

Η βαρύτητα ως εντροπική δύναμη

Γιώργος Πάστρας

Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής

ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

17 Ιουλίου 2020

Τι ξέρουμε σήμερα για τον κόσμο;

Όλα τα φαινόμενα χωρίζονται σε 4 κατηγορίες:

- Ηλεκτρομαγνητικά
- Ισχυρά πυρηνικά
- Ασθενή πυρηνικά
- Βαρυτικά

Αυτές είναι οι θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις

Τι ξέρουμε σήμερα για τον κόσμο;

Θεμελιώδεις Δυνάμεις

Δύναμη	Σχετική Ισχύς	Εμβέλεια (μέτρα)	Σωματίο Αλληλεπίδρασης
Ισχυρή Πυρηνική	1	10^{-15}	Γκλουόνιο (μεταξύ quarks), μεσόνιο π (μεταξύ νουκλεονίων)
Ηλεκτρομαγνητική	$\frac{1}{137}$	∞	Φωτόνιο
Ασθενής Πυρηνική	10^{-6}	10^{-18}	W^+, W^-, Z_0
Βαρύτητα	$6 * 10^{-38}$	∞	Βαρυτόνιο(;) - Δεν έχει ανακαλυφθεί

Τι ξέρουμε σήμερα για τον κόσμο;

Οι θεωρίες που περιγράφουν τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις υπακούουν λίγες βασικές αρχές

- Είναι σχετικιστικές
- Είναι κβαντικές*

* Όλες εκτός από τη βαρυτική θεωρία. Γιατί;

Τι δεν ξέρουμε για τον κόσμο;

Η έλλειψη μιας κβαντικής θεωρίας για τη βαρύτητα είναι το πιο μεγάλο θεωρητικό πρόβλημα στη φυσική.

Αυτή η θεωρία θα περιγράψει σωστά τα φαινόμενα που σχετίζονται με:

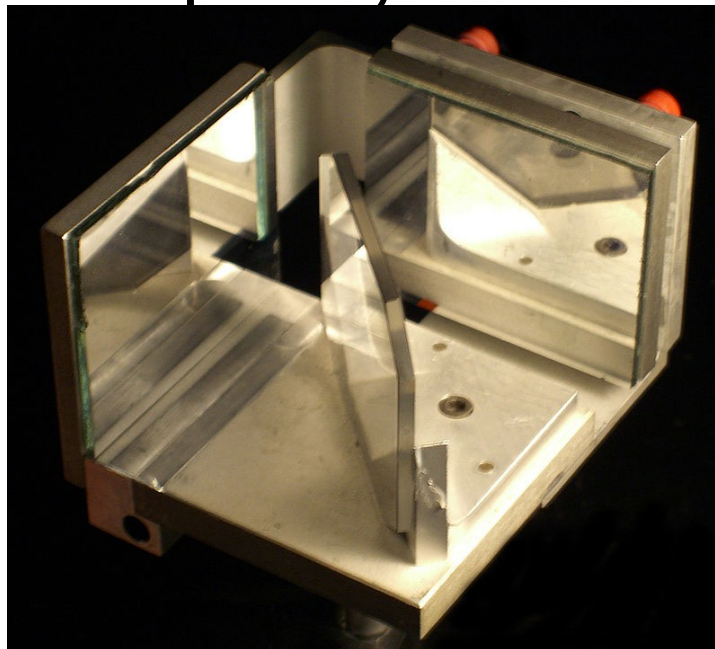
- πολύ ισχυρά βαρυτικά πεδία (μελανές οπές)
- τα πρώτα στάδια του σύμπαντος (πολύ κοντά στη μεγάλη έκρηξη)

Τι δεν ξέρουμε για τον κόσμο;

Για να καταλάβουμε το πρόβλημα πρέπει να ανατρέξουμε στους θεμέλιους λίθους των θεωριών των βασικών αλληλεπιδράσεων και να τους καταλάβουμε καλύτερα.

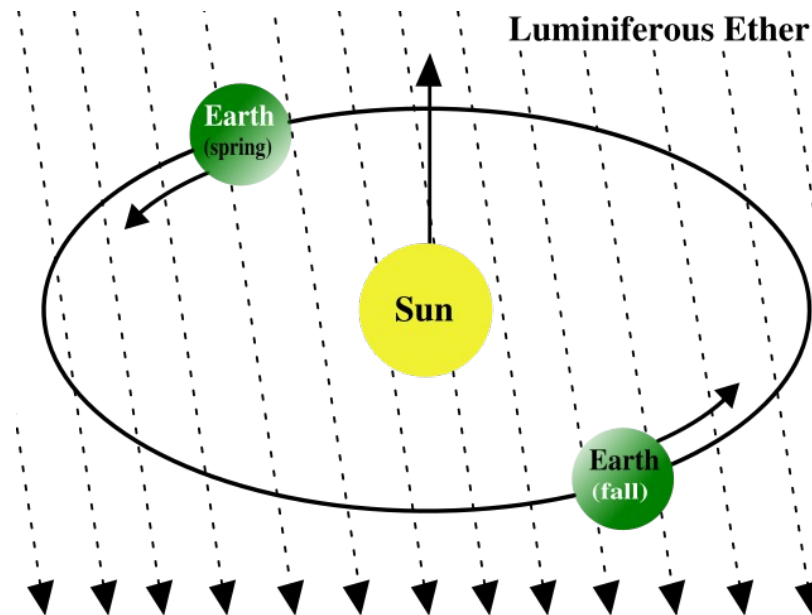
Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Όλα ξεκινούν το 1881 με το περίφημο πείραμα των Michelson και Morley με το οποίο μέτρησαν την ταχύτητα του φωτός.



Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Η ταχύτητα του φωτός από ένα μακρινό άστρο θα έπρεπε να κυμαίνεται μέσα σε ένα έτος κατά την ταχύτητα περιφοράς της γης



Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Όμως η ταχύτητα είναι πάντα η ίδια:
300.000km/sec!!!

Το φως είναι σαν ένα αυτοκίνητο στο δρόμο, το οποίο απομακρύνεται από εμάς με την ίδια ταχύτητα όσο και αν τρέξουμε!

Με την ίδια ταχύτητα απομακρύνεται και από τα δέντρα έξω από το δρόμο!

Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Το πρόβλημα αυτό ταλαιπωρούσε την επιστημονική κοινότητα μέχρι που ο Albert Einstein το 1905 έλυσε το πρόβλημα με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας.

Τίποτα δεν είναι προβληματικό με το φως. Είναι με την ταχύτητά του. Ο χώρος και ο χρόνος είναι τέτοιοι ώστε η ταχύτητα του φωτός να είναι πάντα η ίδια για όλους.

Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

- Κινούμενα ρολόγια χτυπούν πιο αργά (διαστολή του χρόνου)
- Κινούμενα μήκη συρρικνούνται (συστολή του μήκους)
- Κινούμενα σώματα έχουν μεγαλύτερη αδράνεια (διαστολή της μάζας)

Το τελευταίο καταλήγει στο περίφημο $E=mc^2$

Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

$$E=mc^2$$

ενέργεια μετατρέπεται σε μάζα και αντίστροφα;

ΟΧΙ!

Υπάρχει μία μόνο διατηρήσιμη ποσότητα, η ενέργεια. Η μάζα (αδράνεια) είναι ιδιότητα της ενέργειας. Σωστότερα θα γράφαμε $m=E/c^2$.

Λιγότερες αρχές διατήρησης, άρα περισσότερα επιτρεπτά φαινόμενα.

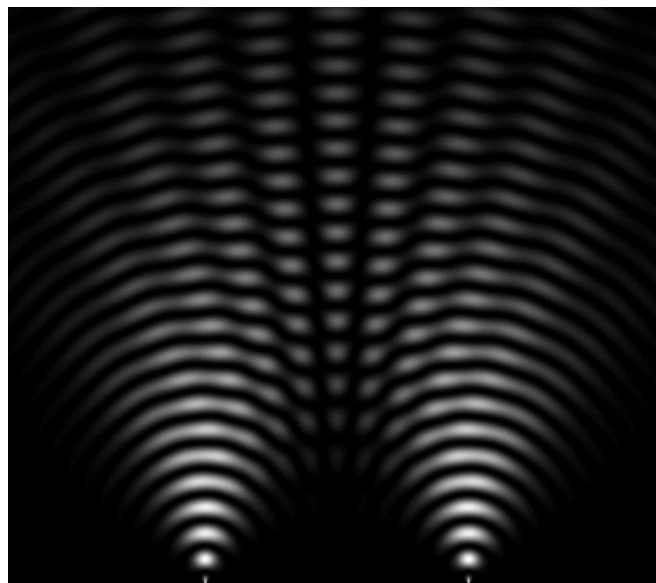
Κβαντική Μηχανική

Πώς ξεχωρίζουν τα σωμάτια από τα κύματα;
Με πειράματα **συμβολής**.

Τα κύματα είναι ταλαντώσεις ενός μέσου που ξεκινούν να διαδίδονται από μια αρχική πηγή. Αν έχουμε δύο πηγές, στις θέσεις που οι ταλαντώσεις από κάθε πηγή είναι αντίθετες προστίθενται στο μηδέν. Αντίθετα εκεί που είναι παράλληλες διπλασιάζεται η ταλάντωση.

Κβαντική Μηχανική

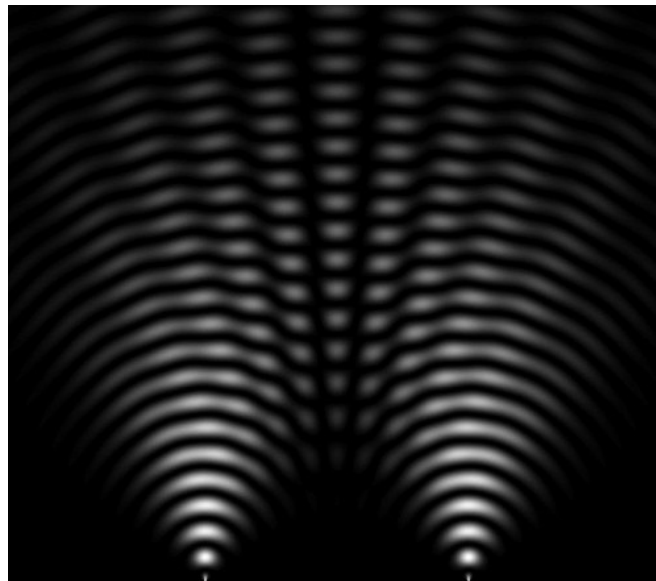
Για παράδειγμα αν έχουμε δύο πηγές φωτός παίρνουμε αυτήν την χαρακτηριστική εικόνα με τους κροσσούς συμβολής



Κβαντική Μηχανική

Αντίθετα αν είχαμε δύο πηγές ηλεκτρονίων δεν θα μπορούσε να συμβεί αυτό.

