

Εφαρμοσμένη Οπτική  
**Γεωμετρική  
Οπτική**

Γιώργος Ασημέλλης  
Γιάννης Βαμβακάς  
Πάνος Δρακόπουλος

S.S.32  
ΑΣΗ

ΕΥΔΟΞΟΣ  
2013

Τ.Ε.Ι. ΛΑΡΙΣΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
Αρ. εισ. 80421

ΓΙΩΡΓΟΣ ΑΣΗΜΕΛΛΗΣ

ΓΙΑΝΝΗΣ ΒΑΜΒΑΚΑΣ

ΠΑΝΟΣ ΔΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΟΠΤΙΚΗ

# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

- Φως, Πηγές και Σώματα
- Ανάκλαση
- Διάθλαση
- Φακοί και Απεικόνιση
- Παχείς Φακοί και Συστήματα Φακών
- Απλά Οπτικά Όργανα
- Σφάλματα στην Οπτική
- Θεωρία Πινάκων

Απαγορεύεται η αναδημοσίευση ή αναπαραγωγή του παρόντος έργου στο σύνολό του ή τμημάτων του με οποιονδήποτε τρόπο και η μετάφρασή του ή διασκευή του ή εκμετάλλευσή του με οποιονδήποτε τρόπο αναπαραγωγής έργου λόγου ή τέχνης, σύμφωνα με τις διατάξεις του Ν.2121/1993 και της Διεθνούς Σύμβασης Βέρνης-Παρισιού, που κυρώθηκε με το Ν.100/1975. Επίσης απαγορεύεται η αναπαραγωγή της στοιχειοθεσίας, σελιδοποίησης, εξωφύλλου και γενικότερα της όλης αισθητικής εμφάνισης του βιβλίου, με φωτοτυπικές, ηλεκτρονικές, ή οποιεσδήποτε άλλες μεθόδους, σύμφωνα με το άρθρο 51 του Ν. 2121/1993.

Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα

ΕΚΤΥΠΩΣΗ-ΒΙΒΛΙΟΔΕΣΙΑ:

PRESS LINE Ν. ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΗΣ & ΣΙΑ Ε.Π.Ε.

ΜΑΓΕΡ 11, Πλ. ΒΑΘΗΣ, ΑΘΗΝΑ

(210) 522 5479

[www.pressline.gr](http://www.pressline.gr)



**Σύγχρονη  
Γνώση**

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΝΩΣΗ

ΓΡΑΜΜΟΥ 87, ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ, 16451

(210) 991 9838

[info@optics-books.gr](mailto:info@optics-books.gr)

[www.optics-books.gr](http://www.optics-books.gr)

ISBN 978-960-98531-8-7



9 789609 853187 >

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΧΟΡΗΓΗΣΗΣ 4/6/2012

Πρόλογος	xiii
Ευχαριστίες	xvi
Εισαγωγή	xvii
Μονάδες και Χρήσιμες Σχέσεις	xviii
<b>1. Φως, Πηγές και Σώματα</b>	
1.1. Φως και Κύματα	2
1.1.1. Ακτίνες Φωτός και Μέτωπα Κύματος	5
1.1.2. Αρχή του Huygens	7
1.2. Φως και Σωματίδια	9
1.3. Η Διάδοση του Φωτός	10
1.3.1. Το Φως ...Βιάζεται, Αλλά Έχει Αρχές	10
1.3.2. Η Ευθύγραμμη Διάδοση του Φωτός	11
1.3.3. Γεωμετρική Σκιά	12
1.3.4. Διαφανή και Αδιαφανή Σώματα	15
1.4. Δείκτης Διάθλασης	17
1.4.1. Οπτική Πυκνότητα και Οπτικός Δρόμος	20
1.5. Πηγές Φωτός	22
1.5.1. Το Φως ...Δημιουργείται	22
1.5.2. Αυτόφωτα και Ετερόφωτα Σώματα	23
1.6. Αλληλεπιδράσεις Ύλης - Φωτός	24
<b>2. Ανάκλαση</b>	
2.1. Το Φαινόμενο της Ανάκλασης	25
2.1.1. Η Ανάκλαση, Εφαρμογή της Αρχής του Ελάχιστου Χρόνου	27
2.2. Ανάκλαση από Κάτοπτρα	30
2.2.1. Ανάκλαση από Επίπεδο Κάτοπτρο	30
2.2.2. Ανάκλαση από Γωνία	32
2.2.3. Στροφή Κατόπτρου	33
2.3. Ορίζοντας την Απεικόνιση	38
2.3.1. Αντικείμενο και Είδωλο	38
2.3.2. Συμβάσεις Προσήμων – Διανυσματική Λογική	40
2.3.3. Μεγέθυνση στην Απεικόνιση	42
2.4. Είδωλα από Επίπεδα Κάτοπτρα	44
2.4.1. Χαρακτηριστικά Ειδώλου από Επίπεδο Κάτοπτρο	44
2.4.2. Είδωλα από Πολλαπλά Κάτοπτρα	48

