

ΜΕΛΑΝΕΣ ΟΠΕΣ

Ιωάννης Χρ. Αγαπάκης

13 Μαΐου 2019

Μελανές Οπές | Ιωάννης Χρ. Αγαπάκης

ISBN: 978-618-00-1241-5

Εκτύπωση



Κ. Ν. Επισκόπου 7
54635 Θεσσαλονίκη
Τ. 2310 203566
www.copycity.gr

© 2019 Ιωάννης Χρ. Αγαπάκης

Απαγορεύεται η αναδημοσίευση και γενικά η αναπαραγωγή εν όλω ή εν μέρει ή και περιληπτικά, κατά παράφραση ή διασκευή, του παρόντος βιβλίου με οποιοδήποτε μέσο, σύμφωνα με τους Ν. 2387/1920, 4301/1929, τα ΝΑ 3565/56, 4254/62, 4264/75, Ν. 100/75 και λοιπούς εν γένει κανόνες Διεθνούς Δικαίου, χωρίς προηγούμενη γραπτή άδεια του συγγραφέα.

Στον πατέρα μου

*Ο χωροχρόνος είναι ένα σφιχτόπλεχτο ύφασμα, που
ζαρώνει, υπό την παρουσία μάζας, με απόλυτα
προβλέψιμο τρόπο.*

Περιεχόμενα

Πρόλογος

Πρόλογος του συγγραφέα 1

Εισαγωγή 5

1 Οι Μελανές Οπές ως φυσικό αποτέλεσμα της βαρυτικής κατάρρευσης αστέρων 11

1.1 Η Μελανή Οπή ως μη σχετικιστική έννοια 11

1.2 Αρχές Αστρικής Εξέλιξης 14

2 Μετρικός Τανυστής του Schwarzschild 19

2.1 Γενικά 19

2.2 Καμπύλωση του χωροχρόνου 20

2.3 Όταν $r \rightarrow \infty$ ο μετρικός τανυστής Schwarzschild τείνει στον μετρικό τανυστή Minkowski της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας 24

2.4 Ακτίνα Καμπυλότητας Μελανής Οπής 25

2.5 Μετατόπιση μήκους κύματος των φωτονίων προς το ερυθρό 28

3 Ακτίνα Schwarzschild 31

3.1 Τετραδιάστατος χωροχρόνος 31

3.2	Ακτίνα Βαρύτητας και επιφάνεια Schwarzschild	34
3.3	Οι ιδιότητες της επιφάνειας Schwarzschild από τη μελέτη των μεταβολών του κώνου φωτός	37
4	Η «μεγίστη» γεωμετρία Schwarzschild	45
4.1	Ορισμοί	45
4.2	Ο μετασχηματισμός Kruskal - Szekeres	46
4.3	Κοσμικές σήραγγες (γέφυρα Einstein – Rossen)	50
5	Ειδικά Θεωρήματα, Ορισμοί και είδη Μελανών Οπών	55
6	Ο χωροχρόνος Kerr-Newman	67
6.1	Περιγραφή του χωροχρόνου και της μελανής οπής Kerr-Newman	67
6.2	Αφαίρεση έργου από την Εργοπεριοχή	73
7	Κβαντομηχανική, θερμοδυναμική και Μελανές Οπές	77
7.1	Οι Μελανές Οπές στο πεδίο της κβαντομηχανικής	78
7.2	Εξαέρωση Μελανών Οπών	83
7.3	Κβαντική θερμική ακτινοβολία μελανών οπών και Κοσμολογία	86
7.4	Η θερμοδυναμική των Μελανών Οπών	88
8	Οι Μελανές Οπές ως υπαρκτά αντικείμενα στο Σύμπαν	95
8.1	Παρατηρήσεις Μελανών Οπών	95
8.2	Πέφτοντας σε μια Μελανή Οπή	101
8.3	Ταξίδια στο χρόνο	104
8.4	Ημιστέρες - Κβάζαρς (Quasars)	107

Επίλογος	113
Παραρτήματα	115
Παράρτημα Α	117
Παράρτημα Β	123
Παράρτημα Γ	125
Παράρτημα Δ	131
Παράρτημα Ε	135
Παράρτημα ΣΤ	137
Παράρτημα Ζ	143
Παράρτημα Η	147
Παράρτημα Θ	153
Παράρτημα Ι	157
Βιβλιογραφία	159
Γλωσσάριο	165
Ευρετήριο	181

