

Μια ματιά στη θεωρία της Γενικής Σχετικότητας

Γεώργιος Παππάς

8 Απριλίου 2019

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



Ειδική Σχετικότητα εν συντομία

Αφετηρία

Βασικές Αρχές

Τι αλλάζει η Ειδική Σχετικότητα

Σύνοψη της Ειδικής Σχετικότητας

Γενική Σχετικότητα

Μετά την Ειδική Σχετικότητα τι;

Βασικές αρχές

Φυσική σε καμπύλους χωροχρόνους

Πειραματικός έλεγχος (μια ενδεικτική λίστα)

Νευτώνεια Φυσική

Νευτώνεια Φυσική

- ▶ **Αρχή της Σχετικότητας του Γαλιλαίου:**
Οι νόμοι της φύσης είναι οι ίδιοι για όλους τους παρατηρητές ανεξάρτητα της ταχύτητας με την οποία κινούνται (για αδρανειακούς παρατηρητές).
- ▶ Ο χώρος και ο χρόνος είναι απόλυτες έννοιες και όλοι οι παρατηρητές τους αντιλαμβάνονται το ίδιο.

Προβληματισμοί

Ηλεκτρομαγνητισμός:

- ▶ Ο ηλεκτρομαγνητισμός στην πλήρη διατύπωσή του από τον Maxwell φαίνεται να έχει πρόβλημα με την Νευτώνεια αντίληψη του χώρου και του χρόνου.
- ▶ Το πιο χαρακτηριστικό φαινόμενο είναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το φως φαίνεται να κινείται με σταθερή ταχύτητα ανεξάρτητα της ταχύτητας κίνησης του παρατηρητή κόντρα στις προβλέψεις της Νευτώνειας φυσικής.

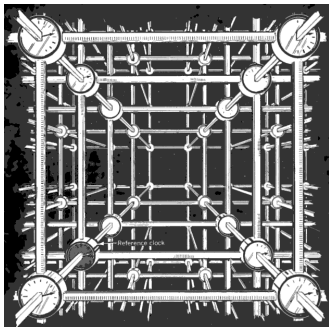
Ειδική Σχετικότητα

Αρχές της Ειδικής Σχετικότητας

- ▶ **Αρχή της σχετικότητας**, που λέει ότι όλοι οι παρατηρητές αν είναι αδρανειακοί είναι και ισοδύναμοι, δηλαδή οι φυσικοί νόμοι ισχύουν ακριβώς το ίδιο για όλους και όλοι θα συμφωνούν για την φυσική πραγματικότητα.
- ▶ **Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι σταθερή** και η ίδια για όλους τους αδρανειακούς παρατηρητές και δεν εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία κινείται αυτός που την μετρά .

Βασικές έννοιες: Ο παρατηρητής (σύστημα αναφοράς), Το “γεγονός”, Η μέτρηση.

Επιστροφή στις βάσεις



Τι είναι ένας παρατηρητής;

Ο παρατηρητής είναι μια “μετρίτηκη διάταξη” που είναι εξοπλισμένη με ρολόγια και χάρακες.

Πώς μετράμε;

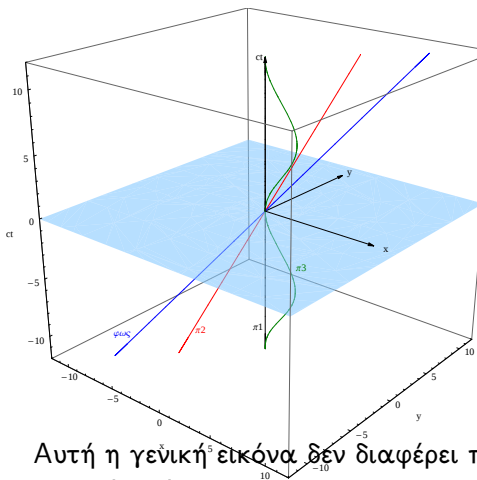
Συγχρονίζουμε τα ρολόγια με φωτεινά σήματα και κάνουμε τοπικές μετρήσεις χώρου και χρόνου. Τον χώρο τον μετράνε οι χάρακες και τον χρόνο τα ρολόγια.

Υπόθεση των ρολογιών:

Τα ρολόγια δεν επηρεάζονται από τον τρόπο κίνησής τους και μετράνε με σταθερό ρυθμό πάντα.

