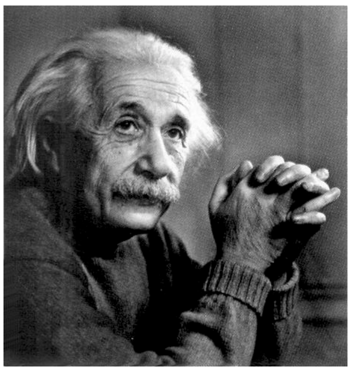
ΕΞΩΦΥΛΛΟ

6-1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις αρχές του έτους 1905 ένας άγνωστος εικοσιεξάχρονος υπάλληλος της Ελβετικής Υπηρεσίας Ευρεσιτεχνιών, ο Albert Einstein, δημοσίευσε τρεις εργασίες τεράστιας σημασίας. Η πρώτη αφορούσε στην ερμηνεία της κίνησης Brown (απόδειξη ύπαρξης μορίων). Η δεύτερη, που τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ το 1921, αφορούσε στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (κβαντική θεωρία του φωτός). Στην τρίτη εισήγε την ειδική θεωρία της σχετικότητας.



Εικ. 6.1

Η θεωρία της σχετικότητας έφερε επανάσταση στην αντίληψή μας για τον κόσμο και έδωσε νέο περιεχόμενο σε βασικές έννοιες όπως ο χώρος, ο χρόνος, η ύλη και η ενέργεια. Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας οι διαστάσεις ενός σώματος και η χρονική διάρκεια ενός φαινομένου δεν είναι ίδια για όλους τους παρατηρητές. Για παράδειγμα, το μήκος ενός πυραύλου που κινείται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και η χρονική διάρκεια ενός συμβάντος στον πύραυλο μετριούνται διαφορετικά από τους επιβάτες του πυραύλου και από κάποιον παρατηρητή ακίνητο σε σχέση με τον πύραυλο. Πριν διατυπωθεί αυτή η θεωρία η ύλη και η ενέργεια θεωρούνταν ξεχωριστές οντότητες. Με τη θεωρία της σχετικότητας όμως, αποδείχτηκε ότι η μία μπορεί να μετατρέπεται στην άλλη. Έτσι ερμηνεύεται η παραγωγή ενέργειας στον Ήλιο.

Τα συμπεράσματα της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας αντιτίθενται σε βαθιά ριζωμένες αντιλήψεις, που οφείλονται στην καθημερινή εμπειρία, και γι' αυτό δύσκολα γίνονται αποδεκτά. Ακόμη και επιστήμονες πολύ μεγάλης εμβέλειας, όπως ο Lorentz, σε εργασίες του οποίου στηρίχτηκε ο Einstein για να διατυπώσει τη θεωρία του, δυσπιστούσαν απέναντί της.

Η ειδική θεωρία της σχετικότητας έχει, εντούτοις, δυο πολύ ισχυρά πλεονεκτήματα. Το πρώτο είναι ότι έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά. Το δεύτερο είναι ότι σε οριακές της περιπτώσεις (όταν τα συστήματα αναφοράς κινούνται μεταξύ τους με ταχύτητες πολύ μικρότερες από την ταχύτητα του φωτός, δηλαδή ταχύτητες που "χωράει ο νους του ανθρώπου") δίνει αποτελέσματα που είναι απολύτως συμβατά με τις προβλέψεις της νευτώνειας φυσικής.

Εικ. 6.2

Το 1915 ο Einstein δημοσίευσε μια εργασία για τη γενική σχετικότητα. Το θέμα αυτό επρόκειτο να τον απασχολήσει για πολλά χρόνια ακόμη. Η κεντρική ιδέα της γενικής θεωρίας ήταν να επεκταθεί η ισχύς των νόμων της φυσικής σε όλα τα συστήματα αναφοράς, δηλαδή όχι μόνο στα αδρανειακά αλλά και στα επιταχυνόμενα. Στην προσπάθειά του διατύπωσε μια νέα θεωρία για τη βαρύτητα η οποία εμπεριείχε και τη θεωρία του Newton σαν ειδική περίπτωση.

Η γενική θεωρία παρουσίαζε μαθηματικά προβλήματα με τα οποία δεν ήταν εξοικειωμένοι οι φυσικοί της εποχής ακόμη και ο ίδιος ο Αϊνστάιν. Τότε ο φίλος του Grossman (Γκρόσμαν) τον έφερε σε επαφή με εργασίες μαθηματικών (Ρίμαν, Κρίστοφελ, Ρίτσι-Κουρμπάστρο και Λεβί-Τσιβίτα) που τον εφοδίασαν με τα απαραίτητα μαθηματικά εργαλεία.

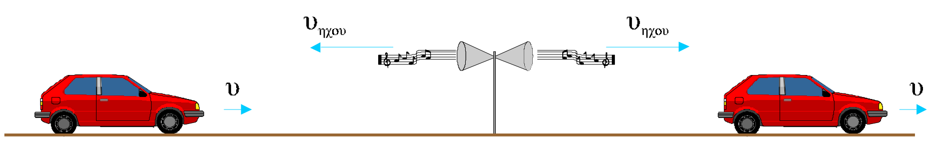
Το 1919 συνέβη μια ολική έκλειψη του Ήλιου, γεγονός που έδωσε τη δυνατότητα να γίνουν κάποιες παρατηρήσεις ενθαρρυντικές για τη γενική θεωρία.

Αν και - ακόμη και σήμερα - η γενική θεωρία δεν έχει επιβεβαιωθεί πλήρως, οι δρόμοι που άνοιξε επηρέασαν βαθιά τη σύγχρονη φυσική.

6-2 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ MICHELSON – MORLEY

Πριν διατυπώσει ο Einstein τη θεωρία της σχετικότητας, θεωρούσαν ότι το φως, όπως συμβαίνει και με τον ήχο, χρειάζεται κάποιο μέσο για να διαδοθεί. Υπέθεταν ότι υπήρχε ένα μέσον, **ο αιθέρας**, που γέμιζε ολόκληρο το σύμπαν και στο οποίο διαδίδεται το φως.

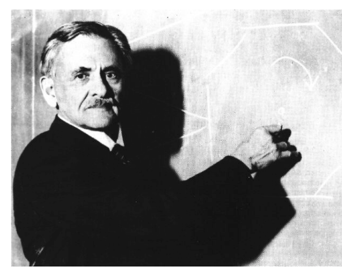
Όταν ο επιβάτης ενός αυτοκινήτου πλησιάζει με ταχύτητα υ μια πηγή ήχου, ο ήχος διαδίδεται ως προς αυτόν με ταχύτητα $\upsilon_{ηχου}+\upsilon$, ενώ όταν απομακρύνεται από μια πηγή ήχου η ταχύτητα διάδοσης του ήχου ως προς αυτόν είναι $\upsilon_{ηχου}-\upsilon$. Εάν το φως διαδιδόταν κατά ανάλογο τρόπο, η κίνηση ενός παρατηρητή προς ή από μια πηγή φωτός θα επηρέαζε την ταχύτητα του φωτός, όπως την αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής.



Σχ. 6.1 Ο ήχος διαδίδεται με ταχύτητα $\upsilon_{ηχου}+\upsilon$ ως προς τον οδηγό όταν το αυτοκίνητο πλησιάζει την πηγή και με ταχύτητα $\upsilon_{ήχου}-\upsilon$ όταν απομακρύ-νεται από αυτή.

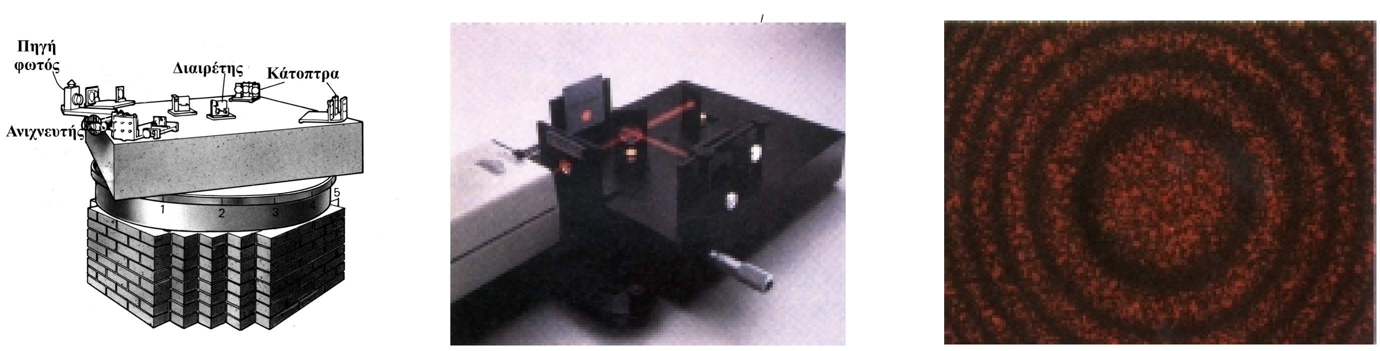
Το 1887, στις Η.Π.Α., οι A.A. Michelson (Μάικελσον 1852-1931) και E.W. Morley (Μόρλεϊ 1838-1923) σχεδίασαν και εκτέλεσαν ένα ιδιοφυές πείραμα για να μετρήσουν την ταχύτητα της Γης. Στο πείραμα αυτό έγινε προσπάθεια να μετρηθούν διαφορές στην ταχύτητα του φωτός που οφείλονται στην κίνηση της Γης.

Το πείραμα αυτό αποδείχτηκε επαναστατικό γιατί, πέρα από τις επιδιώξεις των εμπνευστών του, αποκάλυψε την παράξενη φύση του φωτός.



Εικ. 6.3 Michelson (1852-1931). Αμερικανός πρωσικής καταγωγής. Σταδιοδρομία στο αμερικάνικο ναυτικό και παράλληλα λαμπρή επιστημονική σταδιοδρομία. Ο πρώτος Αμερικανός που κέρδισε το βραβείο Νόμπελ.

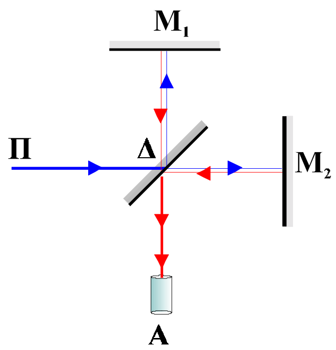
Η κεντρική ιδέα των Michelson – Morley ήταν ότι αν δυο δέσμες μονοχρωματικού φωτός συμβάλουν δημιουργούν ένα σύστημα κροσσών συμβολής. Αν με οποιονδήποτε τρόπο μεταβάλουμε τη διαφορά φάσης ανάμεσα στις δέσμες οι κροσσοί συμβολής θα εμφανισθούν μετατοπισμένοι. Τις θέσεις των κροσσών συμβολής και, κατ' επέκταση, τις ενδεχόμενες μετατοπίσεις τους μπορούμε να τις προσδιορίσουμε με μεγάλη ακρίβεια με τη βοήθεια ενός συμβολόμετρου.



(α) (β) (γ)

Σχ. 6.2 (α) Το συμβολόμετρο του Michelson. (β) Ένα σύγχρονο συμβολόμετρο. (γ) Εικόνα κροσσών συμβολής από συμβολόμετρο.

Το συμβολόμετρο του πειράματος (σχ. 6.2α) περιλαμβάνει μια τράπεζα που μπορεί να περιστρέφεται, μια πηγή μονοχρωματικού φωτός (Π), έναν ανιχνευτή (Α) με τον οποίο παρατηρούμε τους κροσσούς συμβολής δυο κάτοπτρα (M_1, M_2) κι ένα ημικάτοπτρο - διαιρέτη δέσμης (Δ). Με ειδικές διατάξεις (μικρομετρικούς κοχλίες) μπορούμε να μεταβάλλουμε τις αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων του συμβολόμετρου με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

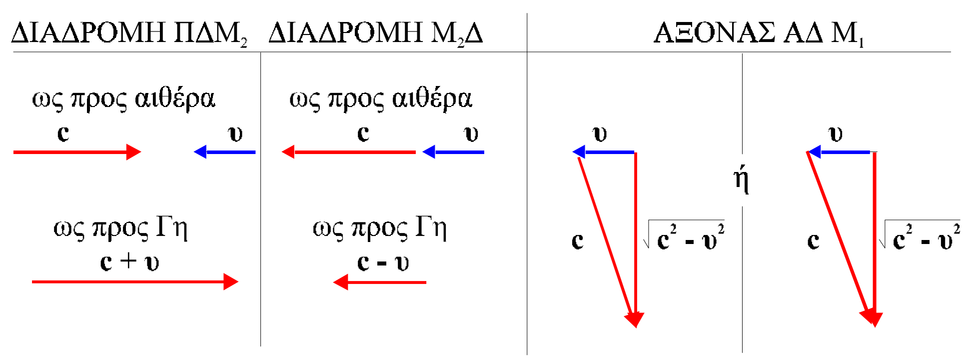


Σχ. 6.3 Η πορεία των φωτεινών ακτίνων στο συμβολόμετρο Michelson.

Η πηγή (σχ. 6.3) παράγει μια μονοχρωματική δέσμη φωτός, ένα τμήμα της οποίας ανακλάται στο ημικάτοπτρο και φτάνει στο κάτοπτρο M_1 ενώ το υπόλοιπο της δέσμης διαθλάται σ' αυτό και φτάνει στο κάτοπτρο M_2. Στον ανιχνευτή καταλήγουν δύο δέσμες: αυτή που ανακλάται στο M_1 και στη συνέχεια διαθλάται στο ημικάτοπτρο και αυτή που ανακλάται πρώτα στο M_2 και μετά στο ημικάτοπτρο. Οι δέσμες συμβάλλουν και δίνουν μια εικόνα κροσσών συμβολής όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 6.2γ. Συνοπτικά οι διαδρομές που διανύουν οι συμβάλλουσες δέσμες είναι $ΠΔM_1ΔA$ και $ΠΔM_2ΔA$.

Ρυθμίζουμε τις αποστάσεις ΠΔ, $ΔM_1$, $ΔM_2$, ΔΑ να είναι όλες ακριβώς ίσες με L. Έστω ότι ο άξονας $ΠΔM_2$ είναι παράλληλος με την ταχύτητα της Γης και ότι η μονοχρωματική δέσμη εκπέμπεται με φορά αντίθετη αυτής της κίνησης της Γης. Υπενθυμίζουμε ότι το τραπέζι μπορεί να στρέφεται επομένως υπάρχει κάποια θέση του τραπεζιού για την οποία θα συμβαίνει αυτό. Η Γη κινείται στο διάστημα με μέση ταχύτητα $\upsilon = 30 \times 10^3 \ m/s$.

Σύμφωνα με τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου στον άξονα $ΠΔM_2$ η ταχύτητα του φωτός ως προς τη Γη θα έπρεπε να είναι $c+\upsilon$ για τη μετάβασή του από το Π προς το M_2 και $c-\upsilon$ για τη μετάβασή του από το M_2 προς το Π. (σχ. 6.4)



Σχ. 6.4

Στον άξονα $AΔM_1$ το φως έπρεπε, να διαδίδεται και προς τις δυο κατευθύνσεις σύμφωνα με τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου, με ταχύτητα $\sqrt{c^2 - \upsilon^2}$ (σχ.6.4).

Ο χρόνος που χρειάζεται το φως για να διανύσει τη διαδρομή $ΠΔM_2ΔA$ θα είναι

$$t_1 = \frac{L}{c+\upsilon} + \frac{L}{c+\upsilon} + \frac{L}{c-\upsilon} + \frac{L}{\sqrt{c^2-\upsilon^2}}$$

ενώ ο χρόνος που χρειάζεται το φως για να διανύσει τη διαδρομή ΠΔM_1ΔΑ θα είναι

$$t_2 = \frac{L}{c+\upsilon} + \frac{L}{\sqrt{c^2-\upsilon^2}} + \frac{L}{\sqrt{c^2-\upsilon^2}} + \frac{L}{\sqrt{c^2-\upsilon^2}}$$

Η διαφορά

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{L}{c+\upsilon} + \frac{L}{c-\upsilon} - \frac{L}{\sqrt{c^2-\upsilon^2}} - \frac{L}{\sqrt{c^2-\upsilon^2}}$$

είναι υπεύθυνη για τη διαφορά φάσης με την οποία φτάνουν τα δυο τμήματα της δέσμης στον ανιχνευτή με αποτέλεσμα τη δημιουργία των κροσσών συμβολής.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος το συμβολόμετρο περιστρεφόταν κατά 90^o για να αλλάξει η ταχύτητα του φωτός ως προς ένα από τους άξονες. Η περιστροφή έπρεπε να είχε ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση των κροσσών συμβολής. Ωστόσο δεν παρατηρήθηκε καμιά μετατόπιση. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε πολλές φορές, δίνοντας πάντα το ίδιο αποτέλεσμα.

Το αποτέλεσμα του πειράματος Michelson – Morley προβλημάτισε πολύ τους φυσικούς μέχρι το 1905 οπότε εξηγήθηκε πλήρως από τον Einstein με την ειδική θεωρία της σχετικότητας.

6-3 ΤΑ ΑΞΙΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Ο Einstein στήριξε την ειδική θεωρία της σχετικότητας σε δυο απλές και φαινομενικά αθώες παραδοχές.

1. **Οι νόμοι της φυσικής είναι ίδιοι για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς**. Δηλαδή οι θεμελιώδεις νόμοι της φυσικής έχουν την ίδια μαθηματική μορφή για όλους τους αδρανειακούς παρατηρητές.

2. **Η ταχύτητα του φωτός είναι ίδια για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς και είναι ανεξάρτητη από την κίνηση της φωτεινής πηγής.**

Σύμφωνα με την πρώτη παραδοχή, δεν είναι δυνατό να γίνει διάκριση μεταξύ δύο συστημάτων αναφοράς τα οποία κινούνται μεταξύ τους με σταθερή ταχύτητα. Οι νόμοι της φυσικής ισχύουν με την ίδια μορφή και στα δύο αδρανειακά συστήματα.

