Από τις Σκουληκότρυπες του Σύμπαντος στις Μαύρες Οπές του LHC

Παναγιώτα Καντή

Τομέας Θεωρητικής Φυσικής, Τμήμα Φυσικής,
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Διαλέξεις Υποδοχής Πρωτοετών Φοιτητών
Ιωάννινα, 18 Οκτωβρίου 2013

Δομή της Ομιλίας:

- Γενική Θεωρία της Σχετικότητας:
    - Μερικά Βασικά Στοιχεία
    - Λύσεις Μαύρων Οπών (Black Holes)
    - Λύσεις Σκουληκότρυπων (Wormholes)
- Πέρα από τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας:
    - Λύσεις Σκουληκότρυπων στις Θεωρίες Υπερχορδών
    - Λύσεις Μαύρων Οπών σε Θεωρίες με επιπλέον Χωρικές Διαστάσεις
- Συμπεράσματα

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

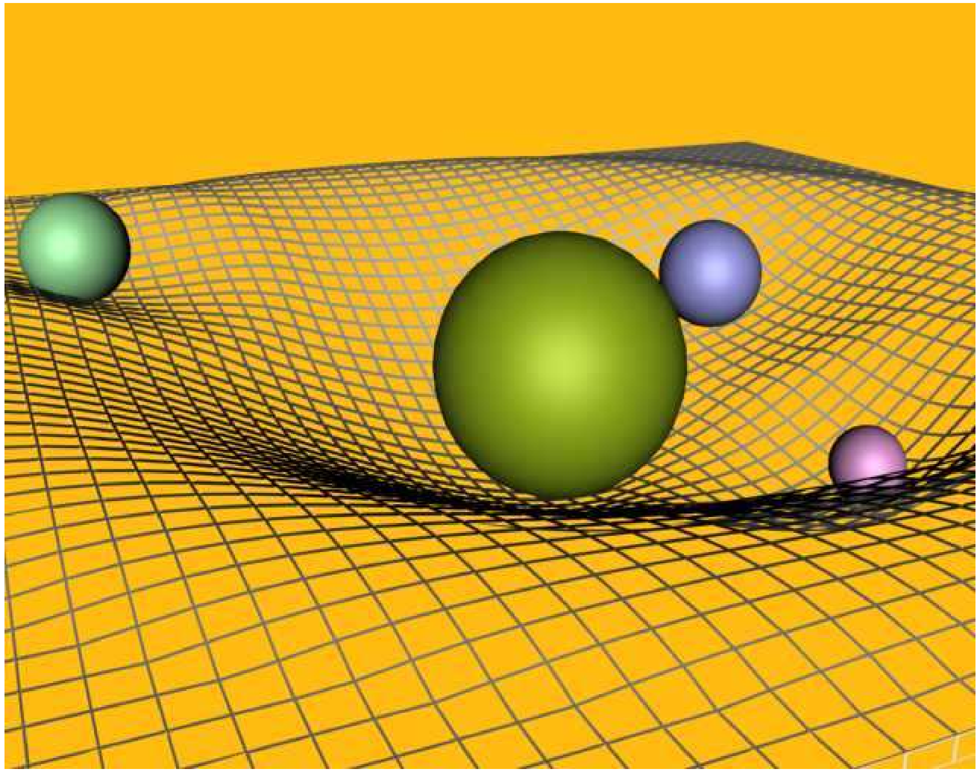
- Διατυπώθηκε από τον Albert Einstein σε τέσσερα επιστημονικά άρθρα (1915)

- Ενσωματώνει τη Βαρυτική Θεωρία του Νεύτωνα. Περιγράφει όμως και περιοχές έντονου βαρυτικού πεδίου – εκεί όπου η θεωρία του Νεύτωνα αποτυγχάνει

- Ενσωματώνει την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας (1905) και την βασική της ιδέα ότι χώρος και χρόνος αποτελούν δύο διάκριτα κομμάτια ενός ενιαίου υποβάθρου, του χωρόχρονου, μέσα στο οποίο λαμβάνουν χώρα όλα τα γεγονότα

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Συνδέει την καμπυλότητα του χωρόχρονου με την ύλη



