

Ολογραφική Αρχή και Νέα Υλικά

Γεώργιος Λιναρδόπουλος

Ινστιτούτο Πυρηνικής & Σωματιδιακής Φυσικής
Εθνικό Κέντρο Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος»



53ο Θερινό Σχολείο, Ε.ΚΕ.Φ.Ε. «Δημόκριτος»
Αθήνα, 05 Ιουλίου 2018

Πλάνο ομιλίας

- 1 Κβαντική βαρύτητα
- 2 Μελανές οπές
- 3 Ολογραφική αρχή
- 4 Η αντιστοιχία AdS/CFT
- 5 Τοπολογικά υλικά

Ενότητα 1

Κβαντική βαρύτητα

Η δύναμη της βαρύτητας

Η αρχή της ισοδυναμίας διατυπώθηκε το 1907 από τον A. Einstein:

Οι νόμοι της Φυσικής εντός του πεδίου βαρύτητας είναι οι ίδιοι με τους νόμους της Φυσικής σε ένα τοπικό επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς.

Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά είναι αδύνατον να ανιχνεύσουμε ένα πεδίο βαρύτητας κάνοντας τοπικά πειράματα. Πάντα μπορούμε να επιλέξουμε το (τοπικό) σύστημα συντεταγμένων μας έτσι ώστε να μην αισθανόμαστε τη δύναμη της βαρύτητας.

Η δύναμη της βαρύτητας

Η αρχή της ισοδυναμίας διατυπώθηκε το 1907 από τον A. Einstein:

Οι νόμοι της Φυσικής εντός του πεδίου βαρύτητας είναι οι ίδιοι με τους νόμους της Φυσικής σε ένα τοπικό επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς.

Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά είναι αδύνατον να ανιχνεύσουμε ένα πεδίο βαρύτητας κάνοντας τοπικά πειράματα. Πάντα μπορούμε να επιλέξουμε το (τοπικό) σύστημα συντεταγμένων μας έτσι ώστε να μην αισθανόμαστε τη δύναμη της βαρύτητας.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το βαρυτικό πεδίο εκφράζουν αυτήν ακριβώς την ιδιότητα, δηλαδή την αναλλοιωτότητα της θεωρίας κάτω από γενικούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων («γενική συναλλοιωτότητα»).

Η δύναμη της βαρύτητας

Η αρχή της ισοδυναμίας διατυπώθηκε το 1907 από τον A. Einstein:

Οι νόμοι της Φυσικής εντός του πεδίου βαρύτητας είναι οι ίδιοι με τους νόμους της Φυσικής σε ένα τοπικό επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς.

Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά είναι αδύνατον να ανιχνεύσουμε ένα πεδίο βαρύτητας κάνοντας τοπικά πειράματα. Πάντα μπορούμε να επιλέξουμε το (τοπικό) σύστημα συντεταγμένων μας έτσι ώστε να μην αισθανόμαστε τη δύναμη της βαρύτητας.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το βαρυτικό πεδίο εκφράζουν αυτήν ακριβώς την ιδιότητα, δηλαδή την αναλλοιωτότητα της θεωρίας κάτω από γενικούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων («γενική συναλλοιωτότητα»):

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} = 0 \quad (\text{εξισώσεις Einstein, 1915})$$

Η δύναμη της βαρύτητας

Η αρχή της ισοδυναμίας διατυπώθηκε το 1907 από τον A. Einstein:

Οι νόμοι της Φυσικής εντός του πεδίου βαρύτητας είναι οι ίδιοι με τους νόμους της Φυσικής σε ένα τοπικό επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς.

Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά είναι αδύνατον να ανιχνεύσουμε ένα πεδίο βαρύτητας κάνοντας τοπικά πειράματα. Πάντα μπορούμε να επιλέξουμε το (τοπικό) σύστημα συντεταγμένων μας έτσι ώστε να μην αισθανόμαστε τη δύναμη της βαρύτητας.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το βαρυτικό πεδίο εκφράζουν αυτήν ακριβώς την ιδιότητα, δηλαδή την αναλλοιωτότητα της θεωρίας κάτω από γενικούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων («γενική συναλλοιωτότητα»):

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (\text{εξισώσεις Einstein, 1915}),$$

όπου ο τανυστής «ενέργειας-ορμής» $T_{\mu\nu}$ εκφράζει την ύπαρξη πεδίων ύλης...

Η δύναμη της βαρύτητας

Η αρχή της ισοδυναμίας διατυπώθηκε το 1907 από τον A. Einstein:

Οι νόμοι της Φυσικής εντός του πεδίου βαρύτητας είναι οι ίδιοι με τους νόμους της Φυσικής σε ένα τοπικό επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς.

Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά είναι αδύνατον να ανιχνεύσουμε ένα πεδίο βαρύτητας κάνοντας τοπικά πειράματα. Πάντα μπορούμε να επιλέξουμε το (τοπικό) σύστημα συντεταγμένων μας έτσι ώστε να μην αισθανόμαστε τη δύναμη της βαρύτητας.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το βαρυτικό πεδίο εκφράζουν αυτήν ακριβώς την ιδιότητα, δηλαδή την αναλλοιωτότητα της θεωρίας κάτω από γενικούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων («γενική συναλλοιωτότητα»):

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (\text{εξισώσεις Einstein, 1917}),$$

όπου ο τανυστής «ενέργειας-ορμής» $T_{\mu\nu}$ εκφράζει την ύπαρξη πεδίων ύλης... και Λ είναι η κοσμολογική σταθερά.

Κβαντική βαρύτητα

Είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά της ύλης σε ατομική και υποατομική κλίμακα διέπεται από τους νόμους της κβαντικής μηχανικής:

$$i\hbar \cdot \partial_t \psi(t, \mathbf{x}) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(t, \mathbf{x}) \right] \psi(t, \mathbf{x}) \quad (\text{εξίσωση Schrödinger, 1925}).$$

Ο κβαντικός κόσμος διαφέρει σε πολλά σημεία από τον κλασικό, π.χ.

Κβαντική βαρύτητα

Είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά της ύλης σε ατομική και υποατομική κλίμακα διέπεται από τους νόμους της κβαντικής μηχανικής:

$$i\hbar \cdot \partial_t \psi(t, \mathbf{x}) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(t, \mathbf{x}) \right] \psi(t, \mathbf{x}) \quad (\text{εξίσωση Schrödinger, 1925}).$$

Ο κβαντικός κόσμος διαφέρει σε πολλά σημεία από τον κλασικό, π.χ.

- Τα παρατηρήσιμα μεγέθη (E , J , κλπ) λαμβάνουν διακριτές τιμές («κβάντωση»).

Κβαντική βαρύτητα

Είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά της ύλης σε ατομική και υποατομική κλίμακα διέπεται από τους νόμους της κβαντικής μηχανικής:

$$i\hbar \cdot \partial_t \psi(t, \mathbf{x}) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(t, \mathbf{x}) \right] \psi(t, \mathbf{x}) \quad (\text{εξίσωση Schrödinger, 1925}).$$

Ο κβαντικός κόσμος διαφέρει σε πολλά σημεία από τον κλασικό, π.χ.

- Τα παρατηρήσιμα μεγέθη (E , J , κλπ) λαμβάνουν διακριτές τιμές («κβάντωση»).
- Τα σωματίδια έχουν και κυματική υπόσταση («κυματοσωματιδιακός δυϊσμός»).