2.5. Κυρτά και Κοίλα Κάτοπτρα	50
2.5.1. Γεωμετρικοί Ορισμοί	50
2.5.2. Εστιακή Απόσταση και Οπτική Ισχύς Κατόπτρου	52
2.6. Οπτική Ισχύς και Κλίση Δέσμης	55
2.6.1. Κλίση Δέσμης και Διάδοση	57
2.7. Είδωλα από Σφαιρικά Κάτοπτρα	60
2.7.1. Σχέση Απεικόνισης Σφαιρικού Κατόπτρου	60
2.7.2. Απεικόνιση από Κυρτά Κάτοπτρα	62
2.7.3. Απεικόνιση από Κοίλα Κάτοπτρα	66
<b>3. Διάθλαση</b>	
3.1. Το Φαινόμενο της Διάθλασης	82
3.1.1. Η Διάθλαση, Εφαρμογή της Αρχής του Ελάχιστου Χρόνου	82
3.1.2. Νόμος της Διάθλασης	84
3.2. Διάθλαση σε Οπτικά Αραιότερο Μέσο	87
3.2.1. Κρίσιμη Γωνία Πρόσπτωσης και Ολική Εσωτερική Ανάκλαση	88
3.3. Εφαρμογές Διάθλασης	90
3.3.1. Φαινόμενη Ανύψωση	90
3.3.2. Παράλληλη Μετατόπιση	92
3.3.3. Κυματαγωγοί και Οπτικές Ύνες	95
3.3.4. Ατμοσφαιρικά Φαινόμενα	100
3.4. Διάθλαση από Πρίσμα	104
3.4.1. Εκτροπή Ακτίνας	104
3.4.2. Ελάχιστη Εκτροπή Ακτίνας	106
3.4.3. Μέγιστη Εκτροπή Ακτίνας	107
3.4.4. Λεπτό Πρίσμα και Πρισματική Ισχύς	108
3.4.5. Ορθογώνιο Πρίσμα	110
3.4.6. Ανάλυση Χρωμάτων	116
3.4.7. Ουράνιο Τόξο	120
3.5. Διάθλαση από Σφαιρικό Δίοπτρο	122
3.5.1. Εστιακή Απόσταση και Οπτική Ισχύς Διόπτρου	123
3.5.2. Το Επίπεδο Δίοπτρο	127
<b>4. Φακοί και Απεικόνιση</b>	
4.1. Απλός Φακός	130
4.1.1. Αρχή Λειτουργίας Φακών	132
4.2. Χαρακτηριστικά Λεπού Φακού	137
4.2.1. Ακτίνα Καμπυλότητας	137