Υπάρχουν όμως τέτοια ρολόγια; Ναι υπάρχουν. Το φως μπορεί να είναι ένα τέτοιο ρολόι, όπως και κάθε σωματίδιο με μάζα.

Χωροχρόνος και κοσμικές τροχιές



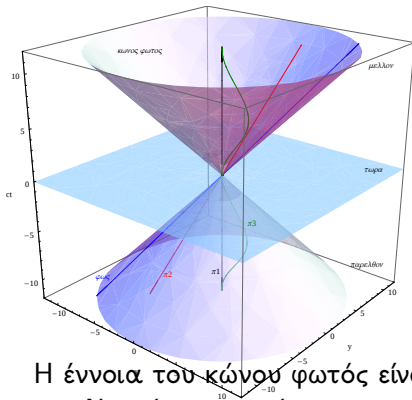
Κοσμικές τροχιές:

Οι παρατηρητές κινούνται στο χώρο και τον χρόνο διαγράφοντας τις κοσμικές τροχιές τους. Κοσμικές τροχιές ακολουθούν και τα σωματίδια και τα φωτόνια και η κλίση των τροχιών εξαρτάται από την ταχύτητά τους.

Χώρος και χρόνος συνθέτουν το χωροχρόνο ($x_0 \equiv ct, x_1, x_2, x_3$).

Αυτή η γενική εικόνα δεν διαφέρει πολύ από την Νευτώνεια φυσική ακόμα.

Αιτιότητα στην Ειδική Σχετικότητα



Κώνος φωτός:

Το όριο που εισάγει η ταχύτητα του φωτός οδηγεί στην έννοια του κώνου φωτός.

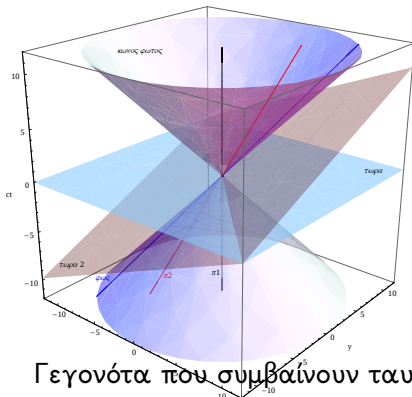
Ένας παρατηρητής επηρεάζει και επηρεάζεται μόνο από ό,τι είναι μέσα στον κώνο φωτός του. Τα σωματίδια με μάζα κινούνται μέσα στον κώνο φωτός ενώ τα φωτόνια πάνω του.

Η έννοια του κώνου φωτός είναι μια σημαντική απόκλιση από την Νευτώνεια αιτιότητα.

Οι κώνοι φωτός είναι οι ίδιοι για όλους τους παρατηρητές.

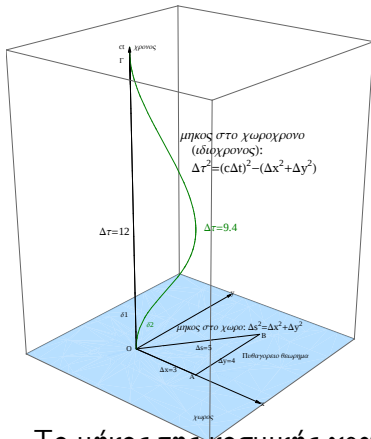
Ταυτόχρονο:

Η κατάσταση κίνησης ενός παρατηρητή αλλάζει την έννοια του ταυτόχρονου.



Γεγονότα που συμβαίνουν ταυτόχρονα για έναν παρατηρητή δεν είναι ταυτόχρονα για κάθε άλλο παρατηρητή.

Χωροχρονικό μήκος και ιδιόχρονος



Χωρικό μήκος:

Πυθαγόρας: $ds^2 = dx^2 + dy^2$.

Η συντομότερη διαδρομή ανάμεσα σε 2 σημεία είναι η ευθεία.

Χωροχρονικό μήκος:

$(cd\tau)^2 = (cdt)^2 - (dx^2 + dy^2)$

Οι ευθείες τροχιές έχουν μεγαλύτερο μήκος.

Το χωροχρονικό μήκος είναι αναλλοίωτο.

Ο χωροχρόνος είναι επίπεδος.