Κβαντική βαρύτητα

Είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά της ύλης σε ατομική και υποατομική κλίμακα διέπεται από τους νόμους της κβαντικής μηχανικής:

$$i\hbar \cdot \partial_t \psi(t, \mathbf{x}) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(t, \mathbf{x}) \right] \psi(t, \mathbf{x}) \quad (\text{εξίσωση Schrödinger, 1925}).$$

Ο κβαντικός κόσμος διαφέρει σε πολλά σημεία από τον κλασικό, π.χ.

- Τα παρατηρήσιμα μεγέθη (E , J , κλπ) λαμβάνουν διακριτές τιμές («κβάντωση»).
- Τα σωματίδια έχουν και κυματική υπόσταση («κυματοσωματιδιακός δυϊσμός»).
- Συμπληρωματικές ποσότητες δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα («αβεβαιότητα»).

Κβαντική βαρύτητα

Είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά της ύλης σε ατομική και υποατομική κλίμακα διέπεται από τους νόμους της κβαντικής μηχανικής:

$$i\hbar \cdot \partial_t \psi(t, \mathbf{x}) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(t, \mathbf{x}) \right] \psi(t, \mathbf{x}) \quad (\text{εξίσωση Schrödinger, 1925}).$$

Ο κβαντικός κόσμος διαφέρει σε πολλά σημεία από τον κλασικό, π.χ.

- Τα παρατηρήσιμα μεγέθη (E , J , κλπ) λαμβάνουν διακριτές τιμές («κβάντωση»).
- Τα σωματίδια έχουν και κυματική υπόσταση («κυματοσωματιδιακός дуϊσμός»).
- Συμπληρωματικές ποσότητες δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα («αβεβαιότητα»).

Συνήθως η βαρύτητα είναι εξαιρετικά ασθενής σε ατομικό και υποατομικό επίπεδο για να εμφανίζει κβαντική συμπεριφορά. Τα κβαντικά βαρυτικά φαινόμενα εκδηλώνονται είτε κοντά στην κλίμακα Planck ($\ell_P \sim 10^{-35} m$) είτε σε περιοχές του χωροχρόνου όπου το βαρυτικό πεδίο είναι πολύ ισχυρό (π.χ. κοντά σε μελανές οπές, το πρώιμο σύμπαν, κλπ).

Ενότητα 2

Μελανές οπές

Η ολογραφική αρχή: πρελούδιο

- Η ολογραφική αρχή των 't Hooft και Susskind (1993-94) καθορίζει το ανώτατο αριθμό κβαντικών καταστάσεων σε μια περιοχή του χωροχρόνου όπου δρα η βαρύτητα .

Η ολογραφική αρχή: πρελούδιο

- Η ολογραφική αρχή των 't Hooft και Susskind (1993-94) καθορίζει το ανώτατο αριθμό κβαντικών καταστάσεων σε μια περιοχή του χωροχρόνου όπου δρα η βαρύτητα .
- Θα δούμε ότι τροποποιεί δραστικά μία εκ των θεμελιωδέστερων αρχών της Φυσικής, την έννοια της «τοπικότητας».

Η ολογραφική αρχή: πρελούδιο

- Η ολογραφική αρχή των 't Hooft και Susskind (1993-94) καθορίζει το ανώτατο αριθμό κβαντικών καταστάσεων σε μια περιοχή του χωροχρόνου όπου δρα η βαρύτητα .
- Θα δούμε ότι τροποποιεί δραστικά μία εκ των θεμελιωδέστερων αρχών της Φυσικής, την έννοια της «τοπικότητας».
- Είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξέλιξη των ιδεών για τις μελανές οπές (π.χ. την αρχή της «συμπληρωματικότητας», το παράδοξο της πληροφορίας και το «παράδειγμα της μεμβράνης») και την εντροπία διεμπλοκής.

Η ολογραφική αρχή: πρελούδιο

- Η ολογραφική αρχή των 't Hooft και Susskind (1993-94) καθορίζει το ανώτατο αριθμό κβαντικών καταστάσεων σε μια περιοχή του χωροχρόνου όπου δρα η βαρύτητα .
- Θα δούμε ότι τροποποιεί δραστικά μία εκ των θεμελιωδέστερων αρχών της Φυσικής, την έννοια της «τοπικότητας».
- Είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξέλιξη των ιδεών για τις μελανές οπές (π.χ. την αρχή της «συμπληρωματικότητας», το παράδοξο της πληροφορίας και το «παράδειγμα της μεμβράνης») και την εντροπία διεμπλοκής.
- Η αντιστοιχία AdS/CFT του Maldacena (1997) αποτέλεσε το πρώτο συγκεκριμένο παράδειγμα της ολογραφικής αρχής.

Η ολογραφική αρχή: πρελούδιο

- Η ολογραφική αρχή των 't Hooft και Susskind (1993-94) καθορίζει το ανώτατο αριθμό κβαντικών καταστάσεων σε μια περιοχή του χωροχρόνου όπου δρα η βαρύτητα .
- Θα δούμε ότι τροποποιεί δραστικά μία εκ των θεμελιωδέστερων αρχών της Φυσικής, την έννοια της «τοπικότητας».
- Είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξέλιξη των ιδεών για τις μελανές οπές (π.χ. την αρχή της «συμπληρωματικότητας», το παράδοξο της πληροφορίας και το «παράδειγμα της μεμβράνης») και την εντροπία διεμπλοκής.
- Η αντιστοιχία AdS/CFT του Maldacena (1997) αποτέλεσε το πρώτο συγκεκριμένο παράδειγμα της ολογραφικής αρχής.
- Μαζί με την αντιστοιχία «βαρύτητας/βαθμίδας» αποτελούν τον κινητήριο μοχλό της Θεωρητικής Φυσικής από το 1997 μέχρι και σήμερα.

Μελανές οπές

Οι μελανές οπές είναι λύσεις των εξισώσεων Einstein, π.χ.

$$ds^2 = - \left[1 - \frac{2M}{r} \right] dt^2 + \left[1 - \frac{2M}{r} \right]^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega_2^2 \quad (\text{Schwarzschild})$$

Μελανές οπές

Οι μελανές οπές είναι λύσεις των εξισώσεων Einstein, π.χ.

$$ds^2 = - \left[1 - \frac{2M}{r} \right] dt^2 + \left[1 - \frac{2M}{r} \right]^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega_2^2 \quad (\text{Schwarzschild})$$

$$ds^2 = - \left[1 - \frac{2Mr - Q^2}{r^2} \right] dt^2 + \left[1 - \frac{2Mr - Q^2}{r^2} \right]^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega_2^2 \quad (\text{Reissner-Nordström})$$

Μελανές οπές

Οι μελανές οπές είναι λύσεις των εξισώσεων Einstein, π.χ.

$$ds^2 = - \left[1 - \frac{2M}{r} \right] dt^2 + \left[1 - \frac{2M}{r} \right]^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega_2^2 \quad (\text{Schwarzschild})$$

$$ds^2 = - \left[1 - \frac{2Mr - Q^2}{r^2} \right] dt^2 + \left[1 - \frac{2Mr - Q^2}{r^2} \right]^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega_2^2 \quad (\text{Reissner-Nordström})$$

$$ds^2 = - \left[1 - \frac{2Mr}{\Sigma} \right] dt^2 - \frac{4M r a \sin^2 \theta}{\Sigma} dt d\phi + \frac{\Sigma}{r^2 - 2Mr + a^2} dr^2 + \Sigma d\theta^2 + \left[r^2 + a^2 + \frac{2M r a^2 \sin^2 \theta}{\Sigma} \right] \sin^2 \theta d\phi^2$$

(Kerr),

όπου,

$$d\Omega_2^2 \equiv d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2, \quad a \equiv \frac{J}{mc}, \quad \Sigma \equiv r^2 + a^2 \cos^2 \theta.$$

Θερμοδυναμική μελανών οπών #1

Κάθε μελανή οπή χαρακτηρίζεται από έναν «ορίζοντα γεγονότων», επιφάνεια πέραν της οποίας είναι (κλασικά) αδύνατο να διαφύγει ύλη ή πληροφορία προς το άπειρο.