4.2.2.	Υλικό Φακού	138
4.2.3.	Κύρια και Δευτερεύουσα Εστία	139
4.2.4.	Εστιακά Επίπεδα	140
4.2.5.	Δευτερέων Άξονας	141
4.2.6.	Είδη Λεπτών Φακών	142
4.3.	Οπτική Ισχύς και Εστιακή Απόσταση Φακού	143
4.3.1.	Από τι Εξαρτάται η Εστιακή Απόσταση ενός Φακού;	144
4.3.2.	Μέτρηση Εστιακής Απόστασης Φακού	148
4.4.	Απεικόνιση με Φακούς	149
4.4.1.	Σχέση Απεικόνισης Φακών	149
4.4.2.	Διάδοση από Δεξιά προς τα Αριστερά	152
4.4.3.	Σχέση του Νεύτωνα	153
4.4.4.	Αντιστροφή Ειδώλου και Μεγέθυνση σε Φακούς	154
4.4.5.	Ταξινόμηση Θέσεων Αντικειμένου - Ειδώλου	157
4.4.6.	Διαγράμματα Ακτίνων	159
4.4.7.	Απεικόνιση με Αποκλίνοντες Φακούς	164
4.4.8.	Διαδρομή Τυχαίας Ακτίνας σε Λεπτό Φακό	167
4.4.9.	Οπτικό Άπειρο	169
4.4.10.	Φανταστικό Αντικείμενο	170
<b>5.</b>	<b>Παχείς Φακοί και Συστήματα Φακών</b>	
5.1.	Παχείς Φακοί	179
5.1.1.	Εστιακή Απόσταση σε Παχύ Φακό	179
5.1.2.	Ειδικοί Φακοί	183
5.1.3.	Κύρια Σημεία και Επίπεδα	186
5.1.4.	Δεσμικά Σημεία	195
5.1.5.	Διαδρομή Ακτίνας σε Παχύ Φακό	197
5.2.	Απεικόνιση σε Παχύ Φακό	198
5.2.1.	Διαγράμματα Ακτίνων σε Παχύ Φακό	198
5.2.2.	Διαδρομή Τυχαίας Ακτίνας σε Παχύ Φακό	200
5.2.3.	Σχέση Απεικόνισης σε Παχύ Φακό	201
5.3.	Συστήματα Φακών	202
5.3.1.	Οπτική Ισχύς και Κύρια Επίπεδα σε Σύστημα Φακών	202
5.3.2.	Απεικόνιση με Δύο ή Περισσότερους Φακούς	206
<b>6.</b>	<b>Απλά Οπτικά Όργανα</b>	
6.1.	Ανθρώπινος Οφθαλμός	217
6.1.1.	Χαρακτηριστικά Αμφιβληστροειδικού Ειδώλου	219

6.1.2. Πρότυπα Οφθαλμών	221
6.1.3. Φαινόμενη Γωνία Παρατήρησης	223
6.1.4. Μακρινή και Κοντινή Όραση	224
6.2. Σκοτεινός Θάλαμος	227
6.2.1. Καλλιτεχνική Φωτογράφιση με Κάμερα Στενοπής	232
6.3. Μεγεθυντικός Φακός	234
6.4. Μικροσκόπιο και Τηλεσκόπιο	238
6.4.1. Αρχή Λειτουργίας Μικροσκοπίου	238
6.4.2. Αρχή Λειτουργίας Τηλεσκοπίου	240
<b>7. Σφάλματα στην Οπτική</b>	
7.1. Σημείο = Εξιδανίκευση	243
7.1.1 Είδη και Αίτια Σφαλμάτων	244
7.1.2 Παραβολικές Επιφάνειες και Παραξονική Προσέγγιση	245
7.2. Σφάλμα Χρωματικής Εκτροπής	247
7.3. Μονοχρωματικά Σφάλματα	248
7.3.1 Σφάλμα Σφαιρικής Εκτροπής	248
7.3.2 Σφάλμα Κόμης	250
7.3.3 Αστιγματισμός	251
7.3.4 Καμπύλωση και Παραμόρφωση	253
<b>8. Θεωρία Πινάκων</b>	
8.1. Εξισώσεις Διάθλασης και Μεταφοράς	260
8.1.1. Συμβάσεις για τα Πρόσημα Φυσικών Μεγεθών	262
8.2. Πίνακες Οπτικών Φαινομένων	263
8.2.1. Πίνακας Διάδοσης ή Μεταφοράς	263
8.2.2. Πίνακας Διάθλασης	264
8.2.3. Πίνακας Ανάκλασης	265
8.2.4. Σειρά Εφαρμογής Πινάκων	266
8.3. Πίνακας Οπτικού Συστήματος	267
8.3.1. Πίνακας Αντικειμένου - Ειδώλου	268
8.3.2. Πίνακας Λεπού Φακού	269
8.4. Ιδιότητες Πινάκων	271
<b>Ευρετήριο Όρων</b>	275

