

Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΟΣ

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, η ενέργεια κλπ.

Ένα από τα φυσικά μεγέθη για τα οποία η αντίληψή μας άλλαξε με την εισαγωγή της θεωρίας της σχετικότητας ήταν και η ταχύτητα του φωτός.

Σύμφωνα με τα νέα δεδομένα **η ταχύτητα του φωτός έχει την ίδια τιμή σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς¹ και είναι ανεξάρτητη από την κίνηση της φωτεινής πηγής ή του παρατηρητή.**

Ας δούμε τώρα γιατί δεν γίνεται να κινηθεί κάποιο σώμα με μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή του φωτός και γιατί η ταχύτητα αυτή (**$c=299.792.453$ m/sec**) είναι το ανώτατο όριο των ταχυτήτων.

Η σχετικιστική εξίσωση για τη διατήρηση της ορμής δίδεται από τη σχέση:²

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

όπου:

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

Η σχέση αυτή προέκυψε από την κλασική σχέση **$p=m \cdot u$** με τη βοήθεια του **μετασχηματισμού Lorentz³** και ικανοποιεί τις παρακάτω συνθήκες:

α. Η ολική σχετικιστική ορμή ενός απομονωμένου συστήματος σωμάτων διατηρείται σε όλα τα συστήματα αναφοράς.

β. Η σχετικιστική ορμή προσεγγίζει την κλασική τιμή $m \cdot u$ όταν η ταχύτητα u παίρνει μικρές σχετικά με την ταχύτητα του φωτός τιμές, δηλαδή όταν $u \ll c$.

Μπορούμε να ερμηνεύσουμε την παραπάνω σχετικιστική εξίσωση της ορμής ως το γινόμενο της **σχετικιστικής μάζας (γm)** και της ταχύτητας u του σωματιδίου (αντικειμένου). Χρησιμοποιώντας αυτή την περιγραφή παρατηρούμε ότι: **ο παράγοντας γ αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας u .**

¹ **Αδρανειακό Σύστημα Αναφοράς** ορίζεται ως το σύστημα στο οποίο ένα σώμα δεν παρουσιάζει επιτάχυνση. Κάθε σύστημα που κινείται με σταθερή ταχύτητα σε σχέση με ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς είναι κι αυτό αδρανειακό.

² Η απόδειξη αυτής της σχέσεως δεν κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί.

³ Αναπτύχθηκε στα 1890 από τον Ολλανδό φυσικό H.A. Lorentz προκειμένου να «διασώσει» την Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell που δεν υπάκουε στον μετασχηματισμό Γαλιλαίου.

Σύμφωνα με τις κλασικές αντιλήψεις μας για τον χώρο και τον χρόνο, για να μετασχηματίσουμε τις συντεταγμένες ενός συστήματος αναφοράς $S(x,y,z,t)$ σε ένα κινούμενο προς αυτό με σταθερή ταχύτητα u σύστημα $S'(x', y', z', t')$ θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις μετασχηματισμού του Γαλιλαίου, σύμφωνα με τις οποίες $x'=x-ut$, $y'=y$, $z'=z$, $t'=t$. Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της Θεωρίας της Σχετικότητας ο Einstein χρησιμοποίησε, για να μετασχηματίσει τις εν λόγω συντεταγμένες, τις εξισώσεις

μετασχηματισμού Lorentz σύμφωνα με τις οποίες: $x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = \frac{t - \frac{u}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$.

Μπορούμε λοιπόν να ισχυριστούμε ότι **η κινούμενη μάζα του αντικειμένου αυξάνεται σε συνάρτηση με την ταχύτητα**, σύμφωνα με τη σχέση:

$$m' = \gamma \cdot m = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

όπου:

η σχετικιστική μάζα (m') ονομάζεται η μάζα ενός αντικειμένου το οποίο κινείται με ταχύτητα u σε σχέση με τον παρατηρητή.

η μάζα ηρεμίας (m) είναι η μάζα του αντικειμένου, όπως αυτή μετράται από τον ακίνητο παρατηρητή.

