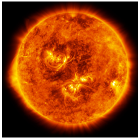
Εξατμιζόμενες Μελανές Οπές και το Παράδοξο της Πληροφορίας

Ηλίας Κόκκας

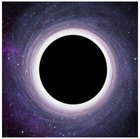
University of Tennessee, Knoxville

Περιεχόμενα

Κλασσικές Μελανές Οπές

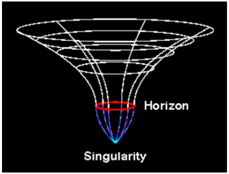


$\xrightarrow{M > M_{cr}}$



$$: \ ds^2 = -\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

- $r = r_s$: Ορίζοντας γεγονότων
- $r = 0$: Ανωμαλία (singularity)



Κβαντική μηχανική

Στην ΚΜ η κυματοσυνάρτηση ψ ενός συστήματος μας δίνει την πληροφορία για αυτό

$$\psi \longrightarrow |\psi\rangle : \text{ διάνυσμα}$$

Για σωματίδιο με σπιν $1/2$:

$$|\psi\rangle = \cos\alpha\,|\uparrow\rangle + \sin\alpha\,|\downarrow\rangle = cos\alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + sin\alpha \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Κβαντική Διεμπλοκή (Quantum Entanglement)

Όταν δυο κβαντικά συστήματα είναι διεμπλεγμένα, τότε έχουμε πληροφορία για το ολικό σύστημα και όχι για καθένα ξεχωριστά. Για δυο σωματίδια με σπιν $1/2$

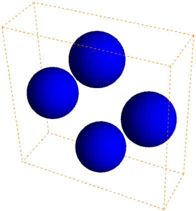
$$|\psi\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\rangle_A\,|\downarrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_A\,|\uparrow\rangle_B\right) \quad : \quad s = 1, m_s = 0$$

Κβαντική πληροφορία

Καθαρές και Μικτές καταστάσεις

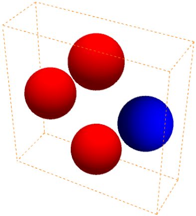
- Κάθε κατάσταση της μορφής $|\psi\rangle$ είναι μια καθαρή κατάσταση , με πίνακα πυκνότητας $\rho = |\psi\rangle \langle\psi|$
- Μια μικτή κατάσταση είναι ένα μίγμα καθαρών καταστάσεων, $\rho = \sum_{i=1}^{N} p_i |\psi_i\rangle \langle\psi_i|$
- Για μια καθαρή κατάσταση $\rho^2 = \rho$, για μία μικτή κατάσταση $\rho^2 \neq \rho$

BOX 1(Καθαρή κατάσταση)



$$\rho_1 = \rho_{Blue}$$

BOX 2(Μικτή κατάσταση)



$$\rho_2 = \frac{1}{4}\rho_{Blue} + \frac{3}{4}\rho_{Red}$$

όπου $|Blue\rangle = |\uparrow\rangle$ και $|Red\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$

Οι συντελεστές $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$ είναι κλασσικές πιθανότητες που οφείλονται στην άγνοια μας!

Μελανές Οπές

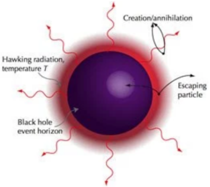
Κλασσικές Μελανές Οπές + Κβαντική Μηχανική = Θερμική ακτινοβολία Μελανών Οπών

Γιατί συμβαίνει αυτό;

- Κβαντικό κενό : δυνητικά σωματίδια → χωρίς παραγωγή σωματιδίων

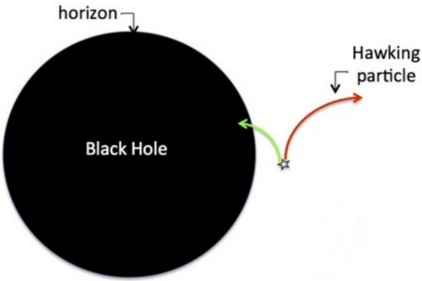
$$\Delta E \Delta t \leqslant \hbar$$

- Κοντά στον ορίζοντα → παραγωγή σωματιδίων



Τα σωματίδια που φεύγουν προς τα έξω αποτελούν την ακτινοβολία Hawking. Εξάτμιση Μελανής Οπής

Το παράδοξο της πληροφορίας I



Τα παραγόμενα σωματίδια είναι κβαντικά διεμπλεγμένα:

$$|\psi\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|1\rangle_A |0\rangle_B + |0\rangle_A |1\rangle_B\right)$$

