης κατανόηση της γέννησης του σύμπαντος και των μελανών οπών απαιτεί την αποκωδικοποίηση κβαντικών φαινομένων υπό την παρουσία ισχυρών βαρυτικών πεδίων. Μελετώνται, μεταξύ άλλων, φαινόμενα όπως η εξαέρωση των μαύρων τρυπών μέσω της ακτινοβολίας Hawking και έννοιες όπως το άστρο Πλανκ, οι βαρυτικές μοναδικότητες και η αντιστοιχία Ads/CFT. Επιπλέον, περιγράφονται κοσμολογικές προβλέψεις του μοντέλου ΛCDM και αποσαφηνίζεται το γιατί το Καθιερωμένο Πρότυπο της σωματιδιακής Φυσικής είναι η πιο επιτυχημένη θεωρία μας μέχρι στιγμής. Διευκρινίζονται, όμως, παράλληλα, τα ερωτήματα που έχουν παραμείνει αναπάντητα, όπως η φύση της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας και δίνονται παραδείγματα της σύγχρονης έρευνας, μέσα από αναφορές στην κβαντική κοσμολογία βρόχων και την κοσμολογία βρανών. Τέλος, αναζητούνται τρόποι πειραματικού ελέγχου των θεωριών που έχουν, μέχρι στιγμής, προταθεί, αλλά υπογραμμίζεται η δυσκολία ενός τέτοιου εγχειρήματος.

Λέξεις-κλειδιά: κβαντική βαρύτητα, Γενική Σχετικότητα, κβαντική θεωρία πεδίου, κβαντική βαρύτητα βρόχων, χορδές.

Εισαγωγή

Μία από τις βασικές επιδιώξεις της σύγχρονης θεωρητικής Φυσικής είναι η ενοποίηση της Κβαντικής Μηχανικής και της Γενικής Σχετικότητας, η διατύπωση, δηλαδή, μιας κβαντικής θεωρίας της βαρύτητας. Η πρώτη είναι μία εξαιρετικά επιτυχημένη θεωρία που περιγράφει τη φύση σε υποατομικές κλίμακες , ενώ η τελευταία σε κοσμολογικές κλίμακες. Και οι δύο θεωρίες άλλαξαν ριζικά την αντίληψή μας για τον κόσμο.

Κβαντική Μηχανική

Η Κβαντική Μηχανική γεννήθηκε από την αδυναμία της κλασικής Φυσικής να περιγράψει τα ατομικά φαινόμενα. Σύμφωνα, δηλαδή με τη νευτώνεια θεώρηση τα ηλεκτρόνια θα έπρεπε να ακολουθούν σπειροειδείς τροχιές και τελικά να καταρρένουν στον πυρήνα, κάτα που προφανώς δεν συμβαίνει. Για να εξηγηθεί η σταθερότητα των ατόμων και ένα πλήθος από φαινόμενα που αφορούν τον μικρόκοσμο αναπτύχθηκε μία αλλόκοτη θεωρία που κατάφερε να επαληθευτεί πειραματικά περισσότερο από κάθε άλλη θεωρία, αλλά οι προβλέψεις της είναι τόσο παράξενες που η κοινή λογική αδυνατεί να συλλάβει. Συγκεκριμένα οι βασικές της αρχές είναι η παραδοχή ότι δεν μπορούμε να γνωρίζουμε ταυτόχρονα τη θέση και την ορμή ενός σωματιδίου (αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg), το γεγονός ότι δύο φερμιόνια δεν μπορούν να βρίσκονται στην ίδια κβαντική κατάσταση την ίδια χρονική στιγμή (απαγορευτική αρχή του Pauli) και ότι κάθε σωματίδιο συμπεριφέρεται ως κύμα (κυματοσωματιδιακός δυϊσμός). Ορισμένα μεγέθη όπως η ενέργεια και η ορμή δεν μπορούν να πάρουν οποιεσδήποτε τιμές άλλα συγκεκριμένες, Ένα σωματίδιο μπορεί να βρίσκεται σε δύο διαφορετικές θέσεις (ή καλύτερα σε έναν γραμμικό συνδυασμό δύο θέσεων) ταυτόχρονα (υπέρθεση). Το μόνο που μπορούμε να γνωρίζουμε είναι η κυματοσυνάρτηση (Ψ) που περιγράφει ένα σωματίδιο, δηλαδή μία μαθηματική περιγραφή της κατάστασης του, που μας δίνει την πιθανότητα να βρεθεί ένα σωματίδιο σε μία συγκεκριμένη κατάσταση μεχρι να γίνει η παρατήρηση, να καταρρεύσει η κυματοσυνάρτηση και να ανιχνεύσουμε π.χ. τη θέση του. Όταν η κυματοσυνάρτηση δύο σωματιδίων ταυτίζεται, τότε λέμε ότι βρίσκονται σε κατάσταση κβαντικής διεμπλοκής, δηλαδή η παρατήρηση μίας ιδιότητας του ενός (π.χ. σπιν) επηρεάζει την παρατήρηση της αντίστοιχης ιδιότητας του άλλου, όσο μακριά κι αν βρίσκονται.