Η δεύτερη παραδοχή εξηγεί το αποτέλεσμα του πειράματος των Michelson –Morley. Το φως δεν υπάκουει στους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου. Ας σταθούμε λίγο σε αυτή την τολμηρή υπόθεση, ότι δηλαδή το φως έχει την ίδια ταχύτητα σε όλα τα αδρανειακά συστήματα. Έστω ότι δύο παρατηρητές μετρούν την ταχύτητα του φωτός που εκπέμπεται από μία φωτεινή πηγή. Ο πρώτος είναι ακίνητος ως προς την πηγή και ο δεύτερος απομακρύνεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα απ΄ αυτή. Και οι δύο θα μετρήσουν την ίδια ταχύτητα για το φως. Είναι παράδοξο, ωστόσο το πείραμα του Michelson το επιβεβαιώνει.

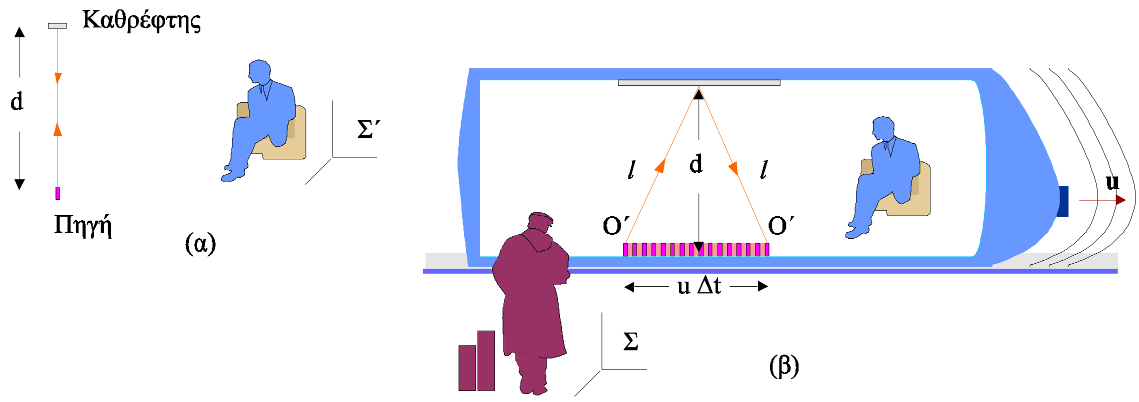
6-4 ΧΩΡΟΧΡΟΝΟΣ

Ο χώρος μέσα στον οποίο ζούμε είναι τρισδιάστατος. Η θέση ενός υλικού σημείου μπορεί να προσδιορισθεί με τρεις συντεταγμένες που αναφέρονται σ' ένα σύστημα συντεταγμένων προσδεμένο στο σύστημα αναφοράς μας. Επίσης το μέγεθος ενός αντικειμένου μπορούμε να το προσδιορίσουμε με τρεις διαστάσεις. Ένα παραλληλεπίπεδο κουτί περιγράφεται με το μήκος, το πλάτος και το ύψος του. Το κουτί όμως δεν ήταν πάντα κουτί. Κάποια χρονική στιγμή κατασκευάστηκε και κάποια άλλη πιθανόν να καταστραφεί. Έτσι η περιγραφή του κουτιού μέσα στο χώρο δεν έχει νόημα αν δεν αναφερόμαστε ταυτόχρονα και στη χρονική διάρκεια της ύπαρξής του.

Δεν έχει νόημα να μιλάμε για χώρο χωρίς να συνυπολογίζουμε το χρόνο. Κάθε αντικείμενο, πρόσωπο, πλανήτης, άστρο, γαλαξίας υπάρχει μέσα σ' αυτό που ονομάζουμε **χωροχρονικό συνεχές**.

6-5 Η ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Ας φανταστούμε ένα τρένο που κινείται με ταχύτητα **u** ως προς παρατηρητή ακίνητο στο σταθμό. Στο δάπεδο του τρένου υπάρχει μια πηγή φωτεινών αναλαμπών ενώ στην οροφή, ακριβώς επάνω από την πηγή, υπάρχει καθρέφτης (σχ. 6.5).



Σχ. 6.5 (α) Ένας φωτεινός παλμός που εκπέμπεται από την πηγή Ο΄ και επιστρέφει ανακλώμενος από ένα καθρέφτη, όπως παρατηρείται στο Σ΄. (β) Η διαδρομή του ίδιου φωτεινού παλμού όπως παρατηρείται στο Σ.

Το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο το φως διανύει την απόσταση πηγή – καθρέφτης – πηγή, όπως γίνεται αντιληπτό από έναν επιβάτη του τρένου, θα είναι

$$\Delta t_0 = \frac{2d}{c} \tag{6.1}$$

Ας δούμε πώς μετράει τη διάρκεια του ίδιου φαινομένου ένας παρατηρητής που στέκεται ακίνητος στο σταθμό. Από τη στιγμή που εκπέμφθηκε το φως μέχρι να επιστρέψει στην πηγή του, το τρένο θα έχει μετατοπισθεί - για τον ακίνητο παρατηρητή - κατά $\Delta s = u\Delta t$. Επομένως, γι' αυτόν η διαδρομή του φωτός θα είναι διαφορετική. Θα έχει συνολικό μήκος $2l$ όπου $l = \sqrt{d^2 + \left(\frac{u\Delta t}{2}\right)^2}$.

Το φως έχει την ίδια ταχύτητα για όλους τους παρατηρητές. Ο χρόνος που χρειάζεται το φως για να διατρέξει αυτή την απόσταση θα είναι

$$\Delta t = \frac{2l}{c} = \frac{\sqrt{d^2 + \left(\frac{u\Delta t}{2}\right)^2}}{c} \qquad (6.2)$$

Ποια σχέση συνδέει τις δυο χρονικές διάρκειες του ίδιου φαινομένου όπως γίνεται αντιληπτό από τους δυο διαφορετικούς παρατηρητές;
Λύνουμε το σύστημα των (6.1) και (6.2) ως προς Δt απαλείφοντας το d και βρίσκουμε:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-u^2/\ c^2}} \qquad (6.3)$$

Βλέπουμε ότι $\Delta t \rangle \Delta t_0$, δηλαδή ότι το ίδιο φαινόμενο έχει διαφορετική διάρκεια για καθένα από τους δυο παρατηρητές.

> Ένα γεγονός που συμβαίνει μέσα σ' ένα σύστημα αναφοράς Σ΄ το οποίο κινείται ως προς ένα σύστημα αναφοράς Σ έχει μεγαλύτερη διάρκεια για έναν παρατηρητή που είναι ακίνητος στο Σ απ' ότι για έναν παρατηρητή που είναι ακίνητος στο Σ΄.
> Το συμπέρασμα αυτό καθιερώθηκε να λέγεται **διαστολή του χρόνου.**

Κάθε αδρανειακό σύστημα έχει τον **ιδιόχρονό** του. Ο ιδιόχρονος του αδρανειακού συστήματος είναι ο χρόνος που μετράει ένα ρολόι ακίνητο ως προς το αδρανειακό σύστημα. Αν συγχρονίσουμε δυο πανομοιότυπα ρολόγια και στη συνέχεια θέσουμε σε κίνηση το ένα από αυτά, το κινούμενο ρολόι θα πηγαίνει πίσω σε σχέση με αυτό που θεωρήσαμε ακίνητο. Ο χρόνος, λοιπόν, δεν είναι απόλυτος. Εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία ένα αδρανειακό σύστημα κινείται ως προς κάποιο άλλο. Με άλλα λόγια εξαρτάται από την περιοχή του χωροχρόνου στην οποία βρισκόμαστε.

Όλες οι διαδικασίες - φυσικές, χημικές, βιολογικές - που συμβαίνουν σ' ένα σύστημα αναφοράς που κινείται σε σχέση μ' ένα άλλο, που θεωρείται ακίνητο, μετρούμενες με ρολόγια του ακίνητου συστήματος, συντελούνται πιο αργά από τις αντίστοιχες που θα συνέβαιναν στο ακίνητο σύστημα. Εάν μετρήσουμε μ' ένα ρολόι της Γης το ρυθμό με τον οποίο κτυπά η καρδιά ενός αστροναύτη όσο βρίσκεται στη Γη και μετά με το ίδιο ρολόι την ώρα που ταξιδεύει θα βρούμε ότι όταν ταξιδεύει η καρδιά του κτυπά με αργότερο ρυθμό. Ο ίδιος ο αστροναύτης, όμως, δε νιώθει καμία αλλαγή.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.1

Ένα τρένο ταξιδεύει με ταχύτητα $u = 108\ km/h = 30\ m/s$. Ένας επιβάτης του τρένου, που ακούει ένα τραγούδι, κτυπάει τα χέρια του προσπαθώντας να κρατήσει το ρυθμό. Για τον επιβάτη ο χρόνος ανάμεσα σε δυο διαδοχικά χτυπήματα είναι Δt_0. Πόσος θα είναι ο χρόνος αυτός για έναν παρατηρητή που στέκει ακίνητος στην αποβάθρα;

Απάντηση:

Σύμφωνα με τη σχέση (6.3) $\qquad \Delta t = \frac{1}{\sqrt{0{,}99999999999999}}\Delta t_0$

Το Δt είναι πρακτικά ίσο με το Δt_0. Στα όρια της πραγματικότητας που ζούμε δεν είναι αντιληπτή η διαστολή του χρόνου λόγω της κίνησης ενός συστήματος αναφοράς σε σχέση με ένα άλλο. Η παγιωμένη αντίληψή μας ότι ο χρόνος είναι απόλυτος είναι απολύτως δικαιολογημένη, όσο οι ταχύτητες με τις οποίες κινούνται τα συστήματα αναφοράς μας είναι πολύ μικρότερες της ταχύτητας του φωτός.

Αν τρένο του προβλήματος ταξίδευε με ταχύτητα

$u = 0{,}5\ c$ θα ήταν $\Delta t = 1{,}155\ \Delta t_0$

αν η ταχύτητά του ήταν

$u = 0{,}9\ c$ θα ήταν $\Delta t = 2{,}294\ \Delta t_0$

ενώ αν $u = 0{,}99\ c$ θα ήταν $\Delta t = 7{,}089\ \Delta t_0$

Ο παρατηρητής στην αποβάθρα υποθέτει ότι ο επιβάτης του τρένου ακούει ένα τραγούδι με πολύ πιο αργό ρυθμό.

Στο μακρόκοσμο, ταχύτητες συγκρίσιμες με την ταχύτητα του φωτός είναι αδύνατες για τα σημερινά δεδομένα. Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να επιταχύνουμε ένα διαστημόπλοιο σ' αυτές τις ταχύτητες είναι δισεκατομμύρια φορές μεγαλύτερο από αυτό που χρησιμοποιείται για να τεθεί σε τροχιά ένα διαστημικό λεωφορείο.

Η διαστολή του χρόνου παρ' όλα αυτά έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά. Το 1972 επιστήμονες συγχρόνισαν ατομικά ρολόγια καισίου, που έχουν ακρίβεια $1/10^{13}$ s. Κάποια από τα συγχρονισμένα ρολόγια τα πήραν μαζί τους σε ένα μεγάλο ταξίδι με αεριωθούμενο αεροπλάνο ενώ κάποια άλλα τα άφησαν στη Γη. Επιστρέφοντας στη Γη τα ρολόγια που ταξίδεψαν παρουσίασαν την προβλεπόμενη από τη θεωρία της σχετικότητας διαφορά στη μέτρηση του χρόνου του ταξιδιού σε σχέση με αυτά που έμειναν στη Γη. Για την ιστορία αναφέρουμε ότι η διαφορά ήταν της τάξης των $10^{-9}\ s$ (1 *ns*).

Άλλη πειραματική επιβεβαίωση προέρχεται από τη μέτρηση του χρόνου διάσπασης των μιονίων. Τα μιόνια (μ) είναι ασταθή σωματίδια που παράγονται όταν κοσμική ακτινοβολία βομβαρδίζει τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η μέση διάρκεια ζωής τους είναι $\tau_0 = 2{,}2 \times 10^{-6}\ s$ όταν ο χρόνος μετριέται ως προς ένα σύστημα αναφοράς όπου τα μιόνια ηρεμούν. Τα μιόνια κινούνται με ταχύτητα που προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός (0,99c). Ακόμη και με μια τέτοια ταχύτητα, στη διάρκεια της ζωής τους διανύουν περίπου 600 m. Είναι λοιπόν παράδοξο το γεγονός ότι ανιχνεύονται αρκετά μιόνια στην επιφάνεια της Γης έχοντας διανύσει αρκετά χιλιόμετρα από το σημείο παραγωγής τους στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Το παράδοξο αίρεται αν συνυπολογίσουμε το φαινόμενο της διαστολής του χρόνου. Για έναν παρατηρητή στη Γη ο μέσος χρόνος ζωής ενός μιονίου θα είναι $\tau = \dfrac{\tau_0}{\sqrt{1-(0{,}99c)^2/c^2}} \approx 16 \times 10^{-6}\ s$. Αν πολλαπλασιάσουμε αυτόν το χρόνο επί την ταχύτητα $0{,}99c$ βρίσκουμε ότι τα μιόνια πριν διασπασθούν διανύουν κατά μέσο όρο 4800 m. Δεν είναι, επομένως, παράδοξο, το ότι αρκετά μιόνια φτάνουν στην επιφάνεια της Γης.

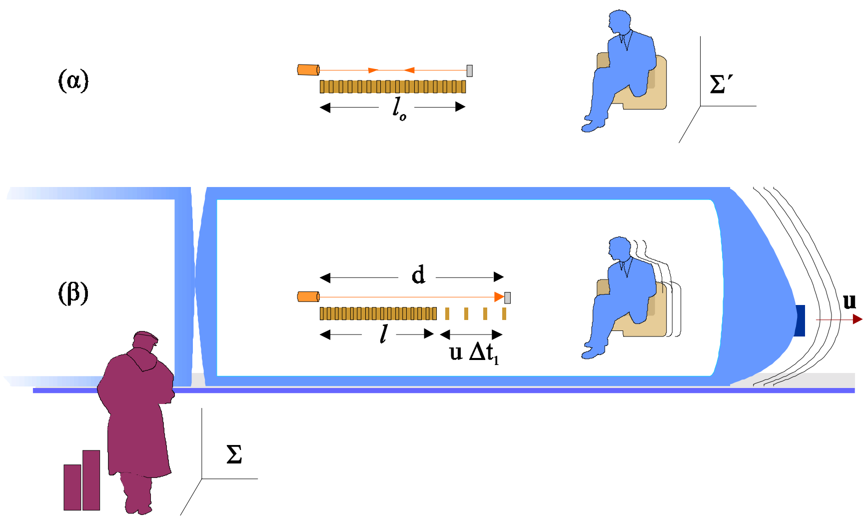
Εικ. 6.4 Το CERN είναι εγκατεστημένο έξω από τη Γενεύη και χρηματοδοτείται από όλα τα ευρωπαϊκά κράτη. Ο κόκκινος κύκλος στη φωτογραφία δείχνει τη θέση ενός υπόγειου επιταχυντή σωματιδίων

Το 1976 στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών (CERN), στη Γενεύη, επιστήμονες επιτάχυναν μιόνια σε ταχύτητα 0,9994c και μέτρησαν το μέσο χρόνο ζωής τους. Το αποτέλεσμα έδωσε για τα κινούμενα μιόνια μέσο χρόνο ζωής 30 φορές μεγαλύτερο από αυτόν των ακίνητων, όπως προέβλεπε η ειδική θεωρία της σχετικότητας.

6-6 Η ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

Όπως το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα σε δυο γεγονότα εξαρτάται από το σύστημα αναφοράς από το οποίο το μετράμε, και η απόσταση ανάμεσα σε δυο σημεία εξαρτάται από το σύστημα αναφοράς του παρατηρητή

Ας κάνουμε πάλι ένα νοητό πείραμα, χρησιμοποιώντας το τρένο της προηγούμενης παραγράφου (σχ. 6.5).



Σχ. 6.6 (α) Ένας φωτεινός παλμός εκπέμπεται από μια πηγή που βρίσκεται στο άκρο ενός χάρακα, ανακλάται από ένα καθρέφτη που βρίσκεται στο άλλο άκρο και επιστρέφει στην πηγή. (β) Η κίνηση του φωτεινού παλμού όπως τον βλέπει ένας παρατηρητής στο Σ΄. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η απόσταση που ταξιδεύει ο παλμός για να φτάσει στον καθρέφτη είναι μεγαλύτερη κατά την ποσότητα $u\Delta t_1$ από το μήκος (l) του χάρακα όπως το αντιλαμβάνεται αυτός.

Ένας χάρακας έχει τοποθετηθεί μέσα στο τρένο στη διεύθυνση κίνησης. Στο ένα άκρο του χάρακα στερεώνουμε μια πηγή φωτεινών αναλαμπών ενώ στο άλλο άκρο έναν καθρέφτη. Για τον παρατηρητή που ταξιδεύει μέσα στο τρένο ο χρόνος που χρειάζεται μια φωτεινή αναλαμπή για να επιστρέψει στην πηγή ανακλώμενη στον καθρέφτη θα είναι

$$\Delta t_0 = \frac{2l_0}{c} \qquad (6.4)$$

όπου l_0 το μήκος του χάρακα όπως το αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής του τρένου.

Για τον παρατηρητή στο σταθμό, το φως ξεκινώντας από την πηγή, για να φτάσει στον καθρέφτη διανύει απόσταση $d = l + u\Delta t_1$

και για να επιστρέψει στην πηγή απόσταση $d' = l - u\Delta t_2$

όπου l το μήκος του χάρακα όπως το αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής.

