

Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ FARADAY

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ  
**ΣΤΟΥΠΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
**ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ - ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ</b>		
1.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2.	ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟ ΣΤΟΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟ	1
1.2.1.	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΕΣ	3
1.3.	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ: ΑΠΟ ΤΟ ΦΩΣ ΣΤΑ LASER	5
1.3.1.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ LASER	12
1.3.2.	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ LASER	13
1.4.	ΜΑΓΝΗΤΟΟΠΤΙΚΗ	17
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ - ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FARADAY</b>		
2.1.	ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FARADAY	18
2.2.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΝΝΟΙΩΝ	19
2.2.1.	ΤΟ SPIN ΚΑΙ Η ΠΟΛΩΣΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ	19
2.2.2.	ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	21
2.2.3.	ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ - ΔΙΑΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ	21
2.2.4.	ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ - ΑΝΤΙΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ	22
2.2.5.	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ - ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΑΣΗΣ	24
2.2.6.	ΠΟΛΩΣΗ - ΟΠΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ	25
2.2.7.	ΔΙΑΘΛΑΣΗ - ΑΝΑΚΛΑΣΗ	27
2.2.8.	ΣΥΜΒΟΛΗ	29
2.2.9.	ΣΤΑΘΕΡΑ VERDET	29
2.3.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ FARADAY	30
2.3.1.	Η ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ FARADAY	30
2.3.2.	ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ FARADAY ΣΕ ΔΙΑΦΑΝΗ ΠΛΑΚΑ	32
2.3.3.	ΠΛΑΓΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ	33
2.3.4.	ΜΕΣΟ FARADAY ΣΕ ΑΝΤΗΧΕΙΟ FABRY - PEROT	34
2.3.5.	ΔΙΑΜΗΚΕΣ ΚΑΙ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	35
2.4.	ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FARADAY	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ</b>		
3.1.	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ FARADAY	38
3.1.1.	Η ΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΟΛΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LCD	38
3.1.2.	ΗΛΕΚΤΡΟ-ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (KERR, ROCKELS ΚΑΙ FARADAY)	41
3.1.3.	Η ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ FARADAY ΣΤΟ ΔΙΑΣΤΡΙΚΟ ΧΩΡΟ	41
3.1.4.	Η ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ FARADAY ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	42
3.2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FARADAY	43
3.2.1.	ΠΕΙΡΑΜΑ 1 (ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FARADAY)	43
3.2.2.	ΠΕΙΡΑΜΑ 2 (ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FARADAY)	46
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>		
ΠΑΡ. Α	ΒΙΟΓΡΑΦΙΑ ΜΙCHAEL FARADAY	51
ΠΑΡ. Β	ΜΟΝΑΔΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟ S.I.	56
<b>ΥΠΟΜΝΗΜΑ</b>		
ΥΠ. Α	ΕΝΟΤΗΤΕΣ	57
ΥΠ. Β	ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	58
ΥΠ. Γ	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	61
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	62

---

---

## ΥΠΟΜΝΗΜΑ

---

---

### **ΥΠΟΜΝΗΜΑ Α: ΕΝΟΤΗΤΕΣ**

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 1.2** (σελ. 1)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 14, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 303-304

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 1.2.1** (σελ. 3)

[17] [www.tmth.edu.gr](http://www.tmth.edu.gr)

[18] [www.neo.gr](http://www.neo.gr)

[3] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 2005), σελ. 152-153

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 1.3** (σελ. 5)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 381-382

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 13-17

[7] Το χρονικό του χρόνου, Stephen Hawking, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 28-32, 68-69

[1] Πανεπιστημιακή Φυσική, Hugh D. Young, Εκδόσεις Παπαζήση, σελ. 946-947

[5] Βραβεία Nobel Φυσικής, Τάσος Κυπριανίδης, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 97-99, 134-135

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 1.3.1** (σελ. 12)

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 120-121

[1] Πανεπιστημιακή Φυσική, Hugh D. Young, Εκδόσεις Παπαζήση, σελ. 1121-1124

[6] Αρχές των Laser (δεύτερη έκδοση), O. Svelto, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 257

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 1.3.2** (σελ. 13)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 7-11

[6] Αρχές των Laser (δεύτερη έκδοση), O. Svelto, Εκδόσεις Κάτοπτρο

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 1.4** (σελ. 17)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 25

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 2.1** (σελ. 18)

[25] [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)

[13] [www.minidisc.org](http://www.minidisc.org)

[14] [www.atis.org](http://www.atis.org)

[15] [www.answers.com](http://www.answers.com)

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 2.2.1** (σελ. 19)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 249-250

[8] Το σύμπαν σε ένα καρυδότσουφλο, Stephen Hawking, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 48

