

Φαινόμενα μη τοπικότητας πλησίον του ορίζοντα γεγονότων μιάς μελανής οπής

Νίκος Ράμμος

Η επίσημη θέση της επιστημονικής κοινότητας μέχρι σήμερα περί της πιθανότητας διαφυγής προσπίπτουσας ύλης, συνεπώς και κβαντομηχανικής πληροφορίας, από το πολύ ισχυρό βαρυτικό πεδίο μιας μελανής οπής υποστηρίζει ότι η πιθανότητα αυτή είναι μηδενική.

Όμως κάποιες μελέτες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια μέσα στα πλαίσια της κβαντομηχανικής θεωρίας, δείχνουν πως πιθανόν να υπάρχει τρόπος διαφυγής προσπαθώντας να δοθεί έτσι μια λύση στο «παράδοξο της πληροφορίας». Η θέση αυτή υποστηρίζεται και από την παρούσα μελέτη στην οποία παρουσιάζεται μια νέα κβαντομηχανική προσέγγιση του ζητήματος περί της διαφυγής πληροφοριακού περιεχομένου της ύλης.

1. Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι, βάση των συμπερασμάτων της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, ο ορίζοντας γεγονότων μίας μαύρης τρύπας σημειακής μάζας M , εκδηλώνει μια ασυνήθη ιδιότητα καθολικού χαρακτήρα που απαγορεύει την αποστολή οποιονδήποτε σημάτων από την περιοχή $r < r_s$ στην περιοχή $r > r_s$ (όπου $r_s = 2GM/c^2$). Με άλλα λόγια η επιφάνεια $r = r_s$ ενεργεί σαν «ημιπερατή μεμβράνη». Σήματα μπορούν να εισέλθουν σ' αυτή αλλά όχι να εξέλθουν (προς έναν εξωτερικό παρατηρητή). Έτσι, η ύλη που εισέρχεται εντός της μαύρης τρύπας αφομοιώνεται, με τις πληροφορίες της να χάνονται ανέκκλητα. Σύμφωνα όμως με την κβαντική μηχανική η πληροφορία που εμπεριέχεται σε ένα φυσικό σύστημα πρέπει πάντοτε να διατηρείται. Αυτό ακριβώς το γεγονός αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της σύγχρονης φυσικής.

Παρόλα αυτά έχουν προταθεί κάποιοι φυσικοί μηχανισμοί-μοντέλα για την επίλυση του «παραδόξου της πληροφορίας» από διάφορες επιστημονικές ομάδες ανά τον κόσμο. Ενδεικτικά αναφέρονται αυτές του Samir Mathur στα πλαίσια της κβαντομηχανικής θεωρίας και πιο συγκεκριμένα της θεωρίας των χορδών, και των Andrew Strominger και Cumrun Vafa μέσα στα πλαίσια της ίδιας θεωρίας. Επίσης υπάρχει και το μοντέλο του Stephen Hawking ο οποίος ανακοίνωσε το 2004 ότι έλυσε αυτό το παράδοξο.