Το φως διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα και στις δύο περιπτώσεις. Επομένως μπορούμε να γράψουμε

$$d = c\Delta t_1 \quad \text{και} \quad d' = c\Delta t_2$$

ή $$l + u\Delta t_1 = c\Delta t_1 \quad \text{και} \quad l - u\Delta t_2 = c\Delta t_2$$

από τις οποίες παίρνουμε

$$\Delta t_1 = \frac{l}{c-u} \qquad \text{και} \qquad \Delta t_2 = \frac{l}{c+u}$$

Ο συνολικός χρόνος στον οποίο το φως διατρέχει την απόσταση πηγή – καθρέφτης – πηγή θα είναι :

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{l}{c-u} + \frac{l}{c+u}$$

και τελικά

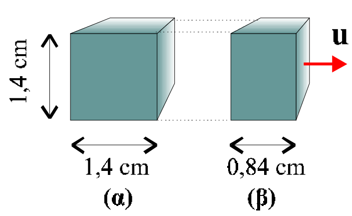
$$\Delta t = \frac{2l}{c\left(1-u^2/c^2\right)} \qquad (6.5)$$

Από τις (6.3), (6.4) και (6.5) βρίσκουμε

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}} \qquad (6.6)$$

Βλέπουμε ότι το μήκος (l) που μετράει ο παρατηρητής που είναι ακίνητος στο σταθμό είναι μικρότερο από το μήκος (l_0) που μετράει ο παρατηρητής που βρίσκεται στο τρένο. Το φαινόμενο αυτό το ονομάζουμε **"συστολή μήκους"**.

Το μήκος ενός αντικειμένου όπως μετριέται στο σύστημα αναφοράς ως προς το οποίο ηρεμεί (το l_0 στο πείραμά μας), ονομάζεται **ιδιομήκος** του αντικειμένου **ή μήκος ηρεμίας.**



Σχ. 6.7 (α) Κύβος ακίνητος ως προς τον παρατηρητή. (β) Ο ίδιος κύβος κινούμενος με ταχύτητα u=0,8c ως προς τον παρατηρητή.

Αποδείξαμε ότι μήκη σε διεύθυνση παράλληλη στη διεύθυνση της σχετικής κίνησης δυο αδρανειακών συστημάτων αναφοράς συστέλλονται. Αποδεικνύεται ακόμη ότι μήκη κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης δε συστέλλονται (σχ. 6.7).

Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι στην πραγματικότητα δε συστέλλεται το ίδιο το αντικείμενο, αλλά η μέτρησή του από ένα άλλο σύστημα αναφοράς. Είναι ο χώρος που παραμορφώνεται και όχι το αντικείμενο, όπως επίσης είναι ο χρόνος που παραμορφώνεται όταν βρίσκουμε ότι κάποια ρολόγια πηγαίνουν πιο αργά και όχι τα ίδια τα ρολόγια. Οι υπολογισμοί μας δε μέτρησαν παραμορφώσεις αντικειμένων ή γεγονότων αλλά διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες περιοχές του χωροχρόνου.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.2

Ας υποθέσουμε πάλι ένα τρένο που ταξιδεύει με ταχύτητα $u = 108\ Km/h \quad (30\ m/s)$. Ένας επιβάτης του μετράει, με μια μετροταινία, το μήκος του βαγονιού στο οποίο βρίσκεται και το βρίσκει 25 m. Πόσο θα είναι το μήκος του βαγονιού για παρατηρητή ακίνητο στο σταθμό;

Απάντηση:

Σύμφωνα με την εξίσωση (6.6)

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}} = (25\ m)\cdot\sqrt{0{,}99999999999999} = 25\ m$$

Ο ακίνητος παρατηρητής βρίσκει στην ουσία, $l = l_0$ Η παγιωμένη μας αντίληψη για το αναλλοίωτο του μήκους είναι απολύτως δικαιολογημένη όσο οι ταχύτητες με τις οποίες τα συστήματα αναφοράς μας είναι πολύ μικρότερες της ταχύτητας του φωτός.

Ας υποθέσουμε ότι αντί για το τρένο του προβλήματος έχουμε ένα διαστημόπλοιο που ταξιδεύει με ταχύτητα $u = 0{,}5\ c$ και ο επιβάτης του πάλι μετράει το μήκος του και το βρίσκει 25 m. Πόσο θα το έβρισκε ο ακίνητος παρατηρητής της Γης;

$$l_1 = l_0\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}} = (25\ m)\cdot 0{,}866 = 21{,}65\ m$$

αν το διαστημόπλοιο ταξίδευε με ταχύτητα $u = 0{,}9\ c$

θα ήταν $\quad l_2 = l_0 \cdot 0{,}436 = 10{,}9\ m$

ενώ αν ταξίδευε με ταχύτητα $u = 0{,}99\ c$

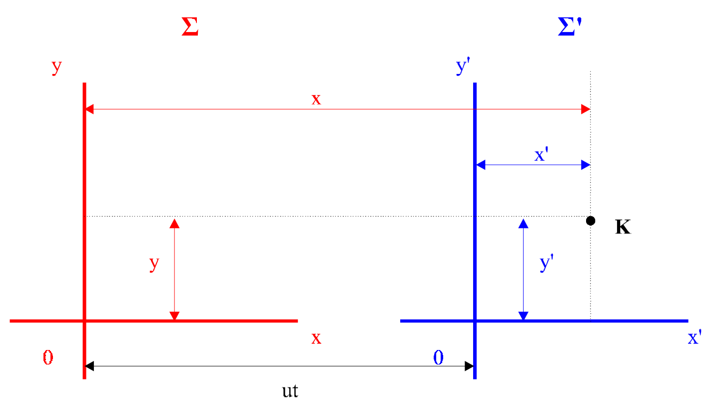
το μήκος του θα ήταν μόλις $\quad l_3 = l_0 \cdot 0{,}141 = 3{,}525\ m$

6-7 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ LORENTZ

Στις προηγούμενες δυο παραγράφους δείξαμε ότι η μέτρηση του μήκους και του χρόνου δε δίνει τα ίδια αποτελέσματα για δυο παρατηρητές που είναι ακίνητοι ως προς τα συστήματα αναφοράς τους, αν το σύστημα αναφοράς του ενός (Σ΄) κινείται με ταχύτητα **u** ως προς το σύστημα αναφοράς του άλλου (Σ).

Χρειαζόμαστε κάποιους "κανόνες" που να μετασχηματίζουν την εικόνα της πραγματικότητας του ενός παρατηρητή σε αυτήν κάποιου άλλου. Πιο συγκεκριμένα χρειαζόμαστε κάποιες σχέσεις μετασχηματισμού, ούτως ώστε οι μετρήσεις που κάνει ο παρατηρητής στο Σ να είναι αποδεκτές στο Σ΄ και αντίστροφα.

Ας υποθέσουμε ότι το Σ΄ κινείται ως προς το Σ παράλληλα προς τον άξονα των *x* και ότι τη χρονική στιγμή *t*=0 τα δύο συστήματα ταυτίζονται (σχ.6.8). Ένα σημείο Κ θα έχει ως προς το Σ συντεταγμένες (*x, y, z*) και ως προς το Σ΄ συντεταγμένες (*x΄, y΄, z΄*). Για το *x* θα ισχύει $x = ut + x'$. Όμως μιλάμε για ένα *x΄* όπως το βλέπει ο παρατηρητής του Σ και όχι όπως το βλέπει ο παρατηρητής του Σ΄ δηλαδή, συνεσταλμένο.

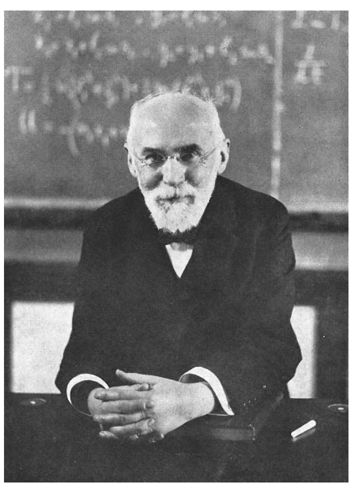


Σχ. 6.8

Για να το ξεχωρίζουμε θα το συμβολίζουμε x'_{Σ}. Πιο σωστά λοιπόν $x = ut + x'_{\Sigma}$. Μεταξύ του x'_{Σ} και του x' ισχύει η σχέση (6.6) δηλαδή $x'_{\Sigma} = x'\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$.

$$x = ut + x'\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}} \tag{6.7}$$

Λύνοντας ως προς x' προκύπτει $x' = \dfrac{x-ut}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$ (6.8)



Εικ. 6.5 H. A. Lorentz (1853-1928), Ολλανδός κορυφαίος θεωρητικός φυσικός. Ο Lorentz εισήγαγε τους μετασχηματισμούς του το 1890, προκειμένου να διασώσει την Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell που δεν υπάκουε στους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου. Ο Einstein ήταν ο πρώτος που κατανόησε τη φυσική τους σημασία το 1905.

Για τα y', z' θα ισχύει $\quad y' = y \quad$ (6.9)

και $\quad z' = z \quad$ (6.10)

Έτσι αν ο παρατηρητής του Σ διαβιβάσει σ' αυτόν του Σ΄ όλες του τις μετρήσεις $(x,\ y,\ z,\ u,\ t)$ τότε ο παρατηρητής του Σ΄ μπορεί να βρει τη θέση του Κ χωρίς να κάνει δικές του μετρήσεις.

Κανένα αδρανειακό σύστημα δε μπορεί να θεωρηθεί απολύτως ακίνητο. Όπως θεωρήσαμε το Σ ακίνητο και το Σ΄ κινούμενο με **u** μπορούμε θεωρήσουμε το Σ΄ ακίνητο και το Σ κινούμενο με **–u**. Θα πρέπει λοιπόν να ισχύει και πάλι μια σχέση απολύτως συμμετρική με την (6.7). Αντικαθιστώντας στην (6.7) τους τονούμενους χαρακτήρες με μη τονούμενους και αντίστροφα και την ταχύτητα *u* με *-u* , προκύπτει

$$x' = -ut' + x\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

Αντικαθιστώντας το x' με το ίσον του από την (6.8) και λύνοντας ως προς t' καταλήγουμε

$$t' = \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \tag{6.11}$$

Οι εξισώσεις (6.8), (6.9), (6.10) και (6.11) ονομάζονται μετασχηματισμοί Lorentz από το Σ στο Σ΄. Τους παραθέτουμε συγκεντρωτικά, μαζί με τους αντίστροφους μετασχηματισμούς (από το Σ΄ στο Σ).

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

$\leftarrow$ Από το Σ στο Σ΄

$$x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$
$$y = y'$$
$$z = z'$$
$$t = \frac{t' + ux'/c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Από το Σ΄ στο Σ $\rightarrow$

Βλέπουμε ότι όταν $u \langle\langle c$ οι μετασχηματισμοί Lorentz δίνουν $x' = x - ut$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$, δηλαδή συμπίπτουν με τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου.

Επίσης βλέπουμε ότι το x' εξαρτάται και από το t και το t' από το x. Στην ειδική θεωρία της σχετικότητας ο χώρος και ο χρόνος είναι αλληλένδετοι. Μιλάμε πια για **χωροχρόνο**.

ΤΟ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΟ ΚΑΙ Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Ας υποθέσουμε ότι δυο γεγονότα συμβαίνουν ταυτόχρονα για ένα παρατηρητή ακίνητο ως προς το σύστημα Σ΄ στις θέσεις (x_1', y_1', z_1', t_1') και (x_2', y_2', z_2', t_2'). Θα συμβαίνουν ταυτόχρονα και για έναν παρατηρητή ακίνητο ως προς το Σ;

Σύμφωνα με τους αντίστροφους μετασχηματισμούς Lorentz (από το Σ΄ στο Σ) η χρονική στιγμή που θα συμβεί το γεγονός 1 για τον παρατηρητή του Σ θα είναι $t_1 = \dfrac{t_1' + ux_1'/c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$ και η χρονική στιγμή που θα συμβεί το γεγονός 2 θα είναι $t_2 = \dfrac{t_2' + ux_2'/c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$.

Ο χρόνος που μεσολάβησε ανάμεσα στα δυο γεγονότα για τον παρατηρητή του Σ θα είναι

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\Delta t' + u\Delta x'/c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \qquad (6.12)$$

Αν τα γεγονότα είναι ταυτόχρονα για τον παρατηρητή του Σ΄ τότε $\Delta t' = 0$, οπότε

$$\Delta t = \frac{u\Delta x'/c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \neq 0$$

Αυτό σημαίνει ότι για τον παρατηρητή που βρίσκεται στο Σ τα γεγονότα δεν είναι ταυτόχρονα. Βέβαια αν τα γεγονότα συμβαίνουν σε μικρή απόσταση μεταξύ τους ως προς το Σ΄ και το Σ΄ κινείται με ταχύτητα πολύ μικρότερη του c ως προς το Σ το Δt είναι πρακτικά μηδενικό και τα γεγονότα ταυτόχρονα και ως προς το Σ.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.3

Ένα μαχητικό αεροπλάνο κινείται με ταχύτητα 680 *m/s* (διπλάσια της ταχύτητας του ήχου). Το αεροπλάνο έχει μήκος 20 m. Ο πιλότος αντιλαμβάνεται ταυτόχρονα δυο εκρήξεις, μια από το ρύγχος του αεροπλάνου και μια από την ουρά. Με ποια διαφορά χρόνου αντιλαμβάνεται τις εκρήξεις ένας παρατηρητής ακίνητος στη Γη;

Απάντηση:

Ένας παρατηρητής θα «δει» τις λάμψεις με χρονική διαφορά

$$\Delta t = \frac{u\Delta x' / c^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \frac{680 \cdot 20 / 9 \cdot 10^{16}}{\sqrt{1-\frac{680^2}{9 \cdot 10^{16}}}} = 0{,}00000000000015 \ s$$

Η διαφορά αυτή είναι πάρα πολύ μικρή και δε γίνεται αντιληπτή.

6-8 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ LORENTZ

Έστω ότι σ' ένα σημείο του συστήματος συντεταγμένων Σ βρίσκεται ένα σώμα που μετατοπίζεται, κινούμενο στη διεύθυνση του άξονα των x. Για έναν παρατηρητή ακίνητο στο Σ σε χρόνο Δt το σώμα μετακινήθηκε κατά Δx. Ένας παρατηρητής ακίνητος στο Σ΄ αντιλαμβάνεται ότι το γεγονός διάρκεσε χρόνο $\Delta t'$ και ότι η μετατόπιση ήταν $\Delta x'$. Το Σ΄, όμως, κινείται με ταχύτητα u παράλληλα στον άξονα των x.

Από τις σχέσεις $$x' = \frac{x-ut}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \qquad \text{και} \qquad t' = \frac{t-ux/c^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

εύκολα προκύπτουν $$\Delta x' = \frac{\Delta x - u\Delta t}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \qquad \text{και} \qquad \Delta t' = \frac{\Delta t - u\Delta x / c^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

και για στοιχειώδεις μεταβολές

$$dx' = \frac{dx - udt}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \qquad \text{και} \qquad dt' = \frac{dt - udx / c^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

Η ταχύτητα υ' του κινητού ως προς το Σ΄ θα είναι

$$\upsilon' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - udt}{dt - udx / c^2}$$

ή $$\upsilon' = \frac{\frac{dx}{dt} - u}{1 - \frac{u}{c^2}\frac{dx}{dt}}$$

Όμως $\dfrac{dx}{dt} = \upsilon$ είναι η ταχύτητα του κινητού όπως την αντιλαμβάνεται παρατηρητής του Σ. Επομένως, η τελευταία σχέση παίρνει τη μορφή

$$\upsilon' = \frac{\upsilon - u}{1 - \dfrac{u}{c^2}\upsilon} \qquad (6.13)$$

Η σχέση αυτή εκφράζει την ταχύτητα υ' του κινητού, ως προς το Σ΄, σε συνάρτηση με την ταχύτητά του υ ως προς το σύστημα Σ.

Αντίστροφα, η σχέση

$$\upsilon = \frac{\upsilon' + u}{1 + \dfrac{u}{c^2}\upsilon'} \qquad (6.14)$$

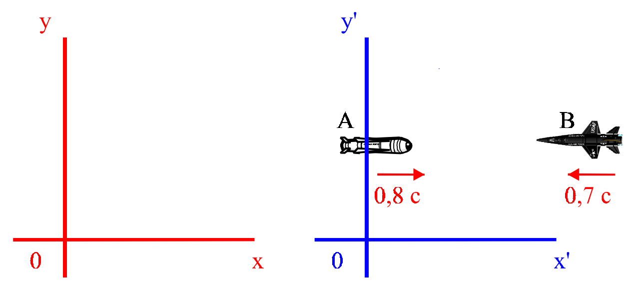
εκφράζει την ταχύτητα υ' του κινητού, ως προς το σύστημα Σ΄ σε συνάρτηση με την ταχύτητά του ως προς το Σ.

Παρατηρούμε ότι όταν οι ταχύτητες υ και u πολύ μικρότερες από c θα είναι $\upsilon' \approx \upsilon - u$ και $\upsilon \approx \upsilon' + u$ όπως προβλέπουν οι μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου.