Ένας παρατηρητής έξω από τον ορίζοντα θα δει μια μικτή κατάσταση

$$\rho_B = Tr_A[|\psi\rangle_{AB} \langle\psi|]$$

Η ακτινοβολία Hawking δεν φέρει πληροφορία σχετικά με

- Την ύλη που δημιούργησε την ΜΟ
- Επιπλέον ύλη η οποία έπεσε στην ΜΟ

Το παράδοξο της πληροφορίας II

Η κατάσταση του συστήματος βήμα βήμα

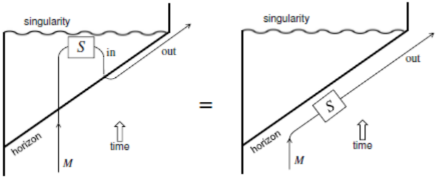
- Αρχικά, $|\Psi_{t_0}\rangle = |\varphi\rangle_M$ η ύλη που θα σχηματίσει τη ΜΟ
- Αμέσως μετά τη δημιουργία της ΜΟ $|\Psi_{t_1}\rangle = |\varphi\rangle_M |\psi\rangle_{AB}$
- Ένας εξωτερικός παρατηρητής θα πρέπει να αθρίσει πάνω στις καταστάσεις του εσωτερικού της ΜΟ $\rho_B = Tr_{A,M}[|\Psi\rangle_{t_1} \langle\Psi|]$: Μικτή κατάσταση
- Μετά την εξάτμιση $\rho_{t_2} = \rho_B$

Μια καθαρή κατάσταση μετατράπηκε σε μικτή, το οποίο σημαίνει πως πληροφορία καταστράφηκε!

Αλλαγές λόγω τελικής συνθήκης [1]

Μπορούμε να αποφύγουμε την καταστροφή πληροφορίας

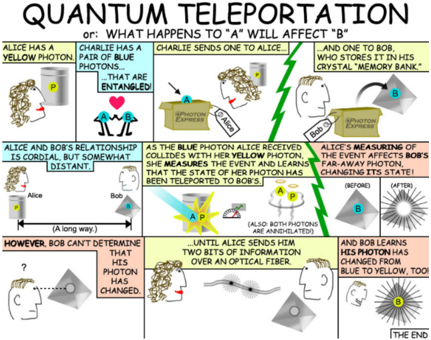
- Μετά το σχηματισμό της ΜΟ
  $|\Psi_i\rangle = |\varphi\rangle_M |\psi\rangle_{AB} = |\varphi\rangle_M \sum_j |j\rangle_A |j\rangle_B$
- Εφαρμόζουμε την τελική συνθήκη $|\Psi_f\rangle = \sum_{im} S^*_{mi} |m\rangle_M |i\rangle_A$ όπου ο πίνακας S είναι μοναδιαίος
- Έξω από τον ορίζοντα $|\Psi_B\rangle = \langle\Psi_f|\Psi_i\rangle$



- Το οποίο ισοδυναμεί με μοναδιαία χρονική εξέλιξη $|\varphi\rangle_M \rightarrow \sum_i S_{\varphi i} |i\rangle_B$

[1] Horowitz, Maldacena arXiv:hep-th/0310281v2 1 Dec 2003

Η πληροφορία δραπετεύει με κβαντική τηλεμεταφορά



Η Alice και ο Bob κατέχουν δυο μέγιστα κβαντικά διεμπλεγμένα σωματίδια

$$|\phi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|00\rangle_{AB} + |11\rangle_{AB}\right)$$

Η Alice θέλει να στείλει στον Bob το qubit

$$|\psi\rangle_C = \alpha\,|0\rangle_C + \beta\,|1\rangle_C$$

Η κατάσταση του ολικού συστήματος είναι

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2}\,|\phi^+\rangle_{CA}\,|\psi\rangle_B + \frac{1}{2}\,|\psi^+\rangle_{CA}\,\sigma_1\,|\psi\rangle_B + \frac{1}{2}\,|\psi^+\rangle_{CA}\,(-i\sigma_2)\,|\psi\rangle_B + \frac{1}{2}\,|\psi^+\rangle_{CA}\,\sigma_3\,|\psi\rangle_B$$

- Η Alice μετράει το υποσύστημα CA,
- στέλνει τα αποτελέσματα στον Bob (κλασσική επικοινωνία)
- Ο Bob δρα με την ταυτότητα ή κάποιον πίνακα του Pauli αναλόγως με τα αποτελέσματα της Alice

Η πληροφορία δεν ταξίδεψε γρηγορότερα από το φως

Επειδή στην singularity βάζουμε μοναδική τελική συνθήκη, δεν χρειαζόμαστε κλασσική επικοινωνία!