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Σε ένα εκπαιδευτικό βιβλίο φυσικών επιστημών εκτίθενται οι απόψεις των συγγραφέων όσον αφορά στον τρόπο μετασχηματισμού των επιστημονικών θεωριών σε εκπαιδευτικά πρότυπα (/ το γνωσιακό αντικείμενο), επιχειρείται από αυτούς η βέλτιστη προσέγγιση της επιστημονικής ακρίβειας και παρουσιάζεται ο πλέον αποτελεσματικός για αυτούς τρόπος παρουσίασης των προτύπων αυτών στους εκπαιδευόμενους (/ στο γνωστικό υποκείμενο). Συγχρόνως οι συγγραφείς εκτίθενται στην κρίση των εκπαιδευόμενων και, γενικότερα, της εκπαιδευτικής κοινότητας.

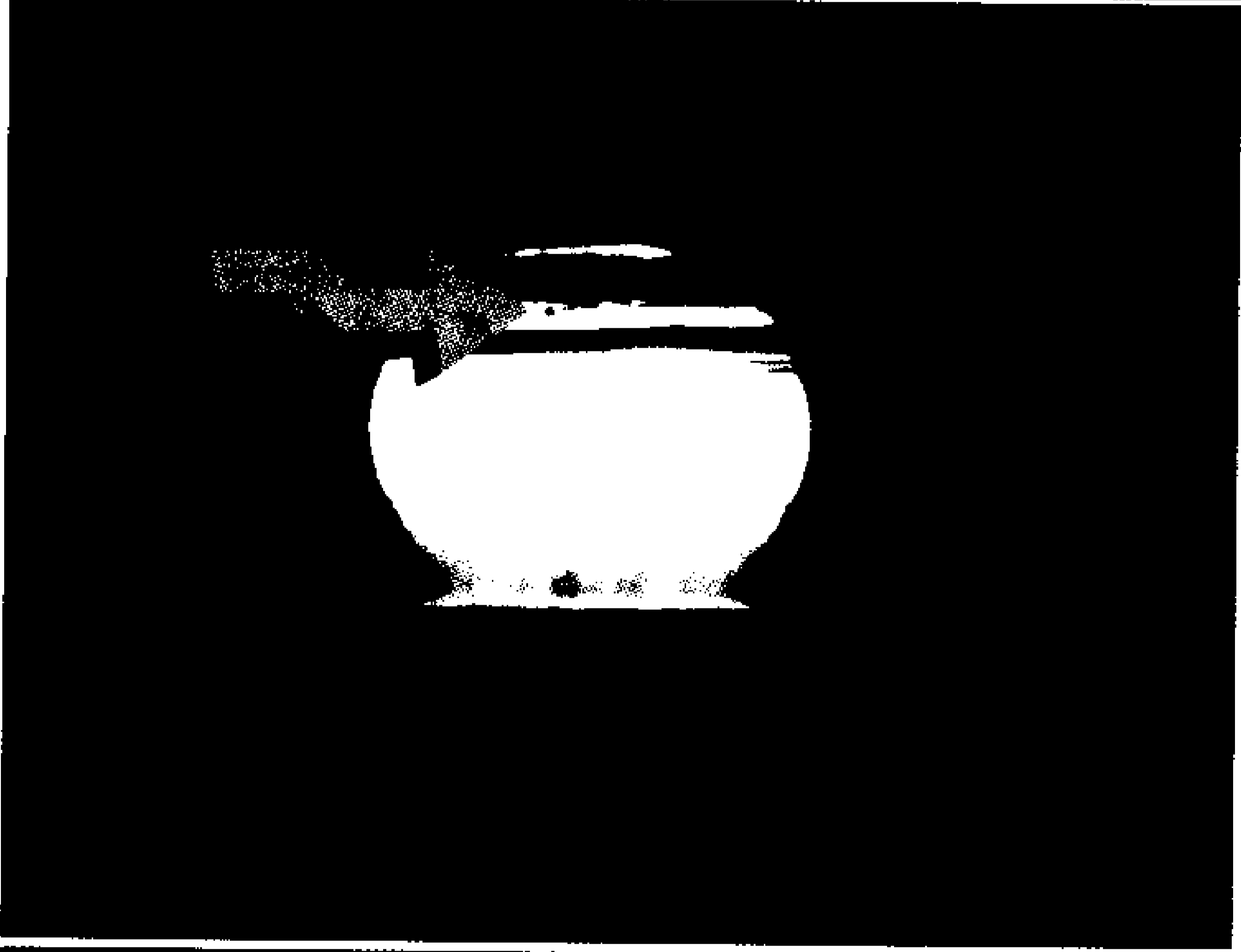
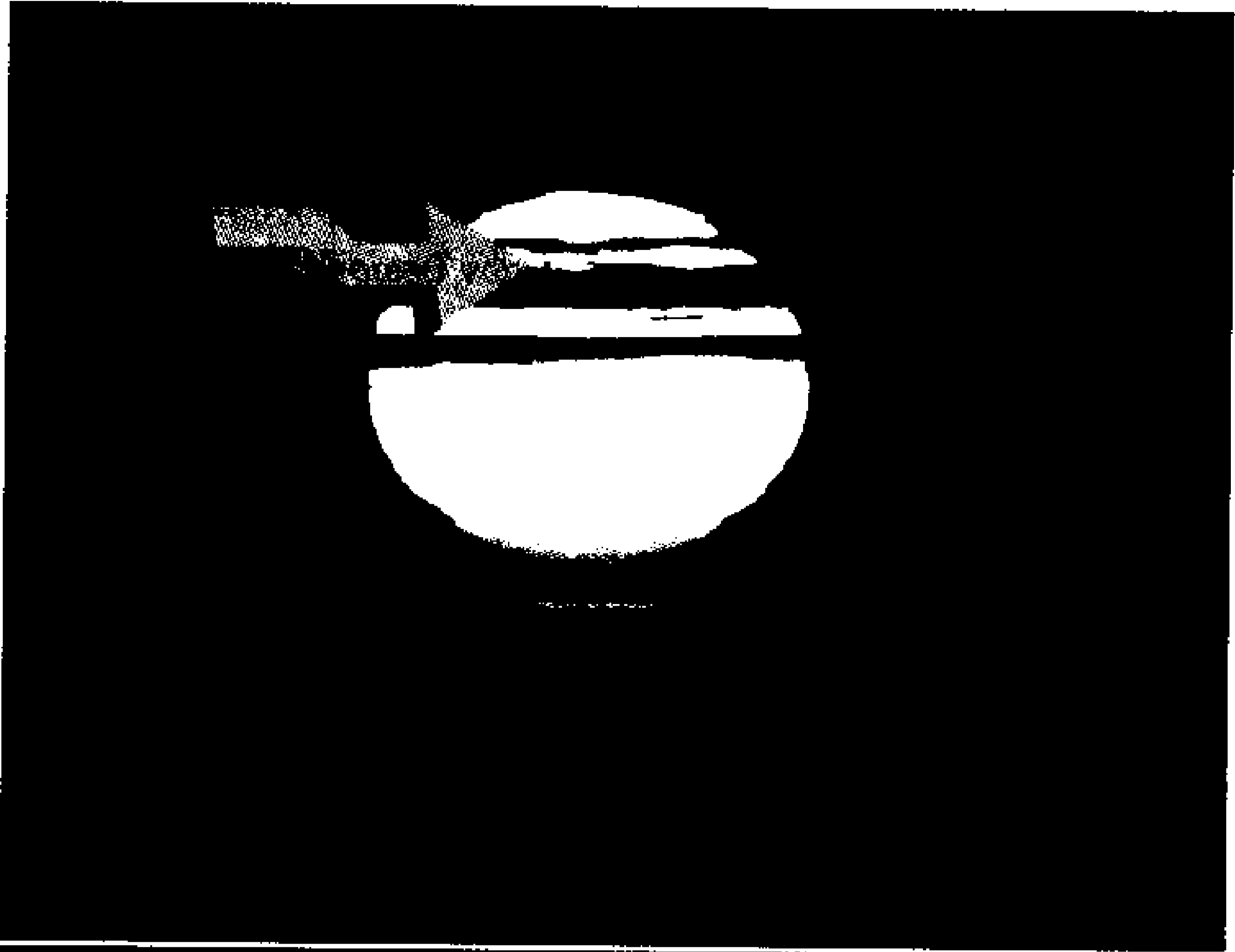
Οι συγγραφείς του ανά χείρας βιβλίου θεωρώ ότι έχουν επιτύχει τόσο όσον αφορά στο μετασχηματισμό της επιστημονικής θεωρίας σε γνωσιακό αντικείμενο για τους πρωτοετείς φοιτητές του πανεπιστημιακού και τεχνολογικού τομέα της ανώτατης εκπαίδευσης, με επιτυχή εκπαιδευτικά πρότυπα και συμβατό με τα –ηλικιακά, γνωστικά, στοχοθετικά – χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα, αναφέρονται στις εφαρμογές μιας εκ των δύο εκφάνσεων του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού για το ορατό φως, η οποία συνθέτει το περιεχόμενο της ‘γεωμετρικής οπτικής’. Ιδιαίτερο βάρος έχει δοθεί στη –λεπτομερή– ποιοτική ανάλυση των περιεχομένων, στην ακρίβεια, αρτιότητα και ελκυστικότητα των –απαραίτητων σε αυτή τη θεματική– γεωμετρικών σχημάτων και στη διατύπωση –με πρωτοποριακό τρόπο– του μαθηματικού φορμαλισμού.