Θερμοδυναμική μελανών οπών #1

Κάθε μελανή οπή χαρακτηρίζεται από έναν «ορίζοντα γεγονότων», επιφάνεια πέραν της οποίας είναι (κλασικά) αδύνατο να διαφύγει ύλη ή πληροφορία προς το άπειρο.

- Θεώρημα εμβαδού (Hawking, 1971): Η επιφάνεια του ορίζοντα γεγονότων μιας μελανής οπής δε μειώνεται με το χρόνο,

$$dA \geq 0.$$

Θερμοδυναμική μελανών οπών #1

Κάθε μελανή οπή χαρακτηρίζεται από έναν «ορίζοντα γεγονότων», επιφάνεια πέραν της οποίας είναι (κλασικά) αδύνατο να διαφύγει ύλη ή πληροφορία προς το άπειρο.

- Θεώρημα εμβαδού (Hawking, 1971): Η επιφάνεια του ορίζοντα γεγονότων μιας μελανής οπής δε μειώνεται με το χρόνο,

$$dA \geq 0.$$

- Θεώρημα No-hair (Israel, Carter, Hawking, 1967-72): Μια στάσιμη μελανή οπή χαρακτηρίζεται από τρεις ακριβώς ποσότητες: μάζα M , φορτίο Q και στροφορμή J .

Θερμοδυναμική μελανών οπών #1

Κάθε μελανή οπή χαρακτηρίζεται από έναν «ορίζοντα γεγονότων», επιφάνεια πέραν της οποίας είναι (κλασικά) αδύνατο να διαφύγει ύλη ή πληροφορία προς το άπειρο.

- Θεώρημα εμβαδού (Hawking, 1971): Η επιφάνεια του ορίζοντα γεγονότων μιας μελανής οπής δε μειώνεται με το χρόνο,

$$dA \geq 0.$$

- Θεώρημα No-hair (Israel, Carter, Hawking, 1967-72): Μια στάσιμη μελανή οπή χαρακτηρίζεται από τρεις ακριβώς ποσότητες: μάζα M , φορτίο Q και στροφορμή J .
- Εντροπία Bekenstein-Hawking (1972-74): Η εντροπία μιας μελανής οπής είναι ανάλογη του εμβαδού του ορίζοντά της,

$$S_{\text{BH}} = \frac{kc^3}{\hbar} \cdot \frac{A}{4G}.$$

Θερμοδυναμική μελανών οπών #2

- Οός νόμος: η επιφανειακή βαρύτητα/θερμοκρασία κάθε στάσιμης μελανής οπής είναι σταθερή (Hawking, 1974-75),

$$T = \frac{\kappa}{2\pi}.$$

Θερμοδυναμική μελανών οπών #2

- 0ός νόμος: η επιφανειακή βαρύτητα/θερμοκρασία κάθε στάσιμης μελανής οπής είναι σταθερή (Hawking, 1974-75),

$$T = \frac{\kappa}{2\pi}.$$

- 1ος νόμος: κάθε μεταβολή της ενέργειας μιας στάσιμης μελανής οπής συνδέεται με τη μεταβολή της επιφάνειας, του φορτίου και της στροφορμής της (Bardeen-Carter-Hawking, 1973),

$$dM = TdS + \mu dQ + \omega dJ.$$

Θερμοδυναμική μελανών οπών #2

- 0ός νόμος: η επιφανειακή βαρύτητα/θερμοκρασία κάθε στάσιμης μελανής οπής είναι σταθερή (Hawking, 1974-75),

$$T = \frac{\kappa}{2\pi}.$$

- 1ος νόμος: κάθε μεταβολή της ενέργειας μιας στάσιμης μελανής οπής συνδέεται με τη μεταβολή της επιφάνειας, του φορτίου και της στροφορμής της (Bardeen-Carter-Hawking, 1973),

$$dM = TdS + \mu dQ + \omega dJ.$$

- 2ος νόμος: η εντροπία κάθε μελανής οπής (και της ύλης που την περιβάλλει) δεν μειώνεται (Bekenstein, 1972-74),

$$dS_{\text{BH} + \text{matter}} \geq 0.$$

Θερμοδυναμική μελανών οπών #2

- 0ός νόμος: η επιφανειακή βαρύτητα/θερμοκρασία κάθε στάσιμης μελανής οπής είναι σταθερή (Hawking, 1974-75),

$$T = \frac{\kappa}{2\pi}.$$

- 1ος νόμος: κάθε μεταβολή της ενέργειας μιας στάσιμης μελανής οπής συνδέεται με τη μεταβολή της επιφάνειας, του φορτίου και της στροφορμής της (Bardeen-Carter-Hawking, 1973),

$$dM = TdS + \mu dQ + \omega dJ.$$

- 2ος νόμος: η εντροπία κάθε μελανής οπής (και της ύλης που την περιβάλλει) δεν μειώνεται (Bekenstein, 1972-74),

$$dS_{\text{BH} + \text{matter}} \geq 0.$$

- 3ος νόμος: μηδενική επιφανειακή βαρύτητα/θερμοκρασία ($T = \kappa = 0$) είναι ανέφικτη με πεπερασμένο αριθμό βημάτων.

Ακτινοβολία Hawking

- Το γεγονός ότι η μελανή οπή μπορεί να έχει μη μηδενική θερμοκρασία (0ός νόμος) σημαίνει ότι δύναται να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.

Ακτινοβολία Hawking

- Το γεγονός ότι η μελανή οπή μπορεί να έχει μη μηδενική θερμοκρασία (0ός νόμος) σημαίνει ότι δύναται να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία Hawking (1974-75) παράγεται από τις κβαντικές διακυμάνσεις της ύλης κοντά στον ορίζοντα γεγονότων μιας μελανής οπής.

Ακτινοβολία Hawking

- Το γεγονός ότι η μελανή οπή μπορεί να έχει μη μηδενική θερμοκρασία (0ός νόμος) σημαίνει ότι δύναται να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία Hawking (1974-75) παράγεται από τις κβαντικές διακυμάνσεις της ύλης κοντά στον ορίζοντα γεγονότων μιας μελανής οπής.

Ακτινοβολώντας, η μελανή οπή χάνει σταδιακά τη μάζα της και συρρικνώνεται μέχρις ότου εξαϋλωθεί σε ένα σύννεφο ακτινοβολίας με μεγαλύτερη εντροπία (2ος νόμος).

