

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
Α.Ε.Ν. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΛΑΜΠΟΥΡΑ ΣΤΕΦΑΝΙΑ**

**ΘΕΜΑ**

**“ΜΑΥΡΕΣ ΤΡΥΠΕΣ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΒΑΡΥΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ, Η  
ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΩΝ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ  
ΤΟΥΣ.ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΟΥ EINSTEIN”**

**ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ: ΓΚΟΓΚΑ ΑΝΤΡΙΑΝ  
Α.Γ.Μ: 3965**

**Ημερομηνία ανάληψης της εργασίας: 16/05/2019  
Ημερομηνία παράδοσης της εργασίας: 09/07/2020**

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΘΗΓΗΤΩΝ**

<i>A/A</i>	<i>Όνοματεπώνυμο</i>	<i>Ειδικότητα</i>	<i>Αξιολόγηση</i>	<i>Υπογραφή</i>
<i>1</i>				
<i>2</i>				
<i>3</i>				
<b>ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ</b>				

**Ο ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ :**

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>4</b>
<b>2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>5</b>
<b>3. ΧΩΡΟΧΡΟΝΟΣ.....</b>	<b>6</b>
<b>4. ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....</b>	<b>8</b>
<b>5. ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ.....</b>	<b>11</b>
<b>6. ΣΥΣΤΟΛΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ.....</b>	<b>13</b>
<b>7. ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΤΑΞΙΔΙΑ.....</b>	<b>14</b>
<b>8. ΜΑΥΡΕΣ ΤΡΥΠΕΣ.....</b>	<b>18</b>
<b>9. ΛΕΥΚΕΣ ΤΡΥΠΕΣ.....</b>	<b>22</b>
<b>10. ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΤΗΣ ΦΥΣΗΣ.....</b>	<b>24</b>
<b>11. ΒΑΡΥΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ.....</b>	<b>26</b>
<b>12. Η ΔΙΑΔΡΟΜΗ.....</b>	<b>27</b>
<b>13. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>30</b>
<b>14. ΦΥΣΙΚΗ.....</b>	<b>33</b>
<b>15. ΕΛΛΗΝΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ.....</b>	<b>36</b>
<b>16. ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΚΑΛΟΓΕΡΑ.....</b>	<b>37</b>
<b>17. ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>38</b>
<b>18. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>39</b>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται η έννοια των μαύρων τρυπών, τα χαρακτηριστικά των βαρυτικών κυμάτων και πώς χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του ρυθμού διαστολής του συμπαντος καθώς και η σύνδεση τους με την θεωρία του Einstein. Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι ορισμοί της διαστολής του χρόνου, συστολής του μήκους. Επίσης παρουσιάζεται η συμβολή των Ελλήνων επιστημονων στις μελετες αυτες.

Πιο συγκεκριμενα αναλυεται η σύνδεση των βαρυτικών κυμάτων με τις μαυρες και λευκες τρυπες. Ακομη γινεται εκτενης αναφορα σε ολη την διαδικασια των πειραματων που υπηρξαν πριν από αυτές τις εννοιες και οπου η βαση της θεωριας της σχετικοτητας του Einstein προεβλεψε την υπαρξη βαρυτικών κυμάτων, τα οποια αποτελουν το αντικειμενο της παρουσας εργασιας. Επειτα δημοσιοποιηται η πρωτη εικονα της σκιας μια μαυρης τρυπας το 2019 η οποια επεμβαινει στη θεωρια του Einstein δημιουργωντας νεα υποερωτηματα στους επιστημονες.

Εν κατακλειδι αναφερεται η σημαντικοτητα των εγκαταστασεων LIGO οι οποιες είναι υπευθυνες για την ανιχνευση των βαρυτικών κυμάτων χρησιμοποιωντας ανιχνευτες υψηλης τεχνολογιας καθως επισης αναγνωριζεται η συμμετοχη πολλων Ελλήνων επιστημονων που με το έργο τους συμβάλουν ενεργά στη συγχρονη επιστημη.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βαρυτικά κύματα. Μαύρες τρύπες. Θεωρία της σχετικότητας. Όροι φυσικής που για πολλούς δε σημαίνουν τίποτα και για πολλούς τα πάντα. Για κάποιους είναι η αρχή μίας ιδέας, για την εξήγηση της λειτουργίας του σύμπαντος και για άλλους άγνωστες έννοιες που άκουσαν σε ταινίες επιστημονικής φαντασίας.

Παρόλο που δεν είμαι φυσικός, νιώθω την ανάγκη να ασχοληθώ και να εμβαθύνω, όσο μου είναι δυνατόν, σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Εξάλλου, η μελέτη των αστρικών φαινομένων και η δημιουργία του κόσμου απασχολούν τους ανθρώπους από την στιγμή που αντιλήφθηκαν την ίδια την ύπαρξή τους.

Τί είναι τα βαρυτικά κύματα; Γιατί η ανακάλυψή τους δημιούργησε τέτοια αναστάτωση στον επιστημονικό κόσμο; Ποιά είναι η σχέση που τα συνδέει με τις περίφημες μαύρες τρύπες; Τί νέες πληροφορίες προσθέτουν στην επαλήθευση του μοντέλου του Big Bang? Πού ανακαλύφθηκαν; Ποιά ήταν τα κύρια πρόσωπα που έχουν τα εύσημα για την ανακάλυψή τους; Υπήρχαν Έλληνες ανάμεσά τους; Πώς επηρεάζει μία τέτοια ανακάλυψη την επιστημονική και μη, κοινότητα;

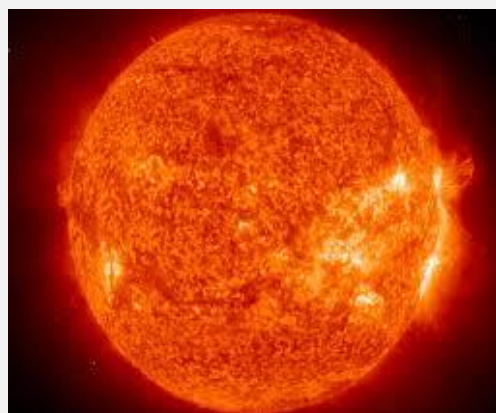
Σε όλα αυτά τα ερωτήματα θα προσπαθήσω να δώσω απαντήσεις, παρουσιάζοντας στοιχεία από πειραματικές μετρήσεις και υπογραμμίζοντας την επιστημονική σκέψη πίσω από την ανάλυση αυτών.

## ΧΩΡΟΧΡΟΝΟΣ

Πριν μιλήσουμε για τον χωροχρόνο αυτόν καθ' αυτόν, ας ξεκινήσουμε από τα βασικά. Τί είναι η βαρύτητα; Μπορούμε πολύ απλά από τον νόμο του Νεύτωνα, λαμβάνοντας υπόψιν το κλασικό μοντέλο της μηχανικής, να πούμε ότι η βαρύτητα είναι η δύναμη που έλκει δύο σώματα που έχουν κάποια μάζα και βρίσκονται σε απόσταση  $\chi$ . Όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του σώματος, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η δύναμη που θα ασκεί. Μπορούμε να δούμε παρακάτω ένα παράδειγμα της διαφοράς της ελκτικής δύναμης ανάμεσα σε δύο σώματα με διαφορετική μάζα όπως ο Ήλιος και η Γη :



$$g=9.81\text{m/s}^2$$



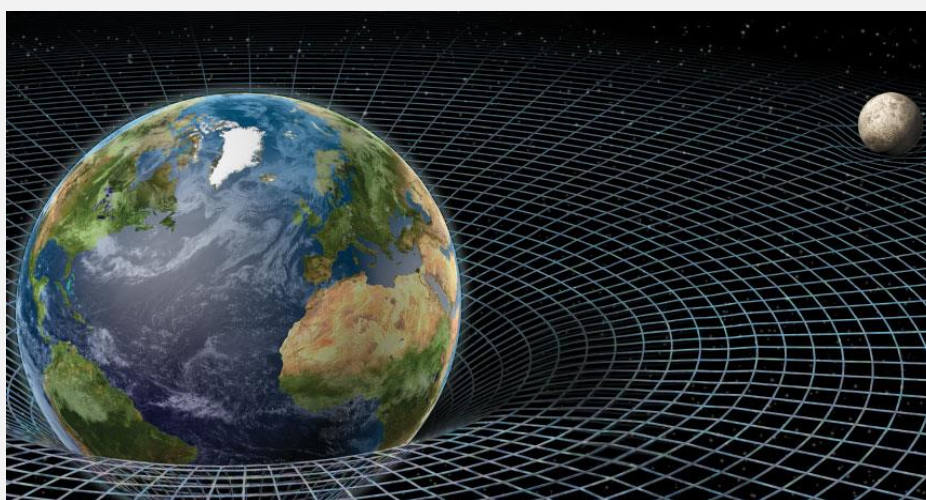
$$G=273.95\text{m/s}^2$$

- ✚ Όπως βλέπουμε, ο Ήλιος με μάζα 332.950 μεγαλύτερη από αυτήν της Γης, έχει επιτάχυνση βαρύτητας μεγαλύτερη περίπου 27 φορές από αυτή της Γης. Η επιτάχυνση βαρύτητας έχει άμεση σχέση με την ελκτική δύναμη ενός σώματος. Είναι όμως τα πράγματα τόσο απλά; Είναι δηλαδή η βαρύτητα απλά μία δύναμη όπως για παράδειγμα η δύναμη Coulomb που απλά έλκει ή απωθεί ένα σώμα; Η απάντηση είναι όχι, και σε αυτή τη φάση ερχόμαστε να εισάγουμε την έννοια του χωροχρόνου. Στην νευτώνεια φυσική ο χρόνος και ο χώρος είναι δύο χωριστές έννοιες, κάτι το οποίο στη πραγματικότητα και σύμφωνα με την θεωρία της σχετικότητας του Einstein (θα ασχοληθούμε σε βάθος σε επόμενο κεφάλαιο), δεν ισχύει.

## ΓΚΟΓΚΑ ΑΝΤΡΙΑΝ

Ο χωροχρόνος πρακτικά είναι ο συνδυασμός των τριών διαστάσεων που εμφανίζονται στο σύμπαν με μία τέταρτη: τον χρόνο. Όλα τα σώματα έχουν εξάρτηση από το χρόνο και δε θα μπορούσαμε να μελετήσουμε το φαινόμενο της κίνησης με ακρίβεια, απομονώνοντάς το από τις υπόλοιπες διευθύνσεις. Πώς όμως η βαρύτητα αποτυπώνεται στον χωροχρόνο και πώς τον επηρεάζει;

Ουσιαστικά η βαρύτητα καμπυλώνει ή αλλιώς, παραμορφώνει το χωροχρόνο. Μπορούμε να το κάνουμε εικόνα με ένα απλό παράδειγμα: έστω ότι έχουμε ένα τετρωμένο σεντόνι. Εάν τοποθετήσουμε στο κέντρο μία σφαίρα θα δημιουργηθεί ένα κοίλωμα και η επιφάνεια που θα βρίσκεται πιο κοντά στη σφαίρα θα έχει μεγαλύτερη κλίση (επιτάχυνση). Όσο μεγαλύτερη η μάζα της σφαίρας, τόσο πιο βαθιά θα πέσει το σεντόνι και τόσο μεγαλύτερη κλίση θα έχει κοντά στην περιφέρειά της. Εάν ρίξουμε μία σχετικά μικρότερη σφαίρα στο σεντόνι θα δημιουργήσει και αυτή τα ίδια αποτελέσματα αλλά σε μικρότερο βαθμό. Όταν η μικρή σφαίρα μπει στο πεδίο έλξης της μεγάλης (εκεί που το σεντόνι καμπυλώνει) θα κυλήσει έως όπου έρθουν σε επαφή.



Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε πως με την καμπύλωση του χωροχρόνου ερμηνεύονται φυσικά φαινόμενα όπως αυτό της περιστροφής της Σελήνης γύρω από την Γη. Η μάζα της Γης καμπυλώνει τον χωροχρόνο και η Σελήνη που βρίσκεται στην καμπύλωση, εγκλωβίζεται σε περιστροφή γύρω από την Γη.

## ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Είναι αδύνατον, ωστόσο, να μιλήσουμε για χωροχρόνο χωρίς να εξετάσουμε και να κατανοήσουμε πλήρως τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας και τον βασικό ρόλο που διαδραματίζει στην ερμηνεία φυσικών φαινομένων.

Η γενική θεωρία της σχετικότητας ή γενική σχετικότητα είναι η θεωρία βαρύτητας, η οποία περιγράφει τη βαρυτική δύναμη μέσω των καμπυλώσεων του χωροχρόνου παρουσία μάζας. Βασική αρχή της θεωρίας είναι η ισοδυναμία των επιταχυνόμενων συστημάτων αναφοράς με συστήματα που βρίσκονται εντός βαρυτικού πεδίου.

Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας διατυπώθηκε από τον A.Einstein και παρουσιάστηκε τον Νοέμβριο του 1915 ενώπιον της Πρωσικής Ακαδημίας Επιστημών. Η παρουσίαση δημιούργησε μεγάλη αναστάτωση για τον απλό λόγο ότι η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας αντικαθιστούσε την ερμηνεία του Νεύτωνα για την βαρύτητα.

Ο δρόμος για την διατύπωση της θεωρίας ήταν μεγάλος και όχι χωρίς εμπόδια. Σύντομα μετά τη δημοσίευση της το 1905, ο Einstein προσπάθησε να βρει τρόπο για το πώς να συμπεριλάβει τη βαρύτητα στο νέο σχετικιστικό πλαίσιο του . Το 1907, ένα απλό νοητικό πείραμα που περιλάμβανε έναν παρατηρητή σε ελεύθερη πτώση, ήταν η απαρχή για την οκταετή έρευνά του πάνω στη σχετικιστική θεωρία της βαρύτητας. Μετά από μία πληθώρα λανθασμένων εκκινήσεων, η εργασία του κορυφώθηκε με την παρουσίαση των Πεδιακών Εξισώσεων του Einstein στο επιστημονικό συνέδριο που προαναφέραμε. Οι εξισώσεις αυτές προσδιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο η γεωμετρία του χώρου και του χρόνου επηρεάζεται από την ύπαρξη ύλης και ακτινοβολίας .

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$



Παραπάνω βλέπουμε μία μορφή της εξίσωσης του Einstein όπου τα  $R$  και  $g$  αφορούν στη δομή του χωρόχρονου, το  $T$  αφορά στην επίδραση της ύλης και του ενεργειακού περιεχομένου (που επηρεάζει τη δομή του χωρόχρονου) ενώ  $G$  και  $c$  είναι παράγοντες μετατροπής (παγκόσμιες σταθερές) που προκύπτουν από τη χρήση παραδοσιακών μονάδων μέτρησης. Τέλος έχουμε το  $\Lambda$ , το οποίο χαρακτηρίζεται ως κοσμολογική σταθερά. Ο ίδιος ο Einstein την χαρακτήρισε ωστόσο ως το μεγαλύτερο σφάλμα στη καριέρα του ως φυσικός και αυτό γιατί βασιζόταν στο μοντέλο ενός στατικού σύμπαντος. Ο Hubble ανακαλύπτοντας την ερυθρή μετατόπιση αδιαμφισβήτητα επαλήθευσε το μοντέλο ενός σύμπαντος που διαστέλλεται συνεχώς.

Οι πεδιακές εξισώσεις του Einstein είναι μη γραμμικές, γεγονός που τις καθιστά πολύ δύσκολες στην επίλυση. Αρχικά ο αυστριακός επιστήμονας έκανε κάποιες μαθηματικές προσεγγίσεις για να πάρει κάποια ουσιαστικά αποτελέσματα αλλά τελική λύση στο μαθηματικό του πρόβλημα ήρθε να δώσει ο αστροφυσικός Karl Swarztchild (θα δούμε ξανά το όνομά του όταν ασχοληθούμε με τις μαύρες τρύπες).

Είδαμε παραπάνω μερικές ιστορικές αναφορές για το δρομολόγιο που ακολούθησε η σκέψη του Einstein μέχρι το τελικό αποτέλεσμα, όμως είναι εξίσου σημαντικό να αναφέρουμε τα θεμέλια για την θέσπιση της βάσης της επιστημονικής σκέψης.

- Πρωταρχικό ρόλο έπαιξαν οι εξισώσεις της θεωρίας του ηλεκτρομαγνητισμού του Maxwell. Αυτές προέβλεψαν την σταθερότητα της ταχύτητας του φωτός και τόνιζαν την αναγκαιότητα διατύπωσης των φυσικών νόμων ανεξάρτητα του σημείου αναφοράς.
- Στη συνέχεια, θεμέλιος λίθος υπήρξε το πείραμα Michealson-Morley. Αυτό απέδειξε ουσιαστικά ότι δεν υπάρχει αιθέρας, άρα το φως δεν χρειάζεται μέσο για να διαδοθεί, όπως αντίθετα ο ήχος. Το πείραμα αυτό επίσης έδειξε ότι η ταχύτητα του φωτός είναι σταθερή σε σχέση με την κίνηση της Γης.
- Ο Ολλανδός φυσικός Hendrik Antoon Lorentz εισήγαγε τους ομώνυμους τύπους Lorentz .

## ΓΚΟΓΚΑ ΑΝΤΡΙΑΝ

Ουσιαστικά αυτοί οι τύποι προσφέρουν μία διατύπωση των φυσικών νόμων, ισοδύναμη για κάθε αδρανειακό σύστημα. Μπορούμε να δούμε αυτούς τους τύπους παρακάτω:

### Μετασχηματισμός Lorentz

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Στους παραπάνω τύπους τα  $x$ ,  $y$ ,  $z$  και  $t$  είναι οι τιμές του συστήματος, ενώ τα τονούμενα είναι οι τιμές που αντιλαμβάνεται ένας εξωτερικός παρατηρητής του φαινομένου.

Τέλος, μεγάλο ρόλο στον σχηματισμό της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας όπως την ξέρουμε έπαιξε το μαθηματικό και επιστημονικό έργο του Γάλλου επιστήμονα Jules Henri Poincare. Κάποιοι θεωρούν ότι αυτός ήταν ο πραγματικός πατέρας της σχετικότητας έτσι, λόγω της μεγάλης αξίας της προσφοράς του στο τελικό αποτέλεσμα, κάποιοι ονομάζουν την θεωρία Einstein-Poincare.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να παρουσιάσω δύο φαινόμενα, με αντίστοιχα λυμένα παραδείγματα, που ερμηνεύει η θεωρία της σχετικότητας και που μπορούμε να παρατηρήσουμε τόσο πάνω στη Γη, όσο και σε μακρινά ουράνια σώματα. Τα δύο φαινόμενα αυτά είναι η διαστολή του χρόνου και η συστολή του μήκους.

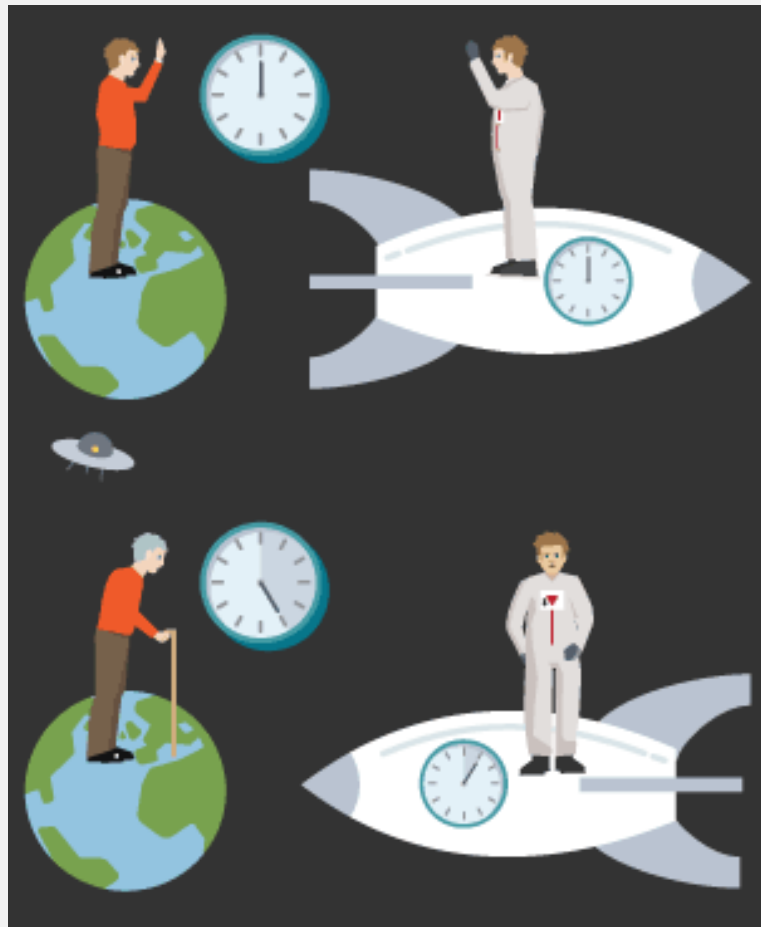
### ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Στη θεωρία της σχετικότητας, η διαστολή του χρόνου είναι η διαφορά του χρόνου που παρήλθε ανάμεσα σε δύο γεγονότα που μετρήθηκαν από παρατηρητές είτε κινούμενοι σχετικώς ο μιν με τον δε, είτε βρισκόμενοι σε διαφορετική βαρυτική μάζα ή μάζες (δεχόμενοι δηλαδή διαφορετικές βαρυτικές έλξεις). Ένα ακριβές ρολόι σε κατάσταση ηρεμίας σε σχέση με έναν παρατηρητή μπορεί να μετρηθεί να "χτυπά" σε διαφορετικό ρυθμό όταν συγκρίνεται με έναν δεύτερο παρατηρητή ο οποίος έχει ένα επίσης ακριβές ρολόι. Το γεγονός αυτό δεν αποδίδεται ούτε στις τεχνικές ανακρίβειες του ρολογιού ούτε από το γεγονός ότι τα σήματα χρειάζονται χρόνο για να διαδοθούν, αλλά από τη φύση του ίδιου του χωροχρόνου.

Ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα του φαινομένου της διαστολής του χρόνου είναι το λεγόμενο παράδοξο των δίδυμων αδελφών. Θεωρούμε ένα ελεγχόμενο πείραμα με τους εικοσάχρονους δίδυμους αδελφούς Γρηγόρη και Αργούλη. Ο Γρηγόρης, που είναι ο πιο ανήσυχος από τους δίδυμους, μπαίνει σε ένα διαστημόπλοιο και αρχίζει ένα ταξίδι για έναν μακρινό αστέρα, που απέχει από τη Γη 30 έτη φωτός. Το διαστημόπλοιο του μπορεί να επιταχυνθεί σε ταχύτητα που προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός. Αφού φτάσει στον αστέρα, ο Γρηγόρης καταλαμβάνεται από νοσταλγία και επιστρέφει αμέσως στη Γη με την ίδια μεγάλη ταχύτητα που είχε όταν έφυγε. Όταν φτάνει στη Γη εκπλήσσεται με τις αλλαγές που βλέπει γύρω του. Οι πόλεις που ήξερε έχουν αλλάξει πολύ και άλλες έχουν ξεφυτρώσει. Ο τρόπος ζωής των ανθρώπων έχει επίσης αλλάξει αφάνταστα. Τελικά, συναντά τον δίδυμο αδελφό του Αργούλη, γεροντάκι 80 περίπου χρονών, σοφότερο βέβαια από ό,τι τον είχε αφήσει αλλά πιο αδύναμο και με πρόβλημα βαρηκοΐας. Ο ίδιος όμως ο Γρηγόρης έχει μεγαλώσει μόνο καμιά δεκαριά χρόνια. Αυτό συνέβη, διότι οι οργανικές διαδικασίες του σώματός του επιβραδύνθηκαν κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του. Είναι φυσικό να ρωτήσει κάποιος: «ποιος από τους δίδυμους ταξίδεψε με ταχύτητα παραπλήσια με την ταχύτητα του φωτός; Διότι αυτός θα είναι εκείνος που δεν γέρασε». Ακριβώς, αυτό είναι το παράδοξο. Στο σύστημα αναφοράς του Αργούλη, αυτός έμεινε ακίνητος ενώ ο Γρηγόρης έφυγε με μεγάλη ταχύτητα. Από την άλλη πλευρά, κάποιος μπορεί να πει ότι διαστημικός ταξιδιώτης Γρηγόρης νόμιζε ότι ο Αργούλης μαζί με τη Γη απομακρύνθηκαν με πολύ μεγάλη ταχύτητα και κατόπιν επέστρεψαν.