Το μήκος της κοσμικής γραμμής ορίζει τον **ιδιόχρονό**, δηλαδή το χρόνο που μετρά το ρολόι ενός παρατηρητή. Κάθε σωματίδιο με μάζα μετρά ιδιόχρονο που είναι αναλλοίωτος.

Βασικά στοιχεία της Ειδικής Σχετικότητας:

- ▶ **Αρχή της σχετικότητας:** Η φυσική είναι ίδια για όλους.
- ▶ Η ταχύτητα του φωτός είναι σταθερή για όλους.
- ▶ **Κώνος φωτός:** Το σύνορο της επικοινωνίας.
- ▶ Δεν υπάρχει απόλυτη έννοια του ταυτόχρονου.
- ▶ **Χωροχρόνος:** αντικαθιστά τον χώρο και το χρόνο.
- ▶ Ο χωροχρόνος μοιάζει αλλά είναι διαφορετικός από τον 3D-χώρο. Τα μήκη δίνονται από το χωροχρονικό μήκος

$$ds^2 = (cdt)^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

Ο χωροχρόνος είναι ένας επίπεδος 4D-χώρος που τον λέμε χώρο Minkowski.

- ▶ **Ιδιόχρονος:** Κάθε παρατηρητής μετρά τον προσωπικό του χρόνο που είναι το μήκος της κοσμικής τροχιάς που διαγράφει στο χωροχρόνο $(cd\tau)^2 = ds^2$.

Ο ιδιόχρονος είναι αναλλοίωτος.

Γενική Σχετικότητα

Η ΕΣ είναι συμβατή με τον H/M και η υπόλοιπη μέχρι τότε γνωστή φυσική μπορεί να γραφεί με σχετικιστικούς όρους. Η μόνη προβληματική περίπτωση είναι η Νευτώνεια βαρύτητα.

Προβλήματα:

- ▶ **Ισοδυναμία βαρυτικής με αδρανειακή μάζα:** Η ΕΣ μας λέει ότι η ενέργεια έχει αδρανειακή μάζα. Έχει και βαρυτική μάζα; Είναι και αυτές ίδιες;
- ▶ **Ακαριαία δράση από απόσταση:** Ο νόμος της παγκόσμιας έλξης θέλει διάδοση με άπειρη ταχύτητα. Προσπάθειες να γίνει σχετικιστικός όπως και ο νόμος του Coulomb στον H/M οδήγησαν σε προβληματικές λύσεις.
- ▶ Από τη διατήρηση της ενέργειας $\Rightarrow$ ότι το φως χάνει ενέργεια όταν σκαρφαλώνει το βαρυτικό δυναμικό (πείραμα Pound-Rebka 1959). Από αυτό μπορεί να δείξει κανείς ότι ο **χωροχρόνος** στην περιοχή ενός βαρυτικού πεδίου **δεν μπορεί να είναι επίπεδος**.

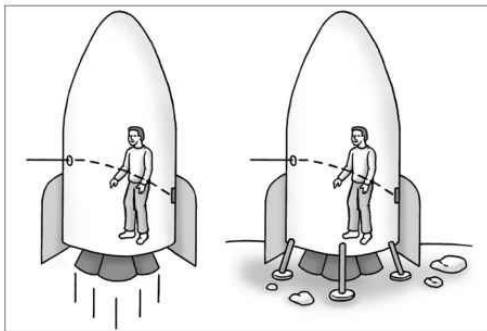
Επιστροφή στις βάσεις και πάλι

Εξετάζουμε τις βασικές μας αρχές ξανά:

- ▶ **Αρχή της ισοδυναμίας του Einstein:** Ένα βαρυτικό πεδίο είναι ισοδύναμο τοπικά με ένα πεδίο επιταχύνσεων. Αλλιώς, ένας παρατηρητής που κάνει ελεύθερη πτώση δεν νιώθει καμία βαρύτητα (πείραμα ανελκυστήρα/πύραυλο, αστροναύτες στον ISS).
- ▶ Οι νόμοι της φυσικής είναι ίδιοι για όλους τους παρατηρητές που εκτελούν ελεύθερη πτώση. Ο χωροχρόνος τοπικά είναι αυτός της ΕΣ.

Αποτέλεσμα: Η βαρύτητα δεν υπάρχει ως δύναμη. Αυτό που αντιλαμβανόμαστε ως βαρύτητα είναι αποτέλεσμα της καμπύλωσης του χωροχρόνου.

