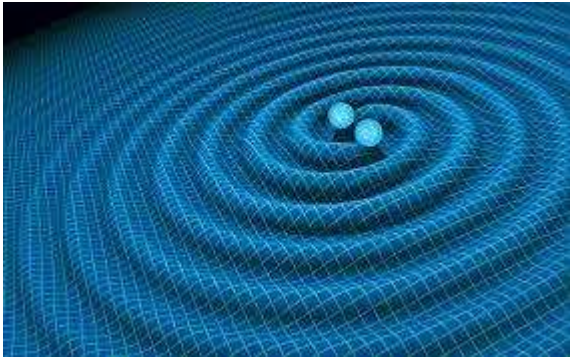


# Ο Maxwell, ο Einstein και τα κύματα

Από **Κώστας Παπαχρήστου** - 23 Φεβρουαρίου 2016



## 1. Εισαγωγή

Αν αναζητούσαμε τις κορυφαίες μορφές της Θεωρητικής Φυσικής κατά τον δέκατο-ένατο και τον εικοστό αιώνα, θα καταλήγαμε χωρίς δυσκολία στον **James Clerk Maxwell** (1831-1879) και τον **Albert Einstein** (1879-1955), αντίστοιχα. Μεταξύ των πολλών επιτευγμάτων τους, ο πρώτος ενοποίησε τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό σε μία ενιαία ηλεκτρομαγνητική θεωρία και πρόβλεψε την ύπαρξη των **ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων** (χωρίς τα οποία η ίδια η ζωή αλλά και οι επικοινωνίες μας θα ήταν αδύνατες), ενώ ο δεύτερος άλλαξε για πάντα την αντίληψή μας για το χώρο και το χρόνο και διατύπωσε τη μοντέρνα θεωρία της βαρύτητας, στο πλαίσιο της οποίας προέβλεψε τα **κύματα βαρύτητας**.

Ο Maxwell έφυγε από τη ζωή αρκετά νέος και δεν ευτύχησε να δει, λίγα χρόνια αργότερα, την πειραματική επαλήθευση της θεωρίας του για την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όσο για τον Einstein, κατά μία έννοια στάθηκε πιο «*τυχερός*» αφού θα ήταν ούτως ή άλλως βιολογικά αδύνατο να βρίσκεται παρών, εν έτει 2016, στην επίσημη αναγγελία της πλήρους επιβεβαίωσης της Γενικής Σχετικότητας σε ό,τι αφορά τα κύματα βαρύτητας!

Στο άρθρο που ακολουθεί θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε τι είναι τα μυστηριώδη κύματα που πρώτοι πρόβλεψαν οι δύο αυτοί γίγαντες της Φυσικής Επιστήμης των περασμένων δύο αιώνων. Για βαθύτερη και πιο εξειδικευμένη προσέγγιση στο θέμα, ο αναγνώστης παραπέμπεται στις πηγές που παρατίθενται στο τέλος.

## 2. Ο Maxwell και η πρώτη θεωρία ενοποίησης αλληλεπιδράσεων

Έχουμε συνηθίσει να ακούμε για τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό σαν δύο ξεχωριστά φυσικά φαινόμενα. Κάθε ηλεκτρικό φορτίο (ανεξάρτητα από την κίνησή του) δέχεται μια δύναμη όταν βρίσκεται μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, ενώ σε κάθε κινούμενο φορτίο ασκείται δύναμη μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο.

Πράγματι, αν ζούσαμε σε έναν εξωπραγματικό κόσμο όπου όλα τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία έμεναν αμετάβλητα μέσα στο χρόνο, δεν θα είχαμε επίγνωση ότι τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά φαινόμενα είναι αλληλένδετα και αμοιβαία εξαρτημένα. Οι περίφημες τέσσερις **εξισώσεις του Maxwell** [1,2] θα έσπαζαν σε δύο ανεξάρτητα ζευγάρια, ένα για κάθε πεδίο (ηλεκτρικό και μαγνητικό).