Κατάλογος Σχημάτων

- 2.1 Οι κυκλικές τροχιές (α) σε επίπεδο και (β) σε καμπύλο χωροχρόνο. Η ύπαρξη μάζας καμπυλώνει τον χωροχρόνο, με αποτέλεσμα κυκλικές τροχιές της ίδιας διαμέτρου να μην αντιστοιχούν στην ίδια ακτινική απόσταση. 22
- 2.2 Αριστερά: Συγκριτικά η καμπύλωση του χώρου (που εδώ παρίστανται διδιάστατος) που επιφέρουν η Γη, ο Ήλιος και ένας Αστέρης Νετρονίων. Δεξιά: Μια καλλιτεχνική αναπαράσταση της στρέβλωσης του χώρου που επιφέρει η Γη. 27
- 3.1 Αριστερά: Κώνος φωτός, μελλοντικός (πάνω) και παρελθοντικός (κάτω). Δεξιά: Ο κώνος φωτός στο γεγονός Σ. Μόνο δύο χωρικές συντεταγμένες χρησιμοποιούνται οι $x^1 = x$ και $x^2 = y$. Το άνοιγμα του κώνου είναι $tg\delta = dx/cdt$ 33
- 3.2 Αριστερά: : Ο προσανατολισμός του κώνου φωτός αλλάζει κατεύθυνση κατά 90° , όταν η φωτεινή ακτίνα διέρχεται το όριο $r = R_s$. Δεξιά: Οι κώνοι φωτός στη γειτονιά μιας Μελανής Οπής. 36

- 3.3 Η μεταβολή του κώνου φωτός σε πεδίο *Schwarzschild*. Έξω από τον ορίζοντα $r = R_s$ ο κώνος φωτός περιλαμβάνει στο εσωτερικό του τη χρονοειδή συντεταγμένη $x^0 = ct$ και το άνοιγμά του ολοένα και μικραίνει, όσο πλησιάζει προς τον ορίζοντα. Μέσα στον ορίζοντα, δηλαδή στην περιοχή $r < R_s$, οι συντεταγμένες x^0 και r εναλλάσσουν τους ρόλους τους, με αποτέλεσμα ο κώνος φωτός να αλλάζει προσανατολισμό κατά 90° , ώστε να περιλαμβάνει πάλι τη χρονοειδή συντεταγμένη, η οποία όμως τώρα έχει αλλάξει και είναι η r . Ο κώνος, όσο πλησιάζει προς την ανωμαλία ($r = 0$) συνεχώς κλείνει. Εκφυλίζεται δε σε μία ευθεία (την γενέτειρα του), όταν φθάσει στην ανωμαλία $r = 0$ 40
- 4.1 Το χωροχρονικό διάγραμμα των συντεταγμένων *Kruskal - Szekeres* στο οποίο φαίνονται μόνο οι συντεταγμένες u, v 48
- 4.2 Ο μέγιστος χωροχρόνος *Schwarzschild* σε συντεταγμένες *Kruskal - Szekeres*. 51
- 4.3 Σχηματική απεικόνιση της γέφυρας *Einstein - Rosen* που ενώνει (α) δύο διαφορετικά παράλληλα σύμπαντα (β) δύο απομακρυσμένα σημεία του ίδιου σύμπαντος της μεγίστης επεκτάσεως της γεωμετρίας *Schwarzschild*. 53
- 5.1 (α) Η περιστρεφόμενη Μελανή Οπή έχει σχηματίσει δύο οριζόντες γεγονότων εσωτερικό και εξωτερικό. (β) Η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται και ο εσωτερικός ορίζοντας τείνει προς τον εξωτερικό. (γ) Η ταχύτητα περιστροφής γίνεται πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα οι δύο οριζόντες να συγχωνευτούν, η ανωμαλία γίνεται γυμνή. 62
- 6.1 Ο ορίζοντας γεγονότων και το στατικό όριο μιας περιστρεφόμενης μελανής οπής. Οι οριζόντες είναι σφαίρες με κέντρο το σημείο $(0,0,0)$, ενώ τα στατικά όρια είναι ελλειψοειδή εκ περιστροφής περι του άξονα z . Στο σχήμα δεξιά οι άξονες είναι βαθμονομημένοι σε συντεταγμένες *Kerr* x, y, z . Επίσης εδώ διακρίνεται η γραμμοσκιασμένη δακτυλοειδής ανωμαλία του χωροχρόνου *Kerr*. 72