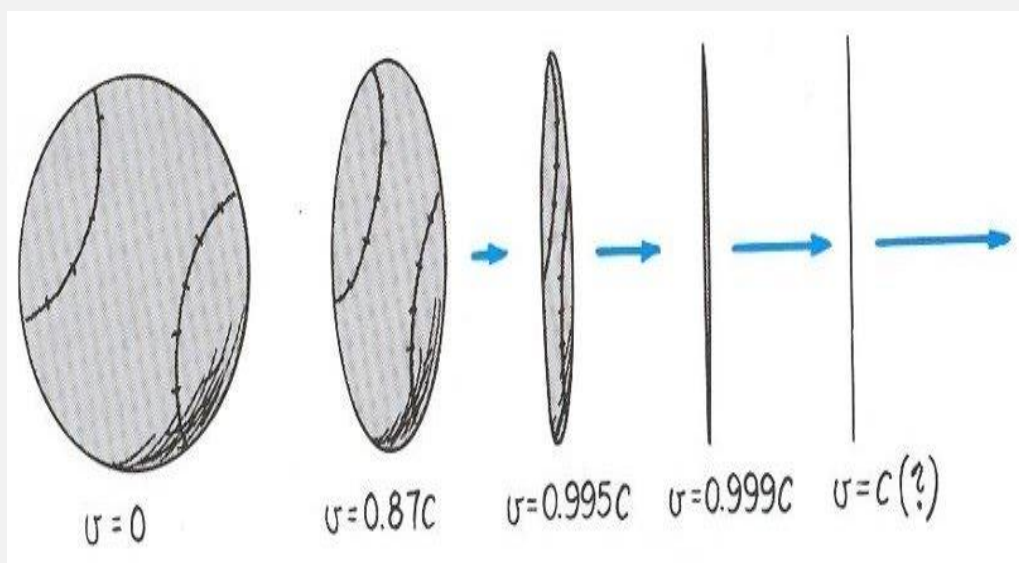
## ΓΚΟΓΚΑ ΑΝΤΡΙΑΝ

Σ' αυτό λοιπόν έγκειται το παράδοξο. Για να λύσουμε το παράδοξο, πρέπει να επιστήσουμε την προσοχή μας στο ότι το ταξίδι αυτό δεν είναι τόσο συμμετρικό όσο ίσως νομίζουμε. Ο Γρηγόρης κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του υπέστη επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις και επομένως δεν κινούνταν πάντοτε ισοταχώς. Αυτό σημαίνει ότι ο Γρηγόρης βρισκόταν επί αρκετό διάστημα σε μη αδρανειακό σύστημα αναφοράς και έτσι οι προβλέψεις της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας δεν ισχύουν για το σύστημα αναφοράς του. Από την άλλη πλευρά, ο Αργούλης, που έμεινε στη Γη, βρισκόταν σε αδρανειακό σύστημα αναφοράς επομένως μπορεί να κάνει σωστές προβλέψεις χρησιμοποιώντας την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Οι δύο αδελφοί δεν βρίσκονται σε συμμετρικές περιπτώσεις και για τον λόγο ότι ο Γρηγόρης χρειάστηκε να στρίψει το διαστημόπλοιο για να γυρίσει στη Γη και υπόκεινταν σε δυνάμεις που δεν δρούσαν πάνω στον Αργούλη. Επομένως, ο Γρηγόρης είναι εκείνος που ήταν νεότερος όταν επέστρεψε στη Γη.



## ΣΥΣΤΟΛΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

Οι διαστάσεις (π.χ. μήκος) ενός αντικειμένου, όπως μετράται από έναν παρατηρητή μπορεί να είναι μικρότερη από ό, τι τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ίδιου αντικειμένου που υποβάλλονται από άλλο παρατηρητή (πχ. το παράδοξο της σκάλας που ταξιδεύει με ταχύτητα κοντά στην ταχύτητα του φωτός και μπορεί να χωρέσει μέσα σε ένα μικρότερο γκαράζ). Το παραπάνω ορίζει την συστολή του μήκους .



*ΣΥΣΤΟΛΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΣΕ ΕΝΑ ΜΠΑΛΑΚΙ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ*

Η συστολή κατά μήκος επηρεάζει μόνο τη διάσταση που είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση της κίνησης. Το μήκος ηρεμίας (ιδιόμηκος της ράβδου) σύμφωνα με ένα παρατηρητή που είναι ακίνητος επί της ράβδου φαίνεται ότι είναι  $L'$ .

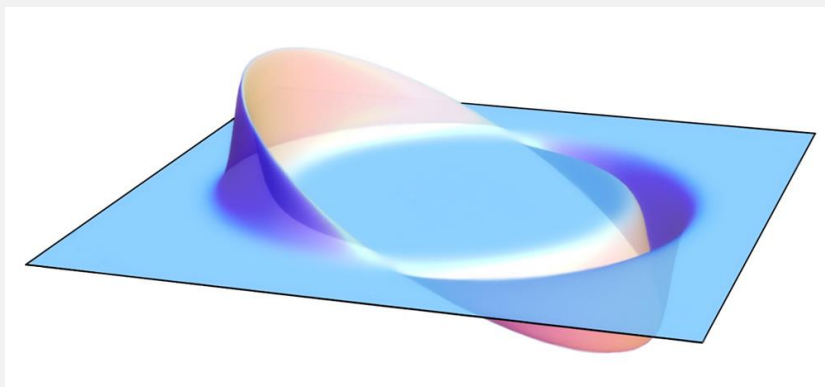
$$L' = L \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

## ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΤΑΞΙΔΙΑ

Ο χωροχρόνος και η γενική θεωρία της σχετικότητας είναι άμεσα συνδεδεμένα με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, που θα επιτρέψουν στην ανθρωπότητα να ταξιδέψει στο διάστημα μειώνοντας το χρόνο του ταξιδιού (αν και πίο σωστό θα ήταν να πούμε μειώνοντας την απόσταση) και να ανοίξουν ένα νέο κεφάλαιο όσον αφορά την εξερεύνηση του διαστήματος. Παρακάτω θα δούμε δύο παραδείγματα τέτοιων πιθανών επιτευγμάτων, που ωστόσο βρίσκονται ακόμα σε θεωρητική φάση .

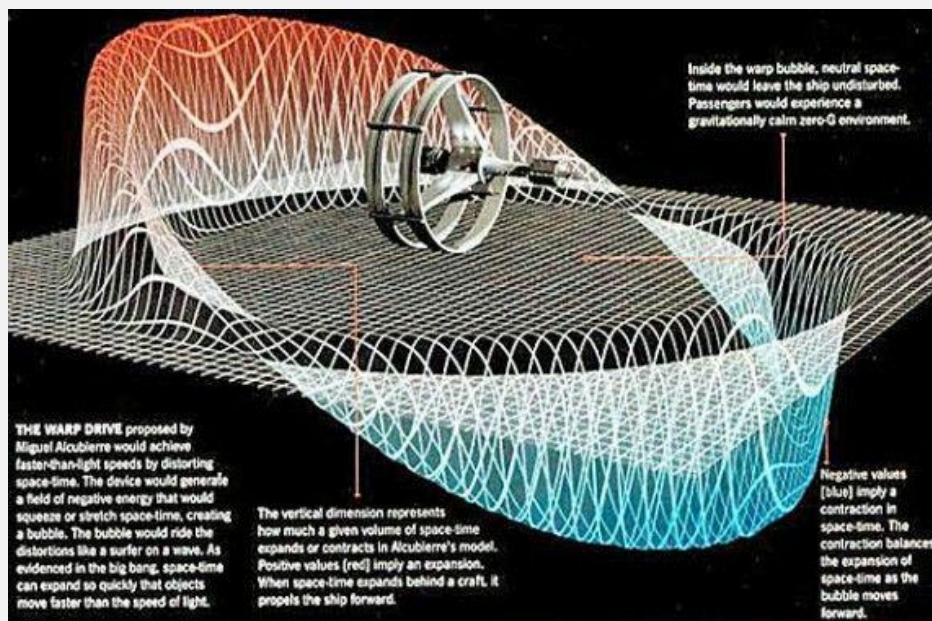
### I. Alcubierre drive

Ο Μεξικανός Miguel Alcubierre το 1994 διατύπωσε μία θεωρία για να αλλάξει τη γεωμετρία του χωροχρόνου, δημιουργώντας ένα κύμα το οποίο θα έκανε τον χώρο να συσταλεί στο πρόσθιο μέρος ενός διαστημοπλοίου και να διασταλεί στο οπίσθιο μέρος. Το διαστημόπλοιο με αυτόν τον τρόπο δημιουργεί μία φυσαλίδα γύρω του, και ενώ δεν κινείται μέσα σε αυτή, παρασύρετε από το κύμα που προαναφέραμε. Ο κινητήρας παραμένει ακόμα σε θεωρητικό επίπεδο λόγω της απαιτούμενης μεγάλης ενέργειας που χρειάζεται για να λειτουργήσει. Παρόλα αυτά ο Harold Sonny White σημείωσε ότι χρησιμοποιώντας έναν δακτύλιο στρέβλωσης αντί για φυσαλίδα, θα μειωνόταν κατά πολύ η ενέργεια που είναι απαραίτητη για να λειτουργήσει. Επίσης με την έρευνα να έχει προχωρήσει από το 1994 ειδικά στον τομέα της αρνητικής ενέργειας (βασικό μέρος του Alcubierre Drive) δεν φαίνεται πλέον να είναι ακατόρθωτο να επιτευχθεί η απαιτούμενη ποσότητα.



ΔΥΣΔΥΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΣΤΡΕΒΛΩΣΗΣ ALCUBIERRE

Το 2012 η NASA ανακοίνωσε την κατασκευή ενός συμβολόμετρου για την ανίχνευση χωρικών παραμορφώσεων που δημιουργούνται από την συστολή και τη διαστολή του χώρου γύρω από έναν Alcubierre Drive .



ΔΙΑΣΤΗΜΟΠΛΟΙΟ ΣΕ ΠΕΔΙΟ ALCUBIERRE

## II. Σκουληκότρυπες

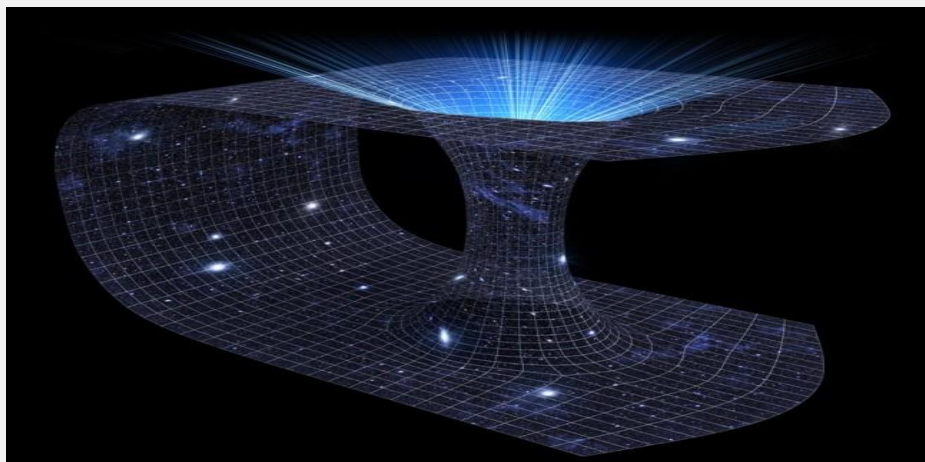
Οι σκουληκότρυπες εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στη γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν, η οποία δείχνει ότι η βαρύτητα δεν είναι τίποτα περισσότερο από την κρυφή στρέβλωση του χωροχρόνου από την ενέργεια, συνήθως τη μάζα και την ενέργεια των άστρων και των γαλαξιών.

