# ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΝΙΚΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

***ΒΕΛΕΝΤΖΑΣ ΑΘ. - ΦΥΣΙΚΟΣ***

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τέλη του 1915, μόλις ο Einstein κατόρθωσε να δημιουργήσει την «Γενική Θεωρία της Σχετικότητας». Αυτό συνέβη μια δεκαετία μετά τη «μαγική χρονιά» του 1905 κατά την οποία δημοσίευσε τις τρείς διάσημες εργασίες του για την ειδική σχετικότητα, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και την κίνηση Brown.

Ο Einstein παρέμεινε ως το 1908 στο γραφείο διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στη Βέρνη όπου εργαζόταν. Ωστόσο μετά το 1905 άρχισε να γίνεται γνωστός, να επικοινωνεί με φυσικούς όπως τον Plank και τον Lorentz και να αναπτύσσει περισσότερο τις ιδέες του. Το 1908 έγινε υφηγητής στο πανεπιστήμιο της Ζυρίχης και το 1909 πήρε μια έδρα στο πανεπιστήμιο της Πράγας, όπου όμως τον ενοχλούσε η υποκριτική και αντισημιτική ατμόσφαιρα που επικρατούσε εκεί (Segre 1997). Το 1912 επέστρεψε στην πολυτεχνική σχολή της Ζυρίχης όπου είχε φοιτήσει, για λίγο όμως, καθώς την επόμενη χρονιά του έγινε διευθυντής του νεοσύστατου Ινστιτούτου ερευνών Kaiser Wilhelm και μέλος της Πρωσικής Βασιλικής Ακαδημίας Επιστημών, με τον τίτλο του καθηγητή του πανεπιστημίου του Βερολίνου. Εκεί δεν είχε ακαδημαϊκές υποχρεώσει και μπορούσε μα μοιράζει, όπως ήθελε, το χρόνο του μεταξύ έρευνας και διδασκαλίας. Ο Einstein είχε αρχίσει πλέον να εργάζεται πάνω στη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας για την οποία πολλοί φυσικοί πιστεύουν ότι αποτελεί την τελειότερη και αισθητικά ομορφότερη δημιουργία στην ιστορία της Φυσικής(Bernstein 1993).

Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας βασίστηκε στην αδυναμία να εξηγηθεί με βάση τις τότε υπάρχουσες θεωρίες η ισότητα "αδρανειακής" και "βαρυτικής μάζας" καθώς και στην απαίτηση να περιγραφούν οι νόμοι της φύσης ως προς οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς ανεξάρτητα αν αυτό είναι αδρανειακό ή όχι. Η βαρύτητα προκύπτει ως αποτέλεσμα της "καμπύλωσης" του χωροχρόνου. Έχουμε δηλαδή χωροχρόνο που δεν είναι Ευκλείδειος, αλλά καμπύλος. Η καμπύλωση του χωροχρόνου εξαρτάται από τις μάζες που βρίσκονται σε αυτόν. Επίσης η κίνηση μαζών μέσα σε δεδομένο βαρυτικό πεδίο δεν εξαρτάται από τις μάζες, αλλά μόνο από την αρχική θέση και ταχύτητα και η κίνηση οφείλεται στην παραμόρφωση του χωροχρόνου.

Η Γενική θεωρία της Σχετικότητας προβλέπει διάφορα φαινόμενα που έχουν επαληθευτεί όπως η καμπύλωση του φωτός και η μεταβολή της συχνότητάς του ανάλογα με το βαρυτικό πεδίο στο οποίο βρίσκεται, η μετάπτωση του περιηλίου του πλανήτη Ερμή, η χρονική καθυστέρηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που διέρχονται μέσα από πεδίο βαρύτητας. Επίσης προβλέπεται η ύπαρξη Μαύρων Οπών και βαρυτικών κυμάτων για τα οποία υπάρχουν αστρονομικές ενδείξεις.

## ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΜΑΖΑ

Σύμφωνα με τη Νευτώνεια μηχανική, ένα σώμα μάζας $m$ επιταχύνεται από μια δύναμη $\boldsymbol{F}$ με επιτάχυνση που δίνεται από τον θεμελιώδη νόμο της Μηχανικής

$$\boldsymbol{F} = m_a \boldsymbol{a}$$

Η μάζα $m_\alpha$ λέγεται αδρανειακή μάζα και είναι χαρακτηριστική σταθερά
του σώματος που επιταχύνεται.

Η βαρυτική δύναμη που ασκείται στο σώμα από το βαρυτικό πεδίο (π.χ της Γης) ισούται με

$$\boldsymbol{B} = m_\beta \boldsymbol{g}$$

Όπου, **g** είναι η ένταση του πεδίου βαρύτητας και $m_\beta$ είναι η βαρυτική μάζα του σωματίου που και αυτή η φυσική ποσότητα είναι μία σταθερά που χαρακτηρίζει το σωμάτιο.

Συνεπώς έχουμε δύο είδη μάζας, την **αδρανειακή μάζα**, που σχετίζεται με την επιτάχυνση, που αποκτά κάποιο σωμάτιο υπό την επίδραση δύναμης και τη **βαρυτική μάζα**, που σχετίζεται με τη βαρυτική αλληλεπίδραση.

Αν ένα σώμα "πέφτει", δηλαδή κινείται μόνο υπό την επίδραση της βαρύτητας, μπορούμε να γράψουμε

$$m_a \boldsymbol{a} = m_\beta \boldsymbol{g}$$

Έχουμε επομένως

$$\boldsymbol{a}=(m_\alpha/m_\beta)\boldsymbol{g}$$

Από τα χρόνια του Γαλιλαίου ήταν γνωστό (με την ακρίβεια των μετρήσεων της εποχής εκείνης) ότι η επιτάχυνση που οφείλεται στη βαρύτητα είναι ανεξάρτητη από το σώμα που έλκεται. Αυτό σημαίνει ότι το πηλίκο $m_\beta/m_\alpha$ είναι το ίδιο για όλα τα σώματα. Ορίζοντας τις μονάδες των μαζών ώστε το πηλίκο αυτό να είναι ο καθαρός αριθμός 1, προκύπτει $m_\beta=m_\alpha$.

Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για σώματα που κινούνται υπό την επίδραση άλλων δυνάμεων, όπως για παράδειγμα ηλεκτρικών. Πράγματι η επιτάχυνση που θα αποκτήσει ένα ηλεκτρικά φορτισμένο σώμα σε ηλεκτρικό πεδίο είναι

$$\boldsymbol{a}=(\boldsymbol{F}/m_\alpha)=(q/m_\alpha)\boldsymbol{E}$$

Το πηλίκο $q/m_\alpha$ δεν είναι το ίδιο για όλα τα σώματα, άρα δεν αποκτούν όλα την ίδια επιτάχυνση μέσα στο ίδιο ηλεκτρικό πεδίο έντασης $\boldsymbol{E}$ .

Η ισότητα βαρυτικής και αδρανειακής μάζας πιστοποιήθηκε και πειραματικά από τον Ούγγρο Eötvös με ακρίβεια 1 προς $10^8$ κάνοντας ακόμα πιο αξιοσημείωτο αυτό που η προ σχετικότητας θεωρίες το θεωρούσαν συμπτωματικό ή ακριβέστερα δεν μπορούσαν να το ερμηνεύσουν. Το πείραμα του Eötvös έπαιξε για τη γενική σχετικότητα ένα ρόλο ανάλογο με αυτόν που έπαιξε το πείραμα των Michelson - Morley για την ειδική σχετικότητα (Ford 1980), παρόλο που δεν είναι σίγουρο ότι ο Einstein γνώριζε τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων όταν διαπραγματευόταν τις αντίστοιχες θεωρίες.

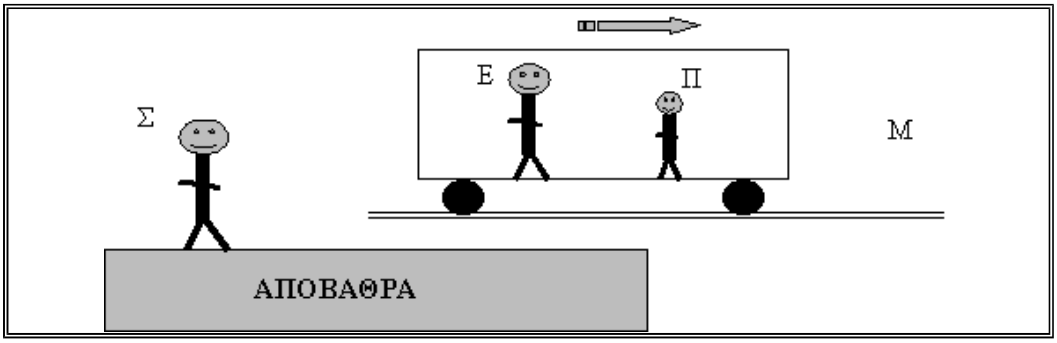
## ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΚΑΙ ΜΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Στην κλασική μηχανική, αλλά και στην ειδική θεωρία της σχετικότητας αδρανειακό σύστημα αναφοράς (ΣΑ) είναι ένα σύστημα στο οποίο ένα σώμα που είναι ελεύθερο από όλες τις εξωτερικές επιδράσεις συμπεριλαμβανομένης και της βαρύτητας δεν επιταχύνεται. Κάθε ΣΑ που κινείται με σταθερή ταχύτητα ως προς το προηγούμενο είναι και αυτό αδρανειακό ΣΑ. Σύμφωνα με την αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου, που ισχύει στη Νευτώνεια Μηχανική, οι νόμοι της Μηχανικής έχουν την ίδια μορφή ως προς όλα τα αδρανειακά ΣΑ και οι σωστοί μετασχηματισμοί από το ένα σύστημα στο άλλο είναι οι μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου. Ο Einstein, στην ειδική θεωρία της σχετικότητας, επέκτεινε την αρχή της σχετικότητας, ώστε να συμπεριλάβει όλους τους νόμους της φυσικής, δηλαδή και τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού, αλλά σε αυτή τη θεωρία οι σωστοί μετασχηματισμοί είναι οι μετασχηματισμοί Lorentz.

