

Οημήτρης Ε. Κρέττας
Ορ. Φυσικός

ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Με τα Μαθηματικά του Λυκείου



ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΖΗΤΗ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Δύο λόγια πριν αρχίσουμε

Η προσπάθεια κατανόησης του κόσμου είναι η πιο δελεαστική σχέση του ανθρώπου με τη φύση. Η σχέση αυτή άρχισε από τότε που ο άνθρωπος πρωτοκοίταξε τ' άστρα, είναι διαρκής και θα συνεχίζεται όσο υπάρχει ο άνθρωπος.

Το ψάξιμο για την ανεύρεση της αλήθειας οδηγεί σε κόσμους μαγικούς, όπου κάθε αλήθεια οδηγεί στην επόμενη. Μια αέναη πορεία οδηγεί στη γνώση. Οι θεωρίες σφραγίζουν τους αιώνες και οι δυο επαναστατικές θεωρίες που σημάδεψαν τον εικοστό αιώνα, από την αρχή του, είναι η Θεωρία της Σχετικότητας και η Κβαντομηχανική. Δυο θεωρίες οι οποίες με την φαινομενικά παράλογη λογική τους και τις τολμηρές παραδοχές τους έδωσαν απλές λύσεις σε αξεπέραστα αδιέξοδα της Φυσικής, έτσι που σήμερα ακόμα και η πιο απίστευτη αλήθεια να θεωρείται αυτονόητη.

Θα ασχοληθούμε με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας, η οποία όχι μόνο έδωσε διέξοδο σε προβληματισμούς, αλλά και νέα διάσταση στη Φυσική, δημιούργησε νέο τρόπο σκέψης. Η θεωρία αυτή είναι έργο ενός μόνο ανθρώπου, του *Albert Einstein* (14-3-1879, 18-4-1955) και αποτελεί κορύφωση του ανθρώπινου πνεύματος.

Εισαγωγικά θα ξεκινήσουμε με φαινόμενα που οδήγησαν τη Φυσική σε αντιφάσεις και στη συνέχεια με τη γόνιμη συμβολή της Θεωρίας της Σχετικότητας στο οικοδόμημα της Σύγχρονης Φυσικής. Θα αναφερθούμε στους μετασχηματισμούς Lorentz και στις συνέπειες που προκύπτουν, με την αποδοχή των θεμελιωδών απόψεων της Θεωρίας της Σχετικότητας. Στη συνέχεια θα επεκταθούμε στους τομείς της Μηχανικής, την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας, την ύλη και την αντιύλη. Θα συνδέσουμε τον Ηλεκτρισμό με τον Μαγνητισμό, δείχνοντας ότι η εμφάνιση του Μαγνητισμού είναι σχετιστικό φαινόμενο και θα συνεχίσουμε με φαινόμενα της Οπτικής. Θα μας απασχολήσει ο ευρηματικός τρόπος, με τον οποίο γίνεται η γεωμετρική αντιμετώπιση της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας και τα τετρανύσματα, που βοηθούν στη γενίκευση των μετατροπών, στη Θεωρία της Σχετικότητας, από ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς σε ένα άλλο. Τέλος θα κάνουμε μια σύντομη σύνδεση της Θερμοδυναμικής με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας.

Η ανάπτυξη της Θεωρίας της Σχετικότητας δεν μπορεί να γίνει χωρίς τη χρήση μαθηματικών απλών ή προχωρημένων. Η μη μαθηματική ανάπτυξη της Θεωρίας της Σχετικότητας οδηγεί σε παρανοήσεις και η πλήρης μαθηματική ανάπτυξη σε δυσκολίες. Η ομορφιά και η γοητεία της θεωρίας αυτής είναι συνυφασμένη με τη χρήση των μαθηματικών.

Διαλέξαμε τη μαθηματική ανάπτυξη που αρκείται στη χρήση των μαθηματικών που διδάσκονται στο Λύκειο. Έτσι το βιβλίο αυτό απευθύνεται σε όσους έχουν ακολουθήσει θετικές επιστήμες και σε όσους έχουν τελειώσει το Λύκειο και επιθυμούν να ασχοληθούν με τη συναρπαστική αυτή θεωρία.

Οι μαθηματικές αποδείξεις κάνουν φανερή την αλήθεια, μέσα από ποσοτικές σχέσεις. Πολλές κουραστικές αποδείξεις μπορούν να παραληφθούν από τον αναγνώστη, χωρίς όμως να αγνοηθεί το αποτέλεσμα, που συνδέει με ποσοτικές σχέσεις τα διάφορα γεγονότα. Η επανάληψη, όπου γίνεται, στοχεύει στην εξοικείωση με τις πρωτόγνωρες απόψεις της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας.

Έχει γίνει ανάπτυξη παραδειγμάτων, τόσο στη αριθμητική όσο και στη γεωμετρική αντιμετώπιση των θεμάτων, για να γίνει καλύτερα κατανοητή η διαφορά μεταξύ της Κλασικής Φυσικής και της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας.

Επειδή το αλάθητο είναι ανέφικτο, η επιείκεια και η κατανόηση είναι απαραίτητες, κατά τα μελέτη της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας, μέσα από αυτό το βιβλίο.

Κάθε παρατήρησή σας που συμβάλλει στη βελτίωση - διόρθωση του βιβλίου αυτού με χαρά μας θα τη λάβουμε υπόψη και σας ευχαριστούμε εκ των προτέρων.

Με ευχαριστίες για τον αναγνώστη

Δημήτρης Κρέτζας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

	σελίδα
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Χώρος.....	2
1.3 Χρόνος.....	3
1.4 Σύστημα συντεταγμένων και σύστημα αναφοράς Αδρανειακά συστήματα αναφοράς	5
1.5 Μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου	7
1.6 Αρχή της Σχετικότητας του Γαλιλαίου	9
1.7 Μη αδρανειακά συστήματα αναφοράς	11
1.8 Απόλυτος χώρος – Απόλυτη κίνηση	13
1.9 Ο αιθέρας	17
1.10 Η ταχύτητα του φωτός	18
α) Μέθοδος Römer.....	19
Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός από τις εκλείψεις του δορυφόρου του Δία Ιώ	19
Απόλυτη κίνηση του ηλιακού συστήματος	19
β) Το φαινόμενο Doppler	21
γ) Διάθλαση	22
* Αλλαγή της εστιακής απόστασης των φακών	22
δ) Συμμετοχή της πηγής στην ταχύτητα του φωτός	23
ε) Το πείραμα του Hoek.....	24
στ) Το πείραμα του Fizeau.....	26
ζ) Η αποπλάνηση του φωτός	27
η) Το πείραμα του Michelson	33
1.11 Η υπόθεση της συστολής	37
1.12 Το πείραμα των Sagnac-Garress	39

ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ LORENTZ – ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ

2.1	Γενικά.....	45
2.2	Αξιώματα της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας.....	46
2.3	Συγχρονισμός – Ταυτοχρονισμός.....	47
	Γενικά.....	47
	α) Συγχρονισμός.....	48
	β) Ταυτοχρονισμός.....	50
2.4	Μέτρηση μήκους και χρόνου.....	53
	Γενικά.....	53
	α) Διαστολή του χρόνου.....	54
	β) Συστολή του μήκους.....	58
	γ) Παρατηρήσεις.....	61
2.5	Μετασχηματισμοί Lorentz - Einstein.....	65
Συνέπειες των μετασχηματισμών Lorentz		
2.6	Μέτρηση του χρόνου.....	70
2.7	Μέτρηση του μήκους.....	73
	Κλείσιμο ράβδου σε κοντύτερο σωλήνα.....	74
	Κίνηση στερεάς σφαίρας.....	76
	Όγκος.....	77
	Γωνία ράβδου με τη διεύθυνση κίνησης.....	78
2.8	Περισσότερα για τη μέτρηση του χρόνου.....	78
2.9	Περισσότερα για τη μέτρηση του μήκους.....	83
2.10	Το ταυτόχρονο – Αιτιότητα.....	85
2.11	Ο ταξιδιώτης του Langevin – Το παράδοξο των διδύμων.....	87
	Το οπτικό ρολόι.....	89
	Το παράδοξο των διδύμων ως πραγματικό γεγονός.....	92
2.12	Το μόνιο ως ταξιδιώτης του Langevin.....	93
2.13	Ταξίδι στ' άστρα.....	95
2.14	Η αναλλοίωτη ποσότητα μεσοδιάστημα – Συμπεράσματα.....	96
	Το μεσοδιάστημα.....	96
	Παρατηρήσεις.....	97
2.15	Σύνθεση ταχυτήτων.....	103
	Παρατηρήσεις.....	104
	Διαδοχικοί μετασχηματισμοί Lorentz.....	106

	* Ταχύτητα κάθετα στη σχετική κίνηση των Α.Σ.Α.....	108
	* Συνολική ταχύτητα.....	108
2.16	Η ταχύτητα διάδοσης του φωτός ως όριο	110
	* Ταχύτητα αντίθετα κινουμένων σωμάτων.....	111
	* Κίνηση ράβδου μεγάλου μήκους	111
	* Ταχύτητα σημείων περιστρεφόμενης ράβδου.....	112
	* Ταχύτητα τομής ράβδου και ευθείας.....	112
	* Ταχύτητα φωτεινού σήματος σε περιφέρεια κύκλου	112
	* Φαινόμενη ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο κενό.....	113
2.17	Διεύθυνση της ταχύτητας.....	115
	Κατακόρυφη κίνηση, κατακόρυφης ράβδου, με σταθερή ταχύτητα.....	116
	Κατακόρυφη κίνηση, οριζόντιας ράβδου, με σταθερή ταχύτητα.....	117
	Κίνηση παράλληλα προς τον άξονα y' , ράβδου παράλληλης του άξονα x'	120
2.18	Εξήγηση των πειραμάτων Michelson, Fizeau, αποπλάνησης.....	123
	α) Πείραμα του Michelson.....	123
	β) Πείραμα του Fizeau	123
	γ) Αποπλάνηση του φωτός	123
2.19	Σχήμα κινουμένων σωμάτων	125
	Φωτογραφία κινούμενου σώματος.....	125
2.20	Επιτάχυνση.....	129
	Ταξίδι στα άστρα με επιταχυνόμενο πύραυλο	134

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΗΧΑΝΙΚΗ

3.1	Γενικά.....	135
3.2	Νόμος της μεταβολής της μάζας.....	137
3.3	Ο θεμελιώδης νόμος της Δυναμικής	141
	α) Δύναμη παράλληλη προς την ταχύτητα	142
	β) Δύναμη κάθετη στην ταχύτητα	143
	γ) Σχέση γωνιών δύναμης-ταχύτητας και επιτάχυνσης-ταχύτητας.....	144
	* Κίνηση ηλεκτρικού φορτίου μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.....	145
	* Κίνηση ηλεκτρικού φορτίου μέσα σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο	145
3.4	Ισοδυναμία μάζας και ενέργειας	147
	Πυκνότητα σώματος	152
3.5	Η αδράνεια και η βαρύτητα της ενέργειας.....	153
3.6	Αλλαγή της συχνότητας φωτονίου.....	155
3.7	Σχέση ολικής ενέργειας, κινητικής ενέργειας και ορμής.....	157

3.8	Σωματίδια με μηδενική μάζα ηρεμίας.....	158
	Φωτονικός πύραυλος.....	158
3.9	Μετασχηματισμοί Lorentz ορμής και ενέργειας.....	159
3.10	Σύστημα σωμάτων	161
	α) Δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των σωμάτων	161
	β) Υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των σωμάτων	163
3.11	Ελαστική κρούση δύο σωμάτων	165
3.12	Πυρηνικές αντιδράσεις.....	168
	Απορρόφηση φωτονίου.....	171
3.13	Διάσπαση σωματιδίου.....	171
	Εκπομπή φωτονίου.....	175
3.14	Η ανακάλυψη του ποζιτρονίου.....	175
3.15	Σωματίδια - Αντισωματίδια.....	179
3.16	Μετασχηματισμοί Lorentz δύναμης και ισχύος.....	181
	Πίεση.....	184
3.17	Το παράδοξο του νήματος.....	184
3.18	Το παράδοξο του μοχλού.....	186

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

4.1	Ο Μαγνητισμός ως σχετιστικό φαινόμενο.....	189
	α) Αφόρτιστοι αγωγοί.....	189
	β) Φορτισμένοι αγωγοί	191
	γ) Κίνηση φορτίου παράλληλα προς αφόρτιστο αγωγό	194
4.2	Το αναλλοίωτο του ηλεκτρικού φορτίου	196
4.3	Σχετιστική εξέταση του μαγνητικού πεδίου ηλεκτρικού ρεύματος.....	197
4.4	Δύναμη μεταξύ δύο φορτίων που κινούνται παράλληλα με την ίδια ταχύτητα.....	200
4.5	Μετασχηματισμοί Lorentz της πυκνότητας του ηλεκτρικού φορτίου και της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος	202
4.6	Μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο ηλεκτρικού φορτίου	205
	α) Μαγνητικό πεδίο ηλεκτρικού φορτίου	206
	β) Δύναμη κατά την κίνηση ηλεκτρικού φορτίου μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.....	207
	γ) Μετασχηματισμοί των συνιστωσών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.....	208
4.7	Μετασχηματισμοί Lorentz του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.....	211
	Παρατηρήσεις	214

	Ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο κατά την κίνηση φορτισμένου πυκνωτή.....	216
	α) Οπλισμοί του πυκνωτή κάθετοι στον άξονα x	216
	β) Οπλισμοί του πυκνωτή παράλληλοι προς το επίπεδο των αξόνων x, z	216
4.8	Ηλεκτρικό πεδίο κινούμενου ηλεκτρικού φορτίου	217
	α) Δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου	217
	β) Ηλεκτρικό πεδίο του κινούμενου ηλεκτρικού φορτίου.....	219
	γ) Νόμος του Gauss	221
4.9	Μαγνητικό πεδίο κινούμενου ηλεκτρικού φορτίου	223
	α) Δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.....	223
	β) Μαγνητικό πεδίο κινούμενου ηλεκτρικού φορτίου.....	224
	Δράση και αντίδραση	226
4.10	Δύναμη μεταξύ δύο παράλληλα κινουμένων φορτίων	227
4.11	Ο νόμος του Coulomb στη θεωρία της Σχετικότητας.....	229
4.12	Αναλλοίωτες ποσότητες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.....	237
	α) Η αναλλοίωτη ποσότητα $A = \vec{B}' \cdot \vec{E}' = \vec{B} \cdot \vec{E}$	237
	β) Η αναλλοίωτη ποσότητα $\Theta = c^2 B'^2 - E'^2 = c^2 B^2 - E^2$	237
	γ) Παρατηρήσεις.....	237

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΟΠΤΙΚΗ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ

5.1	Το φαινόμενο Doppler στην Κλασική Φυσική.....	243
5.2	Το φαινόμενο Doppler στη θεωρία της Σχετικότητας	247
5.3	Παραγωγή του φαινομένου Doppler από την εξίσωση του κύματος.....	250
	Παρατήρηση.....	254
5.4	Το διάμηκες και το εγκάρσιο φαινόμενο Doppler	254
	α) Το διάμηκες φαινόμενο Doppler	254
	β) Το εγκάρσιο φαινόμενο Doppler	255
	Το παράδοξο των διδύμων με το φαινόμενο Doppler και του κτύπους της καρδιάς	255
5.5	Η όψη του ουρανού.....	259
5.6	Ανάκλαση του φωτός σε κινούμενη επιφάνεια.....	264
	α) Κάθετη πρόσπτωση	264
	β) Πλάγια πρόσπτωση.....	264
	* Μια χρήσιμη σχέση	266
5.7	Το φαινόμενο Compton	267
5.8	Η πίεση του φωτός.....	269
5.9	Το φαινόμενο Navilov – Cherenkov	270
5.10	Κίνηση του φωτός μέσα σε οπτικό μέσο	274

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ
ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

6.1	Χώρος του Minkowski.....	277
6.2	Κίνηση σύμφωνα με την Κλασική Φυσική.....	278
6.3	Κίνηση σύμφωνα με τη θεωρία της Σχετικότητας.....	279
6.4	Γραφική εξαγωγή των μετασχηματισμών Lorentz	284
6.5	Ορισμός των μονάδων μήκους και χρόνου.....	288
6.6	Μέτρηση του μήκους.....	292
6.7	Μέτρηση του χρόνου.....	295
6.8	Γεωμετρική απόδοση του παράδοξου των διδύμων.....	297
6.9	Περιοχές αιτιότητας και μη αιτιότητας.....	299
6.10	Τα ταχύονια.....	302
6.11	Η σύνθεση των ταχυτήτων.....	309
6.12	Εμφάνιση φορτίων σε ουδέτερο αγωγό.....	310
6.13	Περισσότερα για το χώρο του Minkowski.....	313
6.14	Άλλη εξαγωγή των μετασχηματισμών Lorentz	315
6.15	Άλλη εξαγωγή της σύνθεσης των ταχυτήτων.....	317
6.16	Η μέθοδος radar	318
	α) Ο παράγοντας k	318
	β) Η σύνθεση ταχυτήτων.....	320
	γ) Ο ίδιος χρόνος.....	321
	δ) Το ίδιο μήκος.....	322
	ε) Οι μετασχηματισμοί Lorentz.....	324
6.17	Άλλα διαγράμματα.....	328
	A. Το διάγραμμα Brehme.....	329
	α) Εξαγωγή των μετασχηματισμών Lorentz	331
	β) Διαστολή του χρόνου.....	334
	γ) Συστολή του μήκους.....	335
	δ) Το φαινόμενο Doppler	336
	B. Το διάγραμμα Loedel.....	337
	α) Διαστολή του χρόνου.....	338
	β) Συστολή του μήκους.....	339
	γ) Το φαινόμενο Doppler.....	339
	δ) Ταυτόχρονα γεγονότα.....	341
	* Συγχρονισμός ρολογιών.....	343
	ε) Το παράδοξο των διδύμων.....	346
	στ) Η πραγματικότητα της συστολής των μηκών.....	348

ζ) Ορμή και ενέργεια	351
η) Κινούμενα ηλεκτρικά φορτία ευθύγραμμου αγωγού	352

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΤΕΤΡΑΝΥΣΜΑΤΑ

7.1 Γενικά.....	357
7.2 Οι μετασχηματισμοί Lorentz	358
7.3 Το τετράνυσμα της ταχύτητας	360
7.4 Οι τύποι μετασχηματισμού των ταχυτήτων	362
7.5 Οι τύποι μετασχηματισμού ορμής και ενέργειας	364
7.6 Οι τύποι μετασχηματισμού δύναμης και ισχύος	365
7.7 Το τετράνυσμα του κύματος	367

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

8.1 Γενικά.....	369
8.2 Νόμοι της Θερμοδυναμικής.....	370
α) Πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής.....	370
β) Δεύτερος νόμος της Θερμοδυναμικής	370
8.3 Μετασχηματισμοί Lorentz θερμοδυναμικών μεγεθών	372
α) Όγκος	373
β) Πίεση.....	373
γ) Ενέργεια	373
δ) Έργο	373
ε) Θερμότητα.....	374
στ) Εντροπία.....	374
ζ) Θερμοκρασία	375
8.4 Η ακτινοβολία του μαύρου σώματος	375
<i>Βιβλιογραφία.....</i>	<i>377</i>
<i>Γλωσσάρι</i>	<i>379</i>
<i>Αλφαβητικό ευρετήριο ονομάτων</i>	<i>383</i>
<i>Αλφαβητικό ευρετήριο όρων</i>	<i>385</i>

Συνομειώσεις:

- αν. = αναλλοίωτος
Α.Σ.Α. = αδρανειακό σύστημα αναφοράς
δηλ. = δηλαδή
κτλ. = και τα λοιπά
παρ. = παράγραφος
π.χ. = παραδείγματος χάριν
S.I. = Διεθνές Σύστημα

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

1.1 Γενικά

Στην καθημερινή ζωή χρησιμοποιούμε ορισμένες πρωταρχικές έννοιες, τις οποίες θεωρούμε αυτονόητες και δεν μπορούμε να τις ορίσουμε με άλλες απλούστερες. Τέτοιες είναι οι έννοιες "χώρος", "χρόνος" και "ύλη". Κάθε γεγονός κάπου συμβαίνει (χώρος), κάποτε αρχίζει και έχει διάρκεια (χρόνος). Τα σώματα έχουν μάζα (ύλη). Δεν μπορούμε να ασχοληθούμε με κάτι, αν δεν υπάρχει έστω και στη φαντασία μας. Με αυτονόητες τις έννοιες αυτές, προσπαθούμε να καταλάβουμε και να εξηγήσουμε τον κόσμο μας. Ο καθένας κάπου γεννιέται ορισμένη χρονική στιγμή, έχει μάζα, ζει ορισμένο χρόνο και η ζωή του είναι μια πορεία στο φυσικό κόσμο.

Μια από τις πρώτες επιστήμες που αναπτύχθηκαν, η Γεωμετρία, έχει σχέση με το χώρο. Ξεκίνησε από το χώρισμα των αγρών στην αρχαιότητα και αναπτύχθηκε σε κατ' εξοχή θεωρητική επιστήμη από τους αρχαίους Έλληνες.

Η μελέτη της κίνησης των σωμάτων και γενικά των φαινομένων προϋποθέτει στοιχειώδη έννοια του χρόνου, κατά την αλλαγή της θέσης των σωμάτων στο χώρο, την αλληλουχία των γεγονότων π.χ. πρώτο, δεύτερο, αίτιο, αποτέλεσμα κτλ.

Όλα τα φαινόμενα που συμβαίνουν γύρω μας, γίνονται σε χώρο, έχουν θέση στο χρόνο, σχετίζονται με ύλη, ηλεκτρικά φορτία, δυνάμεις κτλ. Ανεξάρτητα από το είδος τους, τα φαινόμενα δεν είναι δυνατόν να τα θεωρήσουμε χωρίς κάποιο πλαίσιο στο οποίο θα τα εξετάσουμε και το πλαίσιο αυτό δεν μπορεί παρά να είναι χωροχρονικό. Τα φαινόμενα όμως έχουν μια απολυτότητα ή σχετίζονται με τον παρατηρητή που τα εξετάζει; Υπάρχει απόλυτη αλήθεια; Υπάρχουν όρια; Μέχρι που μπορούμε να φτάσουμε; Τι είναι δυνατόν και τι είναι αδύνατον; Φυσικά η λογική και η συνέπεια με την οποία την εφαρμόζουμε πρέπει να είναι χωρίς αντιφάσεις. Στο πλαίσιο της λογικής και της συνέπειας της Ειδικής θεωρίας της Σχετικότητας θα αναφερθούμε στη συνέχεια.

1.2 Χώρος

Η επιστήμη που ασχολείται με το χώρο είναι η Γεωμετρία. Δεν νοείται Γεωμετρία χωρίς την έννοια του χώρου. Ο χώρος της Γεωμετρίας θεωρείται **ομογενής**¹ και **ισότροπος**². Στην ομογένεια του χώρου οφείλεται η **αρχή διατήρησης της ορμής** και στην ισοτροπία η **αρχή διατήρησης της στροφορμής**.

Η αντίληψη μας για το χώρο είναι **Ευκλείδεια**, (σημείο, ευθεία γραμμή, επίπεδο, τρεις διαστάσεις, πέμπτο αίτημα των παραλλήλων του Ευκλείδη). Είναι πολύ δύσκολο να φανταστούμε χώρο με διαστάσεις περισσότερες από τρεις, αν και αλγεβρικά μπορούμε να επεξεργαστούμε προβλήματα σε χώρο οσωνδήποτε διαστάσεων. Η Γεωμετρία έχει σχέση με το σχήμα και τη μέτρηση. Η χρησιμότητα της είναι γνωστή από την αρχαιότητα. Στην αρχαία Αίγυπτο με γεωμετρικές μετρήσεις ξαναχάραζαν τα σύνορα των αγρών ύστερα από κάθε πλημμύρα του Νείλου.

Οι μετρήσεις απαιτούν ένα **σύστημα συντεταγμένων**, απαιτούν μονάδες μέτρησης. Π.χ. σε μια διάσταση, αν έχουμε στη σειρά σε ίσες αποστάσεις όμοια αντικείμενα, αν ένα αντικείμενο εξαφανιστεί, μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε τη θέση στην οποία υπήρχε. Σε δυο διαστάσεις μιλήσαμε για τον προσδιορισμό των συνόρων των αγρών ύστερα από κάθε πλημμύρα του Νείλου. Και τι άλλο κάνουμε από το να ορίζουμε τη θέση μας σε χώρο τριών διαστάσεων, όταν λέμε πού μένουμε, αναφέροντας πόλη, οδό, αριθμό, όροφο, διαμέρισμα. Η θέση όμως των αντικειμένων, των αγρών, της κατοικίας μας, είναι σταθερή; Γνωρίζουμε ότι η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της και περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο, ο Ήλιος κινείται μέσα στο γαλαξία που επίσης κινείται. Για ποια θέση μιλούμε, σε ποιο χώρο; Η θέση των αντικειμένων είναι σταθερή ως προς τα γειτονικά αντικείμενα, των αγρών ως προς το Νείλο και τους γειτονικούς αγρούς, του σπιτιού μας ως προς τα γειτονικά σπίτια. Ποια είναι η έννοια του συστήματος συντεταγμένων; Υπάρχουν σταθερές θέσεις στο χώρο; Υπάρχει απόλυτος χώρος; Τι νόημα έχουν οι νόμοι της Φυσικής; Υπάρχει απάντηση που να αντέχει σε κριτική και να είναι κοντά στην αλήθεια; Υπάρχει αλήθεια; Κάθε απάντηση που δίνει εξήγηση μπορεί να θεωρηθεί σωστή, μέχρι τη στιγμή που αδυνατεί να δώσει εξήγηση. Εκατομμύρια πειράματα μπορεί να επιβεβαιώσουν μια θεωρία, αρκεί όμως ένα, που δεν την επιβεβαιώνει, για να την ανατρέψει.

Η πρώτη απάντηση στο ερώτημα είναι η απάντηση της Κλασικής Φυσικής, είναι η απάντηση του Newton. Σύμφωνα με τον Newton, υπάρχει ο **απόλυτος χώρος** που μένει

¹ Ομογένεια του χώρου σημαίνει ότι, σ' ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς όλα τα σημεία του χώρου είναι ισοδύναμα, δηλαδή έχουν τις ίδιες ιδιότητες. Η μεταφορά ενός κλειστού* συστήματος στο χώρο από μια θέση σε άλλη, χωρίς αλλαγή των σχετικών θέσεων και ταχυτήτων των σωμάτων, δεν αλλάζει τις μηχανικές ιδιότητες του συστήματος.

² Ισοτροπία του χώρου σημαίνει ότι, σ' ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς οι ιδιότητες του χώρου είναι ίδιες προς όλες τις κατευθύνσεις. Η στροφή ενός κλειστού συστήματος, ως συνόλου, δεν επηρεάζει τις μηχανικές του ιδιότητες.

* Κλειστό είναι ένα σύστημα σωμάτων στο οποίο απουσιάζουν οι εξωτερικές δυνάμεις. Στο σύστημα αυτό πάνω στα σώματα δεν ενεργούν άλλες δυνάμεις, πέρα από τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωμάτων.