Λίγο μετά αφού ο Αϊνστάιν δημοσίευσε τις εξισώσεις του το 1916, ο Αυστριακός φυσικός Ludwig Flamm ανακάλυψε ότι προβλέπουν και αγωγούς μέσα στον χώρο και το χρόνο. Ο Αϊνστάιν έκανε αργότερα λεπτομερείς έρευνες στις σκουληκότρυπες μαζί με τον Nathan Rosen. Το 1935, αυτοί υπέθεσαν ότι αποτελείται από δύο μαύρες τρύπες, που συνδέονται με μια σήραγγα μέσα στον χωρο-χρόνο. Το ταξίδι μέσα από την σκουληκότρυπα τους ήταν δυνατή μόνο εάν οι μαύρες τρύπες στα δύο άκρα ήταν ειδικού τύπου ή είδους.

## ΓΚΟΓΚΑ ΑΝΤΡΙΑΝ

Μια συμβατική μαύρη τρύπα έχει τέτοιο ισχυρό βαρυτικό πεδίο που τα υλικά που απορροφούνται από αυτήν, δεν μπορούν ποτέ να ξεφύγουν από τη στιγμή που έχουν περάσει από τον ορίζοντα γεγονότων (οι παραπάνω όροι θα αναλυθούν στη συνέχεια). Οι μαύρες τρύπες στο τέλος της σκουληκότρυπας των Αϊνστάιν-Ρόζεν θα πρέπει είναι απαλλαγμένες από τα εν λόγω χωρίς επιστροφή σημεία.

Οι σκουληκότρυπες Einstein – Rosen φαίνονταν το ίδιο περίεργες και για έναν άλλο λόγο: ο προορισμός τους ήταν αδιανόητος. Οι σκουληκότρυπες συνδέανε το σύμπαν μας με μία περιοχή του διαστήματος αλλά σε ένα παράλληλο σύμπαν, ίσως με τα δικά τους άστρα και πλανήτες ή με τους δικούς του γαλαξίες. Εν τω μεταξύ οι θεωρητικοί φυσικοί σήμερα αρχίζουν να αισθάνονται άνετα με την ιδέα ότι το σύμπαν μας είναι ένα μόνο από τα πολλά. Στις ημέρες όμως των Einstein και Rosen ένα παρόμοιο πολυσύμπαν ήταν αδιανόητο.



*ΔΙΑΣΤΡΕΒΛΩΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΕ ΣΚΟΥΛΙΚΟΤΡΥΠΙΑ*

Ευτυχώς, αποδείχτηκε ότι η γενική σχετικότητα επέτρεπε την ύπαρξη και ενός άλλου τύπου σκουληκότρυπας. Το 1955, ο Αμερικανός φυσικός John Wheeler, έδειξε ότι ήταν δυνατό να συνδέσετε δύο περιοχές του διαστήματος μέσα στο σύμπαν μας, το οποίο θα ήταν πολύ πιο χρήσιμο για ένα γρήγορο διαγαλαξιακό ταξίδι. Το πρόβλημα είναι οι σκουληκότρυπες των Wheeler, Einstein και Rosen έχουν όλες το ίδιο ελάττωμα. Είναι ασταθείς. Η αποστολή με αυτές ακόμη και ενός απλού φωτονίου δίνει το έναυσμα για τη δημιουργία ενός ορίζοντα γεγονότων, ο οποίος ουσιαστικά ‘ασφαλίζει’ την σκουληκότρυπα.



Είναι σημαντικό σε αυτή τη φάση να αναφέρουμε ότι την προσπάθεια επίλυσης των προβλημάτων αστάθειας (που όπως και στο Alcubierre Drive σχετίζεται με την αρνητική ενέργεια ) μιας σκουληκότρυπας , έχει αναλάβει μία ομάδα Γερμανών και Ελλήνων ερευνητών . Η Παναγιώτα Καντή , αναπληρώτρια καθηγήτρια θεωρητικής φυσικής στο πανεπιστήμιο Ιωαννίνων , είναι μία από τις Ελληνίδες που συμμετέχουν σε αυτήν την έρευνα . Η ομάδα αυτή έχει δείξει ότι η κατασκευή μιας σκουληκότρυπας μπορεί να είναι δυνατή χωρίς να χρησιμοποιήσουμε καμία αρνητική ενέργεια συνδυάζοντας και την θεωρία των υπερχορδών."Δεν χρειάζεται καν κανονική ύλη με θετική ενέργεια," λέει ο Burkhard Kleihaus του Πανεπιστημίου του Oldenburg στη Γερμανία. "Οι σκουληκότρυπες μπορούν να ανοιχτές και με τίποτα."

## ΜΑΥΡΕΣ ΤΡΥΠΕΣ

Αφού μιλήσαμε για χωροχρόνο και για την γενική θεωρία της σχετικότητας , ερχόμαστε τώρα, έχοντας τα κατάλληλα εφόδια, να εξετάσουμε τα ουράνια σώματα που λέγονται μελανές οπές (ή μαύρες τρύπες). Οι μαύρες τρύπες είναι το σημείο του χωροχρόνου όπου οι βαρυτικές δυνάμεις είναι τόσο ισχυρές που κανένα σωματίδιο δεν μπορεί να ξεφύγει, συμπεριλαμβανομένων των φωτονίων. Αυτό μας προκαλεί έκπληξη διότι τα φωτόνια κινούνται με την ταχύτητα του φωτός, γεγονός που τα καθιστά πολύ δύσκολο στο να περιοριστούν.

Τα κύρια μέρη μίας μαύρης τρύπας είναι τα εξής:

- a) singularity (μοναδικότητα)
- b) event horizon (ορίζοντας γεγονότων)
- c) accretion disc (δίσκος προσαύξησης)
- d) photon sphere (σφαίρα φωτονίων)



Η μοναδικότητα είναι ουσιαστικά το επίκεντρο της μαύρης τρύπας όπου υπάρχει κατάρρευση της μάζας σε άπειρη πυκνότητα. Ο δίσκος προσαύξησης αποτελείται από αέρια , σε τεράστια θερμοκρασία , που κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα παράγοντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία . Η σφαίρα φωτονίων είναι το σημείο από όπου το φως μπορεί να ξεφύγει αν έχει την κατάλληλη κατεύθυνση προς τα έξω.

Είναι μια σφαιρική περιοχή του χώρου λίγο πιο έξω από τον ορίζοντα γεγονότων και την εργόσφαιρα (μια ελλειψοειδής περιοχή γύρω από τη μαύρη τρύπα), όπου η βαρύτητα είναι τόσο ισχυρή που τα φωτόνια αναγκάζονται να κινούνται σε τροχιές. Τέλος ο ορίζοντας γεγονότων είναι η απόσταση από το κέντρο της μαύρης τρύπας από την οποία, όταν βρεθεί κάποιο σώμα δεν μπορεί να διαφύγει. Αυτή η απόσταση ονομάζεται ακτίνα Swartzchild προς τιμήν του Karl Swartzchild που προαναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Σχεδόν όλοι οι γαλαξίες έχουν μία μαύρη τρύπα στο κέντρο τους, όπως και ο ίδιος ο γαλαξίας μας, τον Sagittarius A\*. Πρόκειται για μία υπερμεγεθή μαύρη τρύπα, με μάζα περίπου 4 εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλίου και 23,6 εκατομμύρια χιλιόμετρα σε διάμετρο. Μία πιθανή εκδοχή για την δημιουργία της είναι η συγχώνευση μικρότερων μελανών οπών.

Γενική ερμηνεία για την δημιουργία μίας μαύρης τρύπας είναι η κατάρρευση ενός αστέρα νετρονίου. Η όλη διαδικασία της εξέλιξης ενός αστεριού ρυθμίζεται από τη βασική αντίθεση ανάμεσα στη βαρύτητα και την πίεση. Η βαρύτητα λειτουργεί πάντοτε, ενώ για να λειτουργήσει η πίεση αποτελεσματικά χρειάζεται παραγωγή ενέργειας. Στα πρώτα στάδια της εξέλιξης η ενέργεια προέρχεται από τη βαρυτική ενέργεια που απελευθερώνεται λόγω της συστολής του μεσοαστρικού σύννεφου που σχηματίζει το αστέρι. Στη συνέχεια, πηγή ενέργειας είναι οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις. Όταν εξαντληθούν όλες οι πηγές ενέργειας τότε το αστέρι σταματά να εξελίσσεται και του προσδίδεται μία νέα τελική μορφή. Εάν η αρχική μάζα ήταν πάνω από 10-15 φορές τη μάζα του ηλίου, ώστε στη καταληκτική φάση να είναι περίπου 2.5 φορές τη μάζα του ηλίου, τότε μία πιθανή τελική μορφή του αστεριού είναι η μαύρη τρύπα. Η μάζα θα καταλήξει να είναι τόσο συγκεντρωμένη, ώστε η ταχύτητα διαφυγής να ισούται με την ταχύτητα του φωτός.

Θα ήταν μεγάλη παράλειψη να μην αναφερθεί η φωτογράφιση της μαύρης τρύπας του τεράστιου ελλειπτικού γαλαξία M87, ίσως ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της περασμένης δεκαετίας. Το εκπληκτικό αυτό αποτέλεσμα υλοποιήθηκε με την βοήθεια 8 ραδιοτηλεσκοπίων, διάσπαρτων σε όλη την υφήλιο, τα οποία λειτουργούν όλα μαζί ως ένα γιγάντιο συμβολομετρικό ραδιοτηλεσκόπιο με διάμετρο σχεδόν όση και ο πλανήτης μας.

Το τηλεσκόπιο αυτό, γνωστό ως το Τηλεσκόπιο Ορίζοντα Γεγονότων (Event Horizon telescope EHT), συνέλεξε τον Απρίλιο του 2017 έναν εντυπωσιακό όγκο δεδομένων για την μαύρη τρύπα που βρίσκεται στον πυρήνα του γιγάντιου ελλειπτικού γαλαξία M87, έναν από τους φωτεινότερους γαλαξίες που απαρτίζουν το γαλαξιακό σμήνος της Παρθένου, με μάζα 6,5 δισ. φορές μεγαλύτερη απ' αυτήν του Ήλιου. Για την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων, που διήρκεσε 2 χρόνια, συνεργάστηκαν 200 αστρονόμοι και τεχνικοί απ' όλο τον κόσμο, χρησιμοποιώντας πανίσχυρους υπερυπολογιστές και καινοτόμους αλγόριθμους, με την βοήθεια των οποίων κατόρθωσαν να απεικονίσουν, όχι την ίδια την μαύρη τρύπα που είναι εξ ορισμού αόρατη, αλλά την «σκιά» της.