[3] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 2005), σελ. 146-147

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 2.2.2** (σελ. 21)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 14, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 237-238

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 2.2.3** (σελ. 21)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 14, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 221-222

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 134-135

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 2.2.4** (σελ. 22)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 14, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 125

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 239-241

[25] [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 2.2.5** (σελ. 24)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 14, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 424-428

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 2.2.6** (σελ. 25)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 168

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 25-31

[1] Πανεπιστημιακή Φυσική, Hugh D. Young, Εκδόσεις Παπαζήση, σελ. 961-962

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ 2.2.7** (σελ. 27)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 14, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 100, 218-219

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 28

**ΕΝΟΤΗΤΑ 2.2.8** (σελ. 29)

[1] Πανεπιστημιακή Φυσική, Hugh D. Young, Εκδόσεις Παπαζήση, σελ. 1024-1028

**ΕΝΟΤΗΤΑ 2.2.9** (σελ. 29)

[25] en.wikipedia.org

[23] www.wooster.edu

**ΕΝΟΤΗΤΑ 2.3.1** (σελ. 30)

[11] www.mmresearch.com

**ΕΝΟΤΗΤΑ 2.3.2** (σελ. 32)

[11] www.mmresearch.com

**ΕΝΟΤΗΤΑ 2.3.3** (σελ. 33)

[11] www.mmresearch.com

**ΕΝΟΤΗΤΑ 2.3.4** (σελ. 34)

[11] www.mmresearch.com

**ΕΝΟΤΗΤΑ 2.3.5** (σελ. 35)

[11] www.mmresearch.com

**ΕΝΟΤΗΤΑ 2.4** (σελ. 37)

[28] www.mathematik.tu-darmstadt.de

[29] www.citebase.org

**ΕΝΟΤΗΤΑ 3.1.1** (σελ. 38)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 333

[26] www.tomshardware.com

[27] www.plasmascience.com

**ΕΝΟΤΗΤΑ 3.1.2** (σελ. 41)

[16] home.earthlink.net

**ΕΝΟΤΗΤΑ 3.1.3** (σελ. 41)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 16, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 18-20

[25] en.wikipedia.org

**ΕΝΟΤΗΤΑ 3.1.4** (σελ. 42)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 16, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 13-15

[25] en.wikipedia.org

**ΕΝΟΤΗΤΑ 3.2.1** (σελ. 43)

[23] www.wooster.edu

**ΕΝΟΤΗΤΑ 3.2.2** (σελ. 46)

[22] phys.strath.ac.uk

[21] www.vspub.com

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 155-156

## **ΥΠΟΜΝΗΜΑ Β: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ**

**ΣΧΗΜΑ 1.1** (σελ. 1)

[2] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1997), σελ. 23

**ΣΧΗΜΑ 1.2** (σελ. 2)

[3] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 2005), σελ. 146

**ΣΧΗΜΑ 1.3** (σελ. 2)

[2] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1997), σελ. 119-120

**ΣΧΗΜΑ 1.4** (σελ. 3)

[2] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1997), σελ. 68

**ΣΧΗΜΑ 1.5** (σελ. 3)

[2] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1997), σελ. 68

**ΣΧΗΜΑ 1.6** (σελ. 4)

[17] [www.tmth.edu.gr](http://www.tmth.edu.gr)

[19] [www.energyquest.ca.gov](http://www.energyquest.ca.gov)

**ΣΧΗΜΑ 1.7** (σελ. 4)

[3] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 2005), σελ. 149,151,153

**ΣΧΗΜΑ 1.8** (σελ. 5)

[3] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 2005), σελ. 151, 153

**ΣΧΗΜΑ 1.9** (σελ. 5)

[3] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 2005), σελ. 144

**ΣΧΗΜΑ 1.10** (σελ. 5)

[3] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 2005), σελ. 160

**ΣΧΗΜΑ 1.11** (σελ. 6)

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 20

[7] Το χρονικό του χρόνου, Stephen Hawking, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 9

**ΣΧΗΜΑ 1.12** (σελ. 7)

[7] Το χρονικό του χρόνου, Stephen Hawking, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 29

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 15

**ΣΧΗΜΑ 1.13** (σελ. 8)

[7] Το χρονικό του χρόνου, Stephen Hawking, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 30

[1] Πανεπιστημιακή Φυσική, Hugh D. Young, Εκδόσεις Παπαζήση, σελ. 1036

**ΣΧΗΜΑ 1.14** (σελ. 8)

[7] Το χρονικό του χρόνου, Stephen Hawking, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 31

**ΣΧΗΜΑ 1.15** (σελ. 9)

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 15

[7] Το χρονικό του χρόνου, Stephen Hawking, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 69

