

Κεφάλαιο Σ1

Σχετικότητα

Μια σύντομη επισκόπηση της σύγχρονης φυσικής

Η επανάσταση του 20ου αιώνα

- 1900 Max Planck
 - Διατύπωσε τις βασικές ιδέες που οδηγούν στην κβαντική θεωρία.
- 1905 Αϊνστάιν
 - Διατύπωσε την ειδική θεωρία της σχετικότητας.

21ος αιώνας

- Η ιστορία παραμένει ατελής.

Τα βασικά προβλήματα της νευτώνειας μηχανικής

Η νευτώνεια μηχανική αδυνατεί να περιγράψει την κίνηση σωμάτων τα οποία κινούνται με ταχύτητες που προσεγγίζουν την ταχύτητα του φωτός.

Η νευτώνεια μηχανική είναι μια θεωρία περιορισμένης εμβέλειας.

- Δεν θέτει ανώτατο όριο στην ταχύτητα.
- Οι προβλέψεις της δεν συμφωνούν με τα σύγχρονα πειραματικά αποτελέσματα.
- Η νευτώνεια μηχανική είναι μια ειδική περίπτωση της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας του Αϊνστάιν.
 - Αυτό ισχύει στην περίπτωση που οι ταχύτητες είναι πολύ μικρότερες από την ταχύτητα του φωτός.

Η σχετικότητα του Γαλιλαίου

Για να περιγράψουμε ένα φυσικό γεγονός, πρέπει να ορίσουμε ένα σύστημα αναφοράς.

Δεν υπάρχει απόλυτο αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

- Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα ενός πειράματος που εκτελείται σε ένα όχημα το οποίο κινείται με σταθερή ταχύτητα πρέπει να είναι ίδια με τα αποτελέσματα ενός ίδιου πειράματος που πραγματοποιείται σε ένα ακίνητο όχημα.

Υπενθυμίσεις σχετικά με τα συστήματα αναφοράς:

- Σώματα που δεν δέχονται δυνάμεις δεν υφίστανται επιτάχυνση.
- Οποιοδήποτε σύστημα κινείται με σταθερή ταχύτητα ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, είναι επίσης αδρανειακό σύστημα.

Σύμφωνα με την **αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου**, οι νόμοι της μηχανικής πρέπει να είναι ίδιοι σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.

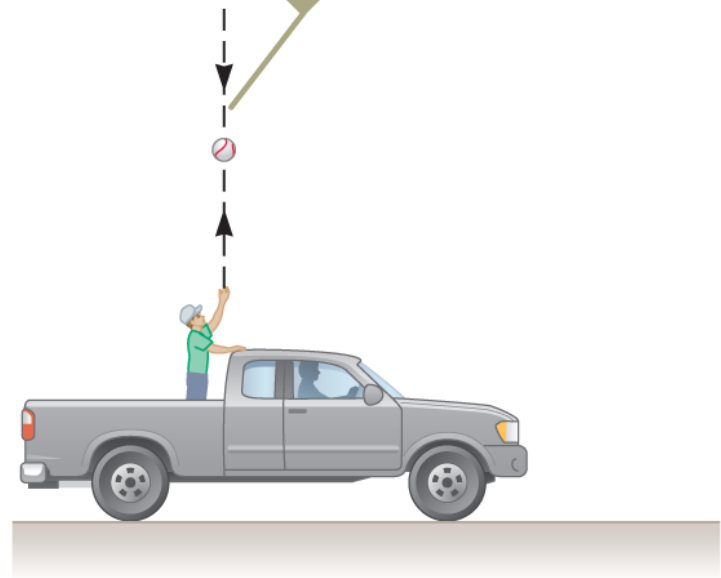
Σχετικότητα του Γαλιλαίου – Παράδειγμα

Το ημιφορτηγό κινείται με σταθερή ταχύτητα ως προς το έδαφος.

Ο παρατηρητής επάνω στο ημιφορτηγό πετάει μια μπάλα κατακόρυφα προς τα επάνω.

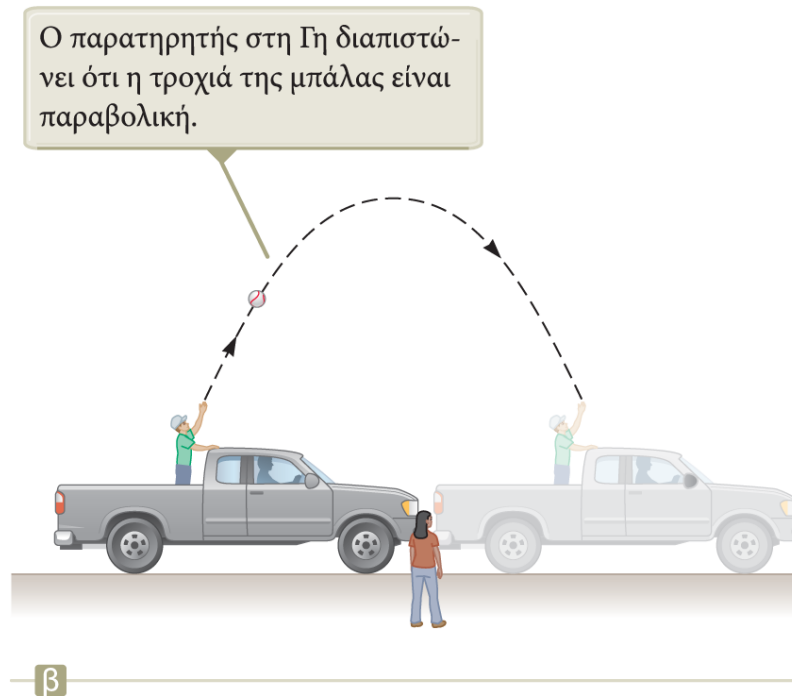
- Η μπάλα φαίνεται να διαγράφει κατακόρυφη τροχιά.
- Ισχύουν ο νόμος της βαρύτητας και οι εξισώσεις της κίνησης με σταθερή επιτάχυνση.

Ο παρατηρητής στο κινούμενο ημιφορτηγό διαπιστώνει ότι όταν πετάει την μπάλα κατακόρυφα προς τα πάνω, η μπάλα ακολουθεί κατακόρυφη τροχιά.



α

Σχετικότητα του Γαλιλαίου – Παράδειγμα (συνέχεια)



Στο έδαφος υπάρχει ένας ακίνητος παρατηρητής.

- Παρατηρεί ότι η τροχιά της μπάλας είναι παραβολική.
- Η μπάλα έχει ταχύτητα προς τα δεξιά ίση με την ταχύτητα του ημιφορτηγού.

Σχετικότητα του Γαλιλαίου – Παράδειγμα, συμπέρασμα

Οι δύο παρατηρητές διαφωνούν σχετικά με το σχήμα της τροχιάς της μπάλας.

Και οι δύο συμφωνούν ότι η κίνηση υπακούει στον νόμο της βαρύτητας και στους νόμους της κίνησης του Νεύτωνα.

Και οι δύο συμφωνούν σχετικά με το χρονικό διάστημα παραμονής της μπάλας στον αέρα.

Συμπέρασμα: Δεν υπάρχει προτιμητέο σύστημα αναφοράς για την περιγραφή των νόμων της μηχανικής.

Θεωρήσεις του ίδιου γεγονότος

Ένα γεγονός αποτελεί φυσικό φαινόμενο.

Θεωρήστε ότι συντελείται ένα γεγονός, το οποίο παρακολουθεί ένας παρατηρητής που βρίσκεται σε ηρεμία σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

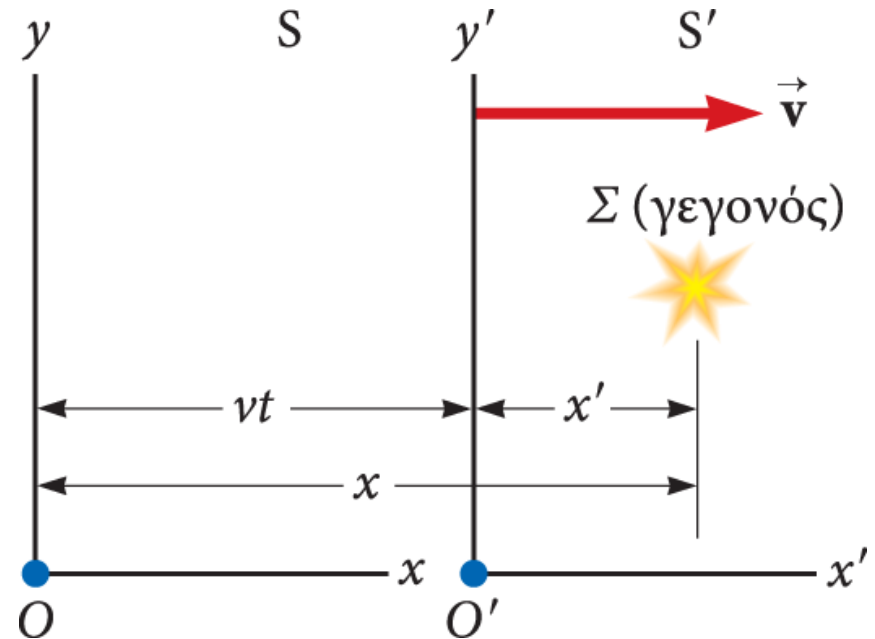
Η θέση και ο χρόνος του γεγονότος προσδιορίζονται από τις συντεταγμένες (x, y, z, t) .

Θεωρήστε δύο αδρανειακά συστήματα, S και S' .

Το S' κινείται με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος των κοινών αξόνων x και x' .

Η ταχύτητά του καταγράφεται ως προς το σύστημα S .

Υποθέστε ότι οι αρχές των S και S' συμπίπτουν τη χρονική στιγμή $t = 0$.



Οι χωροχρονικές εξισώσεις μετασχηματισμού του Γαλιλαίου

Ένας παρατηρητής στο σύστημα S περιγράφει το γεγονός με χωροχρονικές συντεταγμένες (x, y, z, t) .

Ένας παρατηρητής στο σύστημα S' περιγράφει το ίδιο γεγονός με χωροχρονικές συντεταγμένες (x', y', z', t') .

Οι συντεταγμένες συνδέονται με τις σχέσεις:

- $x' = x - vt$
- $y' = y$
- $z' = z$
- $t' = t$

Σημειώσεις για τις εξισώσεις μετασχηματισμού του Γαλιλαίου

Ο χρόνος είναι ο ίδιος και στα δύο αδρανειακά συστήματα αναφοράς.

