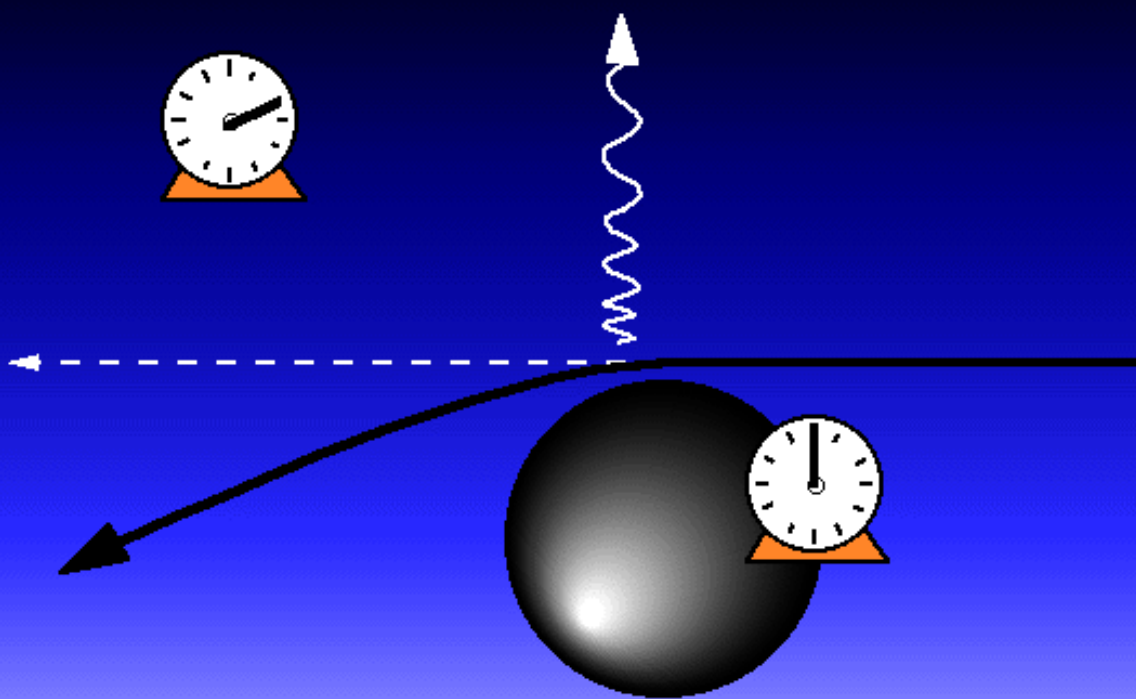


# Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

ΧΑΤΖΗΩΑΝΝΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

# General Relativity



***Gravity & Electromagnetism are Coupled***

CD-94-63499

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	σελ.3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	σελ.4
Η Αρχή της Σχετικότητας του Γαλιλαίου για το Ανναλοίωτο.....	σελ.5
Αδρανειακά Και Μη Συστήματα Αναφοράς.....	σελ.7
Αδρανειακές Δυνάμεις Και Δυνάμεις Βαρύτητας.....	σελ.7
Ειδική Θεωρία Της Σχετικότητας του Α.Einstein.....	σελ.9
Ειδική Σχετικότητα και Μηχανική.....	σελ.15
Η Ειδική Σχετικότητα στη δομή του χωροχρόνου.....	σελ.17
Περισσότερη Σχετικότης.....	σελ.19
Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας του Α.Einstein.....	σελ.20
Η Αρχή της Ισοδυναμίας.....	σελ.22
Βαρυτικό πεδίο και χρόνος.....	σελ.24
Καμπυλότητα Χωροχρόνου.....	σελ.25
Μαύρες Τρύπες.....	σελ.27
Κενό και Ύλη.....	σελ.30
Η Δομή του Διαστήματος σύμφωνα με τη θεωρία της Γενικής Σχετικότητας..	σελ.32
GPS(Global Positioning System).....	σελ.33
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	σελ.35

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία που ακολουθεί κάνει αναφορά στην Θεωρία της Σχετικότητας η οποία αρχικά συνδέθηκε με τον Γαλιλαίο, αλλά στη συνέχεια ολοκληρώθηκε κυρίως με τον Αϊνστάιν, ο τρόπος σκέψης του οποίου σφράγισε τελικά την παγκόσμια ιστορία του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Στην παρακάτω εργασία στο μέρος που αφορά τον Γαλιλαίο γίνεται αναφορά στα Αδρανειακά και Μη Συστήματα Αναφοράς καθώς και στις Αδρανειακές Δυνάμεις και Δυνάμεις Βαρύτητας. Στη συνέχεια αναπτύσσεται η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας όπως αυτή διατυπώθηκε από τον Αϊνστάιν και η οποία συμπληρώνει τους νόμους κίνησης του Νεύτωνα, ώστε να ισχύουν οι νόμοι αυτοί και σε ταχύτητες συγκρίσιμες με την ταχύτητα του φωτός. Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας προκύπτει από την ικανοποίηση της Γενικευμένης Αρχής της Σχετικότητας και της Αρχής του Αϊνστάιν. Τα κεφάλαια Ειδική Σχετικότητα και Μηχανική, Ειδική Σχετικότητα στη Δομή του Χωροχρόνου και Περισσότερη Σχετικότητας αποτελούν αντικείμενο μελέτης και ανάλυσης της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας. Εν κατακλείδι, γίνεται ιδιαίτερη μνεία στην Γενική Θεωρία της Σχετικότητας του Αϊνστάιν, η οποία είναι η θεωρία της βαρύτητας που περιγράφει τη βαρυτική δύναμη μέσω των καμπυλώσεων του χωροχρόνου παρουσία μάζας. Βασική αρχή της θεωρίας είναι η ισοδυναμία των επιταχυνόμενων συστημάτων αναφοράς με συστήματα που ευρίσκονται εντός βαρυτικού πεδίου. Βασικοί πυλώνες πάνω στους οποίους στηρίζεται η θεωρία αυτή είναι όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η Αρχή της Ισοδυναμίας, το Βαρυτικό πεδίο και ο Χρόνος, η Καμπυλότητα του Χωροχρόνου, οι Μαύρες Τρύπες, το Κενό και η Ύλη, η Δομή του Διαστήματος και το Δορυφορικό Σύστημα GPS(Global Positioning System).

## ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η θεωρία της σχετικότητας ή απλά σχετικότητα αναφέρεται σε δυο θεωρίες:

- στην αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου
- στην α) ΕΙΔΙΚΗ και β) ΓΕΝΙΚΗ θεωρία της σχετικότητας του Einstein

### **Η αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου. Η υπόθεση του Γαλιλαίου για το αναλλοίωτο. Ο νόμος της αδράνειας. Αδρανειακά συστήματα αναφοράς**

«Κλειστείτε με κάποιο φίλο σας στο αμπάρι ενός μεγάλου πλοίου, και έχετε μαζί σας μερικές μύγες, πεταλούδες και άλλα μικρά ζώα που μπορούν να πετάξουν. Επίσης ένα με-γάλο δοχείο με νερό και ψάρια μέσα σε αυτό. Κρεμάστε ψηλά ένα μπουκάλι που αδειάζει, σταγόνα-σταγόνα σε ένα φαρδύ δοχείο που βρίσκεται από κάτω του. Με το πλοίο ακίνητο, παρατηρήστε με προσοχή πώς τα μικρά ζώα πετάνε με τις ίδιες ταχύτητες προς όλες τις κατευθύνσεις μέσα στο αμπάρι. Τα ψάρια κολυμπούν αδιάφορα προς όλες τις κατευθύνσεις· οι σταγόνες πέφτουν στο δοχείο από κάτω· και, πετώντας κάτι στον φίλο σας, δεν χρειάζεται να το πετάξετε με μεγαλύτερη δύναμη προς μια κατεύθυνση από όσο σε μια άλλη, αν οι αποστάσεις είναι ίσες· πηδώντας, με τα πόδια μαζί, πηδάτε σε ίσες αποστάσεις προς όλες τις διευθύνσεις. Όταν έχετε παρατηρήσει όλα αυτά προσεκτικά (παρ' όλον ότι δεν υπάρχει αμφιβολία ότι, με το πλοίο ακίνητο, όλα θα συμβούν κατ' αυτόν τον τρόπο), ζητήστε να κινηθεί το πλοίο με οποιαδήποτε ταχύτητα θέλετε, με την προϋπόθεση ότι η ταχύτητα θα είναι ομοιόμορφη και δεν μεταβάλλεται προς τη μια ή την άλλη κατεύθυνση. Δεν θα παρατηρήσετε την παραμικρή διαφορά σε όλα τα φαινόμενα που αναφέρθηκαν, ούτε και θα μπορείτε να πείτε από αυτά κατά πόσο το πλοίο κινείται ή είναι ακίνητο.» Με αυτά τα λόγια εισάγει ο Γαλιλαίος την αρχή της σχετικότητας. Είχε παρατηρήσει, με πειράματα και με λογικούς συλλογισμούς, ότι η ομαλή σχετική κίνηση ανάμεσα σε δύο παρατηρητές δεν επηρεάζει τα φαινόμενα της Μηχανικής, όπως αυτοί τα παρατηρούν. Αυτό εκφράστηκε στην αρχή του Γαλιλαίου για το αναλλοίωτο: Οι

βασικοί νόμοι της Φυσικής είναι ταυτόσημοι για όλα τα συστήματα αναφοράς που κινούνται με σταθερή ταχύτητα το ένα ως προς το άλλο. Η αρχή αναφέρεται φυσικά σε μηχανικά φαινόμενα και αποτελεί μια σημαντικότερη συνεισφορά του Γαλιλαίου στη μαθηματικοποίηση των νόμων της Φυσικής. Ο νόμος της αδράνειας είναι ακόμη μία συνεισφορά του Γαλιλαίου στη Φυσική. Δηλώνει ότι: Ένα σώμα πάνω στο οποίο δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις, θα εξακολουθήσει να κινείται με σταθερή ταχύτητα ή και να είναι ακίνητο. Αρχικά αναφερόταν φυσικά στις, μόνες τότε γνωστές δυνάμεις, τις Μηχανικές, αλλά σήμερα επεκτείνεται για να καλύψει όλες τις δυνάμεις. Γνωρίζοντας ότι οι θεμελιώδεις δυνάμεις που υπάρχουν στη φύση μειώνονται τουλάχιστον τόσο γρήγορα όσο το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης, θεωρούμε ότι ένα σώμα που βρίσκεται αρκετά μακριά από άλλα σώματα μπορεί να θεωρηθεί, κατά προσέγγιση, απομονωμένο. Ο νόμος της αδράνειας διατυπώθηκε ως Πρώτος Νόμος του Νεύτωνα για την Κίνηση. Ο Δεύτερος νόμος συσχετίζει την επιτάχυνση ενός σώματος με τις εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε αυτό:  $\Sigma F = ma$ . Θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ο ορισμός της δύναμης, η οποία, αν οριστεί με αυτόν τον τρόπο, οδηγεί σε πολύ απλές μαθηματικές εκφράσεις για τους νόμους που περιγράφουν τις φυσικές δυνάμεις. Ο πρώτος νόμος του Νεύτωνα για την κίνηση, εκφράζει κάτι πολύ σημαντικό. Ότι είναι δυνατόν να υπάρξουν στη φύση συστήματα αναφοράς, στα οποία ικανοποιείται αρκετά ικανοποιητικά η συνθήκη μηδενικής εξωτερικής δύναμης και για τα οποία ισχύουν οι δύο πρώτοι νόμοι κίνησης του Νεύτωνα. Τα συστήματα αυτά αποκαλούνται αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Υπάρχουν άπειρα αδρανειακά συστήματα, τα οποία κινούνται με σταθερές σχετικές ταχύτητες μεταξύ τους. Προφανώς μόνο κατά προσέγγιση μπορούν να υπάρξουν αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Η Γη, ως περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς δεν είναι αδρανειακό. Μπορεί να θεωρηθεί ως αδρανειακό, αν συμπεριλάβουμε και υποθετικές δυνάμεις (φυγόκεντρος δύναμη και δύναμη Coriolis) στις πραγματικές δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε ένα σώμα. Ο Ήλιος υφίσταται μια πολύ μικρή επιτάχυνση, λόγω των βαρυτικών δυνάμεων από γειτονικά άστρα αλλά, κυρίως, λόγω της περιστροφής του Γαλαξία γύρω από το κέντρο του. Οι επιταχύνσεις αυτές όμως είναι εξαιρετικά μικρές, μη μετρήσιμες, και μπορούν να αγνοηθούν. Το ηλιοκεντρικό σύστημα αναφοράς είναι επομένως, με καλή προσέγγιση, αδρανειακό. Συνήθως αναφερόμαστε σε κίνηση «ως προς τους απλανείς αστέρες» για να μιλήσουμε για κίνηση μέσα σε αδρανειακό σύστημα, εννοώντας την κίνηση ως προς την ύλη στους πολύ μακρινούς γαλαξίες του ορατού σύμπαντος.