Ο Einstein θεωρούσε ότι η ειδική θεωρία της σχετικότητας παρόλο που περιλαμβάνει όλους τους νόμους της Φυσικής είναι «ειδική» υπό την έννοια ότι θεωρεί «ευνοούμενα» συστήματα αναφοράς αυτά που βρίσκονται μόνο σε ομαλή και μη περιστροφική κίνηση (Einstein 1961). Θεωρούσε πολύ δελεαστική την πρόκληση για το επόμενο βήμα προς την αρχή της Γενικής Σχετικότητας, δηλαδή την αρχή ότι **κάθε ΣΑ οποιαδήποτε και αν είναι η κινητική του κατάσταση είναι κατάλληλο για τη διατύπωση των γενικών νόμων της φύσης**.

## ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

Ας φανταστούμε ένα βαγόνι τρένου το οποίο κινείται ως προς την αποβάθρα. Στο βαγόνι επιβαίνει ένας άνδρας (Ε) με το μικρό του παιδί (Π). Στην αποβάθρα ο σταθμάρχης (Σ) μπορεί να βλέπει τι συμβαίνει μέσα στο βαγόνι. Τόσο ο άνδρας / επιβάτης, όσο και ο σταθμάρχης γνωρίζουν τη Νευτώνεια Μηχανική.




Όσο το βαγόνι κινείται με σταθερή ταχύτητα (αδρανειακό ΣΑ) οι ταξιδιώτες δεν αντιλαμβάνονται τίποτα

ιδιαίτερο, δηλαδή, εφόσον δεν ακούνε το ήχο της μηχανής και δεν υπάρχουν κραδασμοί θα μπορούσαν κάλλιστα να υποθέσουν ότι αυτοί δεν κινούνται αλλά ότι απομακρύνεται η αποβάθρα από αυτούς. Για την περιγραφή των φυσικών γεγονότων, για παράδειγμα για την μελέτη της ελεύθερης πτώσης ενός σώματος, το σύστημα αναφοράς της αποβάθρας είναι ισοδύναμο με αυτό του βαγονιού.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι το βαγόνι φρενάρει, οπότε οι επιβάτες θα αισθανθούν ότι δέχτηκαν μια ώθηση προς τα μπρος. Για να ερμηνεύσουν την μετακίνησή τους μέσα στο βαγόνι πρέπει να υποθέσουν ότι δέχονται κάποιες «φαινομενικές» δυνάμεις που στη Νευτώνεια μηχανική αποκαλούνται αδρανειακές δυνάμεις. Η σχετική επιτάχυνση κάθε επιβάτη ως προς το αυτοκίνητο κατά το φρενάρισμα θα είναι ίση κατά μέτρο και με αντίθετη κατεύθυνση από την επιτάχυνση ***a*** του αυτοκινήτου. Συνεπώς κάθε επιβάτης θα υποθέσει ότι δέχεται αδρανειακή δύναμη μέτρου $F=ma$. Τόσο ο άνδρας όσο και το παιδί θα κινηθούν μετά το φρενάρισμα με την ίδια επιτάχυνση, όπως και στην περίπτωση που θα πηδούσαν από μια μάντρα. Βγάζουν δηλαδή το συμπέρασμα ότι οι αδρανειακές δυνάμεις έχουν την ιδιότητα να είναι ανάλογες με τη μάζα, όπως ακριβώς και οι βαρυτικές δυνάμεις. Αυτό ασφαλώς δεν είναι κάτι το μυστηριώδες για τον σταθμάρχη μιας και οι επιβάτες προσπαθούν να συνεχίσουν την προς τα μπρος κίνηση τους με την αρχική τους ταχύτητα.

Άλλο παράδειγμα αδρανειακών δυνάμεων είναι οι «φυγόκεντρες» δυνάμεις που υποθέτουν ότι δέχονται παρατηρητές που βρίσκονται πάνω σε οριζόντιο περιστρεφόμενο δίσκο. Και σε αυτή την περίπτωση οι αδρανειακές δυνάμεις είναι ανάλογες με τη μάζα.

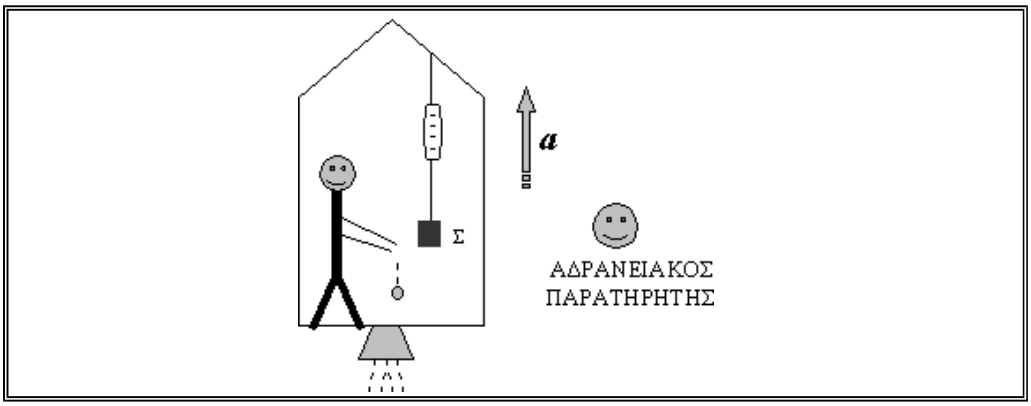
Από τα παραπάνω ανακύπτουν κάποια ερωτήματα

Μήπως οι επιβάτες του βαγονιού στη διάρκεια του φρεναρίσματος θα νοιώσουν το ίδιο αν το αυτοκίνητο δεν φρενάρει αλλά εμφανιστεί ένα κατάλληλο πεδίο βαρύτητας με φορά προς τα μπρος; Μήπως οι παρατηρητές πάνω σε περιστρεφόμενο δίσκο θα νοιώθουν το ίδιο αν ο δίσκος δεν στρέφεται αλλά εμφανιστεί ένα βαρυτικό πεδίο με φορά από το κέντρο του δίσκου προς την περιφέρεια; Αν ναι μήπως οι βαρυτικές δυνάμεις είναι εξίσου φανταστικές με τις αδρανειακές;

Για να απατήσουμε στα παραπάνω ερωτήματα ας δούμε την **αρχή της ισοδυναμίας** που αποτέλεσε το θεμέλιο πάνω στο οποίο οικοδομήθηκε η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας.

## Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ

Ας υποθέσουμε ότι ένας αστροναύτης βρίσκεται εκτός πεδίου βαρύτητας μέσα στο θάλαμο ενός διαστημόπλοιου. Το διαστημόπλοιο επιταχύνεται ως προς κάποιο αδρανειακό παρατηρητή με επιτάχυνση όσο η επιτάχυνση των σωμάτων που κινούνται κοντά στην επιφάνεια της Γης με την επίδραση μόνο της βαρύτητας, δηλαδή περίπου $10m/s^2$.