πάντα ο ίδιος, ανεξάρτητα από την ύπαρξη των αντικειμένων. Ο Newton θεωρεί το χώρο **απόλυτο, Ευκλείδειο**, χωρίς καμιά αναφορά σε αντικείμενα. Οι μετρήσεις θα μπορούσαν να γίνουν ως προς το χώρο αυτό που είναι αιώνιος, ακίνητος και αναλλοίωτος. Ο χώρος αυτός δεν έχει καμιά σχέση με το χρόνο. Οι κινήσεις και οι νόμοι της Φυσικής θα μπορούσαν να εξεταστούν ως προς το χώρο αυτό. Ναι, αλλά ποιος είναι αυτός ο χώρος, ποιο σύστημα συντεταγμένων τον εκφράζει; Ασφαλώς όχι σύστημα συντεταγμένων στη Γη ή στον Ήλιο, αφού το σύμπαν δεν είναι ούτε γεωκεντρικό ούτε ηλιοκεντρικό. Ίσως ένα σύστημα συντεταγμένων με άξονες που κατευθύνονται προς τρία μακρινά άστρα; Υπάρχει ο απόλυτος χώρος; Τα πάντα γύρω μας κινούνται. Οι μετρήσεις που κάνουμε είναι σχετικές. Μπορούμε να προσδιορίσουμε την κίνηση μας ως προς τον απόλυτο χώρο; Σ' αυτό μπορούν να μας βοηθήσουν οι νόμοι της Μηχανικής και γενικότερα οι νόμοι της Φυσικής;

Ο κυριότερος νόμος της Μηχανικής $\vec{F} = m\vec{a}$ (δύναμη = μάζα επί επιτάχυνση), αν ισχύει στο σύστημα συντεταγμένων του απόλυτου χώρου, ισχύει και σε κάθε σύστημα συντεταγμένων που κινείται ευθύγραμμα και ομαλά. Οι νόμοι της Φυσικής σ' ένα τέτοιο σύστημα θα έχουν την ίδια μορφή μ' αυτή που έχουν στο σύστημα συντεταγμένων του απόλυτου χώρου. Τέτοια όμως συστήματα υπάρχουν άπειρα. Ακόμα και στη Γη, παρά την κίνηση της, οι νόμοι της Φυσικής έχουν την ίδια μορφή για ένα ακίνητο παρατηρητή και για τον επιβάτη ενός οχήματος που κινείται ευθύγραμμα και ομαλά.

Συστήματα που κινούνται ευθύγραμμα και ομαλά το ένα ως προς το άλλο υπάρχουν άπειρα. Στα συστήματα αυτά ισχύει ο **νόμος της αδράνειας** (όταν σ' ένα σώμα δεν ασκούνται δυνάμεις ή η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα είναι μηδέν, το σώμα ακινητεί ή συνεχίζει να κινείται ευθύγραμμα και ομαλά). Τα συστήματα αυτά λέγονται **αδρανειακά συστήματα** και δε βοηθούν καθόλου στον προσδιορισμό του απόλυτου χώρου.

Με κανένα πείραμα της Μηχανικής δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε την κίνηση ενός σώματος ως προς τον απόλυτο χώρο. Μήπως όμως κάποιο πείραμα άλλου τομέα της Φυσικής, π.χ. του Ηλεκτρισμού ή της Οπτικής, μπορεί να μας βοηθήσει σ' αυτό;

Με τις προσπάθειες προσδιορισμού απόλυτης κίνησης και τις αντιφάσεις που προκύπτουν θα ασχοληθούμε στη συνέχεια.

1.3 Χρόνος

Εκτός από το χώρο, ατέλειωτη φιλοσοφική συζήτηση θα μπορούσε να γίνει και για το χρόνο. Τι είναι χρόνος; Ποια είναι η φύση του χρόνου; Ο χρόνος είναι κι' αυτός μια από τις πρωταρχικές έννοιες που είναι δύσκολο να ορίσουμε και τις θεωρούμε αυτονόητες. Η αδυναμία μας να ορίσουμε κάτι, δεν μας εμποδίζει να το χρησιμοποιούμε και να κάνουμε μετρήσεις. Λέμε π.χ. ότι μια έκλειψη της Σελήνης θα αρχίσει σ' ένα τόπο κάποια χρονική στιγμή και θα έχει ορισμένη χρονική διάρκεια. Χρησιμοποιούμε την έννοια του χρόνου και της χρονικής διάρκειας, κάνουμε μετρήσεις ορίζοντας αντί για σημεία χρονικές στιγμές και αντί για αποστάσεις χρονική διάρκεια.

Για όλα αυτά είναι απαραίτητη μια σταθερή μονάδα χρόνου για την οποία όλοι να

είμαστε σύμφωνοι. Βέβαια η υποκειμενική εκτίμηση του χρόνου δεν είναι κατάλληλη για ακριβείς μετρήσεις. Με την υποκειμενική εκτίμηση του χρόνου τα ευχάριστα φαίνεται ότι έχουν μικρότερη και τα δυσάρεστα μεγαλύτερη διάρκεια. Μιλούμε για βιολογικό χρόνο, για μέτρηση μικρής χρονικής διάρκειας με τους χτύπους της καρδιάς ή με το ρυθμό της αναπνοής. Είναι φανερό ότι οι μετρήσεις αυτές απέχουν από την αλήθεια, γιατί το μέτρο μέτρησης εξαρτάται από το άτομο, την ηλικία κτλ. Για το παιδί οι μέρες κυλούν πιο αργά, για το γέρο πιο γρήγορα. Πρέπει να αναζητήσουμε αντικειμενική μέτρηση του χρόνου.

Η λειτουργία των κατάλληλων οργάνων, των ρολογιών, πρέπει να βασίζεται σε φυσικά φαινόμενα, τα οποία θεωρούμε ότι επαναλαμβάνονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Οι αρχαίοι είχαν επινοήσει την κλεψύδρα, η οποία ήταν χρήσιμη για μικρή χρονική διάρκεια αλλά όχι για μεγάλη. Η αναζήτηση ενός ακριβούς ρολογιού δεν μπορεί παρά να γίνει στην ίδια τη φύση. Η εναλλαγή της μέρας με τη νύχτα προσφέρει ένα τέτοιο ρολόι. Σήμερα ξέρουμε ότι η διάρκεια της ηλιακής μέρας, δηλαδή ο χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών μεσουρανήσεων του Ήλιου σ' ένα τόπο, σ' όλη τη διάρκεια του χρόνου δεν είναι σταθερή· π.χ. στις 23 Δεκεμβρίου είναι 51 δευτερόλεπτα μεγαλύτερη απ' ό τι στις 16 Σεπτεμβρίου. Θα μπορούσαμε να πάρουμε ως χρόνο σύγκρισης την αστρική μέρα (χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών μεσουρανήσεων των απλανών άστρων). Η αστρική μέρα είναι περίπου 3 min και 56 s μικρότερη από τη μέση ηλιακή μέρα. Αν πάρουμε υπόψη ότι η Γη είναι μια τεράστια σφαίρα με μάζα $6 \cdot 10^{24}$ kg, με σταθερή ροπή αδράνειας, που περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα, η χρονική διάρκεια ανάμεσα σε δυο διαδοχικές μεσουρανήσεις των απλανών είναι σταθερή. Υπάρχουν όμως φαινόμενα που επιβραδύνουν την περιστροφή της Γης, όπως οι παλίρροιας, η σκόνη και τα σώματα που πέφτουν από το διάστημα και άλλα που την επιταχύνουν, όπως η συστολή λόγω ψύξης. Τελικά φαίνεται ότι υπερτερούν οι παράγοντες που προκαλούν επιβράδυνση της περιστροφής της Γης, με αποτέλεσμα να έχουμε σήμερα μέση αύξηση της διάρκειας της μέρας 0,0014 s ανά αιώνα. Επίσης η ασύμμετρη κατανομή των πάγων στα δυο ημισφαίρια και το εποχιακό άπλωμα και μάζεμα τους έχει ως αποτέλεσμα η περιστροφή της Γης να καθυστερεί την άνοιξη και να προτρέπει το φθινόπωρο. Σεισμοί, διάφοροι άλλοι παράγοντες, η ανθρώπινη δραστηριότητα, ακόμα και το σήκωμα του χεριού μας επηρεάζουν την περιστροφή της Γης (με δεδομένο ότι το γινόμενο της ροπής αδράνειας επί τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Γης είναι σταθερό).

Σήμερα έχουμε ακριβέστατα ατομικά ρολόγια. Από το 1967 ως πρότυπο ρολόι θεωρείται το ατομικό ρολόι του οποίου η λειτουργία βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ατόμου του Καισίου, που αντιστοιχεί στη διαφορά ενέργειας ανάμεσα στις δύο χαμηλότερες ενεργειακές του στάθμες. Η ακτινοβολία αυτή βρίσκεται στην περιοχή των μικροκυμάτων και έχει συχνότητα, σύμφωνα με το πρότυπο αυτό ρολόι, 9.192.631.770 Hz. Η ακρίβεια του ρολογιού αυτού είναι καλύτερη από 1 προς 10^{13} .

Σε σχέση με τις πρώτες απόπειρες μέτρησης του χρόνου έχουμε προχωρήσει πολύ σε ακρίβεια, αλλά αυτό που προέχει είναι αν αυτός ο χρόνος, που μετρούμε και χρησιμοποιούμε στις εξισώσεις της Φυσικής, είναι πάντα ο ίδιος, αιώνιος, αμετάβλητος, ρέει με τον ίδιο τρόπο και είναι ίδιος για όλους. Είναι δύσκολο να φανταστούμε ένα χρόνο ανε-

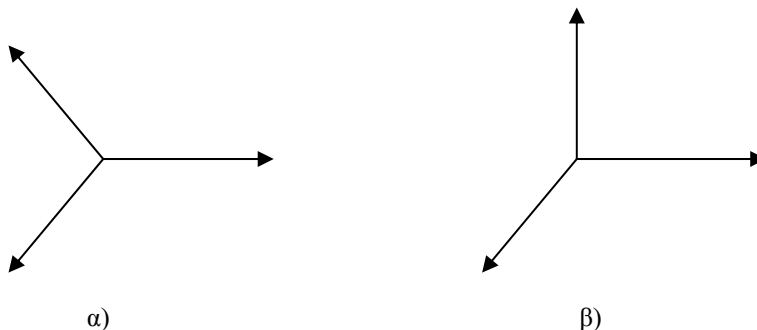
ξάρτητο από τις μεταβολές που συμβαίνουν στη φύση. Αν δεν υπάρχει καμιά μεταβολή, υπάρχει χρόνος;

Πάνω από δυο αιώνες η Κλασική Φυσική στηρίχτηκε στην έννοια του απόλυτου χρόνου που έδωσε ο Newton. Η ίδια η αρχή της αδράνειας της Μηχανικής προϋποθέτει την έννοια του χρόνου (ένα σώμα σε ίσους χρόνους διανύει ίσα διαστήματα). Σύμφωνα με τον Newton υπάρχει ένας αληθινός, απόλυτος, μαθηματικός χρόνος, πάντα ο ίδιος, που κυλά ομοιόμορφα. Ο χρόνος είναι **ομογενής**³. Στην ομογένεια του χρόνου οφείλεται η **αρχή διατήρησης της ενέργειας**. Ο απόλυτος αυτός χρόνος υπάρχει ανεξάρτητα από την ύπαρξη αντικειμένων και φαινομένων.

1.4 Σύστημα συντεταγμένων και σύστημα αναφοράς

Αδρανειακό σύστημα αναφοράς

Το σύστημα συντεταγμένων δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε τις θέσεις σημείων στο χώρο. Θεωρούμε το χώρο ομογενή, ισότροπο, τριών διαστάσεων και Ευκλείδειο. Ένα σύστημα συντεταγμένων έχει μία αρχή που είναι η τομή τριών μη ομοεπιπέδων αξόνων (Σχήμα 1.4,1 α). Αν οι άξονες αυτοί είναι ανά δύο κάθετοι μεταξύ τους (Σχήμα 1.4,2 β), το σύστημα συντεταγμένων λέγεται **Καρτεσιανό**.



Σχήμα 1.4,1

α) Τομή τριών μη ομοεπιπέδων αξόνων
β) Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Οι άξονες είναι ανά δύο κάθετοι μεταξύ τους.

Σ' ένα σύστημα συντεταγμένων, έχοντας ορίσει τη μονάδα μήκους, κάθε σημείο του χώρου ορίζεται από τρεις αριθμούς (x, y, z), τις συντεταγμένους του. Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων και ο προσανατολισμός των αξόνων μπορεί να γίνει αυθαίρετα.

³ Ομογένεια του χρόνου σημαίνει ότι, όλες οι στιγμές του χρόνου είναι ισοδύναμες. Τα ίδια φυσικά φαινόμενα συμβαίνουν με τον ίδιο τρόπο όλες τις χρονικές στιγμές, όταν οι αρχικές συνθήκες είναι ίδιες, δηλαδή όταν σ' ένα αδρανειακό σύστημα αντικαταστήσουμε μια χρονική στιγμή t_1 με μια άλλη t_2 χωρίς να αλλάξουμε τις συντεταγμένες και τις ταχύτητες των σωμάτων, τότε οι μηχανικές ιδιότητες του συστήματος δεν αλλάζουν, και ότι θα συνέβαινε την χρονική στιγμή $t_1 + t$ θα συμβεί τη χρονική στιγμή $t_2 + t$.

Είναι φανερό ότι τα σχήματα και οι ιδιότητες τους δεν εξαρτώνται από την εκλογή του συστήματος συντεταγμένων. Συνήθως προτιμούμε την εκλογή ενός συστήματος συντεταγμένων που απλουστεύει την εξέταση των προβλημάτων. Τα μήκη, οι γωνίες και γενικά όλα τα χαρακτηριστικά ενός σχήματος δεν επηρεάζονται από την εκλογή ή την αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων.