2. Το παράδοξο της πληροφορίας

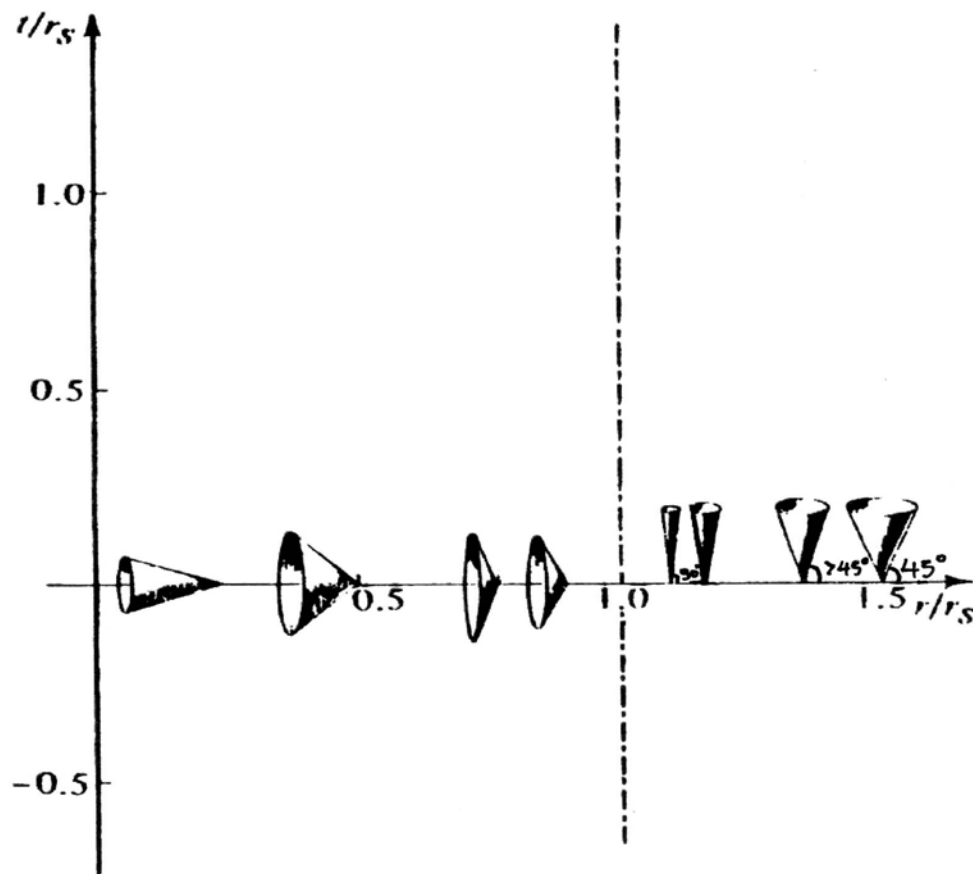
Η ανακάλυψη του Hawking περί της ακτινοβολίας των μελανών οπών εγκαθίδρυσε μια βαθιά και ικανοποιητική σύνδεση μεταξύ της βαρύτητας, της κβαντικής θεωρίας και της θερμοδυναμικής. Ιδιατερώς κομψή είναι η φόρμουλα του Hawking για την εντροπία μίας μαύρης τρύπας $S = 1/4A$ όπου A είναι η επιφάνεια του ορίζοντα γεγονότων σε μονάδες Planck.

Παρόλα αυτά, η ακτινοβολία μίας μελανής οπής εγείρει ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα. Στον ημικλασικό υπολογισμό της ακτινοβολίας της μαύρης τρύπας ο Hawking βρήκε ότι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι ακριβώς θερμική. Πιο συγκεκριμένα, το ακριβές είδος της ακτινοβολίας δεν εξαρτάται από την ακριβή δομή του σώματος που κατέρρευσε για να σχηματίσει τη μαύρη τρύπα. Αυτό διότι η κατάσταση της ακτινοβολίας εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία της μαύρης τρύπας εκτός του ορίζοντα γεγονότων της, και η μαύρη τρύπα δεν έχει μαλλιά που να καταγράφουν καμμία αναλυτική πληροφορία για το σώμα που κατέρρευσε σ' αυτή.

Ας υποθεθεί όμως ότι η μαύρη οπή συνεχίζει να εξατμίζεται μέχρι να εξατμιστεί πλήρως. Τώρα η ακτινοβολία είναι όλο το σύστημα. Και φαίνεται ότι μιά αρχικά καθαρή κβαντική κατάσταση, εξελίχθηκε σε μια μικτή κατάσταση. Με άλλα λόγια, ακόμη και αν η αρχική κβαντική κατάσταση ήταν δεδομένη, δεν γίνεται να προβλεφθεί με βεβαιότητα ποιά θα είναι η τελική κβαντική κατάσταση. (John Preskill, September 1992)

3. Περί διαφυγής της ύλης – Η κλασσική προσέγγιση

Μελετώντας τη γεωμετρία του χωροχρόνου και θεωρώντας τους κώνους φωτός σε ένα χωροχρονικό διάγραμμα $t - r$ όπως φαίνεται στο σχήμα I, μπορεί να διαπιστωθεί γιατί τίποτα δεν μπορεί να διαφύγει από μια μελανή οπή.