Ο αστροναύτης για να σταθεί όρθιος ή να περπατήσει πρέπει να κάνει τα ίδια ακριβώς που κάνει και όταν το διαστημόπλοιο είναι ακίνητο στη βάση εκτόξευσής του στη Γη. Αν αφήνει σώματα να πέφτουν θα πέφτουν όλα προς το «δάπεδο» με επιτάχυνση $10m/s^2$ και το «βάρος» ενός σώματος Σ που το ζυγίζει με δυναμόμετρο το βρίσκει όσο και στην επιφάνεια της Γης. Αν ο αστροναύτης δεν έχει πληροφορίες από τον πιλότο και υποθέσει ότι το διαστημόπλοιο βρίσκεται ακίνητο σε βαρυτικό πεδίο σαν αυτό της Γης, έχουμε το δικαίωμα να χαμογελάσουμε και να πούμε ότι ο αστροναύτης έβγαλε λάθος συμπέρασμα;

Κατά τον Einstein ο τρόπος σκέψης του αστροναύτη δεν είναι ενάντια ούτε στη λογική, ούτε ενάντια στους γνωστούς νόμους της Μηχανικής. Αυτό προκύπτει από την ισότητα βαρυτικής και αδρανειακής μάζας. Για παράδειγμα ο αστροναύτης θα υποθέσει ότι η ένδειξη F του δυναμόμετρου προσδιορίζει το βάρος του σώματος

γιατί αυτό δείχνει την δύναμη που ασκεί το σώμα στο δυναμόμετρο, άρα και το δυναμόμετρο στο σώμα. Το σώμα ισορροπεί σύμφωνα με τον αστροναύτη μέσα σε πεδίο βαρύτητας άρα η F ισούται κατά μέτρο με το βάρος. Από την άλλη μεριά ο αδρανειακός παρατηρητής θα πει ότι το σώμα μέσω του δυναμόμετρου είναι στερεωμένο στην οροφή και συνεπώς είναι αναγκασμένο να κινηθεί με αυτή την επιτάχυνση, συνεπώς η F είναι η αναγκαία δύναμη που ασκείται στο σώμα για να επιταχυνθεί. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει τρόπος για να διαπιστώσει ο αστροναύτης, ή οι επιβάτες του βαγονιού ή του περιστρεφόμενου δίσκου αν δέχονται αδρανειακές ή βαρυτικές δυνάμεις. Αυτή η υπόθεση του Einstein, ότι δηλαδή

*τα αποτελέσματα ενός βαρυτικού πεδίου είναι ισοδύναμα με αυτά ενός συστήματος αναφοράς, που επιταχύνεται σε κατεύθυνση αντίθετη αυτής του βαρυτικού πεδίου και βρίσκεται εκτός βαρυτικού πεδίου*

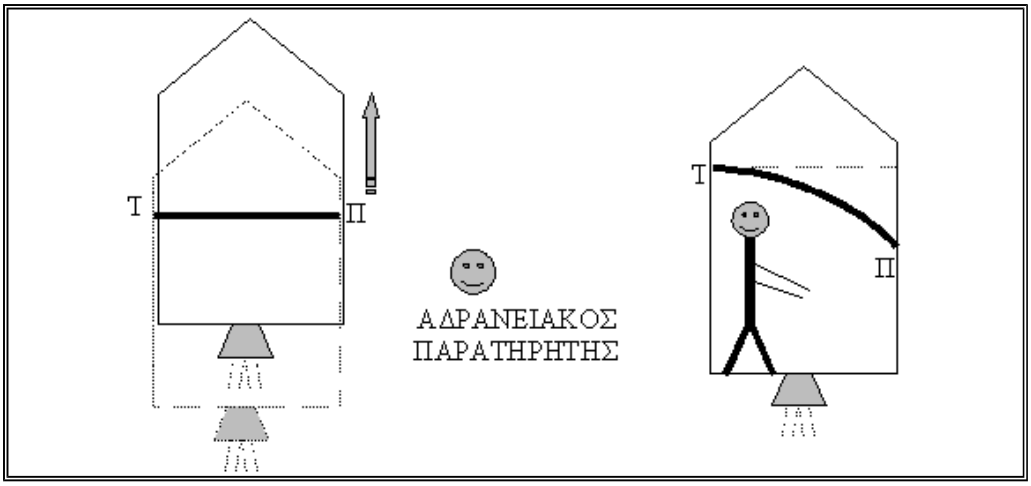
ονομάστηκε *Αρχή της Ισοδυναμίας*.

Ξεκινώντας από την αρχή της ισοδυναμίας προκύπτει ως συμπέρασμα η ισότητα βαρυτικής και αδρανειακής μάζας, δηλαδή η πρόταση για την ισότητα των δύο μαζών αποκτά φυσικό περιεχόμενο.

Μια ακόμα άμεση συνέπεια είναι ότι ένα σώμα που κινείται ελεύθερα σε ένα βαρυτικό πεδίο μπορεί να ορίσει ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Πράγματι ένας άνθρωπος μέσα σε ένα ανελκυστήρα που πέφτει ελεύθερα δεν έχει κάποιο πείραμα με το οποίο να μπορεί να αποφασίσει αν πέφτει ελεύθερα σε βαρυτικό πεδίο ή αιωρείται ελεύθερα εκτός πεδίου βαρύτητας. Τα σώματα που αφήνει αιωρούνται και ο ίδιος νοιώθει αβαρής. Τα ίδια συμβαίνουν και στους αστροναύτες που περιφέρονται σε τροχιά γύρω από τη Γη.

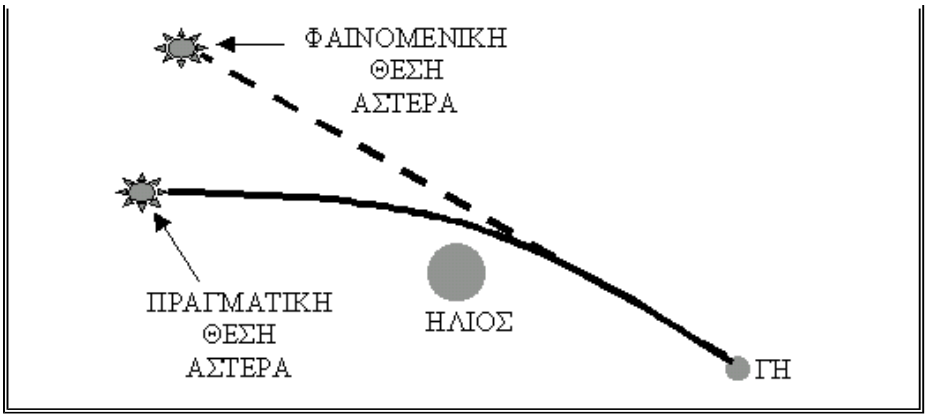
**Η ΚΑΜΠΥΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗ ΒΑΡΥΤΗΤΑ**

Ας επανέλθουμε στο διαστημόπλοιο που κινείται εκτός πεδίου βαρύτητας με επιτάχυνση ως προς αδρανειακό παρατηρητή. Ας φανταστούμε μια δέσμη φωτός που μπαίνει στο διαστημόπλοιο από μια τρύπα Τ που υπάρχει σε ένα τοίχωμα του διαστημοπλοίου.




Ο αδρανειακός παρατηρητής θα πει ότι το φως κινείται ευθύγραμμα, αλλά επειδή το διαστημόπλοιο επιταχύνεται, μετατοπίζεται καθόσον χρόνο το φως ταξιδεύει προς το απέναντι τοίχωμα, έτσι ο δέσμη δεν θα φανεί απέναντι από την τρύπα αλλά παρακάτω. Ο αστροναύτης όμως θα δει ότι το φως καμπυλώνεται. Αν όμως θέλουμε να είμαστε συνεπείς στην αρχή της ισοδυναμίας πρέπει να δεχτούμε ότι και το βαρυτικό πεδίο καμπυλώνει το φως.

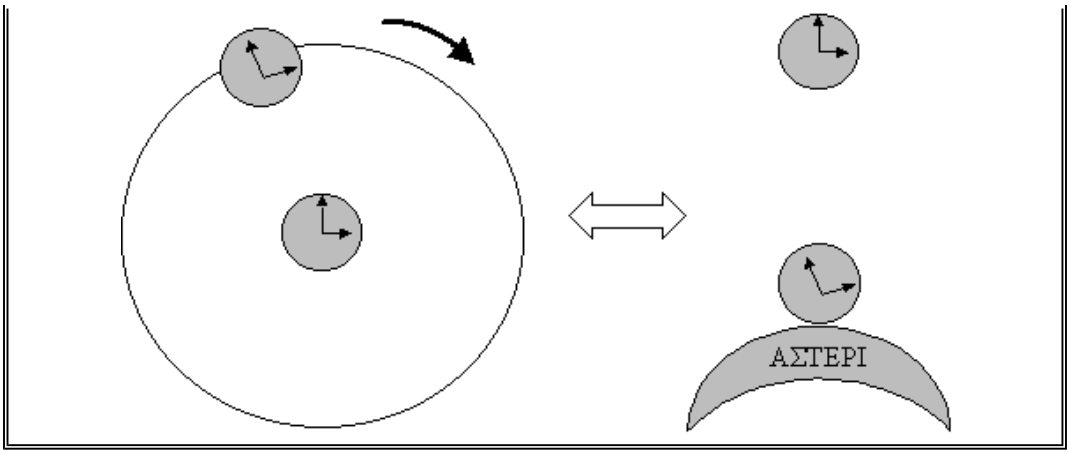
Η απόκλιση του φωτός εξαιτίας της βαρύτητας υπήρχε έμμεσα και στην υπόθεση που έκανε ο Plank το 1907, ότι η ενέργεια πρέπει να δέχεται και να ασκεί δύναμη βαρύτητας, όμως στο φαινόμενο δεν δόθηκε η απαραίτητη σημασία, ως το 1911 που ο Einstein έδειξε ότι το φαινόμενο είναι αναμενόμενο από την αρχή της ισοδυναμίας και επιπλέον πρότεινε και τρόπο παρατήρησής του. Η εκτροπή του φωτός από «ασθενή» βαρυτικά πεδία όπως της Γης είναι ελάχιστη και δύσκολο να παρατηρηθεί. Όμως από το βαρυτικό πεδίο του Ήλιου το αστρικό φως εκτρέπεται τόσο ώστε να μπορεί να παρατηρηθεί (1,74 δεύτερα λεπτά). Για να μπορεί όμως να πραγματοποιηθεί η παρατήρηση των αστεριών των οποίων το φως περνά κοντά από τον Ήλιο πρέπει να συμβεί ολική έκλειψη Ηλίου. Σε αυτή την περίπτωση ο Einstein πρόβλεψε ότι τα αστέρια θα φαίνονται πιο απομακρυσμένα από τη θέση που κατέχουν στον ουρανό όταν βρίσκονται μακριά από το Ήλιο.