Το συμπέρασμα αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι, εκτός από το ότι αφήνει πίσω την αντίληψή μας για το αμετάβλητο της μάζας, οδήγησε τον *Einstein* στο **ανυπέρβλητο της ταχύτητας του φωτός**. Συγκεκριμένα:

Η σχετικιστική δύναμη F που επιδρά σε ένα αντικείμενο του οποίου η ορμή είναι p , ορίζεται από την έκφραση:

$$F = \frac{dp}{dt}$$

η οποία είναι ίδια με την κλασσική διατύπωση του 2^{ου} Νόμου του Νεύτωνα, η οποία δηλώνει ότι, **η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της ορμής του σώματος**.

Αν θεωρήσουμε ότι στο αντικείμενο ασκείται **σταθερή δύναμη F** τότε η σχέση που δίνει τη δύναμη αυτή θα γράφεται:

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{dp}{du} \cdot \frac{du}{dt}$$

ή ισοδύναμα:

$$F = \frac{d \left(\frac{m \cdot u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \right)}{du} \cdot \frac{du}{dt}$$

Όμως πιο πάνω είδαμε ότι, ο παράγοντας $\frac{m}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$, που εκφράζει τη

σχετικιστική μάζα, αυξάνει σε συνάρτηση με την ταχύτητα u , αυτό σημαίνει ότι ο παράγοντας $\alpha(t) = \frac{du}{dt}$ θα ελαττούται (διότι η δύναμη που ασκείται είναι σταθερή, άρα και το γινόμενο των δύο παραγόντων θα πρέπει να παραμένει σταθερό).

Ο παράγοντας $\alpha(t) = \frac{du}{dt}$, όμως, εκφράζει την επιτάχυνση του σώματος.

Αυτό σημαίνει ότι: όσο η ταχύτητα u αυξάνει, προσεγγίζοντας την ταχύτητα του φωτός c , τόσο η επιτάχυνση που προκαλείται από την πεπερασμένη σταθερή δύναμη θα μειώνεται, προσεγγίζοντας το μηδέν.

Με άλλα λόγια **είναι αδύνατον ένα αντικείμενο (σωματίδιο), όταν αποκτήσει την ταχύτητα του φωτός, να επιταχυνθεί περαιτέρω!!!**

Αυτό συμβαίνει διότι όταν η ταχύτητα του σώματος (σωματιδίου) πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός, τότε η σχετικιστική του μάζα γίνεται σχεδόν άπειρη,

όπως φαίνεται από τον τύπο $m' = \gamma \cdot m = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$, και δεν είναι εύκολο να

αυξηθεί περαιτέρω η ταχύτητά του.

Όταν δε η ταχύτητα του σώματος (σωματιδίου) είναι η ταχύτητα του φωτός, τότε η σχετικιστική του μάζα γίνεται άπειρη με αποτέλεσμα, όσο μεγάλη δύναμη και να επιδράσει πάνω του να μην καταφέρνει να το επιταχύνει και η ταχύτητά του να παραμένει καθηλωμένη στην ταχύτητα του φωτός.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ταχύτητα του φωτός c είναι το ανώτατο όριο των ταχυτήτων και κανένα υλικό σώμα δεν μπορεί να υπερβεί αυτό το όριο.

Παράδειγμα

Για να κάνουμε περισσότερο κατανοητά τα παραπάνω θα δώσουμε ένα παράδειγμα από τον χώρο του αθλητισμού.

Έστω ένας αθλητής του στίβου ο οποίος έχει τη δυνατότητα να τρέχει πολύ γρήγορα, σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός. Ας του ζητήσουμε να δέσει στη μέση του και να τραβήξει ένα μικρό αυτοκινητάκι του οποίου η μάζα δεν ξεπερνά τα 10 γραμμάρια.

Του φαίνεται εύκολο και ξεκινάει βολίδα, τραβώντας πίσω του το μικρό αυτοκινητάκι. Ωπ! φθάνει τα 10 m/sec (αυτός είναι ένας καλός χρόνος του αθλήματος των 100 μέτρων στους Ολυμπιακούς Αγώνες)

Μετά από λίγο φθάνει στα 100 m/sec.

Μετά στα 300 m/sec, και λίγο πιο κάτω: ...μπαμ! σπάει το φράγμα του ήχου!