Σχήμα I

Η κλίση του κώνου φωτός είναι dt/dr . Για το φώς, $d\tau = 0$.

$$\Rightarrow d\tau^2 = 0 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2$$

$$\Rightarrow \frac{dt}{dr} = \pm \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} = \pm \frac{r}{|r - r_s|}$$

Μακριά από την μελανή οπή, ο χωροχρόνος δείχνει σαν τον χώρο Minkowski, με 45° κώνους φωτός:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{dt}{dr} = \pm 1$$

Όμως, πλησίον του ορίζοντα γεγονότων $r = r_s$ οι κώνοι φωτός στενεύουν σε μηδενική πυκνότητα σε 90° κλίση:

$$\lim_{r \rightarrow r_s} \frac{dt}{dr} = \pm \infty$$

Λόγω της κλίσης των 90° , τα φωτόνια (όπως και τα σωματίδια ύλης) δεν μπορούν να διαφύγουν – θα χρειάζονταν μια πιο οριζόντια κλίση που να δείχνει προς τα δεξιά για να διαφύγουν από την μαύρη τρύπα.

Από την άλλη, δεν μπορούν να καταρρεύσουν προς τα μέσα, καθώς δεν γίνεται να κινηθούν προς τα αριστερά. Στην πραγματικότητα όμως πέφτουν μέσα, αλλά οι εξωτερικοί παρατηρητές πρέπει να περιμένουν άπειρο χρόνο $t = \infty$ πρίν γίνει αυτό.

Εσωτερικά της μαύρης τρύπας για $r < r_s$, $\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) < 0$,

$$\Rightarrow d\tau^2 = \left|1 - \frac{r_s}{r}\right|^{-1} dr^2 - \left|1 - \frac{r_s}{r}\right| dt^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

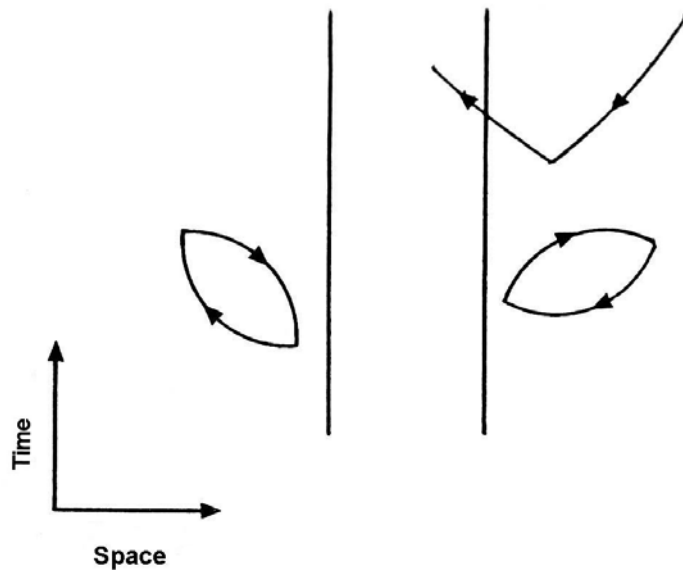
Ας σημειωθεί ότι ο όρος dr^2 έχει τον θετικό μετρικό συντελεστή, ενώ ο όρος dt^2 γίνεται αρνητικός. Αυτό το γεγονός υποδηλώνει ότι η (αρνητική) r διεύθυνση γίνεται η νέα μελλοντική διεύθυνση: σωστός χρόνος, εντροπία, και συνειδησιακός χρόνος κινούνται προς το $r = 0$ παρά στην παλιά t συνιστώσα, που τώρα έγινε χωρική. Συνεπώς τίποτα δεν μπορεί να διαφύγει και είναι καταδικασμένο να καταστραφεί στην ανωμαλία της μελανής οπής. Από τη στιγμή που ένα σωματίδιο εισέρχεται στο εσωτερικό της μαύρης τρύπας, δεν είναι παρατηρήσιμο από οποιονδήποτε εξωτερικό παρατηρητή, αφού η παρατήρησή του προϋποθέτει την εκπομπή ενός φωτονίου, το οποίο θα καταγράψει αυτός ο παρατηρητής. (Mitchell A. Berger, 2004)