Τα φυσικά φαινόμενα συμβαίνουν στο χώρο, γι' αυτό η Φυσική συνδέεται στενά με τη Γεωμετρία. Η μελέτη των φυσικών φαινομένων συχνά αφορά τις κινήσεις, γι' αυτό έχει ανάγκη από μια ακόμα μεταβλητή, το χρόνο t . Όπως μετρούμε αποστάσεις από ένα σημείο, αντίστοιχα μετρούμε το χρόνο που πέρασε από κάποια χρονική στιγμή. Εκτός από τη μονάδα μήκους, ο Φυσικός έχει ανάγκη τη μονάδα χρόνου, εκτός από το μέτρο, έχει ανάγκη και ένα χρονόμετρο.

Ονομάζουμε **σύστημα αναφοράς** κάθε σύστημα συντεταγμένων, εφοδιασμένο με μία μονάδα μήκους για τη μέτρηση των αποστάσεων και ένα χρονόμετρο για τη μέτρηση του χρόνου. Στο σύστημα αναφοράς, σε χώρο τριών διαστάσεων, για την περιγραφή ενός φυσικού φαινομένου, έχουμε ανάγκη όχι τρεις αλλά τέσσερις μεταβλητές, τρεις για τον ορισμό της θέσης (χώρο) και μια για το χρόνο.

Στην Κλασική Φυσική του απόλυτου χώρου και του απόλυτου χρόνου του Newton, για οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς, αρκεί μια μονάδα μήκους και ένα ρολόι τοποθετημένο σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Αυτό, γιατί η Κλασική Φυσική δέχεται τη δυνατότητα άπειρης ταχύτητας στη μετάδοση πληροφοριών και σημάτων στη φύση και, συνεπώς, κάθε παρατηρητής τοποθετημένος σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος θα βρίσκει ίδιες τιμές για τα μήκη και τους χρόνους.

Αδρανειακό είναι ένα σύστημα αναφοράς στο οποίο, όταν ένα σώμα δεν δέχεται δυνάμεις, δεν επιταχύνεται (ακίνηται ή συνεχίζει να κινείται ευθύγραμμα και ομαλά).

Δηλαδή αδρανειακό είναι το σύστημα αναφοράς στο οποίο ισχύει ο νόμος της αδράνειας.

Οι δυνάμεις που αναφέρουμε αφορούν τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωμάτων. Τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς έχουν δύο χαρακτηριστικές ιδιότητες:

- 1. Όλα τα συστήματα αναφοράς που κινούνται ευθύγραμμα και ομαλά, ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, είναι αδρανειακά.**
- 2. Οι νόμοι της Φυσικής είναι ίδιοι, όλες τις χρονικές στιγμές, σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.**

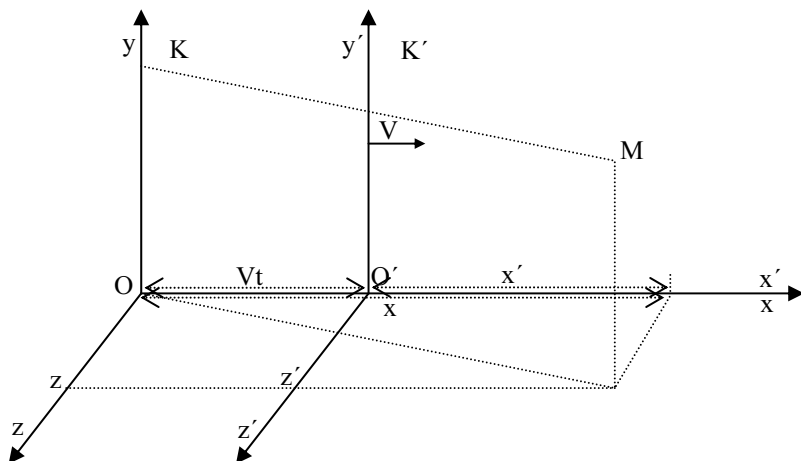
Θεωρούμε ότι οι νόμοι της Φυσικής είναι αναλλοίωτοι και δεν εξαρτώνται από το αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Το ίδιο φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί από δύο παρατηρητές που βρίσκονται ακίνητοι σε δυο διαφορετικά αδρανειακά συστήματα αναφοράς, που το ένα κινείται ως προς το άλλο.

Αμέσως μπαίνει το πρόβλημα της σύγκρισης των μετρήσεων των δύο παρατηρητών που αφορούν το ίδιο φυσικό φαινόμενο. Τα αποτελέσματα είναι ίδια ή διαφορετικά; Τα δύο αδρανειακά συστήματα αναφοράς είναι ισοδύναμα ή υπάρχει κάποιο προνομιούχο σύστημα αναφοράς, ως προς το οποίο οι νόμοι της Φυσικής έχουν την απλούστερη μορφή; Μπορούμε να εξετάσουμε την κίνηση ενός σώματος ως προς τον απόλυτο χώρο.

1.5 Μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου

Ας θεωρήσουμε δυο αδρανειακά συστήματα αναφοράς⁴ τα K, K' , που κινούνται ευθύγραμμα και ομαλά το ένα ως προς το άλλο και ας συσχετίσουμε τις μετρήσεις χώρου (x, y, z και x', y', z') και χρόνου (t και t') για παρατηρητές που ο καθένας ηρεμεί στο σύστημα του.

Επειδή στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με συστήματα που κινούνται ευθύγραμμα και ομαλά το ένα ως προς το άλλο και επειδή δεν έχει σημασία ο προσανατολισμός των αξόνων, για ευκολία, χωρίς να χάνουμε τίποτα από τη γενικότητα, μπορούμε να θεωρήσουμε δύο τρισορθογώνια Α.Σ.Α. K, K' των οποίων, τη χρονική στιγμή $t = t' = 0$, η αρχή O, O' και οι άξονες τους x, y, z και x', y', z' συμπίπτουν αντίστοιχα. Ακόμα θεωρούμε ότι η διεύθυνση της σχετικής ταχύτητας V του ενός ως προς το άλλο, συμπίπτει με την κοινή διεύθυνση των αξόνων τους x, x' (Σχήμα 1.5,1).



Σχήμα 1.5,1

Συστήματα αναφοράς σε σχετική κίνηση με ταχύτητα V .

Για ένα σημείο M οι χωροχρονικές συντεταγμένες του x, y, z, t στο σύστημα K σχετίζονται με τις συντεταγμένες του x', y', z', t' στο σύστημα K' με τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου.

Μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου

$$x' = x - Vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t \quad (1.5,1)$$

Κάθε Α.Σ.Α. αρκεί να είναι εφοδιασμένο μ' ένα ρολόι τοποθετημένο σ' ένα οποιοδήποτε σημείο του, π.χ. στην αρχή των αξόνων του.

⁴ Στη συνέχεια τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς για συντομία θα τα ονομάζουμε Α.Σ.Α.

Λόγω της ισοδυναμίας των Α.Σ.Α., η ταχύτητα του πρώτου συστήματος ως προς το δεύτερο είναι $-V$. Αν θέσουμε στην (1.5,1) όπου V το $-V$ και εναλλάξουμε τους τόνους, παίρνουμε τους αντίστροφους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου.

Αντίστροφοι μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου

$$x = x' + Vt', \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t' \quad (1.5,2)$$

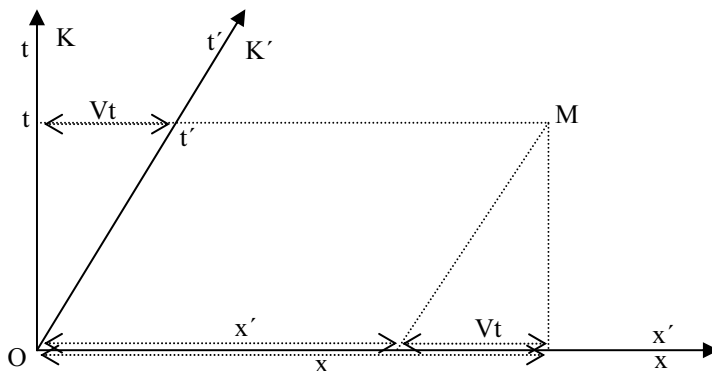
Σημειώνουμε ότι αν δύο γεγονότα γίνουν σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές t_1, t_2 σε δυο διαφορετικά σημεία x_1, x_2 του συστήματος K , πάντα υπάρχει ένα σύστημα K' στο οποίο τα δύο γεγονότα συμβαίνουν στην ίδια θέση ($x'_1 = x'_2$). Τότε:

$$\begin{aligned} x'_1 &= x_1 - Vt_1, & x'_2 &= x_2 - Vt_2 \Rightarrow \\ x'_2 - x'_1 &= (x_2 - x_1) - V(t_2 - t_1) & (1.5,3) \\ x'_2 = x'_1 &\Rightarrow x_2 - x_1 = V(t_2 - t_1) \Rightarrow V = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \end{aligned}$$

όπου V είναι η ταχύτητα του συστήματος K' ως προς το K . Αυτό είναι πάντα δυνατό, αφού στην Κλασική Φυσική δεν υπάρχει όριο για την τιμή της ταχύτητας V .

Σημειώνουμε ότι οι συντεταγμένες του χώρου x, y, z και του χρόνου t μπορεί να παρασταθούν σε μια Γεωμετρία τεσσάρων διαστάσεων και να απεικονιστούν στον λεγόμενο **χώρο του Minkowski**.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, θεωρώντας μόνο τη διάσταση του χώρου x και του χρόνου t στο σύστημα K και x', t' στο σύστημα K' , μπορούμε να παραστήσουμε τα δύο συστήματα αναφοράς όπως στο σχήμα 1.5,2.



Σχήμα 1.5,2

Συστήματα αναφοράς στο χώρο του Minkowski.

Παρατηρούμε ότι η μέτρηση του χρόνου και στα δυο Α.Σ.Α. δίνει, με κατάλληλη βαθμολόγηση, την ίδια τιμή ($t' = t$). Οι άξονες x', x συμπίπτουν. Αν το ένα σύστημα, π.χ.

το K , είναι ορθογώνιο, το άλλο K' είναι πλαγιογώνιο. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1.5,2, είναι $x' = x - Vt$.

Στο επίπεδο x, t η εκλογή της διεύθυνσης του άξονα t είναι αυθαίρετη. Στα συστήματα όμως K, K' τα γεγονότα που είναι ταυτόχρονα είναι πάνω σε μια ευθεία παράλληλη προς τους άξονες x και x' . Ο απόλυτος όμως χρόνος του Newton είναι για όλα τα Α.Σ.Α. ο ίδιος και αυτό απαιτεί στο διάγραμμα του Minkowski, οι άξονες x, x' να έχουν την ίδια διεύθυνση. Οι ίδιοι χρόνοι ($t' = t$) σημειώνονται πάνω στους άξονες t', t οι οποίοι έχουν κατάλληλη βαθμολόγηση. Το διάγραμμα αυτό είναι σύμφωνο με τις παραδοχές της Κλασικής Φυσικής.

1.6 Αρχή της Σχετικότητας του Γαλιλαίου

Από τις σχέσεις των μετασχηματισμών του Γαλιλαίου (1.5,1), επειδή η σχετική ταχύτητα του ενός Α.Σ.Α. ως προς το άλλο είναι V σταθερή, παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \Delta x' &= \Delta x - V\Delta t, & \Delta y' &= \Delta y, & \Delta z' &= \Delta z, & \Delta t &= \Delta t' \Rightarrow \\ \frac{\Delta x'}{\Delta t'} &= \frac{\Delta x}{\Delta t} - V, & \frac{\Delta y'}{\Delta t'} &= \frac{\Delta y}{\Delta t}, & \frac{\Delta z'}{\Delta t'} &= \frac{\Delta z}{\Delta t} \Rightarrow \\ v'_x &= v_x - V, & v'_y &= v_y, & v'_z &= v_z \end{aligned} \quad (1.6,1)$$

όπου v η ταχύτητα ενός σώματος όπως μετριέται στο σύστημα K και v' όπως μετριέται στο σύστημα K' . Η ταχύτητα του σώματος είναι διαφορετική στα δύο Α.Σ.Α.

Αν η ταχύτητα του σώματος δεν είναι σταθερή, από τις σχέσεις (1.6,1) παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \Delta v'_x &= \Delta v_x, & \Delta v'_y &= \Delta v_y, & \Delta v'_z &= \Delta v_z \\ a_x &= \frac{\Delta v_x}{\Delta t}, & a_y &= \frac{\Delta v_y}{\Delta t}, & a_z &= \frac{\Delta v_z}{\Delta t} \\ a'_x &= \frac{\Delta v'_x}{\Delta t}, & a'_y &= \frac{\Delta v'_y}{\Delta t}, & a'_z &= \frac{\Delta v'_z}{\Delta t} \\ a'_x &= a_x, & a'_y &= a_y, & a'_z &= a_z \Rightarrow \bar{a}' = \bar{a} \end{aligned} \quad (1.6,2)$$

όπου \bar{a}, \bar{a}' η επιτάχυνση του σώματος στα δύο Α.Σ.Α. K και K' αντίστοιχα. Επειδή ο χρόνος είναι κοινός στα δύο Α.Σ.Α. ($t' = t$), η επιτάχυνση του σώματος είναι ίδια ($\bar{a}' = \bar{a}$). Αυτό σημαίνει ότι, αν θεωρήσουμε σταθερή και αμετάβλητη τη μάζα του σώματος, ίδια θα είναι και η δύναμη στα δύο Α.Σ.Α. Αν η επιτάχυνση και η δύναμη είναι μηδέν στο ένα σύστημα, θα είναι μηδέν και στο άλλο. Όλα τα συστήματα αναφοράς, που κινούνται ευθύγραμμα και ομαλά, το ένα ως προς το άλλο, είναι ισοδύναμα και, αν το ένα είναι αδρανειακό, αδρανειακά θα είναι και τα άλλα. Άρα, αν υπάρχει ένα Α.Σ.Α., θα υπάρχουν και άπειρα άλλα ισοδύναμα Α.Σ.Α.