Και όμως συμβαίνει



Κβαντική Μηχανική

Τα σωματίδια λοιπόν διαδίδονται σαν κύματα.

Ποιό το νόημα αυτής της κυματικής συνάρτησης που ταλαντώνεται;

Περιέχει **όλη** τη δυνατή πληροφορία για κάθε μετρήσιμο (θέση, ορμή, ...) που χαρακτηρίζει το σωματίο.

Κβαντική Μηχανική

- Κάθε μετρήσιμο έχει ένα προτιμητέο σύνολο κυματοσυναρτήσεων, αρκετά μεγάλο ώστε κάθε κυματοσυνάρτηση να μπορεί να γραφεί σαν συνδυασμός αυτών.
- Κάθε μία από αυτές τις κυματοσυναρτήσεις αντιστοιχεί σε μία πιθανή τιμή αυτού του μετρήσιμου μεγέθους.
- Όταν μετράμε το μέγεθος, η πιθανότητα να βρούμε μια τιμή είναι ανάλογη της συνεισφοράς της αντίστοιχης προτιμητέας κυματοσυνάρτησης στην κυματοσυνάρτηση του σωματίου.

Κβαντική Μηχανική

- Οι αρχές αυτές καταλήγουν στο ότι η ενέργεια παγιδευεμένων σε μια περιοχή σωματιδίων **δεν μπορεί να λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή, αλλά είναι «κβαντισμένη»**
- Αυτό ισχύει για οποιαδήποτε ταλαντωτικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένου χορδών που έχουν πολλούς τρόπους ταλάντωσης ή και τρισδιάστατων ελαστικών μέσων.

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Είναι η σχετικότητα συμβατή με το νόμο του Newton για τη βαρύτητα;

- Στη σχετικότητα **απαγορεύονται** σήματα να ταξιδεύουν **πιο γρήγορα για το φως**. Αν υπάρχουν, τότε υπάρχουν παρατηρητές που τα βλέπουν να πηγαίνουν **πίσω στο χρόνο**.

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Όμως ο νόμος του Newton λέει ότι η δύναμη αλλάζει με το αντίστροφο της απόστασης στο τετράγωνο. Άρα αλλάζοντας την απόσταση, η δύναμη αλλάζει **ακαριαία**
- Αν ο νόμος του Newton είναι σωστός, τότε μπορούμε, χρησιμοποιώντας τη βαρύτητα, να στείλουμε σήματα **πιο γρήγορα από το φως** (άρα για κάποιους πίσω στο χρόνο).

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Άρα η βαρύτητα χρειάζεται τροποποίηση. Η σωστή περιγραφή δεν μπορεί να επιτρέψει τη διάδοση της βαρύτητας ταχύτερα από το φως.

Με άλλα λόγια, αν εξαφανιστεί ο ήλιος δια μαγείας, η γη θα σταματήσει να περιφέρεται γύρω από τον ήλιο, μετά από **περίπου 8min**, **όταν θα δούμε και οπτικά** τον ήλιο να εξαφανίζεται

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Η λύση δίνεται από την αρχή της ισοδυναμίας:

Οι βαρυτικές δυνάμεις είναι ανάλογες της μάζας, όπως και οι μη-αδρανειακές δυνάμεις (οι φανταστικές δυνάμεις που νοιώθουμε όταν ξεκινάει ή φρενάρει το λεοφορείο)

Η βαρύτητα πρέπει να έχει μια περιγραφή σαν μη-αδρανειακή δύναμη

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Τις μη-αδρανειακές δυνάμεις τις νοιώθουμε όταν επιταχυνόμαστε.

Πως γίνεται η βαρύτητα που νοιώθουμε τώρα να είναι τέτοια δύναμη;

Πώς γίνεται αυτή τη στιγμή να επιταχυνόμαστε;

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Οι μάζες καμπυλώνουν το χώρο και το χρόνο έτσι ώστε όταν αντιστεκόμαστε στη βαρύτητα κατά κάποιο τρόπο επιταχυνόμαστε.