Στις 19 Μαΐου του 1919 υπήρχε ολική έκλειψη Ηλίου και ταυτόχρονα αυτός περνούσε μέσα από ένα ιδιαίτερα φωτεινό σύμπλεγμα αστέρων (των Υάδων) που προσφερόταν για φωτογράφηση. Δύο μικρές ομάδες Άγγλων αστρονόμων άδραξαν την ευκαιρία και οργάνωσαν αποστολή για την πειραματική επαλήθευση της πρόβλεψης. Επικεφαλής της μίας ομάδας ήταν ο Eddington που είχε γοητευτεί από τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Οι επεξεργασία των φωτογραφιών που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια τη ηλιακής έκλειψης επιβεβαίωσαν την πρόβλεψη του Einstein. Μάλιστα σύμφωνα με μία μαθήτρια του Einstein όταν αυτός έλαβε το τηλεγράφημα του Eddington είπε ατάραχα «Ήξερα ότι η θεωρία ήταν σωστή» και όταν ρωτήθηκε τι θα γινόταν αν δεν υπήρχε επιβεβαίωση απάντησε ότι θα λυπόταν τον καλό Θεό γιατί η θεωρία ήταν σωστή. Η ανακοίνωση της εκτροπής του αστρικού φωτός από τον Ήλιο έκανε πλέον τον Einstein διάσημο και σύμβολο.

**ΒΑΡΥΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ**

Η αρχή της ισοδυναμίας θα μας βοηθήσει στην κατανόηση και μιας άλλης συνέπειας της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας. Ας φανταστούμε ένα δίσκο που περιστρέφεται γύρω από το κέντρο του. Δύο όμοια ρολόγια είναι τοποθετημένα πάνω στο δίσκο. Το ένα είναι τοποθετημένο στο κέντρο του και το άλλο στην περιφέρεια. Όπως είδαμε ένας παρατηρητής πάνω στο δίσκο δέχεται την αδρανειακή «φυγόκεντρο» δύναμη. Αυτός σύμφωνα με την γενική σχετικότητα μπορεί να θεωρήσει τον εαυτό του ακίνητο και ευρισκόμενο μέσα σε βαρυτικό πεδίο με φορά από το κέντρο του δίσκου προς την περιφέρεια και μάλιστα η ένταση αυτού του πεδίου αυξάνεται από το κέντρο προς την περιφέρεια μιας και η δύναμη αυξάνει με την απόσταση από το κέντρο.

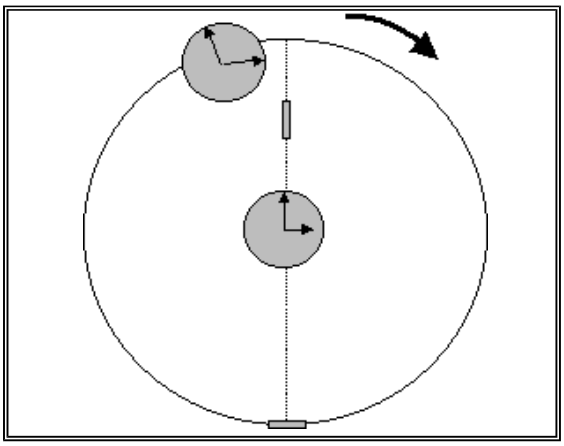



Από τη θεωρία της ειδικής σχετικότητας προκύπτει ότι το ρολόι στο κέντρο του δίσκου πάει σύμφωνα με τα ρολόγια του εδάφους, μιας και δεν κινείται ως προς αυτά. Όμως το ρολόι στην περιφέρεια θα καθυστερεί σε σχέση με τα ρολόγια του εδάφους (διαστολή του χρόνου). Αυτό το φαινόμενο γίνεται αντιληπτό και από παρατηρητή του εδάφους αλλά και από τον παρατηρητή πάνω στο δίσκο. Ο παρατηρητής όμως του δίσκου δεν βλέπει τα ρολόγια να κινούνται, αλλά τα θεωρεί ότι βρίσκονται μέσα σε βαρυτικό πεδίο, συνεπώς δεν έχει άλλη επιλογή από το να διατυπώσει ένα νόμο που να λέει ότι *όσο ισχυρότερο είναι ένα βαρυτικό πεδίο τόσο αργότερα κυλάει ο χρόνος μέσα σε αυτό*. Σύμφωνα με την αρχή της ισοδυναμίας αυτό πράγματι πρέπει να συμβαίνει, δηλαδή ένα ρολόι στη επιφάνεια ενός άστρου θα καθυστερεί σε σχέση με ένα ρολόι που απέχει περισσότερο από το άστρο.

Ο Einstein πρότεινε ένα τρόπο για να παρατηρηθεί η επίδραση του πεδίου βαρύτητας στο χρόνο. Κάθε άτομο μπορεί να θεωρηθεί ως ρολόι. Η διαστολή του χρόνου σημαίνει επιβράδυνση όλων των φυσικών λειτουργιών, άρα και των ατομικών ταλαντώσεων, συνεπώς ένα άτομο πάνω στην επιφάνεια του Ήλιου, όπου το πεδίο βαρύτητας είναι ισχυρό, θα εκπέμπει φως μικρότερης συχνότητας από αυτό που θα εκπέμπει στην επιφάνεια της Γης. Αυτό ονομάστηκε μετατόπιση προς το ερυθρό. Πειράματα αξιόπιστα για τη μέτρηση αυτής της μετατόπισης πραγματοποιήθηκαν μετά το 1960 και τα οποία έδειξαν αυτή τη μετατόπιση με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

## Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΝΕΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Ας επανέλθουμε στον περιστρεφόμενο δίσκο. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων των διαφόρων αποστάσεων χρησιμοποιούμε μικρούς κανόνες που όταν τους βάλουμε δίπλα - δίπλα στο έδαφος έχουν το ίδιο μήκος. Κατόπιν με αυτούς τους κανόνες τοποθετώντας τον ένα δίπλα στον άλλο ο παρατηρητής πάνω στο δίσκο μετρά την περίμετρο, αλλά και μία διάμετρό του. Ο λόγος των δύο τιμών μέτρησης, αν ο δίσκος δεν στρεφόταν, θα ήταν π. Όμως τώρα που ο δίσκος περιστρέφεται ως προς κάποιο αδρανειακό σύστημα αναφοράς ή ισοδύναμα βρίσκεται ακίνητος μέσα σε βαρυτικό πεδίο με φορά από το κέντρο προς την περιφέρεια δεν είναι π, αλλά ένας μεγαλύτερος αριθμός. Ο αδρανειακός παρατηρητής θα πει ότι σύμφωνα με την ειδική θεωρία της σχετικότητας οι κανόνες που μετρούν την περιφέρεια υφίστανται συστολή μήκους γιατί έχουν ταχύτητα παράλληλη με αυτούς, ενώ οι κανόνες που μετρούν τη διάμετρό τους δεν θα υφίστανται συστολή γιατί έχουν ταχύτητα κάθετη σε αυτούς.

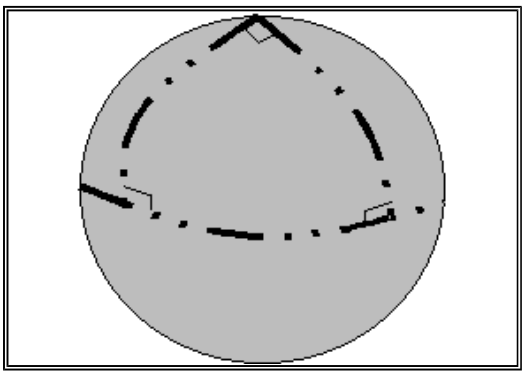


Ο παρατηρητής όμως πάνω στο δίσκο θα μιλήσει για ανάγκη νέας γεωμετρίας μιας και δεν ισχύει η ευκλείδεια. Αυτό θα το κάνει φυσικά εφόσον πιστεύει στη γενική σχετικότητα και άρα θεωρεί το σύστημά του ικανό για την

περιγραφή των φυσικών νόμων. Έτσι με το παραπάνω νοητικό πείραμα καταλήγουμε στο «εκπληκτικό» για την «κοινή λογική» συμπέρασμα ότι η βαρύτητα κάνει το χώρο να μην είναι ευκλείδειος. Η πιο απλή φυσική απαιτεί πιο περίπλοκη γεωμετρία, όπως έγραφε και ο Einstein «όσο απλούστερες και θεμελιακές γίνονται οι υποθέσεις μας τόσο πιο περίπλοκη γίνεται η μαθηματική συσκευή του συλλογισμού μας».(Einstein, Infeled 1938)