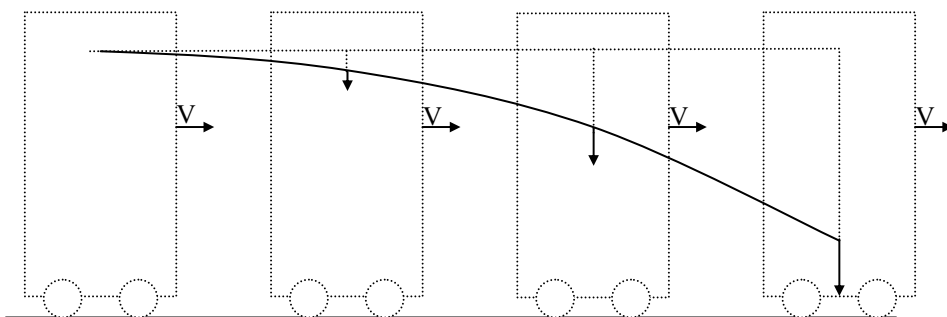
Σε δύο Α.Σ.Α. οι συντεταγμένες και οι ταχύτητες ενός σώματος διαφέρουν, είναι όμως ίδιες οι σχετικές ταχύτητες, οι μεταβολές των ταχυτήτων, οι επιταχύνσεις, οι δυνάμεις και, κατά συνέπεια, ίδιοι είναι οι νόμοι της Φυσικής. Έτσι έχουμε την **αρχή της Σχετικότητας της Κλασικής Μηχανικής** ή **αρχή της Σχετικότητας του Γαλιλαίου** την οποία διατυπώνουμε ως εξής:

Σ' ένα σύστημα αναφοράς που κινείται ευθύγραμμα και ομαλά στον απόλυτο χώρο, οι νόμοι της Μηχανικής έχουν την ίδια ακριβώς μορφή, μ' αυτή που έχουν και σ' ένα σύστημα αναφοράς που είναι ακίνητο.

Αμέσως γίνεται αντιληπτό ότι, σύμφωνα με τα παραπάνω, ο απόλυτος χώρος του Newton χάνει ένα μέρος από την αξία του, αφού όλα τα Α.Σ.Α. είναι ισοδύναμα και δεν μπορούμε να διακρίνουμε ή να προτιμήσουμε το ένα από το άλλο.

Οι εξισώσεις της Μηχανικής διατηρούν τη μορφή τους στους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου και είναι συναλλοίωτες⁵ σ'αυτούς. Η θεμελιώδης σχέση της Μηχανικής $\vec{F} = m\vec{a}$ είναι συναλλοίωτη ως προς τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου. Η λύση των εξισώσεων της Μηχανικής είναι η ίδια στα διάφορα Α.Σ.Α., εφόσον οι αρχικές συνθήκες είναι ίδιες. Τα φαινόμενα της Μηχανικής εξελίσσονται ταυτόσημα με τον ίδιο τρόπο σ' όλα τα Α.Σ.Α.· π.χ. η κρούση δυο σφαιρών του μπιλιάρδου έχει την ίδια μορφή είτε η κρούση γίνεται σ' ένα δωμάτιο είτε μέσα σ' ένα τρένο που κινείται ευθύγραμμα και ομαλά.

Αν οι αρχικές συνθήκες δεν είναι ίδιες, το ίδιο φαινόμενο παρουσιάζεται με διαφορετική μορφή σε διαφορετικά Α.Σ.Α., π.χ. η ελεύθερη πτώση ενός σώματος από ένα όχημα που κινείται ευθύγραμμα και ομαλά, είναι κατακόρυφη για ένα επιβάτη του οχήματος και παραβολική για ένα παρατηρητή ακίνητο στην επιφάνεια της Γης (Σχήμα 1.6,2), γιατί οι αρχικές συνθήκες δεν είναι ίδιες.



Σχήμα 1.6,2

Η ελεύθερη πτώση ενός σώματος μέσα σε ένα όχημα φαίνεται διαφορετική από ένα παρατηρητή ακίνητο μέσα στο όχημα που κινείται ευθύγραμμα και ομαλά (ελεύθερη κατακόρυφη πτώση) και από ένα παρατηρητή ακίνητο στη Γη (οριζόντια βολή).

⁵ Μια εξίσωση που συνδέει φυσικά μεγέθη λέγεται συναλλοίωτη αν, όταν ισχύει σ' ένα σύστημα αναφοράς, διατηρεί την ισχύ και τη μορφή της σ' ένα άλλο σύστημα αναφοράς.

Για τον παρατηρητή στη Γη το σώμα που πέφτει έχει και μια σταθερή οριζόντια ταχύτητα V ίση με την ταχύτητα του οχήματος κατά τη φορά κίνησης του.

1.7 Μη αδρανειακά συστήματα αναφοράς

Σ' ένα Α.Σ.Α. οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στα σώματα οφείλονται μόνο στην αλληλεπίδραση τους και όχι στην κίνηση του συστήματος. Τέτοια είναι τα συστήματα που βρίσκονται σε ευθύγραμμη και ομαλή κίνηση.

Μη αδρανειακό σύστημα αναφοράς είναι το σύστημα αναφοράς στο οποίο εκτός από τις δυνάμεις που οφείλονται στην αλληλεπίδραση των σωμάτων, αναπτύσσονται και φαινόμενες δυνάμεις, οι δυνάμεις αδράνειας, που οφείλονται στην κίνηση του συστήματος αναφοράς.

Αυτό συμβαίνει, όταν το σύστημα αναφοράς έχει ταχύτητα μεταβαλλόμενη είτε κατά μέτρο είτε κατά κατεύθυνση. Τέτοιες δυνάμεις αναπτύσσονται π.χ. κατά το ξεκίνημα ή το σταμάτημα ενός οχήματος. Κατά το χρόνο αυτό το όχημα είναι μη αδρανειακό σύστημα αναφοράς (νομίζουμε ότι μια δύναμη μας σπρώχνει προς τα πίσω ή τα μπρος αντίστοιχα). Όμοια κατά την περιστροφή ενός σώματος (φυγόκεντρη δύναμη, δύναμη Coriolis) κτλ.

Ας θεωρήσουμε ότι ένα σώμα σ' ένα μη αδρανειακό σύστημα αναφοράς Α έχει επιτάχυνση \vec{a} και ότι το σύστημα αυτό κινείται με επιτάχυνση \vec{a}' ως προς ένα Α.Σ.Α. Β. Αν m είναι η μάζα του σώματος, η θεμελιώδης σχέση της Μηχανικής δίνει, για το αδρανειακό σύστημα αναφοράς Β, συνολική επιτάχυνση $\vec{a} + \vec{a}'$ και δύναμη \vec{F} :

$$\vec{F} = m(\vec{a} + \vec{a}') \quad \Rightarrow \quad m\vec{a} = \vec{F} - m\vec{a}' \quad (1.7,1)$$

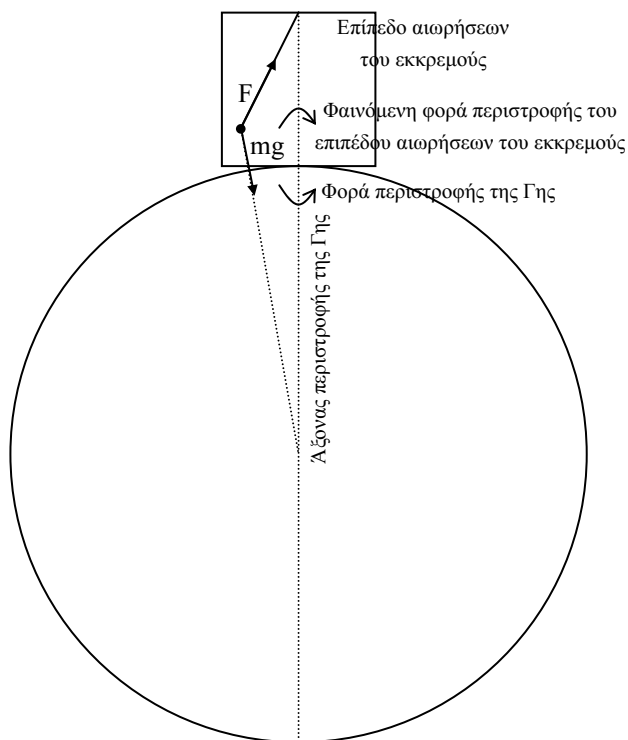
Για το μη αδρανειακό σύστημα Α που επιταχύνεται, η δύναμη $m\vec{a}$ που εξασκείται πάνω στο σώμα m , εκφράζεται ως άθροισμα δύο δυνάμεων, της δύναμης F και μιας φαινόμενης δύναμης $-m\vec{a}'$ που είναι η **δύναμη αδράνειας**. Αν η δύναμη F δεν υπάρχει ($\vec{F} = 0$), τότε $m\vec{a} = -m\vec{a}'$, δηλαδή η μόνη δύναμη που εμφανίζεται στο μη αδρανειακό σύστημα αναφοράς Α είναι η δύναμη αδράνειας που οφείλεται στην κίνηση του συστήματος. Η δύναμη αυτή έχει μέτρο ma' και φορά αντίθετη του \vec{a}' .

Ακόμα μπορούμε να πούμε ότι στα μη αδρανειακά συστήματα αναφοράς ο χώρος δεν είναι ούτε ομογενής ούτε ισότροπος. Επίσης ο χρόνος δεν είναι ομογενής και οι διάφορες χρονικές στιγμές δεν είναι ισοδύναμες. Η περιγραφή των φυσικών φαινομένων σ' ένα μη αδρανειακό σύστημα αναφοράς είναι αρκετά πολύπλοκη.

Η περιγραφή των φυσικών φαινομένων είναι απλούστερη στα αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Μπορούμε όμως να ορίσουμε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς; Βρισκόμαστε πάνω στη Γη η οποία κινείται με μεγάλη ταχύτητα (30 km/s) σε περίπου κυκλική τροχιά γύρω από τον Ήλιο. Επίσης η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της και κατά συνέπεια ένα σύστημα αναφοράς πάνω στη Γη δεν μπορεί να είναι αδρανειακό. Το ρόλο του αδρανειακού συστήματος αναφοράς μπορεί προσεγγιστικά να τον παίξει ένα ηλιοκεντρικό σύστημα, δηλαδή ένα σύστημα αναφοράς που έχει την αρχή του στον Ήλιο και οι άξονες του κατευθύνονται προς τρία μακρινά άστρα. Στο σύστημα

αυτό ισχύει η αρχή της αδράνειας. Την ύπαρξη ενός τέτοιου συστήματος αναφοράς μπορεί να τη δείξει το εκκρεμές του Foucault.

Το εκκρεμές του Foucault είναι ένα απλό μαθηματικό εκκρεμές. Ας θεωρήσουμε ένα τέτοιο εκκρεμές σ' ένα πόλο της Γης, κρεμασμένο από ένα σημείο, με δυνατότητα περιστροφής γύρω από τη σύνδεση του, χωρίς τριβή (Σχήμα 1.7,1). Πάνω στο σφαιρίδιο του εκκρεμούς δρουν οι δυνάμεις του βάρους του mg και της τάσης του νήματος F , οι οποίες βρίσκονται πάνω σ' ένα επίπεδο το οποίο περνά από τον άξονα της Γης. Κατά την κίνηση του εκκρεμούς το επίπεδο αυτό δεν πρέπει να αλλάζει αλλά να παραμένει σταθερό. Όμως σε μια αστρική μέρα (περίπου 23 h και 56 min) το επίπεδο αιωρήσεων του εκκρεμούς κάνει μια στροφή ως προς τη Γη, αντίθετα προς τη φορά περιστροφής της. Η τροχιά της σφαίρας του εκκρεμούς φαίνεται ότι έχει μια ανεπαίσθητη καμπύλωση (στο βόρειο ημισφαίριο προς τα δεξιά) λόγω των δυνάμεων Coriolis.



Σχήμα 1.7,1

Το επίπεδο αιωρήσεων του εκκρεμούς, για ένα κάτοικο της Γης, φαίνεται να περιστρέφεται αντίθετα από τη φορά περιστροφής της Γης.

Η Γη δεν είναι αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Πάνω στο σφαιρίδιο του εκκρεμούς δεν δρα καμιά δύναμη έξω από το επίπεδο αιωρήσεων του. Αυτό σημαίνει ότι, αφού το επίπεδο του εκκρεμούς μένει σταθερό, η Γη περιστράφηκε κατά αντίθετη φορά. Το πεί-

ραμα με το εκκρεμές του Foucault επιτρέπει να βρούμε την περιστροφή της Γης ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, αυτό που αναφέραμε παραπάνω. Στο σύστημα αυτό, και σε κάθε άλλο που κινείται ευθύγραμμα και ομαλά ως προς αυτό, ισχύει ο νόμος της αδράνειας.

Σημειώνουμε ότι ο χρόνος T μιας πλήρους περιστροφής του επιπέδου αιωρήσεων του εκκρεμούς του Foucault, σε γεωγραφικό πλάτος φ , δίνεται από τη σχέση $T = T_0/\eta\mu\varphi$, όπου T_0 ο χρόνος περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονα της (μια αστρική μέρα). Το πείραμα του ο Foucault το εκτέλεσε το 1851, κρεμώντας από το θόλο του Πανθέου στο Παρίσι, με σύρμα μήκους περίπου 67 m, μία μάζα 28 kg. Η μάζα του εκκρεμούς μπορούσε να αιωρείται ελεύθερα προς κάθε κατεύθυνση. Η περίοδος του εκκρεμούς ήταν 17 s. Το επίπεδο της τροχιάς του εκκρεμούς στρεφόταν περίπου 11° την ώρα κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού, κάνοντας ένα κύκλο σε 32 ώρες περίπου, σύμφωνα με την παραπάνω σχέση.