## **ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΚΑΙ ΜΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

### **ΑΝΑΦΟΡΑΣ**

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

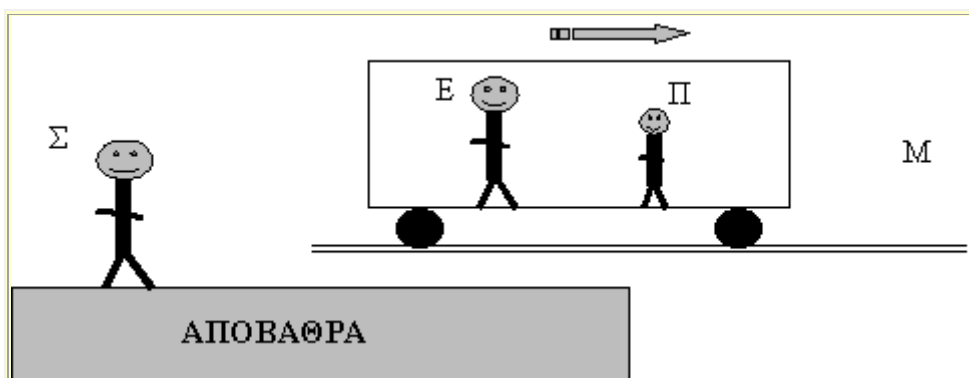
Ο Einstein θεωρούσε ότι η ειδική θεωρία της σχετικότητας παρόλο που περιλαμβάνει όλους τους νόμους της Φυσικής είναι «ειδική» υπό την έννοια ότι θεωρεί «ευνοούμενα» συστήματα αναφοράς αυτά που βρίσκονται μόνο σε ομαλή και μη περιστροφική κίνηση (Einstein 1961). Θεωρούσε πολύ δελεαστική την πρόκληση για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

## **ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ**

### **ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ**

Ας φανταστούμε ένα βαγόني τρένου το οποίο κινείται ως προς την αποβάθρα. Στο βαγόني επιβαίνει ένας άνδρας (E) με το μικρό του παιδί (Π). Στην αποβάθρα ο

σταθμάρχης ( $\Sigma$ ) μπορεί να βλέπει τι συμβαίνει μέσα στο βαγόνι. Τόσο ο άνδρας / επιβάτης, όσο και ο σταθμάρχης γνωρίζουν τη Νευτώνεια Μηχανική.



Όσο το βαγόνι κινείται με σταθερή ταχύτητα (αδρανειακό ΣΑ) οι ταξιδιώτες δεν αντιλαμβάνονται τίποτα ιδιαίτερο, δηλαδή, εφόσον δεν ακούνε το ήχο της μηχανής και δεν υπάρχουν κραδασμοί θα μπορούσαν κάλλιστα να υποθέσουν ότι αυτοί δεν κινούνται αλλά ότι απομακρύνεται η αποβάθρα από αυτούς. Για την περιγραφή των φυσικών γεγονότων, για παράδειγμα για την μελέτη της ελεύθερης πτώσης ενός σώματος, το σύστημα αναφοράς της αποβάθρας είναι ισοδύναμο με αυτό του βαγονιού.

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

Άλλο παράδειγμα αδρανειακών δυνάμεων είναι οι «φυγόκεντρες» δυνάμεις που υποθέτουν ότι δέχονται παρατηρητές που βρίσκονται πάνω σε οριζόντιο



περιστρεφόμενο δίσκο. Και σε αυτή την περίπτωση οι αδρανειακές δυνάμεις είναι ανάλογες με τη μάζα.

Από τα παραπάνω ανακύπτουν κάποια ερωτήματα:

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

Για να απατήσουμε στα παραπάνω ερωτήματα θα δούμε αργότερα στην θεωρία της σχετικότητας του Einstein ,την **αρχή της ισοδυναμίας** που αποτέλεσε το θεμέλιο λίθο πάνω στον οποίο οικοδομήθηκε η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας.

## **Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας του Einstein**

Το 1905 ο Einstein, βασιζόμενος στα νέα πειραματικά δεδομένα και υπερβαίνοντας τις κλασικές προκαταλήψεις, έφερε δύο νέες παραδοχές:

1. *Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι ίδια σε όλα τα συστήματα συντεταγμένων (Σ.Σ.) που βρίσκονται σε σχετική ομαλή κίνηση.*

2. *Όλοι οι νόμοι της φύσης είναι ίδιοι σε όλα τα Σ.Σ. που βρίσκονται σε σχετική ομαλή κίνηση.*

Αυτές οι παραδοχές βρίσκονται σε αντίθεση με τους κλασικούς μετασχηματισμούς οι οποίοι πρέπει να αντικαταστούν. Τροποποιήσεις στις (1) και (2) οδηγούν σε αντίθεση με το πείραμα κι επομένως πρέπει να αποδεχτούμε την ισχύ τους και να αναθεωρήσουμε, τον τρόπο με τον οποίο μετασχηματίζονται οι θέσεις και οι ταχύτητες κατά τα πέρασμα από ένα Σ.Σ. σε άλλο. Σκοπός είναι να βγάλουμε συμπεράσματα από την (1) και (2), να δούμε πού και πώς αυτές οι παραδοχές

έρχονται σε αντίθεση με τους κλασικούς μετασχηματισμούς, και να βρούμε τη φυσική σημασία των αποτελεσμάτων που θα πετύχουμε.

Θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα ενός κινούμενου δωματίου με έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό παρατηρητή που κινείται κάθετα στους τοίχους. Αν εκπέμπεται ένα φωτεινό σήμα από το κέντρο του δωματίου, ρωτάμε τους δυο ανθρώπους τι περιμένουν να παρατηρήσουν, αν έχουν στο μυαλό τους μονάχα τις δυο αρχές.

Ο εσωτερικός παρατηρητής: Το φωτεινό σήμα που προχωρεί από το κέντρο του δωματίου θα φτάσει ταυτόχρονα στους δυο τοίχους, εφόσον απέχουν το ίδιο από τη φωτεινή πηγή και η ταχύτητα του φωτός είναι η ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις.

Ο εξωτερικός παρατηρητής: Στο σύστημα μου η ταχύτητα του φωτός είναι ακριβώς η ίδια με την ταχύτητα στο σύστημα του παρατηρητή που κινείται με το δωμάτιο. Αυτό που βλέπω είναι ένα φωτεινό σήμα που διαδίδεται με μια σταθερή ταχύτητα, ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο ένας τοίχος απομακρύνεται, από το φωτεινό σήμα, ο άλλος το πλησιάζει. Γι' αυτόν το λόγο, το φως θα συναντήσει λίγο πιο αργά τον τοίχο που απομακρύνεται, παρά τον τοίχο που πλησιάζει.

Συγκρίνοντας τις προβλέψεις των παρατηρητών μας, βρίσκουμε ένα συμπέρασμα που έρχεται σε αντίθεση με τις έννοιες της κλασικής φυσικής. Δυο γεγονότα, δηλ. οι δυο φωτεινές ακτίνες που χτυπούν τους δυο τοίχους, είναι σύγχρονα για τον εσωτερικό παρατηρητή, όχι όμως και για τον εξωτερικό.

Στην κλασική φυσική είχαμε ένα ρολόι μονάχα, μια μοναδική ροή του χρόνου για όλους τους παρατηρητές, σε όλα Σ.Σ. Ο χρόνος, και κατά συνέπεια εκφράσεις όπως, «ταυτόχρονα», «νωρίτερα», «αργότερα», είχαν μια σημασία απόλυτα ανεξάρτητη από οποιοδήποτε Σ.Σ.

Η θεωρία της σχετικότητας μας υποχρεώνει να εγκαταλείψουμε αυτή την άποψη. Και πρέπει να κατανοήσουμε τη σημασία της πρότασης: «Δυο γεγονότα που είναι σύγχρονα σε ένα Σ.Σ., μπορεί να μην είναι σύγχρονα σε ένα άλλο Σ.Σ.». Πριν από αυτό, όμως, πρέπει να εξηγήσουμε τι εννοούμε με το «δυο γεγονότα σύγχρονα σε ένα Σ.Σ.».

Για να συζητήσουμε αυτά χρειαζόμαστε ρολόγια. Οποιοδήποτε φυσικό φαινόμενο μπορεί να χρησιμεύσει για ρολόι, φτάνει να επαναλαμβάνεται με ακρίβεια όσες φορές θελήσουμε.

Ας θεωρήσουμε πως σε δυο σημεία που απέχουν μεταξύ τους, έχουμε τοποθετήσει δυο τέλεια ρολόγια, που δείχνουν ακριβώς την ίδια ώρα. Πώς μπορούμε

να είμαστε βέβαιοι, πως δυο απομακρυσμένα ρολόγια δείχνουν ακριβώς την ίδια ώρα; Θα μπορούσαμε να τοποθετηθούμε σ' ένα σημείο πού να απέχει το ίδιο κι από τα δυο ρολόγια, και να παρατηρούμε σ' αυτό το σημείο τα είδωλα τους πού μεταδίδονται από μια τηλεόραση που ισαπέχει από τα δύο. Αν τα δυο σήματα εκπέμπονται ταυτόχρονα, θα φτάσουν σε μένα την ίδια στιγμή. Αν δυο «καλά» ρολόγια πού παρατηρούνται από τη μέση της απόστασης πού τα χωρίζει δείχνουν πάντα την ίδια ώρα, τότε είναι κατάλληλα για να δείχνουν την ώρα σε δυο σημεία απομακρυσμένα μεταξύ τους.

Ωστόσο το να χρησιμοποιούμε μονάχα ένα ρολόι δεν μας εξυπηρετεί, γιατί είμαστε υποχρεωμένοι να κάνουμε όλες μας τις μετρήσεις κοντά του. Παρατηρώντας από μακριά το ρολόι, π.χ. μέσω της τηλεόρασης, πρέπει πάντα να 'χουμε στο μυαλό μας, πώς εκείνο πού βλέπουμε τώρα, έγινε στην πραγματικότητα πρωύτερα. Είμαστε υποχρεωμένοι να κάνουμε διορθώσεις σ' όλες μας τις χρονικές μετρήσεις, ανάλογα με την απόσταση μας από το ρολόι.

Δε βολεύει λοιπόν να έχουμε μονάχα ένα ρολόι. Αλλά μια και ξέρουμε τώρα πώς να ξεκαθαρίσουμε αν δυο ή περισσότερα ρολόγια δείχνουν την ίδια ώρα και δουλεύουν με τον ίδιο ρυθμό, μπορούμε να φανταστούμε όσα ρολόγια θέλουμε μέσα σ' ένα δοσμένο Σ.Σ. Καθένα τους θα μας βοηθά να καθορίζουμε το χρόνο των γεγονότων πού συμβαίνουν στην άμεση γειτονιά του. Όλα τα ρολόγια ηρεμούν σε σχέση με το Σ.Σ. Είναι «καλά» και συγχρονισμένα ρολόγια, που σημαίνει πώς δείχνουν την ίδια ώρα.

Τα γεγονότα είναι σύγχρονα αν τα συγχρονισμένα ρολόγια που βρίσκονται κοντά τους, δείχνουν την ίδια ώρα, τη στιγμή που παράγονται. Το να λέμε πως ένα από τα απομακρυσμένα γεγονότα συνέβη πριν από το άλλο, έχει τώρα καθορισμένο νόημα.

Για να διαπραγματευθούμε το πρόβλημα δυο συστημάτων που βρίσκονται σε σχετική ομαλή κίνηση, πρέπει να θεωρήσουμε δυο ράβδους, εφοδιασμένες με ρολόγια. Ο παρατηρητής σε καθένα απ' αυτά τα δυο Σ.Σ., έχει τώρα τη δική του ράβδο και τη δική του σειρά ρολογιών σταθερά δεμένων μ' αυτήν.