Ακόμη, όταν $\upsilon = c$ προκύπτει $\upsilon' = c$ και, αντίστροφα, όταν $\upsilon' = c$ προκύπτει $\upsilon = c$, δηλαδή όταν ένα σώμα κινείται με την ταχύτητα του φωτός η ταχύτητά του είναι η ίδια για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Το συμπέρασμα συμφωνεί με τη δεύτερη παραδοχή της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.4

Ένας παρατηρητής στη Γη βλέπει δυο διαστημόπλοια Α, Β να κινούνται πάνω στην ίδια ευθεία, με ταχύτητες $0{,}8c$ και $0{,}7c$, αντίστοιχα, αντίθετης φοράς. (σχ. 6.9). Με τι ταχύτητα κινείται το Β ως προς το Α;



Σχ. 6.9

Απάντηση :

Σύμφωνα με τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου ο πιλότος του Α θα έβλεπε το Β να πλησιάζει προς αυτόν με ταχύτητα $0{,}8c + 0{,}7c = 1{,}5c$. Η ταχύτητα αυτή είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός και έρχεται σε σύγκρουση με την παραδοχή ότι τίποτε δεν κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη του *c*. Ας δούμε τι προβλέπουν οι μετασχηματισμοί Lorentz. Αν θεωρήσουμε σαν Σ τη Γη και σαν Σ΄ το διαστημόπλοιο Α, η ταχύτητα του Β ως προς το Α θα δίνεται από τη σχέση 6.13 δηλαδή

$$\upsilon'_B = \frac{\upsilon_B - u}{1 - \dfrac{u}{c^2}\upsilon_B}$$

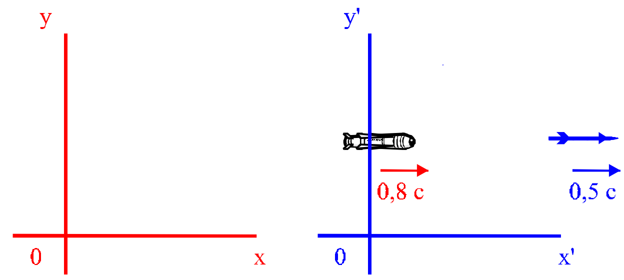
Αν θεωρήσω την ταχύτητα του Α ως προς τη Γη θετική θα έχω $u = 0{,}8c$ και $\upsilon_B = -0{,}7c$ οπότε

$$\upsilon'_B = \frac{\upsilon_B - u}{1 - \dfrac{u}{c^2}\upsilon_B} \quad \text{και τελικά}$$

$$\upsilon'_B = \frac{-0{,}7c - 0{,}8c}{1 - \dfrac{0{,}8c}{c^2}\left(-0{,}7c\right)} = -0{,}96c$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.5

Διαστημόπλοιο που κινείται με ταχύτητα $0{,}6c$ ως προς τη Γη εκτοξεύει πύραυλο με ταχύτητα $0{,}5c$ ως προς αυτό, και με κατεύθυνση ίδια με την κατεύθυνση της ταχύτητας του διαστημοπλοίου (σχ. 6.10). Ποια η ταχύτητα του πυραύλου ως προς τη Γη;



Σχ. 6.10

Απάντηση :

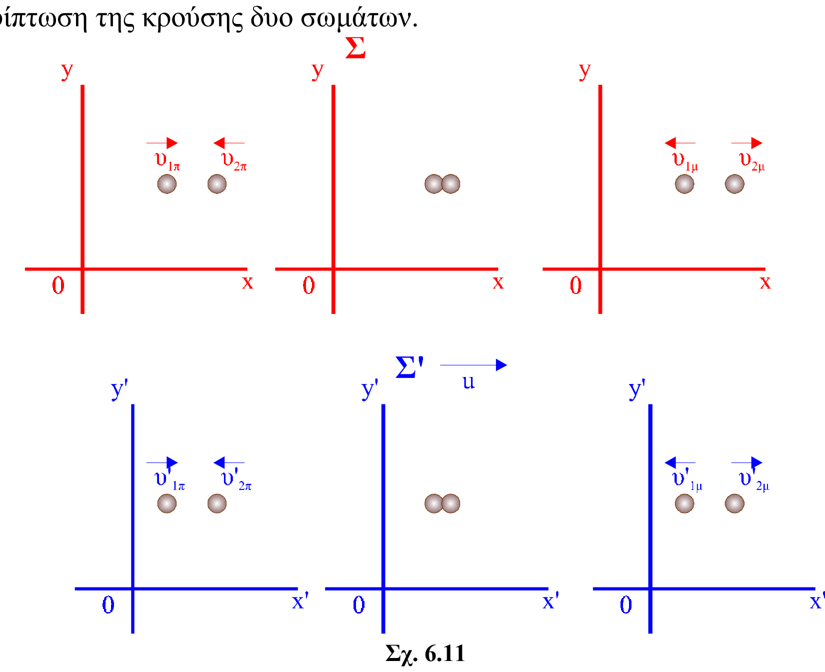
Σύμφωνα με τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου, ο παρατηρητής στη Γη θα έβλεπε τον πύραυλο να κινείται με την ταχύτητα του διαστημοπλοίου συν την ταχύτητά του ως προς το διαστημόπλοιο δηλαδή $0{,}6c + 0{,}5c = 1{,}1c$. Η ταχύτητα αυτή είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός. Το άτοπο αίρεται αν χρησιμοποιήσουμε τους μετασχηματισμούς Lorentz. Αν θεωρήσουμε σαν Σ τη Γη και σαν Σ΄ το διαστημόπλοιο η ταχύτητα του πυραύλου ως προς τη Γη θα δίνεται από τη σχέση 6.14. Είναι δηλαδή

$$\upsilon = \frac{\upsilon' + u}{1 + \frac{u}{c^2}\upsilon'} \qquad \text{οπότε} \qquad \upsilon = \frac{0.5c + 0{,}6c}{1 + \frac{0{,}6c}{c^2}0{,}5c} = 0{,}85c$$

6-9 Η ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΗ ΟΡΜΗ

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής, η ορμή συστήματος δυο ή περισσότερων σωμάτων διατηρείται σταθερή, αν το σύστημα των σωμάτων είναι απομονωμένο.

Μια συνηθισμένη εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ορμής είναι η περίπτωση της κρούσης δυο σωμάτων.



Σχ. 6.11

Ας υποθέσουμε ότι δυο σώματα κινούνται παράλληλα με τον άξονα των x του συστήματος Σ με ταχύτητες $\upsilon_{1\pi}$ και $\upsilon_{2\pi}$ (σχ.6.10) και συγκρούονται. Μετά την κρούση τα σώματα θα έχουν ταχύτητες $\upsilon_{1\mu}$ και $\upsilon_{2\mu}$ αντίστοιχα. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής θα ισχύει $m_1\upsilon_{1\pi} - m_2\upsilon_{2\pi} = m_2\upsilon_{2\mu} - m_1\upsilon_{1\mu}$. Οι δείκτες $(\pi,\ \mu)$ παραπέμπουν στο «αμέσως πριν» και στο «αμέσως μετά» την κρούση.

Ας παρατηρήσουμε την ίδια κρούση από ένα σύστημα αναφοράς Σ΄ που κινείται με ταχύτητα **u** ως προς το Σ. Οι ταχύτητες με τις οποίες θα αντιλαμβανόμαστε να κινούνται τα σώματα πριν και μετά την κρούση θα είναι $\upsilon'_{1\pi}$, $\upsilon'_{2\pi}$, $\upsilon'_{1\mu}$, $\upsilon'_{2\mu}$, που δίνονται από τη σχέση μετασχηματισμού ταχυτήτων του Lorentz (6.13). Αν υπολογίσουμε την ορμή του συστήματος με βάση τις τιμές αυτές, θα διαπιστώσουμε ότι για το σύστημα Σ΄ η αρχή διατήρησης της ορμής, με τη μορφή που γνωρίζουμε, δεν ισχύει. Όμως οι νόμοι της Φυσικής θα έπρεπε να ισχύουν με την ίδια μαθηματική μορφή για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.

Πρέπει, επομένως, να ορίσουμε την ορμή με τέτοιο τρόπο ώστε η αρχή διατήρησης της ορμής να ισχύει και στις περιπτώσεις στις οποίες εφαρμόζουμε τους μετασχηματισμούς Lorentz.

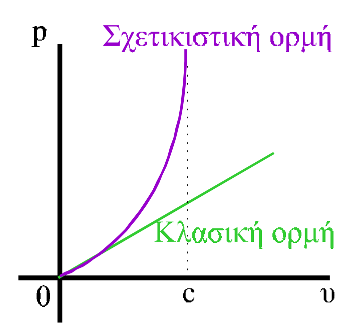
Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται αν ορίσουμε την ορμή σώματος μάζας m που κινείται με ταχύτητα $\boldsymbol{\upsilon}$ με τη σχέση:

$$\mathbf{p} = \frac{m\boldsymbol{\upsilon}}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}} \tag{6.15}$$

(σχετικιστικός ορισμός της ορμής)

Παρατηρήσεις

1. Με τον σχετικιστικό ορισμό της ορμής εξασφαλίζεται η ισχύς της αρχής διατήρησης της ορμής για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.
2. Όταν η ταχύτητα του σώματος υ είναι πολύ μικρότερη του c προκύπτει $\mathbf{p} \approx m\boldsymbol{\upsilon}$. Βλέπουμε, δηλαδή, ότι ο προηγούμενος κλασικός ορισμός της ορμής δεν καταργείται, απλώς αποτελεί μια ειδική περίπτωση του σχετικιστικού ορισμού.
3. Η σχετικιστική ορμή είναι γενικά μεγαλύτερη της κλασικής.
4. Όταν η ταχύτητα του σώματος τείνει στο c η ορμή του τείνει στο άπειρο. (σχ. 6.12).
5. Το μέγεθος m ταυτίζεται με αυτό που λέμε μάζα στη νευτώνεια μηχανική και εκφράζει και εδώ την αδράνεια του σώματος. Στη σχετικότητα το ονομάζουμε **μάζα ηρεμίας** του σώματος.
6. Εφόσον η ορμή δεν είναι πια ανάλογη της ταχύτητας και ο ρυθμός μεταβολής της ορμής, δηλαδή η δύναμη, δε θα είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας, δηλαδή την επιτάχυνση. Είναι φανερό ότι, όσο αυξάνεται η ταχύτητα ενός σώματος, η επιτάχυνση που οφείλεται σε μια δεδομένη δύναμη συνεχώς μειώνεται. Όταν η ταχύτητα του σώματος τείνει στο c η επιτάχυνσή του τείνει στο μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του φωτός είναι η ανώτερη δυνατή ταχύτητα στη φύση.



Σχ. 6.12 Παρατηρούμε ότι για υ<<c οι δυο καμπύλες πρακτικά συμπίπτουν.

6-10 ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ένα από τα σπουδαιότερα συμπεράσματα της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας είναι πως ένα σώμα μάζας ηρεμίας m που κινείται με ταχύτητα υ έχει ενέργεια

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}} \qquad (6.16)$$

Την ενέργεια αυτή δε μπορούμε να τη θεωρήσουμε μόνο κινητική. Αν θέσουμε όπου $\upsilon = 0$ βρίσκουμε $E = mc^2$ και όχι $E = 0$.

Το ποσό ενέργειας mc^2 που κατέχει ένα σώμα όταν ηρεμεί το ονομάζουμε ενέργεια ηρεμίας του σώματος .

Η ενέργεια ηρεμίας είναι ένα ποσό ενέργειας που συσχετίζεται μόνο με τη μάζα ηρεμίας του σώματος. Με άλλα λόγια, μια ποσότητα μάζας m ισοδυναμεί με ένα ποσό ενέργειας mc^2. Πηγαίνοντας το συλλογισμό ένα βήμα πιο πέρα λέμε ότι η μάζα και η ενέργεια είναι δυο όψεις της ίδιας οντότητας.

Είναι πάρα πολλά τα πειράματα όπου ένα μετρήσιμο ποσό μάζας εξαφανίζεται και δίνει τη θέση του σε ένα ισοδύναμο (mc^2) ποσό ενέργειας και, αντίστροφα, ένα ποσό ενέργειας μετατρέπεται σε μάζα.

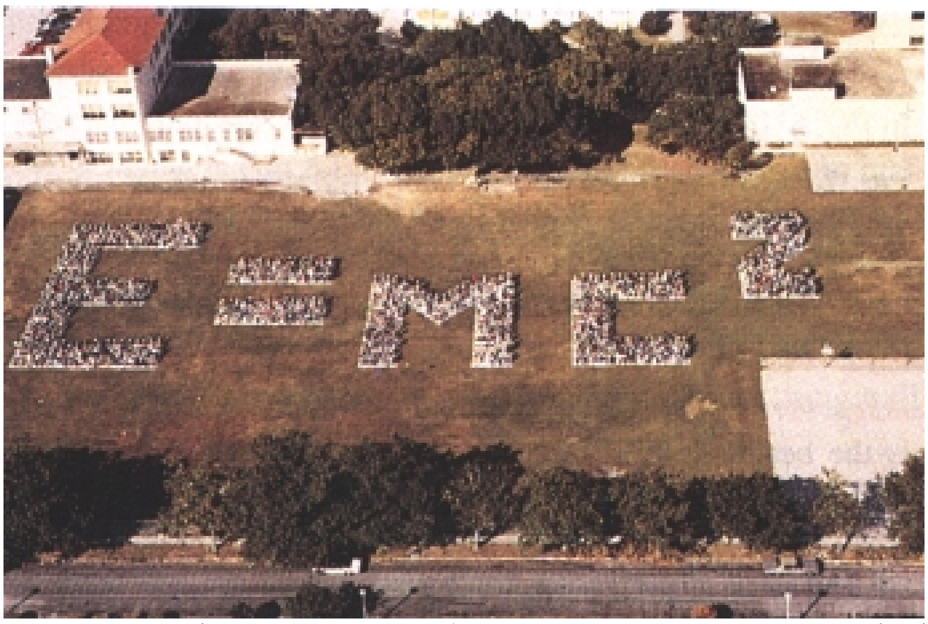
Εικ. 6.6 Ένα φωτόνιο ακτινοβολίας γ προσκρούει σε ένα ηλεκτρόνιο και μετατρέπεται σ' ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Το φαινόμενο λέγεται δίδυμη γένεση. Ένα ποσό ενέργειας μετατράπηκε σε ύλη. Στη φωτογραφία η υλοποίηση του φωτονίου έγινε σε χώρο όπου υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Το ποζιτρόνιο έχει αντίθετο φορτίο από το ηλεκτρόνιο και γι' αυτό διαγράφει σπειροειδή τροχιά αντίστροφης φοράς από αυτήν που διαγράφει το ηλεκτρόνιο.

Σε μια πυρηνική σχάση το άθροισμα των μαζών ηρεμίας των προϊόντων της σχάσης είναι μικρότερο από τη μάζα ηρεμίας του αρχικού πυρήνα. Το έλλειμμα μάζας πολλαπλασιαζόμενο επί c^2 δίνει το ποσό της εκλυόμενης ενέργειας.

Όταν πυρήνες υδρογόνου συνδέονται για να σχηματίσουν πυρήνες ηλίου, σχεδόν το 0,1% της μάζας τους μετατρέπεται σε ενέργεια. Αυτό συμβαίνει στα αστέρια και φυσικά, στον Ήλιο. Συγκεκριμένα, η μάζα του Ήλιου ελαττώνεται με ρυθμό 4,5 εκατομμύρια τόνους το δευτερόλεπτο. Παρόλο που ο ρυθμός αυτός για τα δικά μας δεδομένα είναι τρομακτικός, ο Ήλιος είναι τεράστιος. Η μάζα αυτή που ΄΄χάνεται΄΄ στον Ήλιο μετατρέπεται σε ενέργεια. Στο μέρος αυτής της ενέργειας, που φτάνει στη Γη, οφείλεται η διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας.

Το 1932 ο Αμερικανός φυσικός C. D. Anderson (Άντερσον) ανακάλυψε πως ένα φωτόνιο ακτινοβολίας γ, μετατράπηκε σε ένα ζεύγος σωματιδίων. Το ένα ήταν ηλεκτρόνιο και το άλλο ποζιτρόνιο. Το φαινόμενο ονομάστηκε δίδυμη γένεση. Στο φαινόμενο αυτό ενέργεια (του φωτονίου) μετατρέπεται σε ύλη.

Οι αρχές διατήρησης της μάζας και της ενέργειας συντίθενται από τη θεωρία της σχετικότητας σε μια ευρύτερη αρχή διατήρησης μάζας-ενέργειας.

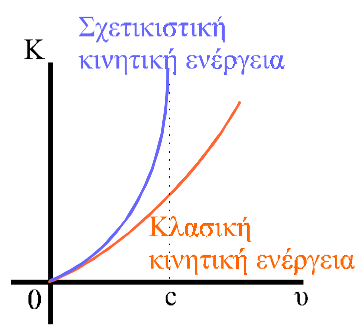


Εικ. 6.7 Μαθητές ενός λυκείου στο Μαϊάμι γιορτάζουν την εκατοστή επέτειο της γέννησης του Einstein.

Εάν θέλουμε να υπολογίσουμε την κινητική ενέργεια (K) του σώματος πρέπει από την ολική του ενέργεια (E) να αφαιρέσουμε την ενέργεια ηρεμίας (mc^2) του σώματος.

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}} - mc^2 \qquad (6.17)$$

Η σχέση (6.17) για $\upsilon \ll c$ να δίνει $K = \frac{1}{2}m\upsilon^2$. (Για την απόδειξη της σχέσης βλέπε σελ.214). Βλέπουμε επίσης ότι η σχέση (6.17) για $\upsilon = 0$ δίνει $K = 0$. Επίσης, όταν η υ τείνει στο c η κινητική ενέργεια τείνει στο άπειρο, όπως φαίνεται και στη γραφική παράσταση $K = f(\upsilon)$ του σχήματος 6.13.