Το 1831, όμως, σε μια σειρά πειραμάτων του [2], ο **Michael Faraday** ανακάλυψε κάτι ενδιαφέρον: κάθε φορά που ένα μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται χρονικά, ένα ηλεκτρικό πεδίο κάνει απαραίτητα την εμφάνισή του! Αν και δεν υπήρχαν τότε ανάλογες πειραματικές ενδείξεις, ο Maxwell πρόβλεψε πως και το αντίστροφο ήταν αληθές. Δηλαδή, ένα μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται κάθε φορά που ένα ηλεκτρικό πεδίο αλλάζει χρονικά. Έτσι, δεν θα έπρεπε στο εξής να ξεχωρίζουμε απόλυτα τα ηλεκτρικά από τα μαγνητικά φαινόμενα, αφού το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μοιάζουν να είναι σε στενή εξάρτηση μεταξύ τους.

Από ιστορική άποψη, έχουμε εδώ την πρώτη θεωρία ενοποίησης φαινομενικά διαφορετικών δυνάμεων (αλληλεπιδράσεων) – των ηλεκτρικών και των μαγνητικών – σε μία ενιαία **ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση**. Ο εικοστός αιώνας θα διεύρυνε το «κάδρο» της ενοποίησης βάζοντας στο παιχνίδι την ασθενή και την ισχυρή αλληλεπίδραση, και κάνοντας μια ηρωική προσπάθεια να εντάξει στο σχήμα και τη δύστροπη βαρύτητα...

### **3. Ηλεκτρομαγνητικά κύματα**

Με τη μαθηματική ιδιοφυΐα που τον διέκρινε, ο Maxwell κωδικοποίησε τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα με τέσσερις περίπλοκες εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο χώρο και το χρόνο [1,2]. Από τις εξισώσεις αυτές προκύπτει το ενδιαφέρον συμπέρασμα ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει κυματικές ιδιότητες [1]. Δηλαδή, μια μεταβολή (διαταραχή) του πεδίου σε κάποιο σημείο του χώρου δεν γίνεται ακαριαία αισθητή σε άλλα σημεία αλλά διαδίδεται μέσω ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός. Ειδικά, το ίδιο το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα που έχει την ιδιότητα να γίνεται αντιληπτό από εμάς διότι ερεθίζει το αισθητήριο της όρασής μας.

Δεν χρειάζεται, νομίζω, να τονίσω τη σημασία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για τη ζωή μας! Μέσω αυτών λαμβάνουμε φως και ζέστη από τον Ήλιο (αλλά, δυστυχώς, και άλλες ακτινοβολίες που είναι βλαπτικές για εμάς), απολαμβάνουμε στερεοφωνική μουσική στο ραδιόφωνο, βλέπουμε ποδοσφαιρικούς αγώνες στην τηλεόραση, επικοινωνούμε με τα κινητά μας τηλέφωνα... Όμως, πώς παράγονται αυτά τα κύματα;

Καταρχήν, λίγη ορολογία: Η διάδοση ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καλείται **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία**. (Στο εξής θα γράφουμε, σύντομα, «*H/M κύματα*» και «*H/M*

ακτινοβολία»). Έτσι, ένα φυσικό σύστημα που εκπέμπει ενέργεια στη μορφή Η/Μ κυμάτων λέμε ότι εκπέμπει Η/Μ ακτινοβολία ή, απλά, ότι **ακτινοβολεί**. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι τα άτομα, τα μόρια, οι πυρήνες, τα θερμά σώματα, οι κεραιές των ραδιοφωνικών σταθμών, κλπ.

Από μια προσεκτική εξέταση των εξισώσεων του Maxwell προκύπτει ότι η Η/Μ ακτινοβολία παράγεται με βασικά δύο τρόπους: (α) με **επιταχυνόμενα** ηλεκτρικά φορτία, και (β) με χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά ρεύματα [1]. Ειδικά, ένα φορτίο που κινείται με σταθερή ταχύτητα (ευθύγραμμο και ομαλά) *δεν* ακτινοβολεί. Συνηθίζω να το εξηγώ αυτό στους μαθητές μου (πριν τους βομβαρδίσω με εξισώσεις) χρησιμοποιώντας την παρακάτω παραβολή:

Μια ζεστή μέρα του καλοκαιριού, πάτε ως το περίπτερο να αγοράσετε ένα παγωτό. Για να προλάβετε πριν λιώσει, αποφασίζετε να το φάτε στο δρόμο. Βαδίζετε αμέριμνοι σε ένα ευθύγραμμο μονοπάτι με σταθερό βήμα (άρα, με σταθερή ταχύτητα) χωρίς να πάρετε είδηση ένα σμήνος από μέλισσες που σας ακολουθούν πολιορκώντας το παγωτό σας! Όταν ξαφνικά τις αντιλαμβάνεστε, επιταχύνετε την κίνησή σας για να τους ξεφύγετε (είτε τρέχετε πιο γρήγορα προς τα μπρος, είτε απλά αλλάζετε κατεύθυνση πορείας). Τρομαγμένες, τότε, από την κίνησή σας αυτή, κάποιες μέλισσες αποκόπτονται από το σμήνος και πετούν μακριά, χωρίς ποτέ να επιστρέψουν.

Τι σημαίνουν όλα αυτά; Το «παγωτό» είναι ένα ηλεκτρικό φορτίο που αρχικά κινείται με σταθερή ταχύτητα, μεταφέροντας στην κατεύθυνση της κίνησής του την ολική ενέργεια του Η/Μ πεδίου του (το «σμήνος των μελισσών») η οποία μένει σταθερή. Όταν το φορτίο επιταχύνεται, ένα μέρος της ενέργειας αυτής (οι «μέλισσες» που πέταξαν μακριά) αποσπάται, κατά κάποιον τρόπο, και απομακρύνεται προς το άπειρο με την ταχύτητα του φωτός, υπό μορφή Η/Μ κύματος. Και, όσο πιο μεγάλη είναι η επιτάχυνση του φορτίου, τόσο πιο μεγάλη είναι και η ενέργεια της εκπεμπόμενης Η/Μ ακτινοβολίας στη μονάδα του χρόνου.

#### 4. Ο Einstein και η Σχετικότητα

Στον κενό χώρο, η ταχύτητα του φωτός (τη συμβολίζουμε με  $c$ ) είναι περίπου 300,000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο. Όμως, έχουμε συνηθίσει να μετράμε τις ταχύτητες σε σχέση με κάποιο προκαθορισμένο **σύστημα αναφοράς**. Για παράδειγμα, όταν ένας επιβάτης περπατά κατά μήκος του διαδρόμου ενός κινούμενου λεωφορείου, η ταχύτητά του, όπως τη μετρά ένας καθιστός συνεπιβάτης του, είναι διαφορετική από εκείνη που θα κατέγραφε κάποιος που στέκεται ακίνητος στο πεζοδρόμιο. Λεωφορείο και πεζοδρόμιο είναι δύο διαφορετικά συστήματα αναφοράς ως προς τα οποία προσδιορίζεται η ταχύτητα κίνησης του επιβάτη.

Σε σχέση με ποιο σύστημα αναφοράς, λοιπόν, η ταχύτητα του φωτός έχει τη γνωστή τιμή  $c$ ; Με βάση τις αντιλήψεις της εποχής του, ο Maxwell δέχθηκε ότι η ταχύτητα διάδοσης της Η/Μ ακτινοβολίας έχει τη «σωστή» τιμή  $c$  σε ένα προνομιακό σύστημα που μένει ακίνητο ως προς τον **αιθέρα**, μια υποθετική ουσία με μεταφυσικές, σχεδόν, ιδιότητες που εθεωρείτο ότι καταλάμβανε ολόκληρο το χώρο. Σ' αυτό και μόνο το σύστημα αναφοράς θα ίσχυαν και οι εξισώσεις του Maxwell. Έτσι, κάθε παρατηρητής κινούμενος ως προς τον αιθέρα θα έπρεπε να μετρά μια τιμή της ταχύτητας του φωτός που θα διέφερε από το  $c$ , ενώ θα έπρεπε, ως προς αυτόν, τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα να μην περιγράφονται σωστά από τις εξισώσεις του Maxwell.