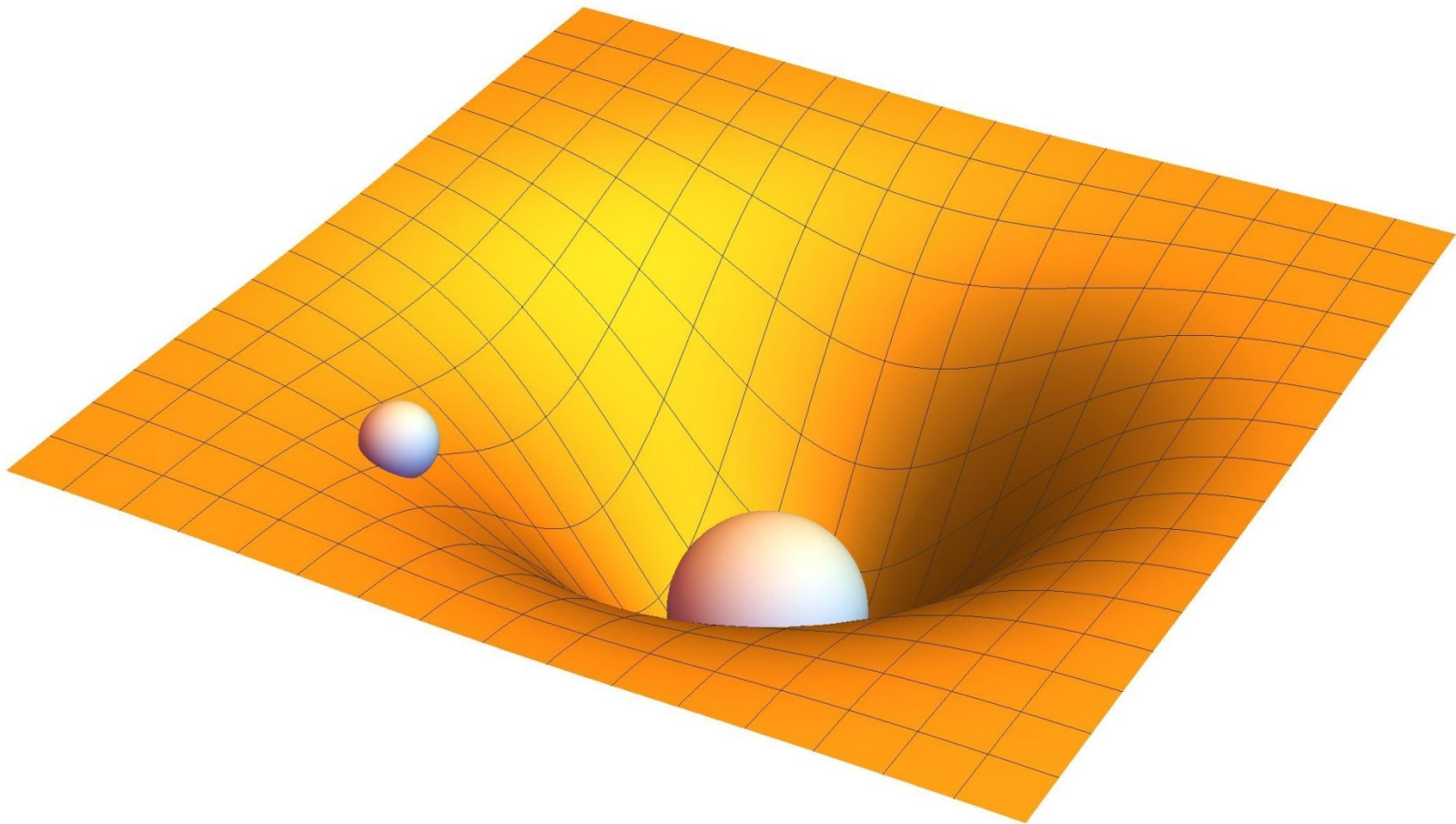
Είναι σαν να λέμε ότι δεν αρμενίζουμε στραβά, αλλά είναι στραβός ο γυαλός.

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Πότε δεν επιταχυνόμαστε;

Όταν δεν νοιώθουμε τη βαρύτητα, δηλαδή όταν κινούμαστε ελεύθερα υπό την επίδρασή της (π.χ. αν πηδήξουμε από ένα αεροπλάνο, μέχρι να πέσουμε στο έδαφος, δεν νοιώθουμε τη βαρύτητα)