Αρχή της ισοδυναμίας του Einstein



Σε τροχιά γύρω από τη Γη ή απομονωμένοι στο διάστημα;



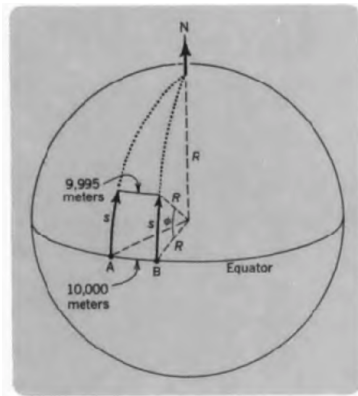
Ένα βαρυτικό πεδίο είναι ισοδύναμο τοπικά με ένα πεδίο επιταχύνσεων. Παρατηρητές σε ελεύθερη πτώση δεν “νιώθουν” βαρύτητα.

Αρχή της ισοδυναμίας του Einstein



Σε ένα πεδίο επιταχύνσεων όλα τα σώματα “πέφτουν” το ίδιο.

Βαρύτητα $\equiv$ καμπυλότητα



Η σχετική απόσταση δύο παρατηρητών σε ελεύθερη πτώση μετράει την καμπυλότητα του χωροχρόνου (παλιρροϊκές δυνάμεις).

Fig. 137. Travelers A and B, starting out parallel, and deviating neither to the left nor to the right, nevertheless find themselves approaching each other after they have traveled some distance. Interpretation 1: Some mysterious force of “gravitation” is at work. Interpretation 2: They are traveling on a curved surface.

Η βαρύτητα είναι το αποτέλεσμα της καμπυλότητας του χωροχρόνου.

Βαρύτητα $\equiv$ καμπυλότητα

Στον καμπύλο χωροχρόνο αλλάζει ο τρόπος που μετράμε αποστάσεις. Νέο Πυθαγόρειο θεώρημα για καμπύλους χώρους:

$$ds^2 = \sum_{a,b} g_{ab} dx^a dx^b$$

Η ύλη/ενέργεια προκαλεί την καμπύλωση του χωροχρόνου και η καμπύλωση του χωροχρόνου κατευθύνει την ύλη.

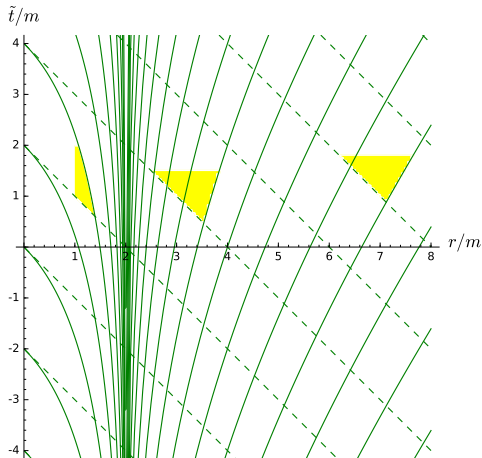
$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab}$$

(καμπυλότητα = πυκνότητα ύλης και ενέργειας)

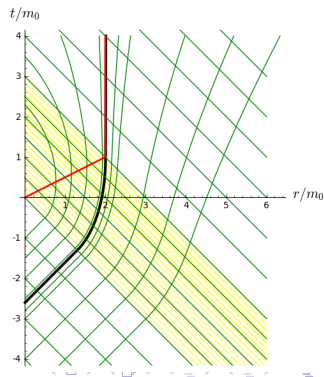
Σε ασθενή πεδία οι παραπάνω εξισώσεις οδηγούν στον νόμο της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα $\Rightarrow \nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$.

Οι κώνοι φωτός παραμορφώνονται

Ο καμπύλος χωροχρόνος επηρεάζει τις τροχιές των φωτονίων $\Rightarrow$ αλλάζουν οι κώνοι φωτός.