6.2	Αφαίρεση ενέργειας από την εργοπεριοχή (εργόσφαιρα) μιας περιστρεφόμενης μελανής οπής Kerr – Newman με τη μέθοδο Penrose	75
7.1	Οι διακυμάνσεις κενού της κβαντικής θεωρίας.	79
7.2	Στην περίπτωση I, στο ζεύγος των δυνάμει φωτονίων δεν επαρκεί ο χρόνος $h/(\Delta E)_{min}$, για να διέλθει τον ορίζοντα και τα φωτόνια επανασυνδέονται. Αντίθετα στην περίπτωση II, το αρνητικής ενέργειας (-E) φωτόνιο πέφτει στη μελανή οπή, πριν παρέλθει ο χρόνος $h/(\Delta E)_{min}$ από την έναρξη της διακύμανσης, ενώ το συζυγές του (+E) εκπέμπεται στο περιβάλλον.	80
8.1	Αριστερά η περιοχή του αστερισμού του Κύκνου, σε σχηματική αναπαράσταση και σε ουρανογραφικό χάρτη, στην οποία βρέθηκε το αντικείμενο X-1, που εκπέμπει έντονη ακτινοβολία X. Δεξιά καλλιτεχνική αναπαράσταση της Μελανής Οπής X-1 του αστερισμού του Κύκνου, στην οποία εικονίζεται η μεταφορά ύλης από τον γαλάζιο γίγαντα συνοδό προς την X-1, καθώς και ο δίσκος προσαύξησης.	96
8.2	Αριστερά η περιοχή του κέντρου του γαλαξία M87 από την οποία το τηλεσκόπιο EHT πήρε την πρώτη φωτογραφία μελανής οπής. Δεξιά η πρώτη φωτογραφία! Το περίγραμμα της M.O γίνεται ορατό λόγω της δέσμης φωτός που συγκεντρώνεται στο στόμιό της. (Πηγή: Event Horizon Telescope)	98
8.3	Στην εικόνα του σχήματος φαίνεται ο χώρος με το τετραγωνισμένο σύστημα, ο χρόνος με τα ρολόγια, του αστροναύτη και του σκάφους, και τέλος το μήκος κύματος των φωτεινών ακτίνων.	101
8.4	Ο χώρος στρεβλώνεται (καμπυλώνεται) κοντά στον ορίζοντα, ο χρόνος τρέχει πιο αργά και το μήκος κύματος των φωτονίων γίνεται μεγαλύτερο (μετατόπιση προς το ερυθρό).	102
8.5	Πάνω στον ορίζοντα το ρολόι του αστροναύτη έχει σταματήσει, ο χώρος έχει υποστεί μεγάλη παραμόρφωση και το μήκος κύματος έχει αυξηθεί κι' άλλο μετατοπίζοντας το φάσμα ακόμη περισσότερο στο ερυθρό.	103

- 8.6 *Μια καλλιτεχνική απεικόνιση του ULAS J1120+0641. Πρόκειται για το πιο μακρινό, μάζας $2.000.000.000M_{\odot}$, κβάζαρ που έχει παρατηρηθεί σε απόσταση 28,85 δισεκατομμυρίων ετών φωτός (Comoving distance, δηλαδή απόσταση που δεν λαμβάνει υπόψη τη διαστολή του Σύμπαντος) από τη Γη. (Πηγή: ESO/M.Kornmesser) 108*

Πρόλογος

Για πολλούς ανθρώπους η μοναδική εμπειρία που έχουν στην Αστρονομία είναι τα όσα βλέπουν με γυμνό μάτι ή με τη βοήθεια ερασιτεχνικών τηλεσκοπίων. Υπάρχει όμως και μια μεγάλη ομορφιά στο χώρο της επιστήμης της Αστρονομίας που αναδύεται μέσα από την επιστήμη της Φυσικής με τη βοήθεια των Μαθηματικών.

Η Αστρονομία είναι γενικά μια επιστήμη πάρα πολύ ιδιαίτερη και σε πολύ μεγάλο βαθμό δημοφιλής.

Η συγγραφή μάλιστα ενός βιβλίου για τις μελανές οπές είναι ένα ταξίδι απέραντο μέσα στο χώρο και στο χρόνο και για το λόγο αυτό είναι πολύ δύσκολο να γραφεί ένα τέτοιο βιβλίο.

Ο συγγραφέας του βιβλίου αυτού δίνει μεγάλη βαρύτητα στο να συνειδητοποιήσει ο αναγνώστης ότι, η εξαιρετική ομορφιά των ιδιοτήτων των μελανών οπών απορρέει από την εφαρμογή σχετικά λίγων θεμελιωδών αρχών της Φυσικής, συνδυασμένων όμως με τη χρήση αρκετών μαθηματικών σχέσεων, την ικανότητα της χρήσης των οποίων πρέπει να διαθέτει.

Η αναλυτική μαθηματική επεξεργασία των αποδείξεων κάνει το βιβλίο αυτό ξεχωριστό από άλλα παρόμοιά του. Επιπλέον, ξεχωριστή είναι και η προσπάθεια του συγγραφέα να δανείσει στον αναγνώστη τη δική του ματιά και τη δική του αγάπη προς την Αστρονομία και αυτό είναι που κάνει το βιβλίο ιδιαίτερα φιλικό.

Υπάρχουν πολλά επίπεδα γνώσης από την απλή απομνημόνευση έως τη δυνατότητα χρήσης των εννοιών και από τη δυνατότητα συμμετοχής σε επιστημονική συζήτηση έως τη συνεισφορά σε ερευνητική προσπάθεια.