- Σύμφωνα με την κλασική μηχανική, όλα τα ρολόγια λειτουργούν με τον ίδιο ρυθμό.
- Ο χρόνος κατά τον οποίο συντελείται ένα γεγονός σύμφωνα με τον παρατηρητή στο S είναι ίδιος με τον χρόνο που συντελείται το ίδιο γεγονός σύμφωνα με τον παρατηρητή στο S' .
- Αυτό αποδεικνύεται ότι δεν ισχύει όταν η ταχύτητα v είναι συγκρίσιμη με την ταχύτητα του φωτός.

Η εξίσωση μετασχηματισμού ταχύτητας του Γαλιλαίου

Υποθέστε ότι ένα σωματίδιο μετακινείται κατά απόσταση dx κατά μήκος του άξονα x μέσα σε χρονικό διάστημα dt .

Η αντίστοιχη μετατόπιση dx' είναι

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx}{dt} - v$$
$$\text{ή } u'_x = u_x - v$$

- Όπου u είναι η ταχύτητα του σωματιδίου και v η σχετική ταχύτητα των δύο συστημάτων συντεταγμένων.

Οι εξισώσεις μετασχηματισμού του Γαλιλαίου – Τελικές σημειώσεις

Οι άξονες x και x' συμπίπτουν, αλλά οι αρχές τους είναι διαφορετικές.

Οι άξονες y και y' είναι παράλληλοι, αλλά δεν συμπίπτουν.

- Αυτό οφείλεται στη μετατόπιση της αρχής του S' ως προς την αρχή του S .
- Το ίδιο ισχύει για τους άξονες z και z' .
- Αυτοί οι άξονες συμπίπτουν μόνο μία χρονική στιγμή λόγω της χρονικής εξάρτησης της μετατόπισης του S' ως προς την αρχή του S .

Ο χρόνος $= 0$ όταν οι αρχές των δύο συστημάτων συντεταγμένων συμπίπτουν.

Αν το σύστημα S' κινείται προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα x ως προς το S , τότε η ταχύτητα v είναι θετική.

- Διαφορετικά, είναι αρνητική.

Η ταχύτητα του φωτός

Η σχετικότητα του Γαλιλαίου δεν μπορεί να εφαρμοστεί στον ηλεκτρισμό, στον μαγνητισμό, και στην οπτική.

Ο Maxwell έδειξε ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι $c = 3.00 \times 10^8$ m/s.

Οι φυσικοί στα τέλη του 19ου αιώνα πίστευαν ότι τα κύματα φωτός διαδίδονται διαμέσου του αιθέρα.

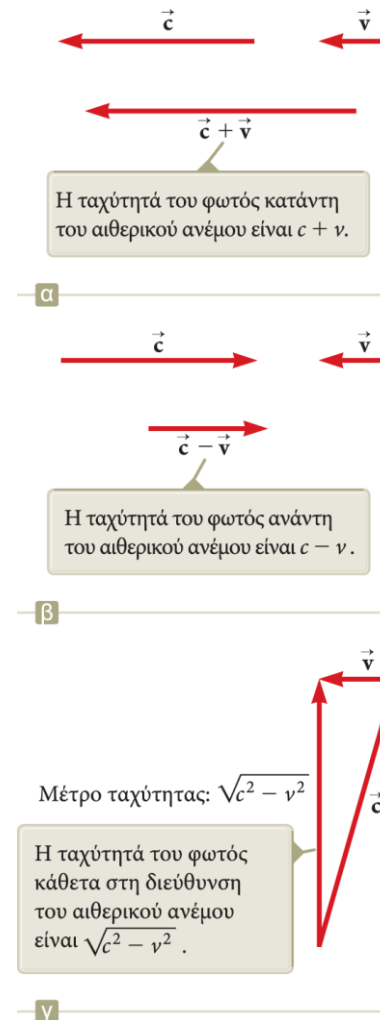
- Η ταχύτητα του φωτός θα μπορούσε να είναι c μόνο σε ένα ειδικό, απόλυτο σύστημα αναφοράς που βρίσκεται σε ακινησία ως προς τον αιθέρα.

Η επίδραση του αιθερικού ανέμου στο φως

Έστω v η ταχύτητα του αιθερικού ανέμου ως προς τη Γη.

c είναι η ταχύτητα του φωτός ως προς τον αιθέρα.

Στο διάγραμμα φαίνεται η συνισταμένη ταχύτητα σε διάφορες περιπτώσεις.



Αιθερικός άνεμος (συνέχεια)

Υποτίθεται ότι η ταχύτητα του αιθερικού ανέμου είναι ίση με την τροχιακή ταχύτητα της Γης.

Όλες οι απόπειρες για την ανίχνευση και την απόδειξη της ύπαρξης του αιθερικού ανέμου αποδείχτηκαν άκαρπες.

Ωστόσο, οι εξισώσεις του Maxwell φαίνεται να υποδηλώνουν ότι η ταχύτητα του φωτός έχει πάντα σταθερή τιμή σε όλα τα αδρανειακά συστήματα.

- Αυτό έρχεται σε αντίφαση με τα αποτελέσματα που προβλέπει η εξίσωση μετασχηματισμού της ταχύτητας του Γαλιλαίου.

Το πείραμα των Michelson-Morley

Πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1881 από τον Michelson.

Επαναλήφθηκε κάτω από διάφορες συνθήκες από τους Michelson και Morley.

Είχε σχεδιαστεί για την ανίχνευση μικρών μεταβολών στην ταχύτητα του φωτός.

- Οι μεταβολές αυτές θα ανιχνεύονταν με τον υπολογισμό της ταχύτητας της Γης ως προς τον υποθετικό αιθέρα.

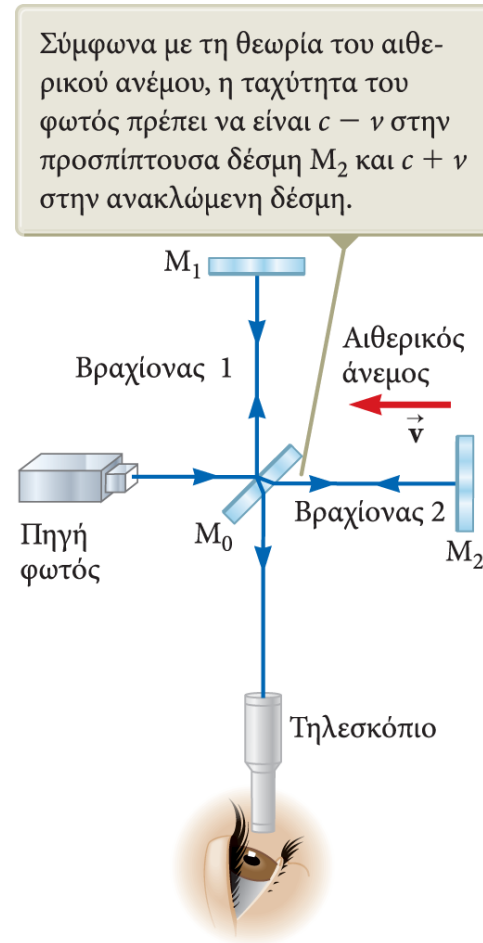
Ο πειραματικός εξοπλισμός των Michelson-Morley

Χρησιμοποιήθηκε το συμβολόμετρο Michelson.

Ο βραχίονας 2 ευθυγραμμίστηκε με την κατεύθυνση της κίνησης της Γης στον χώρο.

Παρατηρήθηκε η εικόνα των κροσσών συμβολής κατά την περιστροφή του συμβολόμετρου κατά 90° .

Θα έπρεπε να παρατηρηθεί μια μικρή, αλλά μετρήσιμη μεταβολή στην εικόνα των κροσσών συμβολής.



Τα αναμενόμενα αποτελέσματα του πειράματος των Michelson-Morley

Η ταχύτητα του φωτός που προσπίπτει στο κάτοπτρο M_2 θα έπρεπε να καταγραφεί στο σύστημα της Γης ως $c - v$.

Η ταχύτητα του φωτός που ανακλάται από το κάτοπτρο M_2 θα έπρεπε να καταγραφεί στο σύστημα της Γης ως $c + v$.

Το πείραμα επαναλήφθηκε σε διαφορετικές εποχές του χρόνου κατά τις οποίες αναμενόταν πως η ένταση και η κατεύθυνση του αιθερικού ανέμου θα ήταν διαφορετική.

Τα τελικά αποτελέσματα του πειράματος των Michelson-Morley

Οι μετρήσεις δεν έδειξαν την παραμικρή μεταβολή στην εικόνα των κροσσών.

- Ποτέ δεν παρατηρήθηκε η προβλεπόμενη μετάθεση των κροσσών συμβολής.
- Τα αρνητικά αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με την υπόθεση του αιθέρα.
- Έδειξαν επίσης ότι είναι αδύνατο να μετρηθεί η απόλυτη ταχύτητα της Γης ως προς το σύστημα του αιθέρα.

Το φως πλέον θεωρείται ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο δεν απαιτεί την ύπαρξη ενός μέσου για να διαδοθεί.

- Η ιδέα του αιθέρα εγκαταλείφθηκε.

Άλμπερτ Αϊνστάιν

1879–1955

1905

- Δημοσίευσε τέσσερις επιστημονικές εργασίες.
- Η πιο σημαντική αφορούσε την ειδική θεωρία της σχετικότητας.

1916

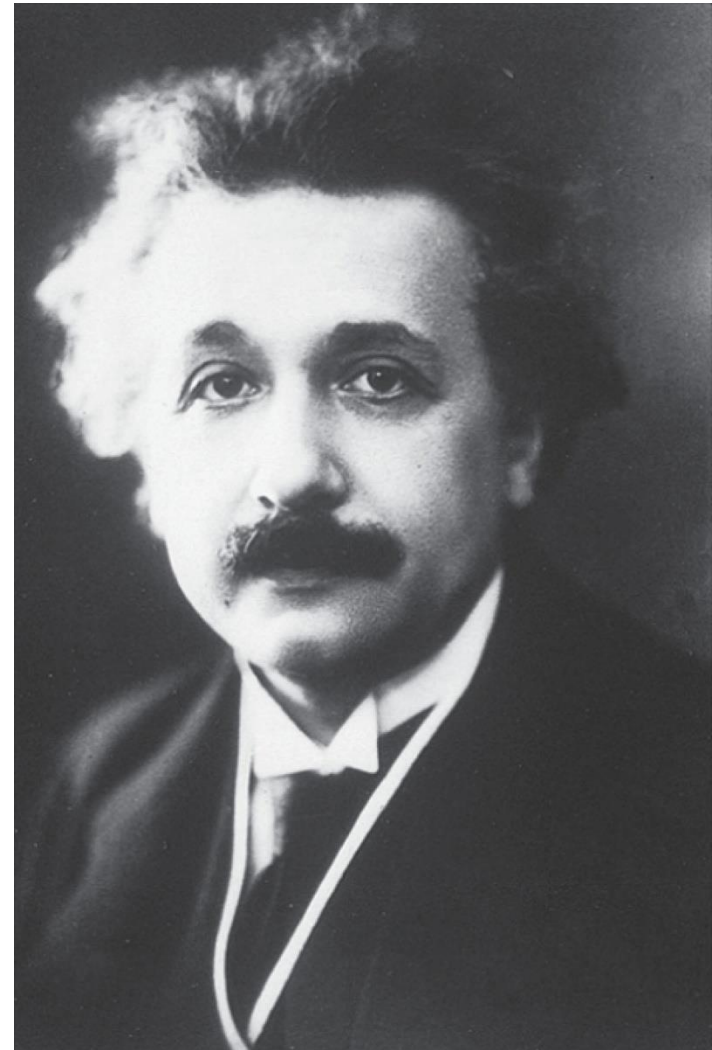
- Γενική σχετικότητα
- 1919 – επιβεβαίωση της θεωρίας

Δεκαετία του 1920

- Δεν δέχθηκε την κβαντική θεωρία.