Ακτινοβολία Hawking

- Το γεγονός ότι η μελανή οπή μπορεί να έχει μη μηδενική θερμοκρασία (0ός νόμος) σημαίνει ότι δύναται να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία Hawking (1974-75) παράγεται από τις κβαντικές διακυμάνσεις της ύλης κοντά στον ορίζοντα γεγονότων μιας μελανής οπής.

Ακτινοβολώντας, η μελανή οπή χάνει σταδιακά τη μάζα της και συρρικνώνεται μέχρις ότου εξαϋλωθεί σε ένα σύννεφο ακτινοβολίας με μεγαλύτερη εντροπία (2ος νόμος).

- Αν όμως η ακτινοβολία Hawking είναι 100% θερμική, τότε όλη η πληροφορία για την αρχική κατάσταση της μελανής οπής μοιάζει να χάνεται.

Ακτινοβολία Hawking

- Το γεγονός ότι η μελανή οπή μπορεί να έχει μη μηδενική θερμοκρασία (0ός νόμος) σημαίνει ότι δύναται να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία Hawking (1974-75) παράγεται από τις κβαντικές διακυμάνσεις της ύλης κοντά στον ορίζοντα γεγονότων μιας μελανής οπής.

Ακτινοβολώντας, η μελανή οπή χάνει σταδιακά τη μάζα της και συρρικνώνεται μέχρις ότου εξαϋλωθεί σε ένα σύννεφο ακτινοβολίας με μεγαλύτερη εντροπία (2ος νόμος).

- Αν όμως η ακτινοβολία Hawking είναι 100% θερμική, τότε όλη η πληροφορία για την αρχική κατάσταση της μελανής οπής μοιάζει να χάνεται.

Το «παράδοξο της πληροφορίας» οδήγησε σε αρκετές επιστημονικές διαμάχες και στοιχήματα μεταξύ των θεωρητικών φυσικών.

Ακτινοβολία Hawking

- Το γεγονός ότι η μελανή οπή μπορεί να έχει μη μηδενική θερμοκρασία (0ός νόμος) σημαίνει ότι δύναται να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία Hawking (1974-75) παράγεται από τις κβαντικές διακυμάνσεις της ύλης κοντά στον ορίζοντα γεγονότων μιας μελανής οπής.

Ακτινοβολώντας, η μελανή οπή χάνει σταδιακά τη μάζα της και συρρικνώνεται μέχρις ότου εξαϋλωθεί σε ένα σύννεφο ακτινοβολίας με μεγαλύτερη εντροπία (2ος νόμος).

- Αν όμως η ακτινοβολία Hawking είναι 100% θερμική, τότε όλη η πληροφορία για την αρχική κατάσταση της μελανής οπής μοιάζει να χάνεται.

Το «παράδοξο της πληροφορίας» οδήγησε σε αρκετές επιστημονικές διαμάχες και στοιχήματα μεταξύ των θεωρητικών φυσικών.

- Η ολογραφική αρχή προτάθηκε με στόχο την ερμηνεία του παραδόξου της πληροφορίας μεταξύ άλλων.

Ακτινοβολία Hawking

- Το γεγονός ότι η μελανή οπή μπορεί να έχει μη μηδενική θερμοκρασία (0ός νόμος) σημαίνει ότι δύναται να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία Hawking (1974-75) παράγεται από τις κβαντικές διακυμάνσεις της ύλης κοντά στον ορίζοντα γεγονότων μιας μελανής οπής.

Ακτινοβολώντας, η μελανή οπή χάνει σταδιακά τη μάζα της και συρρικνώνεται μέχρις ότου εξαϋλωθεί σε ένα σύννεφο ακτινοβολίας με μεγαλύτερη εντροπία (2ος νόμος).

- Αν όμως η ακτινοβολία Hawking είναι 100% θερμική, τότε όλη η πληροφορία για την αρχική κατάσταση της μελανής οπής μοιάζει να χάνεται.

Το «παράδοξο της πληροφορίας» οδήγησε σε αρκετές επιστημονικές διαμάχες και στοιχήματα μεταξύ των θεωρητικών φυσικών.

- Η ολογραφική αρχή προτάθηκε με στόχο την ερμηνεία του παραδόξου της πληροφορίας μεταξύ άλλων.

Σύμφωνα με την ολογραφική αρχή, η πληροφορία της μελανής οπής δεν χάνεται αλλά αποθηκεύεται ως ολόγραμμα πάνω σε ένα «ολογραφικό πέτασμα».

Ενότητα 3

Ολογραφική αρχή

Η ολογραφική αρχή

Η ολογραφική αρχή ('t Hooft, 1993 & Susskind, 1994) διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Θεωρία κβαντικής βαρύτητας} \cong \text{Θεωρία χωρίς βαρύτητα στο σύνορο του χωροχρόνου}$$

Η ολογραφική αρχή

Η ολογραφική αρχή ('t Hooft, 1993 & Susskind, 1994) διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Θεωρία κβαντικής βαρύτητας} \cong \text{Θεωρία χωρίς βαρύτητα στο σύνορο του χωροχρόνου}$$

Ας δούμε τώρα εν συντομία πώς φθάνουμε στην ολογραφική αρχή.

Η ολογραφική αρχή

Η ολογραφική αρχή ('t Hooft, 1993 & Susskind, 1994) διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Θεωρία κβαντικής βαρύτητας} \cong \text{Θεωρία χωρίς βαρύτητα στο σύνορο του χωροχρόνου}$$

Ας δούμε τώρα εν συντομία πώς φθάνουμε στην ολογραφική αρχή.

- Όπως είδαμε η εντροπία των μελανών οπών είναι ανάλογη της επιφάνειας του ορίζοντα γεγονότων τους. Στις $d + 1$ διαστάσεις,

$$S_{\text{BH}} = \frac{kc^3}{\hbar} \cdot \frac{A}{4G_{d+1}}.$$

Η ολογραφική αρχή

Η ολογραφική αρχή ('t Hooft, 1993 & Susskind, 1994) διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Θεωρία κβαντικής βαρύτητας} \cong \text{Θεωρία χωρίς βαρύτητα στο σύνορο του χωροχρόνου}$$

Ας δούμε τώρα εν συντομία πώς φθάνουμε στην ολογραφική αρχή.

- Όπως είδαμε η εντροπία των μελανών οπών είναι ανάλογη της επιφάνειας του ορίζοντα γεγονότων τους. Στις $d + 1$ διαστάσεις,

$$S_{\text{BH}} = \frac{kc^3}{\hbar} \cdot \frac{A}{4G_{d+1}}.$$

- Σύμφωνα με το (γενικευμένο) 2ο θερμοδυναμικό νόμο των μελανών οπών,

$$dS_{\text{BH}} + \text{matter} \geq 0.$$

Όρια εντροπίας

- Το σφαιρικό όριο εντροπίας του Susskind (1995) επιβάλλει τη μη-παραβίαση του 2ου θερμοδυναμικού νόμου κατά την βαρυτική κατάρρευση ενός υλικού συστήματος:

$$S_{\text{matter}} \leq \frac{A}{4G_{d+1}},$$

όπου A είναι η επιφάνεια ενός ασυμπτωτικά σταθερού και σφαιρικά συμμετρικού ή ασθενώς βαρυτικού συστήματος.