Τελικά, η ανάγνωση ενός καλογραμμένου βιβλίου που διαπραγματεύεται ένα δύσκολο θέμα, όπως είναι οι μελανές οπές, προσφέρει στον αναγνώστη, εκτός από την ευχαρίστηση και τις σχετικές γνώσεις, και την ικανοποίηση ότι συμμετέχει στην ασταμάτητη προσπάθεια του ανθρώπου να μάθει και τα αόρατα μυστικά του Σύμπαντος.

Σταύρος Αυγολούπης
Καθηγητής Αστρονομίας
του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Πρόλογος του συγγραφέα

Το περιεχόμενο αυτού του βιβλίου αποτελεί μια εκτεταμένη μαθηματική ανάλυση της έννοιας των Μελανών Οπών και της καμπυλότητας του χωροχρόνου στο πλαίσιο της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας (ΓΘΣ).

Οι μελανές σπές αποτελούν μία τόσο νέα ερευνητική κατεύθυνση, ώστε προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι είχαν προβλεφθεί πριν από 230 χρόνια. Στα 1784 ένας Άγγλος ιερέας, ο **John Mitchell**, προβληματιζόταν κατά πόσο η βαρύτητα μπορούσε να επιδράσει στο φως και διατύπωσε την άποψή του, ότι κάποια αστέρια είναι τόσο μεγάλα, ώστε ούτε το φως μπορεί να ξεφύγει από τη βαρύτητά τους.

Σήμερα, όταν ακούμε την λέξη Μελανή Οπή, αμέσως ο νους μας πάει στη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, αφού με τη διατύπωσή της από τον **Albert Einstein** το Νοέμβριο του 1915 στοιχειοθετήθηκαν ταυτόχρονα τόσο η έννοια της καμπυλότητας του χωροχρόνου όσο και αυτή των Μελανών Οπών.

Η κατανόηση αυτών των εννοιών, είναι γεγονός, ότι απαιτεί γνώση Μαθηματικών σε ανώτερο επίπεδο και ειδικότερα γνώσεις διαφορικής γεωμετρίας, διανυσματικής ανάλυσης, και διαφορικών εξισώσεων. Η πραγματικότητα αυτή δημιούργησε την εντύπωση ότι η μελέτη της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας και κατ' επέκτασιν και των μελανών οπών είναι κάτι δύσκολο ακόμη και για φοιτητές της Σχολής Θετικών Επιστημών. Η αλήθεια είναι ότι κάποιος με αγάπη για τα μαθηματικά και διαθέτοντας θέληση και υπομονή, μπορεί να φθάσει στην κατανόηση του όμορφου αυτού τμήματος της Αστροφυσικής και της Κοσμολογίας. Ξεπερνώντας τα εμπόδια αυτά, ο δρόμος που ανοίγεται μπροστά του ο-

δηγεί όχι μόνον στην κατανόηση του φαινομένου των μελανών οπών, αλλά και στον χώρο της φιλοσοφίας μέσα στο πλαίσιο της δημιουργίας, της γέννησης και του θανάτου του ίδιου του Σύμπαντος. Ο δρόμος της γνώσεως όμως, όπως και εκείνος της αρετής, είναι δυσκολοδιάβατος και απαιτεί θυσίες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για να αποκτήσει κανείς την γνώση των δύσκολων προαναφερθεισών εννοιών, πρέπει αναγκαστικά να ξεπεράσει τις δυσκολίες των μαθηματικών.

Το βιβλίο αυτό αποσκοπεί στο να κάνει, όσο το δυνατόν πιο εύκολη τη διαδρομή αυτή, χωρίς όμως να αφαιρεθούν «δομικά στοιχεία» απαραίτητα για τη διατήρηση της πληρότητας και του υψηλού επιπέδου της γνώσεως. Αυτό επιτυγχάνεται, αφ' ενός με τη δυνατότητα αναλυτικής επεξήγησης δύσκολων εννοιών σε υποσημειώσεις (που σε μερικές περιπτώσεις μάλιστα είναι αρκετά εκτενείς) καθώς και με την παράθεση των αποδείξεων των πιο δύσκολων προτάσεων που εμφανίζονται στο κύριο μέρος του, σε οκτώ ξεχωριστά παραρτήματα στο τέλος.