Γύρω στα 1940

- Η έρευνά του για μια ενοποιημένη θεωρία δεν απέφερε καρπούς.



Η αρχή της σχετικότητας του Αϊνστάιν

Επιλύει την αντίφαση μεταξύ της σχετικότητας του Γαλιλαίου και του γεγονότος ότι η ταχύτητα του φωτός είναι η ίδια για όλους τους παρατηρητές.

Αξιώματα

- **Η αρχή της σχετικότητας:** Οι νόμοι της φυσικής είναι ίδιοι σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.
- **Η σταθερότητα της ταχύτητας του φωτός:** Η ταχύτητα του φωτός στο κενό έχει την ίδια τιμή, $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$, σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του παρατηρητή ή την ταχύτητα της πηγής του φωτός.

Η αρχή της σχετικότητας

Αποτελεί γενίκευση της αρχής της σχετικότητας του Γαλιλαίου, η οποία αναφέρεται μόνο στη μηχανική.

Τα αποτελέσματα οποιουδήποτε πειράματος πραγματοποιείται σε ένα εργαστήριο που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, πρέπει να είναι ίδια με αυτά ενός πειράματος που πραγματοποιείται σε ένα άλλο εργαστήριο, το οποίο κινείται με σταθερή ταχύτητα ως προς το πρώτο.

Δεν υπάρχει προτιμώμενο σύστημα αναφοράς.

Είναι αδύνατο να ανιχνευθεί απόλυτη κίνηση.

Η σταθερότητα της ταχύτητας του φωτός

Απαιτείται από το πρώτο αξίωμα.

Επιβεβαιώνεται πειραματικά με διάφορους τρόπους.

Εξηγεί το αρνητικό αποτέλεσμα του πειράματος Michelson-Morley.

Η σχετική κίνηση δεν έχει σημασία κατά τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός.

- Πρέπει να μεταβάλλουμε τη θεώρηση που επιβάλλει η κοινή λογική για τον χώρο και τον χρόνο.

Οι συνέπειες της ειδικής σχετικότητας

Ας επικεντρωθούμε στις έννοιες του ταυτοχρονισμού, των χρονικών διαστημάτων, και του μήκους:

- Διαφέρουν πολύ στη σχετικιστική μηχανική από ό,τι στη νευτώνεια μηχανική.

Στη σχετικιστική μηχανική:

- Δεν υπάρχει απόλυτο μήκος.
- Δεν υπάρχει απόλυτος χρόνος.
- Γεγονότα σε διαφορετικές τοποθεσίες που φαίνονται να συντελούνται ταυτόχρονα σε ένα σύστημα αναφοράς δεν καταγράφονται ως ταυτόχρονα σε ένα άλλο σύστημα, το οποίο κινείται ομαλά ως προς το πρώτο.

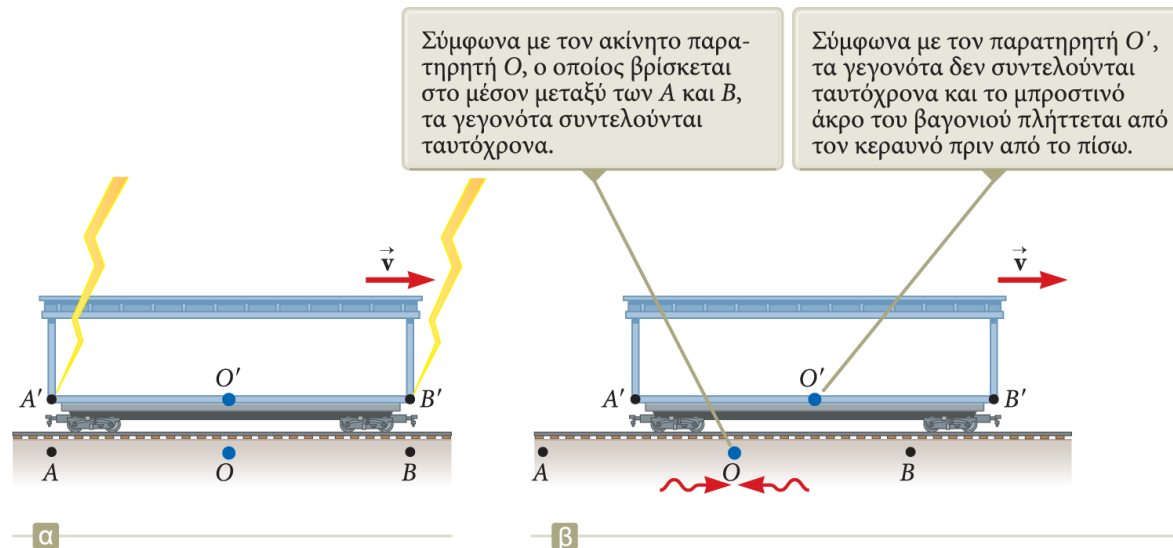
Ταυτοχρονισμός

Στην ειδική σχετικότητα, ο Αϊνστάιν εγκατέλειψε την υπόθεση του ταυτοχρονισμού.

Νοητικό πείραμα για την απόδειξη:

- Ένα βαγόνι τραίνου κινείται με σταθερή ταχύτητα.
- Δύο κεραυνοί χτυπάνε τα άκρα του βαγονιού.
- Οι κεραυνοί αφήνουν σημάδια (A' και B') στο βαγόνι και (A και B) στο έδαφος.
- Υπάρχουν δύο παρατηρητές: Ο παρατηρητής O' στο βαγόνι και ο παρατηρητής O στο έδαφος.

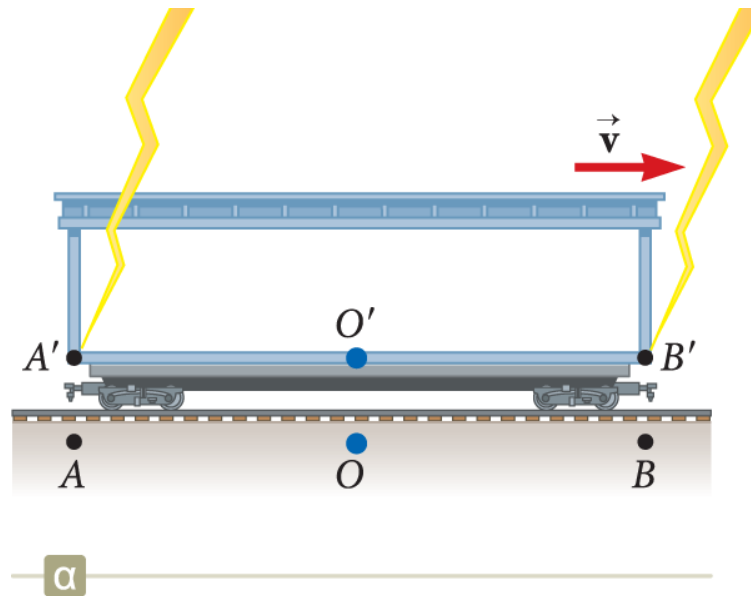
Ταυτοχρονισμός – Νοητικό πείραμα



Ο παρατηρητής O βρίσκεται στο μέσον της απόστασης μεταξύ των σημείων A και B του εδάφους στα οποία χτύπησε ο κεραυνός.

Ο παρατηρητής O' βρίσκεται στο μέσον της απόστασης μεταξύ των σημείων A' και B' του βαγονιού στα οποία χτύπησε ο κεραυνός.

Ταυτοχρονισμός – Αποτελέσματα νοητικού πειράματος



Το φως από τους δύο κεραυνούς φτάνει στον παρατηρητή O ταυτοχρόνως.

- Συμπεραίνει ότι το φως κάλυψε τις αποστάσεις κινούμενο με την ίδια ταχύτητα.
- Ο παρατηρητής O συμπεραίνει ότι οι κεραυνοί χτύπησαν ταυτοχρόνως.

Ταυτοχρονισμός – Αποτελέσματα νοητικού πειράματος (συνέχεια)

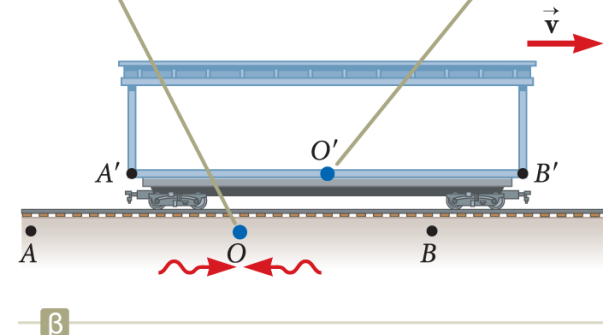
Όταν το φως φτάνει στον παρατηρητή O , ο παρατηρητής O' έχει μετακινηθεί.

Το σήμα από το σημείο B έχει ήδη προσπεράσει τον παρατηρητή O' , αλλά το σήμα από το σημείο A δεν τον έχει φτάσει ακόμη.

- Οι δύο παρατηρητές πρέπει να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι το φως κινείται με την ίδια ταχύτητα.
- Ο παρατηρητής O' συμπεραίνει ότι ο κεραυνός χτυπάει το μπροστινό άκρο του βαγονιού *πριν* χτυπήσει το πίσω άκρο (τα γεγονότα δεν είναι ταυτόχρονα).

Σύμφωνα με τον ακίνητο παρατηρητή O , ο οποίος βρίσκεται στο μέσον μεταξύ των A και B , τα γεγονότα συντελούνται ταυτόχρονα.