Γενική Σχετικότητα

Η Γενική Σχετικότητα, βασίζεται σε μία πολύ απλή αρχή, δηλαδή ότι η επιτάχυνση ισοδυναμεί με τη βαρύτητα και έτσι αν βρισκόμασταν σε ένα διαστημόπλοιο με σταθερή επιτάχυνση 9,8 m/s2 δεν θα μπορούσαμε να καταλάβουμε καμία διαφορά από ότι να στεκόμασταν ακίνητοι στη Γη ή αν βρισκόμασταν μακριά από κάποιο βαρυτικό πεδίο δεν θα νιώθαμε το βάρος μας σαν να κάναμε ελύθερη πτώση στη Γη. Σε αυτή τη θεωρία βασίζεται η τρέχουσα κατανόησή μας για τη βαρύτητα σε όρους γεωμετρίας (βασικό εργαλείο στην μελέτη της γενικής σχετικότητας είναι η διαφορική γεωμετρία και συγκεκριμένα η γεωμετρία του Riemann). Προβλέπει ότι η βαρύτητα είναι καμπύλωση του ίδιου του χωροχρόνου. Η ύλη και η ενέργεια «λέει» στον χώρο πώς να καμπυλωθεί και ο καμπυλωμένος χώρος «λέει» στην ύλη πώς να κινηθεί. Ακόμη και το φως κοντά σε ένα ισχυρό βαρυτικό πεδίο δεν ακολουθεί ευθύγραμμη, αλλά καμπυλόγραμμη τροχιά. Τέλος κάθε βαρυτική αλληλεπίδραση, πόσο μάλλον γεγονότα όπως η σύγκρουση δύο μαύρων τρυπών, (περιοχών του χωροχρόνου με τόσο ισχυρό βαρυτικό πεδίο από το οποίο ούτε το φως δεν μπορεί

να διαφύγει) μπορούν να προκαλέσουν διαταραχές στον χωροχρόνο, κυματισμούς που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός συμπιέζοντας και αποσυμπιέζοντάς τον. Με λίγα λόγια, η Γη περιφέρεται γύρω από τον ήλιο όχι γιατί υπάρχει κάποια μυστηριώδης δύναμη που την έλκει, αλλά απλώς ακολουθεί τη συντομότερη διαδρομή στον καμπυλωμένο γύρω από τον ήλιο χώρο, όπως ακριβώς θα έκανε και ένας βόλος σε ένα τραμπολίνο, γύρω από μία μπάλα του μπόουλινγκ. Δεν είναι, όμως, μία πλήρης θεωρία, ακόμη κι αν δεν σταματά να επιβεβαιώνεται ακόμα και σήμερα μέσα από πειραματικά δεδομένα όπως ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων από συγκρούσεις μελανών οπών ή το γεγονός ότι ο χρόνος στη Γη κυλά πιο αργά σε σχέση με τους δορυφόρους σε τροχία γύρω από αυτή (βαρυτική διαστολή του χρόνου) . Για την ακρίβεια, προβλέπει την ίδια της την κατάρρευση σε δύο περιπτώσεις: στη γέννηση του σύμπαντος (Μεγάλη Έκρηξη) και στα έγκατα μίας μαύρης τρύπας.
Τα δύο προαναφερθέντα παραδείγματα έχουν κάτι κοινό. Αποτελούν βαρυτικές μοναδικότητες, περιοχές του χωροχρόνου στις οποίες το βαρυτικό πεδίο γίνεται άπειρο. Για να τα κατανοήσουμε πρέπει να λάβουμε υπόψιν κβαντικά φαινόμενα, χρειαζόμαστε δηλαδή μία κβαντική θεωρία της βαρύτητας.
Στο σημείο αυτό, κρίνεται απαραίτητο να αποσαφηνίσουμε πως η βαρυτική αλληλεπίδραση είναι υπερβολικά ασθενής σε υποατομικές κλίμακες, σχεδόν αμελητέα. Η ασθενής αλληλεπίδραση, για παράδειγμα, η αμέσως μετά τη βαρύτητα ασθενέστερη δύναμη, είναι 10^{24} φορές ισχυρότερη. Το «πρόβλημα της ιεραρχίας», δηλαδή ο λόγος που συμβαίνει αυτό παραμένει ανεξήγητο.