Σχ. 6.13 Παρατηρούμε ότι για υ<<c οι δυο καμπύλες πρακτικά συμπίπτουν.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.6

Η μάζα του πρωτονίου και του νετρονίου είναι $1{,}67309\times10^{-27}\ kg$ και $1{,}67538\times10^{-27}\ kg$ αντίστοιχα. Η μάζα ενός πυρήνα δευτερίου $\left({}^2_1\mathrm{H}\right)$ είναι $3{,}34451\times10^{-27}\ kg$. Πόση ενέργεια πρέπει να προσφέρουμε για να διαχωρίσουμε τον πυρήνα του δευτερίου στα συστατικά του;

Απάντηση :

Εάν αθροίσουμε τη μάζα των συστατικών του πυρήνα βρίσκουμε ότι είναι μεγαλύτερη από τη μάζα του πυρήνα κατά Δm. Υπολογίζουμε το Δm.

$$\Delta m = (1{,}67309 + 1{,}67538 - 3{,}34451)\times10^{-27}\ kg = 0{,}00396\times10^{-27}\ kg$$

Η διαφορά μάζας μεταξύ της μάζας των συστατικών του πυρήνα και της μάζας του πυρήνα αντιστοιχεί σε ενέργεια $E = \Delta mc^2 = 0{,}00396\times10^{-27}\cdot\left(3\times10^8\right)^2\ J = 0{,}03564\times10^{-11}\ J$

Το πείραμα επαληθεύει ότι τόσο είναι το ποσό ενέργειας που πρέπει να προσφερθεί στον πυρήνα του δευτερίου για να διαχωριστεί στα συστατικά του. Η ενέργεια αυτή λέγεται **ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα.**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.7

Ένα ηλεκτρόνιο κινείται με ταχύτητα $\upsilon = 0{,}85\ c$. Να βρεθεί η ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου και η κινητική του ενέργεια σε eV. Η μάζα ηρεμίας ενός ηλεκτρονίου είναι $m = 9{,}1 \times 10^{-31}\ kg$.

Απάντηση :

Η ενέργεια ηρεμίας θα είναι $mc^2 = \left(9{,}1 \times 10^{-31}\ kg\right) \cdot \left(3 \times 10^{8}\ m/s\right)^2 = 81{,}9 \times 10^{-15}\ J = 0{,}511\, MeV$

Η ολική ενέργεια είναι $E = \dfrac{mc^2}{\sqrt{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}}} = \dfrac{0{,}511\, MeV}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{0{,}85c}{c}\right)^2}} = 0{,}97\, MeV$

Η κινητική ενέργεια βρίσκεται αν από την ολική ενέργεια αφαιρέσουμε την ενέργεια ηρεμίας

$$K = E - mc^2 = 0{,}97\, Mev - 0{,}511\, MeV = 0{,}459\, MeV$$

6-11 ΣΧΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΟΡΜΗΣ

Πολλαπλασιάζουμε και διαιρούμε τον αριθμητή της σχέσης (6.15) με c οπότε

βρίσκουμε
$$p = \frac{mc\upsilon / c}{\sqrt{1 - \upsilon^2 / c^2}}$$

Λύνουμε ως προς $\dfrac{\upsilon}{c}$ και βρίσκουμε

$$\frac{\upsilon}{c} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2c^2}}$$

Αυτό συνεπάγεται ότι

$$\sqrt{1 - \upsilon^2 / c^2} = \frac{mc}{\sqrt{p^2 + m^2c^2}}$$

Αντικαθιστώντας στην (6.16) το $\sqrt{1 - \upsilon^2 / c^2}$ με το ίσον του βρίσκουμε

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \qquad (6.18)$$

Παρατηρούμε ότι όταν η ορμή του σώματος είναι ίση με το μηδέν (το σώμα ηρεμεί) έχει ενέργεια $E = mc^2$, όπως αναμενόταν.

Επίσης, όταν η μάζα ηρεμίας του σώματος είναι μηδενική, ισχύει η σχέση $E = pc$.

Αναρωτιέται κανείς πώς είναι δυνατόν ένα σώμα να έχει μηδενική μάζα ηρεμίας και ορμή διάφορη του μηδενός. Το ερώτημα είναι βάσιμο μόνο αν λάβουμε υπόψη μας τον κλασικό ορισμό της ορμής $\mathbf{p} = m\boldsymbol{\upsilon}$. Αν όμως λάβουμε υπόψη μας το σχετικιστικό ορισμό της ορμής $\mathbf{p} = \dfrac{m\boldsymbol{\upsilon}}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}$ βλέπουμε ότι αν ένα σωματίδιο έχει μηδενική μάζα ηρεμίας και κινείται με την ταχύτητα του φωτός η ορμή ισούται μ' ένα μαθηματικά απροσδιόριστο κλάσμα $\left(\dfrac{0}{0}\right)$ και, πάντως, δεν είναι ίση με το μηδέν.

Η ύπαρξη σωματιδίων με μηδενική μάζα ηρεμίας έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά. Πρόκειται για σωματίδια που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός όπως το φωτόνιο και το νετρίνο. Τα σωματίδια αυτά μεταφέρουν ορμή και ενέργεια αλλά όχι μάζα, κάτι που μας θυμίζει έντονα το κύμα.

6-12 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΕΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ–ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Μέχρι εδώ είδαμε πως μέσω των μετασχηματισμών Lorentz οι βασικοί νόμοι της μηχανικής ισχύουν ισοδύναμα σε όλα τα αδρανειακά συστήματα χωρίς να παραβιάζουν τις αρχές της θεωρίας της σχετικότητας. Τι γίνεται όμως με τον άλλο μεγάλο τομέα της Φυσικής, τον ηλεκτρομαγνητισμό;

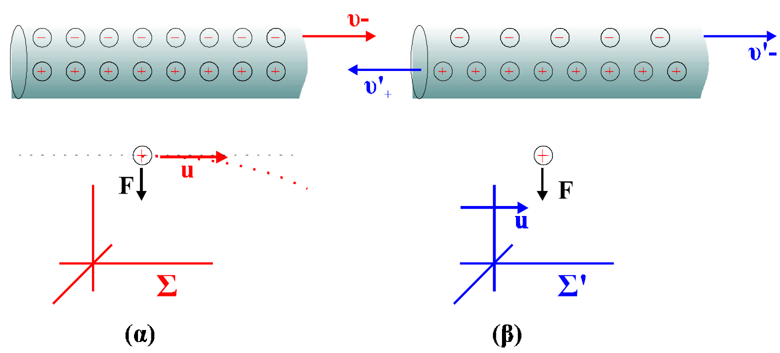
Σε πολλά φαινόμενα του ηλεκτρομαγνητισμού υπεισέρχονται μεγέθη όπως η ταχύτητα, το μήκος, ο χρόνος. Για παράδειγμα η δύναμη που ασκεί ένα μαγνητικό πεδίο σε ένα φορτισμένο σωματίδιο κινούμενο κάθετα στις δυναμικές γραμμές είναι $F = Bu|q|$, εξαρτάται δηλαδή άμεσα από μια ταχύτητα. Ακόμη η ένταση του πεδίου μεταξύ των οπλισμών ενός επίπεδου φορτισμένου πυκνωτή εξαρτάται από τις διαστάσεις των οπλισμών και τη μεταξύ τους απόσταση. Εφόσον οι ταχύτητες και τα μήκη έχουν διαφορετικές τιμές στα διάφορα αδρανειακά συστήματα καταλαβαίνουμε ότι και μεγέθη όπως η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ή του μαγνητικού πεδίου θα έχουν διαφορετική έκφραση, ανάλογα με το σύστημα αναφοράς από το οποίο παρατηρούμε τα φαινόμενα.

Είναι ανάγκη να βρούμε μετασχηματισμούς που να συνδέουν τις μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών από δύο παρατηρητές σε διαφορετικά αδρανειακά συστήματα. Η παραγωγή αυτών των μετασχηματισμών στην πληρότητά τους είναι μια επίπονη μαθηματική διαδικασία. Εμείς απλά θα μελετήσουμε κάποια επιλεγμένα παραδείγματα και στο τέλος θα παραθέσουμε τους μετασχηματισμούς.

Κίνηση φορτίου παράλληλα με ρευματοφόρο αγωγό

Ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο κινείται με ταχύτητα u, στη διεύθυνση του άξονα των x ενός συστήματος αναφοράς Σ και παράλληλα προς ένα ρευματοφόρο αγωγό. Για έναν παρατηρητή ακίνητο ως προς το Σ το φορτίο θα δεχθεί δύναμη $F = Buq$ από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο αγωγός και θα παρεκκλίνει της ευθύγραμμης πορείας του (σχ. 6.14α).

Ο αγωγός δεν ασκεί καμία ηλεκτρική δύναμη στο σωματίδιο. Η πυκνότητα αρνητικού φορτίου είναι απολύτως ίση με αυτήν του θετικού φορτίου. Απλουστεύοντας λίγο μπορούμε να υποθέσουμε ότι μέσα στον αγωγό υπάρχει μια γραμμική κατανομή αρνητικών φορτίων που κινείται ισοταχώς προς τα δεξιά με ταχύτητα υ_- και μια γραμμική κατανομή, ίσων κατ' απόλυτη τιμή με τα αρνητικά, θετικών φορτίων που είναι ακίνητη. Η γραμμική πυκνότητα (φορτίο ανά μονάδα μήκους) και στις δυο κατανομές είναι ίδια, δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών φορέων φορτίου είναι η ίδια και για τις δυο κατανομές.



Σχ. 6.14

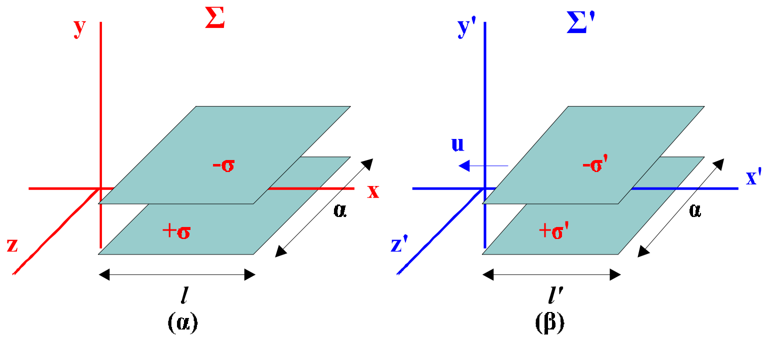
Ας δούμε τώρα πώς αντιλαμβάνεται το φαινόμενο ένας παρατηρητής ακίνητος ως προς σύστημα αναφοράς Σ΄ που κινείται ως προς το Σ με ταχύτητα u παράλληλη προς τον άξονα των x. (σχ. 6.14 β) Τον παρατηρητή αυτόν θα τον λέμε συνοπτικά Σ΄.

Ο Σ΄ βλέπει το φορτισμένο σωμάτιο ακίνητο (6.13). Δε μπορεί λοιπόν να ερμηνεύσει τη δύναμη που δέχεται το φορτισμένο σωματίδιο ως δύναμη μαγνητικού πεδίου. Ο Σ΄ όμως βλέπει και το ρευματοφόρο αγωγό διαφορετικά από τον Σ. Ως προς τον Σ΄ τα θετικά φορτία δεν είναι ακίνητα, κινούνται με ταχύτητα $\upsilon'_+ = -u$ ενώ τα αρνητικά με $\upsilon'_- = \dfrac{\upsilon_- - u}{1 - \dfrac{u}{c^2}\upsilon_-}$. Οι ταχύτητες υ'_+ και υ'_- δεν είναι ίσες. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών αρνητικών φορτίων φαίνεται διαφορετική από την απόσταση δυο θετικών φορτίων (6.6). Η γραμμική πυκνότητα των αρνητικών φορτίων όπως την αντιλαμβάνεται ο Σ΄ είναι διαφορετική από τη γραμμική πυκνότητα των θετικών φορτίων. Με λίγα λόγια, για τον Σ΄ ο ρευματοφόρος αγωγός εμφανίζεται φορτισμένος και μάλιστα θετικά. Η δύναμη που δέχεται λοιπόν το φορτισμένο σωμάτιο για τον Σ΄ είναι ηλεκτρική και ασκείται από το ηλεκτρικό πεδίο του αγωγού. Η δύναμη αυτή είναι ακριβώς ίση με αυτήν του μαγνητικού πεδίου που αντιλαμβάνεται ο Σ.

Οι σχετικιστικοί μετασχηματισμοί των εντάσεων των πεδίων κάνουν άλλοτε ένα ηλεκτρικό πεδίο να φαίνεται σαν μαγνητικό και άλλοτε αντίστροφα.

Ομογενές πεδίο φορτισμένου πυκνωτή

Έστω φορτισμένος επίπεδος πυκνωτής (σχ. 6.15α) με τους οπλισμούς του παράλληλους στο επίπεδο xOz ενός συστήματος αναφοράς. Οι οπλισμοί ως προς το Σ, ως προς το οποίο ο πυκνωτής είναι ακίνητος, έχουν διαστάσεις $l \times a$. Η ένταση του πεδίου μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή είναι $E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$, όπου σ η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου στους οπλισμούς (ποσότητα φορτίου ανά μονάδα επιφανείας).



Σχ. 6.15

Έστω τώρα παρατηρητής ακίνητος ως προς σύστημα αναφοράς Σ΄ που κινείται ως προς το Σ παράλληλα με τον άξονα των x με ταχύτητα u. Ποια είναι η ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του πυκνωτή που αντιλαμβάνεται ο Σ΄;

Ο Σ΄ βλέπει τον πυκνωτή να κινείται ως προς αυτόν με ταχύτητα $-u$ (σχ. 6.14β). Το μήκος των οπλισμών του πυκνωτή για τον Σ΄ θα είναι

$$l' = l\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

ενώ το πλάτος των οπλισμών $\alpha' = \alpha$

Το εμβαδόν των οπλισμών θα είναι $A' = l' \times \alpha' = A\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$

και η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου $\sigma' = \dfrac{Q}{A'} = \dfrac{Q}{A\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \dfrac{\sigma}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$

Άρα η ένταση του πεδίου είναι $E'_{\perp} = \dfrac{\sigma'}{\varepsilon_0} = \dfrac{E_{\perp}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$

Οι δείκτες $\perp$ υποδηλώνουν ότι μιλάμε για ένα πεδίο με την έντασή του κάθετη στη διεύθυνση κίνησης.

Στην παραπάνω επεξεργασία σιωπηρά δεχτήκαμε ότι ο Σ΄ βλέπει την ίδια ποσότητα φορτίου Q στους οπλισμούς του πυκνωτή με τον Σ. Πράγματι **το φορτίο είναι, όπως και η μάζα ηρεμίας, μια αναλλοίωτη ποσότητα για όλα τα συστήματα αναφοράς.**

Εάν η ένταση του πεδίου ήταν παράλληλη στον άξονα των x θα καταλήγαμε στο συμπέρασμα ότι $E'_{||} = E_{||}$

Με ανάλογους τρόπους βρίσκουμε μετασχηματισμούς για όλες τις διευθύνσεις και για το μαγνητικό πεδίο αλλά και για συνδυασμό ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου.

Οι μετασχηματισμοί στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται στην περίπτωση στην οποία το σύστημα Σ΄ κινείται ως προς το Σ παράλληλα με τον άξονα x.

$$E'_x = E_x \qquad E'_y = \frac{\left(E_y - uB_z\right)}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \qquad E'_z = \frac{\left(E_z + uB_y\right)}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

$$B'_x = B_x \qquad B'_y = \frac{\left(B_y + \frac{u}{c^2}E_z\right)}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \qquad B'_z = \frac{\left(B_z - \frac{u}{c^2}E_y\right)}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι δε χρειάστηκε να τροποποιήσουμε σε κανένα σημείο τους ορισμούς που γνωρίζαμε μέχρι τώρα για τον ηλεκτρομαγνητισμό όπως κάναμε για παράδειγμα προηγουμένως για την ορμή ή όπως θα κάνουμε αργότερα για τη θεωρία του βαρυτικού πεδίου. Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία είναι συμβατή με τη θεωρία της σχετικότητας.

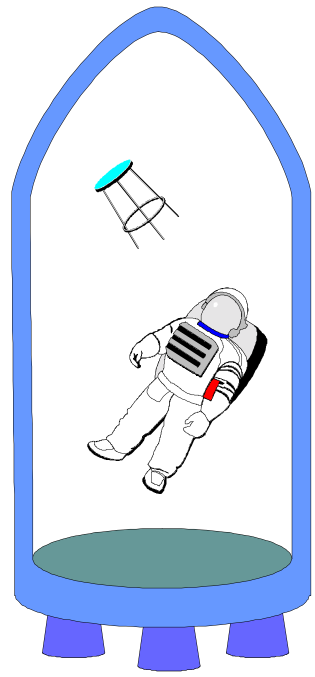
6-13 Η ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στην ειδική θεωρία της σχετικότητας ασχοληθήκαμε αποκλειστικά με την παρατήρηση των φαινομένων από αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Όμως αδρανειακά συστήματα αναφοράς με την αυστηρή έννοια του όρου, δηλαδή συστήματα στα οποία δεν ασκείται καμία δύναμη, με αποτέλεσμα, αν κινούνται να κινούνται ευθύγραμμα ομαλά, δεν υπάρχουν. Ένα συνηθισμένο σύστημα που θεωρούμε αδρανειακό είναι η Γη. Η Γη όμως επιταχύνεται, αφού περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο υπό την επίδραση βαρυτικών δυνάμεων. Το ίδιο συμβαίνει και με τον Ήλιο και με το γαλαξία μας. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη να επεκτείνουμε τα συμπεράσματά μας και σε επιταχυνόμενα συστήματα αναφοράς. Να προσαρμόσουμε δηλαδή τις θεωρίες μας ώστε να ισχύουν οι δυο βασικές παραδοχές της σχετικότητας που αναφέρθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου και στα επιταχυνόμενα συστήματα αναφοράς. Αυτό είναι το αντικείμενο της **γενικής θεωρίας της σχετικότητας.**

Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία, που στηρίζεται στις εξισώσεις του Maxwell, δεν παρουσιάζει προβλήματα, είναι συμβατή με τις παραδοχές της σχετικότητας. Εκεί που υπάρχουν προβλήματα είναι η θεωρία του βαρυτικού πεδίου του Newton. Για παράδειγμα σύμφωνα με τη θεωρία του Newton οι βαρυτικές αλληλεπιδράσεις διαδίδονται ακαριαία στο χώρο. Όμως σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας τίποτε δε μπορεί να διαδοθεί με ταχύτητα μεγαλύτερη της ταχύτητας του φωτός.