**Ο ΚΑΜΠΥΛΟΣ ΧΩΡΟΧΡΟΝΟΣ**

Σύμφωνα με τη θεωρία της γενικής σχετικότητας ο χωρόχρονος δεν είναι ευκλείδειος «επίπεδος» αλλά καμπύλος και έχει μεγαλύτερη καμπυλότητα κοντά σε περιοχές με μάζα και ενέργεια. Για να σχηματίσουμε μια εικόνα του καμπύλου χωρόχρονου θα ήταν σκόπιμο να πάμε νοητικά σε ένα χώρο δύο διαστάσεων. Ας φανταστούμε κάποια μικροσκοπικά όντα που ζουν επάνω στην επίπεδη επιφάνεια ενός πολύ μεγάλου τραπεζιού και που μπορούν να αντιληφθούν μόνο τις δύο διαστάσεις. Αυτά τα όντα σιγά -σιγά αναπτύσσουν τη γεωμετρία τους βασιζόμενη σε μετρήσεις που κάνουν. Θα έχουν για παράδειγμα το νόμο ότι οι πλευρές τριγώνου έχουν άθροισμα $180^o$ ή ακόμα το νόμο ότι ο λόγος της περιμέτρου κύκλου προς τη διάμετρο ισούται με π. Ακόμα αυτά τα όντα θα πιστεύουν ότι αν κινηθούν κατά μήκος μιας ευθείας (αν ακολουθήσουν μια ακτίνα φωτός) θα ταξιδεύουν πάντα απομακρυνόμενα από την αρχική τους θέση. Ας υποθέσουμε ότι εμείς που έχουμε τη αντίληψη και της τρίτης διάστασης μεταφέρουμε τα όντα στην επιφάνεια μιας τεράστιας σφαίρας. Όσο αυτά κινούνται σε πολύ μικρές περιοχές της σφαίρας θα είναι ευχαριστημένα με τη γεωμετρία τους. Με τον καιρό τα όντα αυτά εξελίσσουν την τεχνολογία τους και μπορούν να κινούνται γρήγορα και σε «μεγάλες» αποστάσεις. Είναι επόμενο να διαπιστώνουν πλέον πράγματα που θα έρχονται σε αντίθεση με την «κοινή λογική» και τη γεωμετρία τους. Θα βρίσκουν για παράδειγμα ότι το άθροισμα των γωνιών τριγώνων θα είναι μεγαλύτερο από $180^o$ ή ότι η περίμετρος προς τη διάμετρο του κύκλου δεν έχουν λόγο π. Επίσης θα βρεθούν προ εκπλήξεως αν κάποιο όχημα που κινείται «ίσα εμπρός» βρεθεί ξανά στην αφετηρία του.

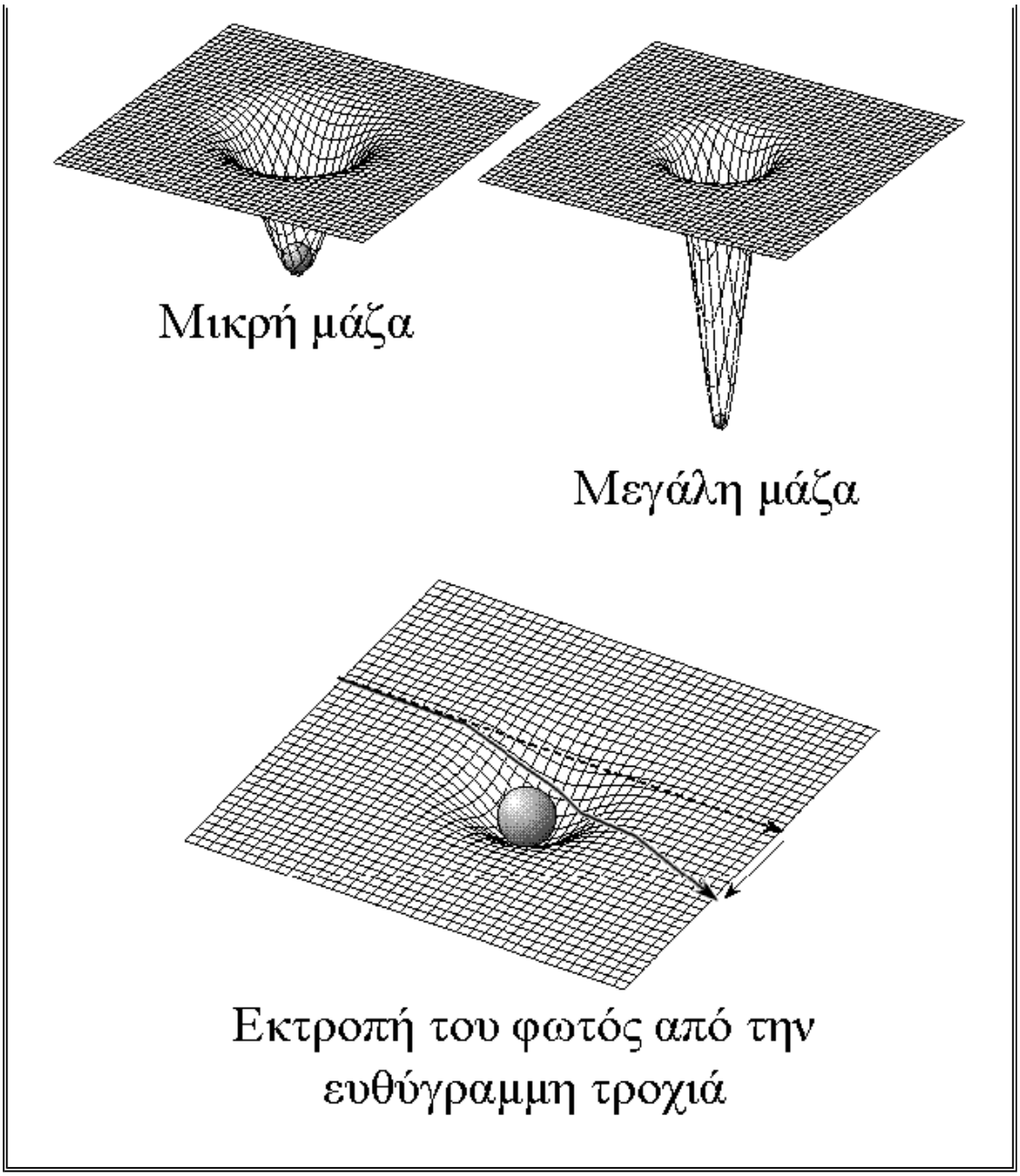


Τα όντα αυτά πρέπει πλέον να αναπτύξουν άλλη γεωμετρία που να ικανοποιεί τις μετρήσεις τους και σε μικρές περιοχές οι νόμοι της να προσεγγίζουν τους νόμους της παλιάς γεωμετρίας την οποία βολεύει να χρησιμοποιούν για υπολογισμούς σε μικρές αποστάσεις. Μπορεί και κάποιος να ονομάσει το χώρο τους «καμπύλο» σε αντιδιαστολή με τον «επίπεδο» που ήταν το όνομα του χώρου στον οποίο νόμιζαν ότι ζούσαν πριν. Με τις μετρήσεις διαπιστώνουν ότι ο χώρος τους είναι καμπύλος μόνο που δεν μπορούν να τον αντιληφθούν.

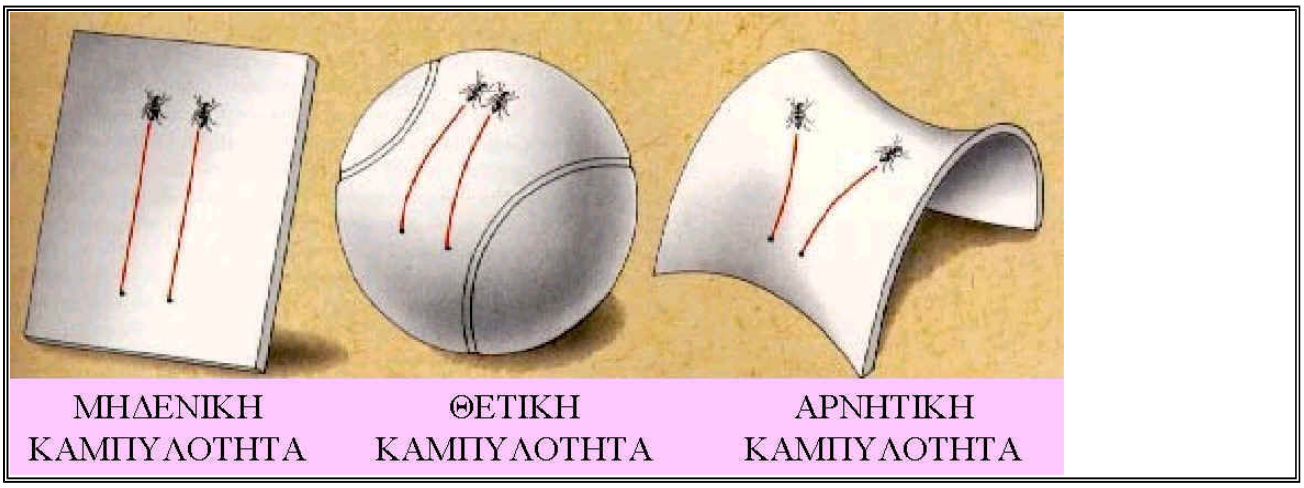
Όταν τα όντα ζούσαν στην επίπεδη επιφάνεια την συντομότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων την ονόμαζαν ευθεία. Το ίδιο θα κάνουν και πάνω στη σφαιρική επιφάνεια που ζουν. Αυτή η «ευθεία» πάνω στον καμπύλο χώρο ονομάζεται *γεωδαισιακή*. Δηλαδή η γραμμή με το μικρότερο μήκος που θα χαράξουμε πάνω σε μια υδρόγειο σφαίρα για να ενώσουμε την Αθήνα με τη Νέα Υόρκη είναι μια γεωδαισιακή καμπύλη. Γεωδαισιακές ανάλογα έχουμε και στον τρισδιάστατο χώρο αλλά και στον τετραδιάστατο χωρόχρονο.