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

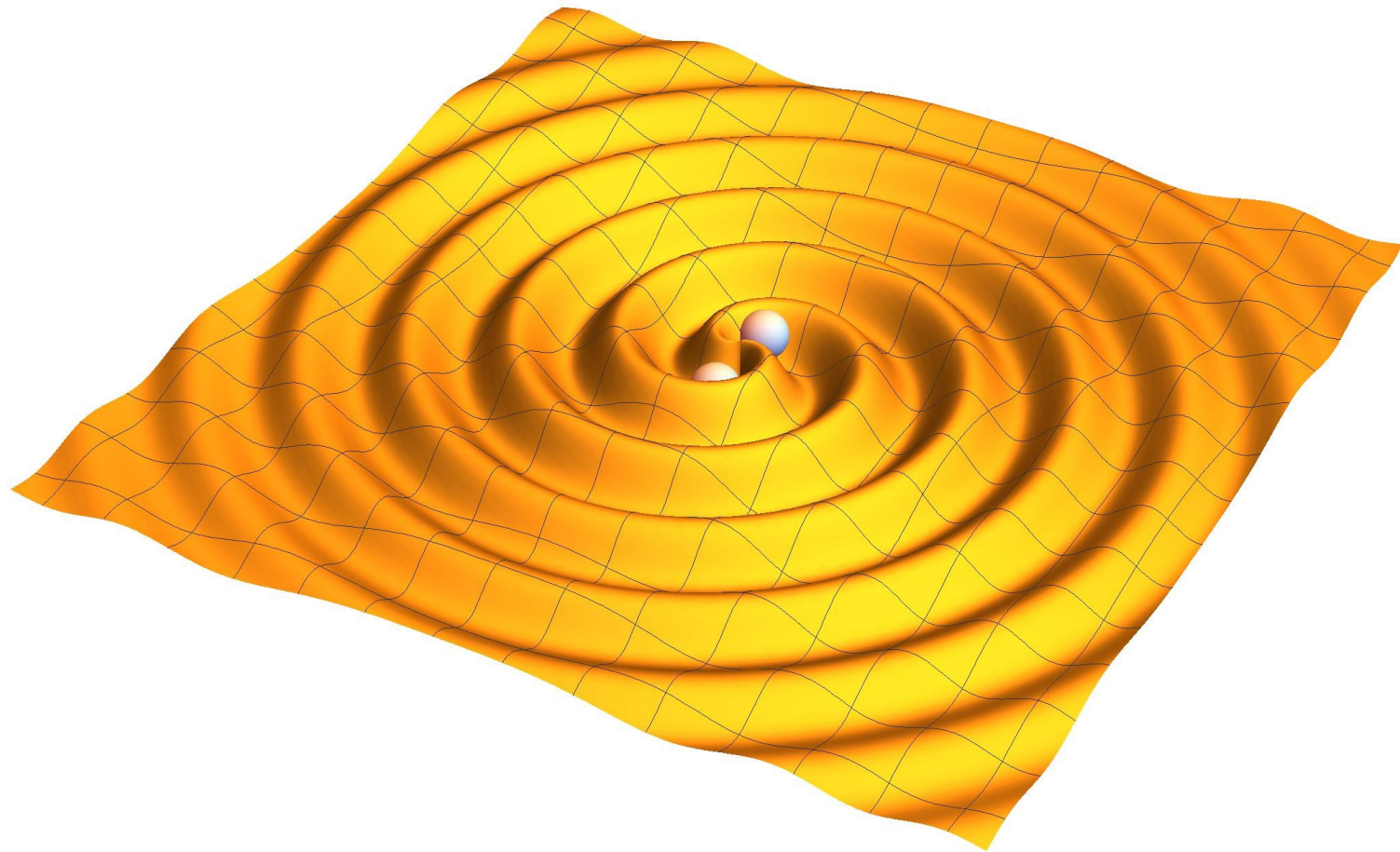


Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Στη γενική σχετικότητα, όντως οι μεταβολές στη βαρύτητα διαδίδονται με τη ταχύτητα του φωτός

(αυτά είναι τα βαρυτικά κύματα, τα οποία μετρήθηκαν και πειραματικά πολύ πρόσφατα)

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας



Κβαντική Θεωρία Πεδίου



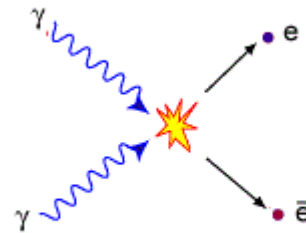
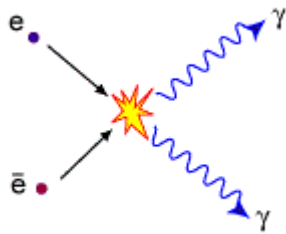
Κβαντική Θεωρία Πεδίου

Το πρώτο πρόβλημα στη σύνθεση σχετικότητας και κβαντομηχανικής πηγάζει από την σχέση $E=mc^2$.

Όπως είπαμε, αυτή μας λέει ότι η ενέργεια και η μάζα δεν διατηρούνται ξεχωριστά, αλλά στην πραγματικότητα είναι η ίδια ποσότητα.

Κβαντική Θεωρία Πεδίου

Λιγότερες αρχές διατήρησης επιτρέπουν σωματιδιακές αντιδράσεις, όπως η εξαύλωση ή η δίδυμη γέννηση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου



Ποια σωματΙΑ περιγράφει η κυματοσυνάρτηση;

Κβαντική Θεωρία Πεδίου

Το πρόβλημα αυτό οδηγεί στην εισαγωγή των πεδίων. Στην εικόνα αυτή, τα σωματίδια είναι απλά κύματα που διαδίδονται σε ένα πεδίο.

Η δίδυμη γέννηση για παράδειγμα είναι η απορρόφηση δύο κυμάτων στο πεδίο των φωτονίων και η δημιουργία δύο κυμάτων στο πεδίο των ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων.

Κβαντική Θεωρία Πεδίου

Τα σωματίδια εμφανίζονται **κβαντισμένα** (1 ή 2 ή 3 κ.τ.λ. σωματίδια) ακριβώς λόγω της **κβάντωσης της ενέργειας** σε ταλαντωτικά συστήματα από τις αρχές της κβαντικής μηχανικής.