Κάθε πειραματική προσπάθεια, όμως, να μετρηθεί διαφορετική τιμή της ταχύτητας του φωτός για διαφορετικούς παρατηρητές που βρίσκονταν σε σχετική κίνηση, αποτύγχανε. Ο Einstein, τότε, σε ένα ιστορικό άρθρο του το 1905, διατύπωσε μια τολμηρή ιδέα: Η ταχύτητα του φωτός στο κενό έχει την **ίδια** τιμή  $c$  για **όλους** τους παρατηρητές, ανεξάρτητα από την κίνησή τους. Επί πλέον, οι νόμοι της Φυσικής – και, ειδικά, οι εξισώσεις του Maxwell – θα πρέπει να ισχύουν στην ίδια μορφή σε όλα τα συστήματα αναφοράς. (Τεχνικά μιλώντας, οι παραπάνω αρχές ισχύουν για μια ειδική κατηγορία παρατηρητών, τους **αδρανειακούς παρατηρητές**, που σχετίζονται με αντίστοιχα **αδρανειακά συστήματα αναφοράς**.) Οι αρχές αυτές αποτελούν τη βάση της **Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας**.

Στην κλασική (Νευτώνεια) Μηχανική, ο χρόνος έχει απόλυτη σημασία, κοινή για όλους τους παρατηρητές. Έτσι, σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, αν εκπέμφουμε έναν παλμό φωτός από ένα σημείο του χώρου προς ένα άλλο, διαφορετικοί παρατηρητές θα συμφωνήσουν μεταξύ τους για το χρόνο που πήρε στο φως να κάνει το ταξίδι, αν και πιθανώς θα διαφωνήσουν ως προς την απόσταση που διανύθηκε (ο κάθε παρατηρητής θα μετρά την απόσταση αυτή σε σχέση με τον εαυτό του).

Στη Σχετικότητα, εν τούτοις, όλοι οι παρατηρητές θα πρέπει να συμφωνήσουν μεταξύ τους για την ταχύτητα  $c$  με την οποία τρέχει το φως. Με δεδομένο ότι διαφωνούν, γενικά, ως προς το μήκος της διαδρομής, θα πρέπει τώρα να διαφωνήσουν *και* ως προς το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε. Έτσι, η Σχετικότητα βάζει τέλος στην ιδέα του απόλυτου χρόνου. Τα χρονικά διαστήματα, όπως κι οι χωρικές αποστάσεις, βρίσκονται σε άμεσο συσχετισμό με την κίνηση του παρατηρητή και δεν προσδιορίζονται απόλυτα.

Επί πλέον, η αμεταβλητότητα της ταχύτητας του φωτός επιβάλλει ένα είδος μαθηματικής «διαπλοκής» ανάμεσα στις χωρικές και τις χρονικές συντεταγμένες ενός συμβάντος, έτσι που η διάκριση ανάμεσα στο χώρο και το χρόνο να μην είναι απόλυτη αλλά να εξαρτάται κι αυτή από την κίνηση του παρατηρητή. Γι' αυτό το λόγο, αντί για τους χωριστούς όρους «χώρος» και «χρόνος», χρησιμοποιούμε την έκφραση **«χωροχρόνος»**.

Η Σχετικότητα δεν πείραξε τις εξισώσεις του Maxwell, αναθεώρησε όμως δραματικά τη Νευτώνεια Μηχανική, η οποία αποδείχθηκε πως ίσχυε μόνο προσεγγιστικά στο όριο των «μικρών» ταχυτήτων (σε σύγκριση, φυσικά, με την τεράστια τιμή του  $c$ !). Μεταξύ άλλων, η Σχετικότητα αποκάλυψε μια εκπληκτική – και πολύ διάσημη, πλέον – σχέση ανάμεσα στη μάζα και την ενέργεια, η οποία (σχέση) θα ήταν αδύνατο να προβλεφθεί από την κλασική Μηχανική. Η πειραματική επιβεβαίωσή της κόστισε αμέτρητες ανθρώπινες ζωές στα «εργαστήρια» της Χιροσίμα και του Ναγκασάκι...