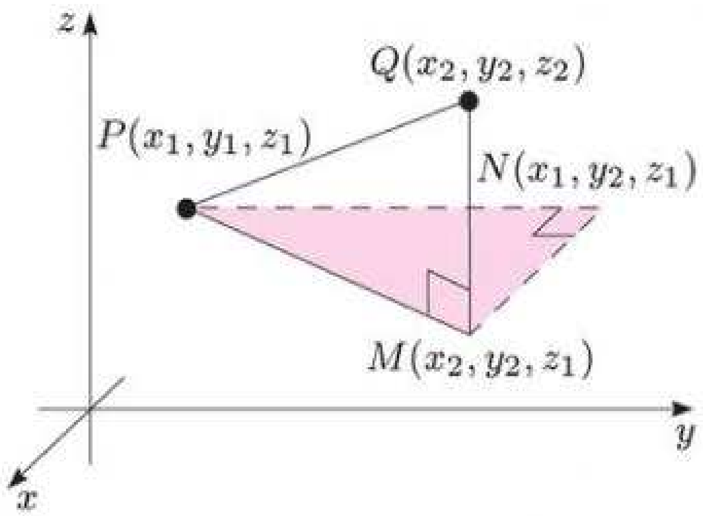
- Η Γ.Θ.Σ. επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τον A. Eddington (1919) μέσω της εκτροπής ακτίνας φωτός από τον ήλιο

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Ευκλείδιος Χώρος: Μια από τις βασικότερες έννοιες είναι αυτή της απόστασης μεταξύ δύο σημείων P και Q στο χώρο:

$$(\Delta s)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$$

Προκύπτει με διπλή εφαρμογή του Πυθαγορείου Θεωρήματος – ισχύει μόνο για επίπεδη γεωμετρία



- Για μικρές (απειροστές) μεταβολές, γράφουμε ισοδύναμα:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

και καλούμε την ποσότητα ds^2 "στοιχείο μήκους" στο χώρο

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Ο Χωρόχρονος της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας :

Οι συντεταγμένες του χρόνου (t) και του χώρου (x, y, z) συνθέτουν μια νέα μαθηματική έννοια, το τετρα-διάνυσμα

$$x^\mu = (t, x, y, z)\,, \qquad \mu = 0, 1, 2, 3$$

- Όπως το διάνυσμα θέσης δηλώνει τη θέση ενός σημείου στον 3-διάστατο Ευκλείδιο χώρο, έτσι και το τετραδιάνυσμα θέσης δηλώνει την 'θέση' ενός γεγονότος στον 4-διάστατο χωρόχρονο Minkowski. Π.χ.
  - δύο ταυτόχρονα γεγονότα: (t, x_1, y_1, z_1) και (t, x_2, y_2, z_2)
  - δύο γεγονότα στο ίδιο σημείο του χώρου: (t_1, x, y, z) και (t_2, x, y, z)

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Η απόσταση μεταξύ δύο γεγονότων στον χωρόχρονο είναι

$$ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2\,,$$

με τη διαφορά προσήμου να διακρίνει την χρονική από τις χωρικές συντεταγμένες

Ο χωρόχρονος Minkowski είναι επίπεδος – οι συντελεστές των απειροστών στοιχείων είναι μονάδες

- Καμπύλος Χωρόχρονος : Εισάγουμε μη τετριμμένες συναρτήσεις μπροστά από τα απειροστά στοιχεία. Π.χ.

$$ds^2 = -A(x^\mu)\,dt^2 + B(x^\mu)\,dx^2 + C(x^\mu)\,dy^2 + D(x^\mu)\,dz^2$$

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Χωρόχρονος Schwarzschild (1916) : Έχει την μορφή:

$$ds^2 = -\left(1-\frac{2M}{r}\right)dt^2 + \left(1-\frac{2M}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2\right)$$

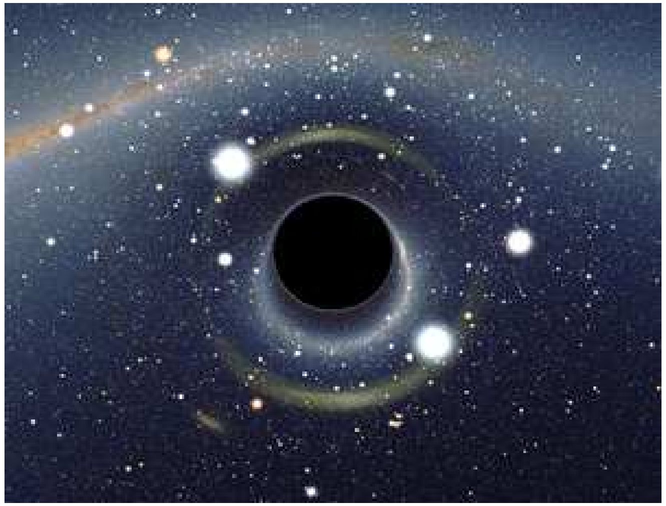
Η μετρική αυτή περιγράφει τον χωρόχρονο:

- γύρω (αλλά έξω) από σφαιρικό σώμα ακτίνας R_0 (όπως η Γη, ο Ήλιος, ένας σφαιρικός Γαλαξίας κτλ)
- γύρω από σώμα που, υπό την ισχύ της βαρυτικής δύναμης, έχει καταρρεύσει από την αρχική του ακτίνα R_0 σε ένα και μοναδικό σημείο, στο $r = 0$. Ένα τέτοιο σώμα ονομάζεται Μαύρη Οπή