Κβαντική Θεωρία Πεδίου

Περνώντας από τα σωμάτια στα πεδία, περνάμε ουσιαστικά σε άπειρους βαθμούς ελευθερίας, αφού τα πεδία περιέχουν ως δυναμική κάθε δυνατή τους ταλάντωση, είτε αυτή συμβαίνει (υπάρχει το σωμάτιο) είτε όχι. Είναι κατά κάποιο τρόπο μια κβαντική εκδοχή μηχανικής ενός συνεχούς μέσου, όπως ένα ρευστό, ή όπως τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Κβαντική Θεωρία Πεδίου

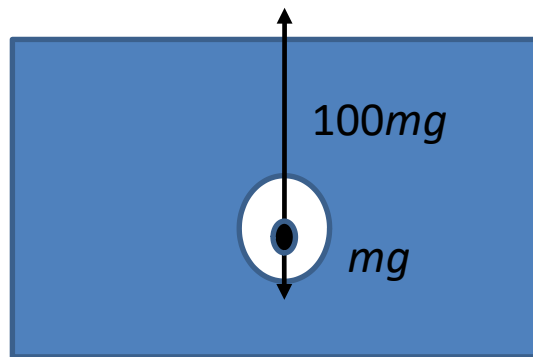
Όπου υπάρχουν αλληλεπιδρώντα ρευστά, υπάρχει και μια σημαντική τεχνική δυσκολία, η **επανακανονικοποίηση**.

Κβαντική Θεωρία Πεδίου

Παράδειγμα από τα ρευστά: έστω μπαλάκι του πινγκ πονγκ, 100 φορές αραιότερο από το νερό. Το βυθίζουμε στο νερό, με πόσην επιτάχυνση ανεβαίνει προς τα πάνω;

Κβαντική Θεωρία Πεδίου

Παράδειγμα από τα ρευστά: έστω μπαλάκι του πινγκ πονγκ, 100 φορές αραιότερο από το νερό. Το βυθίζουμε στο νερό, με πόσην επιτάχυνση ανεβαίνει προς τα πάνω;

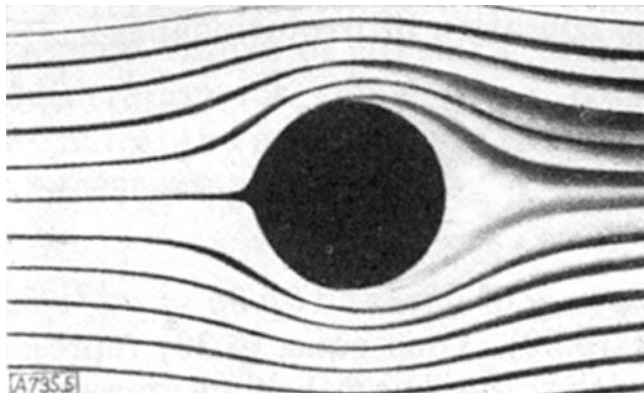


$$a = 99mg/m = 99g !!!$$

Κβαντική Θεωρία Πεδίου

Το αποτέλεσμα είναι αφύσικο.

Η απάντηση είναι ότι όπως ανεβαίνει το μπαλάκι σπρώχνει μαζί του και μια ποσότητα νερού. Δηλαδή το μπαλάκι μέσα στο νερό εμφανίζεται σαν να έχει μεγαλύτερη μάζα.



Κβαντική Θεωρία Πεδίου

Επανακανονικοποίηση+κβαντομηχανική=δυσκολίες:

- Για να είναι η αλληλεπιδρούσα μάζα των σωματίων (μέσα στο νερό) πεπερασμένη, πρέπει η μη-αλληλεπιδρούσα (έξω από το νερό) να είναι άπειρη.
- Φυσικώς, αυτός ο απειρισμός δεν είναι ενοχλητικός. Τα σωματάρια δεν υπάρχουν “έξω από το νερό”.
- Δυστυχώς όμως αυτή η αφύσικη ποσότητα είναι αυτή που μπαίνει στις εξισώσεις του προβλήματος, όπως και στο απλό πρόβλημα με το μπαλάκι.

Κβαντική Θεωρία Πεδίου

- Σε κάποιες θεωρίες (επανακανονικοποιήσιμες) τα άπειρα μπορούν να απομονωθούν από τις μετρήσιμες ποσότητες, δηλαδή τα πειράματα.
- Τέτοιες θεωρίες είναι αυτές που περιγράφουν τις ηλεκτρομαγνητικές, ισχυρές πυρηνικές και ασθενείς πυρηνικές αλληλεπιδράσεις. Με την κβαντική θεωρία πεδίου παίρνουμε ακριβή μοντέλα για τις τρεις από τις τέσσερις αλληλεπιδράσεις. Αυτά τα μοντέλα είναι το λεγόμενο «καθιερωμένο πρότυπο των αλληλεπιδράσεων».

Κβαντική Θεωρία Πεδίου

- Σε άλλες θεωρίες (μη επανακανονικοποιήσιμες) αυτό δεν είναι δυνατό
- Τέτοια θεωρία είναι η γενική σχετικότητα. Δυστυχώς δεν είναι δυνατόν να περιγράψουμε την κβαντική βαρύτητα στα πλαίσια της κβαντικής θεωρίας πεδίου.
Η πιο φιλόδοξη προσπάθεια για μια τέτοια θεωρία είναι η «θεωρία των υπερχορδών»

Δυϊσμοί

- Στην Κβαντική Θεωρία Πεδίου οι φυσικές ποσότητες παθαίνουν επανακανονικοποίηση και εξαρτώνται από την ενέργεια.
- Αυτό σημαίνει ότι μια κβαντική θεωρία αλλάζει πρόσωπο, ανάλογα με την ενέργεια των πειραμάτων.