Σύμφωνα με τον παρατηρητή O' , τα γεγονότα δεν συντελούνται ταυτόχρονα και το μπροστινό άκρο του βαγονιού πλήττεται από τον κεραυνό πριν από το πίσω.



Ταυτοχρονισμός – Νοητικό πείραμα (σύνοψη)

Δύο γεγονότα τα οποία είναι ταυτόχρονα σε ένα σύστημα αναφοράς δεν είναι γενικά ταυτόχρονα σε ένα δεύτερο σύστημα αναφοράς, το οποίο βρίσκεται σε κίνηση ως προς το πρώτο.

Δηλαδή, ο ταυτοχρονισμός δεν είναι απόλυτη έννοια αλλά εξαρτάται από την κατάσταση της κίνησης του παρατηρητή.

- Στο νοητικό πείραμα, και οι δύο παρατηρητές έχουν δίκιο επειδή δεν υπάρχει προτιμητέο αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Ταυτοχρονισμός, χρόνος διάδοσης

Σε αυτό το νοητικό πείραμα, η ασυμφωνία εξαρτάται από τον χρόνο διάδοσης του φωτός προς τους παρατηρητές και επομένως δεν επιδεικνύει το βαθύτερο νόημα της σχετικότητας.

Στις σχετικιστικές αναλύσεις φαινομένων που συμβαίνουν σε υψηλές τιμές ταχυτήτων, ο ταυτοχρονισμός είναι σχετικός ακόμα και αν δεν ληφθεί υπόψη ο χρόνος διάδοσης.

- Σε όλες τις επόμενες αναλύσεις θα αγνοήσουμε τον χρόνο διάδοσης.

Διαστολή του χρόνου, κινούμενος παρατηρητής

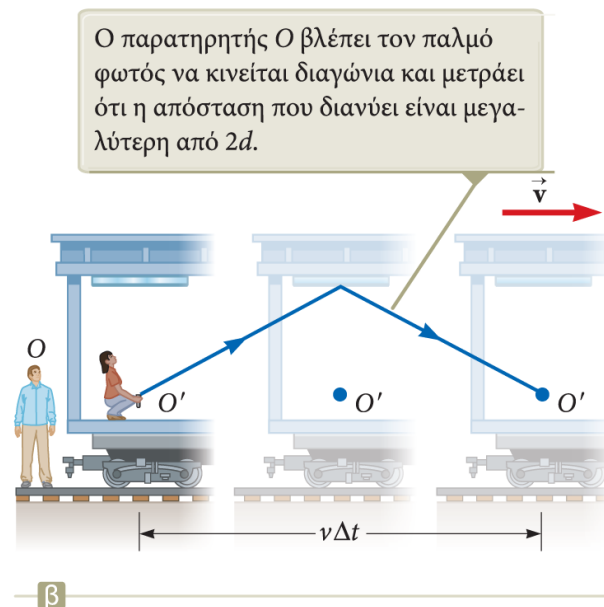
Ο παρατηρητής O' έχει ένα ρολόι.

Το χρησιμοποιεί για να μετρήσει τον χρόνο μεταξύ των γεγονότων (Δt_p).

Μοντελοποιούμε τον παλμό φωτός σαν ένα σωματίδιο που κινείται με σταθερό μέτρο ταχύτητας.

- Ο παρατηρητής βλέπει τα γεγονότα να πραγματοποιούνται στο ίδιο μέρος.
- $\Delta t_p = \text{απόσταση} / \text{μέτρο ταχύτητας} = (2d)/c$

Διαστολή του χρόνου, ακίνητος παρατηρητής



Ο παρατηρητής O βρίσκεται σε ένα δεύτερο σύστημα σε ηρεμία ως προς το έδαφος. Παρατηρεί το κάτοπτρο και τον παρατηρητή O' να κινούνται με ταχύτητα μέτρου v . Όταν το φως από τον φακό φτάνει στο κάτοπτρο, το κάτοπτρο έχει μετατοπιστεί προς τα δεξιά.

Το φως πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση σύμφωνα με τον O από ό,τι σύμφωνα με τον O' .

Διαστολή του χρόνου, παρατηρήσεις

Και οι δύο παρατηρητές καταγράφουν ταχύτητα φωτός c .

Σύμφωνα με τον παρατηρητή O , το φως διανύει μεγαλύτερη απόσταση.

Το χρονικό διάστημα για τον παρατηρητή O (Δt) είναι μεγαλύτερο από ό,τι για τον παρατηρητή O' (Δt_p).

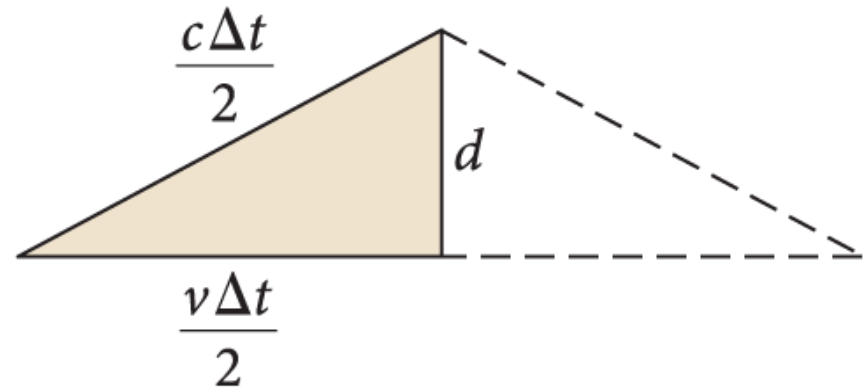
Διαστολή του χρόνου, σύγκριση των χρονικών διαστημάτων

Το χρονικό διάστημα Δt είναι μεγαλύτερο από το χρονικό διάστημα Δt_p .

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t_p$$

$$\text{όπου } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Το γ είναι πάντα μεγαλύτερο της μονάδας.



γ

Διαστολή του χρόνου – Σύνοψη

Το χρονικό διάστημα Δt μεταξύ δύο γεγονότων που καταγράφει ένας παρατηρητής, ο οποίος κινείται ως προς ένα ρολόι, είναι μεγαλύτερο από το χρονικό διάστημα Δt_p μεταξύ δύο ίδιων γεγονότων, που καταγράφει ένας παρατηρητής ο οποίος είναι ακίνητος ως προς το ρολόι.

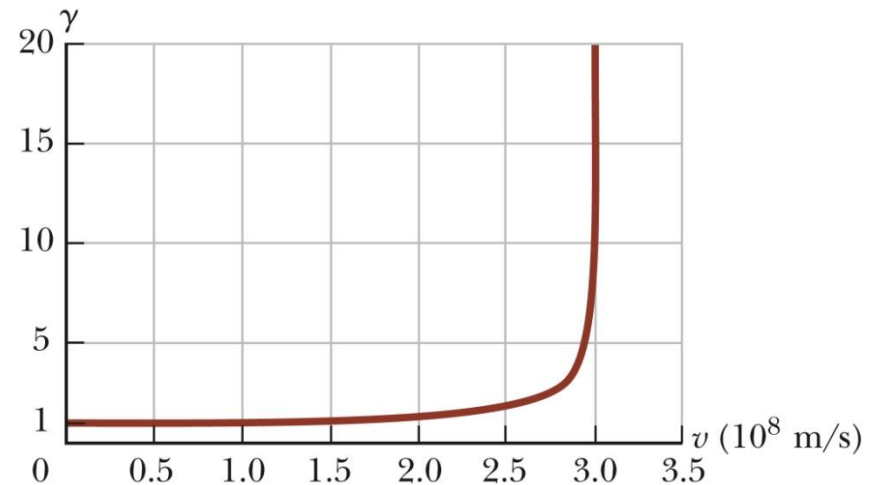
- Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως διαστολή του χρόνου.

Παράγοντας γ

Η διαστολή του χρόνου δεν παρατηρείται στην καθημερινότητα.

Για μικρές τιμές ταχύτητας, ο παράγοντας γ είναι πολύ μικρός και η διαστολή του χρόνου είναι αμελητέα.

Καθώς η ταχύτητα προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός, ο παράγοντας γ αυξάνεται ραγδαία.



Τιμές του παράγοντα γ

ΠΙΝΑΚΑΣ Σ1.1

*Προσεγγιστικές τιμές του γ
για διάφορες τιμές ταχύτητες*

v/c	γ
0	1
0.001 0	1.000 000 5
0.010	1.000 05
0.10	1.005
0.20	1.021
0.30	1.048
0.40	1.091
0.50	1.155
0.60	1.250
0.70	1.400
0.80	1.667
0.90	2.294
0.92	2.552
0.94	2.931
0.96	3.571
0.98	5.025
0.99	7.089
0.995	10.01
0.999	22.37

Προσδιορισμός του ιδιοχρόνου

Το χρονικό διάστημα Δt_p ονομάζεται ιδιοχρόνος.

- Ο ιδιοχρόνος είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο γεγονότων, το οποίο καταγράφει ένας παρατηρητής που βλέπει τα γεγονότα να συντελούνται στο ίδιο σημείο του χώρου.
 - Πρέπει να μπορείτε να αναγνωρίζετε τον παρατηρητή ο οποίος καταγράφει τον ιδιοχρόνο.

Διαστολή του χρόνου – Γενίκευση

Αν ένα ρολόι κινείται ως προς εσάς, παρατηρείτε ότι το χρονικό διάστημα ανάμεσα στους χτύπους του κινούμενου ρολογιού είναι μεγαλύτερο από το χρονικό διάστημα ανάμεσα στους χτύπους ενός ίδιου ρολογιού στο σύστημα αναφοράς σας.

Όλες οι φυσικές διεργασίες επιβραδύνονται όταν συντελούνται σε ένα σύστημα το οποίο κινείται ως προς τον παρατηρητή.

- Αυτές οι διεργασίες μπορεί να είναι χημικές, βιολογικές, καθώς και φυσικές.

Διαστολή του χρόνου – Επαλήθευση

Η διαστολή του χρόνου είναι ένα πραγματικό φαινόμενο, το οποίο έχει επιβεβαιωθεί με διάφορα πειράματα.

Μεταξύ αυτών των πειραμάτων συγκαταλέγονται:

- Αεροπορικές πτήσεις
- Διασπάσεις μιονίων
- Το παράδοξο των διδύμων

Αεροπλάνα και διαστολή χρόνου

Το 1972 πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα, το οποίο απέδειξε άμεσα τη διαστολή του χρόνου.

Τα χρονικά διαστήματα που κατέγραψαν τέσσερα ρολόγια καισίου κατά τη διάρκεια μιας πτήσης συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα που κατέγραψαν ίδια ρολόγια αναφοράς, τα οποία βρίσκονταν στη Γη.

Τα αποτελέσματα συμφώνησαν με τις προβλέψεις της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας.