1.8 Απόλυτος χώρος – Απόλυτη κίνηση

Οι νόμοι της Μηχανικής εκφράζονται με τον ίδιο τρόπο σ' όλα τα Α.Σ.Α., είτε αυτά είναι σε ηρεμία είτε κινούνται ευθύγραμμα και ομαλά. Λέγοντας ότι το σύστημα είναι σε ηρεμία, εννοούμε ότι το σύστημα είναι σε ηρεμία ως προς τι; Θα λέγαμε ίσως ότι ηρεμεί ως προς το χώρο, αλλά ως προς ποιά χώρο; Μπορούμε να έχουμε μια αφηρημένη γεωμετρική έννοια του χώρου; Κάθε σύστημα αναφοράς ορίζει το δικό του χώρο. Στη Φυσική μπορούμε να θεωρήσουμε το χώρο χωρίς την ύπαρξη υλικών σωμάτων;

Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει ένα προνομιούχο σύστημα αναφοράς, που είναι ακίνητο ως προς το χώρο, στον οποίο ισχύει η αρχή της αδράνειας όπως τη ξέρουμε. Τότε όμως υπάρχουν άπειρα άλλα Α.Σ.Α. στα οποία επίσης ισχύει η αρχή της αδράνειας. Ο χώρος όμως αυτός είναι δύσκολο να εννοηθεί ότι είναι ανεξάρτητος από τα υλικά σώματα. Κατά μία άποψη δεν είναι ο χώρος αυτός που ορίζει τα σώματα και τη μορφή τους, αλλά τα σώματα είναι αυτά που ορίζουν το χώρο και τη Γεωμετρία του.

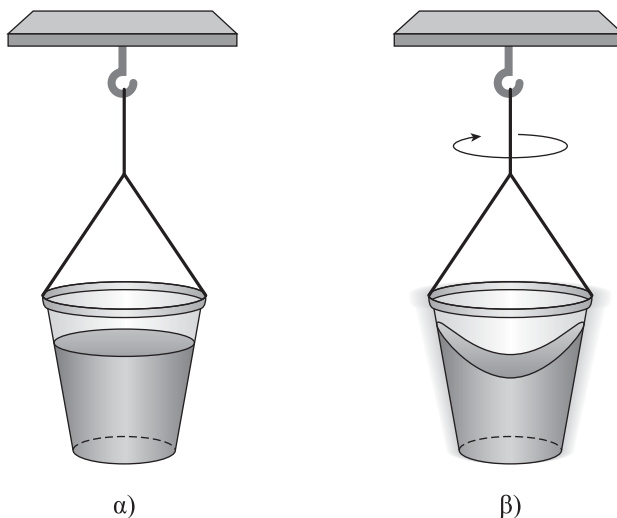
Ο Newton θεωρεί το χώρο απόλυτο, ομογενή, ισότροπο, αιώνιο, αναλλοίωτο, ακίνητο. Μπορούμε όμως να φέρουμε στο φως ένα τέτοιο χώρο, που μοιάζει μ' ένα κουτί, μέσα στο οποίο συμβαίνουν τα φαινόμενα της Φυσικής; Στο χώρο αυτό θα μπορούσαμε να ορίσουμε την κίνηση ενός σώματος χωρίς να κάνουμε αναφορά σε άλλο σώμα. Όταν λέμε ότι ένα αυτοκίνητο τρέχει με ταχύτητα 100 km/h, εννοούμε ότι τρέχει ως προς το δρόμο που το θεωρούμε ακίνητο. Πώς θα ορίσουμε όμως τη μετατόπιση και την ταχύτητα ενός σώματος στον απόλυτο χώρο; Μπορούμε να βρούμε ένα σύστημα αναφοράς ακίνητο στο χώρο, ώστε η κίνηση των σωμάτων στο σύστημα αυτό να είναι η απόλυτη κίνηση;

Η μορφή των νόμων της Μηχανικής στα Α.Σ.Α. δεν μας επιτρέπει με πείραμα της Μηχανικής να βρούμε την απόλυτη κίνηση. Ένας επιβάτης ενός πλοίου, κλεισμένος μέσα σε μια καμπίνα, χωρίς να έχει καμιά επαφή με τον έξω κόσμο, δεν μπορεί να βρει απόλυτη κίνηση, γιατί όλοι οι νόμοι της Μηχανικής ισχύουν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο είτε το σύστημα του είναι ακίνητο, είτε κινείται ευθύγραμμα και ομαλά. Για να ήταν δυνατόν να διαπιστωθεί απόλυτη κίνηση, θα έπρεπε ο χώρος να είναι γεμάτος με ένα υλικό, τον αιθέρα όπως υπέθεσαν, πάνω στο οποίο θα μπορούσαμε να σηματοδέσουμε σημεία, ως

προς τα οποία θα υπολογίζαμε την απόλυτη κίνηση, γιατί τότε δεν θα υπήρχε η ανάγκη να αναφερθούμε σε άλλα σώματα.

Ο Newton θεώρησε ότι οι δυνάμεις αδράνειας, που αναπτύσσονται σε επιταχυνόμενα συστήματα αναφοράς, μπορούν να δείξουν την ύπαρξη του απόλυτου χώρου. Αυτό θα μπορούσε να φανεί καθαρά από τις δυνάμεις αδράνειας που αναπτύσσονται στα περιστρεφόμενα συστήματα αναφοράς. Στην περιστροφική κίνηση μπορούμε να ορίσουμε σχετική και απόλυτη κίνηση, όπως επιχείρησε να δείξει με το εξής πείραμα.

Παίρνουμε ένα κουβά με νερό, εξαρτημένο από ένα νήμα (Σχήμα 1.8,1 α). Το νήμα το στρέφουμε αργά, ώστε να στραφεί πολλές φορές και μετά αφήνουμε το σύστημα ελεύθερο. Ο κουβάς αρχίζει να περιστρέφεται. Στην αρχή η επιφάνεια του νερού είναι επίπεδη. Σιγά-σιγά ο κουβάς με την κίνηση του παρασύρει το νερό και, λόγω των φυγοκεντρικών δυνάμεων, η επιφάνεια του νερού γίνεται παραβολοειδής από περιστροφή (Σχήμα 1.8,1 β). Αν ακινητοποιήσουμε τον κουβά, το νερό σιγά-σιγά θα ηρεμήσει και η επιφάνεια του θα γίνει πάλι επίπεδη.



Σχήμα 1.8,1

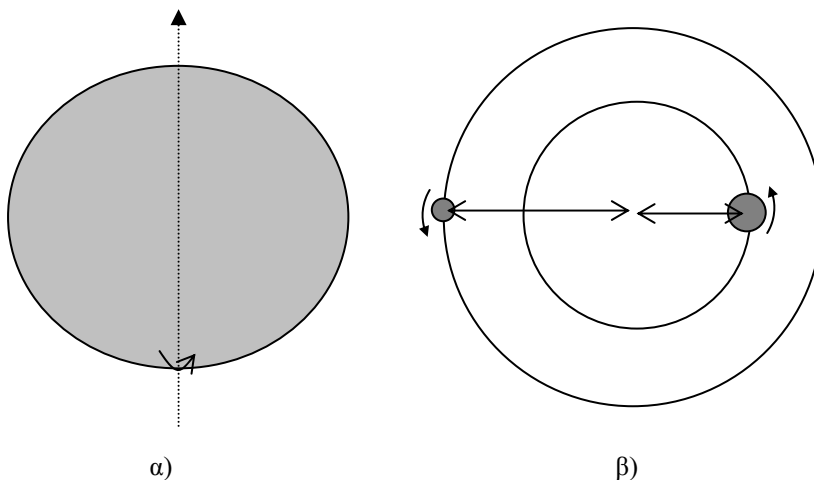
α) Κουβάς με νερό.

β) Κατά την περιστροφή του κουβά η επιφάνεια του νερού γίνεται παραβολοειδής.

Το πείραμα αυτό δείχνει ότι το σχήμα της επιφάνειας του νερού δεν εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του νερού αλλά από την απόλυτη. Αρχικά υπάρχει περιστροφική κίνηση του κουβά και σχετική κίνηση κουβά νερού. Σιγά-σιγά όμως το νερό παρασύρεται, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του νερού φτάνει εκείνη του κουβά, δεν υπάρχει σχετική κίνηση κουβά νερού και η επιφάνεια του νερού γίνεται παραβολοειδής από περιστροφή. Τελικά, όταν σταματήσουμε απότομα τον κουβά, η παραβολοειδής μορφή της επιφάνειας του νερού διατηρείται, μέχρι να γίνει επίπεδη, όταν το νερό σταματήσει να περιστρέφεται (Σχήμα 1.8,1 α).

Η παραπάνω όμως περιγραφή είναι σ' ένα σύστημα αναφοράς συνδεδεμένο με τη Γη. Η επιφάνεια του νερού είναι επίπεδη, όταν το νερό δεν περιστρέφεται και παραβολοειδής, όταν περιστρέφεται ως προς το σύστημα αυτό. Η κίνηση του κουβά δεν έχει επίδραση στο σχήμα της επιφάνειας του νερού.

Ας θεωρήσουμε την περιγραφή του πειράματος σε ένα σύστημα αναφοράς, που περιστρέφεται γύρω από το νήμα εξάρτησης του κουβά, με γωνιακή ταχύτητα ίση με τη μέγιστη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κουβά. Ως προς το σύστημα αυτό, αρχικά το νερό περιστρέφεται και η επιφάνεια του είναι επίπεδη. Ύστερα από λίγο, όταν η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του νερού φτάσει τη μέγιστη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κουβά, το νερό είναι ακίνητο και η επιφάνεια του είναι παραβολοειδής. Στη συνέχεια, ο κουβάς και το νερό περιστρέφονται με την ίδια σταθερή γωνιακή ταχύτητα (ίδια με την αρχική) και η επιφάνεια του νερού είναι επίπεδη. Ως προς αυτό το σύστημα αναφοράς, η επιφάνεια του νερού είναι παραβολοειδής όταν το νερό ηρεμεί και επίπεδη όταν περιστρέφεται με ορισμένη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 1.8,2

α) Πλάτυνση της Γης λόγω περιστροφής.

β) Σύστημα διπλών άστρων. Το ένα άστρο θα έπεφτε πάνω στο άλλο, αν δεν υπήρχε η περιστροφή γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος τους.

Μήπως θα μπορούσε ναδειχθεί η απόλυτη κίνηση από την πλάτυνση της Γης (Σχήμα 1.8,2 α), που έγινε λόγω της περιστροφής της Γης από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις, όταν η Γη ήταν ακόμα ρευστή; Δεν είναι το ίδιο να είναι ακίνητη η ουράνια σφαίρα και να περιστρέφεται η Γη, οπότε υπάρχουν φυγοκεντρικές δυνάμεις και πλάτυνση, με το να περιστρέφεται η ουράνια σφαίρα και να είναι ακίνητη η Γη, οπότε δεν θα υπάρχουν ούτε φυγοκεντρικές δυνάμεις ούτε πλάτυνση. Το εκκρεμές του Foucault, όπως είδαμε (παρ. 1.7), δείχνει την περιστροφή της Γης και η πλάτυνση την επιβεβαιώνει. Αν δεν υπήρχε περιστροφή της Γης, δεν θα υπήρχε πλάτυνση της Γης, η επιτάχυνση της βαρύτητας δεν θα

ήταν μικρότερη στον ισημερινό απ' ότι στους πόλους και οι δυνάμεις Coriolis δεν θα εμφανιζόταν.

Ένα σύστημα διπλών άστρων δεν θα υπήρχε, αν δεν θα υπήρχε περιστροφή γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος τους (Σχήμα 1.8,2 β). Το ίδιο ισχύει και για την κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο.

Δείχνουν όμως αυτά την απόλυτη κίνηση; Σύμφωνα με την άποψη του Newton για τον απόλυτο χώρο, τα παραπάνω φαινόμενα πρέπει να θεωρηθούν όχι ως αποτέλεσμα σχετικής κίνησης ως προς άλλα σώματα, π.χ. τα μακρινά άστρα, αλλά ως αποτέλεσμα περιστροφής στον άδειο χώρο. Τα φαινόμενα των φυγοκεντρικών δυνάμεων και των δυνάμεων Coriolis δεν θα υπήρχαν, αν η Γη ήταν ακίνητη και η ουράνια σφαίρα περιστρεφόταν αντίθετα. Το επίπεδο του εκκρεμούς του Foucault δεν θα άλλαζε. Δείχνουν όμως αυτά την απόλυτη περιστροφή; Τις περιστροφικές κινήσεις δεν μπορούμε να τις θεωρήσουμε με απουσία άλλων σωμάτων· δηλαδή η περιστροφική κίνηση των σωμάτων είναι οπωσδήποτε σχετική. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σύμπαν ορίζει ένα σύστημα αναφοράς ως προς το οποίο, όταν ένα σώμα περιστρέφεται, αναπτύσσονται φυγοκεντρικές δυνάμεις. Το εκκρεμές του Foucault, οι φυγοκεντρικές δυνάμεις και οι δυνάμεις Coriolis απλώς δείχνουν ότι η Γη δεν είναι αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Το επίπεδο αιωρήσεων του εκκρεμούς του Foucault δεν αλλάζει σε αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Αν δεν υπήρχε η περιστροφή των αστρικών συστημάτων, η παγκόσμια έλξη θα έριχνε το ένα άστρο πάνω στο άλλο. Εκείνο που ενδιαφέρει είναι η σχετική κίνηση.