**ΣΧΗΜΑ 1.16** (σελ. 10)

[5] Βραβεία Nobel Φυσικής, Τάσος Κυπριανίδης, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 42, 51, 53-55, 65, 76

**ΣΧΗΜΑ 1.17** (σελ. 11)

[1] Πανεπιστημιακή Φυσική, Hugh D. Young, Εκδόσεις Παπαζήση, σελ. 1123

**ΣΧΗΜΑ 1.18** (σελ. 11)

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 120

[20] [www.physics4U.gr](http://www.physics4U.gr)

**ΣΧΗΜΑ 1.19** (σελ. 12)

[5] Βραβεία Nobel Φυσικής, Τάσος Κυπριανίδης, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 97-99, 134-135

**ΣΧΗΜΑ 2.1** (σελ. 18)

[25] [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)

**ΣΧΗΜΑ 2.2** (σελ. 19)

[8] Το σύμπαν σε ένα καρυδότσουφλο, Stephen Hawking, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 49

**ΣΧΗΜΑ 2.3** (σελ. 20)

[7] Το χρονικό του χρόνου, Stephen Hawking, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 78

**ΣΧΗΜΑ 2.4** (σελ. 20)

[3] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 2005), σελ. 146-147

**ΣΧΗΜΑ 2.5** (σελ. 21)

[3] Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 2005), σελ. 147

**ΣΧΗΜΑ 2.6** (σελ. 21)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 14, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 238

**ΣΧΗΜΑ 2.7** (σελ. 22)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 14, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 221

**ΣΧΗΜΑ 2.8** (σελ. 23)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 240

**ΣΧΗΜΑ 2.9** (σελ. 24)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 15, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 135, 240

**ΣΧΗΜΑ 2.10** (σελ. 25)

[1] Πανεπιστημιακή Φυσική, Hugh D. Young, Εκδόσεις Παπαζήση, σελ. 956

**ΣΧΗΜΑ 2.11** (σελ. 26)

[1] Πανεπιστημιακή Φυσική, Hugh D. Young, Εκδόσεις Παπαζήση, σελ. 962

**ΣΧΗΜΑ 2.12** (σελ. 26)

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 25

**ΣΧΗΜΑ 2.13** (σελ. 27)

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 31

**ΣΧΗΜΑ 2.14** (σελ. 28)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 14, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 100, 218

**ΣΧΗΜΑ 2.15** (σελ. 28)

[4] Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση ΟΕΔΒ 1999), σελ. 28

**ΣΧΗΜΑ 2.16** (σελ. 29)

[7] Το χρονικό του χρόνου, Stephen Hawking, Εκδόσεις Κάτοπτρο, σελ. 75

**ΣΧΗΜΑ 2.17** (σελ. 29)

[1] Πανεπιστημιακή Φυσική, Hugh D. Young, Εκδόσεις Παπαζήση, σελ. 1025-1026

**ΣΧΗΜΑ 2.18** (σελ. 31)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 2.19** (σελ. 32)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 2.20** (σελ. 32)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 2.21** (σελ. 33)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 2.22** (σελ. 33)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 2.23** (σελ. 34)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 2.24** (σελ. 34)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 2.25** (σελ. 35)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 2.26** (σελ. 35)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 2.27** (σελ. 36)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 2.28** (σελ. 36)

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

**ΣΧΗΜΑ 3.1** (σελ. 39)

[26] [www.tomshardware.com](http://www.tomshardware.com)

**ΣΧΗΜΑ 3.2** (σελ. 39)

[26] [www.tomshardware.com](http://www.tomshardware.com)

**ΣΧΗΜΑ 3.3** (σελ. 39)

[26] [www.tomshardware.com](http://www.tomshardware.com)

**ΣΧΗΜΑ 3.4** (σελ. 39)

[26] [www.tomshardware.com](http://www.tomshardware.com)

**ΣΧΗΜΑ 3.5** (σελ. 40)

[26] [www.tomshardware.com](http://www.tomshardware.com)

**ΣΧΗΜΑ 3.6** (σελ. 40)

[26] [www.tomshardware.com](http://www.tomshardware.com)

**ΣΧΗΜΑ 3.7** (σελ. 40)

[26] [www.tomshardware.com](http://www.tomshardware.com)

#### **ΥΠΟΜΝΗΜΑ Γ: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α** (σελ. 51)

[9] Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, Τόμος 9B, Εκδόσεις Αθηνών, σελ. 252-253

[11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)

[30] [www.physics.uci.edu](http://www.physics.uci.edu) (προσωπογραφίες του Faraday)

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β** (σελ. 56)