Η γενική θεωρία της σχετικότητας στηρίζεται στην **ισοδυναμία της βαρυτικής και της αδρανειακής μάζας.**

Έχουμε συναντήσει τη μάζα με δυο όψεις. Τη μάζα δημιουργό και υπόθεμα βαρυτικού πεδίου $\left(F_B = G\dfrac{Mm}{r^2}\right)$ και τη μάζα μέτρο της αδράνειας ενός σώματος $\left(F = ma\right)$. Οι δυο αυτές μάζες είναι ισοδύναμες μεταξύ τους. Η κεντρική ιδέα του Einstein στη γενική θεωρία της σχετικότητας είναι ότι μπορούμε να μελετήσουμε ένα επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς αγνοώντας ότι επιταχύνεται και υποθέτοντας ότι βρίσκεται σ' ένα βαρυτικό πεδίο και αντίστροφα να μελετήσουμε ένα σύστημα που βρίσκεται μέσα σ' ένα βαρυτικό πεδίο αγνοώντας το βαρυτικό πεδίο και υποθέτοντας ότι επιταχύνεται. Όλα αυτά είναι λίγο ασαφή. Ας δούμε το παρακάτω νοητικό πείραμα:



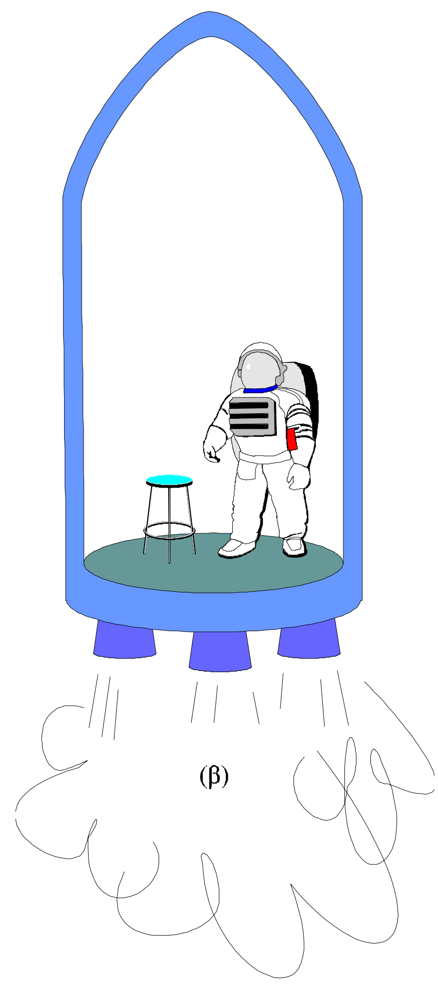
(α)

Ένας άνθρωπος βρίσκεται μέσα σ' ένα διαστημόπλοιο χωρίς παράθυρα. Το διαστημόπλοιο κινείται ισοταχώς μακριά από οποιοδήποτε πεδίο βαρύτητας. Ο άνθρωπος και τα αντικείμενα που βρίσκονται ελεύθερα μέσα στο διαστημόπλοιο δε δέχονται καμία δύναμη, άρα αιωρούνται μέσα σ' αυτό (σχ. 6.16α).

Έστω τώρα ότι το διαστημόπλοιο επιταχύνεται με επιτάχυνση α. Ο άνθρωπος «κολλάει» στο δάπεδο και τα αντικείμενα που αιωρούνται γύρω του πέφτουν, σαν να απέκτησαν ξαφνικά βάρος (σχ. 6.16β). Εάν ο άνθρωπος αγνοεί ότι το διαστημόπλοιο επιταχύνθηκε το πρώτο πράγμα που θα σκεφθεί είναι ότι το διαστημόπλοιο μπήκε σε μια περιοχή όπου υπάρχει πεδίο βαρύτητας. Με απλά πειράματα μάλιστα μπορεί να υπολογίσει την ένταση αυτού του πεδίου βαρύτητας. Θα τη βρει απολύτως ίση με την επιτάχυνση του διαστημοπλοίου.

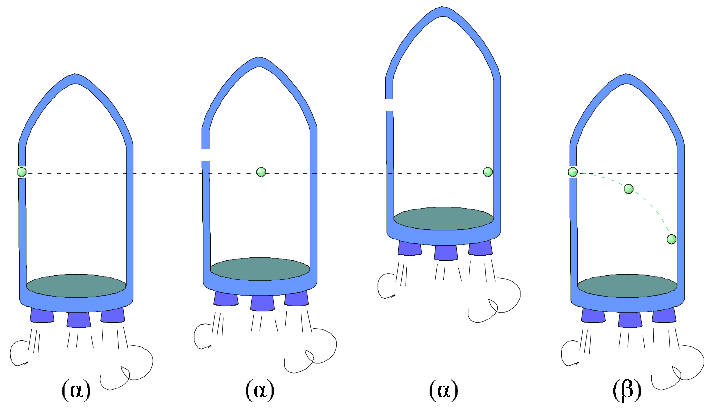
Ας υποθέσουμε τώρα ότι από ένα μικρό άνοιγμα στο πλευρικό τοίχωμα του επιταχυνόμενου διαστημοπλοίου μπαίνει ένα σώμα το οποίο, σύμφωνα με έναν παρατηρητή που βρίσκεται έξω από το διαστημόπλοιο, κινείται ευθύγραμμα ομαλά (σχ. 6.17α).

Το σώμα θα προσκρούσει στο απέναντι τοίχωμα σε μια θέση που δε βρίσκεται ακριβώς απέναντι από το άνοιγμα, αλλά λίγο πιο κάτω. Για τον εξωτερικό παρατηρητή αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό. Αλλά και για τον εσωτερικό παρατηρητή δεν υπάρχει πρόβλημα. Εφόσον έχει υποθέσει ότι βρίσκεται μέσα σε πεδίο βαρύτητας τι πιο φυσιολογικό από το να σκεφτεί ότι το σώμα διαγράφει μια παραβολική τροχιά όπως κάνουν όλα τα σώματα που εκτελούν οριζόντια βολή στην πατρίδα του τη Γη; Μέχρι εδώ λοιπόν ο εσωτερικός παρατηρητής με την υπόθεση ότι βρίσκεται μέσα σε βαρυτικό πεδίο ερμηνεύει όλα τα φαινόμενα, που ο εξωτερικός παρατηρητής αποδίδει στην επιτάχυνση του διαστημόπλοιου.



(β)

Σχ. 6.16

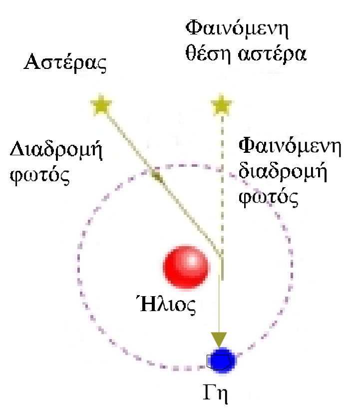


Σχ. 6.17 Στις περιπτώσεις (α) βλέπουμε πώς αντιλαμβάνεται την κίνηση του σώματος ο εξωτερικός παρατηρητής. Στην περίπτωση (β) βλέπουμε πως αντιλαμβάνεται την κίνηση του σώματος ο επιβάτης του διαστημοπλοίου. Τα ίδια ισχύουν και αν αντικαταστήσουμε το σώμα με μια φωτεινή δέσμη.

Από το ίδιο άνοιγμα μπαίνει τώρα μια δέσμη φωτός (σχ. 6.17). Και σ' αυτή την περίπτωση εφόσον το φως ταξιδεύει με πεπερασμένη ταχύτητα, η δέσμη θα συναντήσει το απέναντι τοίχωμα λίγο χαμηλότερα από το ύψος του ανοίγματος. Για τον εξωτερικό παρατηρητή αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό. Ο εσωτερικός παρατηρητής, εάν θέλει να διατηρήσει την υπόθεσή του για το βαρυτικό πεδίο στο οποίο βρίσκεται το διαστημόπλοιο, είναι υποχρεωμένος να πάρει μια γενναία απόφαση για να εξηγήσει την καμπύλωση της δέσμης του φωτός.

Σύμφωνα με τη νευτώνεια θεωρία, το βαρυτικό πεδίο ασκεί δύναμη μόνο σε σώματα που έχουν μάζα. Όμως το φως δεν έχει μάζα. Ο επιβάτης του διαστημόπλοιου πρέπει να εγκαταλείψει τη νευτώνεια θεωρία και να υποθέσει ότι το βαρυτικό του πεδίο μπορεί να καμπυλώσει την τροχιά όχι μόνο ενός σώματος που έχει μάζα αλλά και ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο δυστυχής επιβάτης του διαστημοπλοίου έμπλεξε άσχημα και οδηγείται σε παρανοϊκές σκέψεις γιατί δε γνωρίζει την πολύ απλή αλήθεια ότι το βαρυτικό του πεδίο δεν υπάρχει και ότι το διαστημόπλοιο απλώς επιταχύνεται.



Σχ. 6.18

Το εντυπωσιακό όμως είναι ότι φαινόμενα εκτροπής φωτεινών δεσμών από ισχυρά βαρυτικά πεδία έχουν πια παρατηρηθεί και επιβεβαιωθεί. Κατά τη διάρκεια εκλείψεων του Ηλίου, παρατηρήθηκαν από τους αστρονόμους αστέρες σε θέσεις διαφορετικές από αυτές στις οποίες βρίσκονται στην πραγματικότητα (σχ. 6.18). Το φαινόμενο οφείλεται στην καμπύλωση της τροχιάς του φωτός που εκπέμπουν τα άστρα από το ισχυρό βαρυτικό πεδίο του Ήλιου.

Ο επιβάτης του διαστημοπλοίου μας ανακάλυψε μια φυσική πραγματικότητα, μένοντας απλώς συνεπής στην αρχική του υπόθεση.

Για να είμαστε πιο ακριβείς, τουλάχιστον όσο μας επιτρέπει το επίπεδο αυτού του βιβλίου, πρέπει να πούμε ότι ο Einstein, για να εξηγήσει την εκτροπή του φωτός από την ευθύγραμμη πορεία του, όταν διαδίδεται μέσα σε βαρυτικό πεδίο, δεν απέδωσε στο φως ιδιότητες αντίστοιχες με τις ιδιότητες της μάζας. Υπέθεσε ότι η παρουσία μιας μάζας, που δημιουργεί γύρω της ένα βαρυτικό πεδίο, καμπυλώνει το χωροχρόνο.

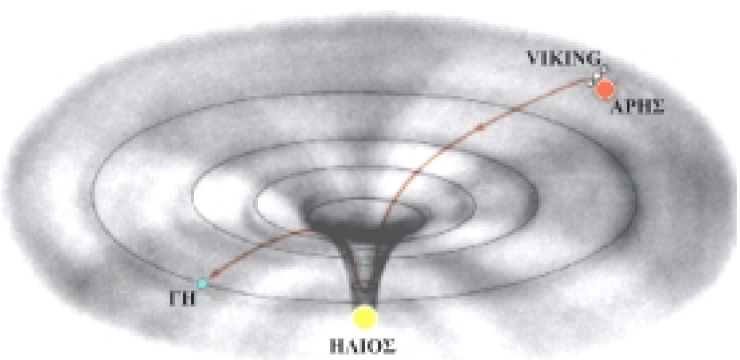
Είναι πολύ δύσκολο να περιγράψει κανείς ποιοτικά έναν καμπυλωμένο χώρο τεσσάρων διαστάσεων. Η δυσκολία προκύπτει από το γεγονός ότι είμαστε όντα που βιωματικά αντιλαμβάνονται χώρους τριών διαστάσεων και επιπλέον από το γεγονός ότι το βασικό μας εργαλείο για την κατανόηση του χώρου, η ευκλείδεια γεωμετρία, δεν ισχύει σε καμπυλωμένους χώρους. Με δυο παραδείγματα θα προσπαθήσουμε να φωτίσουμε λίγο τα πράγματα και θα σταματήσουμε εκεί.

Πάνω σε μια λεία επίπεδη μεμβράνη εκτοξεύουμε οριζόντια ένα σφαιρίδιο πολύ μικρής μάζας. Το σφαιρίδιο, πρακτικά, κάνει ευθύγραμμη ομαλή κίνηση. Στο κέντρο της μεμβράνης τοποθετούμε μια σφαίρα πολύ μεγάλης μάζας. Η επιφάνεια της μεμβράνης παραμορφώνεται (σχ. 6.19).

Σχ. 6.19

Εκτοξεύουμε πάλι ένα πολύ μικρό σφαιρίδιο πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης. Το σφαιρίδιο τώρα προφανώς δεν πρόκειται να κινηθεί ευθύγραμμα. Η τροχιά του θα είναι καμπύλη. Η καμπύλωση της τροχιάς του σφαιριδίου είναι εντονότερη κοντά στη σφαίρα, στο κέντρο της μεμβράνης. Η καμπύλωση αυτή δεν οφείλεται στη βαρυτική έλξη που ασκεί στο σφαιρίδιο η μεγάλη σφαίρα αλλά στην παραμόρφωση που προκάλεσε η μεγάλη σφαίρα στο επίπεδο πάνω στο οποίο κινείται το σφαιρίδιο. Με ανάλογο τρόπο μια πολύ μεγάλη μάζα παραμορφώνει το χωροχρόνο γύρω της στο Σύμπαν.

Για να γίνει αισθητή η καμπύλωση του χωροχρόνου πρέπει η μάζα που την προκαλεί να είναι τεράστια. Για παράδειγμα η καμπύλωση που προκαλεί η Γη δεν είναι καν αισθητή. Τα διαστημικά ταξίδια που γίνονται από τη Γη στη Σελήνη αν και απαιτούν εξαιρετική ακρίβεια υπολογισμών σχεδιάζονται με βάση τη νευτώνεια θεωρία βαρύτητας. Από τα γειτονικά μας ουράνια σώματα μόνο ο Ήλιος έχει αρκετή μάζα για να παραμορφώσει το χωροχρόνο αισθητά (σχ. 6.20).



Σχ. 6.20 Τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα που έστελνε στη Γη το διαστημόπλοιο Viking κατά τη διάρκεια της αποστολής του στον Άρη παρουσίαζαν μια καθυστέρηση στη διάδοσή τους σε σχέση με τον αναμενόμενο χρόνο όταν ο Ήλιος βρισκόταν ανάμεσα στο διαστημόπλοιο και τη Γη.
Η τροχιά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όταν περνούν κοντά από τον Ήλιο καμπυλώνεται με αποτέλεσμα να χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να φτάσουν στη Γη από ότι θα χρειάζονταν αν διαδίδονταν ευθύγραμμα.

Η γενική θεωρία της σχετικότητας είχε αρκετές επιτυχίες μέχρι τώρα. Υπάρχουν όμως ακόμη κάποια αναπάντητα ερωτήματα. Για παράδειγμα δε γνωρίζουμε πώς διαδίδονται οι βαρυτικές επιδράσεις. Ο Einstein υπέθεσε ότι διαδίδονται με βαρυτικά κύματα που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός όπως οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις διαδίδονται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Βαρυτικά κύματα όμως μέχρι τώρα δεν έχουν ανιχνευθεί ίσως γιατί, σύμφωνα και με την πρόβλεψη, είναι εξαιρετικά ασθενή. Αν ποτέ ανιχνευθούν η φυσική θα έχει κάνει ένα πολύ μεγάλο βήμα στην ανάπτυξη μιας ενιαίας θεωρίας για την προέλευση των ηλεκτρομαγνητικών και βαρυτικών δυνάμεων.

ΣΥΝΟΨΗ

Το πείραμα Michelson-Morley έδειξε ότι
η ταχύτητα διάδοσης του φωτός δεν υπακούει στους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου. Είναι η ίδια για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.

Η ειδική θεωρία της σχετικότητας στηρίζεται σε δυο αξιώματα.

1. **Οι νόμοι της φυσικής είναι ίδιοι για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς**.
2. **Η ταχύτητα του φωτός είναι ίδια για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς και είναι ανεξάρτητη από την κίνηση της φωτεινής πηγής.**

Διαστολή χρόνου
Η χρονική διάρκεια ενός φαινομένου εξαρτάται από το σύστημα αναφοράς από το οποίο παρατηρούμε το φαινόμενο. Εάν το φαινόμενο συμβαίνει σ' ένα σύστημα αναφοράς το οποίο κινείται ως προς εμάς με ταχύτητα **u** και, για ένα παρατηρητή ακίνητο στο σύστημα αναφοράς διαρκεί Δt_0, για μας το φαινόμενο θα διαρκεί $\Delta t = \dfrac{\Delta t_0}{\sqrt{1-u^2/\ c^2}}$. Κάθε σύστημα αναφοράς έχει το δικό του **ιδιόχρονο**.

Συστολή μήκους
Το μήκος ενός αντικειμένου εξαρτάται από το σύστημα αναφοράς από το οποίο παρατηρούμε το αντικείμενο. Εάν το αντικείμενο βρίσκεται μέσα σ' ένα σύστημα αναφοράς το οποίο κινείται ως προς εμάς με ταχύτητα **u** και ένας παρατηρητής που βρίσκεται στο σύστημα αναφοράς βρίσκει ότι το μήκος του, στη διεύθυνση της κίνησης του συστήματος, είναι l_0, για μας θα έχει μήκος $l = l_0\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}$.Τα μήκη που είναι κάθετα στη διεύθυνση κίνησης του συστήματος είναι ίδια για τους παρατηρητές των δύο συστημάτων αναφοράς.

Μετασχηματισμοί Lorentz
Εάν γνωρίζουμε τις συντεταγμένες (*x, y, z, t*) ενός γεγονότος σ' ένα σύστημα αναφοράς Σ οι μετασχηματισμοί Lorentz μάς δίνουν τις συντεταγμένες του σ' ένα σύστημα Σ΄ το οποίο κινείται με ταχύτητα **u** ως προς το Σ. Αν η **u** είναι παράλληλη στον άξονα των *x* και τα Σ και Σ΄ ταυτίζονται τη στιγμή *t*=0, οι μετασχηματισμοί Lorentz έχουν την ακόλουθη μορφή

$x' = \dfrac{x-ut}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$	← Από το Σ στο Σ΄	$x = \dfrac{x'+ut'}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$
$y' = y$		$y = y'$
$z' = z$		$z = z'$
$t' = \dfrac{t-ux/c^2}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$	Από το Σ΄ στο Σ →	$t = \dfrac{t'+ux'/c^2}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$

Όταν $u \langle\langle\ c$ οι μετασχηματισμοί Lorentz συμπίπτουν με τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου.