Η περιγραφή των φυσικών φαινομένων γίνεται πάντα από κάποιο σύστημα αναφοράς, αδρανειακό ή μη. Μπορούμε να περιγράψουμε τα φυσικά φαινόμενα και να εκφράσουμε τους νόμους της Φυσικής χρησιμοποιώντας ένα οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς. Η έκφραση των νόμων της Φυσικής είναι απλούστερη σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Η περιγραφή της συμπεριφοράς του νερού στον περιστρεφόμενο κουβά είναι απλούστερη σ' ένα κατάλληλο σύστημα αναφοράς συνδεδεμένο με τη Γη και πολύπλοκη σ' ένα σύστημα αναφοράς που περιστρέφεται μαζί με τον κουβά. Οι κινήσεις των πλανητών περιγράφονται απλούστερα σ' ένα ηλιοκεντρικό (Αρίσταρχος) παρά σ' ένα γεωκεντρικό (Πτολεμαίος) σύστημα αναφοράς.

Στη Μηχανική, ανάμεσα σ' όλα τα συστήματα αναφοράς, υπάρχουν συστήματα στα οποία ο νόμος της αδράνειας εκφράζεται με τη γνωστή του μορφή "**απουσία δυνάμεων αλληλεπίδρασης, οι ταχύτητες των σωμάτων μένουν σταθερές και αμετάβλητες**". Αυτό σημαίνει ότι οι συντεταγμένες χώρου των σωμάτων είναι γραμμικές συναρτήσεις του χρόνου. Αυτά είναι τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Σ' αυτά οι νόμοι της Μηχανικής έχουν την ίδια απλή μορφή. Μπορούμε να πούμε ότι τα συστήματα αυτά (Α.Σ.Α.) κατέχουν προνομιούχα θέση ανάμεσα σ' όλα τα άλλα συστήματα αναφοράς.

* Με πειράματα της Μηχανικής δεν μπορεί να δειχθεί απόλυτη κίνηση. Τα φαινόμενα όμως όλων των κλάδων της Φυσικής είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η φύση είναι μία και είναι λογικό να δεχτούμε ότι τα φυσικά φαινόμενα διαδραματίζονται όμοια σ' όλα τα Α.Σ.Α. για όλους τους τομείς της Φυσικής. Με τη σκέψη αυτή, θα πρέπει να μη μπορεί να δειχτεί απόλυτη κίνηση και με πειράματα οποιουδήποτε άλλου τομέα της Φυσικής, π.χ. του Ηλεκτρισμού ή της Οπτικής.

Στον Ηλεκτρισμό οι θεμελιώδεις εξισώσεις του Maxwell δεν είναι συναλλοιώτες στους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου, αλλά αλλάζουν μορφή. Τα φαινόμενα του Ηλε-

κτρομαγνητισμού δεν εμφανίζονται όμοια σ' όλα τα Α.Σ.Α. Σ' ένα Α.Σ.Α. στο οποίο ισχύουν οι εξισώσεις του Maxwell, η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι c , ίση με την ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με $\epsilon_0\mu_0c^2 = 1$, όπου ϵ_0 και μ_0 η διηλεκτρική σταθερή και η μαγνητική διαπερατότητα του κενού αντίστοιχα, μετρημένες στο Διεθνές Σύστημα (S.I.). Αν όμως η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι c σ' ένα Α.Σ.Α., σ' ένα άλλο Α.Σ.Α., που κινείται με ταχύτητα V ως προς το πρώτο, η ταχύτητα του φωτός στο κενό σ' αυτό μπορεί να είναι $c - V$ ή $c + V$, ανάλογα με την κίνηση του.

Επομένως θα υπάρχει ένα προνομιούχο Α.Σ.Α. ως προς το οποίο η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι c και ως προς αυτό θα μπορούσαμε να εξετάσουμε τις κινήσεις. Το φως και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν θα ακολουθούσαν τη σχετικότητα της Κλασικής Φυσικής. Πάνω σ' αυτό οι υποθέσεις που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι:

- α) Η αρχή της Σχετικότητας της Κλασικής Μηχανικής δεν ισχύει για τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, για τα οποία θα μπορούσαμε να βρούμε ένα απόλυτο προνομιοσύχο σύστημα αναφοράς.
- β) Θεωρώντας ότι η αρχή της Σχετικότητας της Κλασικής Μηχανικής είναι παγκόσμια, οι εξισώσεις του Maxwell δεν την ικανοποιούν με τη γνωστή τους μορφή (αλλάζουν μορφή με τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου) και πρέπει να τους δώσουμε άλλη μορφή.
- γ) Θεωρώντας ότι η αρχή της Σχετικότητας ισχύει για όλα τα φαινόμενα της Φυσικής και όχι μόνο της Μηχανικής και ότι σύμφωνα με την αρχή αυτή το σύστημα των εξισώσεων του Maxwell πρέπει να έχει την ίδια μορφή σε όλα τα Α.Σ.Α., πρέπει να αναζητήσουμε άλλο είδος μετασχηματισμών. Σύμφωνα με τους μετασχηματισμούς αυτών, όλοι οι νόμοι της Φυσικής και όχι μόνο της Μηχανικής, πρέπει να έχουν την ίδια μορφή σ' όλα τα Α.Σ.Α.

Το τι απ' όλα συμβαίνει θα το δείξει το πείραμα. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με ορισμένα πειράματα που έφεραν τη Φυσική σε αδιέξοδο, από το οποίο την έβγαλε η Θεωρία της Σχετικότητας του Einstein.

1.9 Ο αιθέρας

Μέχρι τώρα ασχοληθήκαμε με την ισοδυναμία των Α.Σ.Α. και με την αδυναμία να δειχθεί απόλυτη κίνηση με πείραμα της Μηχανικής. Η ισοδυναμία όμως των Α.Σ.Α. δεν ισχύει στην Ηλεκτροδυναμική. Οι θεμελιώδεις εξισώσεις της ηλεκτροδυναμικής, δηλαδή οι εξισώσεις του Maxwell, δεν είναι συναλλοίωτες στους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου. Τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα δεν διαδραματίζονται με τον ίδιο τρόπο σ' όλα τα Α.Σ.Α. Οι μαγνητικές δράσεις των ηλεκτρικών ρευμάτων, πάνω σε κινούμενα ηλεκτρικά φορτία, εξαρτώνται όχι μόνο από την απόσταση αλλά και από την ταχύτητα των ηλεκτρικών φορτίων. Στην περίπτωση τους οι δυνάμεις που αναπτύσσονται (δράση, αντίδραση) δεν είναι πάνω στην ίδια ευθεία και οι αντιλήψεις της Μηχανικής του Newton δεν είναι εφαρμόσιμες.

Από τις θεωρίες που αναπτύχθηκαν για τη φύση του φωτός, κυριότερες ήταν η σωματιδιακή του Newton και η κυματική του Huyghens. Έγινε παραδεκτή η κυματική φύση του φωτός, γιατί εξηγούσε την ευθύγραμμη διάδοση του φωτός και ότι το φως μέσα στα οπτικώς πυκνότερα μέσα έχει μικρότερη ταχύτητα, ενώ η σωματιδιακή θεωρία εξηγούσε την ευθύγραμμη διάδοση του φωτός, αλλά έδινε ότι μέσα στα οπτικώς πυκνότερα μέσα η ταχύτητα του φωτός είναι μεγαλύτερη. Επί πλέον εξηγούσε φαινόμενα κυματικής φύσης, στα οποία δεν έδινε ικανοποιητική απάντηση η σωματιδιακή θεωρία, όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση⁶. Το φως, ως κύμα, για τη διάδοση του είχε ανάγκη ελαστικού μέσου, του αιθέρα όπως υπέθεσαν. Αργότερα ο Maxwell έδειξε ότι το φως ταξιδεύει στο κενό με την πεπερασμένη ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Θα μπορούσαμε να υποθέσουμε την ύπαρξη ενός προνομιούχου συστήματος αναφοράς, κάτι ανάλογο με την ατμόσφαιρα για τα ηχητικά κύματα, ως προς το οποίο η ταχύτητα του φωτός είναι ίδια προς κάθε κατεύθυνση. Ως προς το σύστημα αυτό, θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την απόλυτη κίνηση των σωμάτων όχι με μηχανικό αλλά με οπτικό πείραμα. Στο απόλυτο αυτό Α.Σ.Α., η ταχύτητα διάδοσης του φωτός θα ήταν ανεξάρτητη από τη κατεύθυνση διάδοσης, ενώ σ' όλα τα άλλα Α.Σ.Α., που κινούνται με ταχύτητα V ως προς αυτό, θα εξαρτιόταν από αυτή και θα ήταν π.χ. $c - V$ ή $c + V$, ανάλογα με την κίνηση τους. Αν υπάρχει ένα τέτοιο σύστημα, θα είναι προνομιούχο, όπως προνομιούχος θα είναι και ο παρατηρητής που βρίσκεται σ' αυτό, ενώ αν δεν υπάρχει όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς με τους παρατηρητές τους θα είναι ισοδύναμα.

Το γεγονός ότι γενικά υπάρχει διάδοση στο χώρο, οδήγησε στην υπόθεση ότι ο χώρος δεν είναι άδειος αλλά γεμάτος με ένα ελαστικό μέσο, τον αιθέρα. Η θεωρία του αιθέρα έχει εγκαταλειφθεί γι' αυτό και δεν θα την αναπτύξουμε λεπτομερειακά. Ο αιθέρας έπρεπε να έχει παράδοξες ιδιότητες. Έπρεπε να είναι στερεό, γιατί μόνο στα στερεά διαδίδονται τα εγκάρσια κύματα όπως π.χ. τα φωτεινά, να είναι πολύ αραιός, να γεμίζει το σύμπαν ανεξάρτητα από την ύπαρξη των υλικών σωμάτων και να μην εμποδίζει καθόλου την κίνηση των σωμάτων μέσα σ' αυτόν. Ακόμα θα μπορούσε να μετρηθεί η κίνηση της Γης ως προς τον αιθέρα, αφού λόγω της κίνησης της γύρω από τον Ήλιο με ταχύτητα 30 km/s σε έξι μήνες υπάρχει διαφορά ταχύτητας 60 km/s.

Προβλήματα και προβληματισμοί που αφορούσαν την ταχύτητα του φωτός ως προς τον αιθέρα, την κίνηση πηγών και δεκτών φωτός οδήγησαν την Φυσική σε αδιέξοδο.

1.10 Η ταχύτητα του φωτός

Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι ίδια για όλα τα χρώματα⁷. Αυτό διαπιστώνεται εύκολα από το γεγονός ότι, κατά την έκλειψη των ουρανίων σωμάτων, η εξαφάνιση τους γίνεται ταυτόχρονα για όλα τα χρώματα. Αν δεν συνέβαινε αυτό, θα έπρεπε κατά την εξαφάνιση του το ουράνιο σώμα ν' αλλάζει χρώματα.

⁶ Σήμερα δεχόμαστε ότι το φως δείχνει διπλή υπόσταση, σωματιδιακή και κυματική και αυτό εξηγεί ικανοποιητικά τα φαινόμενα της Φυσικής, στα οποία λαμβάνει μέρος το φως.

⁷ Από το 1983 η ταχύτητα του φωτός στο κενό ορίστηκε ως 299.792.458 m/s και το πρότυπο μέτρο ως η απόσταση που διανύει το φως σε χρόνο 1/299.792.458 s.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με την ταχύτητα του φωτός, από διάφορα αδρανειακά συστήματα αναφοράς, όπως είχε απασχολήσει τους Φυσικούς πριν από την εμφάνιση της Θεωρίας της Σχετικότητας και κατά πόσο επηρεάζεται από το μέσο διάδοσης, την ταχύτητα της πηγής ή του δέκτη. Προφανώς σύμφωνα με την κυματική θεωρία η ταχύτητα του φωτός στο μέσο διάδοσης δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα της πηγής (όπως συμβαίνει για τα ηχητικά κύματα στην ατμόσφαιρα), ενώ σύμφωνα με τη σωματιδιακή θεωρία σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς στην ταχύτητα του φωτός πρέπει να προστεθεί και η ταχύτητα της πηγής. Σε όλες τις περιπτώσεις πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ταχύτητα του δέκτη.

α) Μέθοδος Römer.

Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός από τις εκλείψεις του δορυφόρου του Δία Ιώ

Η πρώτη μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας του φωτός είναι αστρονομική και ανήκει στο Δανό Αστρονόμο Römer (1675). Ο Römer έκανε παρατηρήσεις πάνω στις εκλείψεις των δορυφόρων του Δία. Η Γη περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο σε ένα χρόνο και ο Δίας σε δώδεκα περίπου χρόνια. Όταν η Γη είναι στο σημείο Α, την μικρότερη απόσταση της από τον πλανήτη Δία (Σχήμα 1.10,1), η έκλειψη ενός δορυφόρου του Δία και συγκεκριμένα του δορυφόρου του "Ιώ", όταν μπαίνει στη σκιά του πλανήτη, διαρκεί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Όσο όμως η Γη απομακρύνεται από το Δία, η έναρξη της έκλειψης καθυστερεί κάθε φορά τόσο, όσο χρόνο κάνει το φως να διανύσει το μέγεθος της απόστασης Δίας-Γη.