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Γιατί καταρρέει ένας αστέρας; Όταν οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σταματήσουν και η μάζα του αστέρα είναι:
  - $M \leq 1.4 M_\odot$, ο αστέρας μετατρέπεται σε λευκό νάνο
  - $1.4 < M \leq 3.2 M_\odot$, μετατρέπεται σε αστέρα νετρονίων,
  - $M > 3.2 M_\odot$, μετατρέπεται σε μαύρη οπή

Χαρακτηρίζεται από τη χωροχρονική ιδιομορφία στο $r = 0$ και τον ορίζοντα γεγονότων στο $r = 2M$ που καλύπτει την ιδιομορφία από κάθε εξωτερικό παρατηρητή



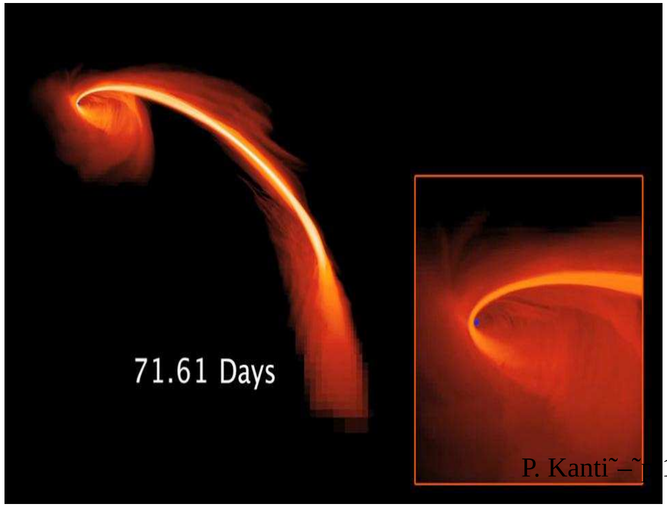
Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Τι γίνεται όμως μέσα από τον ορίζοντα; Όταν $r < 2M$, ισχύει $1 - 2M/r < 0$, οπότε

$$ds^2 = \left|1 - \frac{2M}{r}\right| dt^2 - \left|1 - \frac{2M}{r}\right|^{-1} dr^2 + r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2\right)$$

Οι συντεταγμένες (t, r) αλλάζουν ρόλους - ένα εισερχόμενο σωματίδιο δεν μπορεί να γυρίσει πίσω γιατί ο "χρόνος" r δεν αντιστρέφεται - τίποτα δεν ξεφεύγει από μια μαύρη οπή...

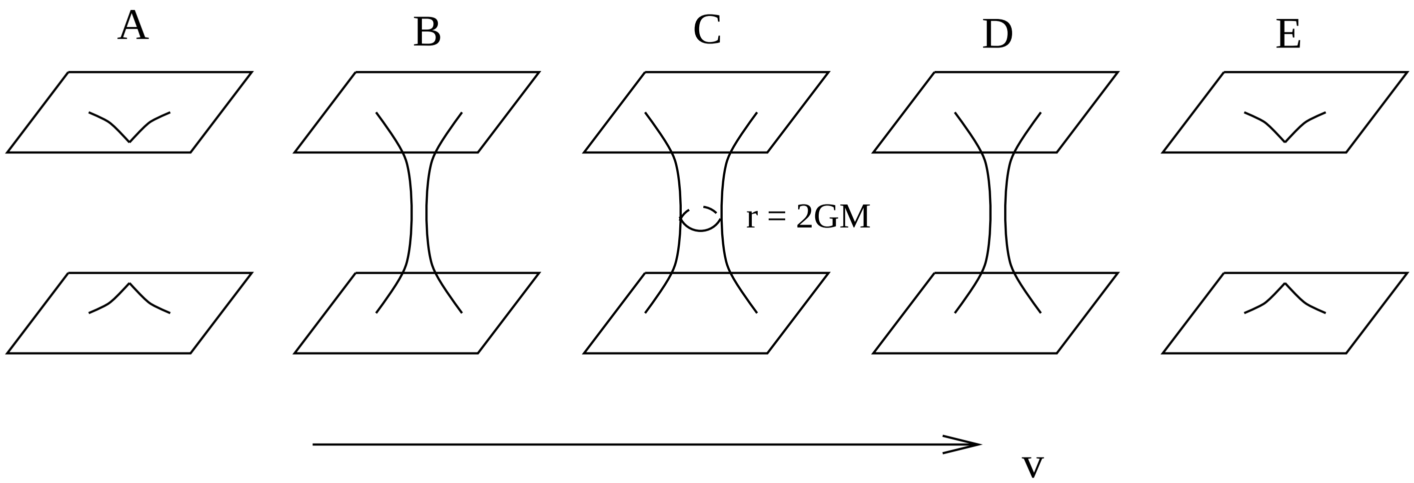
- Υπάρχουν μαύρες οπές; Σήμερα, έχουμε ισχυρές ενδείξεις πως ναι! Έχουμε 'δει' μαύρες οπές στα κέντρα γαλαξιών και αστρικών σμηνών και σε συστήματα αστέρων



Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Όμως, κάθε λύση μαύρης οπής συνοδεύεται από μια λύση λευκής οπής (μια χωροχρονική ανωμαλία με ένα ορίζοντα γεγονότων που επιτρέπει μόνο την έξοδο και όχι την είσοδο!)