Στη συνέχεια (για να μην χρονοτριβούμε), με μια «τούρμπο» εκτίναξη φθάνει τα 200.000 km/sec!!! Εδώ όμως κάτι δεν πάει καλά. Το αυτοκινητάκι μοιάζει να είναι λίγο πιο βαρύ! (αν μπορούσαμε εκείνη τη στιγμή να μετρήσουμε τη μάζα του θα το βρίσκαμε 13,4 γραμμάρια- 3,4 γραμμάρια βαρύτερο!!!) Περίεργο γιατί τίποτε δεν έχει προστεθεί στην άκρη του σχοινιού!

Το αγνοεί και συνεχίζει, αλλά τα πράγματα γίνονται όλο και χειρότερα. Φθάνει στα 299.750 km/sec, το αυτοκινητάκι τώρα ζυγίζει 590 γραμμάρια!

Στα 299.780 km/sec ζυγίζει 1κιλό!, ενώ στα 299.790 km/sec το αυτοκινητάκι έχει φτάσει τους 2,2 τόνους!!!

Όταν φθάνει τα 299.792 km/sec εγκαταλείπει! Δεν μπορεί άλλο γιατί η μάζα του αυτοκινήτου που τραβάει μοιάζει απεριόριστη!!! Κι όμως λίγο ακόμα και θα έφθανε τα 299.792,458 km/sec, θα έφθανε την ταχύτητα του φωτός, αλλά αδύνατον να συνεχίσει!

-Τι ήταν αυτό που εμπόδισε τον αθλητή μας να κάνει **πανσυμπαντικό ρεκόρ**;
 -Τι ήταν αυτό που έκανε το μικρό αυτοκινητάκι να αυξάνει τη μάζα του; και μάλιστα η αύξηση αυτή να γίνεται *τόσο ραγδαία στα τελευταία λίγα km/sec* της αύξησης της ταχύτητας;

Η απάντηση κρύβεται στους δύο τύπους:⁴

$$W = K = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - m \cdot c^2 \quad \text{και} \quad m' = \gamma \cdot m = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Ο αθλητής για να μπορέσει να επιταχύνει μετά τα $u=299.792$ km/sec έπρεπε να παράξει έργο που δίδεται από την πρώτη εξίσωση, αν στη θέση του u βάλουμε την τιμή 299.792 και στη θέση του c την τιμή 299.792,458. Αντιλαμβάνεται κανείς ότι το κλάσμα u^2/c^2 πλησιάζει ασφυκτικά στον αριθμό 1, με αποτέλεσμα να μηδενίζει τον παρονομαστή και να απειρίζεται την ποσότητα του έργου που θα πρέπει να δαπανήσει ο αθλητής για να αυξήσει περαιτέρω την κινητική ενέργεια (δηλαδή την ταχύτητα του συσσωματώματος αθλητή-αυτοκίνητο).

Το ίδιο συμβαίνει και με τη μάζα του μικρού αυτοκινήτου. Σε μικρές ταχύτητες το κλάσμα u^2/c^2 δε μηδενίζει τον παρονομαστή στη δεύτερη εξίσωση της σχετικιστικής μάζας. Όσο όμως πιο κοντά πλησιάζει στην ταχύτητα του φωτός τόσο προς το μηδέν τείνει ο παρονομαστής και τόσο προς το άπειρο τείνει να γίνει η μάζα του αυτοκινήτου. Γι' αυτό αδυνατεί ο αθλητής να συνεχίσει να τραβάει το αυτοκίνητο σε ταχύτητες πολύ κοντά αυτής του φωτός.

Η ταχύτητα του φωτός είναι γι' αυτόν το «μοιραίο» όριο! Δεν θα το φθάσει ποτέ! Η μόνη λύση θα ήταν να ταξιδέψει όσο το δυνατόν ανάλαφρος (με λιγότερη μάζα, **όπως το φωτόνιο**, το σωματίδιο που μεταφέρει το φως) ώστε να μπορεί να πλησιάσει στην ταχύτητα του φωτός. Εκεί όμως είναι θα σταματήσει!

Τίποτε δεν μπορεί να υπερβεί την ταχύτητα του φωτός, ούτε το ίδιο το φως!!!

Ιωάννης Χρ. Αγαπάκης

⁴ Η απόδειξη της σχέσεως $W = K = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - m \cdot c^2$

δεν κρίνεται σκόπιμη στο συγκεκριμένο σημείο