Επαλήθευση της διαστολής του χρόνου – Διασπάσεις μιονίων

Τα μίονια είναι ασταθή σωματίδια τα οποία έχουν φορτίο ίδιο με του ηλεκτρονίου αλλά μάζα 207 φορές μεγαλύτερη.

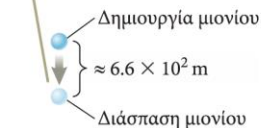
Η ημίσεια ζωή των μιονίων, όταν καταγράφεται σε ένα σύστημα αναφοράς που βρίσκεται σε ηρεμία ως προς αυτά, είναι $\Delta t_p = 2.2 \mu s$ (Εικ. α).

Ως προς έναν παρατηρητή στη Γη, τα μίονια θα πρέπει να έχουν ημιζωή

$$\gamma \Delta t_p \quad (\text{Εικ. β})$$

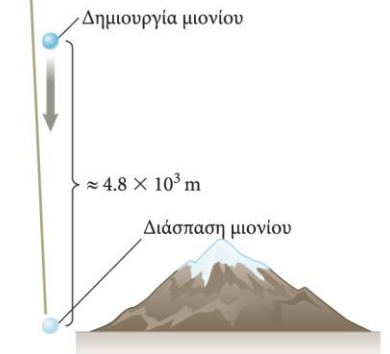
Κατά τη διάρκεια ενός πειράματος του CERN, καταγράφηκαν χρόνοι ημίσειας ζωής οι οποίοι συμφωνούν με τις προβλέψεις της σχετικότητας.

Σύμφωνα με έναν παρατηρητή στη Γη, ο οποίος δεν λαμβάνει υπόψη του τις σχετικιστικές διορθώσεις, τα μίονια που δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα και κινούνται κατακόρυφα προς τα κάτω με τιμές ταχύτητας που προσεγγίζουν αυτή του φωτός έχουν μέσο χρόνο ζωής $2.2 \mu s$ και διανύουν αποστάσεις περίπου $6.6 \times 10^2 m$ πριν διασπαστούν. Άρα, σύμφωνα με αυτόν τον παρατηρητή, λίγα μίονια αναμένεται να φτάσουν στην επιφάνεια της Γης.



α

Σύμφωνα με έναν παρατηρητή στη Γη ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τις σχετικιστικές διορθώσεις, ο χρόνος ζωής των μιονίων διαστέλλεται. Άρα, σύμφωνα με αυτόν τον παρατηρητή, τα μίονια μπορούν να διανύσουν αποστάσεις περίπου $4.8 \times 10^3 m$ προτού διασπαστούν. Πράγματι, πολλά από αυτά φτάνουν στην επιφάνεια της Γης.



β

Το παράδοξο των διδύμων – Περιγραφή

Το παράδοξο των διδύμων είναι ένα νοητικό πείραμα με δύο δίδυμους, τον Γρηγόρη και τον Σταμάτη.

Ο Γρηγόρης ταξιδεύει στον Πλανήτη Χ, ο οποίος απέχει 20 έτη φωτός από τη Γη.

- Το διαστημόπλοιο του ταξιδεύει με ταχύτητα $0.95c$.
- Μόλις φτάνει στον Πλανήτη Χ, ξεκινά αμέσως το ταξίδι της επιστροφής στη Γη με την ίδια ταχύτητα.

Όταν ο Γρηγόρης επιστρέφει, έχει γεράσει κατά 13 έτη, αλλά ο Σταμάτης έχει γεράσει κατά 42 έτη.

Η άποψη των διδύμων για το ταξίδι

Ο Σταμάτης θεωρεί ότι ήταν ακίνητος για όσο χρονικό διάστημα ο Γρηγόρης ταξίδευε.

Ο Γρηγόρης θεωρεί ότι αυτός ήταν σε κατάσταση ηρεμίας, και ότι ο Σταμάτης και η Γη αρχικά απομακρύνθηκαν από αυτόν και στη συνέχεια επέστρεψαν πίσω σε αυτόν.

Το παράδοξο: Ποιος δίδυμος γερνάει πιο αργά στην πραγματικότητα;

Το παράδοξο των διδύμων – Η λύση του γρίφου

Η σχετικότητα ισχύει για συστήματα αναφοράς τα οποία κινούνται με σταθερή ταχύτητα.

Το ταξίδι σε αυτό το νοητικό πείραμα δεν είναι συμμετρικό, καθώς ο Γρηγόρης υφίσταται διάφορες επιταχύνσεις κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του.

Επομένως, ο Σταμάτης μπορεί να εφαρμόσει τον τύπο της διαστολής του χρόνου με ιδιοχρόνο 42 ετών.

- Αυτό δίνει ένα χρονικό διάστημα 13 ετών για τον Γρηγόρη, κάτι που συμφωνεί με το προηγούμενο αποτέλεσμα.

Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει παράδοξο, γιατί ο Γρηγόρης δεν βρίσκεται σε αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Συστολή του μήκους

Η απόσταση που καταγράφεται ανάμεσα σε δύο σημεία του χώρου εξαρτάται από το σύστημα αναφοράς του παρατηρητή.

Το ιδιομήκος, L_p , ενός σώματος είναι το μήκος του που καταγράφει ένας παρατηρητής που είναι ακίνητος ως προς το σώμα.

Το μήκος ενός σώματος που καταγράφεται σε ένα σύστημα αναφοράς το οποίο κινείται ως προς το σώμα είναι πάντα μικρότερο από το ιδιομήκος.

- Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως συστολή του μήκους.

Περισσότερα για το ιδιομήκος

Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε τον παρατηρητή που μετράει το ιδιομήκος.

Το ιδιομήκος είναι πάντα το μήκος που καταγράφει ένας παρατηρητής ο οποίος είναι ακίνητος ως προς το σώμα.

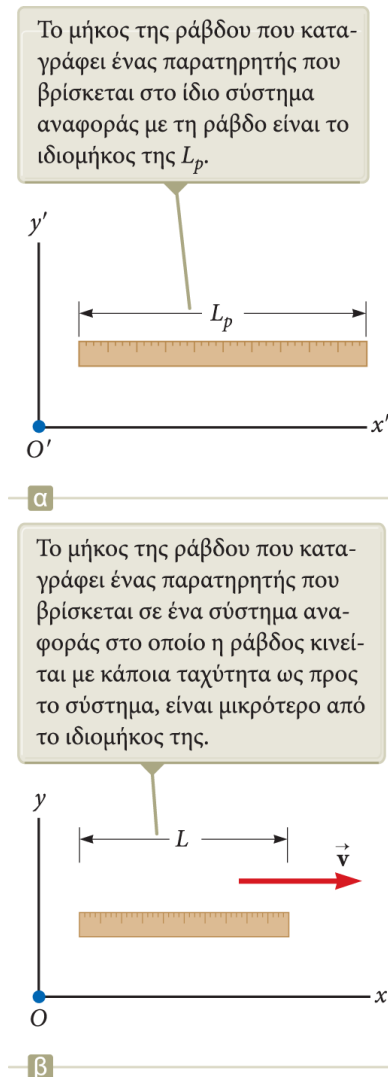
Συχνά ο ιδιοχρόνος και το ιδιομήκος *δεν* καταγράφονται από τον ίδιο παρατηρητή.

Συστολή του μήκους – Εξίσωση

$$L = \frac{L_P}{\gamma} = L_P \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Οι μετρήσεις δείχνουν ότι το μήκος ενός σώματος που κινείται με ταχύτητα v προς μια διεύθυνση παράλληλη με το μήκος του είναι μικρότερο από το μήκος που μετράει ένας παρατηρητής ο οποίος είναι ακίνητος ως προς το σώμα.

Η συστολή του μήκους συμβαίνει μόνο κατά μήκος της διεύθυνσης της κίνησης.



Ιδιομήκος και ιδιοχρόνος

Το ιδιομήκος και ο ιδιοχρόνος ορίζονται διαφορετικά.

Το ιδιομήκος ενός σώματος μετράται από έναν παρατηρητή ο οποίος είναι ακίνητος ως προς τα ακραία σημεία του σώματος.

Ο ιδιοχρόνος μεταξύ δύο γεγονότων μετράται από έναν παρατηρητή για τον οποίο τα δύο γεγονότα συντελούνται στο ίδιο σημείο του χώρου.

Χωροχρονικά διαγράμματα

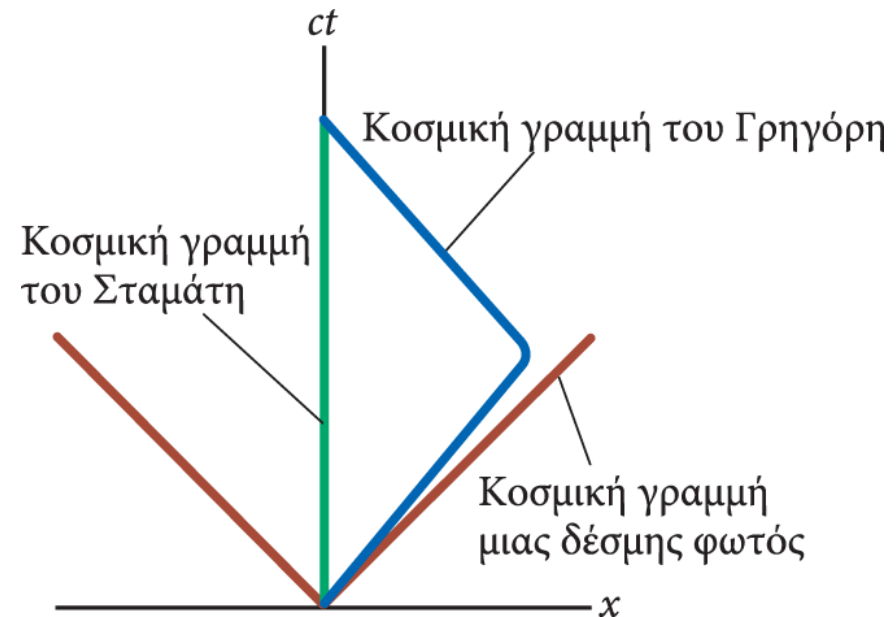
Σε ένα χωροχρονικό διάγραμμα, ct είναι η τεταγμένη, ενώ η θέση x είναι η τετμημένη.

Μια διαδρομή μέσα στον χωροχρόνο ονομάζεται **κοσμική γραμμή**.

Οι κοσμικές γραμμές του φωτός είναι διαγώνιες γραμμές.

Το παράδειγμα είναι το γράφημα για το παράδοξο των διδύμων.