Απομένει στους εκπαιδευτικούς οι οποίοι θα διδάξουν / εφαρμόσουν αυτό το βιβλίο, είτε οι ίδιοι οι συγγραφείς είτε άλλοι, να ολοκληρώνουν πλήρως την προσαρμογή της επιστημονικής έρευνας σε εκπαιδευτική διαδικασία, όπως απαιτούν οι σύγχρονες απόψεις για την εκπαίδευση στις φυσικές επιστήμες. Για αυτήν την επιτυχή προσαρμογή απαιτείται όχι μόνο ένα προσαρμοσμένο με ακρίβεια στις θεωρίες γνωσιακό αντικείμενο αλλά και η εφαρμογή κατά την εκπαιδευτική διαδικασία μιας ‘δι-ερευνητικής’ διδακτικής μεθοδολογίας, η οποία να είναι αντίστοιχη με την ‘ερευνητική’ επιστημονική μεθοδολογία.

Μια ‘επιστημονική / εκπαιδευτική μέθοδος με διερεύνηση’ βελτιστοποιεί την κατανόηση, αφομοίωση, ερμηνεία και εφαρμοστικότητα του όποιου γνωσιακού αντικειμένου με τη διάρθρωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας για κάθε θεματική ενότητα σε σαφή μεθοδολογικά βήματα. Αυτά τα μεθοδολογικά βήματα –πρέπει να– περιλαμβάνουν πληροφορίες για το έναυσμα του ενδιαφέροντος των εκπαιδευομένων (οι οποίες παρέχονται στο ανά χείρας βιβλίο), αποδεικτικό και εφαρμόσιμο πειραματισμό (ο οποίος προτείνεται στο ανά χείρας βιβλίο) και τρόπους γενίκευσης και εφαρμογής (οι οποίοι, επίσης, αναφέρονται στο ανά χείρας βιβλίο) για κάθε θεματική ενότητα.