Σύμφωνα όμως και με τα συμπεράσματα της νευτώνειας μηχανικής, αγνοώντας προς στιγμήν το γεγονός πως το βαρυτικό πεδίο μιάς μελανής οπής είναι πολύ ισχυρό όπου οι εξισώσεις της νευτώνειας μηχανικής δεν εφαρμόζονται (καθότι ισχύουν μόνο για ασθενή βαρυτικά πεδία, όπου ο λόγος της ταχύτητας διαφυγής ενός υλικού σώματος u_e προς την ταχύτητα του φωτός c είναι πολύ μικρότερος της μονάδας δηλαδή ισχύει ότι $u_e/c \ll 1$),

παρατηρείται ότι η πιθανότητα διαφυγής της ύλης η οποία βρίσκεται εντός του ορίζοντα γεγονότων της μαύρης τρύπας είναι μηδενική. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός πως η ολική ενέργεια E_T ενός σώματος μάζας m και ταχύτητας u_e σε απόσταση r_i (όπου $0 \leq r_i < r_s$) από το κέντρο μάζας της μελανής οπής είναι αρνητική ($E_T < 0$).

4. Η ακτινοβολία Hawking

Αλλά σύμφωνα και με τον ημικλαστικό υπολογισμό περί της ακτινοβολίας των μελανών οπών είναι γνωστό ότι, όπως προαναφέρθηκε, η ακτινοβολία Hawking οφείλεται στις κβαντικές διακυμάνσεις του κενού χώρου $(\Delta E) \cdot (\Delta t) \geq \hbar$ εκτός του ορίζοντα γεγονότων της μελανής οπής όπως φαίνεται στο σχήμα II.



Σχήμα II

Συνεπώς αυτή η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία δεν μεταφέρει καμμία πληροφορία προς έναν εξωτερικό παρατηρητή (δηλαδή στην περιοχή $r > r_s$) για την προσπίπτουσα ύλη στο εσωτερικό της μαύρης τρύπας.

5. Περί της διαφυγής πληροφορίας – Μια νέα κβαντομηχανική προσέγγιση

Αναλύοντας όμως το ζήτημα της διαφυγής πληροφοριακού περιεχομένου της ύλης σε μικροσκοπικό επίπεδο μέσω των συμπερασμάτων της κβαντικής μηχανικής, διαπιστώνεται ότι η διαφυγή πληροφορίας από μια μελανή οπή ίσως να είναι εφικτή. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί βάσει των ιδιοτήτων της μή τοπικότητας και του εναγκαλισμού όπως αυτές διαφαίνονται από το φαινόμενο EPR (Einstein – Podolsky – Rosen). Πιο συγκεκριμένα στη μελέτη αυτή θαδειχθεί ότι η διαφυγή της πληροφορίας από την μελανή οπή είναι πιθανή διαμέσου του φαινομένου της διαπλοκής σύμφωνα με το οποίο οι ιδιότητες δύο ή περισσότερων συστημάτων παραμένουν συσχετισμένες ανεξάρτητα των χωροχρονικών αποστάσεων που τα χωρίζουν.