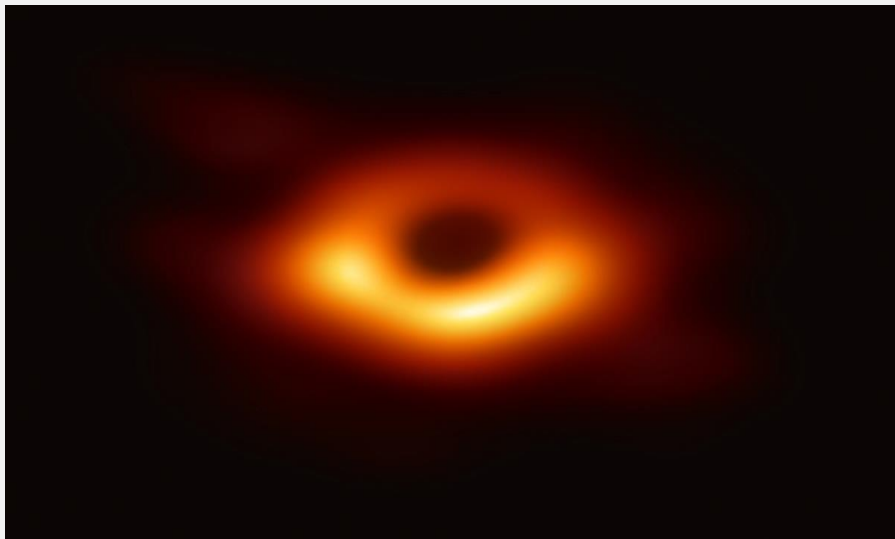
Ανάμεσα στους επιστήμονες που έλαβαν μέρος στην προσπάθεια φωτογράφισης της μαύρης τρύπας, υπήρχε και ο Έλληνας Δημήτρης Ψάλτης (καθηγητής Αστρονομίας και Φυσικής του Πανεπιστημίου της Αριζόνας). Ο ρόλος του ήταν κομβικός διότι μαζί με τους συνεργάτες του ανέλαβαν - για πρώτη φορά σε τέτοια αστροφυσική κλίμακα - να εξετάσουν κατά πόσο η εικόνα της μαύρης τρύπας επαληθεύει τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας του Einstein. Τα λόγια του Έλληνα μετά την σπουδαία ανακάλυψη ήταν τα εξής: «Το Τηλεσκόπιο EHT για πρώτη φορά μας επέτρεψε να ελέγξουμε τις προβλέψεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας του Einstein γύρω από υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες στα κέντρα γαλαξιών. Το μέγεθος και η σκιά επιβεβαιώνει τις ακριβείς προβλέψεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας του Einstein, αυξάνοντας έτσι την εμπιστοσύνη μας σε αυτή τη θεωρία που έχει κλείσει ένα αιώνα. Η απεικόνιση μιας μαύρης τρύπας είναι μόνο η αρχή της προσπάθειας μας να αναπτύξουμε νέα εργαλεία που θα μας επιτρέψουν να ερμηνεύσουμε τα άκρως πολύπλοκα δεδομένα της φύσης».

Ο φωτεινός δακτύλιος, που περιβάλλει την σκιά της μαύρης τρύπας σχηματίζεται καθώς το φως καμπυλώνεται από την ακραία βαρυτική έλξη που επικρατεί γύρω από τον ορίζοντα γεγονότων της. Η «σκιά» αυτή προβλέπεται θεωρητικά μέσα από την Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, γι' αυτό και η πρώτη της αποτύπωση σε εικόνα αποτελεί μία ακόμη παρατηρησιακή επαλήθευση θεμελιωδών προβλέψεων της επαναστατικής θεωρίας που διατύπωσε ο Einstein έναν αιώνα πριν.

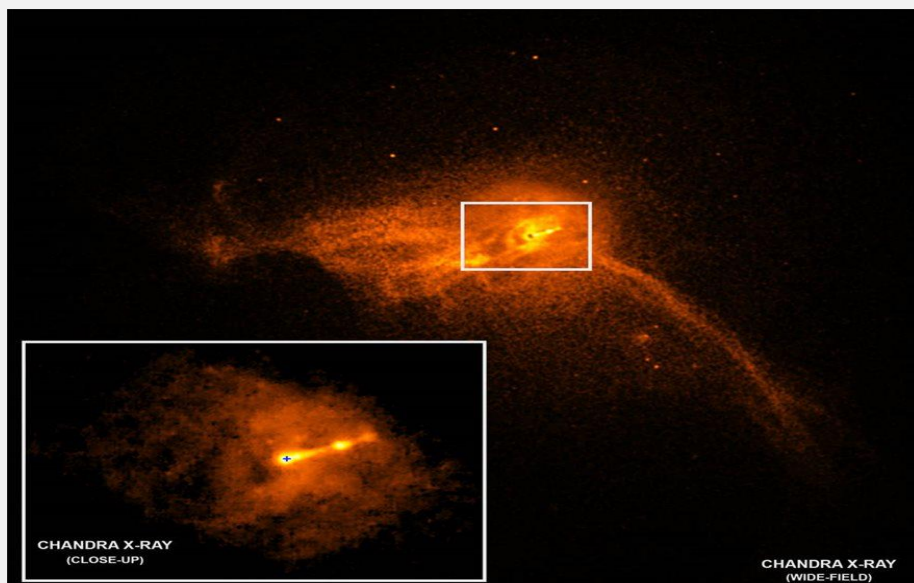
## ΓΚΟΓΚΑ ΑΝΤΡΙΑΝ

Σύμφωνα με την Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, ο ορίζοντας γεγονότων μίας μαύρης τρύπας έχει σε γενικές γραμμές κυκλικό σχήμα, ενώ η διάμετρός του εξαρτάται από την μάζα της. Σύμφωνα με τις σχετικές δημοσιεύσεις της επιστημονικής ομάδας του EHT, ο υπολογισμός της μάζας που περικλείει η μαύρη τρύπα του γαλαξία M87 συμφωνεί με εκτιμήσεις της μάζας της, οι οποίες βασίστηκαν σε άλλες μεθόδους, επιβεβαιώνοντας για μία ακόμη φορά τον Einstein .

Παρακάτω μπορούμε να δούμε τις θαυματικές φωτογραφίες της μαύρης τρύπας του γαλαξία M87. Στη σειρά, βλέπουμε την μεγεθυμένη εικόνα, όπου μία μαύρη οπή περιβάλλεται από θερμή (κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο ) ακτινοβολία και στη συνέχεια την ίδια εικόνα χωρίς μεγέθυνση.



ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΜΑΥΡΗΣ ΤΡΥΠΙΑΣ (Event Horizon Telescope 2019)



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΜΑΥΡΗΣ ΤΡΥΠΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ

### ΛΕΥΚΕΣ ΤΡΥΠΕΣ

Οι λευκές τρύπες (οπές) μπορούν να θεωρηθούν ως το αντίθετο μιας μαύρης τρύπας. Αυτό το αστρικό φαινόμενο σύμφωνα με τη γενική θεωρία της Σχετικότητας, ονομάζεται η υποθετική περιοχή του χωροχρόνου, στην οποία δεν γίνεται να εισχωρήσει κάποιο αντικείμενο από έξω, και από την οποία η ύλη και το φως μπορούν να διαφύγουν.

Όπως προαναφέραμε, οι μαύρες τρύπες δεν επιτρέπουν σε κανένα σωματίδιο ή μάζα να εξέλθει ύστερα από το πέρας τους από τον ορίζοντα γεγονότων. Πού καταλήγουν αυτά όμως; Μία θεωρία υποστηρίζει (αν και με αρκετές αμφιβολίες) ότι μία μαύρη και μία λευκή τρύπα μπορεί να είναι άμεσα συνδεδεμένες και η αρχή της μίας να είναι η κατάληξη της άλλης. Σύμφωνα με αυτή την επιστημονική άποψη όλη η ύλη και το φως που εισέρχονται σε μία μελανή οπή, εξέρχονται στη συνέχεια από μία λευκή .

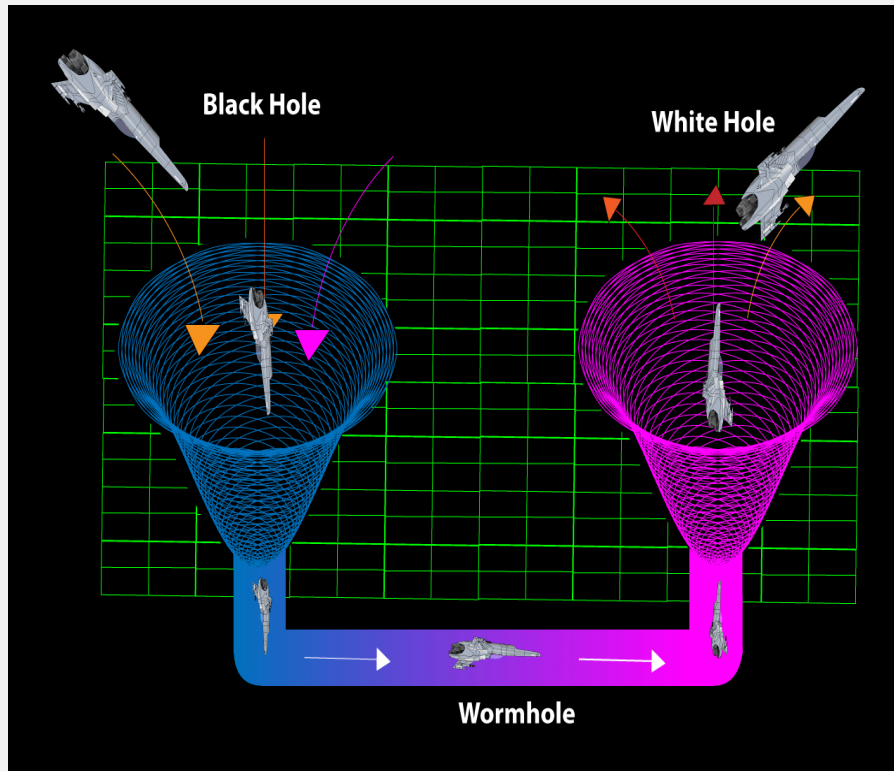
Όπως είναι (μάλλον) φυσικό, λευκή τρύπα δεν έχει μέχρι στιγμής καταγραφεί (όπως ούτε και σκουληκότρυπα) και δεν υπάρχει καμία απτή απόδειξη για την ύπαρξή της. Υπάρχει μόνο στις θεωρητικές αναζητήσεις των επιστημόνων, κάποιοι από τους οποίους πιστεύουν πως κάθε φορά που γεννιέται μια μαύρη τρύπα, στην άλλη άκρη της δημιουργείται μια λευκή και μάλιστα ένα νέο σύμπαν ξεπηδά.

Σε μια παραλλαγή της θεωρίας, το 2014 οι Hal Haggard και Carlo Rovelli επικαλούμενοι την κβαντική θεωρία, αμφισβήτησαν τη δυνατότητα κατάρρευσης σε ένα μοναδικό σημείο άπειρης πυκνότητας (σημείο δημιουργίας της μοναδικότητας) και υποστήριξαν πως λίγο πριν φτάσουμε σε αυτό το σημείο, η μαύρη τρύπα μετασχηματίζεται σε λευκή. Με λίγα λόγια, υποστήριξαν πως το φαινόμενο «μαύρη τρύπα» είναι απλώς μια προσωρινή κατάσταση, πριν αυτή “εκραγεί” σε λευκή.

Σε αυτή τη φάση γεννιέται ένα ερώτημα: αν η διαδικασία δημιουργίας μίας λευκής τρύπας ακολουθεί την θεωρία των Rovelli και Haggard, γιατί δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ; Προς υπεράσπιση της θεωρίας, παρόλο που η διαδικασία μετασχηματισμού χρειάζεται ελάχιστο χρόνο για να ολοκληρωθεί, η βαρυτική δύναμη είναι τόσο μεγάλη ώστε να διαστέλλει το χρόνο με αποτέλεσμα ο παρατηρητής να χρειάζεται δισεκατομμύρια χρόνια για να αντιληφθεί τη μετάβαση.

## ΓΚΟΓΚΑ ΑΝΤΡΙΑΝ

Η ισχύ μίας τέτοιας θεωρίας θα έλυne το πρόβλημα που δημιουργείται όταν πληροφορία εισέρχεται σε μία μαύρη τρύπα και “ καταστρέφεται” ( παράδοξο της πληροφορίας ) , που κατά τους νόμους της φυσικής θα πρέπει να διατηρείται .