### **5. Η βαρύτητα είναι... γεωμετρία!**

Ο χωροχρόνος της Σχετικότητας είναι τετραδιάστατος: τρεις διαστάσεις αντιστοιχούν στο χώρο και μία στο χρόνο. Ας θεωρήσουμε όμως, για ευκολία, δύο μόνο διαστάσεις, μία χωρική και μία χρονική. Στην Ειδική Σχετικότητα, η γεωμετρία του χωροχρόνου θα μοιάζει τότε με εκείνη μιας απέραντης επίπεδης επιφάνειας (αν και η μαθηματική συνταγή για τον υπολογισμό αποστάσεων θα είναι κάπως διαφορετική). Από άποψη γεωμετρικών ιδιοτήτων, μια τέτοια επιφάνεια έχει ουσιαστικές διαφορές από καμπύλες επιφάνειες όπως, π.χ., η επιφάνεια μιας σφαίρας.

Το 1915 ο Einstein διατύπωσε τη **Γενική Θεωρία της Σχετικότητας**, η οποία βασιζόταν σε μια εξαιρετικά πρωτότυπη ιδέα: Αυτό που αντιλαμβανόμαστε ως βαρύτητα δεν είναι στ' αλήθεια μια δύναμη (όπως, π.χ., οι ηλεκτρικές ή οι μαγνητικές δυνάμεις) αλλά είναι αποτέλεσμα **γεωμετρικής παραμόρφωσης του χώρου** (τεχνικά μιλώντας, του *χωροχρόνου*) λόγω της παρουσίας της ύλης. Για παράδειγμα, η Γη κινείται όπως κινείται γύρω από τον Ήλιο όχι γιατί – όπως θα 'λεγε ο Νεύτωνας – ο Ήλιος τής ασκεί μια βαρυτική δύναμη, αλλά λόγω της καμπύλωσης του χώρου που προκαλείται από την ίδια τη μάζα του Ήλιου! Ο χώρος δεν έχει πια γεωμετρικές ιδιότητες όμοιες με αυτές μιας επίπεδης επιφάνειας αλλά μάλλον με εκείνες της επιφάνειας μιας σφαίρας.

Στη Γενική Σχετικότητα, λοιπόν, το βαρυτικό πεδίο δεν αντιμετωπίζεται ως πεδίο δυνάμεων αλλά σαν πεδίο παραμορφώσεων (καμπυλώσεων ή «ρυτιδώσεων») του χώρου. Και, τοπικά, οι παραμορφώσεις αυτές είναι τόσο μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα που τις προκαλεί.

### **6. Κύματα βαρύτητας**

Τι γίνεται, όμως, όταν οι ρυτιδώσεις του χώρου, σε κάποια περιοχή του, μεταβάλλονται χρονικά λόγω ανακατανομής της ύλης στην περιοχή αυτή; Ας θυμηθούμε τι συμβαίνει στον Ηλεκτρομαγνητισμό: Κάθε ανακατανομή των πηγών του Η/Μ πεδίου (φορτίων ή ρευμάτων) σε μια περιοχή του χώρου, προκαλεί διαταραχή του Η/Μ πεδίου στην περιοχή αυτή, η οποία (διαταραχή) διαδίδεται στο χώρο με την ταχύτητα  $c$  του φωτός. Ειδικότερα, από ένα

**επιταχυνόμενο** ηλεκτρικό φορτίο εκπέμπεται ενέργεια στη μορφή Η/Μ ακτινοβολίας (διάδοση ενέργειας μέσω ενός Η/Μ κύματος). Το εκπεμπόμενο Η/Μ κύμα, έτσι, παίρνει μαζί του ένα μέρος της ολικής ενέργειας του φορτίου.

Δεν θα εκπλαγείτε, φαντάζομαι, αν ακούσετε ότι, με βάση τη θεωρία που διατύπωσε ο Einstein το 1916 (ακριβώς έναν αιώνα πριν!), ανακατανομές της ύλης σε κάποια περιοχή του χώρου προκαλούν διαταραχή της τοπικής γεωμετρίας (σε κλασικούς όρους, του πεδίου βαρύτητας) η οποία (διαταραχή) διαδίδεται στο χώρο υπό μορφή ενός **κύματος βαρύτητας** [3–6] που τρέχει κι αυτό – μαντέψτε – με ταχύτητα  $c$ ! Επί πλέον, ένα **επιταχυνόμενο** υλικό αντικείμενο χάνει μέρος της ενέργειάς του λόγω **βαρυτικής ακτινοβολίας**, όπου ο όρος εκφράζει διάδοση ενέργειας μέσω βαρυτικών κυμάτων.