Έστω δύο σωματίδια με σπίν $1/2$ σε απόσταση $r > r_s$ από μια μελανή οπή τύπου Schwarzschild σημειακής μάζας M , τα οποία προέρχονται από ένα σύστημα με συνολική στροφορμή μηδέν. Για παράδειγμα, ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο που παράγονται από την διάσπαση αυτού του συστήματος (με συνολική στροφορμή μηδέν). Ας υποθεθεί ότι αυτά τα δύο σωματίδια απόμακρύνονται στη συνέχεια το ένα από το άλλο, προς αντίθετες κατευθύνσεις, με μηδενική τροχιακή στροφορμή.

Μετά την πάροδο χρονικού διαστήματος Δt , το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε απόσταση r_i από τη μελανή οπή όπου $r_i < r_s$, δηλαδή εντός της μαύρης τρύπας, ενώ το ποζιτρόνιο βρίσκεται εκτός του ορίζοντα γεγονότων της μελανής οπής σε απόσταση $r_e > r_s$.

Επειδή η συνολική στροφορμή είναι μηδέν, τα δύο αυτά σωματίδια θα έχουν συνολικό σπίν μηδέν και το καταστατικό τους διάνυσμα θα είναι σύμφωνα με την κβαντική μηχανική

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+-\rangle - |-+\rangle)$$

όπου οι ιδιοτιμές της z συνιστώσας του σπίν για τα δύο σωματίδια είναι $+\frac{\hbar}{2}, -\frac{\hbar}{2}$ για το πρώτο καταστατικό διάνυσμα $|+-\rangle$ και $-\frac{\hbar}{2}, +\frac{\hbar}{2}$, αντίστοιχα για το δεύτερο καταστατικό διάνυσμα $|-+\rangle$.

Από τη στιγμή που τα δύο σωματίδια έχουν βρεθεί αρκετά μακριά το ένα απ' το άλλο, μετράται η z συνιστώσα του σπίν του ηλεκτρονίου (το οποίο βρίσκεται σε κάποιο χωροχρονικό σημείο εντός της ακτίνας Schwarzschild) και βρίσκεται η τιμή $+\frac{\hbar}{2}$. Τότε χωρίς να διαταραχθεί το ποζιτρόνιο (που βρίσκεται σε κάποιο σημείο εκτός του ορίζοντα γεγονότων της

μελανής οπής), θα είναι γνωστό ότι, λόγω της ιδιότητας του εναγκαλισμού, μια μέτρηση της z συνιστώσας του σπίν του θα δώσει την τιμή $-\frac{\hbar}{2}$.

Αλλά θα μπορούσε εξίσου καλά να μετρηθεί η x συνιστώσα του σπίν του ηλεκτρονίου και, αν βρισκόταν η τιμή $+\frac{\hbar}{2}$, θα συμπεραίνονταν όμοια ότι η x συνιστώσα του σπίν του ποζιτρονίου θα είχε την καθορισμένη τιμή $-\frac{\hbar}{2}$.

Όπως δείχθηκε στο παραπάνω νοητικό πείραμα, η μέτρηση της τιμής της z συνιστώσας του σπιν του ηλεκτρονίου το οποίο βρίσκεται σε απόσταση r_i (όπου $r_i < r_s$) από την μελανή οπή επηρεάζει στιγμιαία το αποτέλεσμα της μέτρησης της τιμής της z συνιστώσας του ποζιτρονίου το οποίο βρίσκεται εκτός της ακτίνας Schwarzschild σε απόσταση r_e (όπου $r_e > r_s$) από την μαύρη τρύπα ανεξάρτητα από την χωροχρονική απόσταση των δύο σωματιδίων. Ο επηρεασμός αυτός οφείλεται στην ιδιότητα του κβαντικού μη διαχωρισμού μέσω της οποίας τα δύο σωματίδια συσχετίζονται και παραμένουν συνδεδεμένα ως ενιαίο σύστημα.