Δυϊσμοί

- Η μορφή της θεωρίας μπορεί να αλλάζει δραστικά, όταν η αλληλεπιδράσεις γίνονται ισχυρότερες στις χαμηλές ενέργειες (ασυμπτωτική ελευθερία).
- Βασικό παράδειγμα: Η κβαντική χρωμοδυναμική, η θεωρία του ισχυρών πυρηνικών αλληλεπιδράσεων.
- Βασικά σωμάτια είναι τα κουάρκ και τα γλουόνια.
- Στις χαμηλές ενέργειες όμως οι δυνάμεις είναι τόσο ισχυρές που τα κουάρκ ενώνονται ανά τρία σε πρωτόνια και νετρόνια. Στις χαμηλές ενέργειες δεν βλέπουμε ούτε ποιιά είναι τα βασικά σωμάτια.

Δυϊσμοί

Κατά κανόνα, η στις χαμηλές ενέργειες η θεωρία έχει **λιγότερη** πληροφορία από ότι στις υψηλές ενέργειες. Όμως, καμιά φορά ειδικές συμμετρίες εξασφαλίζουν ότι υπάρχει όλη η πληροφορία και στις δύο περιγραφές. Τότε η θεωρία έχει **δύο ισοδύναμες περιγραφές** που λέγονται «**δυϊκές θεωρίες**».

Δυϊσμοί

- Η ύπαρξη δυϊσμών είναι εκτός των άλλων και πανίσχυρο υπολογιστικό εργαλείο
- Στην περιοχή των ισχυρώς συζευγμένων καταστάσεων (π.χ. πρωτόνια-νετρόνια), οι υπολογισμοί είναι πολύ δύσκολοι με βάση την αρχική θεωρία
- Μπορούν όμως να γίνουν στην δυϊκή θεωρία.

Δυϊσμοί

Στα πλαίσια της προσπάθειας κατανόησης της κβαντικής βαρύτητας μέσω της θεωρίας χορδών έχουμε ανακαλύψει μεταξύ άλλων και τους λεγόμενους «**ολογραφικούς δυϊσμούς**».

Σε αυτούς, μια θεωρία με βαρύτητα είναι δυϊκή με μια θεωρία που ζει στο όριο του χώρου της βαρυτικής θεωρίας (άρα σε μια διάσταση λιγότερο) και δεν περιέχει βαρύτητα.

Δυϊσμοί

Χώρος Anti de Sitter
(Καμπύλος χωροχρόνος)

Θεωρία με βαρύτητα στις 5(+5) διαστάσεις

Ολογραφικός
δυϊσμός

Όριο χώρου Anti de Sitter
(επίπεδος χωροχρόνος)

Θεωρία χωρίς βαρύτητα στις 4 διαστάσεις
Μοιάζει με τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις

Δυϊσμοί

Αν αυτή η εικόνα είναι η σωστή περιγραφή της βαρύτητας, το πρόβλημα της κβάντωσης της βαρύτητας λύνεται. Ο πραγματικός ορισμός της βαρυτικής θεωρίας δίνεται μέσω της μη βαρυτικής θεωρίας στο επίπεδο σύνορο του χώρου, η οποία δεν έχει μαθηματικά προβλήματα επανακανονικοποίησης.

Δυϊσμοί

Αν όμως δεν υπάρχει στην πραγματικότητα η βαρύτητα σαν θεμελιώδης δύναμη και η φυσική περιγράφεται θεμελιωδώς από την επίπεδη συνοριακή θεωρία, ποιος είναι ο μηχανισμός που τη γεννά και αυτήν και την παραπάνω διάσταση και τη γεωμετρία του χώρου???

Εντροπικές Δυνάμεις

Ας φανταστούμε μια αλυσίδα με 20 κρίκους πάνω σε μια ευθεία. Ας φανταστούμε επίσης ότι η αντιστροφή ενός δεσμού της αλυσίδας απαιτεί μια ενέργεια E .



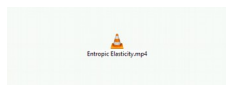
Εντροπικές Δυνάμεις

Σε χαμηλές θερμοκρασίες η αλυσίδα κάθεται όπως την αφήσουμε. Όμως αν ανεβάσουμε τη θερμοκρασία στο E/k_B οι δεσμοί θα αρχίσουν να αλλάζουν τυχαία προσανατολισμούς.



Εντροπικές Δυνάμεις

Επειδή υπάρχουν πολύ περισσότεροι τρόποι η αλυσίδα να είναι διπλωμένη από ότι τεντωμένη, η αλυσίδα στατιστικά φαίνεται να θέλει να συρρικνωθεί.