Όταν διαπραγματευτήκαμε το ζήτημα των μετρήσεων στην κλασική μηχανική, χρησιμοποιήσαμε μονάχα ένα ρολόι, για όλα τα Σ.Σ. Εδώ έχουμε πολλά ρολόγια για κάθε Σ.Σ. Η διαφορά αυτή δεν έχει σημασία. Ωστόσο κανείς δε μπορεί να έχει αντίρρηση (για λόγους ευκολίας) στη χρησιμοποίηση των πολλών, φτάνει να συμπεριφέρονται σαν καλά συγχρονισμένα ρολόγια.

Τώρα πλησιάζουμε το σημείο που φανερώνει πού έρχονται σε αντίθεση οι κλασικοί μετασχηματισμοί με τη θεωρία της σχετικότητας. Τι συμβαίνει όταν δυο σειρές ρολόγια κινούνται ομαλά, η μια σε σχέση με την άλλη; Ο κλασικός φυσικός θα απαντούσε: τίποτα.

Ωστόσο θα μπορούσαμε να φανταστούμε κι ένα κινούμενο ρολόι που προχωρεί με διαφορετικό ρυθμό από ένα ακίνητο. Ας συζητήσουμε αυτή τη δυνατότητα. Τι εννοούμε λέγοντας πως ένα ρολόι που κινείται αλλάζει ρυθμό; Ας δεχτούμε, για λόγους απλότητας, πως έχουμε μονάχα ένα ρολόι στο επάνω Σ.Σ. και πολλά στο κάτω. Όλα τα ρολόγια έχουν τον ίδιο μηχανισμό και τα κάτω είναι συγχρονισμένα. Σχεδιάσαμε τρεις διαδοχικές θέσεις των δυο Σ.Σ. πού κινούνται ομαλά το ένα σε σχέση με το άλλο. Στο πρώτο σχήμα, οι δείκτες του επάνω και των κάτω ρολογιών βρίσκονται στην ίδια θέση, γιατί έτσι τους βάλαμε. Όλα τα ρολόγια δείχνουν την ίδια ώρα. Στο δεύτερο σχέδιο βλέπουμε τις σχετικές θέσεις των δυο Σ.Σ. υστέρη από κάποιο χρόνο.

Όλα τα ρολόγια στο κάτω Σ.Σ. δείχνουν ιδίαν ώρα, αλλά το ρολόι στο επάνω Σ.Σ. δεν προχωρεί πια με τον ίδιο ρυθμό. Ο ρυθμός άλλαξε και η ώρα είναι διαφορετική, γιατί το ρολόι κινείται σχετικά με το κάτω Σ.Σ. Στο τρίτο σχήμα, βλέπουμε πώς η διαφορά των θέσεων των δεικτών αυξάνει με τον χρόνο.

Ένας παρατηρητής που βρίσκεται ακίνητος στο κάτω Σ.Σ. θα 'βρισκε πως ένα ρολόι που κινείται, μεταβάλλει ρυθμό. Στο ίδιο αποτέλεσμα θα έφτανε κανείς αν το ρολόι κινιόταν σχετικά μ' ένα παρατηρητή ακίνητο στο πάνω Σ.Σ. Σ' αυτή την περίπτωση θα 'πρεπε να υπάρχουν πολλά ρολόγια στο πάνω Σ.Σ., και ένα μονάχα στα κάτω. Οι νόμοι της φύσης πρέπει να είναι ίδιοι στα δυο Σ.Σ.

Στην κλασική μηχανική, λοιπόν, γινόταν δεκτό σιωπηρά, πως ένα κινούμενο ρολόι δεν αλλάζει το ρυθμό του. Ωστόσο μπορούμε να φανταστούμε πως ένα κινούμενο ρολόι μεταβάλλει ρυθμό, εφόσον ο νόμος αυτής της αλλαγής είναι ο ίδιος για όλα τα συστήματα αδράνειας.

Ας μελετήσουμε τώρα και το μήκος. Ας πάρουμε μια ράβδο με μήκος ένα μέτρο. Αυτό σημαίνει πως έχει μήκος ένα μέτρο, εφ' όσον ηρεμεί σε ένα Σ.Σ. Ας υποθέσουμε τώρα πως κινείται ομαλά, γλιστρώντας κατά μήκος της ράβδου που αντιπροσωπεύει το Σ.Σ. Το μήκος της θα φαίνεται ότι είναι πάντα ένα μέτρο; Πρώτα πρέπει να ξέρουμε πώς να προσδιορίσουμε το μήκος της όταν βρίσκεται σε κίνηση. Αυτό μπορεί να γίνει με τον ακόλουθο τρόπο: Σε μια δοσμένη στιγμή, δυο παρατηρητές φωτογραφίζουν ταυτόχρονα, ο ένας την αρχή κι ο άλλος το τέλος της. Αφού οι

εικόνες πάρθηκαν ταυτόχρονα, μπορούμε να συγκρίνουμε πάνω στη ράβδο που παριστάνει το Σ.Σ., τα σημάδια με τα οποία συμπίπτουν η αρχή και το τέλος της ράβδου.

Χρειαζόμαστε δυο παρατηρητές για να σημειώσουν σύγχρονα γεγονότα σε διαφορετικές θέσεις ενός δοσμένου Σ.Σ. Αφού οι φωτογραφίες πρέπει να παρθούν ταυτόχρονα και το «ταυτόχρονα» είναι μια σχετική έννοια που εξαρτάται από το Σ.Σ., φαίνεται δυνατό να είναι διαφορετικά τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων, σε διαφορετικά Σ.Σ. που βρίσκονται σε σχετική κίνηση.

Γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα του φωτός, είναι ίδια σ' όλα τα συστήματα αδράνειας. Είναι αδύνατο να συμφιλιώσουμε το γεγονός αυτό, με τους κλασικούς μετασχηματισμούς. Ο κύκλος των παραδοχών μας πρέπει να σπάσει σε κάποιο σημείο. Μήπως αυτό μπορεί να γίνει σε τούτο ακριβώς το σημείο; Μήπως δηλαδή μπορούμε να δεχτούμε αλλαγές στο ρυθμό του κινούμενου ρολογιού και στο μήκος της κινούμενης ράβδου, τέτοιες ώστε η σταθερότητα της ταχύτητας του φωτός να είναι άμεσο επακόλουθο τους;

Το επιχείρημα μπορεί και να αντιστραφεί: αν η ταχύτητα του φωτός είναι ίδια σ' όλα τα Σ.Σ., τότε κινούμενες ράβδοι πρέπει να μεταβάλλουν τα μήκη τους και κινούμενα ρολόγια πρέπει να μεταβάλλουν το ρυθμό τους.

Αυτά μπορεί να φαίνονται περίεργα, αλλά από τη σκοπιά της θεωρίας της σχετικότητας, οι αντιλήψεις της κλασικής φυσικής φαίνονται αυθαίρετες. Γιατί να πιστεύουμε στον απόλυτο χρόνο, που ρέει με τον ίδιο τρόπο για όλους τους παρατηρητές, σε όλα τα Σ.Σ.; Γιατί να πιστεύουμε πως η απόσταση είναι αμετάβλητη; Ο χρόνος καθορίζεται από ρολόγια, οι συντεταγμένες του χώρου από ράβδους και το αποτέλεσμα του καθορισμού τους εξαρτάται από τη συμπεριφορά αυτών των ρολογιών και των ράβδων, όταν βρίσκονται σε κίνηση.

Άλλωστε οι εξισώσεις Maxwell δεν είναι αναλλοίωτες σε σχέση με τους κλασικούς μετασχηματισμούς. Αυτό υποδεικνύει πως η σύνδεση ανάμεσα σε δυο Σ.Σ. πρέπει να είναι διαφορετική. Απεναντίας, οι εξισώσεις Maxwell, είναι αναλλοίωτες σε σχέση με τους μετασχηματισμούς Lorentz οι οποίοι περιλαμβάνουν και νόμους μετασχηματισμού για το χρόνο. Στην κλασική φυσική είχαμε νόμους μετασχηματισμού για τις συντεταγμένες και για τις ταχύτητες, αλλά οι νόμοι της μηχανικής ήταν ίδιοι για δυο Σ.Σ. που βρισκότανε σε σχετική ομαλή κίνηση. Είχαμε νόμους μετασχηματισμού για το χώρο, όχι όμως και για το χρόνο, γιατί ο χρόνος ήταν ο ίδιος για όλα τα Σ.Σ. Τα πράγματα είναι διαφορετικά στη θεωρία της σχετικότητας:

Έχουμε νόμους μετασχηματισμού για το χώρο, το χρόνο και την ταχύτητα, διαφορετικούς από της κλασικής μηχανικής.

Και πάλι, οι νόμοι της φύσης πρέπει να είναι ίδιοι για όλα τα Σ.Σ. που βρίσκονται σε ομαλή σχετική κίνηση. Σ' όλα τα συστήματα αδράνειας ισχύουν οι ίδιοι νόμοι και το πέρασμα από το ένα στο άλλο γίνεται με τους μετασχηματισμούς του Lorentz.

Από αυτούς συνάγεται πως μια κινούμενη ράβδος συστέλλεται προς την κατεύθυνση της κίνησης και η συστολή μεγαλώνει με την αύξηση της ταχύτητας. Δεν υπάρχει όμως συστολή κατά τη διεύθυνση που είναι κάθετη με τη διεύθυνση της κίνησης. Το μήκος μιας ράβδου θα 'φτάνε στο μηδέν, αν η ταχύτητα της έφτανε την ταχύτητα του φωτός. Επίσης ο ρυθμός ενός κινούμενου ρολογιού θα επιβραδυνότανε σε σύγκριση με των ρολογιών μπροστά από τα όποια περνά και θα μηδενιζόταν, αν το ρολόι έφτανε να κινείται με την ταχύτητα του φωτός. Ο αριθμός που εκφράζει την ταχύτητα του φωτός εμφανίζεται στους μετασχηματισμούς του Lorentz και παίζει το ρόλο οριακής ταχύτητας, όπως η άπειρη ταχύτητα στην κλασική μηχανική. Κάθε σώμα αναφοράς (σύστημα συντεταγμένων) έχει τον δικό του χρόνο. Γεγονότα που είναι ταυτόχρονα σε σχέση με έναν παρατηρητή δεν είναι ταυτόχρονα σε σχέση με κάποιον άλλο παρατηρητή (π.χ. ακίνητος και κινούμενος παρατηρητής). Σχετικότητα δηλαδή του ταυτόχρονου. Μία ένδειξη χρόνου δεν έχει νόημα παρά μόνον αν δεχθεί το σώμα αναφοράς στο οποίο αναφέρεται η ένδειξη. Πριν τη θεωρία της σχετικότητας, η κλασική φυσική είχε πάντα δεχθεί σιωπηρά ότι η ένδειξη του χρόνου είχε μια αξία απόλυτη, δηλαδή ότι ήταν ανεξάρτητη από την κατάσταση κίνησης του σώματος αναφοράς. Βέβαια η κατάσταση δικαιολογείται απόλυτα αν θυμηθούμε ότι το 1670 ο Sir Isaac Newton είχε θεωρήσει την ταχύτητα διάδοσης του φωτός σαν άπειρη, ενώ μόλις το 1727 γίνεται η πρώτη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός από τον J. Bradley. Παράδειγμα επιστημονικής πλάνης: Αν πιστεύαμε ότι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στην ατμόσφαιρα είναι άπειρη, τότε θα διαπιστώναμε ότι όταν ένας ξυλοκόπος, σε απόσταση από εμάς, κόβει ξύλα και κατεβάζει το τσεκούρι δεν ακούγεται κανένας θόρυβος, αλλά όταν το ανεβάζει αμέσως μετά, στο ανώτατο σημείο του περίπου, ακούγεται ένας κρότος. Σαν αποτέλεσμα, με το δίκιο μας θα καταλήγαμε στο συμπέρασμα ότι κάπου στην ανοδική του πορεία το τσεκούρι συναντά ένα αόρατο εμπόδιο και δημιουργεί, η σύγκρουσή του με το υποτιθέμενο εμπόδιο, τον κρότο. Κάτι ανάλογο παθαίνουμε σήμερα και με τη μέτρηση του ταυτόχρονου 2 πραγμάτων, βάσει της ταχύτητας μεταδόσεως του φωτός που

αντιλαμβανόμαστε με τα μάτια μας - η οποία αν και τεράστια, είναι όμως πεπερασμένη!