Το περιεχόμενο του βιβλίου αποτελείται από οχτώ κεφάλαια, στα οποία έγινε προσπάθεια οι μαθηματικές αποδείξεις να είναι πλήρεις, ώστε ο αναγνώστης να μην συναντά κενά, τα οποία θα τον δυσκολεύουν στην κατανόηση, διακόπτοντάς του τη συνέχεια της σκέψης.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελανή οπή ως μη σχετικιστική έννοια, αλλά παρουσιάζονται και συνοπτικά στοιχεία αρχών αστρικής εξέλιξης, η οποία οδηγεί τους μεγάλης μάζας αστέρες στη δημιουργία μελανών οπών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εισάγεται η έννοια της καμπύλωσης, που επιφέρει στον χωροχρόνο η ύπαρξη μάζας, στο πλαίσιο της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, καθώς και η έννοια της ακτίνας καμπυλότητας. Η εισαγωγή των νέων αυτών εννοιών έφερε στο προσκήνιο τη νέα αντίληψη για την έλξη των σωμάτων, όχι πια ως αποτέλεσμα της εφαρμογής δυνάμεων, αλλά ως αποτέλεσμα της καμπύλωσης του χωροχρόνου από τη μάζα.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίδεται η μαθηματική περιγραφή της γεωμετρίας Schwarzschild, από την οποία προκύπτουν οι «παράξενες» ιδιότητες της ομώνυμης επιφάνειας, που αλλοίως ονομάζεται και «ορίζοντας γεγονότων». Ενδεικτικά αναφέρονται η παγίδευση των φωτεινών ακτίνων,

αλλά και κάθε άλλης πληροφορίας, στον ορίζοντα γεγονότων και το πάγωμα του χρόνου. Επίσης στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εμπειριστατωμένη μελέτη της μελανής οπής Schwarzschild με τη βοήθεια του «κώνου φωτός».

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η μελέτη της μελανής οπής μέσα από έναν μετασχηματισμό συντεταγμένων (συντεταγμένες Kruskal-Szekeres), η οποία οδηγεί στην κατανόηση του θεωρητικού φαινομένου των κοσμικών σπράγγων (γέφυρα Einstein-Rosen ή σκουληκότρυπα).

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται ορισμοί και θεωρήματα, χρήσιμα για τη συνέχεια της μελέτης άλλων ειδών μελανών οπών, όπως αυτά προκύπτουν ως λύσεις των εξισώσεων πεδίου της ΓΘΣ. Εδώ επίσης περιγράφονται συνοπτικά τα 4 αυτά είδη Μελανών Οπών.

Στο έκτο κεφάλαιο δίδεται η πλήρης μαθηματική περιγραφή της λύσεως Kerr-Newman, που οδηγεί στην ομώνυμη περιστρεφόμενη μελανή οπή και στην διαφοροποίησή της από τη μελανή οπή Schwarzschild.

Στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζονται οι μελανές οπές στο πλαίσιο των νέων επιστημονικών πεδίων της κβαντικής φυσικής και της θερμοδυναμικής και τα αποτελέσματα οδηγούν σε γενικεύσεις των κλασικών αξιωμάτων της θερμοδυναμικής, γεγονός που δίνει ελπίδες για μία μεγάλη ενοποίηση των επιστημονικών πεδίων της ΓΘΣ, της κβαντομηχανικής και της θερμοδυναμικής σε μία «Θεωρία των Πάντων».

Στο όγδοο κεφάλαιο δίδεται μία περιγραφική σύνοψη της έννοιας των μελανών οπών, ως αποτέλεσμα των όσων με μαθηματικό τρόπο παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Τέλος, ξεχωριστά παρατίθενται, σε 10 παραρτήματα, οι αποδείξεις των πιο δύσκολων προτάσεων που εμφανίζονται στα διάφορα κεφάλαια του βιβλίου.

Ευχαριστίες

Κλείνοντας θα ήθελα να αναφερθώ στην πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε στη φιλολογική επιμέλεια του βιβλίου η καθηγήτρια από τα σχολικά μου χρόνια κ. Ελένη Νταγλή, της οποίας οι συμβουλές ήταν ιδιαίτερες διαφωτιστικές.

Ιδιαίτερη μνεία στις ευχαριστίες μου θα ήθελα να κάνω στον αγαπητό καθηγητή κ. Νικόλαο Σπύρου, του οποίου το βιβλίο με τίτλο:

«Εισαγωγή στη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας», αποτέλεσε τον οδηγό στην δημιουργία του βιβλίου μου. Η μεγαλύτερη όμως συνεισφορά του κ. Σπύρου στη συγγραφή αυτού του πονήματος συνίσταται στις ώρες συζητήσεων μας, τηλεφωνικώς και κατ' ιδίαν, πάνω σε θέματα που με προβλημάτιζαν κατά τη διάρκεια της συγγραφής. Τέλος ο κ. Σπύρου ήταν αυτός που αφιερώνοντας αρκετό από τον πολύτιμο χρόνο του, διάβασε το πρώτο *draft* και προέβη στις πολύτιμες διορθώσεις του. Ένα απλό ευχαριστώ στο πρόσωπό του θα ήταν λίγο!