Οι συντεταγμένες του χώρου εξαρτώνται από τις συντεταγμένες του χρόνου και αντίστροφα. Στην ειδική θεωρία της σχετικότητας ο χώρος και ο χρόνος είναι αλληλένδετοι. Μιλάμε πια για **χωροχρόνο**.

Μετασχηματισμοί ταχυτήτων Lorentz

Ένα σώμα που κινείται με ταχύτητα **υ** σε σύστημα αναφοράς Σ παράλληλα στον άξονα των x, ως προς σύστημα αναφοράς Σ΄ που κινείται ως προς το Σ με ταχύτητα **u**, πάλι παράλληλα με τον άξονα των x έχει ταχύτητα

$$\upsilon' = \frac{\upsilon - u}{1 - \frac{u}{c^2}\upsilon} \qquad \text{και αντίστροφα} \qquad \upsilon = \frac{\upsilon' + u}{1 + \frac{u}{c^2}\upsilon'}$$

Αν οι ταχύτητες υ και u είναι πολύ μικρότερες του c τότε ισχύουν οι μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου.
Όταν ένα σώμα κινείται με την ταχύτητα του φωτός η ταχύτητά του είναι η ίδια για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.

Σχετικιστική ορμή

$$\mathbf{p} = \frac{m\boldsymbol{\upsilon}}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}$$

Όταν η ταχύτητα υ είναι πολύ μικρότερη του c θα είναι $\mathbf{p} = m\boldsymbol{\upsilon}$. Η σχετικιστική ορμή είναι γενικά μεγαλύτερη της κλασικής.
Όταν η ταχύτητα του σώματος τείνει στο c, η ορμή του τείνει στο άπειρο.
Το μέγεθος m ταυτίζεται με αυτό που λέμε μάζα στη νευτώνεια μηχανική και εκφράζει και εδώ τις αδρανειακές ιδιότητες του σώματος. Στη σχετικότητα το ονομάζουμε **μάζα ηρεμίας** του σώματος.
Όταν η ταχύτητα του σώματος τείνει στο c η επιτάχυνσή του τείνει στο μηδέν.
Η ταχύτητα του φωτός είναι η μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα στη φύση.

Σχετικιστική ενέργεια

Το ποσό ενέργειας mc^2 που κατέχει ένα σώμα όταν ηρεμεί το ονομάζουμε ενέργεια ηρεμίας του σώματος .

Η **συνολική ενέργεια** ενός σώματος που κινείται με ταχύτητα υ είναι

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}$$

Η **κινητική ενέργεια** ενός σώματος που κινείται με ταχύτητα υ είναι

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}} - mc^2$$

Για $\upsilon \langle\langle\, c$ δίνει $K = \frac{1}{2}m\upsilon^2$

Όταν η ταχύτητα υ τείνει στο c η κινητική ενέργεια τείνει στο άπειρο.

Σχέση ενέργειας ορμής

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$$

Αν η ορμή του σώματος είναι ίση με το μηδέν (το σώμα ηρεμεί) η ενέργειά του θα είναι $E = mc^2$.
Αν η μάζα ηρεμίας του σώματος είναι μηδενική θα ισχύει: $E = pc$.

Στη φύση υπάρχουν σωματίδια μηδενικής μάζας ηρεμίας, όπως το φωτόνιο. Τα σωματίδια αυτά κινούνται με την ταχύτητα του φωτός.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

1. Καμπύλωση χώρου

Καλύψτε με μια τεντωμένη ελαστική μεμβράνη μια μεγάλη λεκάνη. Εκτοξεύστε με μικρή αρχική ταχύτητα ένα μπαλάκι του πινγκ-πονγκ πάνω στη μεμβράνη. Παρατηρήστε την τροχιά του. Τοποθετήστε ένα αντικείμενο στο κέντρο της μεμβράνης και ξαναρίξτε το μπαλάκι του πινγκ-πονγκ. Ξανακάνετε το ίδιο με ένα αντικείμενο μεγαλύτερης μάζας στο κέντρο. Έχετε τώρα μια εικόνα του πώς μια μάζα καμπυλώνει μια επίπεδη επιφάνεια και του πως η καμπύλωση επιδρά στην κίνηση των σωμάτων πάνω στην επιφάνεια.

2. Τελικά δεν ήταν και τόσο δύσκολο….

Μια παράσταση της μορφής $(1+x)^n$ μπορεί να εκφρασθεί ως άθροισμα όρων ως εξής

$$(1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{1\cdot 2}x^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{1\cdot 2\cdot 3}x^3 + ...$$

Με τη βοήθεια της παραπάνω μαθηματικής σχέσης προσπαθήστε να δείξετε ότι η σχέση $K = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}} - mc^2$ για $\upsilon \langle\langle\ c$ δίνει $K = \frac{1}{2}m\upsilon^2$.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

6.1 Ποιο ήταν το συμπέρασμα από το πείραμα των Michelson και Morley, για την ταχύτητα του φωτός;

6.2 Συμπληρώστε τις προτάσεις:
Σύμφωνα με το πρώτο αξίωμα της θεωρίας της σχετικότητας οι νόμοι της φυσικής είναι………………. σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Σύμφωνα με το δεύτερο αξίωμα η ταχύτητα …… …………. είναι ……………..σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.

6.3 Συγκρίνετε τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για μετρήσεις μήκους και χρόνου από παρατηρητές σε συστήματα αναφοράς των οποίων η σχετική ταχύτητα είναι c. Με ποια έννοια, από την άποψη αυτή, το c γίνεται οριακή ταχύτητα;

6.4 Η χρονική διάρκεια ενός φυσικού φαινομένου στο αδρανειακό σύστημα Σ είναι Δt. Η χρονική διάρκεια $\Delta t'$ του ίδιου φαινομένου, όταν αυτό παρατηρείται από το αδρανειακό σύστημα Σ΄ το οποίο κινείται ως προς το πρώτο με ταχύτητα *u* συγκρίσιμη με την ταχύτητα του φωτός, είναι
α) ίση με Δt; β) μεγαλύτερη από Δt; γ) μικρότερη από Δt;
Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

6.5 Ένας παρατηρητής στο αδρανειακό σύστημα Σ διαπιστώνει ότι ένας φάρος ανάβει σε ίσα χρονικά διαστήματα. Θα διαπιστώνει το ίδιο και ένας παρατηρητής που βρίσκεται σε άλλο αδρανειακό σύστημα; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

6.6 Ένα διαστημόπλοιο απομακρύνεται από τη Γη με ταχύτητα που πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός. Ένας παρατηρητής ακίνητος στη Γη, μετράει το μήκος του διαστημόπλοιου. Το ίδιο κάνει και ένας παρατηρητής μέσα στο διαστημόπλοιο. Συμφωνούν τα αποτελέσματα των μετρήσεών τους; Αν όχι, ποιος βρίσκει μεγαλύτερη τιμή για το μήκος;

6.7 Συστολή μήκους είναι το φαινόμενο κατά το οποίο:
- α) Ο παρατηρητής της Γης διαπιστώνει ότι το διαστημόπλοιο που ταξιδεύει έχει μικρότερο μήκος από αυτό που είχε όταν το μέτρησε ακίνητο στη Γη.
- β) Ο αστροναύτης διαπιστώνει ότι στη διάρκεια του ταξιδιού του το διαστημόπλοιο έχει μικρότερο μήκος από αυτό που είχε όταν το μέτρησε ακίνητο στη Γη.

Ποια από τις προτάσεις είναι ορθή;

6.8 Ακίνητος παρατηρητής Α μετράει τις διαστάσεις ενός αντικειμένου ακίνητου ως προς αυτόν και συμπεραίνει ότι πρόκειται για κύβο ακμής d. Ένας δεύτερος παρατηρητής Β, που κινείται με ταχύτητα η οποία πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός, σε διεύθυνση παράλληλη σε μια ακμή του στερεού, θα καταλήξει στο συμπέρασμα ότι :
- α) πρόκειται για κύβο με ακμή d.
- β) πρόκειται για κύβο με ακμή μικρότερη από d.
- γ) πρόκειται για κύβο με ακμή μεγαλύτερη από d.
- δ) οι δύο διαστάσεις του στερεού είναι d αλλά η τρίτη είναι μεγαλύτερη.
- ε) οι δύο διαστάσεις του στερεού είναι d αλλά η τρίτη είναι μικρότερη.

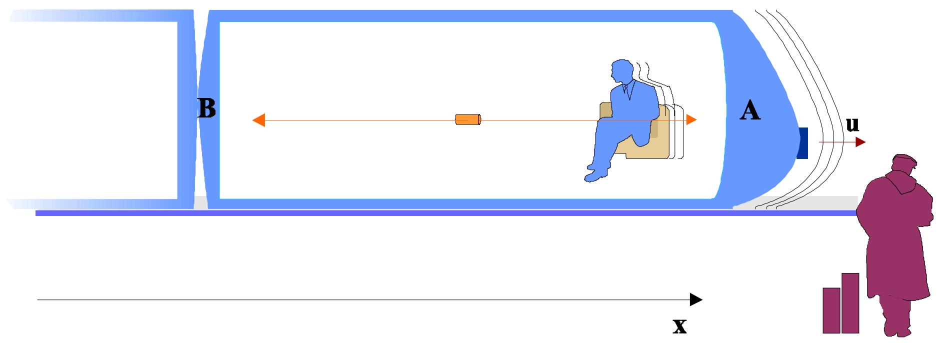
Επιλέξτε το σωστό.

6.9 Εφόσον ο χρόνος ζωής των μιονίων τούς επιτρέπει να διανύσουν περίπου 600 m προτού διασπασθούν, πώς κατορθώνουν να φτάσουν -από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας - στην επιφάνεια της Γης;

6.10 Από διαστημόπλοιο εκτοξεύεται πύραυλος στη διεύθυνση της κίνησής του. Σε ποια περίπτωση η ταχύτητα του πυραύλου για έναν παρατηρητή στη Γη είναι μεγαλύτερη.
- α) Αν το διαστημόπλοιο κινείται ως προς τη Γη;
- β) Αν το διαστημόπλοιο είναι ακίνητο ως προς τη Γη;

6.11 Να απαντήσετε στην προηγούμενη ερώτηση αν αντικαταστήσετε τον πύραυλο με ένα φωτεινό παλμό.

6.12 Υποθέστε ότι ένα βαγόνι κινείται με ταχύτητα *u*, που πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός. Στο μέσον αυτού του βαγονιού παράγονται ταυτόχρονα δύο φωτεινοί παλμοί. Οι παλμοί διαδίδονται κατά τη διεύθυνση *x*, που συμπίπτει με τη διεύθυνση της κίνησης του βαγονιού, σε αντίθετες κατευθύνσεις, και φτάνουν στις δυο απέναντι πλευρές του βαγονιού Α και Β.



Σχ. 6.21

Ποιες από τις προτάσεις που ακολουθούν είναι ορθές;

α) Ένας παρατηρητής που βρίσκεται μέσα στο βαγόνι βρίσκει ότι οι δυο παλμοί φτάνουν ταυτόχρονα στις πλευρές Α και Β του βαγονιού.

β) Ένας παρατηρητής που βρίσκεται μέσα στο βαγόνι βρίσκει ότι ο παλμός που διαδίδεται προς το Β φτάνει πρώτος.

γ) Ένας παρατηρητής ακίνητος στο σταθμό βρίσκει ότι οι δυο παλμοί φτάνουν ταυτόχρονα στις πλευρές Α και Β του βαγονιού.

δ) Ο παρατηρητής που βρίσκεται στο σταθμό βρίσκει ότι ο παλμός που διαδίδεται προς το Α κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτόν που ταξιδεύει προς το Β.

ε) Ο παρατηρητής που βρίσκεται στο σταθμό βρίσκει ότι ο παλμός που διαδίδεται προς το Β φτάνει πρώτος.

6.13 Ένας ακίνητος παρατηρητής βλέπει να περνάει μπροστά του με πολύ μεγάλη ταχύτητα ένα κυκλικό αντικείμενο. Το αντικείμενο κινείται στη διεύθυνση *x* και το επίπεδό του βρίσκεται στο επίπεδο *x, y*. Τι σχήμα έχει το αντικείμενο, για κάποιον που κινείται μαζί με αυτό;

6.14 Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία εξαρτάται από την κίνηση του παρατηρητή. Δώστε ένα απλό παράδειγμα που να επιβεβαιώνει την πρόταση.

6.15 Είναι η ενέργεια μια αναλλοίωτη ποσότητα; Είναι δηλαδή ή ίδια σε όλα τα αδρανειακά συστήματα; Ισχύει σε όλα τα αδρανειακά συστήματα η αρχή διατήρησης της ενέργειας;

6.16 Εφόσον υπάρχει άνω όριο στην ταχύτητα ενός σωματίου θα υπάρχει και άνω όριο στην ορμή και την κινητική του ενέργεια;

6.17 Ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες έχουν τη ίδια ενέργεια. Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι

α) ίση, β) μικρότερη ή γ) μεγαλύτερη από την ενέργεια του πρωτονίου;
Επιλέξτε το σωστό.

6.18 Η ενέργεια συνδέσεως του ατόμου του υδρογόνου είναι $13{,}6\ eV$. Αυτό σημαίνει ότι η μάζα του ατόμου του υδρογόνου είναι :

α) μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών ενός πρωτονίου κι ενός ηλεκτρονίου.

β) μικρότερη από το άθροισμα των μαζών ενός πρωτονίου κι ενός ηλεκτρονίου.

γ) ίση με το άθροισμα των μαζών ενός πρωτονίου κι ενός ηλεκτρονίου.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

6.19 Ένα ορθογώνιο τραπέζι διαστάσεων $10\,m \times 20\ m$ βρίσκεται μέσα σε διαφανές διαστημόπλοιο με τη μεγάλη του πλευρά παράλληλη στη διεύθυνση κίνησης του διαστημόπλοιου. Με τι ταχύτητα πρέπει να περάσει από μπροστά μας το διαστημόπλοιο ώστε το τραπέζι να μας φανεί τετράγωνο;
[Απ : $0{,}87c$]

6.20 Επιβάτης διαστημοπλοίου που ταξιδεύει με ταχύτητα $0{,}99c$ κοιμάται για $5\ \min$, σύμφωνα με το ρολόι του. Πόση ώρα κοιμήθηκε, σύμφωνα με παρατηρητή στη Γη;
[Απ : 35,5 min]

6.21 Ενοικιαστής σχετικιστικού ποδηλάτου επιστρέφει το ποδήλατο μετά από μια ώρα όπως έδειξε το δικό του ρολόι. Στο γραφείο ενοικιάσεων επιμένουν ότι έλειψε δυο ώρες. Ποια ήταν η ταχύτητά του;
[Απ : $\frac{\sqrt{3}}{2}c$]

6.22 Θέλετε να ενοικιάσετε έναν πύραυλο - ταξί που ταξιδεύει με ταχύτητα $0{,}5c$. Η χρέωση γίνεται με την ώρα. Πόσο τοις εκατό ακριβότερη θα είναι μια διαδρομή αν η ώρα του ταξιδιού μετρηθεί με το ρολόι του γραφείου ενοικίασης που εδρεύει στη Γη από ό,τι αν μετρηθεί με το ρολόι του πιλότου - ταξιτζή;
[Απ : 15,5 %]

6.23 Κατά την έκρηξη μιας πυρηνικής βόμβας 10 mg ύλης εξαφανίστηκαν.

Πόση ενέργεια απελευθερώθηκε;

Δίνεται $c=3\times10^{8}$ m/s.

[Απ : 9×10^{11} J]

6.24 Ένα διαστημόπλοιο μάζας 1000 kg πρόκειται να επιταχυνθεί σε ταχύτητα $0{,}5c$. Πόση ενέργεια απαιτείται γι' αυτό;
Δίνεται $c=3\times10^8$ m/s.

[Απ : $1{,}4\times10^{19}\ J$]

6.25 Πόση ενέργεια απαιτείται για να επιταχυνθεί ένα ηλεκτρόνιο
α) από $0{,}5c$ σε $0{,}9c$.
β) από $0{,}9c$ σε $0{,}99c$.
Δίνεται η ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου 0,511 MeV.
[Απ : 0,582 MeV, 2,45 MeV]

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

6.26 Ένα γεγονός συμβαίνει στο αδρανειακό σύστημα Σ σε θέση με συντεταγμένες x=100km, y=10km, z=1km τη χρονική στιγμή t=0,5ms. Ποιες οι συντεταγμένες του γεγονότος (x', y', z', t') για ένα παρατηρητή σε άλλο αδρανειακό σύστημα Σ΄ που κινείται με ταχύτητα –0,8 c ως προς το Σ με διεύθυνση παράλληλη στον κοινό άξονα x; (Τη στιγμή t=0 τα συστήματα ταυτίζονται).
[Απ : x'=367 km, y'=10 km, z'=1 km, t'=1,28 ms]

6.27 Ένα διαστημόπλοιο σε ηρεμία, στη Γη, έχει μήκος 100 m. Ένας παρατηρητής στη Γη μετράει ότι όταν το διαστημόπλοιο κινείται χρειάζεται 4 μs για να περάσει από μπροστά του. Ποια η ταχύτητα του διαστημόπλοιου ως προς τη Γη;
[Απ : 0,083 c]

6.28 Ο πληθυσμός ενός είδους βακτηριδίου διπλασιάζεται κάθε 20 μέρες. Δύο από αυτά τα βακτηρίδια τοποθετούνται σ' ένα διαστημόπλοιο και ταξιδεύουν για 1000 γήινες ημέρες με ταχύτητα 0,995 c ως προς τη Γη. Πόσα βακτηρίδια θα υπάρχουν μέσα στο διαστημόπλοιο όταν επιστρέψει στη Γη; Πόσα θα υπήρχαν αν το διαστημόπλοιο παρέμενε αυτές τις 1000 μέρες στη Γη; Αγνοήστε τις επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις που πρέπει να υποστεί το διαστημόπλοιο στη διάρκεια του ταξιδιού.
[Απ : 64 βακτηρίδια, 2^{51} βακτηρίδια]

6.29 Δύο πύραυλοι Α και Β ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις με ταχύτητες 0,8c και 0,6c, αντίστοιχα, ως προς τη Γη. Ποια η ταχύτητα του πυραύλου Α ως προς το αδρανειακό σύστημα του πυραύλου Β;
[Απ : 0,946 c]

6.30 Για τα πρωτόνια, τα νετρόνια και τους πυρήνες δευτερίου ισχύουν

$m_p=1{,}67261\times10^{-27}$ kg,

$m_n=1{,}67492\times10^{-27}$ kg,

$m_d=3{,}34357\times10^{-27}$ kg.