## **ΕΙΔΙΚΗ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ:** Δεν ήταν

δύσκολο να τροποποιήσουμε την κλασική μηχανική έτσι, ώστε να μην έρχεται σε αντίθεση με τη θεωρία της σχετικότητας. Η παλιά μηχανική ισχύει για μικρές ταχύτητες και αποτελεί την οριακή περίπτωση της νέας.

Ας δούμε ένα παράδειγμα αλλαγής που εισάχθηκε από τη θεωρία της σχετικότητας.

Ας φανταστούμε ένα σώμα ορισμένης μάζας, που κινείται κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής και υφίσταται τη δράση μιας εξωτερικής δύναμης κατά την κατεύθυνση της κίνησης του. Για την κλασική μηχανική, δύναμη είναι ανάλογη με την αλλαγή της ταχύτητας. Για την θεωρία της σχετικότητας, ο νόμος αυτός ισχύει προσεγγιστικά και μόνο για μικρές ταχύτητες. Για αυτήν, όσο πιο πολύ πλησιάζει μια ταχύτητα την ταχύτητα του φωτός, τόσο πιο δύσκολο είναι να αυξηθεί. Κι όταν μια ταχύτητα είναι ίση με του φωτός, είναι αδύνατο να την αυξήσουμε περισσότερο.

Ένα ακίνητο σώμα έχει ορισμένη μάζα, που ονομάζεται μάζα ηρεμίας. Ένα σώμα αντιπαρατάσσει στην αλλαγή της ταχύτητας μεγαλύτερη αντίσταση, όχι μόνο αν η μάζα ηρεμίας του είναι μεγαλύτερη, αλλά κι αν η ταχύτητα του είναι μεγαλύτερη και γίνεται απείρως μεγάλη, όταν η ταχύτητα πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός.

Το αποτέλεσμα αυτό υποβάλλει μιαν άλλη σπουδαία γενίκευση. Ένα σώμα σε ηρεμία έχει μάζα, όχι όμως και κινητική ενέργεια. Ένα κινούμενο σώμα έχει και μάζα και κινητική ενέργεια. Το σώμα αυτό αντιστέκεται στην αλλαγή της ταχύτητας, ισχυρότερα από το ακίνητο σώμα. Θα 'λέγε κανείς πώς η κινητική ενέργεια του κινούμενου σώματος, αυξάνει την αντίσταση του. Αν δυο σώματα έχουν την ίδια μάζα, αυτό που έχει μεγαλύτερη κινητική ενέργεια, αντιστέκεται πιο έντονα στη δράση μιας εξωτερικής δύναμης.

Ας φανταστούμε ένα κουτί που περιέχει σφαίρες και ηρεμεί, τόσο αυτό, όσο κι οι σφαίρες, στο Σ.Σ. του. Για να το κινήσουμε, για να το επιταχύνουμε, χρειάζεται κάποια δύναμη. Άραγε αυτή η ίδια δύναμη θα προκαλέσει την ίδια επιτάχυνση, αν οι σφαίρες κινούνται μέσα στο κουτί προς όλες τις διευθύνσεις με μέση ταχύτητα που πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός; Όχι. Θα χρειαστεί μια μεγαλύτερη δύναμη, εξ αιτίας της αυξημένης κινητικής ενέργειας των σφαιρών, η οποία αυξάνει την αντίσταση του κουτιού. Η κινητική ενέργεια λοιπόν, αντιστέκεται στην κίνηση, όπως

ακριβώς και οι μάζες που ζυγίζουν. Ισχύει άραγε το ίδιο για όλα τα είδη της ενέργειας;

Η θεωρία της σχετικότητας συνάγει, λοιπόν, από τη θεμελιώδη της παραδοχή ότι κάθε ενέργεια αντιστέκεται στην αλλαγή της κίνησης. Κάθε ενέργεια συμπεριφέρεται όπως η ύλη.

Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας δεν υπάρχει ουσιώδης διάκριση ανάμεσα στη μάζα και την ενέργεια. Η ενέργεια έχει μάζα και η μάζα αντιπροσωπεύει ενέργεια. Κι αντί για δυο νόμους διατήρησης (ενέργειας και μάζας), έχουμε ένα μονάχα, το νόμο για τη μάζα-ενέργεια.

Ο λόγος για την έλλειψη άμεσης εμπειρίας αυτών, είναι η εξαιρετικά μικρή σχέση αναλογίας ανάμεσα στη μάζα και την ενέργεια. Η ποσότητα της θερμότητας που μπορεί να μετατρέψει τριάντα χιλιάδες τόνους νερού, σε ατμό, θα ζύγιζε ένα γραμμάριο περίπου δεδομένου ότι ισχύει η περίφημη εξίσωση:  **$E=mc^2$** .

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

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



## Η ΕΙΔΙΚΗ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ

### ΧΩΡΟΧΡΟΝΟΥ:

Στη Φυσική, ο **χωροχρόνος** ή **χωροχρονικό συνεχές** είναι το μαθηματικό μοντέλο που ενώνει τον χώρο και τον χρόνο σε μία συνέχεια. Ο χωροχρόνος συνήθως ερμηνεύεται ως συνδυασμός του ευκλείδειου χώρου τριών διαστάσεων με τον χρόνο ως μια επιπρόσθετη διάσταση, οπότε προκύπτει ένα πολύπτυχο μόρφωμα (manifold) τεσσάρων διαστάσεων. Η τέταρτη διάσταση, αυτή του χρόνου, είναι διαφορετική από τις άλλες τρεις που αφορούν μήκος στον ευκλείδειο χώρο.

Στην Κλασική μηχανική σε χαμηλές (μη σχετικιστικές ταχύτητες, δηλαδή πολύ κάτω από την ταχύτητα του φωτός) ταχύτητες, η χρήση της ευκλείδειας γεωμετρίας είναι κατάλληλη καθώς ο χρόνος μπορεί να παραλείπεται από τη μαθηματική περιγραφή των υπό εξέταση συστημάτων, αφού είναι ο ίδιος παντού για τα αντικείμενα και τον παρατηρητή. Όταν όμως μελετούμε σχετικιστικές κινήσεις των σωμάτων, όταν δηλαδή έχουμε ταχύτητες που προσεγγίζουν την ταχύτητα του φωτός, τότε ο χρόνος δεν μπορεί να παραλειφθεί από τη μαθηματική περιγραφή και το σημείο στον χώρο ανάγεται πια σε γεγονός στον χωροχρόνο. Όταν μελετούμε σχετικιστικά φαινόμενα, προσπαθώντας να τα κατανοήσουμε με ευκλείδεια γεωμετρία σε χώρο τριών διαστάσεων, ο χρόνος αλλοιώνεται καθώς παίζει ρόλο η ταχύτητα του σώματος που μελετάται ως προς τον παρατηρητή και η επίδραση της βαρύτητας φαίνεται να επιβραδύνει το «πέρασμα του χρόνου». Κοιτώντας σε τέσσερις διαστάσεις, απλά λέμε πως ο χωροχρόνος «καμπυλώνει». Ο Newton είχε δώσει για τον κόσμο μian εικόνα όμορφη, ταιριασμένη μέσα στον απόλυτο χώρο και στον απόλυτο χρόνο. Ο Einstein ήρθε να θρυμματίσει αυτή την εικόνα, λέγοντας ότι διαφορετικοί παρατηρητές δεν συμφωνούν για το ταυτόχρονο. Επειδή μάλιστα συμβαίνει να διαφοροποιούνται και οι μετρήσεις τους για τα μήκη, καταλήγουμε πως διαφορετικοί παρατηρητές έχουν διαφορετικά - ιδιωτικά - συστήματα χώρου και χρόνου. Παρά τις ασυμφωνίες τους όμως αυτές, οι παρατηρητές έχουν πολλά κοινά: π.χ. βρίσκουν για το φως την ίδια σταθερή ταχύτητα  $c$ . Αλλά πάνω απ' όλα κατοικούν στο ίδιο σύμπαν! Το τελευταίο μπορεί να φαίνεται υπερβολικά ολοφάνερο, αλλ' όμως μας οδηγεί στην καρδιά του προβλήματος! Διότι οι ιδιωτικοί χώροι και χρόνοι των διαφορετικών παρατηρητών δεν μπορούν να θεωρηθούν απο-μονωμένοι μεταξύ τους. Όπως απέδειξε ο Minkowski ανήκουν όλοι σε μία και μοναδική, παγκόσμια περιοχή που είναι μια

ένωση του χώρου και του χρόνου, που ονομάστηκε χωροχρόνος. Πώς όμως οι διαφορετικοί παρατηρητές αποκτούν τους ιδιωτικούς τους χώρους και χρόνους; Μα χωρίζοντας αυτόν τον ενωμένο χωροχρόνο, με διαφορετικούς τρόπους, σε χώρο και χρόνο. Όμως προσοχή! Ο χωροχρόνος έχει 4 διαστάσεις. Ας μην προσπαθήσουμε να σχηματίσουμε μια εικόνα γι' αυτόν. Είναι τελείως αδύνατον! Ούτε ο Einstein ούτε και ο Minkowski «έβλεπαν» αυτόν τον χωροχρόνο: Οι επιστήμονες δουλεύουν μαζί του με τη βοήθεια ενός μαθηματικού μοντέλου και παρόλο που τους επιτρέπει να εκφράζονται με μεγάλη επιδεξιότητα, τους είναι επίσης αδύνατον να τον δουν! Εκ πρώτης όψεως, και το Νευτώνειο Σύμπαν ήταν τετραδιάστατο, επειδή όμως ο απόλυτος χώρος στήνεται ξεχωριστά από τον απόλυτο χρόνο, ο καθένας καταλήγει να βλέπει με 3+1 μάλλον διαστάσεις παρά με 4. Κάτι τέτοιο όμως δεν συμβαίνει με το χωροχρόνο της σχετικότητας: Ο χώρος και ο χρόνος είναι υφασμένοι μαζί τόσο θεμελιακά, που ο όρος τετραδιάστατος είναι αναπόφευκτος. Στη Νευτώνεια φυσική οι αποστάσεις είναι ίσες μεταξύ τους και παρομοίως και οι χρόνοι είναι ίσοι μεταξύ τους, των δύο παρατηρητών. Στη θεωρία όμως της σχετικότητας, μόνον η σύνθεσή τους έχει την ίδια τιμή για όλους τους παρατηρητές.

### **Παράδειγμα σε 3 διαστάσεις:**

(Πυθαγόρειο θεώρημα)

Από αυτή την ομοιότητα, παρακινούμαστε να θεωρήσουμε τον χρόνο σαν μια τέταρτη διάσταση που, όταν εκφραστεί σε μήκος, αναμιγνύεται λίγο-πολύ ισότιμα με τις τρεις διαστάσεις του χώρου σχηματίζοντας ένα ενιαίο σύνολο, τον τετραδιάστατο χωροχρόνο. Ο πειρασμός μαθηματικά είναι ακατανίκητος, παρόλο που ο χωροχρόνος αρνείται να μπει σε κάποια ρεαλιστική εικόνα. Ας φανταστούμε την τελεία στο τέλος της πρότασης αυτής. Φυσικά την τελεία έχουμε συνηθίσει να τη θεωρούμε σαν ένα σημείο. Στην πραγματικότητα είναι ένα σημείο μόνιμο, ένα σημείο που διαρκεί μέσα στο χρόνο, όσο υπάρχει η σελίδα αυτή. Δεν έρχεται και φεύγει σαν μια λάμψη. Έτσι μπορούμε να φανταστούμε ότι το σημείο αυτό ξετυλίγεται μέσα στο χωροχρόνο, ότι είναι κάτι σαν κορδέλα ή, όπως λέγεται, μια κοσμική γραμμή.

Για να κάνουμε κάποια αναπαράσταση, ας φανταστούμε ότι η διάσταση του χώρου είναι ένας άξονας προς τα κάτω, πάνω στη σελίδα. Έτσι δυο κοσμικές γραμμές σαν του σχήματος θα παριστούν δυο σημεία που πλησιάζουν το ένα το άλλο. Όμως οι κοσμικές γραμμές καθαυτές δεν κινούνται.