Το ζήτημα της κβαντικής βαρύτητας

Το πρόβλημα της κβαντικής βαρύτητας έχει αποδειχθεί πολύ δύσκολο στην επίλυσή του, διότι η Κβαντική Μηχανική και η Γενική Σχετικότητα δεν είναι συμβατές. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες κβαντικές θεωρίες πεδίου που περιγράφουν τις ηλεκτρομαγνητικές, τις ισχυρές και τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις (Κβαντική Ηλεκτροδυναμική, Κβαντική Χρωμοδυναμική, Ηλεκτρασθενής Θεωρία αντίστοιχα), η κβαντική θεωρία της βαρύτητας δεν είναι επανακανονικοποιήσιμη, δηλαδή δεν υπάρχει τρόπος να «εξαφανίσουμε» τους απειρισμούς που προκύπτουν εξαιτίας των κβαντικών διακυμάνσεων (σύμφωνα με την αρχής της απροσδιοριστίας, η ελάχιστη ενέργεια του κενού είναι μη-μηδενική).
Για τον λόγο αυτό έχουν γίνει διάφορες υποθέσεις όπως ότι οι μαύρες τρύπες δεν είναι τόσο «μαύρες», αφού εκπέμπουν ακτινοβολία με τη μορφή σωματιδίων (ακτινοβολία Hawking), η εντροπία μιας μαύρης τρύπας είναι ανάλογη με το εμβαδό του ορίζοντα γεγονότων της, ότι ο ίδιος ο χωροχρόνος είναι κβαντισμένος, δηλαδή ότι αποτελείται από μικροσκοπικά, διακριτά «άτομα» χώρου και χρόνου,τους βρόχους και οι μοναδικότητες της Μεγάλης Έκρηξης και των μελανών οπών αντικαθίστανται από το «Μεγάλη Αναπήδηση», την υπόθεση ότι η Μεγάλη Έκρηξη ήταν αποτέλεσμα της κατάρρευσης ενός προηγούμενου σύμπαντος και το άστρο Πλανκ, το υποθετικό τελικό στάδιο της ζωής ενός άστρου του οποίου η ενεργειακή πυκνότητα φτάνει την ενεργειακή πυκνότητα του Πλανκ, όπου οι πιέσεις που δημιουργούνται από τις κβαντικές διακυμάνσεις εξισορροπούν το βάρος της ύλης αντίστοιχα (Κβαντική Βαρύτητα Βρόχων, Κβαντική Κοσμολογία Βρόχων).

Θερμοδυναμική μελανών οπών

Ας πάρουμε την αρχή της αβεβαιότητας στη μορφή $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$. Αυτό σημαίνει ότι εικονικά σωματίδια μπορούν να δημιουργηθούν σε ζεύγη από το τίποτα και στη

συνέχεια να εξαϋλωθούν, δανειζόμενα την ενέργεια τους από τον «κενό» χώρο (κβαντικές διακυμάνσεις). Ας φανταστούμε, τώρα ότι ένα τέτοιο ζεύγος σωματιδίου – αντισωματιδίου δημιουργείται στην άκρη του ορίζοντα μιας μαύρης τρύπα. Έτσι μπορεί π.χ. το αντισωματίδιο να πέσει μέσα στη μαύρη τρύπα (κατευθυνόμενο προς τη μοναδικότητα) και το σωματίδιο να διαφύγει μεταφέροντας ένα μέρος της μάζας της μελανής οπής. Συνεπώς οι μαύρες τρύπες εκπέμπουν ακτινοβολία με τη μορφή σωματιδίων (ακτινοβολία Hawking) και έτσι εξαερώνονται. Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να διασαφηνίσουμε το εξής: το εμβαδόν του ορίζοντα γεγονότων μίας μαύρης τρύπας είναι ανάλογο με την εντροπία της (σύμφωνα με την εξίσωση Bekenstein – Hawking), άρα κανείς εύλογα θα μπορούσε να αναρωτηθεί πώς είναι δυνατόν να μην παραβιάζεται ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής, αν κανείς «έριχνε» ένα σωματίδιο σε μία μαύρη τρύπα; Η απάντηση βρίσκεται στο ότι η εντροπία της μαύρης τρύπας θα αυξανότας ως αντιστάθμισμα.

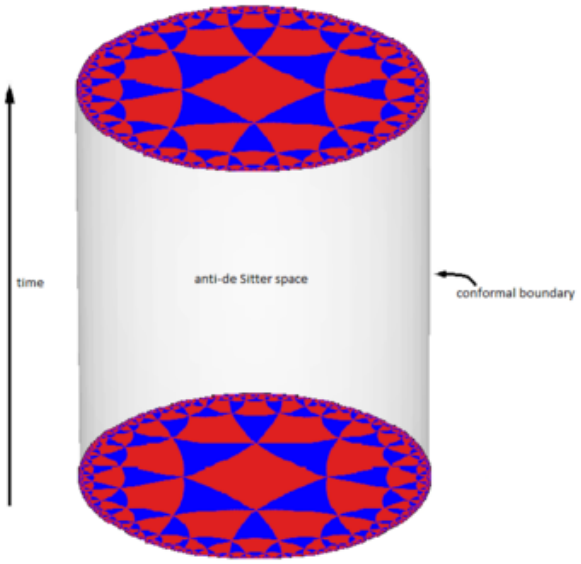
$$S_{\mathrm{BH}} = \frac{k_{\mathrm{B}} A}{4\ell_{\mathrm{P}}^2},$$ (Εξίσωση Bekenstein – Hawking)