Γεωργ. Θεοφ. Καλκάνης  
Καθηγητής Πανεπιστημίου Αθηνών  
<http://micro-kosmos.uoa.gr>





*Τρεις διαδοχικές φωτογραφίες του δύνοντος Ήλιου από τον  
Thomas Stemmler την 6<sup>η</sup> Ιουνίου, 2012.*

*Οι φωτογραφίες συνδυάζουν μια σπάνια σύμπτωση  
φαινομένων που απασχολούν τη γεωμετρική οπτική.  
Συγκεκριμένα, έχουμε τον αντικατοπτρισμό του ηλιακού  
δίσκου στη θάλασσα, την παραμόρφωση του ηλιακού  
δίσκου λόγω διαταραχών του δείκτη διάθλασης της  
ατμόσφαιρας, και την εμφάνιση σκιάς πάνω στον ηλιακό  
δίσκο λόγω της διάβασης της Αφροδίτης από τον Ήλιο.*

*Στην πρώτη εικόνα βλέπουμε το διπλό είδωλο του  
αντικατοπτρισμού, στη δεύτερη και στην τρίτη το  
'ετρουσκικό βάζο'.*

*Η σκιά εμφανίζεται ως μια μικρή κουκκίδα στο επάνω  
μέρος του ηλιακού δίσκου. Μια τέτοια τριπλή σύμπτωση  
δεν αναμένεται πριν το έτος 2117, κατά την επόμενη  
διάβαση της Αφροδίτης.*

Αν η Οπτική είναι τόσο ελκυστική, αυτό το οφείλει στη Γεωμετρική Οπτική. Είναι η πρώτη Οπτική την οποία γνωρίζουμε, και επειδή σχετίζεται άμεσα με την κυρίαρχη αίσθηση, την όραση, είναι και από τα πρώτα μέρη της Φυσικής που κατανοούμε.

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται στους πρωτοετείς φοιτητές του Πανεπιστημιακού και Τεχνολογικού τομέα της ανώτατης εκπαίδευσης. Ιδιαίτερο βάρος έχει δοθεί, εκτός από την ποιοτική ανάλυση, και στην παρουσίαση και αρτιότητα των σχημάτων, καθώς πιστεύουμε ότι η Γεωμετρική Οπτική, όπως και το όνομά της προδικάζει, είναι αλληλένδετη με γεωμετρικά σχήματα.

Σε κάθε ενότητα παρουσιάζονται πολλά λυμένα αντιπροσωπευτικά παραδείγματα για την καλύτερη κατανόηση της αντίστοιχης θεωρίας, ενώ οι αποδείξεις των σχέσεων και τα μαθηματικά που χρησιμοποιούνται είναι τα ελάχιστα δυνατά.

Ο φορμαλισμός που ακολουθείται στο βιβλίο αυτό είναι πρωτοποριακός για τα Ελληνικά δεδομένα, μια και:

- υιοθετεί την καρτεσιανή σύμβαση προσήμων, που είναι και η σύμβαση που εφαρμόζεται σε όλα τα σύγχρονα υπολογιστικά προγράμματα ιχνηλάτησης. Έτσι μπορούν να αναλυθούν, με το ίδιο απλό σύστημα και εφαρμογές αντίστροφης πορείας φωτός, ακόμα και φανταστικά αντικείμενα.
- δίνει έμφαση στη σημασία της οπτικής ισχύος, και στο πόσο αυτή η τόσο απλή έννοια της πρόσθεσης της οπτικής ισχύος με την κλίση της δέσμης εξηγεί ομοιόμορφα κάθε αλληλεπίδραση μιας δέσμης με μια οπτική επιφάνεια.