Το πρόβλημα είναι ότι, ενώ ακόμα κι ένα ατομικό σύστημα μπορεί να εκπέμψει ανιχνεύσιμη Η/Μ ακτινοβολία (π.χ., ορατό φως), για να παραχθεί ανιχνεύσιμη βαρυτική ακτινοβολία απαιτούνται τεράστιες μάζες με πολύ μεγάλες επιταχύνσεις. Τέτοιες φυσικές συνθήκες πράγματι απαντώνται στο Σύμπαν (περιστρεφόμενα ζεύγη αστέρων νετρονίων ή μελανών οπών, αστρικές συγκρούσεις και αστρικές εκρήξεις, κλπ.) και η βαρυτική ενέργεια που απελευθερώνεται είναι ανυπολόγιστη. Όμως, τα φαινόμενα αυτά συμβαίνουν (ευτυχώς!) τόσο μακριά από εμάς ώστε, μέχρι να φτάσουν στη Γη, τα εκπεμπόμενα βαρυτικά κύματα θα έχουν εξασθενήσει κατά εκατομμύρια φορές. Έτσι, μόνο μια εξαιρετικά ευαίσθητη πειραματική διάταξη θα μπορούσε να τα εντοπίσει.

## **7. Τι μας χρειάζονται;**

Μέχρι τώρα, όλες οι πληροφορίες μας για τα φαινόμενα του Σύμπαντος βασίζονταν σε παρατηρήσεις μέσω της Η/Μ ακτινοβολίας (ορατό φως, ραδιοκύματα, μικροκύματα, ακτίνες Χ, κλπ.). Τα βαρυτικά κύματα μπορούν τώρα να μας δώσουν πληροφορίες που θα ήταν αδύνατο να πάρουμε αλλιώς. Για παράδειγμα, από μια σύγκρουση μελανών οπών εκπέμπεται ελάχιστη Η/Μ ακτινοβολία, εκπέμπονται όμως τεράστιες ποσότητες βαρυτικών κυμάτων. Έτσι, με τη βοήθεια αυτών των κυμάτων θα μπορέσουμε να μελετήσουμε τέτοια κατακλυσμιαία κοσμικά φαινόμενα.

Εκτός αυτού, σε αντίθεση με την Η/Μ ακτινοβολία που αλληλεπιδρά έντονα με την ύλη και, ως εκ τούτου, υφίσταται απορροφήσεις και παραμορφώσεις καθώς διασχίζει αποστάσεις εκατομμυρίων ετών φωτός μέσα στο Σύμπαν, τα βαρυτικά κύματα διαπερνούν τεράστιες αποστάσεις μένοντας αναλλοίωτα (απλά εξασθενούν σε μέγεθος, αφού απλώνονται σε όλο και μεγαλύτερο χώρο). Έτσι, η πληροφορία που μεταφέρουν τα κύματα αυτά είναι πολύ περισσότερο αξιόπιστη σε σύγκριση με αυτή που μας δίνουν τα ηλεκτρομαγνητικά.

Και, τέλος, τα βαρυτικά κύματα αναμένεται να απαντήσουν σε σημαντικά ερωτήματα των κοσμολόγων σε ό,τι αφορά τα αρχικά στάδια εξέλιξης του Σύμπαντος. Κάτι τέτοιο είναι έξω από τις δυνατότητες της παραδοσιακής Αστρονομίας, δοθέντος ότι το Σύμπαν ήταν αρχικά αδιαφανές στην Η/Μ ακτινοβολία και καμία Η/Μ πληροφορία από εκείνη την περίοδο δεν φτάνει ως εμάς.

### **8. Επίλογος: Γιατί τόση φασαρία τελευταία;**

Αν και ο Einstein είχε προβλέψει την ύπαρξη βαρυτικών κυμάτων ήδη από το 1916, μια έμμεση απόδειξη της ύπαρξής τους δόθηκε πολύ αργότερα, στα μέσα της δεκαετίας του 1970. Ποτέ όμως δεν είχαν άμεσα ανιχνευθεί τέτοια κύματα πάνω στη Γη.