Σίγουρα, όμως τώρα αναρωτιέστε: Τι θα συνέβαινε αν πέφταμε μέσα σε μία μαύρη τρύπα; Θα χανόταν η πληροφορία ενός σωματιδίου που θα εκτελούσε μία τέτοια πτώση; Το επονομαζόμενο «παράδοξο της πληροφορίας έχει απασχολήσει τη θεωρητική Φυσική για δεκαετίες. Η κβαντική μηχανική αρνείται την καταστροφή της πληροφορίας, το νοητικό πείραμα που μόλις εκτελέσαμε, όμως, προκαλεί σίγουρα τον προβληματισμό μας και σίγουρα χρειαζόμαστε μία κβαντική θεωρία της βαρύτητας για να δώσουμε μία οριστική απάντηση. Έχει προταθεί ότι το κλειδί για να προσεγγίσουμε το ερώτημα αυτό βρίσκεται στην έννοια της κβαντικής σύμπλεξης (Δύο σωματίδια που βρίσκονται σε σύμπλεξη είναι σαν δύο γάντια. Αν βρεις το γάντι για το δεξί χέρι αμέσως καταλαβαίνεις ότι το άλλο είναι για το αριστερό, όσο μακριά κι αν βρίσκεται. Έτσι και με τα σωματίδια αν μετρήσουμε μία ιδιότητα στο ένα π.χ. σπιν πάνω, τότε το άλλο πρέπει οπωσδήποτε να έχει σπιν κάτω!). Όταν, δηλαδή, μία μελανή οπή εκπέμπει ακτινοβολία τα σωματίδια Hawking βρίσκονται σε σύμπλεξη με τα αντίστοιχα αντισωματίδια στο εσωτερικό της μαύρης τρύπας. Έτσι μία μελανή οπή ξεκινά με μηδενική εντροπία, η οποία συνεχώς αυξάνεται μέχρι που μέσω της διαδικασίας της εξαέρωσης μειώνεται μέχρι να ξαναγίνει μηδενική. Η πληροφορία μπορεί, λοιπόν να διαφύγει από μία μελανή οπή. Τέλος, εικάζεται ότι δύο σωματίδια σε κατάσταση σύμπλεξης συνδέονται μέσω μίας σκουληκότρυπας (EP = EPR)

Θεωρία Υπερχορδών

Μία άλλη προσέγγιση (Μ-Θεωρία, Θεωρία Υπερχορδών) προβλέπει πως ακόμη και τα υποατομικά σωματίδια, τα «τουβλάκια» από τα οποία αποτελούνται τα πάντα γύρω μας που μέχρι στιγμής αντιλαμβανόμαστε ως αδιάστατα μαθηματικά σημεία δεν είναι παρά ταλαντώσεις χορδών, μονοδιάστατων θεμελιωδών αντικειμένων που απαρτίζουν όλα τα σωματίδια που προβλέπει το καθιερωμένο πρότυπο της σωματιδιακής Φυσικής. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η ύπαρξή των χορδών απαιτεί έντεκα και όχι τέσσερις διαστάσεις, τόσο μικρές που δεν μπορούμε να τις αντιληφθούμε και 10^{500} διαφορετικά σύμπαντα με διαφορετικούς φυσικούς νόμους (σύμφωνα με τις κοσμολογικές προβλέψεις της Θεωρίας Χορδών το σύμπαν δεν είναι παρά μία βράνη, μία κλειστή χορδή, σε έναν υπερδιάστατο χώρο, μέσα στον οποίο σύμπαντα-βράνες αλληλεπιδρούν βαρυτικά). Παρά τις παράξενες προβλέψεις της, οι θεωρητικοί Φυσικοί έχουν ανακαλύψει στο πλαίσιο της θεωρίας χορδών μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα για την κβαντική βαρύτητα αντιστοιχία μεταξύ ενός

ασταθούς, ανοικτού χωροχρόνου αρνητικής καμπυλότητας (που υπακούει στην υπερβολική γεωμετρία, όπου το άθροισμα των γωνιών ενός τριγώνου είναι μικρότερο από 180 μοίρες), του χωροχρόνου anti-de Sitter και ορισμένων κβαντικών θεωριών πεδίου που παραμένουν αναλλοίωτες κάτω από κάποιους μετασχηματισμούς, τις σύμμορφες θεωρίες πεδίου. Η ιδέα είναι ότι μπορούμε να αναπαραστήσουμε τον τρισδιάστατο (υπερβολίκό χώρο) AdS σαν έναν κύλινδρο από δίσκους Poincare με τη βαρύτητα στο όριο (όπου ο χωροχρόνος μοιάζει με χωροχρόνο Minkowski) και μελετώντας αυτό το μοντέλο (με δύο διαστάσεις χώρου και μία χρόνου) να εξάγουμε συμπεράσματα για τη βαρύτητα στον χώρο dS. Ο δυϊσμός αυτός βασίζεται στην ολογραφική αρχή, την οποία θα επιχειρήσουμε να περιγράψουμε αργότερα.