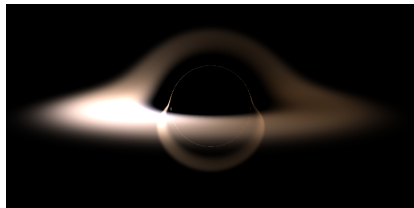
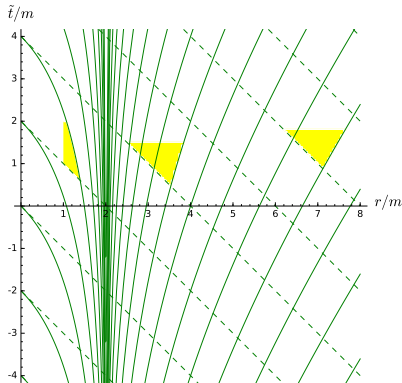


Μπορούν να υπάρξουν
μαύρες τρύπες:



Μαύρες τρύπες

Τι είναι η μαύρη τρύπα;

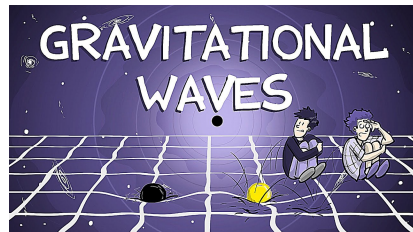
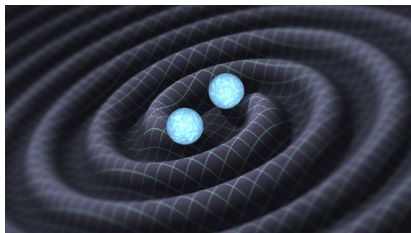


Ακραία φαινόμενα γύρω από τις μαύρες τρύπες. Έντονη καμπύλωση των τροχιών των φωτονίων και ερυθρομετάθεση.

Όπως το φως παθαίνει ερυθρομετάθεση κοντά σε ισχυρά βαρυτικά πεδία, έτσι και τα ρολόγια κυλάνε πιο αργά σε σχέση με τους απομακρυσμένους παρατηρητές.

Βαρυτικά κύματα

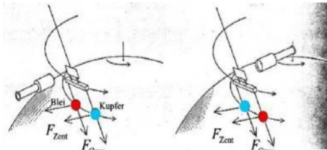
Η πληροφορία διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός. Όποια αλλαγή στον χωροχρόνο θα διαδοθεί με την ταχύτητα του φωτός. Όπως και στον Η/Μ έχουμε κύματα.



Πειραματικός έλεγχος

Αρχή της ισοδυναμίας

Eötvös:



Lunar Laser Ranging:

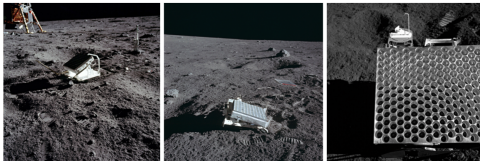
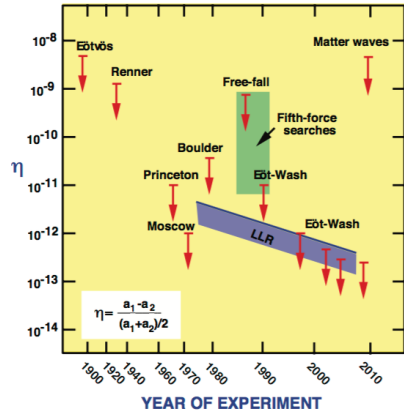


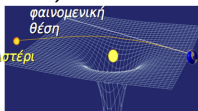
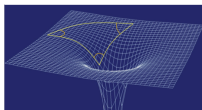
Figure 1: From left to right, the Apollo 11, 14, and 15 retroreflector arrays. (Image credits: NASA.)

(50 χρόνια από το Απόλλων 11, 1969-2019)

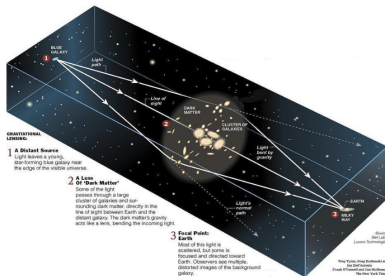


Καμπύλωση του φωτός

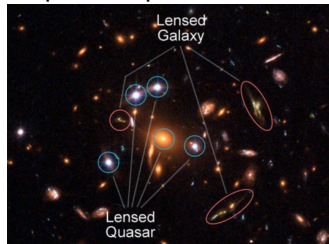
Από τον Ήλιο:
(100 χρόνια από τη μέτρηση του
Eddington 1919-2019)