Σε συνδυασμό με το βιβλίο μας “Οπτικά Όργανα Απεικόνισης”, το οποίο εξετάζει σε βάθος λεπτομερείς εφαρμογές της Γεωμετρικής Οπτικής, πιστεύουμε ότι παραδίδουμε ένα ελκυστικό και ευχάριστο, αλλά ταυτόχρονα επιστημονικά πλήρες βιβλίο, το οποίο μπορεί άνετα να καλύψει και τις ανάγκες φοιτητών Τμημάτων όπως Οπτικής, Φυσικής, Φωτογραφίας, Πολυτεχνικών Σχολών, αλλά και κάθε μεμονωμένου ενδιαφερόμενου, είτε είναι ερασιτέχνης αστρονόμος, φωτογράφος, ή απλώς θέλει να γνωρίσει την ομορφιά της Οπτικής.

Ιούνιος 2012

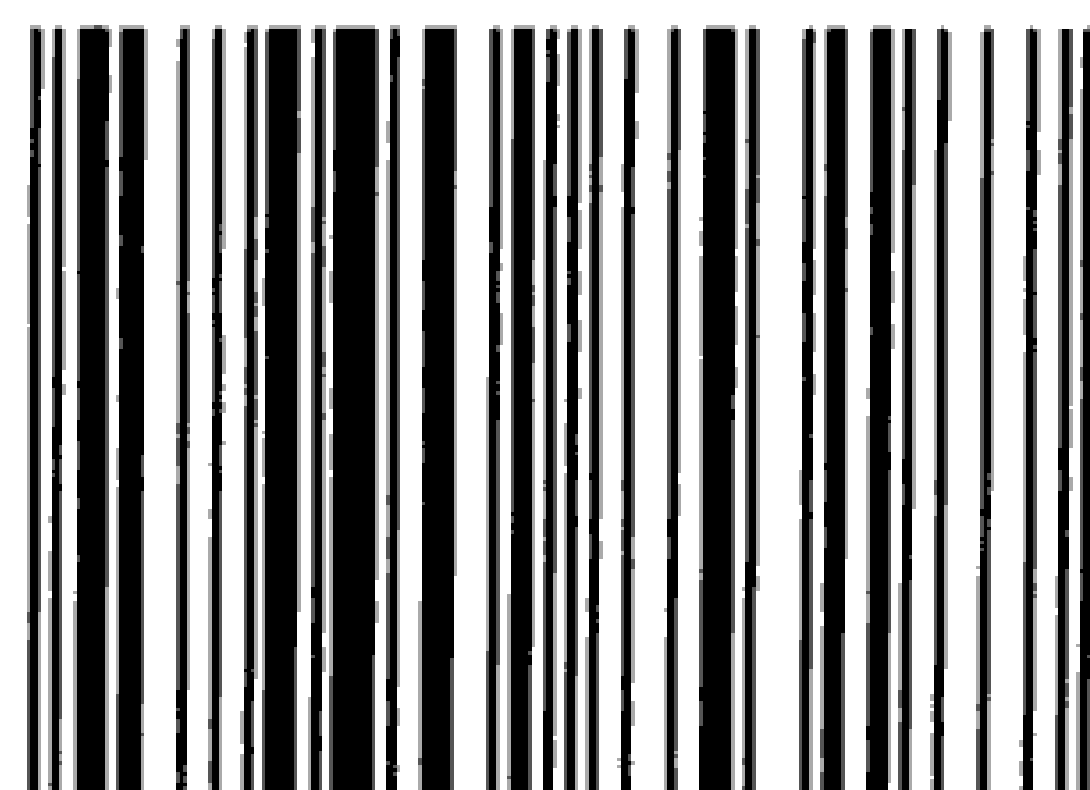
Γιώργος Ασημέλλης - Γιάννης Βαμβακάς - Πάνος Δρακόπουλος



Σύγχρονη  
Γνώση

[www.optics-books.gr](http://www.optics-books.gr)

ISBN 978-960-98531-8-7



9789609853187