Εικόνα 1.1 Αντιστοιχία AdS/CFT

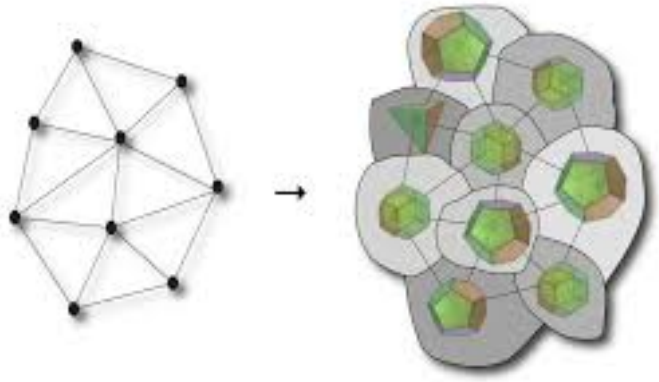
Αν και το σύμπαν, σύμφωνα με το μοντέλο ΛCDM της Κοσμολογίας είναι επίπεδο, έχει μηδενική καμπυλότητα, εφόσον η παράμετρος πυκνότητας Ω, δηλαδή ο λόγος της μέσης πυκνότητας της ύλης προς την κρίσιμη πυκνότητα, είναι ακριβώς ίση με 1 και έτσι υπακούει στην ευκλείδεια Γεωμετρία, όπου το άθροισμα των γωνιών ενός τριγώνου είναι 180 μοίρες, η συγκεκριμένη αντιστοιχία μας είναι πολύ χρήσιμη, γιατί μας βοηθά να κατανοήσουμε και να μελετήσουμε την θεωρία χορδών και κυρίως την κβαντική βαρύτητα. Τέλος, η Θεωρία Υπερχορδών προβλέπει την ύπαρξη υπερσυμμετρικών σωματιδίων, που δεν έχουν ανιχνευθεί π.χ. στον LHC, παρά τις συνεχείς προσπάθειες.
Μία καθολική αρχή που διέπει κάθε θεωρία κβαντικής βαρύτητας είναι η ολογραφική αρχή. Με λίγα λόγια, αυτό που μας λέει είναι ότι η περιγραφή του τρισδιάστατου χώρου μπορεί να κωδικοποιηθεί σε μία δισδιάστατη επιφάνεια. Γι' αυτόν τον λόγο η εντροπία, ως μέτρο της ελλίπουσας πληροφορίας ,είναι ανάλογη με το εμβαδόν και όχι με τον όγκο του ορίζοντα γεγονότων μίας μαύρης τρύπας.

Κβαντική βαρύτητα βρόχων

Μετά τη σύντομη αυτή περιγραφή των αρχών της θεωρίας χορδών, κρίνεται αναγκαίο να μελετήσουμε τις βασικές ιδέες μιας άλλης υποψήφιας θεωρίας κβαντικής βαρύτητας, της κβαντικής βαρύτητας βρόχων. Η κυριότερη διαφορά