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αγαπητό μου καθηγητή και φίλο κ. Σταύρο Αυγολούπη για την πολύτιμη βοήθεια, τις χρήσιμες συμβουλές αλλά και για τα καλά του λόγια στην προλόγισή του βιβλίου.

Ιωάννης Χρ. Αγαπάκης

Εισαγωγή

Στα 1915 ο Albert Einstein παρουσίασε μία επαναστατική ιδέα για την βαρύτητα και την φύση του χώρου και του χρόνου, μια ιδέα που θα άλλαζε για πάντα την ιστορία της φυσικής και τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε το Σύμπαν.

Σύμφωνα με τη θεωρία της Σχετικότητας, οι τρεις διαστάσεις του χώρου και εκείνη του χρόνου αποτελούν μία ενιαία οντότητα που ονομάζεται **χωροχρόνος**

Μπορούμε να φανταστούμε τον χωροχρόνο σαν ένα ενιαίο ύφασμα, το οποίο καμπυλώνεται στα σημεία όπου υπάρχουν μάζες. Όσο πιο μεγάλη είναι η μάζα σε κάποιο σημείο του χωροχρόνου τόσο πιο μεγάλη είναι η καμπύλωση (τόσο περισσότερο καμπυλώνεται το ύφασμα) στην περιοχή αυτή.

Αυτό το μοντέλο του κόσμου αλλάζει κατά πολύ κάποια πράγματα.

Το πρώτο είναι ότι δίνει μία τελείως διαφορετική ερμηνεία στην έννοια της βαρύτητας από εκείνη που έδινε ο Νεύτωνας. Στη Νευτώνεια φυσική, η βαρύτητα είναι μία ελκτική δύναμη που ασκείται ακαριαία μεταξύ των μαζών. Σύμφωνα με τη νέα θεωρία, η βαρυτική δύναμη την οποία βιώνουμε στην καθημερινότητά μας είναι το αποτέλεσμα μιας καμπύλωσης του χωροχρόνου, η οποία προκαλείται από την ύπαρξη μάζας. Άρα τα σώματα δεν έλκονται μεταξύ τους, λόγω κάποιας βαρυτικής δύναμης, αλλά αναγκάζονται να ακολουθήσουν την καμπύλωση του χωροχρόνου, κινούμενα στις συντομότερες δυνατές τροχιές. Αυτό εμείς το αντιλαμβανόμαστε ως επιτάχυνση. (ο Νεύτωνας είχε συνδέσει την επιτάχυνση με την βαρυτική δύναμη στον δεύτερό του νόμο με τη σχέση: $\Sigma F = m\gamma$).

Το δεύτερο πράγμα που αλλάζει είναι η έννοια του χρόνου. Στη νευτώνεια φυσική ο χρόνος ήταν μία απόλυτη έννοια. Αν όλοι οι παρατηρητές συγχρόνιζαν τα ρολόγια τους θα μετρούσαν ακριβώς τα ίδια χρονικά διαστήματα ανάμεσα σε δύο γεγονότα. Αν όμως ο χωροχρόνος είναι ενιαία οντότητα, τότε η καμπύλωσή του θα πρέπει να αλλάζει κάτι και στη διάσταση του χρόνου (πράγματι όπως θα δούμε στο δεύτερο κεφάλαιο - παρ. 2.5 - ο χρόνος κοντά σε μία μεγάλη μάζα κυλά πιο αργά απ' ότι μακριά απ' αυτήν).

Αυτές οι απόψεις του Einstein για τη φύση του χωροχρόνου οδήγησαν σε μία πολύ παράξενη και εντυπωσιακή ιδέα.

Φανταστείτε ένα σώμα με πολύ μεγάλη μάζα, συγκεντρωμένη σε έναν πολύ μικρό χώρο. Ένα τέτοιο σώμα θα μπορούσε να καμπυλώσει τον χωροχρόνο γύρω του σε τέτοιο βαθμό που η καμπύλωσή του θα δημιουργούσε έναν «κλειστό δρόμο». Στο παράδειγμα με το τεντωμένο ύφασμα που καμπυλώνεται, η μάζα που έχουμε τοποθετήσει στο ύφασμα το αναγκάζει να «διπλώσει». Μπορεί όμως να υπάρξει κάτι τέτοιο στη φύση;

Από την θεωρία της Αστρικής Εξέλιξης¹ ένα τέτοιο αντικείμενο μπορεί να σχηματιστεί στο τέλος της ζωής ενός γιγαντιαίου αστέρα. Ο πυρήνας του αστέρα αυτού καταρρέει κάτω από την βαρύτητα και συμπιέζεται σε ένα σημείο άπειρης πυκνότητας το οποίο ονομάζεται «**Μοναδικότητα**». Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, ο χωροχρόνος γύρω από αυτό το σημείο να καμπυλωθεί τόσο έντονα που πρακτικά να αποκοπεί από το υπόλοιπο Σύμπαν.