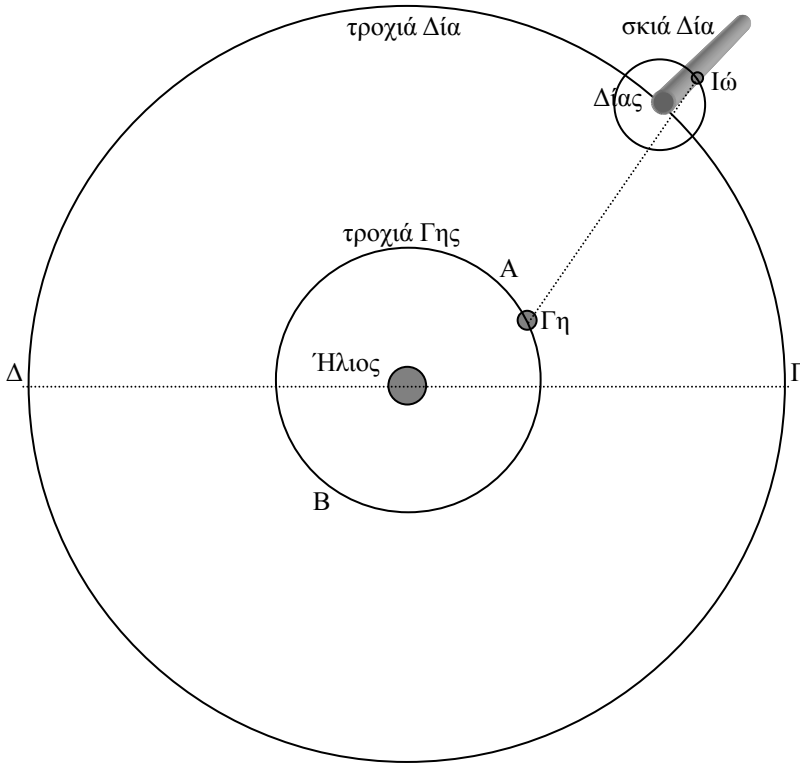
Ύστερα από έξι μήνες περίπου η Γη είναι στη μεγαλύτερη απόσταση από το Δία, στη θέση Β, αφού ο Δίας έχει μετακινηθεί λίγο (15°) πάνω στην τροχιά του. Η έναρξη της έκλειψης του δορυφόρου του Δία θα καθυστερήσει σε σχέση με τη θέση Α τόσο, όσο χρόνο κάνει το φως να διανύσει τη διάμετρο της γήινης τροχιάς γύρω από τον Ήλιο. Η καθυστέρηση αυτή (στους άλλους έξι μήνες θα είναι φυσικά συντόμευση) είναι 17 min, περίπου 1000 s. Αν ληφθεί υπόψη ότι η διάμετρος της τροχιάς της Γης είναι $3 \cdot 10^8$ km, η ταχύτητα του φωτός c υπολογίζεται σε $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. (Ο Römer είχε μετρήσει καθυστέρηση περίπου 22 min που αντιστοιχεί σε ταχύτητα του φωτός στο κενό 210.000 km/s).

Απόλυτη κίνηση του ηλιακού συστήματος

Ο Maxwell (1879) υπέδειξε ότι με την παρατήρηση των εκλείψεων των δορυφόρων του Δία θα μπορούσε να βρεθεί η κίνηση του ηλιακού μας συστήματος ως προς τον αιθέρα.

Ας υποθέσουμε ότι ο Ήλιος με το ηλιακό του σύστημα κινείται με ταχύτητα v ως προς τον αιθέρα κατά τη διεύθυνση ΔΓ (Σχήμα 1.10,1). Αν η ταχύτητα του φωτός ως προς τον αιθέρα είναι c , όταν ο Δίας είναι στο Γ, η ταχύτητα του φωτός από το Δία ως προς τη Γη θα είναι $c + v$. Αν δ είναι η διάμετρος της τροχιάς της Γης, η καθυστέρηση της έναρξης της έκλειψης δορυφόρου του Δία, σε έξι μήνες, θα είναι $t_1 = \delta / (c + v)$.

Ύστερα από έξι χρόνια περίπου ο Δίας θα είναι στη θέση Δ. Η αντίστοιχη ταχύτητα του φωτός ως προς τη Γη θα είναι $c - v$. Ο αντίστοιχος χρόνος καθυστέρησης για την έναρξη της έκλειψης του δορυφόρου του Δία σε έξι μήνες θα είναι $t_2 = \delta / (c - v)$.



Σχήμα 1.10,1

Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός με τη μέθοδο Römer: Σε έξι μήνες περίπου η απόσταση Γη-Δίας έχει μεγαλώσει τόσο, όσο είναι η διάμετρος της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο.

Η ίδια μέτρηση μπορεί να γίνει όταν υπάρχει κίνηση του Ήλιου, μαζί με το ηλιακό σύστημα, ως προς τον αιθέρα. Ο Ήλιος μαζί με όλο το ηλιακό σύστημα θεωρούμε ότι κινείται, κατά τη διεύθυνση ΔΓ, με ταχύτητα v .

Σε έξι χρόνια πρέπει να υπάρχει χρονική διαφορά Δt ίση με:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\delta}{c - v} - \frac{\delta}{c + v} \Rightarrow \Delta t = \frac{2\delta v}{c^2 - v^2} \quad (1.10,1)$$

$$\text{για } v \ll c \Rightarrow \Delta t = \frac{2\delta v}{c^2}$$

Επειδή $(\delta/c) \approx 1000$ s, $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s προκύπτει ότι, αν $\Delta t = 1$ s, θα είναι $v = 150$ km/s. Διαφορά Δt δεν παρατηρήθηκε. Συνεπώς η ταχύτητα του φωτός δεν εξαρτάται από την κίνηση του δέκτη ως προς τον αιθέρα.

β) Το φαινόμενο Doppler

Τα ηχητικά κύματα που δημιουργούνται στον αέρα, διαδίδονται προς κάθε κατεύθυνση, μέσα στον αέρα, με την ίδια ταχύτητα c ως προς τον αέρα. Όταν ένας ακροατής και μια ηχητική πηγή ακινητούν ως προς τον αέρα, ο ακροατής ακούει ήχο ίδιας συχνότητας με εκείνη που εκπέμπει η πηγή. Όταν η πηγή ή ο ακροατής ή και οι δυο κινούνται ως προς τον αέρα, ο ακροατής ακούει ήχο διαφορετικής συχνότητας από εκείνη που εκπέμπει η πηγή. Π.χ. όταν ένα αυτοκίνητο σφυρίζει, ο ήχος του μας φαίνεται οξύτερος (μεγαλύτερης συχνότητας), όταν μας πλησιάζει και βαρύτερος (μικρότερης συχνότητας), όταν απομακρύνεται.

Ας υποθέσουμε για ευκολία ότι η ηχητική πηγή και ο ακροατής κινούνται πάνω στην ίδια ευθεία. Ας θέσουμε c , v_π , v_α , αντίστοιχα την ταχύτητα του κύματος (ήχου), της ηχητικής πηγής και του ακροατή ως προς τον αέρα. Όταν η ηχητική πηγή εκπέμπει ήχο συχνότητας ν , ο ακροατής ακούει ήχο συχνότητας ν' . Η συχνότητα ν' συνδέεται με τη ν (η απόδειξη δίνεται στην παρ. 5.1) με τη σχέση:

$$\nu' = \nu \frac{c - v_\alpha}{c - v_\pi} \Rightarrow \nu' = \nu \frac{1 - \frac{v_\alpha}{c}}{1 - \frac{v_\pi}{c}} \quad (1.10,2)$$

Στις παραπάνω σχέσεις οι ταχύτητες είναι θετικές, όταν η φορά τους είναι ίδια με τη φορά διάδοσης του κύματος και αρνητικές, όταν είναι αντίθετη.

Παρατηρούμε ότι όσον αφορά τις ταχύτητες πηγής-ακροατή ο τύπος δεν είναι συμμετρικός. Αν εναλλάξουμε τις ταχύτητες πηγής-ακροατή, ενώ η σχετική τους ταχύτητα παραμένει ίδια, η συχνότητα που ακούει ο ακροατής είναι διαφορετική. Π.χ. δεν είναι το ίδιο να είναι ακίνητη η πηγή ($v_\pi = 0$) και να την πλησιάζει ο ακροατής με ταχύτητα v , με το να είναι ακίνητος ο ακροατής ($v_\alpha = 0$) και να τον πλησιάζει η πηγή με ταχύτητα v . Η εφαρμογή του παραπάνω τύπου για τις δυο αυτές περιπτώσεις δίνει:

$$\text{ακίνητη πηγή } \nu' = \nu \left(1 + \frac{v}{c} \right), \quad \text{ακίνητος ακροατής } \nu' = \frac{\nu}{1 - \frac{v}{c}} \quad (1.10,3)$$

Οι παραπάνω τύποι πρέπει να ισχύουν και για το φως, αφού και αυτό διαδίδεται με κύματα (ηλεκτρομαγνητικά), αρκεί με c να συμβολίσουμε την ταχύτητα του φωτός ως προς τον αιθέρα.

Σημειώνουμε ότι η συχνότητα του φωτός σχετίζεται με το χρώμα του. Το οπτικό φάσμα των άστρων είναι γραμμικό. Όταν ένα άστρο το πλησιάζουμε ή μας πλησιάζει, οι φασματικές του γραμμές μετατοπίζονται προς μεγαλύτερες συχνότητες, ενώ, όταν απομακρυνόμαστε ή απομακρύνεται μετατοπίζονται προς μικρότερες συχνότητες. Το πρόβλημα είναι αν η μετατόπιση των φασματικών γραμμών εξαρτάται από την απόλυτη κίνηση της πηγής (άστρου) και του δέκτη (Γης) ως προς τον αιθέρα ή από τη σχετική κίνηση πηγής-δέκτη.

Για $v_a \ll c$ και $v_\pi \ll c$ η σχέση των συχνοτήτων δίνει:

$$v' = v \frac{1 - \frac{v_a}{c}}{1 - \frac{v_\pi}{c}} \approx v \left(1 - \frac{v_a}{c} \right) \left(1 + \frac{v_\pi}{c} \right) = v \left[1 + \frac{v_\pi - v_a}{c} - \frac{v_a v_\pi}{c^2} \right] \quad (1.10,4)$$

Ο όρος $(v_\pi - v_a)/c$ σχετίζεται με τη σχετική ταχύτητα της πηγής ως προς τον παρατηρητή. Ο όρος $v_a v_\pi / c^2$ σχετίζεται με την απόλυτη κίνηση πηγής και παρατηρητή ως προς τον αιθέρα και είναι δύσκολο να μετρηθεί γιατί είναι πολύ μικρός.

Είναι φανερό ότι η ύπαρξη του μέσου του αιθέρα για τη διάδοση των φωτεινών κυμάτων, όπως της ατμόσφαιρας για τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων, δίνει διαφορετικά αποτελέσματα για την ίδια σχετική ταχύτητα πηγής-δέκτη, διότι υπάρχει ο όρος με τις απόλυτες ταχύτητες της πηγής και του δέκτη ως προς τον αιθέρα. Αυτό δεν είναι σύμφωνο με την αρχή της ισοδυναμίας των Α.Σ.Α. στην Κλασική Φυσική και επιτρέπει τη μέτρηση της απόλυτης κίνησης της Γης ως προς τον αιθέρα, κάτι που δεν έγινε δυνατό. Η ισοδυναμία των Α.Σ.Α. θα μπορούσε να αποκατασταθεί, αν θεωρούσαμε ότι κάθε σώμα παρασύρει κατά κάποιο τρόπο μερικά ή ολικά τον αιθέρα.

γ) Διάθλαση

Κατά τη διάθλαση (το πέρασμα του φωτός από ένα οπτικό μέσο σ' ένα άλλο), ο δείκτης διάθλασης του φωτός n δίνεται από το λόγο της ταχύτητας του φωτός στο κενό (στον αιθέρα) c_0 προς την ταχύτητα του φωτός c μέσα στο οπτικό μέσο ($n = c_0/c$).

Αν το οπτικό μέσο κινείται ως προς τον αιθέρα, πρέπει η ταχύτητα του φωτός να διαφέρει από την ταχύτητα που έχει όταν δεν υπάρχει κίνηση του οπτικού μέσου. Αυτό θα έχει ως συνέπεια την αλλαγή του δείκτη διάθλασης του φωτός του οπτικού μέσου για κάθε ακτινοβολία. Αυτό θα επέτρεπε τη μέτρηση της ταχύτητας της Γης ως προς τον αιθέρα, αφού στη διάρκεια μισού χρόνου η μεταβολή της ταχύτητας της Γης είναι 60 km/s. Με πειράματα που έγιναν το 1818 από το Γάλλο Francois Arago κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε. Αυτό σημαίνει ότι ο δείκτης διάθλασης του φωτός μένει σταθερός, ανεξάρτητα από την κίνηση του οπτικού μέσου. Αυτό συμφωνεί με την άποψη ότι τα υλικά σώματα κατά την κίνηση τους συμπαρασύρουν τον αιθέρα.

* Αλλαγή της εστιακής απόστασης των φακών

Όταν παρατηρούμε τα άστρα με ένα τηλεσκόπιο, το φως τους συγκεντρώνεται στην εστιακή απόσταση του αντικειμενικού φακού του τηλεσκοπίου. Η εστιακή απόσταση του φακού εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης, που εξαρτάται από την ταχύτητα του φωτός. Θα έπρεπε κατά τη διάρκεια του έτους η εστιακή απόσταση των φακών ν' αλλάζει, κάτι που δεν παρατηρείται. Αν ο φακός κατά την κίνηση του δεν παρασύρει τον αιθέρα αλλά κινείται όπως ένα δίχτυ μέσα στο νερό, η ταχύτητα του φωτός θα άλλαζε και μαζί μ' αυτή και η εστιακή απόσταση του φακού. Η μη επίδραση της κίνησης της Γης, πάνω στο δείκτη διάθλασης των οπτικών μέσων, δείχνει ότι τα οπτικά μέσα πρέπει κατά την κίνηση τους να παρασύρουν τον αιθέρα.