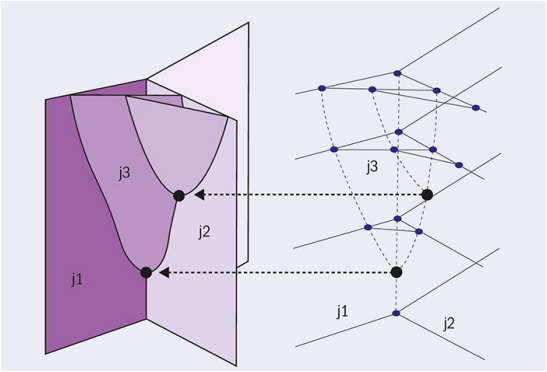
ανάμεσα στις δύο θεωρίες είναι ότι αντιμετωπίζουν τη βαρύτητα με έναν εντελώς διαφορετικό τρόπο. Η θεωρία χορδών περιγράφει τη βαρύτητα στο πλαίσιο της υπερβαρύτητας, μιας θεωρίας πεδίου που προϋποθέτει την ύπαρξη υπερσυμμετρικών σωματιδίων και προβλέπει ότι η βαρύτητα είναι μία αλληλεπίδραση, της οποίας ο φορέας είναι το υποθετικό βαρυτόνιο, ένα σωματίδιο μηδενικής μάζας και σπιν-2. Σε αντιδιαστολή με την παραπάνω περιγραφή της βαρύτητας, η κβαντική βαρύτητα βρόχων περιγράφει τη βαρύτητα ακριβώς όπως η γενική σχετικότητα, δηλαδή σε όρους γεωμετρίας του χωροχρόνου και όχι σαν μια ακόμη δύναμη. Πιο συγκεκριμένα, είναι μία θεωρία ανεξάρτητη υποβάθρου, δηλαδή δεν διαιρεί το σύμπαν σε ένα τμήμα που μπορεί να περιγράψει και σε ένα άλλο το οποίο αποτελεί μέρος του υποβάθρου. Ο χώρος περιεγράφηκε αρχικά από τη θεωρία του Νεύτωνα ως ένα σταθερό, απόλυτο υπόβαθρο, μία «σκηνή» στην οποία κινείται η ύλη. Αυτή είναι και η προσέγγιση της κβαντικής μηχανικής για τον χώρο. Αιώνες αργότερα. η γενική σχετικότητα ήρθε για να κλονίσει την ιδέα αυτή και να αντιμετωπίσει τον χώρο ως μία δυναμική οντότητα, που που μπορεί να καμπυλώνει και να διαστέλλεται, που συνδυασμένος και ενσωματομένος με τον χρόνο αποτελεί τον ενιαίο χωροχρόνο παραμορφώσιμο από την ύλη και την ενέργεια. Η γεωμετρία του χώρου δεν είναι σταθερή, αλλά εξελίσσεται με τον χρόνο, όπως κάθε άλλο πεδίο. Η δεύτερη σημαντική αρχή που διέπει τη συγκεκριμένη θεωρία είναι το αναλλοίωτο ως προς τους διαφορομορφισμούς. Είναι στενά συνδεδεμένη με την ανεξαρτησία υποβάθρου και μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: Κανείς είναι ελεύθερος να διαλέξει όποιο σύστημα συντεταγμένων θέλει για να απεικονίσει τον χωροχρόνο και να εκφράσει τις εξισώσεις του. Κανένα σύστημα συντεταγμένων δεν είναι προνομιακό. Οι εξισώσεις της Φυσικής είναι ίδιες, όποιο σύστημα συντεταγμένων κι αν επιλέξουμε. Βασική πρόβλεψη της θεωρίας βρόχων είναι η διακριτή δομή του χωροχρόνου. Πιο συγκεκριμένα, αν και ο χώρος σε μακροσκοπική κλίμακα φαντάζει συνεχής, σε μικροσκοπική κλίμακα είναι «κοκκώδης». Το κβάντο του χώρου είναι ο όγκος Planck 10^{-99} cm το μικρότερο δυνατό χρονικό διάστημα είναι ο χρόνος Planck, 10-43 δευτερόλεπτα, ο χρόνος που χρειάζεται το φως για να διασχίσει 1 μήκος Planck, δηλαδή 10^{-33} cm (20 τάξεις μεγέθους μικρότερο από έναν ατομικό πυρήνα). Υπάρχουν περισσότεροι όγκοι Planck σε έναν κύβο ζάχαρης, από όλους τους κύβους ζάχαρης θα χωρούσαν στο παρατηρίσιμο σύμπαν! Ο χώρος, δηλαδή, από ένα σημείο και μετά δεν μπορεί να διαιρεθεί παιρετέρω.

Η κβαντική βαρύτητα βρόχων αναπτύχθηκε μέσα από την αναδιατύπωση των εξισώσεων πεδίου Einstein τις μεταβλητές Ashtekar . Λίγο αργότερα, εμφανίστηκαν κάποιες λύσεις της εξίσωσης Wheeler – DeWitt σύμφωνα με αυτή την αναδιατύπωση. Στην κβαντική βαρύτητα βρόχων, για να περιγράψουμε κάθε κβαντική κατάσταση της γεωμετρίας του χώρου, χρησιμοποιούμε διαγράμματα, όπως τα διαγράμματα Feynman για την κβαντική θεωρία πεδίου, τα δίκτυα σπιν. Πρόκειται για γραφήματα οι ακμές των οποίων χαρακτηρίζονται από αριθμούς που αναπαριστούν καταστάσεις εγγενούς στροφορμής. Χαρακτηρίζονται από έναν όγκο υ για κάθε κόμβο και από έναν ημιακέραιο αριθμό j για κάθε γραμμή. Έτσι, για παράδειγμα ένας κύβος απεικονίζεται ως μία τελέια, από την οποία προεξέχουν 6 γραμμές που αναπαριστούν τις έδρες του.