*Η ΣΧΕΣΗ ΓΙΝΓΚ ΓΙΑΝΓΚ ΛΕΥΚΗΣ ΚΑΙ ΜΑΥΡΗΣ ΤΡΥΠΙΑΣ*

## ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΤΗΣ ΦΥΣΗΣ

Σε αυτή τη φάση θα κάνουμε μία αναφορά στις δυνάμεις της φύσης και τους αντίστοιχους φορείς τους. Αυτό, σε συνδυασμό με τις έννοιες και τις πληροφορίες που αναλύσαμε πιο πάνω, θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τη σημασία της ανακάλυψης των βαρυτικών κυμάτων, με τα οποία θα ασχοληθούμε εκτενώς στη συνέχεια.

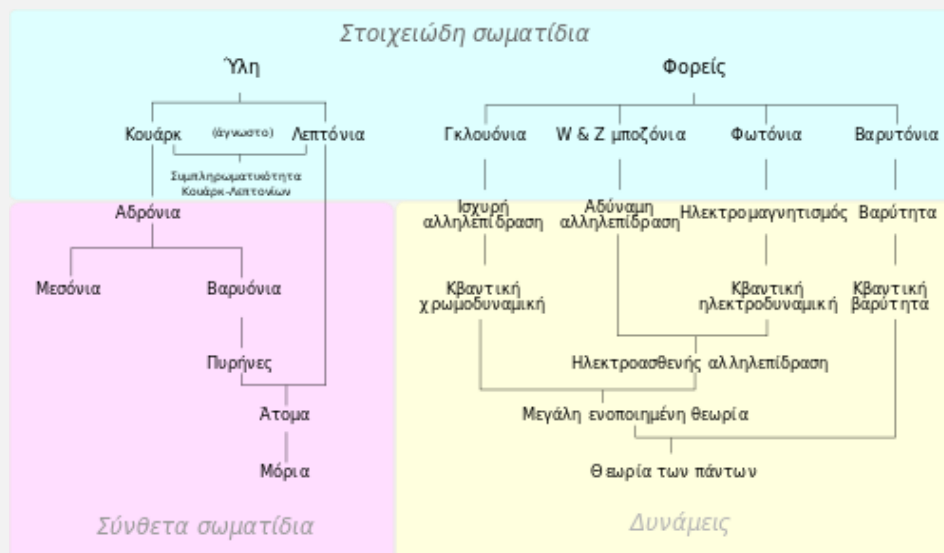
Στη φύση υπάρχουν τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις. Η κάθε μία έχει ένα πεδίο δράσης, ένα μέτρο και έναν φορέα:

- i. **Ισχυρή δύναμη:** είναι η πιο ισχυρή αλλά με μικρό πεδίο ισχύος (περίπου στο 1 femtometre). Ο φορέας αυτής της δύναμης είναι το γλουόνιο. Είναι η δύναμη που ασκείται σε quark και antiquark, το οποίο σε μεγαλύτερη κλίμακα μεταφράζεται ως τη δύναμη που κρατάει ενωμένα πρωτόνια και νετρόνια ώστε να σχηματιστεί ένας πυρήνας.
- ii. **Ηλεκτρομαγνητική δύναμη:** είναι η δεύτερη σε ισχύ αλλά έχει μεγάλο πεδίο δράσης το οποίο εκτείνεται στο άπειρο. Ο φορέας της είναι το φωτόνιο. Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη μελετά τα φαινόμενα που απορρέουν από το ηλεκτρικό φορτίο των σωματιδίων και από την αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών με τα μαγνητικά πεδία. Η θεμελιώδης αυτή δύναμη επιτρέπει την κατανόηση πολλών φυσικών φαινομένων όπως ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός, και το φως, και αποτελεί το πρώτο δείγμα ενοποίησης δύο διαφορετικών δυνάμεων -του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού- στη φυσική. Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση εμφανίζεται μεταξύ των αντικειμένων που διαθέτουν ηλεκτρικό φορτίο, τα οποία με τη σειρά τους αποτελούν τις πηγές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Το πεδίο αυτό διαδίδεται στο χώρο με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ένα κυματικό φαινόμενο για το οποίο δεν απαιτείται η μεσολάβηση κάποιου υλικού μέσου για την διασπορά του στο κενό και το οποίο ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός.
- iii. **Ασθενής δύναμη:** το μέτρο της είναι της τάξης των nano ( $10^{-9}$ ) και έχει περιορισμένο εύρος δράσης στα 0.001 femtometre. Ο φορέας της είναι τα μποζόνια  $W^\pm$  και  $Z$ . Το πιο οικείο αποτέλεσμα της ασθενούς



αλληλεπίδρασης είναι η διάσπαση βήτα (των νετρονίων στον ατομικό πυρήνα) και η σχετιζόμενη με αυτήν ραδιενέργεια. Η λέξη ασθενής προέρχεται από το γεγονός ότι η έντασή της είναι περίπου 10<sup>13</sup> φορές μικρότερη από την αντίστοιχη της ισχυρής αλληλεπίδρασης.

- iv. **Βαρυτική δύναμη:** Έχει μέτρο της τάξης του 10<sup>-38</sup> και το εύρος της δράσης του εκτείνεται στο άπειρο. Ωστόσο, το σημείο στο οποίο θέλουμε να εστιάσουμε είναι ο φορέας αυτής της δύναμης: το βαρυτόνιο (γκραβιτόνιο). Το βαρυτόνιο ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το κβάντο της βαρυτικής ακτινοβολίας υπό μορφή βαρυτικών κυμάτων όπως αυτά προβλέπονται από την Γενική Σχετικότητα .



Για πολύ καιρό οι γνώσεις μας περιορίζονταν, σε μία σχετικά βαθιά κατανόηση των τριών πρώτων θεμελιωδών δυνάμεων της φύσης ενώ, όσον αφορά την βαρυτική δύναμη, υπήρχαν αμφιβολίες και συζητήσεις για την φυσική που εξηγεί και ερμηνεύει το φαινόμενο. Όμως, το 2016 μία επιστημονική ανακάλυψη ήρθε για να ξεθολώσει τα νερά.

### **ΒΑΡΥΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ**

Όλα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι οι βασικές και προαπαιτούμενες γνώσεις για να κατανοήσουμε στο μεγαλείο της μία από τις μεγαλύτερες επιστημονικές ανακαλύψεις. Δε θα μπορούσαμε παρά να μιλάμε για την ανακάλυψη των βαρυτικών κυμάτων, η οποία ανακοινώθηκε επίσημα στις 11 Φεβρουαρίου 2016. Ωστόσο, όπως και στην πλειοψηφία όλων των πειραμάτων επιστημονικής φύσης, τα αποτελέσματα δεν εμφανίστηκαν παρά μόνο μετά από μεγάλη προσπάθεια και χρόνια αφοσίωσης των ειδικών. Από το 1999 όπου το LIGO ολοκληρώθηκε, μέχρι το 2016, η διαδρομή ήταν μεγάλη και όχι χωρίς εμπόδια.

## Η ΔΙΑΔΡΟΜΗ

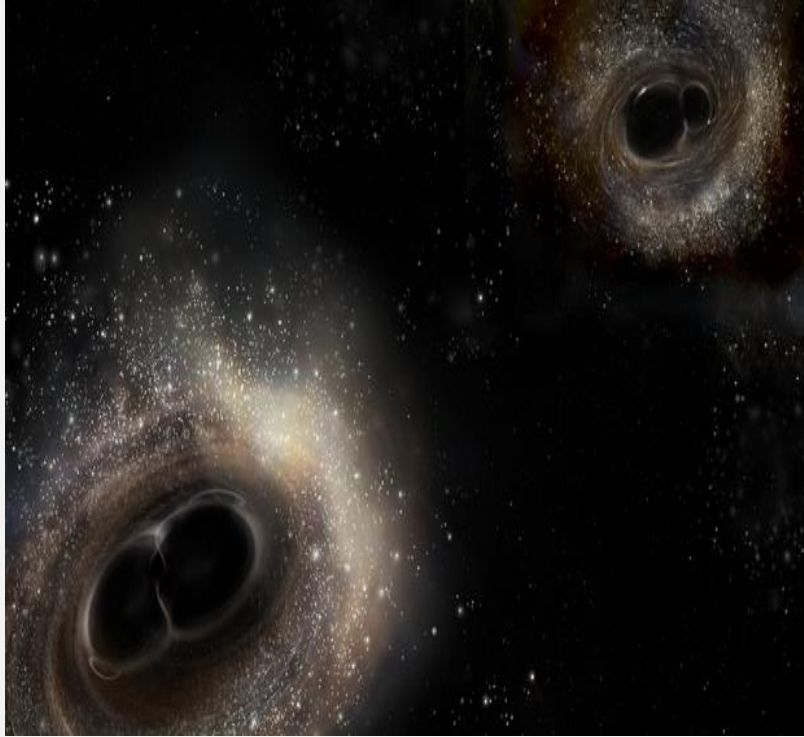
Ο δρόμος για την ανίχνευση ξεκινά κάπου στα μέσα της δεκαετίας του 1970, όπου έγινε στο M.I.T μία έρευνα για την δημιουργία ενός συμβολόμετρου λέιζερ διαστάσεων της τάξης χιλιομέτρων που συμπεριλάμβανε και πρόβλεψη των πιθανών πηγών θορύβου .

Η κατασκευή του LIGO ( Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory ) ολοκληρώθηκε το 1999. Το U.S. National Science Foundation αλλά και άλλες χώρες χρηματοδοτούν το LIGO και διαχειρίζεται από την Caltech (California Institute of Technology) και από το MIT (Massachusetts Institute of Technology). Τα δεδομένα που συλλέγονται είναι διαθέσιμα σε ιδρύματα που συνεργάζονται στον κόσμο και ανάμεσα στους ερευνητές αυτών των ιδρυμάτων βρίσκονται και πολλοί Έλληνες.

Ο σκοπός αυτού του γιγαντιαίου συμβολόμετρου είναι η διεύρυνση του τομέα της αστροφυσικής που ασχολείται με τα βαρυτικά κύματα και ειδικότερα η ανίχνευση αυτών. Οι ανιχνευτές του LIGO χρησιμοποιούν συμβολόμετρα laser για να εντοπίσουν και να μετρήσουν διαταραχές στο χωροχρόνο, που συμβαίνουν ανάμεσα σε στάσιμους καθρέπτες, τα οποία προκαλούνται από βαρυτικά κύματα που περνάνε από το σημείο. Η ανίχνευση για βαρυτικά κύματα ξεκίνησε το 2002 και ολοκληρώθηκε το 2010, χωρίς όμως να φέρει κάποια χρήσιμα αποτελέσματα.

Το 2010 ολοκληρώνεται η αρχική λειτουργία του LIGO και αρχίζει η εγκατάσταση του advanced LIGO με σκοπό την βελτιστοποίηση της ευαισθησίας ανίχνευσης. Το 2014 ολοκληρώνεται η εγκατάσταση και την επόμενη χρονιά, τα θετικά αποτελέσματα των δοκιμών αποδεικνύουν την επιτυχία της τροποποίησης.

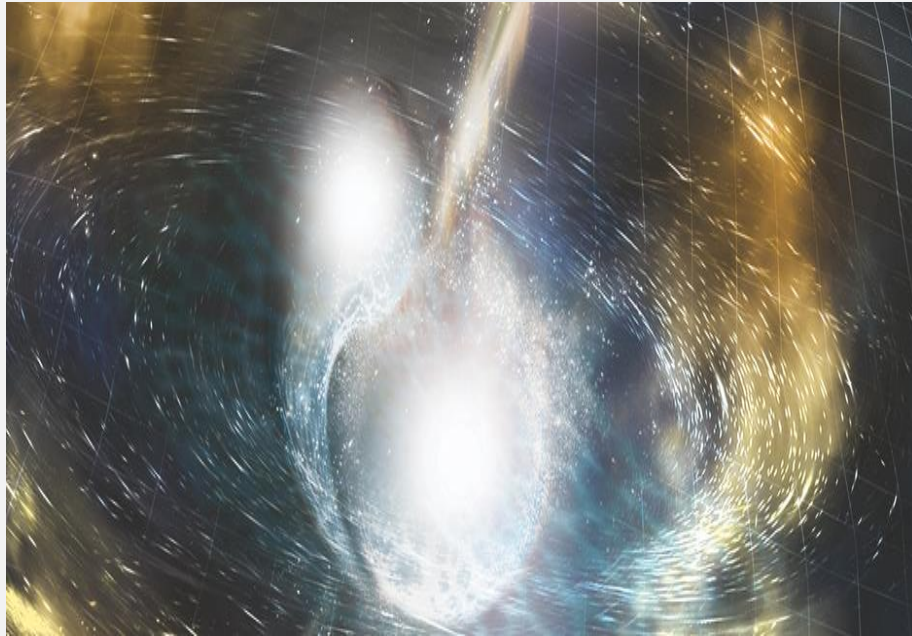
Τον Σεπτέμβρη του 2015 γίνεται ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων από τη σύγκρουση δύο μελανών οπών και τον Δεκέμβρη της ίδιας χρονιάς ξανά παρατηρήθηκαν ύστερα από τη συγχώνευση δύο μαύρων τρυπών που ανήκαν σε δυαδικό σύστημα.



*ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΜΕΛΑΝΩΝ ΟΠΩΝ*

Τον Ιανουάριο του 2016 ολοκληρώθηκε η πρώτη φάση παρατήρησης του LIGO και έγινε η επίσημη ανακοίνωση για την σπουδαία αυτή ανακάλυψη. Ωστόσο η έρευνα δε σταμάτησε εκεί αλλά ίσα ίσα τα ανατρεπτικά αποτελέσματα έδωσαν το έναυσμα στους επιστήμονες να συνεχίσουν την έρευνά τους.

Έτσι το 2017 το έργο συνεχίζεται και τον Αύγουστο γίνονται δύο πολύ σημαντικές ανιχνεύσεις. Αρχικά μία ακόμα σύγκρουση μελάνων οπών και στη συνέχεια, σε συνεργασία με το VIRGO, γίνεται ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων που εκπέμπονται από την σύγκρουση δύο αστέρων νετρονίου . Στις 25 Αυγούστου ολοκληρώνεται η δεύτερη φάση στο πρόγραμμα του LIGO .



*ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΑΣΤΕΡΩΝ ΝΕΤΡΟΝΙΟΥ*

Τον Οκτώβρη του 2017 γίνεται η απονομή του βραβείου Νόμπελ φυσικής στους συνιδρυτές του LIGO Reiner Weiss, Barry Barish και Kip Thorne. Βραβείο, που όπως ανέφερε ο ίδιος ο Weiss στην ομιλία του, δέχονται και εκ μέρους όλων των υπολοίπων χιλιάδων επιστημόνων και τεχνικών που συμμετείχαν στο πρόγραμμα, πράγμα που υπογραμμίζει το μεγαλείο αυτής της επιτυχίας.

Από το 2017 μέχρι και σήμερα η έρευνα στο τομέα των βαρυτικών κυμάτων συνεχίζεται και συγκεντρώνονται επιπλέον δεδομένα από τη σύγκρουση αστέρων νετρονίου και ίσως το 2020 να μην είναι μόνο μία νέα δεκαετία, αλλά μία εντελώς νέα εποχή για την αστροφυσική, μιάς και γίνονται μεγάλα άλματα. Φαίνεται πως είμαστε πλέον στο σωστό δρόμο για την κατανόηση μυστήριων φαινομένων.

## ΟΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Έχει ενδιαφέρον σε αυτό το σημείο να παρατηρήσουμε τις εγκαταστάσεις του LIGO και να σταθούμε στις διαστάσεις τους αλλά και την οργάνωση τους για την βέλτιστη λειτουργία. Το εργαστήριο LIGO λειτουργεί με δύο ανιχνευτές: LIGO Hanford και LIGO Livingstone στη Washington και στη Louisiana αντίστοιχα, σε απόσταση 3000 km. Μπορούμε να δούμε τις εντυπωσιακές τους διαστάσεις στις κάτω εικόνες.



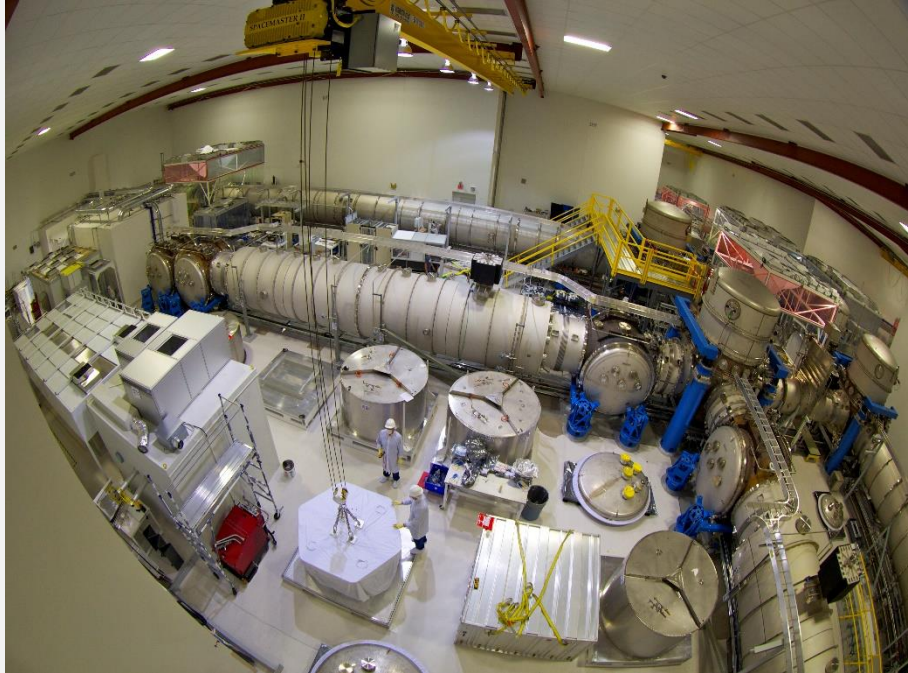
*LIGO HANFORD*



*LIGO LIVINGSTON*

## ΓΚΟΓΚΑ ΑΝΤΡΙΑΝ

Τα εργαστήρια του Hanford και Livingstone διαθέτουν μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας τα οποία και χειρίζονται έμπειροι τεχνικοί. Παρακάτω βλέπουμε το εσωτερικό του εργαστηρίου του πρώτου και έναν τεχνικό εν ώρα εργασίας στο δεύτερο.



*ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ HANFORD*



*ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΕΝ ΩΡΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ*

## ΓΚΟΓΚΑ ΑΝΤΡΙΑΝ

Τέλος βλέπουμε τις εγκαταστάσεις του Virgo , τον ευρωπαϊό “αδελφό” του LIGO. Βρίσκεται στην Cascina της Ιταλίας και αποτελεί ευρωπαϊκό πρόγραμμα ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων που σε συνεργασία με το LIGO πέτυχε σπουδαία αποτελέσματα.



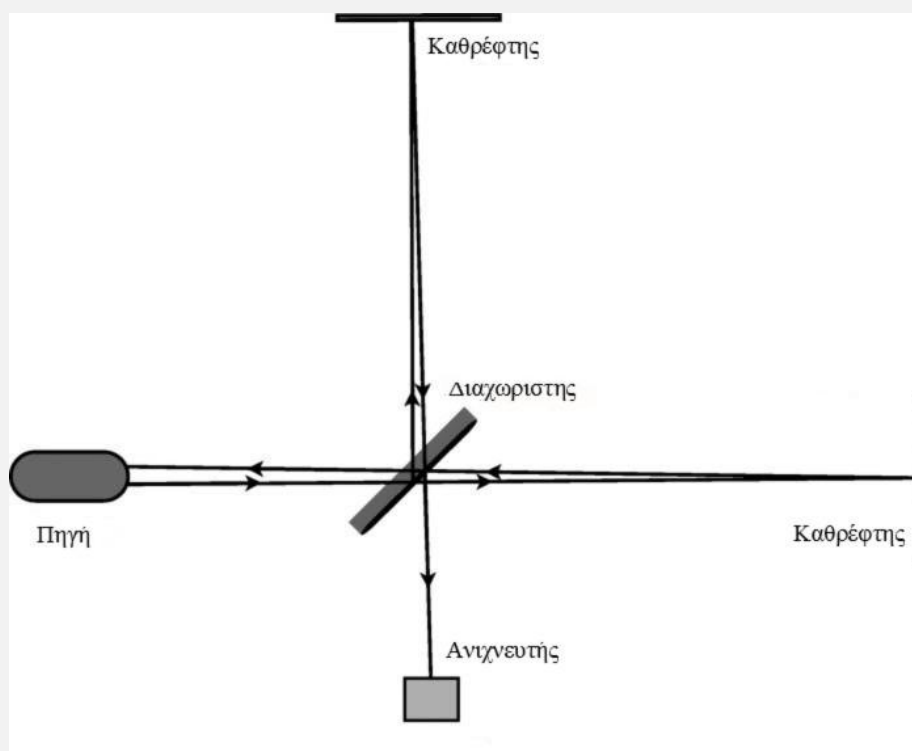
*VIRGO CASCINA ITALY*



## Η ΦΥΣΙΚΗ

Σε αυτή τη φάση θα εμβαθύνουμε σε όσα προαναφέραμε για το πως λειτουργούν ουσιαστικά οι ανιχνευτές. Θα πρέπει αρχικά να μιλήσουμε για συμβολόμετρα Michelson Morley. Ευρέως διαδεδομένα σήμερα, τα συμβολόμετρα εφευρέθηκαν τον 19ο αιώνα από τον Albert Michelson. Το συμβολόμετρο Michelson χρησιμοποιήθηκε το 1887 από τον ίδιο κι αργότερα στο περίφημο πείραμα Michelson-Morley, το οποίο ερευνούσε την ύπαρξη του αιθέρα, μιας ουσίας που θεωρούνταν ότι υπήρχε στο Σύμπαν εκείνη την εποχή. Όλα τα σύγχρονα συμβολόμετρα εξελίχθηκαν με βάση αυτό, αφού επιδείκνυε πως οι ιδιότητες του φωτός μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να γίνουν πολύ μικρές μετρήσεις. Η εφεύρεση των λέιζερ αργότερα διευκόλυνε και διεύρυνε αυτές τις μετρήσεις όπως αυτές που απαιτούνται στο LIGO.

Το συμβολόμετρο αποτελείται από δύο καθρέπτες, έναν πομπό (λέιζερ), έναν δέκτη και έναν διαχωριστή ακτίνας.

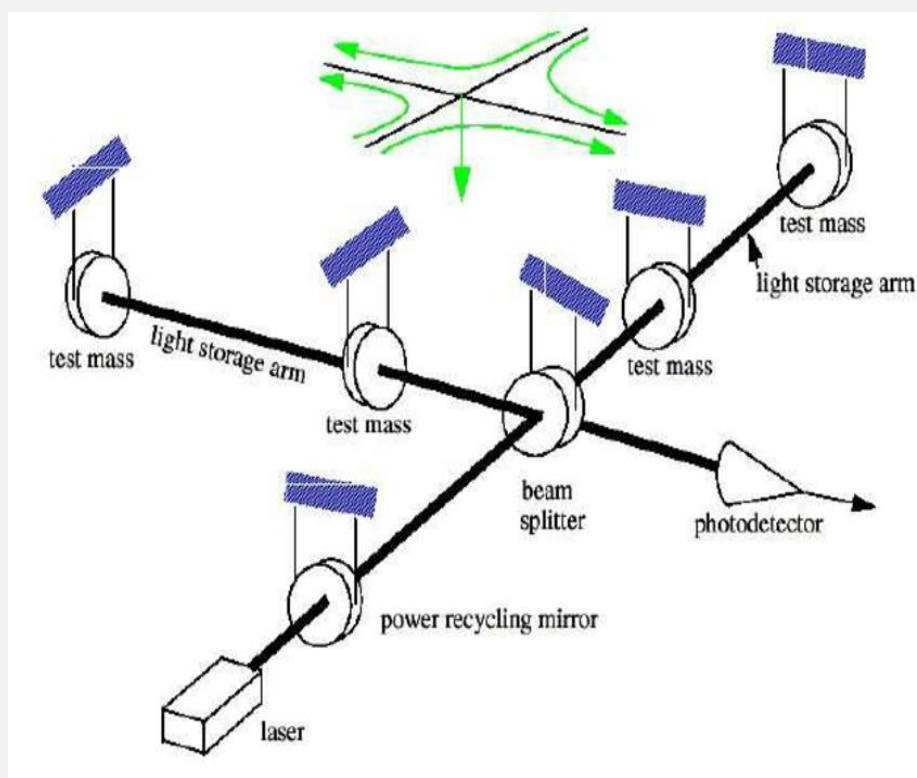


ΔΙΑΤΑΞΗ MICHELSON MORLEY

Παρόλο που ο επιστημονικός συλλογισμός πίσω από το πείραμα είναι αρκετά σύνθετος, το ίδιο το πείραμα είναι αρκετά απλό. Ας δούμε λοιπόν πως από το Michelson φτάσαμε στα συμβολόμετρα στο LIGO.