Η Θεωρία της Γενικής Σχετικότητας θεωρεί τη βαρύτητα ιδιότητα του χωρόχρονου. Ελεύθερο θεωρείται ένα σωμάτιο που δεν δέχεται δυνάμεις πλην των βαρυτικών. Τα ελεύθερα σωμάτια και το φως κινούνται στο χωρόχρονο κατά μήκος των γεωδαισιακών.

Το φως που φτάνει στη Γη από ένα άστρο και περνά κοντά από τον Ήλιο και «καμπυλώνεται», όπως είδαμε με την αρχή της ισοδυναμίας, μπορούμε πλέον να πούμε ότι ακολουθεί μια γεωδαισιακή. Στο σχήμα φαίνεται μια δισδιάστατη αναπαράσταση ενός καμπύλου χώρου.

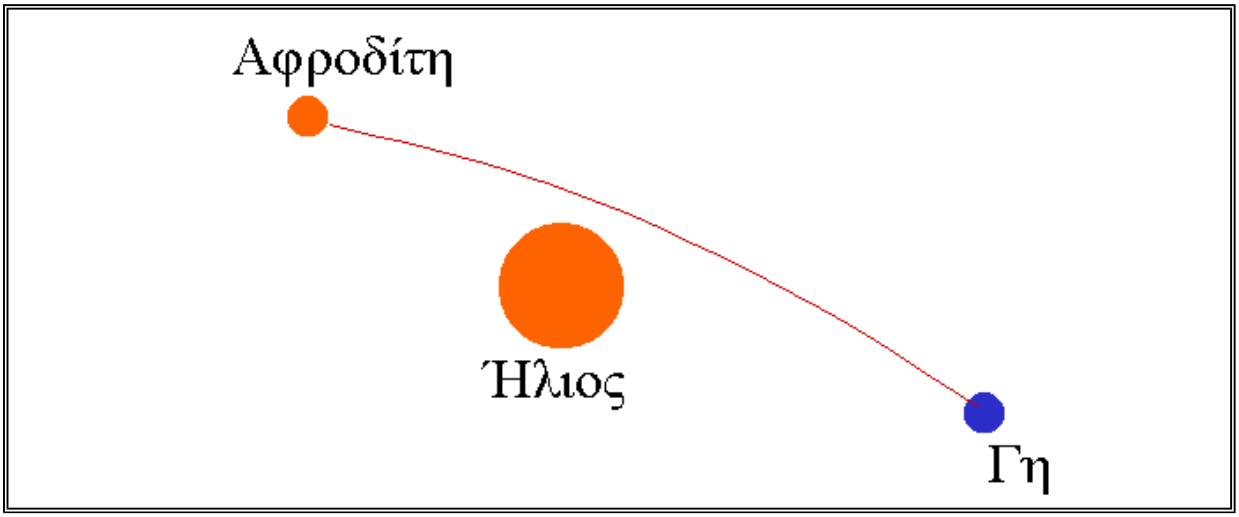



Ακόμα στα παρακάτω σχήματα φαίνονται επιφάνειες με θετική και αρνητική καμπυλότητα.



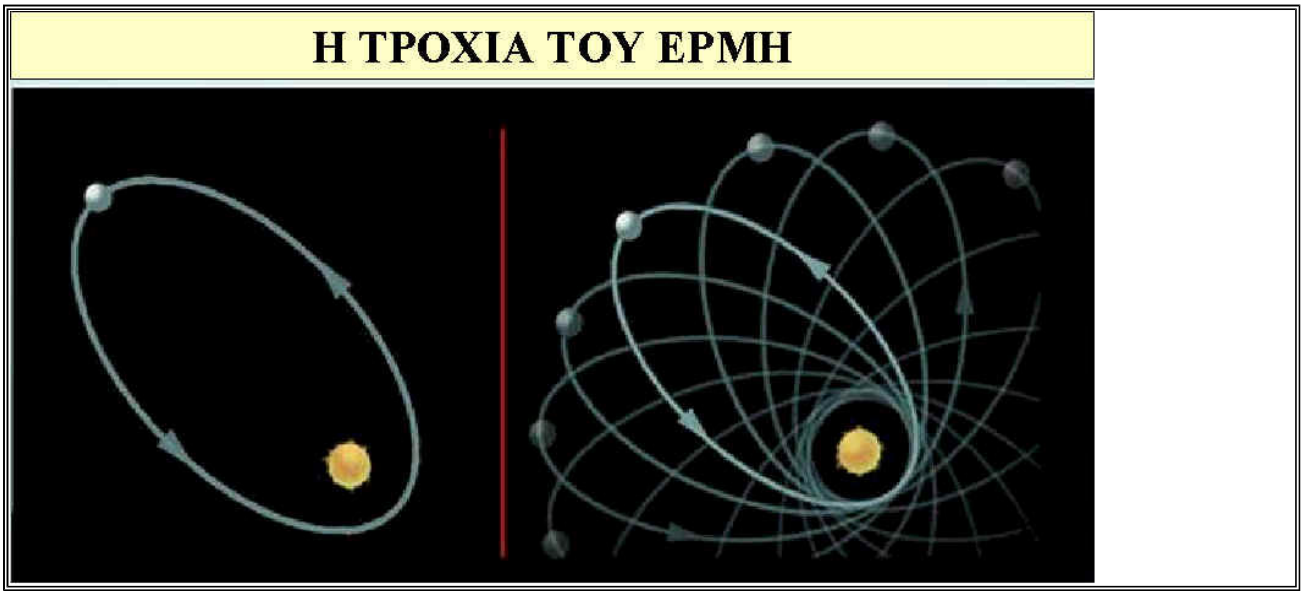

Από τη δεκαετία του 60 έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα «καθυστέρησης Shapiro» (αστρονόμος) (Serway at.al 1989) των οποίων τα αποτελέσματα υποστηρίζουν την ισχύ της θεωρίας. Συγκεκριμένα στέλνονται

ηλεκτρομαγνητικά σήματα από τη Γη στην Αφροδίτη (ή και σε άλλους πλανήτες και φυσικούς ή τεχνητούς δορυφόρους) και αφού ανακλώνται επιστρέφουν στη Γη. Όταν τα σήματα περνούν κοντά από τον Ήλιο καθυστερούν περίπου κατά 200μs από την περίπτωση που περνούν μακριά από τον Ήλιο. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί με την καμπύλωση του χωροχρόνου κοντά στην Ήλιο.




**ΜΕΤΑΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΗΛΙΟΥ ΤΟΥ ΕΡΜΗ**

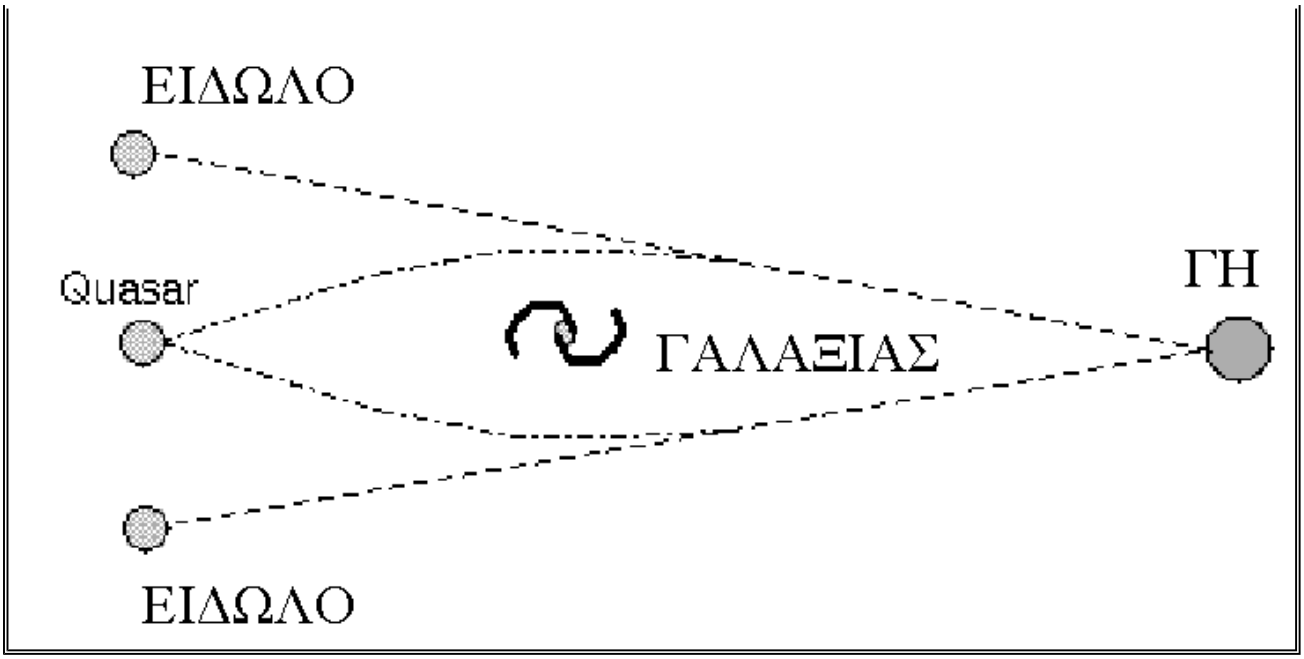
Το 1859 ο αστρονόμος Le Verrier ανακάλυψε ότι το περιήλιο του Ερμή μετατοπίζεται προς τα μπρος κατά 43 δεύτερα λεπτά της μοίρας κάθε 100 χρόνια.



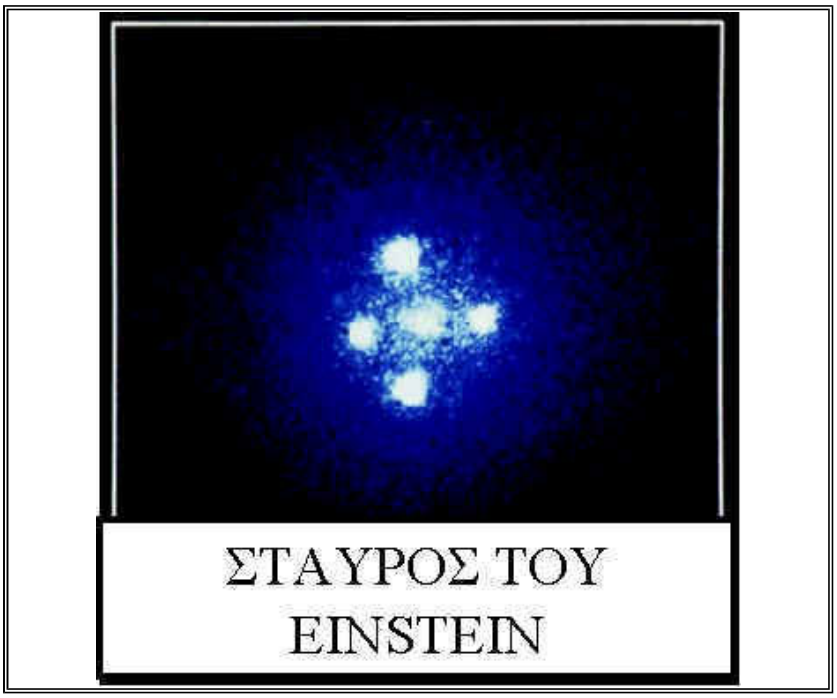

Διατυπώθηκαν διάφορες θεωρίες για την ερμηνεία του φαινομένου, όπως η απόκλιση του νόμου της βαρύτητας από «το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης», η ύπαρξη ενός νέου πλανήτη του Vulcan / Ηφαίστου κοντά στον Ήλιο κ.α. οι οποίες δεν επιβεβαιώνονται. Η εξήγηση από τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας αποτελεί μια ακόμα επιτυχία της. Η μετάπτωση του περιηλίου του Ερμή οφείλεται κυρίως στη επίδραση του πεδίου βαρύτητας του Ήλιου πάνω στις ιδιότητες του χωρόχρονου.

**ΒΑΡΥΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ**

Ως αποτέλεσμα της καμπύλωσης του φωτός από ισχυρά βαρυτικά πεδία προκύπτει το φαινόμενου της δημιουργίας ειδώλων κάποιων αστέρων. Κάποιος γαλαξίας ή σμήνος γαλαξιών παίζει το ρόλο του «βαρυτικού φακού» όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα




Το φαινόμενο έγινε για πρώτη φορά αντιληπτό το 1979 όταν ανακαλύφθηκε ο διπλός κβάσαρ Q0957+561, ο οποίος τελικά δεν ήταν διπλός αλλά ένας μοναχικός ημιαστέρας με το είδωλό του.




**ΒΑΡΥΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ**

Οι εξισώσεις πεδίου της γενικής σχετικότητας επιδέχονται λύσεις κυματικής μορφής όπως ήδη έδειξε από το 1916 ο Einstein. Δηλαδή όπως ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό φορτίο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα, έτσι και ένα περιστρεφόμενο σύστημα μαζών εκπέμπει βαρυτικά κύματα. Με τα βαρυτικά κύματα έχουμε μεταφορά ενέργειας μακριά από την πηγή εκπομπής τους. Τα βαρυτικά κύματα είναι ασθενή και συνεπώς δύσκολο να ανιχνευτούν. Καταβάλλονται σήμερα προσπάθειες από πολλούς επιστήμονες να κατασκευαστούν υπερευαίσθητοι ανιχνευτές προκειμένου να τα ανιχνεύσουν. Παρόλο που τα βαρυτικά κύματα είναι δύσκολο να ανιχνευτούν οι επιστήμονες είναι πεισμένοι για την ύπαρξή τους. Μια ισχυρή ένδειξη για την ύπαρξή τους αποτελεί το γεγονός ότι έχει βρεθεί ότι η περίοδος ενός διπλού πάλσαρ (αστέρας νετρονίου που στρέφεται ταχύτατα) μειώνεται επειδή τα δύο αστέρια πλησιάζουν. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει απώλεια ενέργειας η οποία προφανώς ακτινοβολείται. Αυτή η ενέργεια είναι, με σφάλμα 4%, αυτή που υπολογίζεται με βάση τη θεωρία της γενικής σχετικότητα ότι ακτινοβολείται ως βαρυτική ακτινοβολία.

**ΜΑΥΡΕΣ ΤΡΥΠΕΣ**

Μία από τις προβλέψεις της Γενικής θεωρίας της σχετικότητας είναι και η πιθανή ύπαρξη μαύρων οπών.

Για να κατανοήσουμε ποιοτικά τις μαύρες τρύπες πρέπει να σκεφτούμε ότι ένα σώμα ανεξάρτητα της μάζας του, για να ξεφύγει της βαρυτικής έλξης ενός ουράνιου σώματος χρειάζεται ορισμένη ταχύτητα διαφυγής. Αν υποθέσουμε ότι η ταχύτητα διαφυγής πλησιάζει την έσχατη ταχύτητα που είναι ή ταχύτητα του φωτός, c, τότε κανένα σώμα., ούτε το φως, δεν μπορεί να ξεφύγει, συνεπώς το ουράνιο σώμα δεν "θα φαίνεται" θα είναι μια μαύρη τρύπα. Το αποτέλεσμα της Γενικής θεωρίας δίνει ότι αυτό συμβαίνει αν η ακτίνα του ουρανίου σώματος είναι μικρότερη ή ίση από την κρίσιμη ακτίνα.

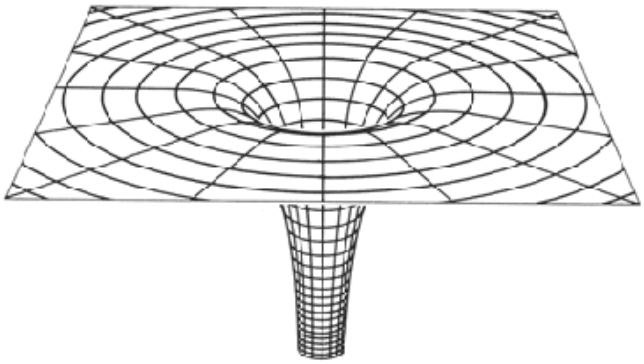
$$R_c = \frac{2GM}{c^2}$$

Αυτή η ακτίνα για ένα αστέρα με μάζα σαν το Ήλιο είναι μόλις 3Km, ενώ με μάζα ίση με τη μάζα της Γης είναι 9mm!!!

Πως όμως μπορεί να γίνει αυτό, δηλαδή να συμπιεστεί τόσο πολύ η ύλη; Η απάντηση είναι ότι όταν ένας αστέρας καταναλώσει τα πυρηνικά του καύσιμα δεν μπορεί να αναπτυχθεί η απαραίτητη θερμοκρασία και πίεση για να αντισταθμίζεται η έλξη των ίδιων των συστατικών του και αρχίζει έτσι η βαρυτική του κατάρρευση. Υπό κάποιες προϋποθέσεις μπορεί αυτός να καταλήξει σε μαύρη τρύπα.