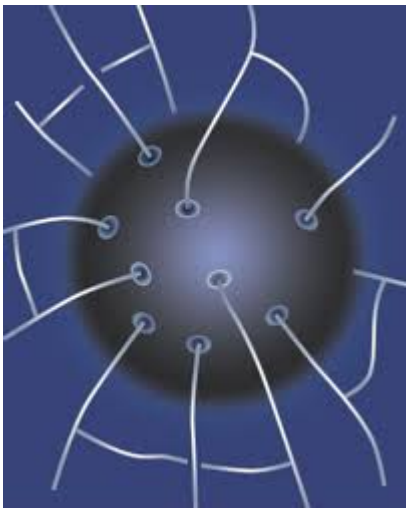
Εικόνα 1.2: Ένα δίκτυο σπιν

Τα διαγράμματα Feynman που αναφέραμε παραπάνω διαφέρουν δραματικά από τα γραφήματα αυτά, αφού περιγράφουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων, ενώ τα δίκτυα σπιν αναπαριστούν καθορισμένες καταστάσεις όγκων και εμβαδών. .Η ύλη «υπάρχει» στους κόμβους των δικτύων αυτών. Η βασική διαφορά μεταξύ φωτονίων (των κβάντων του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και των κόμβων αυτών των γραφημάτων (των κβάντων της βαρύτητας) είναι ότι τα φωτόνια υπάρχουν στον χώρο, ενώ τα κβάντα της βαρύτητας συνιστούν τον ίδιο τον χώρο. Κάθε δίκτυο σπιν περιγράφει ένα στιγμιότυπο, μια «παγωμένη» στιγμή του σύμπαντος. Τα δίκτυα σπιν μεταβάλλονται και εξελίσσονται με τον χρόνο, καθώς αναπτύσσονται. Η χρονική εξέλιξη ενός δικτύου σπιν είναι ένας αφρός σπιν. «Αφρός» γιατί αποτελείται από επιφάνειες που τέμνονται σε γραμμές, οι οποίες με τη σειρά τους τέμνονται σε κορυφές, δημιουργώντας μία δομή που θυμίζει αφρό. Όλες οι μεταβολές της γεωμετρίας του χώρου περιγράφονται από τις μεταβολές των δικτύων σπιν.



Εικόνα 1.3:Αφρός σπιν

Στο πλαίσιο της κβαντικής βαρύτητας βρόχων έχει προταθεί η υπόθεση ότι μία μαύρη τρύπα καταλήγει σε μία λευκή τρύπα, δηλαδή σε μία περιχή του χωροχρόνου από την οποία ύλη και ακτινοβολία μόνο εξερχονται (τίποτα δεν μπορεί να εισέλθει).



Εικόνα 1.4: Ορίζοντας γεγονότων μελανής οπής διαγραμμισμένος από βρόχους

Φυσική πέρα από το καθιερωμένο πρότυπο

Το καθιερωμένο πρότυπο, η πιο επιβεβαιωμένη πειραματικά (και συνεπής μαθηματικά) θεωρία που έχουμε μέχρι στιγμής για την περιγραφή της ύλης και των αλληλεπιδράσεών της, αποτέλεσμα σύνθεσης τριών κβαντικών θεωριών πεδίου, χρειάστηκε δεκαετίες για να ολοκληρωθεί και να θεμελιωθεί, όμως έχει αφήσει αρκετά φαινόμενα ανεξήγητα, όπως η σκοτεινή ύλη και η σκοτεινή ενέργεια. Η σκοτεινή ύλη συμβάλλει σε ποσοστό 26,8 στη συνολική ύλη και ενέργεια του σύμπαντος και βοηθά τους γαλαξίες να παραμένουν σταθεροί, συνεισφέροντας στη συνολική μάζα τους, όμως δεν αλληλεπιδρά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, οπότε η ανίχνευσή της θα μπορούσε να είναι έμμεση, μέσω των βαρυτικών της αποτελεσμάτων. Ένα ακόμη ερώτημα που έχει μείνει αναπάντητο είναι η φύση της σκοτεινής ενέργειας, της σταθερής πυκνότητας ενέργειας που «γεμίζει» τον χώρο, η οποία συμβάλλει σε ποσοστό 68.3 % στη συνολική ύλη και ενέργεια του σύμπαντος και προκαλεί την επιταχυνόμενη διαστολή του. Περιγράφεται με τη βοήθεια της κοσμολογικής σταθεράς Λ, των εξισώσεων πεδίου Einstein, όμως, όπως και τη σκοτεινή ύλη, την αποκαλούμε «σκοτεινή», ακριβώς επειδή δεν την έχουμε κατανοήσει ακόμη.

Μία περισσότερο μαθηματική προσέγγιση στο πρόβλημα της κβαντικής περιγραφής της βαρύτητας, είναι η θεωρία συστροφέων, η οποία προτείνει ότι ο προβολικός μιγαδικός διανυσματικός χωροχρόνος συστροφέων , ένας χώρος άμαζων σωματιδίων (με σπιν) αποτελεί το βασικό θεμέλιο του χωροχρόνου.

Από τι αποτελείται , λοιπόν, ο κόσμος; Ο χώρος δεν είναι τίποτα παραπάνω από ένα πεδίο, το οποίο αποτελείται από κβάντα και ο χρόνος αναδύεται από τις διαδικασίες του ίδιου πεδίου. Με άλλα λόγια, ο κόσμος αποτελείται από κβαντικά πεδία (τα σωματίδια δεν είναι παρά διεγερμένες καταστάσεις πεδίων). Τα πεδία αυτά δεν υπάρχουν στον χωροχρόνο, αλλά το ένα πάνω στο άλλο. Ο χωροχρόνος είναι, λοιπόν, το βαρυτικό πεδίο.