Στις 11 Φεβρουαρίου του 2016, η επιστημονική ομάδα των δίδυμων ανιχνευτών βαρυτικών κυμάτων *LIGO* (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) [4] ανακοίνωσε, τελικά, ότι ανίχνευσε βαρυτικά κύματα στις 14 Σεπτεμβρίου του 2015. Τα κύματα αυτά προήλθαν από τη σύγκρουση και τη συγχώνευση δύο μελανών οπών (που αρχικά σχημάτιζαν ένα περιστρεφόμενο ζεύγος) σε απόσταση **1.3 δισεκατομμυρίων ετών φωτός** από τη Γη [7]. Ήταν η τελική επιβεβαίωση της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας του Einstein!

Το «παρατηρητήριο» *LIGO* αποτελείται από δύο πανομοιότυπους ανιχνευτές (συμβολόμετρα λέιζερ) που βρίσκονται στις ΗΠΑ, σε απόσταση περίπου 3,000 χιλιομέτρων μεταξύ τους. Ο ένας ανιχνευτής βρίσκεται στην πολιτεία **Ουάσιγκτον** και ο άλλος στην πολιτεία **Λουϊζιάνα**.

Οι επιστήμονες που συμμετείχαν στην ερευνητική αυτή ομάδα μάλλον δεν θα χρειαστούν τη βοήθεια έμπειρου αστρολόγου για να προβλέψει προς ποια συμπαντική κατεύθυνση θα κινηθεί το επόμενο βραβείο Νόμπελ στη Φυσική!

### **Σημειώσεις – Αναφορές:**

[1] Κ. Ι. Παπαχρήστου, *Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία και τη Φυσική των Αγώγιμων Στερεών* (Εκδόσεις ΣΝΔ, 2010).

[2] Α. Ν. Μαγουλάς, *Ηλεκτρομαγνητισμός και Εφαρμογές* (Εκδόσεις ΣΝΔ, 2013).

[3] Βλ., π.χ., Wikipedia, *Gravitational Wave* .

[4] *LIGO-Caltech*, *Gravitational Waves* .

[5] The New York Times, *Gravitational Waves Detected, Confirming Einstein's Theory* (περιέχει video).

[6] Video: *Gravitational Waves Explained* .

[7] Αναλυτικά: Λόγω της περιστροφής (άρα της επιτάχυνσης που αυτή συνεπάγεται) το σύστημα των δύο οπών έχανε συνεχώς ενέργεια καθώς εξέπεμπε βαρυτικά κύματα. Αυτό είχε ως συνέπεια να μειώνεται όλο και περισσότερο η απόσταση ανάμεσα στις δύο οπές, πράγμα που, με τη σειρά του, τις έκανε να περιστρέφονται ολοένα και πιο γρήγορα, εκπέμποντας όλο και περισσότερη βαρυτική ακτινοβολία. Στην κορύφωση του φαινομένου, οι δύο οπές συγκρούστηκαν και συγχωνεύτηκαν εκπέμποντας ένα τεράστιο ποσό βαρυτικής ενέργειας μέσα σε ελάχιστο χρόνο. Αυτή την εκπομπή κατέγραψαν οι ανιχνευτές του *LIGO*. Το ηχητικό σήμα ήταν, φυσικά, τεχνητό!

Αναρτήθηκε από [costaspap](#) στις [6:55 π.μ.](#)

Αντιδράσεις:



Αποστολή με μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου [BlogThis!](#) [Μοιραστείτε το στο Twitter](#) [Μοιραστείτε το στο Facebook](#) [Κοινοποίηση στο Pinterest](#)

Ετικέτες [Εκπαίδευση](#), [Επιστήμη](#)

### Κώστας Παπαχρήστου

Γεννήθηκε στην Αθήνα και επιμένει να ζει εκεί! Σπούδασε Φυσική στην Αθήνα και στις ΗΠΑ. Τώρα τη διδάσκει σε μεγάλα «παιδιά» (αυτά που επιτρέπεται να βλέπουν ταινίες με την ένδειξη «XX»). Του αρέσει η μουσική, η ποίηση και ο καλός κινηματογράφος. Είναι σπαδός της ΑΕΚ. [Διαβάστε περισσότερες πληροφορίες για τον Κώστα Παπαχρήστου](#)