[25] [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] *Πανεπιστημιακή Φυσική (τόμος δεύτερος)*  
Hugh D. Young - Εκδόσεις Παπαζήση
- [2] *Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση 1997)*  
Παιδαγωγικό Ινστιτούτο - Οργανισμός Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων
- [3] *Φυσική Γενικής Παιδείας Β' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση 2005)*  
Παιδαγωγικό Ινστιτούτο - Οργανισμός Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων
- [4] *Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου (έκδοση 1999)*  
Παιδαγωγικό Ινστιτούτο - Οργανισμός Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων
- [5] *Βραβεία Nobel Φυσικής*  
Τάσος Κυπριανίδης - Εκδόσεις Κάτοπτρο
- [6] *Αρχές των Lasers (δεύτερη έκδοση)*  
Ο. Svelto - Εκδόσεις Κάτοπτρο
- [7] *Το χρονικό του χρόνου*  
Stephen Hawking - Εκδόσεις Κάτοπτρο
- [8] *Το σύμπαν σε ένα καρυδότσουφλο*  
Stephen Hawking - Εκδόσεις Κάτοπτρο
- [9] *Εκπαιδευτική Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια*  
Τόμοι 1-9α (Βιογραφίες),  
Τόμοι 14-15 (Μαθηματικά, Φυσική, Χημεία),  
Τόμος 16 (Επιστήμες της Γης και του Διαστήματος) - Εκδόσεις Αθηνών
- [10] *Λεξικό των Επιστημών (φυσική, χημεία, μαθηματικά)*  
Neil Ardley - Εκδόσεις Ερευνητές

## **ΠΗΓΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ**

- [11] [www.mmresearch.com](http://www.mmresearch.com)
- [12] [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)
- [13] [www.minidisc.org](http://www.minidisc.org)
- [14] [www.atis.org](http://www.atis.org)
- [15] [www.answers.com](http://www.answers.com)
- [16] [home.earthlink.net](http://home.earthlink.net)
- [17] [www.tmth.edu.gr](http://www.tmth.edu.gr)
- [18] [www.neo.gr](http://www.neo.gr)
- [19] [www.energyquest.ca.gov](http://www.energyquest.ca.gov)
- [20] [www.physics4U.gr](http://www.physics4U.gr)
- [21] [www.vsppub.com](http://www.vsppub.com)
- [22] [phys.strath.ac.uk](http://phys.strath.ac.uk)
- [23] [www.wooster.edu](http://www.wooster.edu)
- [24] [www.st.northropgrumman.com](http://www.st.northropgrumman.com)
- [25] [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)
- [26] [www.tomshardware.com](http://www.tomshardware.com)
- [27] [www.plasmascience.com](http://www.plasmascience.com)
- [28] [www.mathematik.tu-darmstadt.de](http://www.mathematik.tu-darmstadt.de)
- [29] [www.citebase.org](http://www.citebase.org)
- [30] [www.physics.uci.edu](http://www.physics.uci.edu)
- [31] [www.rigb.org](http://www.rigb.org)



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

## 1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί το εισαγωγικό μέρος της παρούσας εργασίας και θα μπορούσε, γενικά, να χωριστεί σε δύο σκέλη. Το πρώτο σκέλος αποτελείται από ιστορικά στοιχεία που αφορούν την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, δηλαδή πως αναπτύχθηκαν οι ιδέες του ηλεκτρισμού, του μαγνητισμού και του φωτός στο πέρασμα των αιώνων και τι σχέση έχουν μεταξύ τους οι έννοιες αυτές. Αναφέρονται εξέχοντες επιστήμονες και γεγονότα που αποτέλεσαν σταθμό στην ανάπτυξη των σύγχρονων θεωριών περί ηλεκτρομαγνητισμού και γενικότερα της σύγχρονης φυσικής. Το δεύτερο σκέλος αποτελείται από πιο εξειδικευμένες και πρακτικές γνώσεις όσον αφορά το πειραματικό μέρος της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται κατασκευαστικά στοιχεία και ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητών (σωληνοειδές) και του φωτός laser, έτσι ώστε να είναι πιο κατανοητή η πειραματική διαδικασία. Τα δύο σκέλη που περιγράφηκαν παραπάνω είναι συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει ομοιομορφία στην γενικότερη περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας.