Πιθανοί τρόποι πειραματικού ελέγχου

Ένας πολλά υποσχόμενος τρόπος πειραματικής επαλήθευσης μίας βασικής πρόβλεψης της κβαντικής βαρύτητας βρόχων και άλλων θεωριών, της παρατήρησης ελάχιστης διαφοράς στην ταχύτητα του φωτός ανάλογα με το μήκος κύματος

(παραβίαση του αναλλοίωτου Lorentz) είναι η μελέτη εκρήξεων ακτινών γ, όμως, μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν τέτοιες ενδείξεις. Ίσως, ακόμη μέσα από την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων να επιβεβαιώσουμε την ύπαρξη βαρυτονίων , υποθετικών σωματιδίων αντίστοιχα με τα φωτόνια για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, δηλαδή το φως. Τέλος, παρατηρήσεις στην κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου θα μπορούσαν να επιβεβαιώσουν την κβαντική κοσμολογία βρόχων, την κοσμολογική θεωρία που πηγάζει από τις εξισώσεις της κβαντικής βαρύτητας βρόχων.
Μαύρες τρύπες μπορούμε να κατασκευάσουμε και στο εργαστήριο, προκειμένου να τις δούμε να εξαερώνονται και να επιβεβαιώσουμε τους ισχυρισμούς του Hawking, εφόσον μία μαύρη τρύπα θα μπορούσε να έχει οποιαδήποτε μάζα μεγαλύτερη ή ίση της μάζας Planck! Όσο μικρότερη είναι η μάζα μίας μαύρης τρύπας τόσο πιο γρήγορα εξαερώνεται. Για να επιτευχθεί ,όμως, κάτι τέτοιο πρέπει να συγκεντρώσουμε πάρα πολύ μεγάλη μάζα σε πολύ μικρό χώρο, έτσι ώστε η ταχύτητα διαφυγής να ξεπεράσει την ταχύτητα του φωτός. Ενδεχομένως μετά τη μεγάλη έκρηξη δημιουργήθηκαν αρχέγονες μελανές οπές, πολύ πυκνές περιοχές που κατέρρευσαν βαρυτικά. Έχουν προταθεί ως επίλυση του προβλήματος της σκοτεινής ύλης από τη στιγμή που δεν έχουν παρατηρηθεί ακόμη σωματίδια σκοτεινής ύλης.

Συμπεράσματα

Παρόλο που η θεωρητική πρόοδος στη κβαντική βαρύτητα είναι σημαντική, καμία από τις τρέχουσες προσεγγίσεις δεν έχει επαληθευτεί και απ' ότι φαίνεται, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, θα χρειαστεί πολύς καιρός μέχρι να βρεθούν κατάλληλα πειράματα, ικανά να ελέγξουν τις προβλέψεις των υπαρχουσών θεωριών. Ίσως χρειαστεί να σκεφτούμε με τρόπο ριζοσπαστικό και να μην διστάσουμε να αναθεωρήσουμε εντελώς την αντίληψή μας για έννοιες όπως ο χώρος και ο χρόνος. Μέχρι να βρεθεί μία κβαντική θεωρία της βαρύτητας, η οποία αδιαμφισβήτητα θα συνδυάζει μερικές από τις αρχές όλων των προσεγγίσεων που παρουσιάσαμε, όπως για παράδειγμα την ολογραφική αρχή και την ιδέα ότι ο χωροχρόνος είναι διακριτός, το πρόβλημα θα παραμείνει ανοιχτό για κάθε περίεργο άνθρωπο που θέλει να καταλάβει πώς λειτουργεί ο κόσμος.

$$\hat{H}(x)|\psi\rangle = 0$$ (Εξίσωση Wheeler-DeWitt)

Βιβλιογραφία

Ashtekar, A., 2005. Gravity and the quantum. New Journal of Physics, 7(1), p.198.Ashtekar, Abhay (2005). The winding road to quantum gravity (PDF). Current Science, 89. pp. 2064–2074.

Feynman, R.P., 1971. Lectures on gravitation (Vol. 13). Pasadena: California Institute of Technology.

Kiefer, C. (2007). Quantum Gravity. Oxford University Press. ISBN 978-0-19-921252-1.

Maldacena, J., 2005. The illusion of gravity. Scientific American, 293(5), pp.56-63.

Penrose, R. (2007). The road to reality : a complete guide to the laws of the universe. Vintage. p. 1017. OCLC 716437154.

Rovelli, C., 2004. Quantum gravity. Cambridge university press.

Rovelli, C., 2003. Loop quantum gravity. Physics World, 16(11), p.37.

Rovelli, C. and Vidotto, F., 2014. Covariant loop quantum gravity: an elementary introduction to quantum gravity and spinfoam theory. Cambridge University Press.

Smolin, L., 2001. Three Roads to Quantum Gravity: A New Understanding Of Space, Time And The Universe: A New Understanding of Space, Time and the Universe.