Στο χωροχρόνο, παρελθόν, παρόν και μέλλον είναι όλα απλωμένα μπροστά μας, ακίνητα σαν τις λέξεις ενός βιβλίου. Στον χωροχρόνο, καθετί που για μας αποτελεί το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον, εμφανίζεται ενιαία. Κάθε παρατηρητής, καθώς ο χρόνος του περνά, ανακαλύπτει - τρόπος του λέγειν - νέα στρώματα από το χωροχρόνο που τα νομίζει για διαδοχικές όψεις του υλικού κόσμου, παρόλο που πραγματικά το σύνολο των γεγονότων που αποτελούν τον χωροχρόνο υπάρχει πριν από τη γνώση του παρατηρητή γι' αυτά. Το χώρο-χρονικό συνεχές της ειδικής σχετικότητας είναι ένα Ευκλείδειο συνεχές, δηλαδή ένα Καρτεσιανό σύστημα



συντεταγμένων με 4 διαστάσεις. Αυτό δεν ισχύει στη γενική θεωρία της σχετικότητας, όπου το πεδίο βαρύτητας παραμορφώνει το φως και συνεπώς η ταχύτητα του φωτός δεν αποτελεί πλέον μια παγκόσμια σταθερά.

**Περισσότερη σχετικότης:** Όλες οι έννοιες που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε τη φύση είναι περιορισμένες. Δεν είναι περιγραφές της πραγματικότητας, όπως έχουμε την τάση να πιστεύουμε, αλλά δημιουργήματα του νου μας. Μέρη του χάρτη και όχι του εδάφους.

Η πίστη πως η γεωμετρία βρίσκεται ενσωματωμένη σε όλα τα φυσικά πράγματα έχει τις ρίζες της στα αρχαία χρόνια. Η γεωμετρία θεωρήθηκε σαν ο τέλειος συνδυασμός της λογικής και της ομορφιάς κι έτσι της αποδόθηκε θεϊκή καταγωγή! Η Ευκλείδεια γεωμετρία αναγνωρίστηκε σαν η τέλεια ερμηνεία της φύσης του χώρου για περισσότερους από 25 αιώνες. Χρειάστηκε να έλθει ο Einstein για να αποδείξει σε επιστήμονες και φιλοσόφους, πως η γεωμετρία δεν βρίσκεται ενσωματωμένη στη

φύση αλλά στον τρόπο σκέψης μας. Το νέο πλαίσιο, ο χωροχρόνος, βρίσκει την απόλυτη εφαρμογή του σε κάθε περίπτωση φαινομένων που αφορούν μεγάλες ταχύτητες ή ισχυρά πεδία βαρύτητας. Κάθε φορά που μελετάμε φυσικά φαινόμενα με μεγάλες ταχύτητες, μας είναι εξαιρετικά δύσκολο να τα συλλάβουμε διανοητικά κι ακόμη πιο δύσκολο να τα εκφράσουμε στην κοινή γλώσσα.

Το «παράδοξο των διδύμων» αποτελεί ίσως την πιο διαδεδομένη παραδοξολογία της σύγχρονης φυσικής: Αν ένας από τους δυο αδελφούς ταξιδέψει με τεράστια ταχύτητα στο εξωτερικό διάστημα, θα είναι κατά πολύ νεώτερος όταν επιστρέψει στη Γη, κι αυτό γιατί η καρδιά του, ο ρυθμός της κυκλοφορίας του αίματος, τα εγκεφαλικά του κύματα θ' ακολουθήσουν πολύ αργότερους ρυθμούς σε σύγκριση με τον αδελφό του που θα παραμείνει στη Γη. Ο διαστημικός ταξιδιώτης βέβαια δεν πρόκειται να νιώσει κάτι το ασυνήθιστο, αλλά κατά την επιστροφή του θα παρατηρήσει πως ο δί-δυμος αδελφός του θα έχει γεράσει πολύ περισσότερο από τον ίδιο! Τα φαινόμενα αυτά μοιάζουν παράδοξα για όσο διάστημα αρνιόμαστε να τα δεχθούμε σαν τρισδιά-στατες προβολές τετραδιάστατων συμβάντων, όπως οι σκιές είναι διδιάστατες προ-βολές τρισδιάστατων αντικειμένων. Αν είχαμε την ικανότητα να «δούμε» την τετραδιάστατη χωροχρονική πραγματικότητα, το στοιχείο της παραδοξολογίας θα εξαφανιζόταν από μόνο του!

## **Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας του Einstein**

Κάνοντας μια εισαγωγή στη γενική θεωρία της σχετικότητας, θα προσπαθήσουμε να απαντήσαμε πρώτα σ' ένα θεμελιώδες ερωτήματα: Υπάρχει σύστημα αδράνειας; Μάθαμε κάτι για τους νόμους της φύσης, την αμεταβλητότητά τους ως προς τους μετασχηματισμούς του Lorentz και την ισχύ τους για τα συστήματα αδράνειας που κινούνται ομαλά το ένα ως προς το άλλο. Αλλά ποιο είναι το πλαίσιο στο οποίο πρέπει να τους αναφέρουμε;

Για να καταλάβουμε καλύτερα τη δυσκολία που εμφανίζεται, θέσουμε λίγες απλές ερωτήσεις: Τι είναι σύστημα αδράνειας; Ο κλασικός φυσικός θα απαντούσε: «Είναι ένα Σ.Σ. όπου ισχύουν οι νόμοι της μηχανικής. Ένα σώμα πού πάνω του δε δρα εξωτερική δύναμη, κινείται ομαλά μέσα σε ένα τέτοιο Σ.Σ. Αυτή η ιδιότητα μας κάνει λοιπόν ικανούς να διακρίνουμε ένα σύστημα αδράνειας, από οποιοδήποτε άλλο». Ωστόσο, τι εννοεί όταν λέει πως στο σώμα δε δρα καμιά δύναμη; Ο φυσικός μας θα αναγκαζόταν να ομολογήσει: «Εννοώ απλώς ότι το σώμα κινείται ομαλά σε

ένα σύστημα αδράνειας». Βρισκόμαστε μπροστά στην αρχική μας ερώτηση... Και τι είναι σύστημα αδράνειας;

Αυτή είναι μια σοβαρή δυσκολία στην κλασική φυσική. Έχουμε νόμους, αλλά δεν ξέρουμε σε ποιο πλαίσιο να τους αναφέρουμε.

Μπορούμε να πλησιάσουμε την ίδια δυσκολία από μια διαφορετική οπτική. Ας υποθέσουμε πως σ' ολόκληρο το σύμπαν υπάρχει μόνο ένα σώμα, που αποτελεί τα Σ.Σ. μας. Το σώμα αυτό αρχίζει να περιστρέφεται. Σύμφωνα με την κλασική μηχανική, οι νόμοι της φυσικής για ένα περιστρεφόμενο σώμα, είναι διαφορετικοί από τους νόμους για ένα σώμα που δεν περιστρέφεται. Αν η αρχή της αδράνειας ισχύει στη μια περίπτωση, δεν ισχύει στην άλλη. Όλα αυτά όμως φαίνονται πολύ ύποπτα. Μας επιτρέπεται να θεωρούμε την κίνηση ενός μονάχα σώματος, μέσα σ' όλο το σύμπαν; Λέγοντας κίνηση ενός σώματος, εννοούμε πάντα την αλλαγή της θέσης του ως προς ένα άλλο σώμα. Είναι λογικό να μιλάμε για κίνηση ενός μοναχικού σώματος; Η κλασική μηχανική και η κοινή λογική βρίσκονται σε ασυμφωνία σ' αυτό το σημείο. Ο κανόνας του Νεύτωνα είναι: αν ισχύει η αρχή της αδράνειας, τότε το Σ.Σ. βρίσκεται είτε σε ηρεμία, είτε σε ομαλή κίνηση. Αν ή αρχή της αδράνειας δεν ισχύει, τότε το κινούμενο σώμα βρίσκεται σε μεταβαλλόμενη κίνηση.

Στην κλασική φυσική δεν υπάρχει απόλυτη ομαλή κίνηση. Αν δυο συστήματα συντεταγμένων κινούνται ομαλά μεταξύ τους, δεν έχει νόημα να πούμε: «Τούτο τα Σ.Σ. ηρεμεί και το άλλο κινείται». Αλλά αν δυο Σ.Σ. κινούνται ανομοιόμορφα το ένα ως προς το άλλο, τότε έχει νόημα να πούμε: «Αυτό το σώμα κινείται, και το άλλο ηρεμεί (ή κινείται ομαλά)». Η απόλυτη κίνηση έχει εδώ καθορισμένο νόημα. Οι δυσκολίες που αναφέραμε, δηλαδή οι δυσκολίες του συστήματος αδράνειας και της απόλυτης κίνησης, είναι στενά δεμένες μεταξύ τους. Η απόλυτη κίνηση γίνεται δυνατή μόνο με την ιδέα ενός συστήματος αδράνειας, για το οποίο ισχύουν οι νόμοι της φύσης.

Θα έτεινε κανείς να πιστέψει πως δεν υπάρχει διέξοδος απ' αυτές τις δυσκολίες. Η ρίζα τους βρίσκεται στο ότι οι νόμοι της φύσης ισχύουν μόνο για μια ειδική τάξη Σ.Σ., δηλαδή για τα συστήματα αδράνειας. Η δυνατότητα να ξεπεραστούν οι δυσκολίες, εξαρτάται από την απάντηση που δίνει κανείς στην ερώτηση: Μπορούμε να διατυπώσουμε τους νόμους της φυσικής με τέτοιο τρόπο, ώστε να ισχύουν για όλα τα Σ.Σ., δηλαδή όχι μονάχα για κείνα που κινούνται ομαλά, αλλά και για κείνα που κινούνται με οποιοδήποτε τρόπο μεταξύ τους; Αν αυτό μπορεί να γίνει, οι δυσκολίες μας θα ξεπεραστούν.

Τελικά αποδείχθηκε πως μπορούμε να δημιουργήσουμε μια φυσική στηριγμένη στη σχετικότητα πού να ισχύει για όλα τα Σ.Σ., μια φυσική οπού δε θα υπάρχει θέση για την απόλυτη, αλλά μονάχα για τη σχετική κίνηση.

Έχουμε μια τουλάχιστον ένδειξη, για το πώς μπορεί κανείς να οικοδομήσει τη νέα φυσική. Η πραγματική σχετικιστική φυσική πρέπει να ισχύει σε όλα τα Σ.Σ. και κατά συνέπεια και στην ειδική περίπτωση του συστήματος αδράνειας. Γνωρίζουμε ήδη τους νόμους για το τελευταίο. Οι νέοι γενικοί νόμοι, πού θα ισχύουν για όλα τα Σ.Σ., πρέπει να ανάγονται στους παλιούς γνωστούς νόμους, στην ειδική περίπτωση του συστήματος αδράνειας.

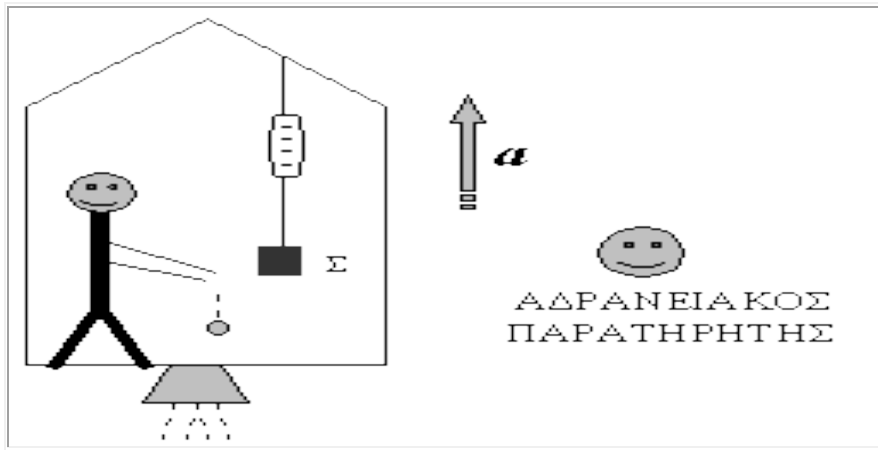
Το πρόβλημα να διατυπωθούν οι νόμοι της φυσικής για οποιοδήποτε Σ.Σ., λύθηκε από τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Η ειδική θεωρία της σχετικότητας εφαρμόζεται μονάχα σε συστήματα αδράνειας. Οι δυο θεωρίες δε μπορούν να έρχονται σε αντίθεση, γιατί πρέπει πάντα να συμπεριλαμβάνουμε τους παλιούς νόμους της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας, στους γενικούς νόμους για ένα σύστημα αδράνειας. Απλά το σύστημα αδράνειας, για το όποιο διατυπώθηκαν αρχικά οι νόμοι της φυσικής, δεν αποτελεί τώρα παρά μια οριακή ειδική περίπτωση.