Ανάγκη για απλά μοντέλα

Χωρίς τελική συνθήκη έχουμε το ημικλασσικό αποτέλεσμα

$$\text{καθαρές καταστάσεις} \rightarrow \text{μικτές καταστάσεις}$$

ημικλασσικό : κλασσική βαρύτητα + κβαντική ύλη
Μήπως είναι αναγκαία μια θεωρία κβαντικής βαρύτητας;

Θα ασχοληθούμε με μοντέλα σε 2 διαστάσεις

Η δράση θα είναι της μορφής

$$S = S_{cl} + S_1$$

- S_{cl} : κλασσική βαρύτητα
- S_1 : ακτινοβολία Hawking και backreaction

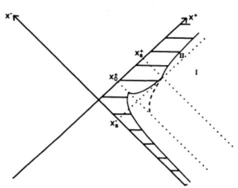
η S είναι ημικλασσική δράση ωστόσο είναι ο κυρίαρχος όρος στο όριο του μεγάλου N, όπου N ο αριθμός των πεδίων

Το μοντέλο RST I [2]

Θεωρούμε τη δράση η οποία έχει αναλυτική λύση

$$S = \frac{1}{\pi}\int dx^+ dx^- \left[\partial_+\Omega\partial_-\Omega - \partial_+\chi\partial_-\chi + \lambda^2 e^{\frac{2}{\sqrt{\kappa}}(\chi-\Omega)}\right]$$

όπου $\Omega = \frac{\sqrt{\kappa}}{2}\phi + \frac{e^{-2\phi}}{\sqrt{\kappa}}$, $\chi = \sqrt{\kappa}\rho - \frac{\sqrt{\kappa}}{2}\phi + \frac{e^{-2\phi}}{\sqrt{\kappa}}$ και $\kappa = \frac{N}{12\pi}$



- Για $x^+ < x_0^+$ έχουμε επίπεδο χώρο
- Στο $x^+ = x_0^+$ δημιουργήται μια ΜΟ
- Για $x^+ > x_E^+$ και $x^- > x_E^-$ έχουμε επίπεδο χώρο
- Στο $\Omega = \Omega_{cr}$ η καμπυλότητα είναι άπειρη, $\Omega < \Omega_{cr}$ το πεδιο ϕ γίνεται μιγαδικό
- Αναγκαζόμαστε να βάλουμε συνοριακές συνθήκες $\partial_\pm\Omega|_{\Omega=\Omega_{cr}} = 0$ και $f_i|_{\Omega=\Omega_{cr}} = 0$

[2] Russo, Susskind, Thorlacius arXiv:hep-th/9206070v1 17 Jun 1992

Το μοντέλο RST II

Ερώτηση: Καταστρέφουν την πληροφορία οι ΜΟ;

Δυστηχώς, δεν μπορούμε να απαντήσουμε καθώς εμφανίζονται άλλα προβλήματα

Η ασύνέχεια των συνοριακών συνθηκών επάνω στα πεδία $f_i \to$ παραγωγή άπειρης ενέργειας στο τέλος της εξατμισης στο $x^- = x_E^-$ Thunderbolt!

Ενδείξεις για Thunderbolt[a]

[a] Strominger arXiv:hep-th/9501071v1 13 Jan 1995

1. $T_{--}(x_E^-) \sim \delta^2(0)$
2. $\lim_{x_2^- \to x_E^- + \epsilon} \lim_{x_1^- \to x_E^- - \epsilon} \langle 0_{in} | \partial_- f(x_2^-) \partial_- f(x_1^-) | 0_{in} \rangle$: πεπερασμένο, αντί για $\frac{1}{\epsilon^2}$ με $\epsilon \to 0$

Πως αποφεύγουμε το Thunderbolt;

A Βάζοντας την τελική συνθήκη στην singlularity;

B Χρησιμοποιώντας διαφορετικές συνοριακές συνθήκες;

Διορθώνεται η συμπεριφορά της συνάρτησης συσχέτισης;

ΤΕΛΟΣ

Ευχαριστώ!