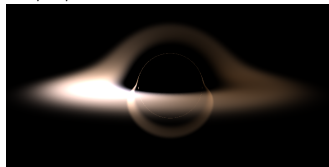
Βαρυτικοί φακοί:



Βαρυτικοί φακοί:



10/4/19 ανακοίνωση του EHT:



1η εικόνα μιας μαύρης τρύπας (;)

Φαινόμενο Shapiro

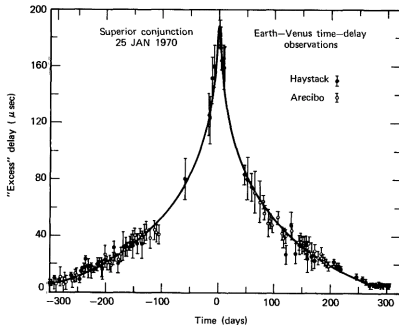


Figure 8.3 Comparison of theory with observation for the time delay of radar echoes from Venus.¹⁵ (Courtesy of I. I. Shapiro.)

Το φως όταν διασχίζει ισχυρά βαρυτικά πεδία καμπυλώνεται. Έτσι η τροχιά που διανύει έχει μεγαλύτερο μήκος όταν παρεμβάλλεται ένα σώμα μεγάλης μάζας. Αυτή είναι η αιτία της καθυστέρησης Shapiro.

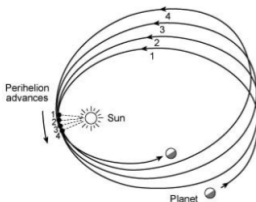
Το φαινόμενο αυτό μετρήθηκε σε σήματα ραντάρ που ανακλάστηκαν στην Αφροδίτη. Παρόμοιες μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί σε όλο το ηλιακό σύστημα και όχι μόνο.

Τροχιές των σωμάτων

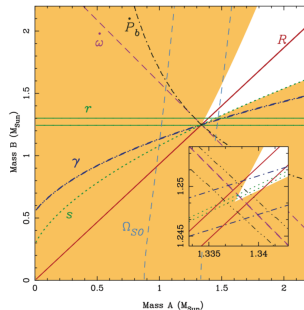
Μετάθεση του περιηλίου της τροχιάς
του Ερμή:

Παρατήρηση: 43.0"/αιώνα

ΓΘΣ: 42.9"/αιώνα



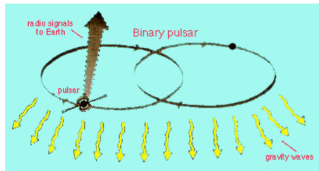
Διπλοί πάλσαρς:



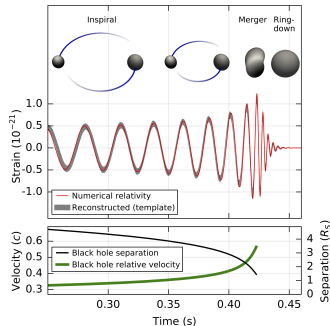
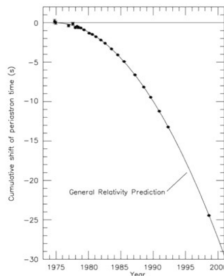
The "double" pulsar: J0737-3039A, B

$\dot{P}$: ρυθμός μεταβολής περιόδου, $\dot{\omega}$: μετάθεση του περιάστρου,
 r, s : παράμετροι του Shapiro delay, γ : redshift/time dilation.

Βαρυτικά κύματα



Βραβείο Νόμπελ
Φυσικής 1993
Hulse & Taylor



Τα βαρυτικά κύματα έχουν παρατηρηθεί έμμεσα από την αλλαγή της τροχιάς διπλών συστημάτων αστέρων νετρονίων. Έχουν ανιχνευθεί και άμεσα από τους ανιχνευτές LIGO/VIRGO από τη συγχώνευση μελανών οπών.

Τα παραπάνω ήταν ένα μικρό μέρος από τους διάφορους πειραματικούς ελέγχους της Γενικής Σχετικότητας. Από τη δεκαετία του 1960 και μετά η θεωρία υφίσταται συνεχή έλεγχο, με τη βοήθεια της εξέλιξης της τεχνολογίας, της αστρονομίας και των διαστημικών αποστολών.

Τέλος.
Ευχαριστώ.