Αλλά σκιαγραφώντας το δρόμο που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση της νέας θεωρίας, θα αναγκαστούμε να είμαστε πιο ασαφείς απ' ότι ως τώρα. Νέες δυσκολίες που προβάλλουν στην ανάπτυξη της επιστήμης, υποχρεώνουν τη θεωρία να γίνεται όλο και πιο αφηρημένη. Γιατί όσο πιο απλές και θεμελιώδεις γίνονται οι παραδοχές μας, τόσο γίνεται πιο περίπλοκο το μαθηματικό όργανο σκέψης.

Η νέα ιδέα είναι απλή: να δημιουργήσουμε μια φυσική πού να ισχύει για όλα τα Σ.Σ. Η πραγματοποίηση της συνεπιφέρει περιπλοκές στη μαθηματική διατύπωση και μας υποχρεώνει να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά μαθηματικά όργανα. Εδώ θα δείξουμε μονάχα τη σύνδεση ανάμεσα στην πραγματοποίηση αυτού του προγράμματος και σε δυο βασικά προβλήματα: τη βαρύτητα και τη γεωμετρία.

## **Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ**

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



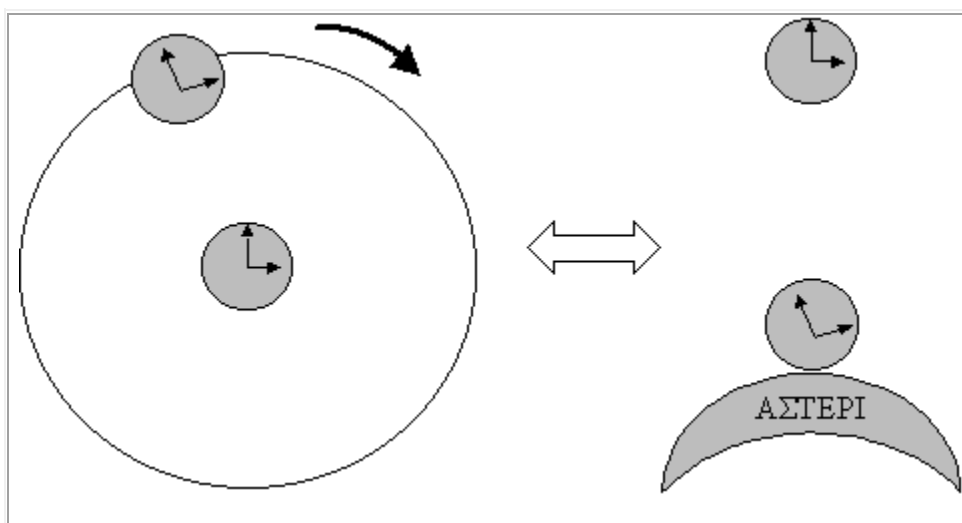
Ο αστροναύτης για να σταθεί όρθιος ή να περπατήσει πρέπει να κάνει τα ίδια ακριβώς που κάνει και όταν το διαστημόπλοιο είναι ακίνητο στη βάση εκτόξευσής του στη Γη. Αν αφήνει σώματα να πέφτουν θα πέφτουν όλα προς το «δάπεδο» με επιτάχυνση  $10\text{m/s}^2$  και το «βάρος» ενός σώματος  $\Sigma$  που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

Κατά τον Einstein ο τρόπος σκέψης του αστροναύτη δεν είναι ενάντια ούτε στη λογική, ούτε ενάντια στους γνωστούς νόμους της Μηχανικής. Αυτό προκύπτει από την ισότητα βαρυτικής και αδρανειακής μάζας. Για παράδειγμα ο αστροναύτης θα υποθέσει ότι η ένδειξη  $F$  του δυναμόμετρου προσδιορίζει το βάρος του σώματος γιατί αυτό δείχνει την δύναμη που ασκεί το σώμα στο δυναμόμετρο, άρα και το δυναμόμετρο στο σώμα. Το σώμα ισορροπεί σύμφωνα με τον αστροναύτη μέσα σε πεδίο βαρύτητας άρα η  $F$  ισούται κατά μέτρο με το βάρος. Από την άλλη μεριά ο αδρανειακός παρατηρητής θα πει ότι το σώμα μέσω του δυναμόμετρου είναι στερεωμένο στην οροφή και συνεπώς είναι αναγκασμένο να κινηθεί με αυτή την επιτάχυνση, συνεπώς η  $F$  είναι η αναγκαία δύναμη που ασκείται στο σώμα για να επιταχυνθεί. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει τρόπος για να διαπιστώσει ο αστροναύτης, ή οι επιβάτες του βαγονιού ή του περιστρεφόμενου δίσκου αν δέχονται αδρανειακές ή βαρυτικές δυνάμεις. Αυτή η υπόθεση του Einstein, ότι δηλαδή τα αποτελέσματα ενός βαρυτικού πεδίου είναι ισοδύναμα με αυτά ενός συστήματος αναφοράς, που επιταχύνεται σε κατεύθυνση αντίθετη αυτής του βαρυτικού πεδίου και βρίσκεται εκτός βαρυτικού πεδίου ονομάστηκε *Αρχή της Ισοδυναμίας*.

Ξεκινώντας από την αρχή της ισοδυναμίας προκύπτει ως συμπέρασμα η ισότητα βαρυτικής και αδρανειακής μάζας, δηλαδή η πρόταση για την ισότητα των δύο μαζών αποκτά φυσικό περιεχόμενο. Μια ακόμα άμεση συνέπεια είναι ότι ένα σώμα που κινείται ελεύθερα σε ένα βαρυτικό πεδίο μπορεί να ορίσει ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Πράγματι ένας άνθρωπος μέσα σε ένα ανελκυστήρα που πέφτει ελεύθερα δεν έχει κάποιο πείραμα με το οποίο να μπορεί να αποφασίσει αν πέφτει ελεύθερα σε βαρυτικό πεδίο ή αιωρείται ελεύθερα εκτός πεδίου βαρύτητας. Τα σώματα που αφήνει αιωρούνται και ο ίδιος νοιώθει αβαρής. Τα ίδια συμβαίνουν και στους αστροναύτες που περιφέρονται σε τροχιά γύρω από τη Γη.

## **ΒΑΡΥΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ**

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

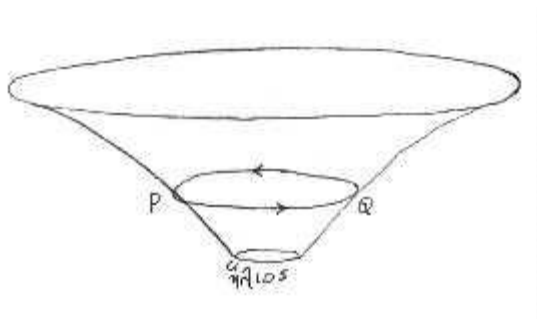




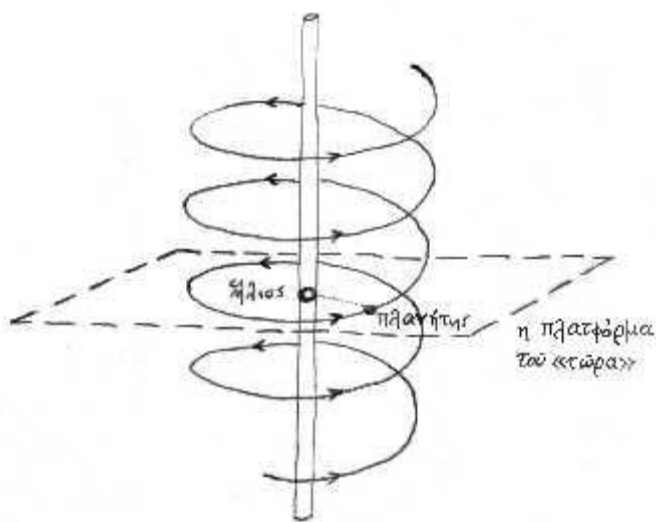
Από τη θεωρία της ειδικής σχετικότητας προκύπτει ότι το ρολόι στο κέντρο του δίσκου πάει σύμφωνα με τα ρολόγια του εδάφους, μιας και δεν κινείται ως προς αυτά. Όμως το ρολόι στην περιφέρεια θα καθυστερεί σε σχέση με τα ρολόγια του εδάφους (διαστολή του χρόνου). Αυτό το φαινόμενο γίνεται αντιληπτό και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

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

**Καμπυλότητα Χωροχρόνου:** Σύμφωνα με τη θεωρία της γενικής σχετικότητας, η βαρύτητα δεν αντιμετωπίζεται σαν δύναμη, αλλά σαν έμφυτη καμπυλότητα του χωροχρόνου. Μικρά σώματα σαν τους πλανήτες κινούνται σε τροχιές γύρω από τον ήλιο όχι από την έλξη του ήλιου, αλλά επειδή απλούστατα, στον καμπυλωμένο χωροχρόνο γύρω από τον ήλιο δεν υπάρχουν ευθείες κοσμικές γραμμές. Μια ευθεία γραμμή μπορεί να οριστεί σαν η συντομότερη απόσταση ανάμεσα σε 2 σημεία. Στον καμπυλωμένο χωροχρόνο οι κινήσεις των πλανητών αντιπροσωπεύονται από τις γεωδαισιακές γραμμές - το ανάλογο των συντομότερων αποστάσεων σε καμπύλες επιφάνειες. Έτσι, οι πλανήτες, σαν ελεύθερα σώματα, υπακούουν στον πρώτο νόμο του Newton, τον νόμο της αδράνειας - όπως αυτός μεταφέρεται στον καμπυλωμένο χωροχρόνο. Δύο διαγράμματα ίσως μας βοηθήσουν:



Το πρώτο δείχνει πάνω στη σελίδα μας τον τρισδιάστατο χώρο γύρω από τον ήλιο, καμπυλωμένο από τη βαρύτητα (με την καμπυλότητα υπερβολικά τονισμένη). Εξαιτίας της καμπυλότητας, ένας πλανήτης στο P που έχει την τάση να κινηθεί προς τα δεξιά πάνω σε ευθεία γραμμή, αντί να κινηθεί έτσι, θ' ακολουθήσει κάποια καμπύλη τροχιά PQ. Έτσι, μπορούμε ίσως ν' αντιληφθούμε γιατί ένας πλανήτης διαγράφει μια τροχιά γύρω από τον ήλιο. Το διάγραμμα όμως αυτό είναι ελαττωματικό, γιατί δεν δείχνει ούτε τον χρόνο ούτε την καμπυλότητά του. Έτσι είναι παραπλανητικό, γιατί η κύρια αιτία της πλανητικής κίνησης δεν είναι τόσο η καμπύλωση του χώρου, όσο η καμπύλωση του χρόνου που, όπως είδαμε, συνδέεται με τη μεταβολή της ταχύτητας του φωτός σ' ένα βαρυτικό πεδίο. Η καμπυλότητα του χρόνου δεν μπορεί εύκολα να παρασταθεί γραφικά. Χωρίς να τη δείξουμε, ας δούμε στη συνέχεια και το δεύτερο διάγραμμα με τον χρόνο σαν κατακόρυφο άξονα πάνω στη σελίδα μας:



Η διπλή γραμμή είναι η κοσμική γραμμή του ήλιου μέσα στο χρόνο. Η ελικοειδής γραμμή παριστάνει την κοσμική γραμμή ενός πλανήτη, μια γεωδαισιακή γραμμή του καμπυλωμένου χωροχρόνου γύρω από τον ήλιο. Ας φανταστούμε ότι είμαστε πάνω σε μια πλατφόρμα που παριστά το «παρόν» μας. Επειδή το παρόν μας κινείται προς

το μέλλον, η πλατφόρμα στο διάγραμμα θα ανυψωθεί, αφού παραστήσαμε τον χρόνο με διεύθυνση προς τα πάνω. Καθώς η πλατφόρμα ανυψώνεται, η έλκα θα τη συναντήσει σε διαδοχικά σημεία που από την πλατφόρμα θα φαίνονται σαν ένα μοναδικό σημείο της τροχιάς γύρω από τον ήλιο. Καθένα από τα δυο αυτά διαγράμματα ήταν εν γνώσει μας ελαττωματικό. Παρόλ' αυτά, το καθένα με τον τρόπο του μας δίνει κάποια ένδειξη περί τίνος πρόκειται, και αν τα συγκρατήσουμε - έστω και ασαφή - στο μυαλό μας, θα έχουμε μια όχι και τόσο κακή εικόνα του βαρυτικού κόσμου του Einstein.