Μάλιστα, το σύστημα εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου: στο σύστημα μαύρης-λευκής οπής αναπτύσσεται ένας 'λαιμός', φτάνει στην μέγιστη ακτίνα του $r_{max} = 2M$ και στη συνέχεια συρρικνώνεται και εξαφανίζεται



Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Το πέρασμα αυτό (Flamm, 1916; Weyl, 1920) ονομάστηκε γέφυρα Einstein-Rosen (1935) ή σκουληκότρυπα (Wheeler, 1955)

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια γέφυρα Einstein-Rosen για διαστημικά ταξίδια; Δυστυχώς όχι...

- Ο λαιμός ανοίγει και κλείνει τόσο γρήγορα που ούτε ένα φωτόνιο δεν προλαβαίνει να περάσει
- Ο ορίζοντας της λευκής οπής – το σημείο εξόδου – είναι ασταθής (Eardley, 1974)
- Οι βαρυτικές δυνάμεις στον ορίζοντα είναι τεράστιες

Άρα, η σκουληκότρυπα Schwarzschild, και όλες οι αντίστοιχες λύσεις στα πλαίσια της Γ.Θ.Σ., δεν είναι 'διασχίσιμες'

Πέρα από τη Γ.Θ.Σ.

- Μια Ενδιαφέρουσα Ιστορία: Στη δεκαετία του '80, ο Carl Sagan έγραψε το βιβλίο επιστημονικής φαντασίας *Contact*.

Σε αυτό, η ηρωίδα, μέσω μιας σκουληκότρυπας, μεταφέρεται σε απομακρυσμένο σημείο του σύμπαντος κι επιστρέφει σώα

Μετά από παράκληση του Carl Sagan, ο Kip Thorne ανέλαβε να διερευνήσει εκ νέου την πιθανότητα να συμβεί κάτι τέτοιο

Το *Contact* κυκλοφόρησε το 1985, και η επιστημονική εργασία των Morris-Thorne το 1987 με πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα...

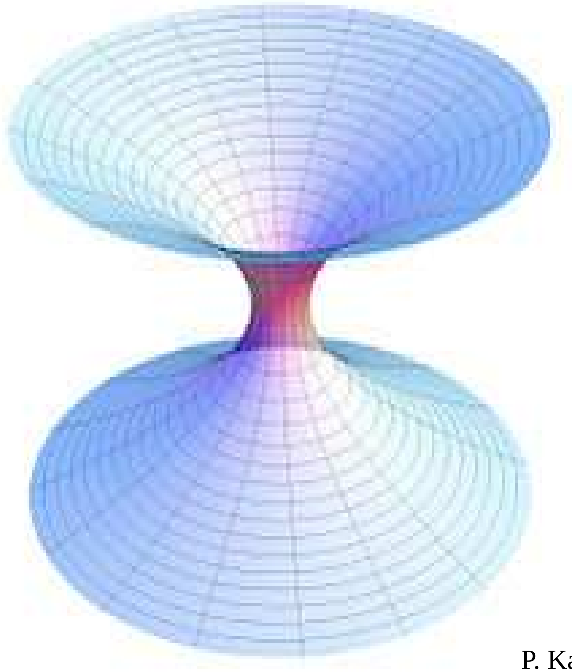
Πέρα από τη Γ.Θ.Σ.

- Το Βασικό Συμπέρασμα: "Μια διασχίσιμη σκουληκότρυπα δεν πρέπει να έχει ούτε ορίζοντα ούτε ιδιομορφία – δηλαδή, να μην σχετίζεται καθόλου με μια μαύρη οπή"

Οι Morris & Thorne απαίτησαν:

– την ύπαρξη δύο απομακρυσμένων περιοχών και του λαιμού
– την απουσία ορίζοντα ή ιδιομορφίας

Όμως ο λαιμός παραμένει ανοιχτός μόνο αν υποθέσουμε ότι γύρω του υπάρχει μια εξωτική κατανομή ύλης (παραβίαση της συνθήκης $p \leq \rho$)



Αδιέξοδο και πάλι...;

Πέρα από τη Γ.Θ.Σ.