## 1.2. ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟ ΣΤΟΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟ

Ηλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα ήταν γνωστά στον άνθρωπο από πολύ παλιά. Οι αρχαίοι Έλληνες προβληματίζονταν από τη μυστηριώδη ιδιότητα που αποκτούσε το ήλεκτρο (κοινώς κεχριμπάρι, το οποίο είναι απολιθωμένη ρητίνη δέντρων), όταν τριβόταν σε μάλλινο ύφασμα, να έλκει ελαφρά αντικείμενα, π.χ. κομματάκια άχυρο, και την εξίσου μυστηριώδη ιδιότητα του μαγνήτη λίθου (οξειδίο του σιδήρου  $Fe_3O_4$ ) να έλκει μικροσκοπικά ρινίσματα σιδήρου. Για να ερμηνεύσει τις ιδιότητες αυτές ο Θαλής ο Μιλήσιος (625-546 π.Χ.) διατύπωσε την άποψη ότι το ήλεκτρο και ο μαγνήτης λίθος έχουν ψυχή ικανή να απορροφήσει τα γειτονικά τους σώματα. Αυτή η πρωτόλεια και προφητική «ενοποίηση» των δύο αυτών κατηγοριών φαινομένων, που από το ήλεκτρο και το μαγνήτη λίθο ονομάστηκαν αντίστοιχα Ηλεκτρισμός και Μαγνητισμός, έμελλε να βρει πανηγυρική δικαίωση 25 αιώνες αργότερα.



**ΣΧΗΜΑ 1.1:** Μαγνήτης λίθος.

Η μελέτη των ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων άρχισε γύρω στα τέλη του 17ου αιώνα. Οι πρώτοι πειραματιστές του ηλεκτρισμού παρατήρησαν ότι τα υλικά εμφάνιζαν διαφορές στην ικανότητα να διατηρούν την «ηλεκτρική αρετή» (electrical virtue) τους. Μερικά υλικά μπορούσαν να ηλεκτριστούν με τριβή και να διατηρηθούν σε ηλεκτρισμένη κατάσταση και άλλα δεν μπορούσαν να ηλεκτριστούν ή δεν διατηρούσαν την «αρετή» αυτή, όταν την αποκτούσαν. Τα πρώτα ονομάστηκαν «ηλεκτρικά» και τα δεύτερα «μη ηλεκτρικά».

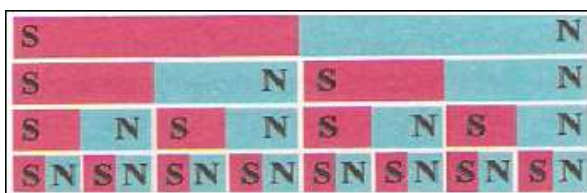
Στις αρχές του 18ου αιώνα τα πειράματα του Stephen Gray (1670-1736) έδειξαν ότι η «ηλεκτρική αρετή» ήταν δυνατό να μεταφέρεται από ένα σώμα σε άλλο, σε απόσταση εκατοντάδων μέτρων, μέσω σπάγκου που κρατιόταν ψηλά στο έδαφος με μεταξωτά νήματα. Ακόμη, πολύ γρηγορότερα έγινε αντιληπτό ότι υπήρχαν δύο είδη ηλεκτρισμού, ο ηλεκτρισμός της ύαλου, οποίος παράγονταν όταν μια γυάλινη ράβδος τριβόταν με μάλλινο ύφασμα, και ο ηλεκτρισμός της ρητίνης, ο οποίος παραγόταν όταν τριβόταν ήλεκτρο με δέρμα ζώου. Δύο σώματα όμοια ηλεκτρισμένα απωθούνταν, ενώ δύο σώματα με ηλεκτρισμό διαφορετικού είδους έλκονταν. Ο ηλεκτρισμός της ύαλου ονομάστηκε, αυθαίρετα, θετικός και ο ηλεκτρισμός της ρητίνης αρνητικός. Πολύ αργότερα η επιλογή αυτή αποδείχθηκε ατυχής. Στη συνέχεια, οι ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών αποδόθηκαν στη ύπαρξη δύο ειδών αβαρούς ηλεκτρικού ρευστού, του θετικού και του αρνητικού.

Λίγο μετά τα μέσα του 18ου αιώνα, τα «μυστηριώδη» ηλεκτρικά ρευστά πήραν μια πιο συγκεκριμένη μορφή, με την εισαγωγή μια νέας έννοιας, ενός φυσικού μεγέθους. Ο Charles Augustine de Coulomb (1736-1806) υπέθεσε ότι δύο ηλεκτρισμένα σώματα, τα οποία έλκονταν ή απωθούνταν με την ίδια δύναμη όταν βρισκόταν στην ίδια απόσταση από τρίτο ηλεκτρισμένο

σώμα, θα έπρεπε να έχουν ίδιο ηλεκτρικό φορτίο. Το ηλεκτρικό φορτίο, συγκέντρωση ηλεκτρικού ρευστού σε «ηλεκτρικό» υλικό, μπορούσε να μετρηθεί από τη δύναμη που αυτό προκαλούσε. Το 1785, ο Coulomb έδειξε ότι η δράση μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων είναι μια σχέση ανάλογη με αυτή της παγκόσμιας έλξης, γνωστή σήμερα ως Νόμος του Coulomb.