Αν οι εξισώσεις της θεωρίας της γενικής σχετικότητας περιορισθούν στην περίπτωση όπου τα πεδία βαρύτητας πρέπει να θεωρούνται αδύνατα και όπου όλες οι μάζες μετακινούνται, σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων, με ταχύτητες που είναι πολύ μικρές συγκρινόμενες μ' αυτή του φωτός, έχουμε τη θεωρία του Newton σαν πρώτη πολύ καλή προσέγγιση, η οποία έτσι βγαίνει χωρίς καμία υπόθεση, ενώ ο Newton ήταν υποχρεωμένος να υποθέσει ότι η έλξη ανάμεσα σε υλικά σημεία είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασής τους. Αν αυξηθεί η ακρίβεια υπολογισμού, διαπιστώνονται διαφορές από τη θεωρία του Newton, που βέβαια ξεφεύγουν ακόμη όλες από την παρατήρηση εξαιτίας της μικρότητάς τους. Αυτή η συμφωνία πάει τόσο μακριά που δεν βρέθηκαν ως τώρα παρά λίγες συνέπειες της θεωρίας της σχετικότητας προσιτές στο πείραμα όπου δεν οδηγεί η προ της σχετικότητας Νευτώνεια φυσική, παρά τη βαθιά διαφορά των βασικών υποθέσεων των δύο θεωριών. Η θεωρία της σχετικότητας βρήκε τεράστια εφαρμογή στον υποατομικό κόσμο των ιλιγγιωδών ταχυτήτων.

### **Μαύρες Τρύπες**

Το πιο εντυπωσιακό αποτέλεσμα της κυρτότητας του χωροχρόνου, στην περιοχή της αστροφυσικής είναι ο θάνατος των άστρων. Πεθαίνοντας από βαρύτητα, το άστρο γίνεται όλο και πιο πυκνό. Η δύναμη της βαρύτητας στην επιφάνειά του γίνεται συνεχώς ισχυρότερη και, κατά συνέπεια, ο χωροχρόνος γύρω του υιοθετεί μιαν όλο και μεγαλύτερη κυρτότητα. Η αυξανόμενη βαρύτητα στην επιφάνεια του άστρου εμποδίζει οποιαδήποτε διαφυγή σωματιδίων ή ενέργειας προς το διάστημα. Από ένα σημείο κι έπειτα, ακόμη και το φως δεν μπορεί να ξεφύγει από την επιφάνειά του, εφόσον η βαρύτητα είναι ισχυρότερη από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η επικοινωνία με τα άλλα άστρα, και γενικά με τον εξωτερικό χώρο, παύει να υφίσταται. Πράγμα που σημαίνει ότι μας είναι αδύνατο να δούμε ένα τέτοιο άστρο

και για τον λόγο αυτό το ονομάζουμε μαύρη τρύπα. Οι μαύρες τρύπες αντιπροσωπεύουν τις ιδανικές εκφράσεις της σχετικιστικής θεωρίας. Η ισχυρή κυρτότητα του χωροχρόνου στην περιοχή τους δεν περιορίζει μόνο την εκπομπή του φωτός, αλλά παράλληλα εξαφανίζει την έννοια του χρόνου. Αν υποθεθεί ότι είχαμε στη διάθεσή μας ένα εκπληκτικό ρολόι, ικανό να τοποθετηθεί και να λειτουργήσει στην επιφάνεια ενός άστρου που πεθαίνει, θα βλέπαμε πως, μετά τη διακοπή της εκπομπής του φωτός, θα σταματούσαν και οι χτύποι του ρολογιού, όχι εξαιτίας κάποιας βλάβης, αλλά επειδή στα πλαίσια ενός τόσο κυρτού και τόσο πυκνού σώματος όπως η μαύρη τρύπα, η ροή του χρόνου χάνει τη σημασία της και παύει να υφίσταται. Το όλο θέμα και πάλι ανάγεται στη φύση και στη θέση του παρατηρητή. Και αυτό, γιατί στο εσωτερικό του άστρου που πεθαίνει δεν παρατηρείται τίποτε το αφύσικο, ακόμη και όταν η εκπομπή του φωτός γίνει αδύνατη. Ο χρόνος στο εσωτερικό της μαύρης τρύπας συνεχίζει ν' ακολουθεί τη φυσιολογική του ροή. Ας θέσουμε τώρα το ερώτημα: Πότε πεθαίνει ένα άστρο στην πραγματικότητα; Από την άποψη της σχετικιστικής θεωρίας που μας προσέφερε την παραπάνω περιγραφή, το ερώτημα αυτό δεν έχει απάντηση ούτε νόημα. Η διάρκεια της ζωής ενός άστρου που πεθαίνει είναι σχετική και εξαρτάται από το πλαίσιο αναφοράς που χρησιμοποιεί ο παρατηρητής. Στη γενική θεωρία της σχετικότητας οι κλασσικές έννοιες του χώρου και του χρόνου, σαν απόλυτες και ανεξάρτητες φυσικές οντότητες, διαγράφονται οριστικά. Από τη μια μεριά, όλες οι μετρήσεις που αφορούν το χώρο και το χρόνο είναι σχετικές και εξαρτώνται από την κατάσταση της κίνησης του παρατηρητή. Από την άλλη μεριά, η όλη δομή του χωροχρόνου συνδέεται άμεσα και αδιαχώριστα με τη διανομή της μάζας. Ο χώρος είναι κυρτός σε μιαν ανεξάρτητη ποικιλία καμπυλότητας και ο χρόνος ακολουθεί διαφορετικούς ρυθμούς ροής στα διαφορετικά σημεία του σύμπαντος. Επίσης, εφόσον τα υποατομικά σωματίδια μπορούν να κινηθούν σύμφωνα ή αντίθετα με τη ροή του χρόνου, όπως μπορούν να κινηθούν δεξιά και αριστερά μέσα στον χώρο, η μονοδρομική αντίληψη του χρόνου χάνει τη σημασία της! Οι περισσότεροι πιστεύουν ότι ο χρόνος κυλάει. Στην πραγματικότητα μένει εκεί που βρίσκεται. Για το απόλυτο δεν υπάρχει ούτε χρόνος, ούτε χώρος, ούτε αιτιότητα.

Για να κατανοήσουμε ποιοτικά τις μαύρες τρύπες πρέπει να σκεφτούμε ότι ένα σώμα ανεξάρτητα της μάζας του, για να ξεφύγει της βαρυτικής έλξης ενός ουράνιου σώματος χρειάζεται ορισμένη ταχύτητα διαφυγής. Αν υποθέσουμε ότι η ταχύτητα διαφυγής πλησιάζει την έσχατη ταχύτητα που είναι ή ταχύτητα του φωτός,  $c$ , τότε

κανένα σώμα., ούτε το φως, δεν μπορεί να ξεφύγει, συνεπώς το ουράνιο σώμα δεν "θα φαίνεται" θα είναι μια μαύρη τρύπα. Το αποτέλεσμα της Γενικής θεωρίας δίνει ότι αυτό συμβαίνει αν η ακτίνα του ουρανίου σώματος είναι μικρότερη ή ίση από την κρίσιμη ακτίνα.

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

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

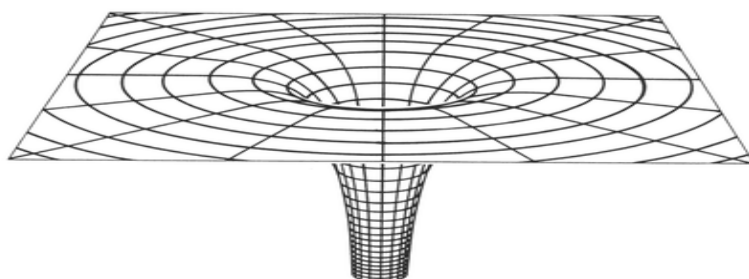
Πως όμως μπορεί να γίνει αυτό, δηλαδή να συμπιεστεί τόσο πολύ η ύλη; Η απάντηση είναι ότι όταν ένας αστέρας καταναλώσει τα πυρηνικά του καύσιμα δεν μπορεί να αναπτυχθεί η απαραίτητη θερμοκρασία και πίεση για να αντισταθμίζεται η έλξη των ίδιων των συστατικών του και αρχίζει έτσι η βαρυτική του κατάρρευση.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

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

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

## Κενό και Ύλη

**Κενό:** Στη φυσική, ως κενό ορίζεται η απόλυτη απουσία ύλης σε μια περιοχή του χώρου. Το τέλειο κενό (ή απόλυτο κενό) είναι μια εξιδανίκευση που φαίνεται πως δεν μπορεί να υπάρξει στην πραγματικότητα του δικού μας σύμπαντος, αλλά προσεγγίζεται μερικώς στο εξώτερο διάστημα. Οι φυσικοί χρησιμοποιούν τον όρο μερικό κενό για να περιγράψουν το ατελές κενό που παρατηρείται στον πραγματικό κόσμο. Μια πλήρης περιγραφή της ατελούς αυτής φυσικής κατάστασης θα απαιτούσε να προσδιοριστούν περισσότερες παράμετροι, όπως η θερμοκρασία καθώς στην ιδανικότερη παρατηρήσιμη κατάσταση κενού, αυτήν του διαστήματος, υπάρχουν πάντα μερικά άτομα υδρογόνου ανά κυβικό μέτρο. Ακόμα όμως κι αν αφαιρούσαμε όλη την ύλη με τη γνωστή μορφή της από τον χώρο, σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, τα ιδεατά σωματίδια που εμφανίζονται για απειροελάχιστο χρόνο και ξανά χάνονται και η σκοτεινή ενέργεια της οποίας τα αποτελέσματα είναι παρατηρήσιμα δεν μας αφήνουν να ελπίσουμε για δυνατότητα δημιουργίας πραγματικού κενού στον κόσμο που γνωρίζουμε. **Ύλη:** Η ύλη πριν τον 20ό αιώνα οριζόταν ως το συστατικό από το οποίο αποτελούνται όλα τα φυσικά αντικείμενα που έχουν μάζα (υλικά αντικείμενα), τα οποία διαχωρίζονται από ενεργειακά φαινόμενα όπως ο ήχος ή το φως. Επειδή η μάζα μπορεί να αναδύεται από σωματίδια με πρακτικά ανύπαρκτη μάζα ηρεμίας, όταν αυτά αποκτούν μεγάλες ταχύτητες, και επειδή σωματίδια που έχουν μάζα δεν ορίζονται κατ' ανάγκη ως ύλη, καθώς δεν μπορούν να υφίστανται αυθύπαρκτα. Σίγουρα ο όρος ύλη χρησιμοποιείται για τα αντικείμενα που απαρτίζονται από άτομα και για τα υποατομικά σωματίδια όπως τα πρωτόνια, τα νετρόνια και τα ηλεκτρόνια, τα οποία εμφανίζουν, σε ηρεμία, εκτός από μάζα, και την ιδιότητα του να καταλαμβάνουν όγκο στον χώρο. Μακροσκοπικά, από ύλη αποτελούνται τα φυσικά σώματα όπως μία πέτρα ή το νερό, ουράνια σώματα όπως πλανήτες, αστέρες, γαλαξίες, κλπ. Η αντιύλη είναι επί της ουσίας ύλη που στο σύμπαν μας εμφανίζει ιδιότητες που την κάνουν να εξουδετερώνεται στην επαφή της με την ύλη, παράγοντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, καθώς και να εμφανίζει διαφορετικό χρόνο ζωής από την ύλη