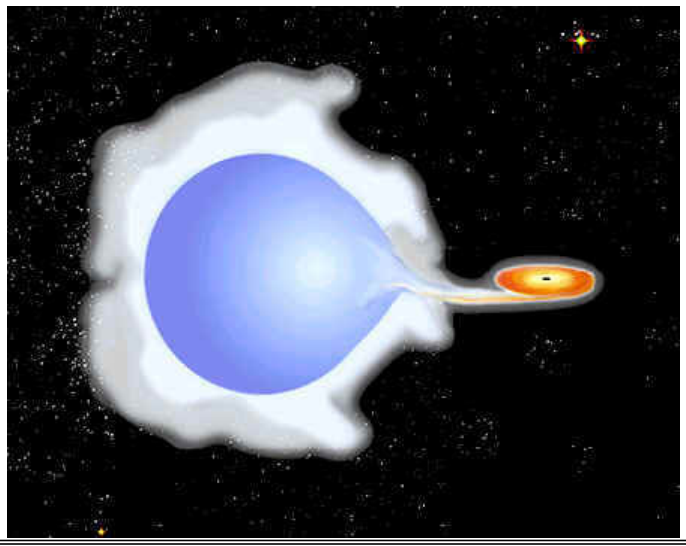
Η πρώτη σχετικιστική λύση για μη περιστρεφόμενη μαύρη τρύπα δόθηκε το 1916 από τον Schwarzschild, ενώ τον πρώτο υπολογισμό για τη βαρυτική σύνθλιψη σε κατάσταση μαύρης τρύπας έκαναν το 1939 οι Oppenheimer και Snyder. Έντονη δραστηριότητα γύρω από το θέμα των μαύρων οπών έχουμε μετά το 1960. Ο Kerr βρήκε τη λύση του προβλήματος της περιστρεφόμενης μαύρης τρύπας. Ο Hawking το 1974 υποστήριξε ότι αν εφαρμόσουμε τους νόμους της κβαντικής μηχανικής έξω από μια μαύρη τρύπα τότε θα διαπιστώσουμε ότι αυτή εξαχνώνεται δημιουργώντας σωματίδια και εκεί μπορεί κάποιος να ορίσει χαρακτηριστική θερμοκρασία και εντροπία.

Κάθε σήμα που εκπέμπεται από «παρατηρητή» μέσα στη σφαίρα που ορίζεται από τη κρίσιμη ακτίνα παραμένει δέσμιο μέσα σε αυτά τα όρια που ονομάζονται «ορίζοντας των γεγονότων» Μέσα σε κάθε μαύρη τρύπα υπάρχει μια περιοχή του χωρόχρονου που καλείται «σημειακή ανωμαλία». Εκεί δεν ισχύουν οι γνωστοί νόμοι της φυσικής, η βαρύτητα είναι άπειρη και ο χρόνος έχει φτάσει στο τέλος του. Όμως τα τεκταινόμενα εκεί δεν φτάνουν ποτέ στο έξω κόσμο, δεν περνούν ποτέ τον ορίζοντα των γεγονότων.



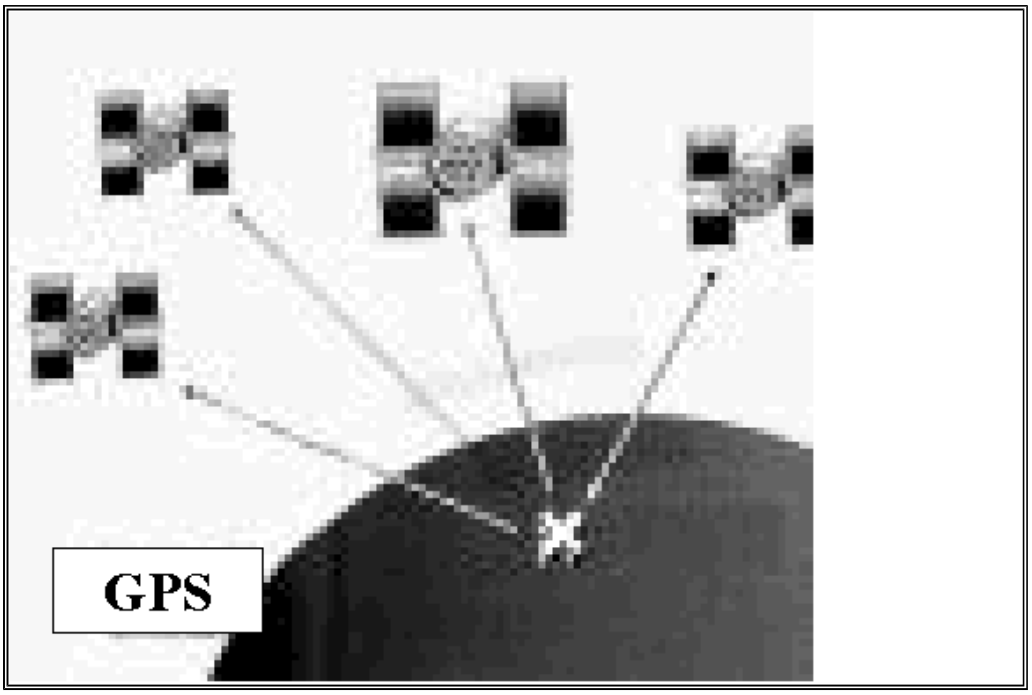
Ο χωρόχρονος κοντά στη μαύρη τρύπα (δισδιάστατη αναπαράσταση)

Ο Χ-1 του αστερισμού του Κύκνου είναι πιθανόν μια μαύρη τρύπα. Αυτός «ρουφάει» ύλη από το συνοδό του. Τα αέρια αυτής της ύλης φτάνουν σε πολύ ψηλές θερμοκρασίες και καθώς πέφτουν πάνω στον Χ-1 εκπέμπουν ακτίνες Χ.



**GPS - Global Positioning System**

Μια μονάδα GPS είναι μια διάταξη η οποία μπορεί να προσδιορίζει ακριβέστατα τη θέση στην οποία βρίσκεται πάνω στη Γη και αποτελεί παράδειγμα καθημερινής εφαρμογής της θεωρίας της σχετικότητας. Ο προσδιορισμός της θέσης γίνεται με την ανίχνευση σημάτων που στέλνονται από δορυφόρους. Εάν όλοι οι δορυφόροι εκπέμπουν σήματα ταυτόχρονα, και η μονάδα GPS ανιχνεύει τα σήματα από τέσσερις διαφορετικούς δορυφόρους, θα υπάρξουν τρεις σχετικές χρονικές καθυστερήσεις μεταξύ των σημάτων που ανιχνεύει. Τα σήματα δίνουν στη μονάδα GPS την ακριβή θέση του δορυφόρου από τον οποίο προήλθαν. Με αυτές τις πληροφορίες, η μονάδα GPS χρησιμοποιεί την ταχύτητα του φωτός για να μεταφράσει τις χρονικές καθυστερήσεις σε αποστάσεις, και επομένως να υπολογίσει τη θέση της στη Γη.




Αλλά για να γίνει αυτό με ακρίβεια πρέπει να γίνουν διορθώσεις στα ρολόγια των δορυφόρων λαμβάνοντας υπόψη τη διαστολή του χρόνου τόσο λόγω κίνησης του δορυφόρου όσο και λόγω μεταβολής του υψομέτρου (δηλαδή της μεταβολής του βαρυτικού πεδίου). Αυτό πρέπει να γίνεται γιατί η ταχύτητα του φωτός είναι περίπου 0,3 μέτρα ανά νανοδευτερόλεπτο, έτσι ένα λάθος 100 νανοδευτερολέπτων θα μπορούσε παραδείγματος χάριν, να βάλει ένα αεροπλάνο από το διάδρομο σε μια τυφλή προσγείωση.

**ΕΠΙΛΟΓΟΣ**

Η γενική θεωρία της σχετικότητας είναι μια θεωρία που έχει περάσει ικανοποιητικά τα πειραματικά test στα

οποία έχει υποβληθεί, όπως ερυθρή μετατόπιση, καμπύλωση φωτός, καθυστέρηση σημάτων κοντά στον Ήλιο και έχει δώσει ικανοποιητικές ερμηνείες σε φαινόμενα όπως η μετάπτωση περιηλίου του Ερμή. Σήμερα στην αστροφυσική και κοσμολογία παίζει κεντρικό ρόλο. Με τη θεωρία αυτή γίνεται η μελέτη των μαύρων οπών, των αστέρων νετρονίων, των βαρυτικών φακών κ.α. Επίσης η θεωρία της γενικής σχετικότητας λαμβάνεται υπόψη και στην καθημερινή ζωή στο δορυφορικό σύστημα παγκόσμιας ναυσιπλοΐας και αεροπλοΐας καθώς λαμβάνεται υπόψη η μετατόπιση προς το ερυθρό των χρησιμοποιούμενων ρολογιών. Οι συνεχείς εφαρμογές της κάνουν τους υποστηρικτές της να χαμογελούν….