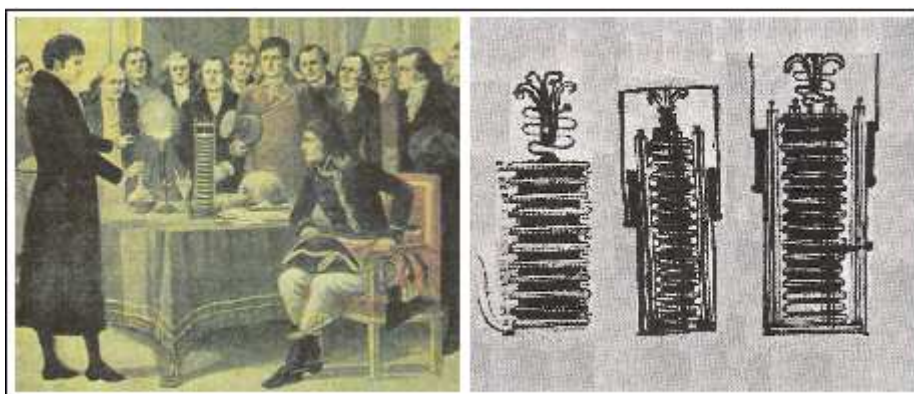
Η φύση των ηλεκτρικών φορτίων δεν επρόκειτο να γίνει κατανοητή παρά εκατό χρόνια αργότερα, αυτό όμως δεν εμπόδισε τον Benjamin Franklin (1706-1790) να διατυπώσει την υπόθεση της ύπαρξης ενός και μοναδικού ηλεκτρικού ρευστού του οποίου ο αρνητικός ηλεκτρισμός είναι η έλλειψη θετικού φορτίου. Βέβαια, μετέπειτα φάνηκε ότι στην πραγματικότητα μάλλον το αντίθετο συμβαίνει, τα θετικά φορτία είναι εκδήλωση της έλλειψης αρνητικών φορτίων. Το σφάλμα αυτό είναι συνέπεια της πρώτης, λαθεμένης επιλογής που έγινε στο πρόσημο των ηλεκτρικών φορτίων. Ακόμη, ο Franklin διατύπωσε την άποψη ότι ο κεραυνός δεν είναι τίποτε άλλο από ηλεκτρική εκκένωση, δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ νεφών και γης. Μέχρι το σημείο αυτό η μελέτη του Ηλεκτρισμού περιελάμβανε την έρευνα στατικών φορτίων, τον τομέα της Ηλεκτροστατικής ή του Στατικού Ηλεκτρισμού.

Την ίδια περίοδο ο Μαγνητισμός ήταν πολύ πιο μυστηριώδης. Προχωρώντας με τρόπο ανάλογο προς τον Ηλεκτρισμό, ο Coulomb διατύπωσε την υπόθεση της ύπαρξης δυο ειδών μαγνητικού ρευστού, του βόρειου (N) και του νότιου (S). Οι μαγνητικές μάζες, το μαγνητικό ανάλογο των ηλεκτρικών φορτίων, ήταν η συγκέντρωση μαγνητικών ρευστών στα άκρα του μαγνήτη, η οποία έδινε σ' αυτόν τις ιδιότητες του. Οι μαγνητικές μάζες, όπως και τα ηλεκτρικά φορτία, έλκονταν και απωθούνταν, ακολουθώντας τον Νόμο του Coulomb. Οι ομοιότητες σταματούσαν εδώ, τα θετικά και αρνητικά φορτία δεν υπήρχαν ανεξάρτητα, αν κάποιος προσπαθούσε να διαιρέσει ένα μαγνήτη αντί να απομονωθούν οι δύο μαγνητικές μάζες, δημιουργούνταν δυο μικρότεροι ξεχωριστοί μαγνήτες. Μέχρι το σημείο αυτό η μελέτη του Μαγνητισμού περιελάμβανε την έρευνα των ιδιοτήτων φυσικών μαγνητών, δηλαδή στατικών μαγνητικών μαζών, τον τομέα της Μαγνητοστατικής.