Όρια εντροπίας

- Το σφαιρικό όριο εντροπίας του Susskind (1995) επιβάλλει τη μη-παραβίαση του 2ου θερμοδυναμικού νόμου κατά την βαρυτική κατάρρευση ενός υλικού συστήματος:

$$S_{\text{matter}} \leq \frac{A}{4G_{d+1}},$$

όπου A είναι η επιφάνεια ενός ασυμπτωτικά σταθερού και σφαιρικά συμμετρικού ή ασθενώς βαρυτικού συστήματος.

- Το όριο Susskind σαφώς υπαινίσσεται μια «ολογραφική αρχή» σύμφωνα με την οποία είναι αδύνατον να αποθηκεύσουμε περισσότερους από $A/4$ βαρυτικούς βαθμούς ελευθερίας στο εσωτερικό επιφάνειας εμβαδού A .

Όρια εντροπίας

- Το σφαιρικό όριο εντροπίας του Susskind (1995) επιβάλλει τη μη-παραβίαση του 2ου θερμοδυναμικού νόμου κατά την βαρυτική κατάρρευση ενός υλικού συστήματος:

$$S_{\text{matter}} \leq \frac{A}{4G_{d+1}},$$

όπου A είναι η επιφάνεια ενός ασυμπτωτικά σταθερού και σφαιρικά συμμετρικού ή ασθενώς βαρυτικού συστήματος.

- Το όριο Susskind σαφώς υπαινίσσεται μια «ολογραφική αρχή» σύμφωνα με την οποία *είναι αδύνατον να αποθηκεύσουμε περισσότερους από $A/4$ βαρυτικούς βαθμούς ελευθερίας στο εσωτερικό επιφάνειας εμβαδού A .*
- Το σφαιρικό όριο εντροπίας του Susskind μπορεί να αναβαθμιστεί στο συναλλοίωτο όριο εντροπίας του Bousso (1999) το οποίο δεν απαιτεί σταθερότητα, σφαιρική συμμετρία ή ασθενή βαρύτητα για το βαρυτικό σύστημα: *Η εντροπία εντός κάθε φωτεινού κώνου που πηγάζει από ένα ολογραφικό πέτασμα είναι μικρότερη ή ίση από το $1/4$ της επιφάνειας του πετάσματος.*

Ολογραφία

- Η ολογραφική αρχή προκύπτει από την ακόλουθη πρόταση:

*Ολογραφικά πετάσματα με πυκνότητα πληροφορίας 1 bit ανά επιφάνεια Planck
μπορούν να κατασκευαστούν σε κάθε σημείο του χωροχρόνου.*

που σημαίνει ότι οι συνοριακοί βαθμοί ελευθερίας διέπονται από κάποια μη-βαρυτική θεωρία.

Ολογραφία

- Η ολογραφική αρχή προκύπτει από την ακόλουθη πρόταση:

Ολογραφικά πετάσματα με πυκνότητα πληροφορίας 1 bit ανά επιφάνεια Planck μπορούν να κατασκευαστούν σε κάθε σημείο του χωροχρόνου.

που σημαίνει ότι οι συνοριακοί βαθμοί ελευθερίας διέπονται από κάποια μη-βαρυτική θεωρία.

- Τέτοιες μη-βαρυτικές θεωρίες είναι γνωστές ως Κβαντικές Θεωρίες Πεδίου — μια τέτοια είναι και το Καθιερωμένο Πρότυπο των Στοιχειωδών Σωματιδίων που περιγράφει όλες τις γνωστές αλληλεπιδράσεις (ισχυρή & ηλεκτρασθενής) — πλην της βαρυτικής.

Ολογραφία

- Η ολογραφική αρχή προκύπτει από την ακόλουθη πρόταση:

Ολογραφικά πετάσματα με πυκνότητα πληροφορίας 1 bit ανά επιφάνεια Planck μπορούν να κατασκευαστούν σε κάθε σημείο του χωροχρόνου.

που σημαίνει ότι οι συνοριακοί βαθμοί ελευθερίας διέπονται από κάποια μη-βαρυτική θεωρία.

- Τέτοιες μη-βαρυτικές θεωρίες είναι γνωστές ως Κβαντικές Θεωρίες Πεδίου — μια τέτοια είναι και το Καθιερωμένο Πρότυπο των Στοιχειωδών Σωματιδίων που περιγράφει όλες τις γνωστές αλληλεπιδράσεις (ισχυρή & ηλεκτρασθενής) — πλην της βαρυτικής.
- Ωστόσο οι κβαντικές θεωρίες πεδίου είναι αυστηρά τοπικές θεωρίες: οι ιδιότητές τους σε ένα οποιοδήποτε σημείο, επηρεάζονται μόνο από τα γειτονικά του σημεία. Έτσι και το πλήθος των αντίστοιχων βαθμών ελευθερίας είναι ανάλογο του όγκου.

Ολογραφία

- Η ολογραφική αρχή προκύπτει από την ακόλουθη πρόταση:

Ολογραφικά πετάσματα με πυκνότητα πληροφορίας 1 bit ανά επιφάνεια Planck μπορούν να κατασκευαστούν σε κάθε σημείο του χωροχρόνου.

που σημαίνει ότι οι συνοριακοί βαθμοί ελευθερίας διέπονται από κάποια μη-βαρυτική θεωρία.

- Τέτοιες μη-βαρυτικές θεωρίες είναι γνωστές ως Κβαντικές Θεωρίες Πεδίου — μια τέτοια είναι και το Καθιερωμένο Πρότυπο των Στοιχειωδών Σωματιδίων που περιγράφει όλες τις γνωστές αλληλεπιδράσεις (ισχυρή & ηλεκτρασθενής) — πλην της βαρυτικής.
- Ωστόσο οι κβαντικές θεωρίες πεδίου είναι αυστηρά τοπικές θεωρίες: οι ιδιότητές τους σε ένα οποιοδήποτε σημείο, επηρεάζονται μόνο από τα γειτονικά του σημεία. Έτσι και το πλήθος των αντίστοιχων βαθμών ελευθερίας είναι ανάλογο του όγκου.
- Αντιθέτως είδαμε ότι η βαρύτητα επιβάλλει ισχυρούς περιορισμούς στον αριθμό των διαθέσιμων καταστάσεων αποκλείοντας πολλές από αυτές. Η «τοπικότητα» παύει να ισχύει. Το πλήθος των βαθμών ελευθερίας είναι ανάλογο της επιφάνειας.

Ενότητα 4

Η αντιστοιχία AdS/CFT

Η αντιστοιχία AdS/CFT

Το πρώτο παράδειγμα ολογραφικής αντιστοιχίας διατυπώθηκε το 1997 από τον Maldacena:

$$\begin{array}{l} \text{Θεωρία υπερχορδών τύπου IIB} \\ \text{στο υπόβαθρο } \text{AdS}_5 \times S^5 \end{array} \cong \begin{array}{l} \text{Θεωρία } \mathcal{N} = 4 \text{ super Yang-Mills} \\ \text{με ομάδα βαθμίδας } \mathfrak{su}(N_c) \end{array}$$

στην οποία το ρόλο της βαρυτικής θεωρίας έχει η θεωρία χορδών (σε 5+5 διαστάσεις) και το ρόλο της μη-βαρυτικής θεωρίας έχει η θεωρία $\mathcal{N} = 4$ SYM (σε 3+1 διαστάσεις).