- Γενικευμένες Θεωρίες Βαρύτητας: Η θεωρία των υπερχορδών είναι μια γεωμετρική θεωρία σε ανώτερο $(D = 10)$ αριθμό διαστάσεων

Βρέθηκαν λύσεις σκουληκότρυπων που (Kanti, Kleihaus & Kunz, 2011):

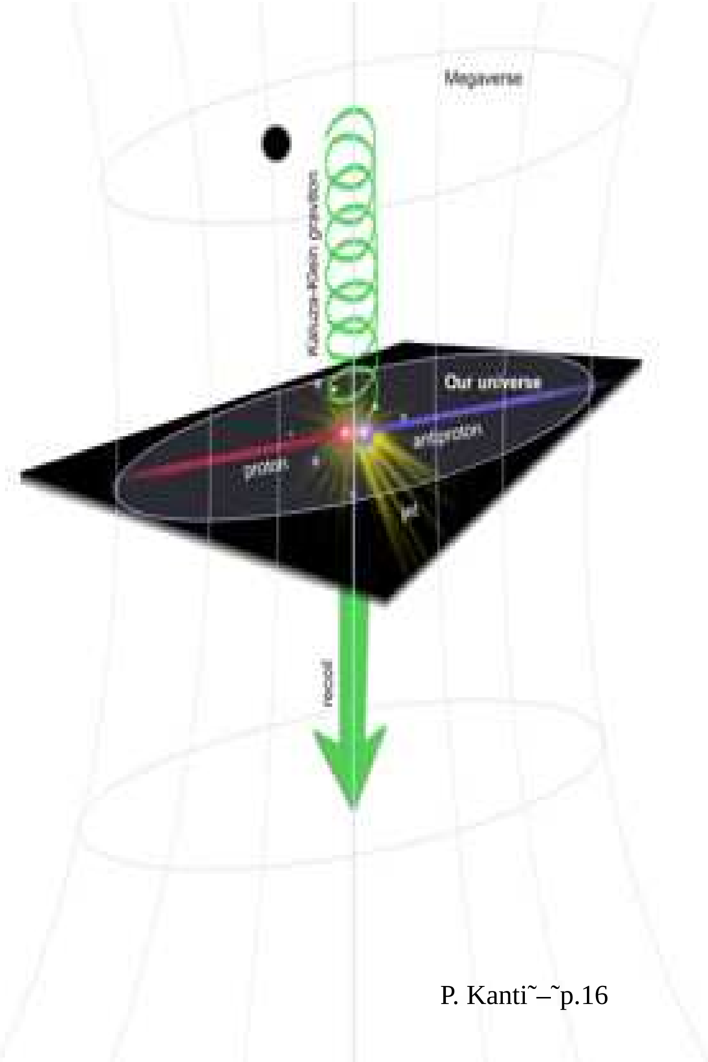
- δεν απαιτούν εξωτική ύλη
- είναι όσο μεγάλες θέλουμε
- είναι διασχίσιμες από σωματίδια
- είναι ευσταθείς σε διαταραχές

Την θέση της εξωτικής ύλης την παίρνουν διάφοροι γεωμετρικοί όροι που είναι συνήθεις στην θεωρία των υπερχορδών

Πέρα από τη Γ.Θ.Σ.

- Η ύπαρξη, εκτός των 3+1 διαστάσεων, και άλλων χωρικών διαστάσεων αλλάζει όλη τη γεωμετρία του χωρόχρονου

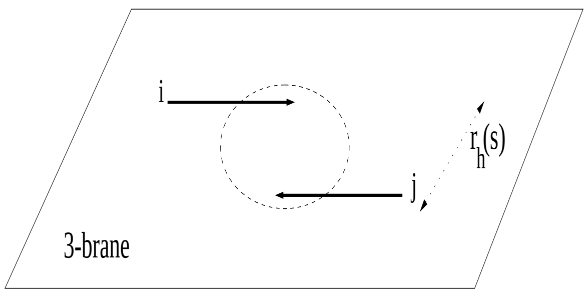
- Βασική Ιδέα : Ζούμε πάνω σε μία (3+1)-διάστατη υπερ-επιφάνεια (brane) η οποία βρίσκεται εμβαπτισμένη σε ένα πολυδιάστατο χώρο που μόνο η βαρύτητα ‘βλέπει’



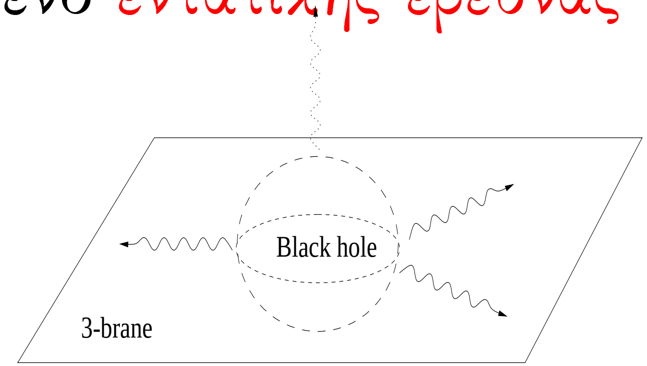
Συνέπειες: Πολλές ... σε Βαρύτητα, Σωματιδιακή & Εφαρμοσμένη Φυσική

Πέρα από τη Γ.Θ.Σ.