- Όλα τα πιθανά μελλοντικά γεγονότα για τον Σταμάτη και τον Γρηγόρη βρίσκονται μεταξύ του άξονα x και των καφεκόκκινων γραμμών.
- Κανένας από τους διδύμους δεν μπορεί να ταξιδέψει ταχύτερα από το φως.



Κώνοι φωτός

Αν το χωροχρονικό διάγραμμα περιστραφεί γύρω από τον άξονα ct , η καφεκόκκινη γραμμή θα σχηματίσει έναν κώνο.

- Αυτός ο κώνος ονομάζεται κώνος φωτός.
- Ο κώνος γενικεύει το χωροχρονικό διάγραμμα σε δύο χωρικές διαστάσεις.

Όλα τα μελλοντικά συμβάντα για έναν παρατηρητή που βρίσκεται στην αρχή των συντεταγμένων θα πρέπει να βρίσκονται εντός του κώνου φωτός.

Μία ακόμα περιστροφή θα γενίκευε τον κώνο φωτός στις τρεις χωρικές διαστάσεις.

Ωστόσο, η απεικόνιση τεσσάρων διαστάσεων δεν είναι δυνατή στις δύο διαστάσεις ενός φύλλου χαρτιού.

- Τρεις χωρικές διαστάσεις και ο χρόνος.

Το σχετικιστικό φαινόμενο Doppler

Μια ακόμη συνέπεια της διαστολής του χρόνου είναι η μετάθεση της συχνότητας του φωτός που εκπέμπουν τα κινούμενα άτομα συγκριτικά με τη συχνότητα του φωτός που εκπέμπουν τα άτομα όταν είναι ακίνητα.

Αν μια πηγή φωτός και ένας παρατηρητής πλησιάζουν μεταξύ τους με σχετική ταχύτητα μέτρου v , η συχνότητα που καταγράφει ο παρατηρητής είναι

$$f' = \frac{\sqrt{1+v/c}}{\sqrt{1-v/c}} f$$

όπου f είναι η συχνότητα της πηγής στο ακίνητο σύστημα.

Η μετάθεση εξαρτάται μόνο από τη σχετική ταχύτητα, v , ανάμεσα στην πηγή και στον παρατηρητή.

Όταν η πηγή και ο παρατηρητής πλησιάζουν μεταξύ τους, τότε $f' > f$.

Ένα παράδειγμα είναι η μετάθεση του φωτός των γαλαξιών προς το ερυθρό, κάτι που υποδεικνύει ότι οι περισσότεροι γαλαξίες απομακρύνονται από εμάς.

Οι εξισώσεις μετασχηματισμού του Lorentz

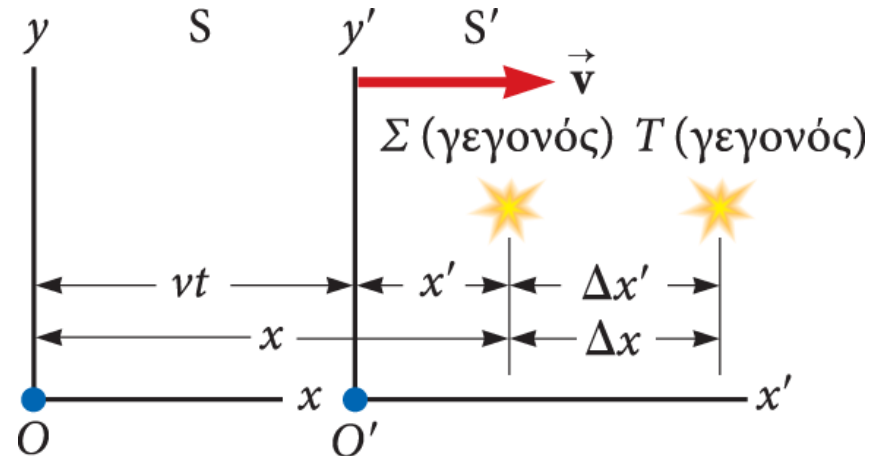
Υποθέστε ότι τα γεγονότα στα σημεία Σ και T καταγράφονται από δύο παρατηρητές.

Ο ένας παρατηρητής είναι ακίνητος στο σύστημα S .

Ο άλλος παρατηρητής βρίσκεται στο σύστημα S' και κινείται προς τα δεξιά με ταχύτητα μέτρου v .

Ο παρατηρητής στο S καταγράφει το γεγονός με χωροχρονικές συντεταγμένες (x, y, z, t) .

Ο παρατηρητής στο S' καταγράφει το ίδιο γεγονός με χωροχρονικές συντεταγμένες (x', y', z', t') .



Οι εξισώσεις μετασχηματισμού του Lorentz (συνέχεια)

Ο μετασχηματισμός του Γαλιλαίου προβλέπει ότι $\Delta x = \Delta x'$.

- Η απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία του χώρου στα οποία συμβαίνουν τα γεγονότα δεν εξαρτάται από την κίνηση του παρατηρητή.

Ο μετασχηματισμός του Γαλιλαίου δεν ισχύει όταν η ταχύτητα v προσεγγίζει τη c .

- Το αποτέλεσμα $\Delta x = \Delta x'$ έρχεται σε αντίθεση με τη συστολή του μήκους.

Οι εξισώσεις που ισχύουν για οποιαδήποτε ταχύτητα είναι οι εξισώσεις μετασχηματισμού του Lorentz.

- Ισχύουν για ταχύτητες $0 < v < c$.

Μετασχηματισμοί του Lorentz, εξισώσεις

Για τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων από το S στο S' χρησιμοποιούμε τις σχέσεις:

$$x' = \gamma(x - vt) \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \gamma\left(t + \frac{v}{c^2}x\right)$$

Αυτές οι σχέσεις δείχνουν ότι στη σχετικότητα οι έννοιες του χώρου και του χρόνου δεν είναι ανεξάρτητες αλλά στενά συνυφασμένες μεταξύ τους.

Για τον μετασχηματισμό συντεταγμένων από το S' στο S χρησιμοποιούμε τις σχέσεις:

$$x = \gamma(x' + vt') \quad y' = y \quad z' = z \quad t = \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right)$$

Μετασχηματισμοί του Lorentz, ζεύγη γεγονότων

Μπορούμε να προσαρμόσουμε κατάλληλα τους μετασχηματισμούς του Lorentz ώστε να περιγράψουμε ζεύγη γεγονότων:

Από το S στο S'

$$\Delta x' = \gamma (\Delta x - v \Delta t)$$
$$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{v}{c^2} \Delta x \right)$$

Από το S' στο S

$$\Delta x = \gamma (\Delta x' + v \Delta t')$$
$$\Delta t = \gamma \left(\Delta t' + \frac{v}{c^2} \Delta x' \right)$$

Μετασχηματισμοί Lorentz, ζεύγη γεγονότων (συνέχεια)

Στις προηγούμενες εξισώσεις, ο παρατηρητής O' καταγράφει:

$$\Delta x' = x'_2 - x'_1 \text{ και } \Delta t' = t'_2 - t'_1$$

Επίσης, ο παρατηρητής O καταγράφει:

$$\Delta x = x_2 - x_1 \text{ και } \Delta t = t_2 - t_1$$

Οι συντεταγμένες y και z παραμένουν ανεπηρέαστες από την κίνηση κατά μήκος του άξονα x .

Η εξίσωση μετασχηματισμού ταχύτητας του Lorentz

Το «γεγονός» είναι η κίνηση ενός σώματος.

Το σύστημα S' κινείται ως προς το S με ταχύτητα μέτρου v .

Στο σύστημα S'

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$$

$$u'_y = \frac{u_y}{\gamma \left(1 - \frac{u_x v}{c^2} \right)} \quad \text{και} \quad u'_z = \frac{u_z}{\gamma \left(1 - \frac{u_x v}{c^2} \right)}$$

Η εξίσωση μετασχηματισμού ταχύτητας του Lorentz (συνέχεια)

Ο όρος v δεν εμφανίζεται στον αριθμητή των εξισώσεων για τα u'_y και u'_z καθώς η σχετική κίνηση γίνεται κατά μήκος του άξονα x .

Όταν η ταχύτητα v είναι πολύ μικρότερη της c , η εξίσωση μετασχηματισμού ταχύτητας του Lorentz απλοποιείται στην εξίσωση μετασχηματισμού ταχύτητας του Γαλιλαίου.

Εάν $u_x = c$, τότε $u'_x = c$ και αποδεικνύεται ότι η ταχύτητα του φωτός είναι ανεξάρτητη από τη σχετική κίνηση του συστήματος αναφοράς.

Η εξίσωση μετασχηματισμού ταχύτητας του Lorentz (*τελική διαφάνεια*)

Για να βρούμε την u_x συναρτήσει της u'_x , χρησιμοποιούμε τη σχέση

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}}$$

Μετρήσεις στις οποίες οι παρατηρητές δεν συμφωνούν

Οι δύο παρατηρητές O και O' δεν συμφωνούν ως προς τα εξής:

- Το χρονικό διάστημα μεταξύ γεγονότων τα οποία συντελούνται στην ίδια θέση σε ένα σύστημα αναφοράς.
- Την απόσταση μεταξύ δύο σημείων που παραμένουν σταθερά σε ένα από τα δύο συστήματα αναφοράς.
- Τις συνιστώσες της ταχύτητας ενός κινούμενου σωματιδίου.
- Τον ταυτοχρονισμό δύο γεγονότων τα οποία συντελούνται σε διαφορετικές θέσεις στα δύο συστήματα.

Μετρήσεις στις οποίες οι παρατηρητές συμφωνούν

Οι δύο παρατηρητές O και O' συμφωνούν ως προς:

- Το μέτρο της σχετικής ταχύτητας v του ενός ως προς τον άλλο.
- Την ταχύτητα c οποιασδήποτε ακτίνας φωτός.
- Τον ταυτοχρονισμό δύο γεγονότων, τα οποία συντελούνται στην ίδια θέση και στον ίδιο χρόνο σε ένα σύστημα αναφοράς.

Σχετικιστική ορμή

Για να ισχύει η διατήρηση της ορμής σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς, ο ορισμός πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες:

- Η ορμή ενός απομονωμένου σωματιδίου πρέπει να διατηρείται σε όλες τις συγκρούσεις.
- Η σχετικιστική τιμή που υπολογίζεται για την ορμή p ενός σωματιδίου πρέπει να προσεγγίζει την τιμή mu που προβλέπει η κλασική φυσική όταν η ταχύτητα u τείνει στο μηδέν.

$$\vec{p} \equiv \frac{m\vec{u}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma m\vec{u}$$

- Όπου $\vec{u}$ είναι η ταχύτητα του σωματιδίου και m η μάζα του.