Εντροπικές Δυνάμεις

Αν την ενώνουμε με ένα ελατήριο στην μια πλευρά, θα φαινόταν να το τραβάει. Αυτό είναι ένα παράδειγμα στατιστικής (εντροπικής) δύναμης.



Κβαντική διεμπλοκή

Στα πλαίσια των ολογραφικών δυϊσμών, έχουμε ενδείξεις για τη φύση της βαρύτητας στην εικόνα της μη βαρυτικής θεωρίας.

Η γεωμετρία (άρα και η βαρύτητα) σχετίζεται με τη συνοριακή θεωρία έτσι ώστε η βαρύτητα να περιγράφει μια εντροπική δύναμη.

Δεν σχετίζεται όμως με θερμικές τυχαιότητες, αλλά με κβαντικές τυχαιότητες.

Κβαντική διεμπλοκή

Οι τυχαιότητες αυτές σχετίζονται με ένα αμιγώς κβαντικό φαινόμενο το οποίο λέγεται «κβαντική διεμπλοκή» (quantum entanglement).

Το φαινόμενο αυτό έχει εφαρμογές στην κβαντική πληροφορία, κβαντικούς υπολογιστές και παίζει καθοριστικό ρόλο στις κβαντικές φάσεις της ύλης (π.χ. υπεραγωγιμότητα).

Κβαντική διεμπλοκή

Μετρήσεις σε διεμπλεγμένα συστήματα είναι συσχετισμένες.

Οι πιθανότητες που γεννούν τις στατιστικές δυνάμεις εμφανίζονται όταν μελετάει κανείς το ένα από τα δύο αγνοώντας το άλλο.

Το πιο απλό και χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το λεγόμενο «παράδοξο EPR»

Κβαντική διεμπλοκή

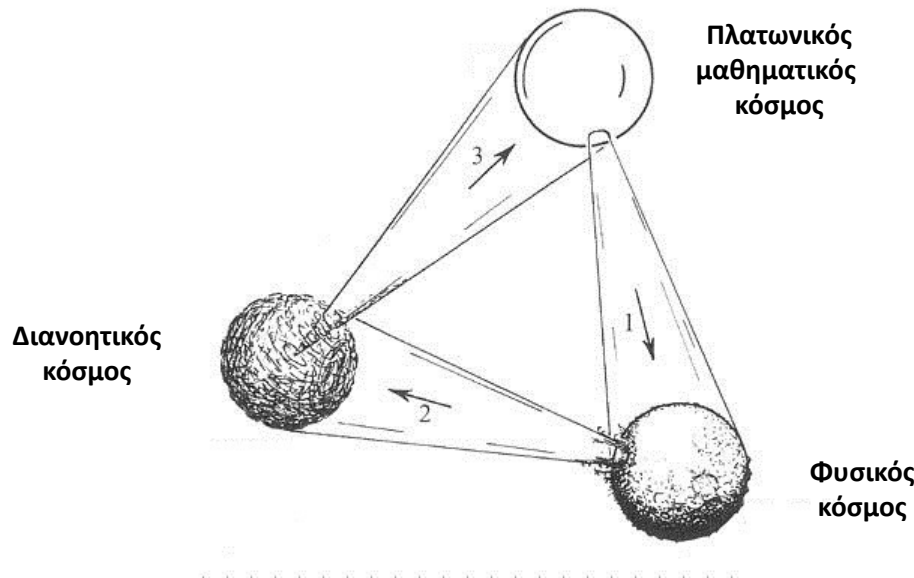
Στη λογική αυτή η βαρύτητα είναι αμιγώς κβαντικό φαινόμενο, το οποίο θα έπρεπε να είναι αναμενόμενο σε κάθε κβαντική θεωρία.

Για να επιβεβαιωθεί όμως αυτή η εικασία απαιτείται να είναι συμβατή με όλα τα γνωστά βαρυτικά φαινόμενα (κύματα, μελανές οπές, ...)

Πρέπει να καταλάβουμε το μηχανισμό και χωρίς τη χρήση του ολογραφικού δυϊσμού.

Επίλογος

Κάθε Επιστημονική Θεωρία είναι ένα Μαθηματικό μοντέλο (Πλατωνικός μαθηματικός κόσμος) του Σύμπαντος (Φυσικός κόσμος), το οποίο, με ένα σύνολο κανόνων και με λογική συνοχή (Διανοητικός κόσμος), αντιστοιχεί ποσότητες του μοντέλου σε πειραματικά δεδομένα. Η επιτυχία αυτής της αντιστοίχισης είναι ο απόλυτος κριτής κάθε Θεωρίας. Η κβαντική βαρύτητα απέχει πολύ ακόμα από την τελική της κρίση.



Η έρευνα του ομιλητή χρηματοδοτείται από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) και τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) στο πλαίσιο της 1ης Προκήρυξης ερευνητικών έργων ΕΛΙΔΕΚ για την ενίσχυση Μεταδιδακτόρων Ερευνητών/τριών με το πρόγραμμα με αριθμό Νο 2595, “Holographic Applications of Quantum Entanglement” (HAPPEN) που υλοποιείται στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”



ΕΛΙΔΕΚ.

Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας & Καινοτομίας



ΓΓΕΤ

ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ
ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



DEMOKRITOS

Ευχαριστώ για την προσοχή!