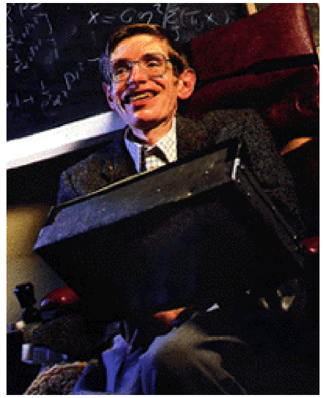
- Οι Μαύρες Οπές; Αν υπάρχουν επιπλέον χωρικές διαστάσεις, αυτές διευκολύνουν τη δημιουργία των μαύρων οπών:
  - Για μια μαύρη οπή με $M \simeq 5000\, m_p$ στις $D = 3+1$, η ακτίνα του ορίζοντα είναι $r_h \simeq 10^{-50}\,\mathrm{m}$
  - Για μια μαύρη οπή με $M \simeq 5000\, m_p$ στις $D > 3+1$, ισχύει ότι $r_h \simeq 10^{-19}\,\mathrm{m}$ - μεγαλύτερη κατά 10^{31}!
- Δημιουργία Μαύρων Οπών σε Επιταχυντή: Προτάθηκε το 1999 και αποτελεί ακόμα αντικείμενο εντατικής έρευνας



$\Rightarrow$

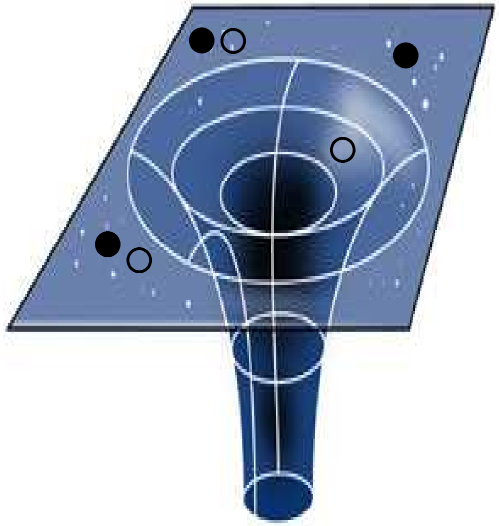


Πέρα από τη Γ.Θ.Σ.



- Ακτινοβολία Hawking: Σύμφωνα με τη κβαντική φυσική, ζεύγη σωματιδίων-αντισωματιδίων δημιουργούνται αυθόρμητα – όταν το αντι-σωματίδιο πέσει μέσα στη μαύρη οπή, το σωματίδιο διαφεύγει και ανιχνεύεται σαν ακτινοβολία Hawking

Μια μαύρη οπή ακτινοβολεί σαν ένα μέλαν σώμα με θερμοκρασία $T = 1/4\pi M$



Αυτό σημαίνει ότι:

- $M = 5M_\odot \;\Rightarrow\; T \simeq 10^{-8}\,\mathrm{C}$ (δύσκολο!)
- $M = 10^{15}\mathrm{gr} \;\Rightarrow\; \nu \simeq 100\,\mathrm{MeV}$ (απίθανο...)
- $M = 5000\mathrm{m_p} \;\Rightarrow\; \nu \simeq 200\,\mathrm{GeV}$ (πιθανό στον LHC;)

Συμπεράσματα

- Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας είναι η πληρέστερη θεωρία Βαρύτητας που διαθέτουμε
- Προβλέπει την ύπαρξη λύσεων Μαύρων Οπών αλλά και Σκουληκότρυπων, που παραμένουν ακόμα ανεξερεύνητες
- Σήμερα διαθέτουμε Γενικευμένες Θεωρίες Βαρύτητας που περιλαμβάνουν και επεκτείνουν την Γ.Θ.Σ.
- Οι περισσότερες προβλέπουν την ύπαρξη επιπλέον χωρικών διαστάσεων στη φύση με σημαντικές συνέπειες στην μορφή και τις ιδιότητες των λύσεων (μαύρες οπές, σκουληκότρυπες, κοσμολογικές λύσεις κτλ) που αυτές προβλέπουν

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Εξισώσεις Πεδίου του Einstein : Καθορίζουν τη μορφή του βαρυτικού πεδίου συναρτήσει της κατανομής ενέργειας και μάζας

$$\boxed{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\, g_{\mu\nu}\, R = 8\pi G\, T_{\mu\nu}}$$

όπου:

- $T_{\mu\nu}$: ο τανυστής ενέργειας-ορμής (τον υποθέτουμε)
- $g_{\mu\nu}$: ο μετρικός τανυστής - συνάρτηση των $A, B, C, D \ldots$
- $R_{\mu\nu}$: ο τανυστής Ricci που εκφράζει καμπυλότητα - ορίζεται από τον $g_{\mu\nu}$ και τις παραγώγους του
- $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$: το βαθμωτό Ricci

Οι εξισώσεις πεδίου του Einstein είναι Διαφορικές Εξισώσεις των άγνωστων συναρτήσεων και των παραγώγων τους

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Εν γένει, οι επιλογές για το $T_{\mu\nu}$, και οι μορφές του $g_{\mu\nu}$, είναι άπειρες – λίγες όμως από αυτές έχουν φυσική σημασία

- Χωρόχρονος Schwarzschild: Έστω ένα σφαιρικό και ακίνητο σώμα μάζας M και ακτίνας R_0 (π.χ. ο Ήλιος). Εάν το κέντρο του είναι στη θέση $r = 0$, αναμένουμε το στοιχείο μήκους στην περιοχή γύρω του να έχει τη μορφή

$$ds^2 = -A(r)\, dt^2 + B(r)\, dr^2 + r^2\, (d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2)$$

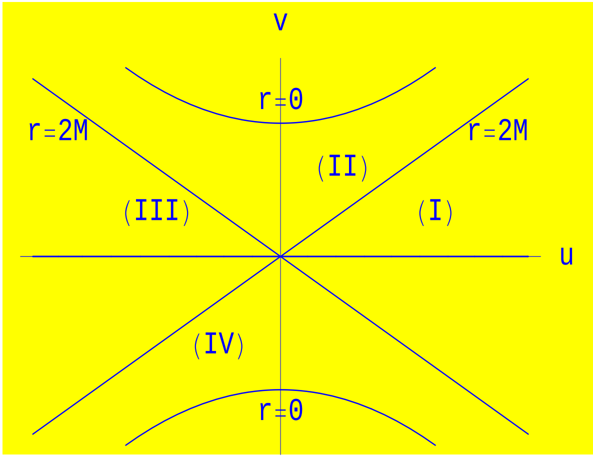
Για $r > R_0$, ο χώρος είναι κενός και επομένως $T_{\mu\nu} = 0$. Οι άγνωστες συναρτήσεις $A(r)$ και $B(r)$ καθορίζονται από τις εξισώσεις πεδίου του Einstein που, μετατρέπονται σε απλές διαφορικές εξισώσεις ως προς r.

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Δεν τελειώσαμε όμως ακόμα....

- Συντεταγμένες Schwarzschild (t, r) : Περιγράφουν μόνο την μισή γεωμετρία: την περιοχή έξω (I) και μέσα (II) από τον ορίζοντα της μαύρης οπής

- Συντεταγμένες Kruskal (v, u) : Ενώ $0 < r < \infty$, τώρα $-\infty < u < \infty$ (μέγιστη επέκταση του χωρόχρονου). Η πλήρης γεωμετρία τώρα περιλαμβάνει:



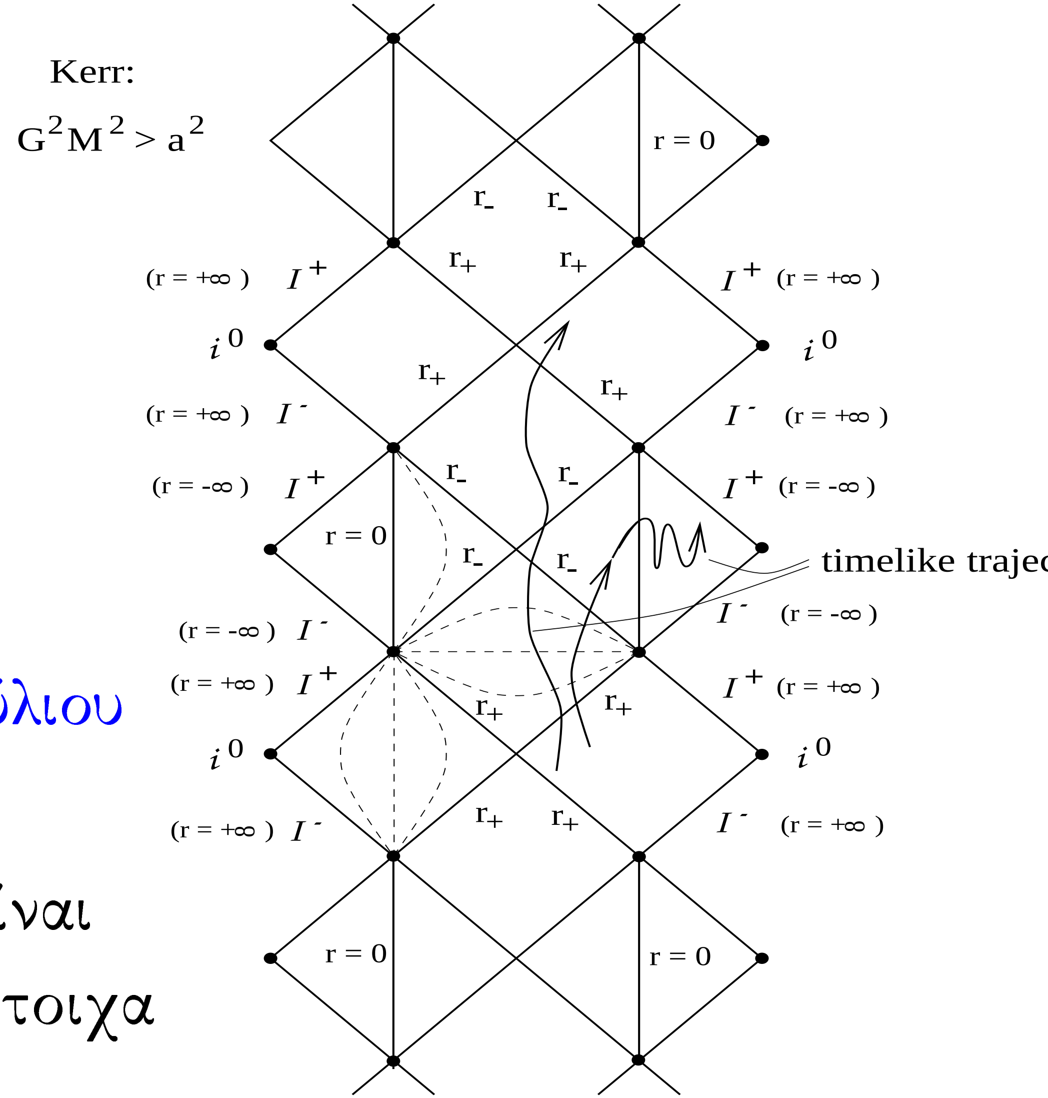
- Την εξωτερική (I) και εσωτερική (II) περιοχή της μαύρης οπής

- Την εξωτερική (III) και εσωτερική (IV) περιοχή της λευκής οπής (επιτρέπει μόνο την έξοδο και όχι την είσοδο)

Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Υπάρχουν όμως δύο άλλα είδη μαύρων οπών, οι φορτισμένες Reissner-Nordstrom και οι περι-στρεφόμενες Kerr-Newman

- Η παρουσία του εσωτερικού ορίζοντα Cauchy επιτρέπει την διάσχιση του 'τούνελ'
- Η ιδιομορφία με σχήμα δακτύλιου επιτρέπει ταξίδια στο χρόνο
- Όμως, ο ορίζοντας Cauchy είναι και αυτός ασταθής και τα αντίστοιχα 'τούνελ' μη διασχίσιμα...



Πέρα από τη Γ.Θ.Σ.

- Σύγχρονη προσέγγιση: Στη θεωρία υπάρχει μόνο φυσικά αποδεκτή ύλη με $p_{\upsilon\lambda} \leq \rho_{\upsilon\lambda}$, όμως ισχύει ότι

$$p_{o\lambda} = p_{\upsilon\lambda} + p_{extra}\,, \qquad \rho_{o\lambda} = \rho_{\upsilon\lambda} + \rho_{extra}$$

με τις "έξτρα" συνεισφορές να οφείλονται σε γεωμετρικούς παράγοντες και να προκαλούν την παραβίαση της $p_{o\lambda} \leq \rho_{o\lambda}$

- Γενικευμένες Θεωρίες Βαρύτητας: Η θεωρία των υπερ-χορδών είναι μια γεωμετρική θεωρία σε ανώτερο αριθμό διαστάσεων

Στις χαμηλές ενέργειες, ανάγεται σε μια βαρυτική θεωρία που περιλαμβάνει την Γ.Θ.Σ. αλλά και μια πληθώρα άλλων πεδίων και ανώτερων βαρυτικών όρων

Πέρα από τη Γ.Θ.Σ.

Στα πλαίσια μιας τέτοιας γενικευμένης θεωρίας που, στις εξισώσεις πεδίου, περιέχει τον γεωμετρικό όρο Gauss-Bonnet

$$R^2_{\mathrm{GB}} = R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma} - 4R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} + R^2\,,$$

βρήκαμε λύσεις σκουληκότρυπων που (Kanti, Kleihaus & Kunz, 2011):

- δεν απαιτούν εξωτική ύλη
- είναι όσο μεγάλες θέλουμε
- είναι διασχίσιμες από σωματίδια
- είναι ευσταθείς σε διαταραχές

Περαιτέρω διάβασμα: New Scientist, τεύχος 10ης Μαρτίου 2012