Η μάζα στη σχετικότητα

Παλαιότερες θεωρήσεις της σχετικότητας διατηρούσαν την ισχύ της αρχής της διατήρησης της ορμής σε υψηλές τιμές ταχύτητας υιοθετώντας τη «σχετικιστική μάζα».

Πλέον, η μάζα θεωρείται *αμετάβλητη*.

- Αυτό σημαίνει ότι είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας.

Η μάζα ενός σώματος σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς θεωρείται ως η μάζα που καταγράφει ένας παρατηρητής ο οποίος βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας ως προς το σώμα.

Η σχετικιστική μορφή των νόμων του Νεύτωνα

Η σχετικιστική δύναμη η οποία δρα επάνω σε ένα σωματίδιο που έχει ορμή $\vec{p}$ ορίζεται ως

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Αυτή η σχέση διατηρεί την ισχύ της κλασικής μηχανικής στις χαμηλές τιμές ταχύτητας.

Είναι συνεπής με τη διατήρηση τόσο της σχετικιστικής όσο και της κλασικής ορμής ενός απομονωμένου συστήματος.

Εξετάζοντας την επιτάχυνση διαπιστώνουμε ότι είναι αδύνατο ένα σωματίδιο να επιταχυνθεί από ακινησία σε ταχύτητα $u \geq c$.

Ταχύτητα του φωτός, σημειώσεις

Η ταχύτητα του φωτός είναι το όριο της ταχύτητας στο σύμπαν.

Είναι η μέγιστη δυνατή τιμή ταχύτητας για μεταφορά ενέργειας και για μεταφορά πληροφορίας.

Κάθε σώμα το οποίο έχει μάζα, πρέπει να κινείται πιο αργά από την ταχύτητα του φωτός.

Σχετικιστική κινητική ενέργεια

Το θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί σε σχετικιστικές περιπτώσεις.

Παίρνει τη μορφή:

$$W = K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - mc^2 = \gamma mc^2 - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2$$

Σχετικιστική ενέργεια

Ο ορισμός της κινητικής ενέργειας τροποποιείται στη σχετικιστική μηχανική ως

$$E = \gamma mc^2 - mc^2$$

- Αυτή η σχέση ανάγεται στην κλασική εξίσωση της κινητικής ενέργειας όταν $u \ll c$.
- Ο όρος mc^2 ονομάζεται ενέργεια ηρεμίας του σώματος και είναι ανεξάρτητος από το μέτρο της ταχύτητάς του.
- Ο όρος γmc^2 είναι η ολική ενέργεια, E , του αντικειμένου και εξαρτάται από το μέτρο της ταχύτητάς του και την ενέργεια ηρεμίας του.

Σχετικιστική ενέργεια – Συνέπειες

Ένα σωματίδιο έχει ενέργεια εξαιτίας της μάζας του και μόνο.

- Ένα ακίνητο σωματίδιο με μηδενική κινητική ενέργεια έχει ενέργεια η οποία είναι ανάλογη της αδρανειακής μάζας του.
- Αυτό φαίνεται από την εξίσωση $E = K + mc^2 = 0 + mc^2$.

Μια μικρή ποσότητα μάζας αντιστοιχεί σε μια τεράστια ποσότητα ενέργειας.

Ενέργεια και σχετικιστική ορμή

Μια χρήσιμη σχέση είναι αυτή που συνδέει την ολική ενέργεια, E , και τη σχετικιστική ορμή, p .

- $E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2$
 - Όταν το σωματίδιο βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, τότε $p = 0$ και $E = mc^2$.
 - Σωματίδια χωρίς μάζα ($m = 0$) έχουν $E = pc$.
- Η μάζα m ενός σωματιδίου είναι ανεξάρτητη από την κίνησή του, οπότε η τιμή της είναι ίδια σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.
 - Η μάζα m συχνά ονομάζεται αναλλοίωτη μάζα ή μάζα ηρεμίας.

Μονάδες ενέργειας και μάζας

Χρησιμοποιείται επίσης για την έκφραση της μάζας σε μονάδες ενέργειας.

- Μάζα ενός ηλεκτρονίου = $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}$
- Μετατροπή: $1 \text{ u} = 929.494 \text{ MeV}/c^2$

Μάζα και ενέργεια

Η ισοδυναμία μάζας και ενέργειας αποδεικνύεται αδιαμφισβήτητα σε πυρηνικές αλληλεπιδράσεις και σε αλληλεπιδράσεις στοιχειωδών σωματιδίων στο εργαστήριο.

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να περιλαμβάνει την ενέργεια ηρεμίας σαν μία ακόμα μορφή αποθηκευμένης ενέργειας.

Η μετατροπή της μάζας σε ενέργεια είναι σημαντική στις ατομικές και πυρηνικές αντιδράσεις.

Περισσότερα για τη μάζα

Η μάζα έχει δύο φαινομενικά διαφορετικές ιδιότητες:

- Προκαλεί *βαρυτική έλξη* σε άλλες μάζες:
 $F_g = m_g g$
- Παρουσιάζει *αδράνεια*, δηλαδή αντίσταση στην επιτάχυνση:
 $\Sigma F = m_i a$

Το γεγονός ότι οι m_g και m_i είναι ευθέως ανάλογες αποτελεί ένδειξη ότι συνδέονται μεταξύ τους.

Σύμφωνα με τον Αϊνστάιν, η διττή συμπεριφορά της μάζας υποδηλώνει ότι υπάρχει μια πολύ στενή και θεμελιώδης σχέση μεταξύ των δύο ιδιοτήτων.

Το παράδειγμα του ανελκυστήρα (1)

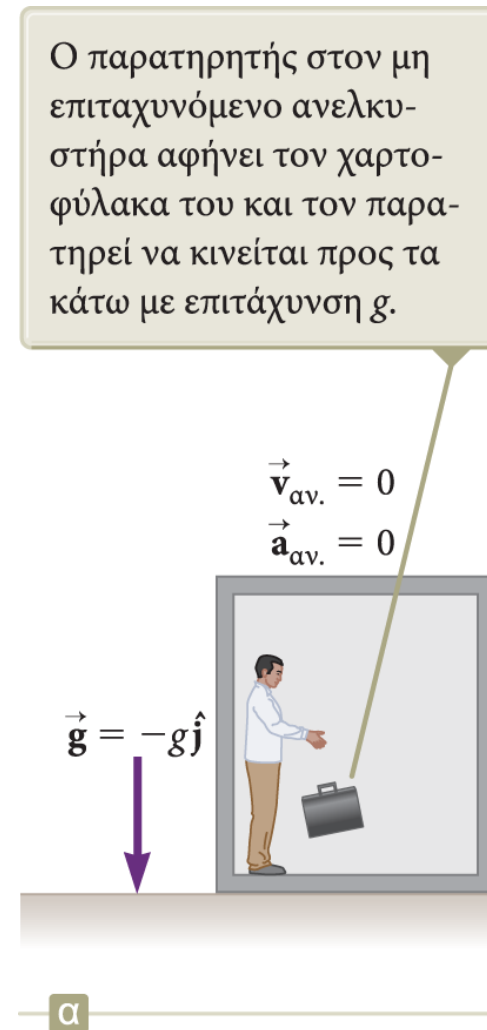
Ο παρατηρητής είναι ακίνητος μέσα σε ένα ομογενές βαρυτικό πεδίο που έχει κατεύθυνση κατακόρυφα προς τα κάτω.

Στέκεται μέσα σε έναν ανελκυστήρα στην επιφάνεια ενός πλανήτη.

Η βαρυτική έλξη τον πιέζει στο δάπεδο.

Εάν αφήσει τον χαρτοφύλακα του, θα πέσει προς το δάπεδο με επιτάχυνση

$$\vec{g} = -g\hat{j}$$



Το παράδειγμα του ανελκυστήρα (2)

Σε αυτή την περίπτωση, ο παρατηρητής επιταχύνει κατακόρυφα προς τα πάνω.

Μια δύναμη παράγει μια κατακόρυφη επιτάχυνση με φορά προς τα πάνω ίση με $a = g$.

Ο παρατηρητής νοιώθει να πιέζεται στο δάπεδο με δύναμη ίση με τη δύναμη του βαρυτικού πεδίου της εικόνας β.

Αν αφήσει το χαρτοφύλάκά του, θα τον δει να πέφτει προς το δάπεδο με επιτάχυνση $a = g$.

Ο παρατηρητής στον επιταχυνόμενο ανελκυστήρα αφήνει τον χαρτοφύλακα του και τον παρατηρεί να κινείται προς τα κάτω με επιτάχυνση g .

$$\vec{a}_{\text{αν.}} = +g\hat{j}$$



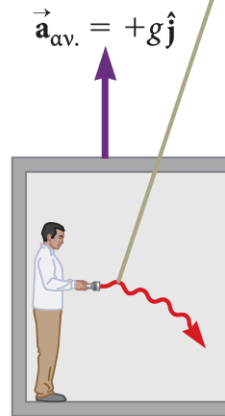
Το παράδειγμα του ανελκυστήρα (3)

Στην εικόνα γ, ο ανελκυστήρας επιταχύνει κατακόρυφα προς τα πάνω και ο επιταχυνόμενος παρατηρητής βλέπει τη δέσμη φωτός να καμπυλώνεται προς τα κάτω.

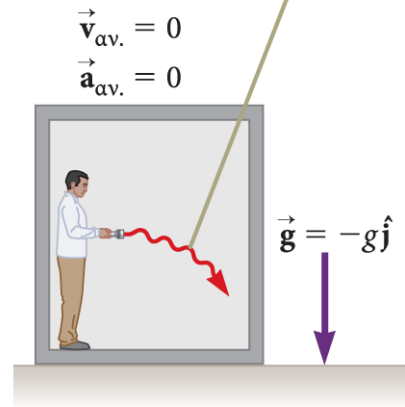
Από την οπτική γωνία ενός παρατηρητή που βρίσκεται σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς εκτός του ανελκυστήρα, καθώς το δάπεδο του ανελκυστήρα επιταχύνει κατακόρυφα προς τα επάνω, το φως κινείται ευθύγραμμα.

Κατ' αναλογία με την ισοδυναμία των περιπτώσεων (α) και (β), ο παρατηρητής στο (δ) θα πρέπει να δει το φως να καμπυλώνεται προς τα κάτω.

Σε έναν επιταχυνόμενο ανελκυστήρα, ο παρατηρητής διαπιστώνει ότι η δέσμη του φωτός καμπυλώνεται προς τα κάτω.



Λόγω της ισοδυναμίας των περιπτώσεων α και β, θα πρέπει, όταν η δέσμη φωτός βρεθεί μέσα σε ένα βαρυτικό πεδίο, να καμφθεί προς τα κάτω.