Πόση ενέργεια θα απελευθερωθεί κατά το σχηματισμό ενός πυρήνα δευτερίου από ένα ελεύθερο πρωτόνιο και ένα ελεύθερο νετρόνιο;
Δίνονται $c=3\times10^8$ m/s, 1 eV $=1{,}6\times10^{-19}$ J.
[Απ : 2,22 MeV]

6.31 Μια δέσμη ραδιενεργών σωματιδίων παρατηρείται καθώς διασχίζει το εργαστήριο. Βρέθηκε ότι κάθε σωματίδιο «ζει» κατά μέσο όρο για ένα χρονικό διάστημα 20ns. Όταν βρίσκονται σε ηρεμία στο εργαστήριο τα ίδια σωματίδια, ζουν κατά μέσο όρο 7,5ns. Ποια είναι η ταχύτητα των σωματιδίων της δέσμης;
Δίνεται $c=3\times10^8$ m/s.

[Απ : $2{,}78\times10^8$ m/s]

ΕΝΘΕΤΟ

Ο EINSTEIN ΚΑΙ ΟΙ ΘΕΩΡΙΕΣ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Ο Albert Einstein γεννήθηκε στο Ουλμ της Γερμανίας το 1879 από Γερμανοεβραίους γονείς. Ο πατέρας του ήταν μάλλον αποτυχημένος μικροβιομήχανος με αρκετά φιλελεύθερες, για την εποχή του, απόψεις. Ως τα δεκαπέντε χρόνια του ο Einstein παρακολούθησε μαθήματα στη γενέτειρά του. Από μικρός έδειξε κλίση στα μαθηματικά και τη φυσική.

Το 1894 η οικογένειά του μετανάστευσε, για οικονομικούς λόγους, στην Ιταλία όπου την ακολούθησε για λίγο και ο νεαρός Albert. Δεκάξι χρόνων πήγε στην Ελβετία για να συμπληρώσει τις σπουδές του. Ύστερα από ένα προπαρασκευαστικό έτος στη σχολή του Ααράου, μπήκε στο Πολυτεχνείο της Ζυρίχης, από όπου πήρε το δίπλωμά του το 1900. Για ένα διάστημα δίδαξε σε κατώτερα σχολεία και, το 1902, αφού απόκτησε στο μεταξύ την ελβετική ιθαγένεια προσλήφθηκε στο Ομοσπονδιακό Γραφείο Ευρεσιτεχνιών της Βέρνης. Την ίδια εποχή ο Einstein παντρεύτηκε με τη Μιλέβα Μάριτς, μια Ουγκαρέζα συμφοιτήτριά του. Απέκτησαν δυο γιους, ένας από τους οποίους έγινε διαπρεπής καθηγητής Μηχανολογίας στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας.

Η περίοδος που εργάστηκε στο γραφείο ευρεσιτεχνιών της Βέρνης υπήρξε ίσως η πιο γόνιμη για την επιστημονική δραστηριότητα του Einstein και το 1905 είδε να ωριμάζουν οι καρποί των σκέψεων που έκανε από καιρό. Πραγματικά, εκείνο το χρόνο το περιοδικό Annalen der Physik δημοσίευσε θεμελιώδη άρθρα του νεαρού επιστήμονα. Το πρώτο άρθρο περιείχε τη διατύπωση της κβαντικής θεωρίας του φωτοηλεκτρικού φαινομένου – αξίζει να αναφερθεί ότι επίσημα το βραβείο Νόμπελ του 1921 απονεμήθηκε στον Einstein ακριβώς γι' αυτή την εργασία του – και το δεύτερο, με τον ελάχιστα ηχηρό τίτλο *Περί της ηλεκτροδυναμικής των εν κινήσει σωμάτων*, ήταν η πρώτη ανακοίνωση για τις αρχές της θεωρίας της ειδικής σχετικότητας.

Τον ίδιο χρόνο ανέλαβε ένα αξίωμα στο Πανεπιστήμιο της Ζυρίχης, από όπου το 1910 πήγε στην Πράγα, που τότε βρισκόταν κάτω από αυστροουγγρική κυριαρχία. Το 1912 ξαναγύρισε στη Ζυρίχη ως καθηγητής στο Πολυτεχνείο και έμεινε στη θέση αυτή ως το 1914, οπότε, ύστερα από μεσολάβηση του Max Planck πήγε στο Βερολίνο. Εκεί παρέμεινε είκοσι σχεδόν χρόνια, κάτοχος της έδρας της φυσικής στην Πρωσική Ακαδημία Επιστημών και διάδοχος (1914) του Van' t Hoff στη διεύθυνση του Ινστιτούτου Φυσικής "Kaiser Wilchelm". Στο Βερολίνο ο Einstein πήρε διαζύγιο από την πρώτη του σύζυγο και παντρεύτηκε την εξαδέλφη του Έλσα, που στάθηκε η πιστή σύντροφος της ζωής του.

Στα μετά το 1905 χρόνια, παρόλο που οι μελέτες του στρέφονταν κατά πρώτο και κύριο λόγο στην ανάπτυξη της θεωρίας της σχετικότητας ασχολήθηκε και με άλλους τομείς της θεωρητικής φυσικής : το 1906 έδωσε την κλασική διατύπωση της θεωρίας της κίνησης Brown και το 1907 διατύπωσε την κβαντική θεωρία των ειδικών θερμοτήτων, θέματα που τον απασχόλησαν και στα επόμενα χρόνια.

Η σπουδαιότητα αυτών των εργασιών είναι τόση ώστε να δικαιολογείται η κρίση πολλών φυσικών, κατά τους οποίους και αν ακόμη ο Einstein δεν είχε γράψει ούτε μια γραμμή για τη θεωρία της σχετικότητας, οι άλλες του

© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

εργασίες θα έφταναν για να του εξασφαλίσουν μια σπουδαιότατη θέση στην ιστορία της φυσικής.

Στη γενίκευση της θεωρίας της σχετικότητας και στη σχέση μεταξύ των φαινομένων της βαρύτητας και των επιταχυνόμενων κινήσεων ο Einstein αφιέρωσε μεγάλο μέρος της δραστηριότητάς του στη Ζυρίχη, την Πράγα και το Βερολίνο, αντλώντας από τις θεμελιώδεις υποθέσεις ποσοτικά συμπεράσματα που θα μπορούσαν να επαληθευθούν πειραματικά : διακήρυξε ότι οι φωτεινές ακτίνες των αστέρων καμπυλώνονται καθώς περνούν κοντά από τον Ήλιο (1911), έδωσε μια ερμηνεία ορισμένων ανωμαλιών της κίνησης του Ερμή που δε μπορούσαν να εξηγηθούν μέσα στα πλαίσια της νευτώνειας μηχανικής (1915), εξήγησε θεωρητικά τη μετακίνηση προς το ερυθρό των γραμμών του φάσματος. Καρπός σκέψεων δέκα χρόνων και περισσότερο, υπήρξε η δημοσίευση (1916) της θεωρίας της γενικής σχετικότητας. Αυτό ήταν το έργο που ο ίδιος ο Einstein θεωρούσε ως τη σπουδαιότερη συμβολή του στην επιστημονική σκέψη. Σε διάφορες ευκαιρίες είπε πως η θεωρία της ειδικής σχετικότητας θα είχε διατυπωθεί και δίχως αυτόν, γιατί βρισκόταν ήδη διάχυτη στον επιστημονικό κόσμο. Όμως εξαιτίας της έλλειψης εντυπωσιακών πειραμάτων θα ήταν πολύ δυσκολότερο να είχε σκεφτεί κάποιος να επανεξετάσει τη θεωρία της βαρύτητας, που φαινόταν οριστικά συστηματοποιημένη από τον Newton. Για να γίνει αυτό χρειαζόταν η εξαιρετική πνευματική διορατικότητα του Einstein και η μεγάλη αδέσμευτη κρίση του. Το έργο που απασχόλησε ιδιαίτερα το μυαλό του Einstein σχεδόν 30 χρόνια, ήταν η προσπάθειά του να επεξεργασθεί μια ενιαία γενική θεωρία, που θα ενοποιούσε τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και του πεδίου βαρύτητας. Παρόλο που η προσπάθεια αυτή θεωρητικής επεξεργασίας δεν κατάληξε σε οριστικά αποτελέσματα, παραμένει πάντα ένα από τα υψηλότερα σημεία στα οποία έφτασε η επιστημονική σκέψη όλων των εποχών.

Η εργασία του στο πρόβλημα που τον ενδιέφερε με πάθος και που απορρόφησε σχεδόν ολοκληρωτικά τη δραστηριότητά του στα τελευταία χρόνια της ζωής του, δεν εμπόδισε τον Einstein να παρεμβαίνει ενεργά στις συζητήσεις για τα θεμελιώδη ζητήματα της σύγχρονης φυσικής, με ιδέες μεγάλης αξίας. Παράλληλα με τις επιστημονικές του έρευνες, ανάπτυξε σημαντική δράση στον τομέα της ιστορίας της επιστήμης, και στο πεδίο των φιλοσοφικών συζητήσεων για τα θεμέλια της επιστήμης .

Όταν αναγκάστηκε, λόγω των αντισημιτικών φυλετικών διώξεων των ναζιστών, να εγκαταλείψει τη Γερμανία (1932), ο Einstein εγκαταστάθηκε αρχικά στο Βέλγιο και αργότερα στις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου έγινε καθηγητής στο Ινστιτούτο Ανωτέρων Σπουδών του Princeton. Το 1936 είχε την ατυχία να χάσει τη σύζυγό του, που είχε σταθεί γι' αυτόν πραγματική σύντροφος της ζωής του. Το 1940 έλαβε την αμερικανική υπηκοότητα.

Άνθρωπος απλός και βαθύτατα ευγενικός, περιφρονούσε κάθε εξωτερική επίδειξη και δημοσιότητα. Οι αρετές αυτές έπαιξαν σημαντικό ρόλο στο να αποκτήσει τη συμπάθεια του μεγάλου κοινού. Ψυχή εξαιρετικά ευαίσθητη έτρεφε μεγάλη αγάπη για την καλή μουσική και ήταν ο ίδιος εξαίρετος καλλιτέχνης του βιολιού.

© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

Η επίδραση του έργου του Einstein στο φιλοσοφικό στοχασμό ήταν και είναι μεγάλη. Η ριζική τροποποίηση των εννοιών του χώρου και του χρόνου, που εισήγαγε η θεωρία της σχετικότητας είχε τεράστιας σημασίας φιλοσοφικά επακόλουθα. Η εξάλειψη από το πεδίο της φυσικής των εννοιών του απόλυτου χώρου και του απόλυτου χρόνου, αποτέλεσε αληθινή επανάσταση στην επιστημονική σκέψη. Για να φτάσει κανείς σε μια τόσο επαναστατική άποψη χρειαζόταν εξαιρετική ελευθερία σκέψης η οποία θα επέτρεπε να ανατραπούν έννοιες που αποτελούσαν τους ακρογωνιαίους λίθους της φυσικής για δυο αιώνες.

Ο Einstein, μέχρι το τέλος της ζωής του επιδίωξε το ιδανικό της κλασικής φυσικής, σύμφωνα με το οποίο για κάθε φαινόμενο μπορεί να προσδιορισθεί μια σαφής σχέση αιτίου – αποτελέσματος. Τη θέση αυτή απορρίπτει σήμερα το μεγαλύτερο μέρος των σύγχρονων φυσικών οι οποίοι βασιζόμενοι στις αρχές της κβαντικής θεωρίας θεωρούν ότι τα φαινόμενα που εκτυλίσσονται σε ατομική κλίμακα είναι αδύνατον να προσδιορισθούν με απόλυτο τρόπο. Οι δρόμοι που ακολούθησε η κβαντική θεωρία βρήκαν αντίθετο τον Einstein που, αν και θεμελιωτής της, προτίμησε να απομονωθεί από την υπόλοιπη επιστημονική κοινότητα και να εργαστεί μόνος του στις τελευταίες δεκαετίες της ζωής του.

Πλούσια ήταν και η πολιτική και κοινωνική δράση του Einstein. Το 1914 αρνήθηκε να υπογράψει μια διακήρυξη Γερμανών διανοούμενων που δικαιολογούσε τη γερμανική επίθεση εναντίον του Βελγίου. Αγωνίστηκε για την προστασία των Εβραίων και για να τους ξαναδοθεί μια πατρίδα στην Παλαιστίνη. Του προσφέρθηκε η θέση του πρώτου προέδρου του κράτους του Ισραήλ αλλά την αρνήθηκε. Το 1939 του ζητήθηκε να υποστηρίξει το σχέδιο ανάπτυξης της ατομικής βόμβας από τις Ηνωμένες Πολιτείες. Το δίλημμα ήταν μεγάλο. Ο Einstein ήξερε ότι η χιτλερική Γερμανία ήδη είχε ξεκινήσει ένα ανάλογο πρόγραμμα. Τελικά με μια ιστορική του επιστολή στον πρόεδρο Roosevelt τάχθηκε υπέρ του σχεδίου. Την τελευταία δεκαετία της ζωής του, μετά την ατομική καταστροφή της Χιροσίμα και του Ναγκασάκι (1945), την αφιέρωσε στην εκστρατεία για την ειρηνική χρήση της ατομικής ενέργειας. Πέθανε στο Princeton το 1955.

© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

ΤΟ ΠΑΡΑΔΟΞΟ ΤΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ

ΕΝΘΕΤΟ

Δύο δίδυμα αδέλφια, ο Γιώργος και ο Θανάσης, έχουν πολύ διαφορετικούς χαρακτήρες. Ο Γιώργος είναι πολύ ανήσυχο πνεύμα και ψάχνει συνέχεια για καινούριες εμπειρίες. Ο Θανάσης είναι ένας ήσυχος άνθρωπος. Όταν τα δύο αδέλφια βρίσκονται σε ηλικία είκοσι χρόνων ο Γιώργος παίρνει τη μεγάλη απόφαση να ταξιδέψει σ' ένα μακρινό αστέρι που απέχει από τη Γη 30 έτη φωτός. Το διαστημόπλοιό του μπορεί να ταξιδεύει με ταχύτητα που πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός.

Όταν ο Γιώργος φτάνει στον προορισμό του διαπιστώνει ότι κανένα μέρος δεν του αρέσει τόσο όσο η πατρίδα του η Γη και αποφασίζει να επιστρέψει. Όμως, όταν επιστρέφει στη Γη τριάντα χρονών ... πλούσιος σε εμπειρίες και πιο ώριμος τον περιμένει μια έκπληξη. Τα πράγματα έχουν αλλάξει πολύ και ο αδελφός του ο Θανάσης είναι γέρος ογδόντα χρονών!

Μια βιαστική προσέγγιση θα απέδιδε τη διαφορά στην ηλικία των δύο αδελφών στην επιβράδυνση των βιολογικών λειτουργιών του Γιώργου επειδή ταξίδεψε για μεγάλο διάστημα σε σχέση με το Θανάση με ταχύτητα κοντά στην ταχύτητα του φωτός.

Θα μπορούσε όμως κανείς εύλογα να αναρωτηθεί γιατί να θεωρήσουμε τον Γιώργο να ταξιδεύει ως προς το Θανάση κι όχι το Θανάση ως προς το Γιώργο. Ανάμεσα σε δυο αδρανειακά συστήματα που κινούνται το ένα ως προς το άλλο έχουμε πάντα την ευχέρεια να θεωρούμε το ένα ακίνητο και το άλλο κινούμενο ως προς το πρώτο και αντίστροφα.

Γιατί λοιπόν να μην είναι ο Γιώργος που γέρασε περισσότερο από τον Θανάση; Εδώ βρίσκεται το παράδοξο.

Το σύστημα διαστημόπλοιο - Γη δεν παρουσιάζει συμμετρία. Αν η Γη είναι αδρανειακό σύστημα το διαστημόπλοιο δεν είναι αδρανειακό σύστημα σ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού. Για να φτάσει την ταχύτητα του φωτός πρέπει να επιταχύνθηκε για κάποιο χρονικό διάστημα. Επίσης φτάνοντας στον προορισμό του, για να επιστρέψει στη Γη, χρειάστηκε να αλλάξει κατεύθυνση δηλαδή να μεταβάλλει και πάλι την ταχύτητά του. Τέλος για να προσγειωθεί στη Γη πρέπει να επιβραδύνθηκε για κάποιο χρονικό διάστημα.

Δεν μπορούμε λοιπόν να εφαρμόσουμε πιστά στο πρόβλημα των διδύμων αυτά που μάθαμε για την ειδική θεωρία της σχετικότητας.

Υπενθυμίζεται ότι τα συμπεράσματα της ειδικής θεωρίας ισχύουν μόνο για αδρανειακά συστήματα και ότι ισχύει για ένα σύστημα Σ΄ ως προς ένα άλλο σύστημα Σ ισχύει και αντίστροφα για το Σ ως προς το Σ΄.