Με άλλα λόγια γίνεται στιγμιαία μεταφορά της πληροφορίας της τιμής της z συνιστώσας του σπίν του ηλεκτρονίου από την περιοχή $r < r_s$ στην περιοχή $r > r_s$ προς το ποζιτρόνιο χωρίς την ανταλλαγή οποιουδήποτε σήματος μεταξύ των σωματιδίων.

5. Συμπεράσματα

Σ' αυτή τη μελέτη δείχθηκε ότι η πιθανότητα διαφυγής ενός υλικού σώματος (συνεπώς και κβαντομηχανικής πληροφορίας) από το πολύ ισχυρό βαρυτικό πεδίο μιάς μελανής οπής είναι αδύνατη σύμφωνα με την κλασσική θεώρηση. Το ίδιο πιστεύεται ότι ισχύει και για την ακτινοβολία Hawking η οποία δεν αποτελεί σε καμιά περίπτωση επεξεργασμένη μορφή πληροφορίας της προσπίπτουσας ύλης προερχόμενη από την εσωτερική περιοχή της μαύρης τρύπας. Δηλαδή μέσω αυτής της ακτινοβολίας δεν μπορεί να μεταφέρεται κβαντομηχανική πληροφορία, από το εσωτερικό της μελανής οπής, προς έναν εξωτερικό παρατηρητή για τους προαναφερόμενους λόγους.

Όμως όπως αποδείχθηκε, βάση των συμπερασμάτων της κβαντικής μηχανικής, η διαφυγή κβαντομηχανικής πληροφορίας ίσως είναι δυνατή μέσω του φαινομένου του εναγκαλισμού. Παρόλα αυτά πρέπει να τονιστεί ότι στην παρούσα μελέτη δεν παρουσιάσθηκε

κάποιος συγκεκριμένος φυσικός μηχανισμός για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνεται αυτό. (δηλαδή η μεταφορά κβαντομηχανικής πληροφορίας από την περιοχή $r < r_s$ προς την περιοχή $r > r_s$).

Πάντως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτής της νέας κβαντομηχανικής προσέγγισης είναι πως σε αυτή την περίπτωση δεν γίνεται μεταφορά της πληροφορίας μέσω κάποιου μεταδιδόμενου σήματος από την περιοχή εντός της μελανής οπής προς έναν εξωτερικό παρατηρητή. Η γνώση της πληροφορίας, στην περιοχή που βρίσκεται εκτός του ορίζοντα γεγονότων της μαύρης τρύπας, επιτυγχάνεται ως το αποτέλεσμα της μη τοπικότητας της κβαντομηχανικής θεωρίας και συγκεκριμένα μέσω του φαινομένου της κβαντικής συσχέτισης. Ακόμη, ενδιαφέρουσα θα ήταν και η περίπτωση εξαγωγής κβαντομηχανικής πληροφορίας από μια μελανή οπή μεταξύ συσχετιζόμενων μακροσκοπικών σωμάτων (για παράδειγμα συσχετίζοντας νέφη αερίου καισίου, κάτι το οποίο ήδη έχει επιτευχθεί).

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Ε. Βαγιονάκης, Εισαγωγή στην Κβαντική Μηχανική, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Ιωαννίνα 2002
- [2] Παν. Τσιλιμιγκράς, Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων, Εκδοτικός Οίκος Γρηγ. Φουντάς, 1996
- [3] Hugh D. Young, University Physics (8th edition), Addison-Wesley Company, Inc. 1992
- [4] Ελένη Χατζηαχρήστου, Το Ολογραφικό Σύμπαν-Πραγματικότητα ή Ψευδαίσθηση, Περισκόπιο της Επιστήμης, Νοέμβριος 2004
- [5] John Preskill, “Do Black Holes Destroy Information?”, September 1992
- [6] Phil Schewe, James Riordon, and BenStein, Entanglement of Macroscopic Objects, Physics news Update, September 26, 2001
- [7] Mitchell A. Berger, Cosmology, (Lecture Notes C358),
<http://www.ucl.ac.uk/~ucahmab/Cosmo/CosmologyOne.pdf>