Το παράδειγμα του ανελκυστήρα – Συμπεράσματα

Ο Αϊνστάιν πρότεινε ότι οι δύο περιπτώσεις είναι ισοδύναμες.

Κανένα επιτόπιο πείραμα δεν μπορεί να ανιχνεύσει διαφορές ανάμεσα σε αυτά τα δύο συστήματα αναφοράς.

- Το ένα σύστημα είναι ένα αδρανειακό σύστημα μέσα σε ένα βαρυτικό πεδίο.
- Το άλλο σύστημα επιταχύνει μέσα σε έναν χώρο χωρίς βαρύτητα.

Τα συμπεράσματα του Αϊνστάιν (συνέχεια)

Ο Αϊνστάιν επέκτεινε την ιδέα περισσότερο και πρότεινε ότι κανένα πείραμα (της μηχανικής ή άλλο) δεν μας επιτρέπει να διακρίνουμε διαφορές ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις.

Πρότεινε ότι μια δέσμη φωτός πρέπει να καμπυλώνεται προς τα κάτω από την επίδραση ενός βαρυτικού πεδίου.

- Η καμπύλωση θα είναι μικρή.
- Μια δέσμη λέιζερ η οποία εκπέμπεται οριζόντια, αποκλίνει λιγότερο από 1 cm αφού διανύσει 6 000 km.

Το φαινόμενο αυτό έχει επαληθευτεί με διάφορα πειράματα.

Αξιώματα της γενικής σχετικότητας

Οι νόμοι της φύσης παραμένουν αναλλοίωτοι για παρατηρητές σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς, είτε αυτό επιταχύνει είτε όχι.

Στην περιοχή ενός οποιουδήποτε σημείου, ένα βαρυτικό πεδίο ισοδυναμεί με ένα επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς σε έναν χώρο χωρίς βαρύτητα

- Αυτή είναι η *αρχή της ισοδυναμίας*.

Επιπτώσεις της γενικής σχετικότητας

Ο χρόνος επηρεάζεται από τη βαρύτητα.

- Ένα ρολόι το οποίο βρίσκεται κάτω από την επίδραση ενός βαρυτικού πεδίου λειτουργεί πιο αργά από ένα άλλο το οποίο βρίσκεται σε έναν χώρο όπου η βαρύτητα είναι αμελητέα.

Οι συχνότητες της ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα άτομα κάτω από την επίδραση ενός ισχυρού βαρυτικού πεδίου μετατίθενται προς μικρότερες τιμές.

- Αυτό έχει ανιχνευθεί στις φασματικές γραμμές που εκπέμπουν τα άτομα σε αστέρες μεγάλης μάζας.

Ένα βαρυτικό πεδίο μπορεί να «αντικατασταθεί» σε οποιοδήποτε σημείο από ένα κατάλληλα επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς, το οποίο εκτελεί ελεύθερη πτώση.

Ο Αϊνστάιν όρισε ένα συγκεκριμένο μέγεθος, την καμπύλωση του χωροχρόνου, το οποίο περιγράφει το βαρυτικό πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο.

Καμπύλωση του χωροχρόνου

Η καμπύλωση του χωροχρόνου αντικαθιστά εντελώς τη βαρυτική θεωρία του Νεύτωνα.

- Σύμφωνα με τον Αϊνστάιν, η βαρυτική δύναμη δεν υφίσταται.

Η παρουσία μιας μάζας καμπυλώνει τον χωροχρόνο στην περιοχή της μάζας.

- Αυτή η καμπύλωση επιβάλλει τη χωροχρονική διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσουν όλα τα σώματα που εκτελούν ελεύθερη πτώση.

Οι επιπτώσεις της καμπυλότητας του χωροχρόνου

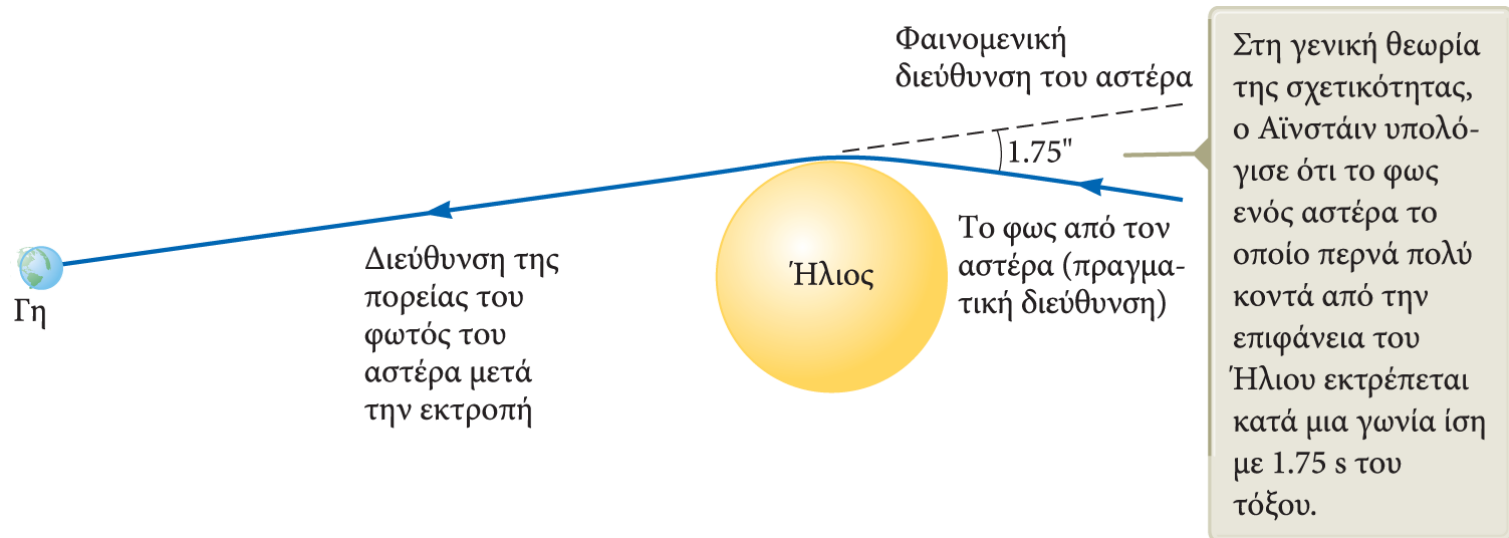
Φανταστείτε δύο ταξιδιώτες, οι οποίοι βαδίζουν παράλληλα επάνω στην επιφάνεια της Γης με κατεύθυνση προς βορρά κατά μήκος δύο μεσημβρινών που απέχουν μεταξύ τους στον ισημερινό λίγα μέτρα.

Καθώς προσεγγίζουν τον βόρειο πόλο, οι τροχιές τους συγκλίνουν.

Πλησιάζουν ο ένας τον άλλο σαν να υπήρχε μια ελκτική δύναμη μεταξύ τους.

Η σύγκλισή τους οφείλεται στη γεωμετρία της επιφάνειας, και όχι σε μια ελκτική δύναμη.

Δοκιμή της γενικής σχετικότητας



Η γενική σχετικότητα προβλέπει ότι μια ακτίνα φωτός, η οποία διέρχεται κοντά από τον Ήλιο, θα εκτραπεί λόγω της καμπυλότητας του χωροχρόνου που προκαλεί ο Ήλιος.

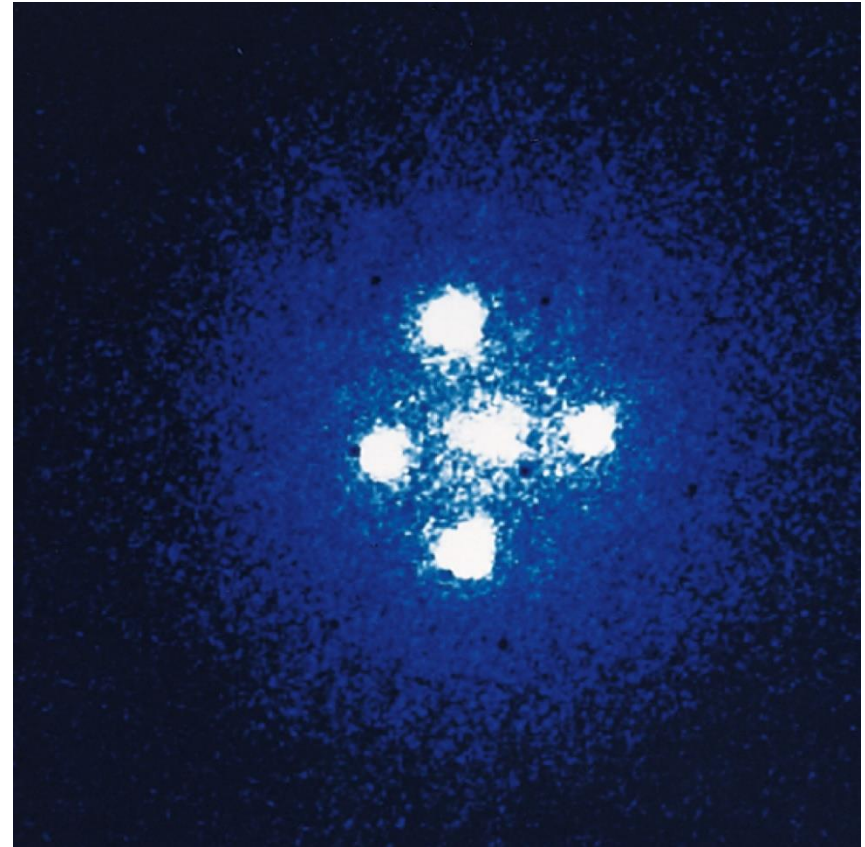
Αυτή η πρόβλεψη επιβεβαιώθηκε από τους αστρονόμους κατά τη διάρκεια μιας ολικής έκλειψης Ηλίου.

Ο Σταυρός του Αϊνστάιν

Τα τέσσερα φωτεινά σημεία αποτελούν είδωλα του ίδιου γαλαξία.

Το φως του γαλαξία έχει καμπυλωθεί από ένα σώμα μεγάλης μάζας που βρίσκεται ανάμεσα στον γαλαξία και τη Γη.

Το σώμα μεγάλης μάζας δρα σαν φακός.



Μελανές οπές

Αν μια μεγάλη ποσότητα μάζας συγκεντρωθεί σε μια περιοχή του χώρου, μπορεί να σχηματιστεί μια μελανή οπή.

Σε αυτή την περίπτωση, η καμπύλωση του χωροχρόνου είναι τόσο μεγάλη ώστε όλη η ύλη και το φως που βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη απόσταση από το κέντρο της μελανής οπής παγιδεύονται σε αυτήν.