Η αντιστοιχία AdS/CFT

Το πρώτο παράδειγμα ολογραφικής αντιστοιχίας διατυπώθηκε το 1997 από τον Maldacena:

$$\begin{array}{l} \text{Θεωρία υπερχορδών τύπου IIB} \\ \text{στο υπόβαθρο } \text{AdS}_5 \times S^5 \end{array} \cong \begin{array}{l} \text{Θεωρία } \mathcal{N} = 4 \text{ super Yang-Mills} \\ \text{με ομάδα βαθμίδας } \mathfrak{su}(N_c) \end{array}$$

στην οποία το ρόλο της βαρυτικής θεωρίας έχει η θεωρία χορδών (σε 5+5 διαστάσεις) και το ρόλο της μη-βαρυτικής θεωρίας έχει η θεωρία $\mathcal{N} = 4$ SYM (σε 3+1 διαστάσεις).

- Η αντιστοιχία του Maldacena είναι γνωστή και ως αντιστοιχία AdS/CFT.

Η αντιστοιχία AdS/CFT

Το πρώτο παράδειγμα ολογραφικής αντιστοιχίας διατυπώθηκε το 1997 από τον Maldacena:

$$\begin{array}{l} \text{Θεωρία υπερχορδών τύπου IIB} \\ \text{στο υπόβαθρο } \text{AdS}_5 \times S^5 \end{array} \cong \begin{array}{l} \text{Θεωρία } \mathcal{N} = 4 \text{ super Yang-Mills} \\ \text{με ομάδα βαθμίδας } \mathfrak{su}(N_c) \end{array}$$

στην οποία το ρόλο της βαρυτικής θεωρίας έχει η θεωρία χορδών (σε 5+5 διαστάσεις) και το ρόλο της μη-βαρυτικής θεωρίας έχει η θεωρία $\mathcal{N} = 4$ SYM (σε 3+1 διαστάσεις).

- Η αντιστοιχία του Maldacena είναι γνωστή και ως αντιστοιχία AdS/CFT.
- Το συνθετικό anti-de Sitter (AdS) προέρχεται από βαρυτικό υπόβαθρο της θεωρίας υπερχορδών στο αριστερό μέλος.

Η αντιστοιχία AdS/CFT

Το πρώτο παράδειγμα ολογραφικής αντιστοιχίας διατυπώθηκε το 1997 από τον Maldacena:

$$\begin{array}{l} \text{Θεωρία υπερχορδών τύπου IIB} \\ \text{στο υπόβαθρο } \text{AdS}_5 \times S^5 \end{array} \cong \begin{array}{l} \text{Θεωρία } \mathcal{N} = 4 \text{ super Yang-Mills} \\ \text{με ομάδα βαθμίδας } \mathfrak{su}(N_c) \end{array}$$

στην οποία το ρόλο της βαρυτικής θεωρίας έχει η θεωρία χορδών (σε 5+5 διαστάσεις) και το ρόλο της μη-βαρυτικής θεωρίας έχει η θεωρία $\mathcal{N} = 4$ SYM (σε 3+1 διαστάσεις).

- Η αντιστοιχία του Maldacena είναι γνωστή και ως αντιστοιχία AdS/CFT.
- Το συνθετικό anti-de Sitter (AdS) προέρχεται από βαρυτικό υπόβαθρο της θεωρίας υπερχορδών στο αριστερό μέλος.
- Η θεωρία $\mathcal{N} = 4$ SYM είναι μία σύμμορφη θεωρία πεδίου (CFT), δηλαδή εκτός από τη συμμετρία Poincaré της ειδικής σχετικότητας είναι συμμετρική και σε αλλαγές κλίμακας (οι Bateman & Cunningham, το έδειξαν για τις εξισώσεις Maxwell το 1908-09).

Η αντιστοιχία AdS/CFT

Το πρώτο παράδειγμα ολογραφικής αντιστοιχίας διατυπώθηκε το 1997 από τον Maldacena:

$$\begin{array}{l} \text{Θεωρία υπερχορδών τύπου IIB} \\ \text{στο υπόβαθρο } \text{AdS}_5 \times S^5 \end{array} \cong \begin{array}{l} \text{Θεωρία } \mathcal{N} = 4 \text{ super Yang-Mills} \\ \text{με ομάδα βαθμίδας } \mathfrak{su}(N_c) \end{array}$$

στην οποία το ρόλο της βαρυτικής θεωρίας έχει η θεωρία χορδών (σε 5+5 διαστάσεις) και το ρόλο της μη-βαρυτικής θεωρίας έχει η θεωρία $\mathcal{N} = 4$ SYM (σε 3+1 διαστάσεις).

- Η αντιστοιχία του Maldacena είναι γνωστή και ως αντιστοιχία AdS/CFT.
- Το συνθετικό anti-de Sitter (AdS) προέρχεται από βαρυτικό υπόβαθρο της θεωρίας υπερχορδών στο αριστερό μέλος.
- Η θεωρία $\mathcal{N} = 4$ SYM είναι μία σύμμορφη θεωρία πεδίου (CFT), δηλαδή εκτός από τη συμμετρία Poincaré της ειδικής σχετικότητας είναι συμμετρική και σε αλλαγές κλίμακας (οι Bateman & Cunningham, το έδειξαν για τις εξισώσεις Maxwell το 1908-09).
- Και οι δύο θεωρίες είναι υπερσυμμετρικές. Και στις δύο θεωρίες έχουν ανακαλυφθεί ολοκληρώσιμες δομές (Minahan-Zarembo, 2002, Bena-Polchinski-Roiban, 2003).

Η δυαδικότητα βαρύτητας/βαθμίδας

Γενικεύοντας την αντιστοιχία AdS/CFT μπορούμε να προτείνουμε την ισοδυναμία μεταξύ μιας βαρυτικής θεωρίας και μιας θεωρίας βαθμίδας:

Θεωρία κβαντικής βαρύτητας σε $d + 1$ διαστάσεις	$\cong$	Θεωρία βαθμίδας σε d διαστάσεις
---	---------	--------------------------------------

Η δυαδικότητα βαρύτητας/βαθμίδας

Γενικεύοντας την αντιστοιχία AdS/CFT μπορούμε να προτείνουμε την ισοδυναμία μεταξύ μιας βαρυτικής θεωρίας και μιας θεωρίας βαθμίδας:

Θεωρία κβαντικής βαρύτητας σε $d + 1$ διαστάσεις	$\cong$	Θεωρία βαθμίδας σε d διαστάσεις
---	---------	--------------------------------------

- Η (αβελιανή) $u(1)$ συμμετρία βαθμίδας είναι γνωστή από τον ηλεκτρομαγνητισμό:

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \lambda \quad (\mathbf{E} = -\nabla V + \partial_t \mathbf{A}, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A})$$

Η δυαδικότητα βαρύτητας/βαθμίδας

Γενικεύοντας την αντιστοιχία AdS/CFT μπορούμε να προτείνουμε την ισοδυναμία μεταξύ μιας βαρυτικής θεωρίας και μιας θεωρίας βαθμίδας:

$$\begin{array}{ccc} \text{Θεωρία κβαντικής βαρύτητας} & \cong & \text{Θεωρία βαθμίδας} \\ \text{σε } d+1 \text{ διαστάσεις} & & \text{σε } d \text{ διαστάσεις} \end{array}$$

- Η (αβελιανή) $u(1)$ συμμετρία βαθμίδας είναι γνωστή από τον ηλεκτρομαγνητισμό:

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \lambda \quad (\mathbf{E} = -\nabla V + \partial_t \mathbf{A}, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A})$$

- Η θεωρία $\mathcal{N} = 4$ SYM είναι μία θεωρία με μη αβελιανή συμμετρία βαθμίδας $su(N_c)$:

$$A_\mu(\mathbf{x}) \rightarrow U(\mathbf{x}) A_\mu(\mathbf{x}) U^\dagger(\mathbf{x}) + \frac{i}{g} U(\mathbf{x}) \partial_\mu U^\dagger(\mathbf{x}),$$

όπου οι A_μ είναι $N_c \times N_c$ πίνακες: $A_\mu(\mathbf{x}) = A_\mu^a(\mathbf{x}) T^a$ (π.χ. για $N_c = 1$, $U = e^{-ie\lambda(\mathbf{x})}$).