**ΣΧΗΜΑ 1.2:** Όσο και να διαιρεθεί ένας μαγνήτης, πάντα θα έχει δύο πόλους.

Η ανακάλυψη του ηλεκτροχημικού στοιχείου από τον Alessandro Volta (1745-1827), το 1798, και η βελτίωση του έδωσε στους ερευνητές της εποχής την πρώτη γεννήτρια που μπορούσε να προμηθεύει εύκολα και κατά κάποιο τρόπο συνεχή ηλεκτρικό ρεύσό. Η ανακάλυψη αυτή αποτέλεσε την αρχή ενός νέου κλάδου, της Ηλεκτροκινητικής ή του Δυναμικού Ηλεκτρισμού. Η ομοιότητα των ηλεκτρικών φορτίων, που παρείχαν τα ηλεκτρικά στοιχεία, και των ηλεκτροστατικών φορτίων αποδείχτηκε από τον Michael Faraday (1791-1867), χάρη στην ομοιότητα των φαινομένων που αυτά δημιουργούσαν. Ακόμη διαπιστώθηκε ότι τα «ηλεκτρικά» υλικά όπως το ήλεκτρο, αντιστεκόταν στη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ τα «μη ηλεκτρικά» υλικά όπως τα μέταλλα την επέτρεπαν. Έτσι τα «ηλεκτρικά» υλικά αποτέλεσαν τους μονωτές και τα «μη ηλεκτρικά» υλικά του αγωγούς.

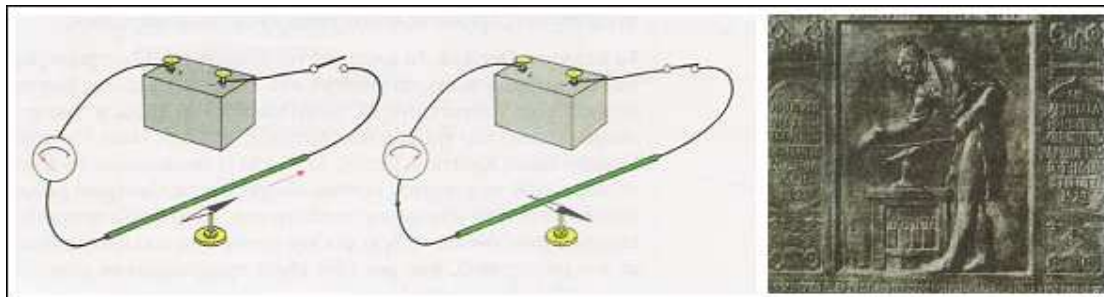


**ΣΧΗΜΑ 1.3:** Ο Alessandro Volta και η βολταϊκή στήλη.

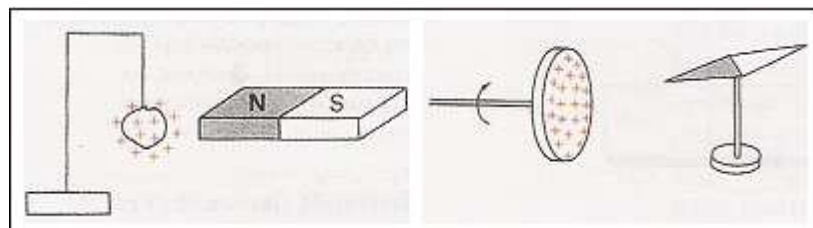
Στο πρώτο μισό του 19ου αιώνα ανακαλύφθηκαν οι νόμοι του ηλεκτρικού ρεύματος με τη διατύπωση των Νόμων του Faraday για την ηλεκτρόλυση, του Νόμου του Joule (James Prescott Joule, 1818-1889) για τα θερμικά αποτελέσματα που προκαλεί η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από ένα αγωγό, του Νόμου του Ohm (George Simon Ohm, 1787-1854) και των Κανόνων του Kirchhoff (Gustave Robert Kirchhoff, 1824-1887) που ερμήνευαν τη διανομή

της ηλεκτρικής ενέργειας που διοχέτευαν οι γεννήτριες στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Παράλληλα οι Carl Frederic Gauss (1777-1855) και Wilhelm Edward Weber (1804-1891) εισήγαγαν ένα σύστημα μονάδων που επέτρεπε τη μέτρηση των φυσικών μεγεθών που εισήχθησαν, δηλαδή του ηλεκτρικού φορτίου, της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, της ηλεκτρικής τάσης, της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, της ηλεκτρικής αντίστασης κ.α.