Το αντικείμενο που έχει δημιουργηθεί ονομάζεται «**Μελανή Οπή**».^{[1],[28]}

Οι Μελανές Οπές είναι η τρίτη μορφή Συμπαγών Αστέρων¹, ή με άλλα λόγια η τρίτη από τις τελικές καταστάσεις στις οποίες είναι δυνατόν να περιέλθει ένας αστέρας, αφού εξαντλήσει τα «καύσιμά» του, καταστραφεί η υδροστατική του ισορροπία και υποκύψει τελικά στη δύναμη της βαρύτητας.^{[1],[32]}

¹Η θεωρία της Αστρικής Εξέλιξης προβλέπει την δημιουργία, στο τέλος της ζωής ενός αστέρα, τριών τελικών καταστάσεων δηλαδή τριών μορφών Συμπαγών Αστέρων (compact stars), τους Λευκούς Νάνους, τους Αστέρες Νετρονίων και τις Μελανές Οπές.

Συγκεκριμένα, αν η μάζα του αρχικού αστέρα είναι 10 φορές μεγαλύτερη αυτής του δικού μας Ήλιου ($M_{BH} > 10M_{\odot}$), ο αστέρας αυτός θα εξαντλήσει τα καύσιμά του με εκπληκτικά ταχύ ρυθμό, μόλις σε μερικά εκατομμύρια έτη, (ενώ ο αντίστοιχος χρόνος για αστέρες της τάξης του Ήλιου, είναι περίπου 10 δισεκατομμύρια έτη^{[18],[28]}). Η βαρύτητα των υπερκείμενων στρωμάτων θα δημιουργήσει βαρυτική πίεση τόσο υψηλή, ώστε καμιά μορφή πίεση (είτε υδροστατικής είτε κβαντομηχανικής προελεύσεως) δεν είναι ικανή να την αντισταθμίσει.

Η ύλη καταρρέει μέσα στην ίδια την ύλη δημιουργώντας έτσι ένα αντικείμενο εξαιρετικά μεγάλης πυκνότητας! Οι διαστάσεις του αντικειμένου, που θα δημιουργηθεί, είναι μηδενικές, ενώ η πυκνότητά του άπειρη. Το βαρυτικό του πεδίο είναι τόσο ισχυρό, ώστε από κάποια απόσταση² και μετά τίποτε, ούτε ακόμη και το ίδιο το φως, δεν μπορεί να διαφύγει. Μιλάμε λοιπόν για τον τελικό θρίαμβο της βαρύτητας!³ Όπως είναι γνωστό από την Αστροφυσική, στις προαναφερθείσες δύο περιπτώσεις αστέρων που φθάνουν στο τέλος της ζωής τους εξαντλώνοντας τα καύσιμά τους, τόσο οι Λευκοί Νάνοι όσο και οι Αστέρες Νετρονίων έχουν μία μέγιστη επιτρεπτή μάζα. Όταν ένας λευκός νάνος υπερβεί το όριο *Chandrasekhar*⁴ (την μέγιστη γι' αυτόν επιτρεπτή μάζα), τότε η πίεση των εκφυλισμένων ηλεκτρονίων δεν είναι αρκετή πια, ώστε να ισορροπήσει τη βαρύτητα. Το αποτέλεσμα είναι να καταρρεύσει σε έναν Αστέρα Νετρονίων, που η ισορροπία του οφείλεται στην πίεση των εκφυλισμένων νετρονίων, η κβαντομηχανική προελεύσεως πίεση των οποίων αναχαιτίζει τη βαρυτική πίεση.^{[1],[32]}

Τι όμως θα συμβεί, εάν ένας αστέρας νετρονίων υπερβεί την αντίστοιχη μέγιστη επιτρεπόμενη μάζα του; (όριο *Oppenheimer-Volkoff-Snyder*) Σ' αυτή την περίπτωση, σύμφωνα με τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, τίποτε δεν μπορεί να σταματήσει την κατάρρευση.

²Η απόσταση αυτή ονομάζεται «ακτίνα βαρύτητας» ή «ακτίνα **Schwarzschild**» και θα την αναλύσουμε παρακάτω.

³Στο κεφάλαιο 1 θα αναφερθούμε λεπτομερώς στην αστρική εξέλιξη και στις Μελανές Οπές ως φυσικό αποτέλεσμα της βαρυτικής κατάρρευσης αστέρων.