## ΓΚΟΓΚΑ ΑΝΤΡΙΑΝ

Το LIGO αποτελείται από δυο τεράστια συμβολόμετρα λέιζερ (τα οποία όπως προαναφέραμε βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση το ένα από το άλλο) μήκους 4km σε σχήμα L και βασίζονται στη δομή των συμβολόμετρων του Michelson. Εκτός από το κοινό σχήμα, έχουν επίσης καθρέφτες στα άκρα των βραχιόνων τους που αντανακλούν το φως και ανιχνευτές που μετράνε την ένταση του φωτός που προκύπτει από την συμβολή των δυο αρχικών δεσμών. Ωστόσο τα συμβολόμετρα του LIGO ξεπερνάνε κατά πολύ σε μέγεθος και πολυπλοκότητα αυτά του Michelson.



*ΕΜΦΑΝΗΣ Η ΟΜΟΙΟΤΗΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟ MICHELSON MORLEY*

Οι ακτίνες λέιζερ είναι ακριβώς ρυθμισμένες ώστε, κάθε φορά που δυο ακτίνες συναντιούνται στη γωνία L, το φως να συνδυάζεται και ακτίνες αλληλοεξουδετερώνονται. Αυτό σημαίνει ότι η κορυφή του κύματος που διασχίζει το ένα σκέλος συμπίπτει με την κοιλάδα του κύματος που διασχίζει το άλλο σκέλος, με αποτέλεσμα τα δυο σήματα να αλληλοαναιρούνται. Οι φυσικοί ονομάζουν αυτό το φαινόμενο συμβολή του φωτός.

Εάν τώρα προσπέσει στο βραχίονα κάποιο βαρυτικό κύμα, τότε θα συμπιέσει το ένα σκέλος και θα επιμηκύνει το άλλο. Οι κορυφές και οι κοιλάδες του κύματος φωτός παύουν να συμπίπτουν κι έτσι τα δυο σήματα σταματούν να αλληλοακυρώνονται. Το αποτέλεσμα είναι ένα ανιχνεύσιμο σήμα από τη συμβολή του φωτός, λόγω της βαρυτικής παρεμβολής.

Η διάταξη L του πειράματος LIGO έχει σχεδιαστεί με τρόπο που να επιτρέπει την ανίχνευση μεταβολών μεγέθους  $10^{-16}$  εκατοστών ή περίπου εκατό εκατομμυριοστά της διαμέτρου του υδρογόνου. Μικροσκοπικές διακυμάνσεις αυτού του μεγέθους μπορεί να τις προκαλέσουν όμως και πολλά καθημερινά φαινόμενα, όπως ένας μικρός σεισμός, ή τα κύματα που χτυπούν την ακτή ή η πτώση των δέντρων που κόβουν οι υλοτόμοι στο παρακείμενο δάσος. Κατασκευάζοντας δυο πανομοιότυπα εργαστήρια σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους με σκοπό την ταυτόχρονη ανίχνευση σημάτων και στα δυο, οι επιστήμονες μπορούν ουσιαστικά να αποκλείσουν αυτές τις τοπικές επιρροές.

## ΕΛΛΗΝΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ

Στη διεθνή επιστημονική κοινοπραξία LIGO που έκανε τη βαρυσήμαντη ανακοίνωση συμμετέχουν αρκετοί Έλληνες όπως η Βίκυ Καλογερά, καθηγήτρια αστροφυσικής του Πανεπιστημίου Northwestern του Σικάγο, ο αναπληρωτής καθηγητής Ερωτόκριτος Κατσαβουνίδης από το MIT, ο μεταδιδακτορικός ερευνητής Αντώνης Κοντός επίσης από το MIT, ο διδακτορικός ερευνητής Μιχάλης Αγάθος από το Εθνικό Ινστιτούτο Υποατομικής Φυσικής Ολλανδίας-πείραμα Virgo, η Μαίρη Σακκελαριάδου από το King's College, ο Νικόλας Δήμος από το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια, ο Λέων Δεληγιαννίδης, ο Ανδρέας Μελάτος από το Πανεπιστήμιο της Μελβούρνης και ο Αντώνης Μυτίδης από το Πανεπιστήμιο της Φλόριντα. Εύκολα καταλαβαίνουμε ότι η συμβολή τους όχι μόνο είναι τεράστιας σημασίας σε παγκόσμιο επιστημονικό επίπεδο αλλά παράλληλα, οι επιστήμονες αυτοί κάνουν περήφανους όλους εμάς τους Έλληνες, που δε μπορούμε παρά να θαυμάσουμε την ευφυΐα και την σκληρή τους δουλειά.



*ΟΙ ΕΛΛΗΝΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΕΣ*

## ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΚΑΛΟΓΕΡΑ

Η Βασιλική (Βίκυ) Καλογερά είναι ελληνίδα αστροφυσικός. Είναι καθηγήτρια στο Πανεπιστήμιο Northwestern (Illinois, USA) και διευθύντρια στο κέντρο Διεπιστημονικής Εξερεύνησης και Έρευνας της Αστροφυσικής (CIERA). Είναι ηγετικό μέλος του LIGO Collaboration το οποίο μελέτησε τα βαρυτικά κύμματα το 2015.

Λόγω των πολλών επιτευγμάτων της και των διακρίσεων της θα ήταν πρόπων να κάνω ένα ειδικό αφιέρωμα στην κυρία Καλογερά. Μετά το πτυχίο στη Φυσική που έλαβε από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης το 1992 και το διδακτορικό της από το University of Illinois το 1997, η Καλογερά είχε μια εξαιρετική σταδιοδρομία στο πεδίο ερευνάς της το οποίο έχει αναγνωρισθεί από πολλούς. Πιο συγκεκριμένα:

- **2002:** Κατέλαβε το βραβείο Annie Jump Cannon της Αμερικανικής Αστρονομικής Εταιρείας, το οποίο αναγνωρίζει την εξαιρετική έρευνα από μεταδιδακτορική γυναίκα ερευνήτρια.
- **2008:** Έλαβε το βραβείο Maria Goepfert-Mayer της Αμερικανικής Εταιρείας Φυσικών για την μελέτη της πάνω στην εξέλιξη και το μέλλον των συμπαγών δυαδικών αντικειμένων.
- **2016:** Πήρε το βραβείο Hans Bethe από την Αμερικανική Εταιρεία Φυσικών για βασικές συνειρφορές στην μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής και βαρυτικής ακτινοβολίας κυμάτων από δυαδικά συμπαγή αντικείμενα, συμπεριλαμβανομένης της τώρα επαληθευμένης πρόβλεψης ότι οι συγχωνεύσεις αστεριών νετρονίων παράγουν μικρές εκρήξεις ακτίνων γάμμα που θα βρεθούν σε όλους τους τύπους γαλαξιών.
- **2018:** Βραβεύθηκε με το βραβείο Dannie Heineman Αστροφυσική για το έργο της στη μελέτη των μαύρων τρυπών, των αστέρων νετρονίων και των λευκών νάνων στα αστροφυσικά συστήματα.



### ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η επιστήμη, όπως είδαμε παραπάνω, έκανε γιγαντιαία άλματα στον τομέα της αστροφυσικής. Η νέα γνώση που αντλήσαμε από τις σπουδαίες ανακαλύψεις, όπως τα βαρυτικά κύματα, θα παίζει ουσιαστικό ρόλο στην τεχνολογική εξέλιξη της ανθρωπότητας.

Για να παραμείνουμε στο σωστό δρόμο για την εξέλιξη αυτή πρέπει να συνεχίζουμε να κοιτάμε ψηλά τον γεμάτο άστρα ουρανό και να αφήσουμε την έμφυτη περιέργεια που χαρακτηρίζει το είδος μας να μας οδηγεί στο άγνωστο .... «to boldly go, where no man has gone before όπως θα έλεγε ο Captain Kirk» ....

Όμως να μην ξεχνάμε ότι για κάθε μεγάλη ανακάλυψη στη φυσική δημιουργούνται άλλες χίλιες νέες ερωτήσεις. Αυτό καθιστά αναγκαία την επιστράτευση λαμπρών επιστημών για την σκληρή εργασία και προσπάθεια που είναι απαραίτητη για να απαντηθούν.

Ωστόσο δε μπορούμε παρά να νιώθουμε περηφάνεια για τα μυαλά που μας έφεραν μέχρι εδώ, ειδικά όταν τα μυαλά αυτά είναι συμπατριώτες μας. Με το έργο τους απέδειξαν για μία ακόμη φορά ότι η Ελλάδα όχι μόνο έδωσε τα φώτα του πολιτισμού στην αρχαιότητα, αλλά συνεχίζει να συμβάλει ενεργά και με πνεύμα συνεργασίας και στη σύγχρονη εποχή.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλυσσανδράκης, Κ.Ε, (2014). Εισαγωγή στην Αστροφυσική. ΠΑΠΑΖΗΣΗΣ
- Serway, R., Moses, C. and Moyer, C, 2018 Modern Physics Saunders College Publishing
- YOUNG, H., 2019. UNIVERSITY PHYSICS. PEARSON.
- LIGO Lab | Caltech. 2020. LIGO Lab | Caltech | MIT. [online] Available at: <<https://www.ligo.caltech.edu/>>
- Eventhorizontelescope.org. 2020. Event Horizon Telescope. [online] Available at: <<https://eventhorizontelescope.org/>>
- Ntrs.nasa.gov. 2020. [online] Available at: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110015936.pdf>>
- Physics4u.gr. 2020. Διαγαλαξιακό Μετρό: Πάνω Στο Εξπρές Της Σκουληκότρυπας – Φυσική Για Όλους. [online] Available at: <<http://physics4u.gr/blog/2012/03/16/%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CE%B3%CE%B1%CE%BB%CE%B1%CE%BE%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CF%8C-%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CF%8C-%CF%80%CE%AC%CE%BD%CF%89-%CF%83%CF%84%CE%BF->>

%CE%B5%CE%BE%CF%80%CF%81%CE%AD%CF%82-

%CF%84%CE%B7/>

- Nemertes.lis.upatras.gr. 2020. [online] Available at:  
  
<<https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/9872/3/Fallida%28math%29.pdf>>
- Ellines.com. 2020. ΒΙΚΥ ΚΑΛΟΓΕΡΑ - Ελληνίδα Αστροφυσικός Τιμάται Με Το Βραβείο «Χανς Μπέτε». [online] Available at:  
  
<<https://www.ellines.com/good-news/24896-ellinida-astrofusikos-timatai-me-to-brabeio-xans-mpete/>>.
- Kathimerini.gr. 2020. Η Αστροφυσικός Βίκυ Καλογερά Στην «Κ»: Πρώτη Φορά Ακούμε Κυριολεκτικά Το Σύμπαν, Της Τασούλας Επτακοίλη | Kathimerini. [online] Available at:  
  
<<https://www.kathimerini.gr/980206/gallery/proswpa/syntey3eis/h-astrofysikos-viky-kalogera-sthn-k-prwth-fora-akoyme-kyriolektika-to-sympan>>.