Εφαρμογές

Η ολογραφική αρχή μας επιτρέπει να συσχετίσουμε τις ιδιότητες της βαρύτητας με τις ιδιότητες των θεωριών βαθμίδας.

Εφαρμογές

Η ολογραφική αρχή μας επιτρέπει να συσχετίσουμε τις ιδιότητες της βαρύτητας με τις ιδιότητες των θεωριών βαθμίδας.

Η έρευνα σήμερα διεξάγεται σε πολλά μέτωπα με αιχμή είτε την αντιστοιχία AdS/CFT, είτε γενικότερα τη δυαδικότητα βαρύτητας/βαθμίδας:

Εφαρμογές

Η ολογραφική αρχή μας επιτρέπει να συσχετίσουμε τις ιδιότητες της βαρύτητας με τις ιδιότητες των θεωριών βαθμίδας.

Η έρευνα σήμερα διεξάγεται σε πολλά μέτωπα με αιχμή είτε την αντιστοιχία AdS/CFT, είτε γενικότερα τη δυαδικότητα βαρύτητας/βαθμίδας:

- Ολοκληρώσιμες θεωρίες πεδίου.

Εφαρμογές

Η ολογραφική αρχή μας επιτρέπει να συσχετίσουμε τις ιδιότητες της βαρύτητας με τις ιδιότητες των θεωριών βαθμίδας.

Η έρευνα σήμερα διεξάγεται σε πολλά μέτωπα με αιχμή είτε την αντιστοιχία AdS/CFT, είτε γενικότερα τη δυαδικότητα βαρύτητας/βαθμίδας:

- Ολοκληρώσιμες θεωρίες πεδίου.
- Ιδιότητες εκτεταμένων αντικειμένων, υπερχορδών και μεμβρανών.

Εφαρμογές

Η ολογραφική αρχή μας επιτρέπει να συσχετίσουμε τις ιδιότητες της βαρύτητας με τις ιδιότητες των θεωριών βαθμίδας.

Η έρευνα σήμερα διεξάγεται σε πολλά μέτωπα με αιχμή είτε την αντιστοιχία AdS/CFT, είτε γενικότερα τη δυαδικότητα βαρύτητας/βαθμίδας:

- Ολοκληρώσιμες θεωρίες πεδίου.
- Ιδιότητες εκτεταμένων αντικειμένων, υπερχορδών και μεμβρανών.
- Ιδιότητες μελανών οπών (παράδοξο της πληροφορίας, μικροσκοπική προέλευση εντροπίας, κλπ).

Εφαρμογές

Η ολογραφική αρχή μας επιτρέπει να συσχετίσουμε τις ιδιότητες της βαρύτητας με τις ιδιότητες των θεωριών βαθμίδας.

Η έρευνα σήμερα διεξάγεται σε πολλά μέτωπα με αιχμή είτε την αντιστοιχία AdS/CFT, είτε γενικότερα τη δυαδικότητα βαρύτητας/βαθμίδας:

- Ολοκληρώσιμες θεωρίες πεδίου.
- Ιδιότητες εκτεταμένων αντικειμένων, υπερχορδών και μεμβρανών.
- Ιδιότητες μελανών οπών (παράδοξο της πληροφορίας, μικροσκοπική προέλευση εντροπίας, κλπ).
- Μελέτη της ισχυρής αλληλεπίδρασης στη φάση του πλάσματος (AdS/QCD).

Εφαρμογές

Η ολογραφική αρχή μας επιτρέπει να συσχετίσουμε τις ιδιότητες της βαρύτητας με τις ιδιότητες των θεωριών βαθμίδας.

Η έρευνα σήμερα διεξάγεται σε πολλά μέτωπα με αιχμή είτε την αντιστοιχία AdS/CFT, είτε γενικότερα τη δυαδικότητα βαρύτητας/βαθμίδας:

- Ολοκληρώσιμες θεωρίες πεδίου.
- Ιδιότητες εκτεταμένων αντικειμένων, υπερχορδών και μεμβρανών.
- Ιδιότητες μελανών οπών (παράδοξο της πληροφορίας, μικροσκοπική προέλευση εντροπίας, κλπ).
- Μελέτη της ισχυρής αλληλεπίδρασης στη φάση του πλάσματος (AdS/QCD).
- Μελέτη συστημάτων συμπυκνωμένης ύλης & κβαντικών κρίσιμων σημείων (AdS/CMT).

Εφαρμογές

Η ολογραφική αρχή μας επιτρέπει να συσχετίσουμε τις ιδιότητες της βαρύτητας με τις ιδιότητες των θεωριών βαθμίδας.

Η έρευνα σήμερα διεξάγεται σε πολλά μέτωπα με αιχμή είτε την αντιστοιχία AdS/CFT, είτε γενικότερα τη δυαδικότητα βαρύτητας/βαθμίδας:

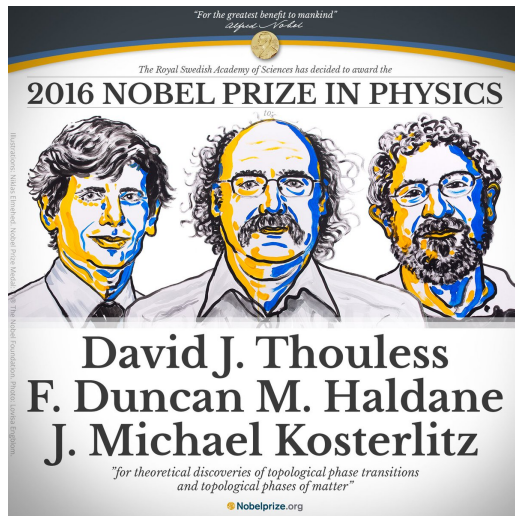
- Ολοκληρώσιμες θεωρίες πεδίου.
- Ιδιότητες εκτεταμένων αντικειμένων, υπερχορδών και μεμβρανών.
- Ιδιότητες μελανών οπών (παράδοξο της πληροφορίας, μικροσκοπική προέλευση εντροπίας, κλπ).
- Μελέτη της ισχυρής αλληλεπίδρασης στη φάση του πλάσματος (AdS/QCD).
- Μελέτη συστημάτων συμπυκνωμένης ύλης & κβαντικών κρίσιμων σημείων (AdS/CMT).

Στα επόμενα θα ήθελα να συζητήσω μία ακόμη ενδιαφέρουσα προοπτική της ολογραφίας.