(διασπάται πιο γρήγορα). Φαίνεται επίσης να υπάρχει και η σκοτεινή ύλη, όμως δεν γνωρίζουμε από τι αποτελείται αυτή ή πώς ακριβώς αλληλεπιδρά με το δικό μας σύμπαν. Οι ατομικές αντιλήψεις τόσο του Δημόκριτου όσο και του Newton βασίστηκαν στη θεμελιώδη διάκριση ανάμεσα στην ύλη και τον «κενό» χώρο. Από την άποψη της γενικής σχετικότητας, η διάκριση αυτή καταργείται. Όπου υπάρχει ένα σώμα με μεγάλη μάζα, εκεί θα υπάρχει αναγκαστικά κι ένα πεδίο βαρύτητας. Και αυτό το πεδίο εκδηλώνεται σαν η κυρτότητα του χώρου που περιβάλλει το σώμα αυτό. Ωστόσο δεν θα πρέπει να νομίζουμε ότι το πεδίο «γεμίζει» τον χώρο και τον υποχρεώνει να «γίνει» κυρτός. Δεν υπάρχει διάκριση ανάμεσα στις 2 έννοιες: Το πεδίο είναι ο κυρτός χώρος. Στη γενική σχετικότητα, το πεδίο βαρύτητας και η δομή ή η γεωμετρία του χώρου ταυτίζονται. Στις εξισώσεις πεδίου του Einstein εκφράζονται με την ίδια μαθηματική ποσότητα. Λέει σχετικά ο Einstein: «Είμαστε υποχρεωμένοι να δούμε την ύλη σαν σύνθεση των περιοχών του χώρου, όπου το πεδίο εμφανίζει μιαν ιδιαίτερη ένταση. Σε αυτό το νέο είδος φυσικής δεν υπάρχει θέση για το πεδίο και την ύλη. Η μόνη πραγματικότητα είναι το πεδίο». Η ανακάλυψη πως η μάζα δεν είναι τίποτα περισσότερο παρά μια μορφή ενέργειας μας υποχρέωσε να μεταβάλουμε ριζικά τις απόψεις μας ως προς τα σωματίδια. Στη σύγχρονη φυσική, η μάζα δεν συνδέεται πλέον με την υλική ουσία, και, κατά συνέπεια, τα σωματίδια δεν θεωρούνται πλέον σαν τα θεμελιώδη συστατικά της ύλης, αλλά σαν συμπυκνώσεις ενέργειας. Τα σωματίδια δεν πρέπει να απεικονίζονται σαν στατικά τρισδιάστατα αντικείμενα, σαν αναρίθμητες μικροσκοπικές μπαλίτσες ή κόκκοι άμμου, αλλά σαν τετραδιάστατες οντότητες του χωροχρόνου. Από την άποψη του χώρου μοιάζουν με αντικείμενα που διαθέτουν κάποια μάζα, ενώ από την άποψη του χρόνου μοιάζουν περισσότερο σαν εξελικτικές διαδικασίες που απαιτούν την αντίστοιχη για την πραγματοποίησή τους ενέργεια. Η θεωρία των κβάντα απέδειξε ότι τα σωματίδια δεν είναι απομονωμένοι κόκκοι ύλης, αλλά πρότυπα πιθανοτήτων, δεσμοί ενός αδιάσπαστου κοσμικού πλέγματος. Η θεωρία του πεδίου, που μας προτείνει η σύγχρονη φυσική, μας υποχρεώνει να εγκαταλείψουμε την κλασσική διάκριση ανάμεσα στο κενό και στην ύλη, μάλιστα δε από τη στιγμή που αποδείχθηκε πως τα στοιχειώδη σωματίδια μπορούν να γεννηθούν αυθόρμητα από το κενό, χωρίς την παρουσία νουκλεονίου ή άλλου ισχυρού σωματιδίου. Το κενό δεν είναι κενό! Αντίθετα περιέχει έναν απεριόριστο αριθμό σωματιδίων που δημιουργούνται και εξαφανίζονται ασταμάτητα. Μια βουδιστική σούτρα λέγει: «Η μορφή είναι το κενό, το κενό είναι η μορφή. Το κενό δεν διαφέρει από τη μορφή, η μορφή δεν διαφέρει

από το κενό. Ό,τι είναι το κενό είναι και η μορφή, ό,τι είναι η μορφή είναι και το κενό!». Το κενό είναι στην πραγματικότητα ένα ολοζώντανο κενό! Οι περισσότεροι σύγχρονοι φυσικοί θεωρούν την ανακάλυψη του δυναμικού χαρακτήρα του κενού σαν τη σημαντικότερη στην ιστορία της επιστήμης. Το κενό έπαψε να θεωρείται σαν το παθητικό και αμέτοχο πλαίσιο της διαδραμάτισης των φυσικών φαινομένων και αναγνωρίστηκε σαν μια δυναμική κατάσταση πρωταρχικής σημασίας. «Όποιος μάθει πως το μεγάλο κενό είναι γεμάτο από κάτι, καταλαβαίνει πως δεν υπάρχει ανυπαρξία» (Τσανγκ Τσάι). Όταν είμαστε υγιείς δεν αντιλαμβανόμαστε τα διαφορετικά μέρη του σώματός μας, αλλά αντιλαμβανόμαστε το σώμα μας σαν ένα αδιάσπαστο σύνολο. Η αντίληψη αυτή δημιουργεί το αίσθημα της υγείας και της χαράς.

## **Η Δομή του Διαστήματος Σύμφωνα με τη Θεωρία της Γενικής Σχετικότητας**

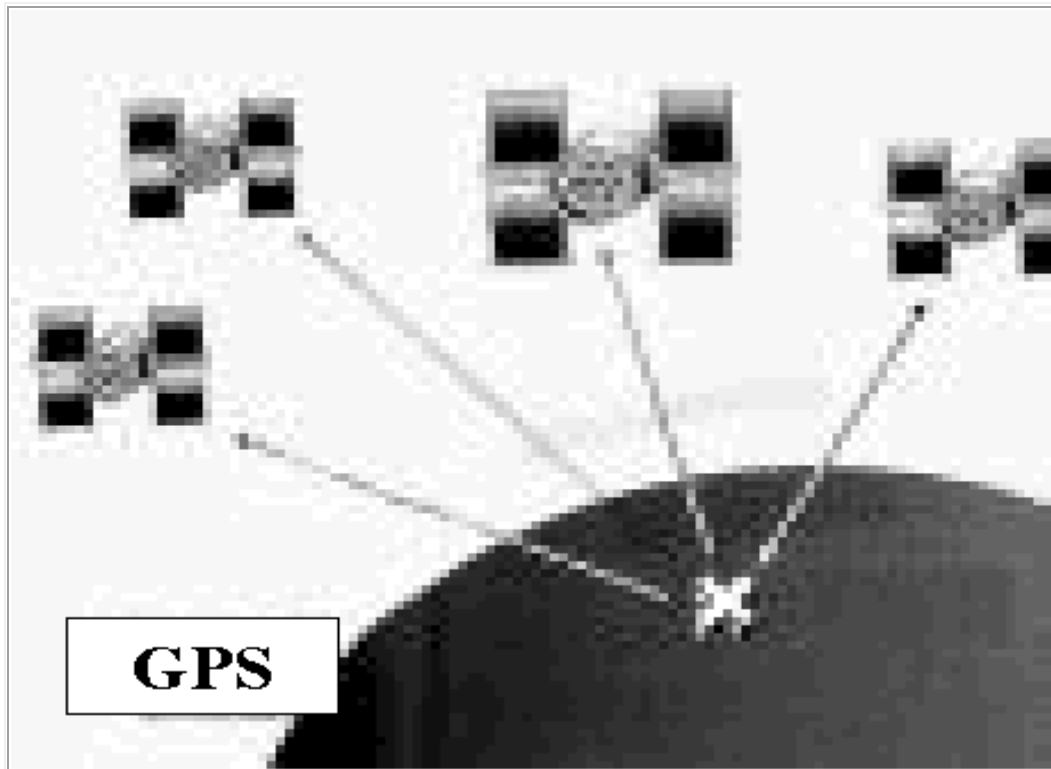
**Διάστημα:** Με τον όρο διάστημα ή πιο επιστημονικά εξωτερικό διάστημα περιγράφεται ο αχανής χώρος όπου κινούνται τα ουράνια σώματα και, ακριβέστερα, οι σχετικά κενές περιοχές μεταξύ των ουρανίων σωμάτων, πέρα από αυτά και τις ατμόσφαιρές τους. Σε αντίθεση με τη συνήθη αντίληψη, το διάστημα δεν είναι εντελώς άδειο, δηλαδή ένα τέλειο κενό, αλλά εμφανίζει περιεκτικότητα (πολύ μικρής πυκνότητας) σε σωματίδια, κυρίως πλάσματος υδρογόνου, ενώ περιέχει ακόμα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτόνια), καθώς και τα πολύ μικρής μάζας νετρίνα. Μακροσκοπικά, σε αυτό περιέχονται επίσης γαλαξίες και νεφελώματα. Σύμφωνα με νεότερες θεωρίες, οι γαλαξίες και τα νεφελώματα αποτελούν μόλις το 5% της πραγματικής μάζας του σύμπαντος· το υπόλοιπο 95% αποτελείται, σύμφωνα με τις θεωρίες αυτές, από σκοτεινή ύλη και σκοτεινή ενέργεια, οι οποίες ωστόσο μέχρι σήμερα δεν έχουν παρατηρηθεί και η ύπαρξή τους δεν έχει επιβεβαιωθεί. Σύμφωνα με τη θεωρία της γενικής σχετικότητας, οι γεωμετρικές ιδιότητες του χώρου δεν είναι ανεξάρτητες, επηρεάζονται από την ύλη. Συνεπώς δεν υπάρχει ζήτημα, στον κόσμο μας, ακριβούς ισχύος της Ευκλείδειας γεωμετρίας. Είναι όμως δυνατό ο κόσμος μας να διαφέρει λίγο μόνον από έναν κόσμο Ευκλείδειο, και η υπόθεση αυτή είναι πολύ πιθανή διότι ακόμη και μάζες του μεγέθους του Ήλιου μας έχουν μια πολύ περιορισμένη επίδραση στη μετρική του περιβάλλοντος διαστήματος. Θα μπορούσαμε να φανταστούμε τον κόσμο μας, πως συμπεριφέρεται, από γεωμετρικής άποψης, σαν μια επιφάνεια ακανόνιστα καμπυλωτή στη λεπτομέρεια, αλλά που δεν



ξεφεύγει πουθενά με υπολογίσιμο τρόπο από ένα επίπεδο, όπως για παράδειγμα η επιφάνεια μιας λίμνης ταραγμένης από μικρά κύματα. Ο υπολογισμός δείχνει πως αν η ύλη ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη, ο κόσμος θα έπρεπε αναγκαία να είναι σφαιρικός (ή ελλειπτικός). Επειδή όμως η ύλη είναι στη λεπτομέρεια ανώμαλα καταμερισμένη, ο πραγματικός κόσμος ξεφεύγει στην πραγματικότητα από το σφαιρικό σχήμα, θα είναι σχεδόν σφαιρικός. Θα πρέπει όμως απαραίτητα να είναι πεπερασμένος αλλά όχι περιορισμένος. Πράγματι, υπάρχει δυνατότητα ενός πεπερασμένου κόσμου και εντούτοις μη περιορισμένου. Ας θυμηθούμε τους κόσμους των δύο εντόμων: Για την ψείρα που ζει στη σφαίρα ο κόσμος είναι πεπερασμένος και εν τούτοις χωρίς όρια! Αυτή η σφαιρική επιφάνεια της ψείρας είναι δύο διαστάσεων. Εύκολα πειθόμαστε ότι το σφαιρικό διάστημα με τρεις διαστάσεις είναι τελείως ανάλογο μ' αυτό των δύο διαστάσεων. Είναι περιορισμένο, αλλά δεν έχει άκρη (όρια). Συμπεραίνεται από αυτά που είπαμε ότι κλειστά διαστήματα χωρίς όρια είναι δυνατά. Ανάμεσα σ' αυτά, το σφαιρικό διάστημα (ή ελλειπτικό) διακρίνεται για την απλότητά του, δεδομένου ότι όλα τα σημεία είναι ισοδύναμα.

## **GPS - Global Positioning System**

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



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

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

*Εγκυκλοπαίδεια: ΠΑΙΔΕΙΑ (τόμος 1)*

*ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (τόμος 14)*

*ΑΛΦΑ (τόμος 1)*

*ΕΝΤΥΠΑ-ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ: ΕΠΕΝΔΥΤΗΣ (εφημερίδα)*

*SYNDAY (περιοδικό)*

*ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΒΗΜΑ*

**Οβερμπάι Ντένις (2002), «Ερωτευμένος Αϊνστάιν», Εκδόσεις Πατάκη.**

**Holton Gerald (1973), «Kepler to Einstein», Harvard University Press.**

**Miller Arthur (1981), «Albert Einstein special of relativity», Addison Wesley**

*INTEPNET:*

*[www.geocities.com-www.physics4u.gr-users.otenet.gr/~voyager/einstein.htm-45k](http://www.geocities.com-www.physics4u.gr-users.otenet.gr/~voyager/einstein.htm-45k)*

*<http://www.usnews.com/usnews/issue/021209/misc/9einstein.htm>*

*<http://galileo.ccs.ucy.ac.cy/~se99at2/einstein4.htm>*