⁴Το όριο «**Chandrasekhar**» για τους λευκούς νάνους ισούται με $1,4M_{\odot}$ ενώ το αντίστοιχο για τους αστέρες νετρονίων όριο «**Oppenheimer – Volkoff – Snyder**» βρίσκεται στο διάστημα $0,7M_{\odot} < M_{OVS} < 3,2M_{\odot}$

Καθώς ο αστέρας καταρρέει, το βαρυτικό του πεδίο ολοένα αυξάνεται, με αποτέλεσμα κάποια στιγμή ούτε το φως δεν μπορεί να δραπετεύσει από την επιφάνειά του. (Μελανή Οπή)

Οι Μελανές Οπές (Μαύρες Τρύπες) πήραν αυτό το όνομα αυτό καθόσον, αφού δεν αφήνουν το φως να ξεφύγει, είναι σκοτεινές δηλαδή **μελανές (μαύρες)** και επειδή, αν οποιοδήποτε αντικείμενο την πλησιάσει εγγύτερα από την ακτίνα **Schwarzschild**, είναι καταδικασμένο να καταλήξει στο κέντρο τους, χωρίς να μπορεί ξανά να βγει απ' αυτές, δηλαδή **οπές (τρύπες)**.

Η ιδέα των Μελανών Οπών αρχικά αναπτύχθηκε στο γόνιμο μυαλό του αιδεσιμότατου **John Mitchell** (εφημέριου του **Thornhill** στο **Yorkshire** της Αγγλίας και μέλους της Βασιλικής Εταιρίας).^[47] Βασίσθηκε στις ιδέες του **Ισαάκ Νεύτωνα**, ο οποίος σ' ένα άρθρο του στα 1783 υποστήριξε πως, εάν ένας αστέρας είναι ικανά συμπαγής, τότε η ταχύτητα διαφυγής από την επιφάνειά του είναι δυνατόν να ξεπερνά την ταχύτητα του φωτός. Στην περίπτωση αυτή, έγραφε, ο αστέρας θα πρέπει να παραμένει σκοτεινός, αφού ούτε το φως θα μπορούσε να δραπετεύσει από την επιφάνειά του. Η ανάλυσή του μάλιστα, βασισμένη στους νόμους του Νεύτωνα για τη βαρύτητα, κατέληγε στο ότι η ακτίνα ενός τέτοιου αστέρα θα έπρεπε να ήταν:

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

που, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, συμπίπτει με την τιμή για την ακτίνα **Schwarzschild**, που προκύπτει από τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας (ΓΣΘ).^{[44],[46]}

Μπορεί σήμερα να γνωρίζουμε ότι η παραπάνω τιμή δεν μπορεί να προκύψει από τη Νευτώνεια Θεωρία, διότι, αφού στη σχέση υπάρχει η σχετικιστική τιμή c για την ταχύτητα του φωτός, οι μελανές οπές θα πρέπει να μελετηθούν αυστηρά στο πλαίσιο της ΓΘΣ. Παρόλα ταύτα η ακρίβεια με την οποία ο **Mitchell** είχε προσεγγίσει την τιμή της ακτίνας είναι εκπληκτική!⁵

⁵Τα ιστορικά στοιχεία για την πρώτη σύλληψη της ιδέας για τις μελανές οπές από τον **Mitchell** αναφέρονται στα πρακτικά του 5ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ε-

Τις ιδέες του ακολούθησε ο P.S. Laplace (1749-1827) στη Γαλλία, αλλά τις εγκατέλειψε, όταν ο Thomas Young (1773-1829) έδειξε με το πείραμα των δύο σχισμών στα 1801, ότι το φως αποτελείται από κύματα (πρέπει να τονισθεί ότι η εργασία του Mitchell βασιζόταν στη σωματιδιακή θεωρία του Νεύτωνα για το φως, οπότε η απόδειξη της κυματικής φύσης του αποθάρρυνε τον Laplace).^{[44],[46]} Έναν αιώνα αργότερα, στα 1915, ο Karl Schwarzschild (1873-1916) παρουσίασε μία λύση των εξισώσεων πεδίου της ΓΘΣ (δύο μόλις μήνες μετά την παρουσίασή της από τον Einstein) η οποία περιέγραφε μια Μελανή Οπή, όπως αυτή προέκυπτε από τις εξισώσεις πεδίου για μια στατική σφαιρικά συμμετρική μάζα M .

Χωρίς αμφιβολία οι μελανές οπές αποτελούν τα πιο μυστηριώδη και γοητευτικά αντικείμενα στη σύγχρονη Αστροφυσική. Η μελέτη τους όμως είναι αρκετά δύσκολη, αφού απαιτεί την κατανόηση της ΓΘΣ. Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια για μια όσο το δυνατόν απλουστευμένη θεώρηση της έννοιας της μελανής οπής μέσα όμως στο πλαίσιο της ΓΘΣ.

ρασιτεχνικής Αστρονομίας που διεξήχθη τον Οκτώβριο 2007 στο συνεδριακό και πολιτιστικό κέντρο του Πανεπιστημίου Πατρών.