Ενότητα 5

Τοπολογικά υλικά

Τοπολογικά υλικά



Το φαινόμενο Hall

Το κλασικό φαινόμενο Hall (E. Hall, 1879)

- Μοντέλο Drude:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e\mathbf{E} - e\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \frac{m\mathbf{v}}{\tau}$$

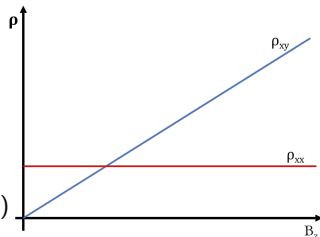
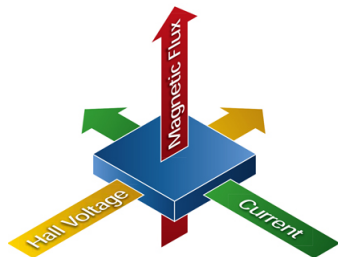
- Στην ισορροπία $\mathbf{J} = -ne\mathbf{v}$ και παίρνουμε το νόμο του Ohm:

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E},$$

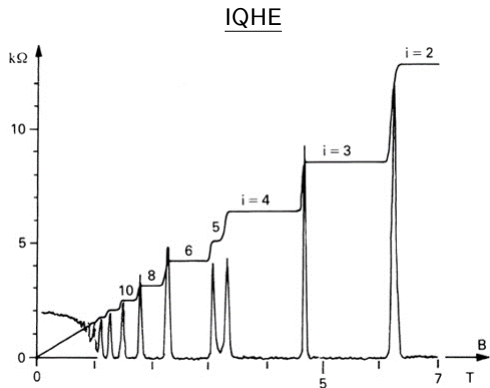
όπου η ειδική αντίσταση Hall είναι

$$\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{\sigma}^{-1} = \begin{pmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} \\ -\rho_{xy} & \rho_{yy} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sigma_{dc}} \begin{pmatrix} 1 & \omega_B \tau \\ -\omega_B \tau & 1 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{dc} \equiv \frac{e^2 n \tau}{m} \quad (\text{αγωγιμότητα dc}), \quad \omega_B \equiv \frac{e B_z}{m} \quad (\text{συχνότητα κύκλοτρον})$$

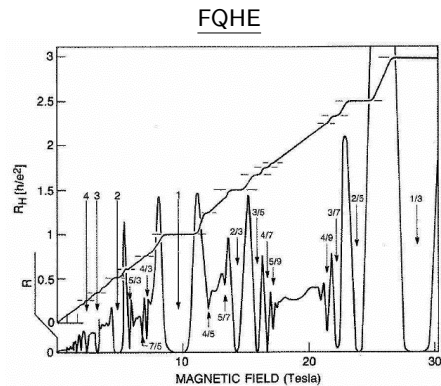


Το φαινόμενο Hall



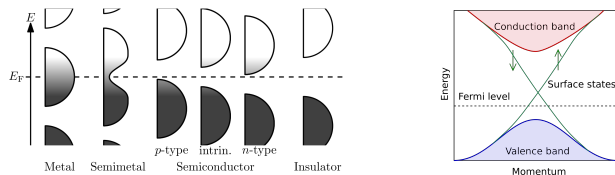
$$\rho_{xy} = \frac{h}{e^2} \frac{1}{\nu}, \quad \nu \in \mathbb{Z}$$

von Klitzing, 1981 (NP 1985)



Τοπολογικοί μονωτές

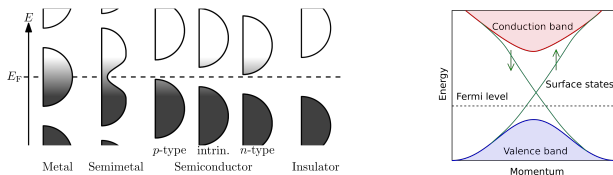
- Οι τοπολογικοί μονωτές συμπεριφέρονται ως μονωτές στο εσωτερικό και ως αγωγοί στην επιφάνεια.



- Μεταλλικές επιφανειακές καταστάσεις προβλέφθηκαν για κβαντικά πηγάδια το 1987 (παρατηρήθηκαν το 2007).
- Σε 3d τοπολογικοί μονωτές ανακαλύφθηκαν σε κράματα βισμούθιου-αντιμονίου (BiSb) το 2008.
- Πιθανώς χρήσιμοι ως σπιντρονικές συσκευές (μνήμης) σε κβαντικούς υπολογιστές.

Τοπολογικοί μονωτές

- Οι τοπολογικοί μονωτές συμπεριφέρονται ως μονωτές στο εσωτερικό και ως αγωγοί στην επιφάνεια.



- Μεταλλικές επιφανειακές καταστάσεις προβλέφθηκαν για κβαντικά πηγάδια το 1987 (παρατηρήθηκαν το 2007).
- Σε 3d τοπολογικοί μονωτές ανακαλύφθηκαν σε κράματα βισμούθιου-αντιμονίου (BiSb) το 2008.
- Πιθανώς χρήσιμοι ως σπιντρονικές συσκευές (μνήμης) σε κβαντικούς υπολογιστές.
- Μοντέλα 2d-τοπολογικών μονωτών μπορούν να μελετηθούν στα πλαίσια της ολογραφίας AdS/CFT.

Ευχαριστώ!

Ενδεικτική βιβλιογραφία

- Ολογραφική αρχή.
R. Bousso. "The Holographic Principle". In: *Rev.Mod.Phys.* 74 (2002), p. 825. arXiv: hep-th/0203101 [hep-th]
- Αντιστοιχία AdS/CFT.
O. Aharony et al. "Large N Field Theories, String Theory and Gravity". In: *Phys.Rep.* 323 (2000), p. 183. arXiv: hep-th/9905111 [hep-th]
E. D'Hoker and D. Z. Freedman. "Supersymmetric Gauge Theories and the AdS/CFT Correspondence". In: (2002). arXiv: hep-th/0201253 [hep-th]
N. Beisert et al. "Review of AdS/CFT Integrability: An Overview". In: *Lett.Math.Phys.* 99 (2012), p. 3. arXiv: 1012.3982 [hep-th]
- Εφαρμογές.
J. Casalderrey-Solana et al. "Gauge/String Duality, Hot QCD and Heavy Ion Collisions". In: (2011). arXiv: 1101.0618 [hep-th]
S. A. Hartnoll, A. Lucas, and S. Sachdev. "Holographic Quantum Matter". In: (2016). arXiv: 1612.07324 [hep-th]
- Εγχειρίδια.
A. P. Lightman et al. *Problem Book in Relativity and Gravitation*. Princeton University Press, 1979
L. Susskind and J. Lindesay. *An Introduction to Black Holes, Information and the String Theory Revolution: The Holographic Universe*. 2005
E. Kiritsis. *String Theory in a Nutshell*. Princeton University Press, 2007
- Τοπολογικά υλικά.
D. Tong. "Lectures on the Quantum Hall Effect". In: 2016. arXiv: 1606.06687 [hep-th]. URL: <https://inspirehep.net/record/1471556/files/arXiv:1606.06687.pdf>
J. E. Moore. "The Birth of Topological Insulators". In: *Nature* 464 (2010), p. 194
C. Kristjansen and G. W. Semenoff. "The D3-probe-D7 Brane Holographic Fractional Topological Insulator". In: *JHEP* 10 (2016), p. 079. arXiv: 1604.08548 [hep-th]