Στα μέσα του 1819 ο Hans Christian Oersted (1777-1851) έκανε μια σημαντική ανακάλυψη, το ηλεκτρικό ρεύμα επηρέαζε τη μαγνητική βελόνα, συνεπώς δημιουργούσε μαγνητικό πεδίο. Έτσι άνοιξε ο δρόμος του Ηλεκτρομαγνητισμού. Την ανακάλυψη του Oersted ακολούθησαν οι εργασίες των Biot-Savart, André Marie Ampere (1775-1836) και Pierre Simon Laplace (1749-1827), οι οποίοι έδειξαν τη σύνδεση και αλληλεπίδραση μεταξύ κινούμενων φορτίων και μαγνητικών πεδίων. Ακόμη ο Ampere διατύπωσε μια θεωρία ερμηνείας των μαγνητικών φαινομένων, τα οποία απέδωσε στη δράση μικροσκοπικών σπειρών που διαρρέονται από ρεύμα. Παράλληλα με αυτά διατυπωνόταν και η κλασσική θεωρία του ηλεκτρικού πεδίου. Η σύνδεση όμως Ηλεκτρισμού και Μαγνητισμού έγινε και κατά την αντίστροφη φορά, με την ανακάλυψη του φαινομένου της Ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, το 1831, από τον Michael Faraday, ο οποίος διαπίστωσε ότι και ο μαγνητισμός μπορούσε να παράγει ηλεκτρισμό.



**ΣΧΗΜΑ 1.4:** (α) το πείραμα του Oersted έδειξε ότι μαγνητική βελόνα επηρεάζεται όταν περνάει ρεύμα από τον αγωγό. (β) αναμνηστική πλακέτα στην οποία παριστάνεται ο Hans Christian Oersted να εκτελεί το ιστορικό πείραμα.

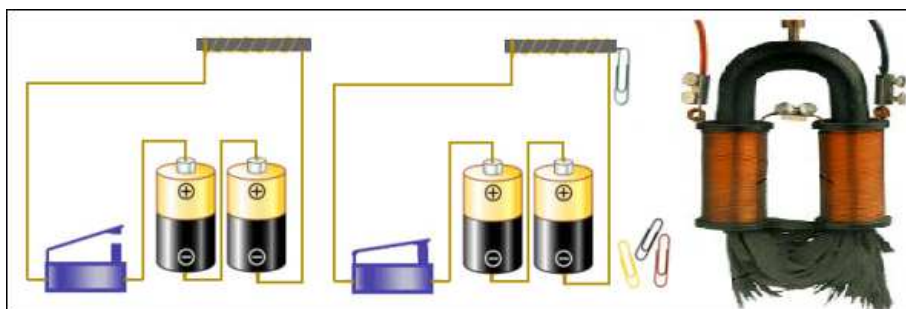


**ΣΧΗΜΑ 1.5:** (α) οι μαγνήτες δεν αλληλεπιδρούν με ακίνητα ηλεκτρικά φορτία αλλά (β) αντιδρούν στην ύπαρξη κινούμενων ηλεκτρικών φορτίων.

Όλα όσα αναφέρθηκαν συνθέτουν την θεωρία του Κλασσικού Ηλεκτρομαγνητισμού ή της Κλασσικής Ηλεκτροδυναμικής. Το 1873, όμως, η θεωρία αυτή διευρύνθηκε, το σύνολο των μέχρι τότε γνωστών ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων, καθώς και αυτά του φωτός και της Οπτικής ερμηνεύθηκαν από μία και μόνη θεωρία, την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell.

### 1.2.1. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΕΣ

Ο ηλεκτρομαγνήτης είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος. Αποτελείται από ένα κομμάτι μαλακό σίδηρο ή χαλκό που λέγεται πυρήνας του ηλεκτρομαγνήτη και από ένα σύρμα που τυλίγεται στον πυρήνα και λέγεται πηνίο. Αν συνδέσουμε τα άκρα του πηνίου με τους πόλους μιας πηγής τότε ο πυρήνας του ηλεκτρομαγνήτη έχει ιδιότητες μαγνήτη (αυτό συμβαίνει γιατί προσανατολίζονται τα στοιχειώδη ηλεκτρικά ρεύματα των ατόμων του σιδήρου ή χαλκού και δημιουργούν ένα νέο πηνίο). Όταν πάψει να περνά ρεύμα από το πηνίο ο σίδηρος χάνει τη μαγνητίσή του, ενώ ο χαλκός τη διατηρεί (γίνεται μόνιμος μαγνήτης). Στους ηλεκτρομαγνήτες δίνουν συνήθως σχήμα πετάλου για να είναι κοντά οι άκρες του, που λέγονται πόλοι του ηλεκτρομαγνήτη, και να έλκουν μαζί. Οι ηλεκτρομαγνήτες έχουν μεγάλη ελκτική δύναμη και οφείλουν την ανακάλυψή τους στο Faraday. Οι ηλεκτρομαγνήτες είναι χρήσιμοι σε περιπτώσεις που ο μαγνήτης πρέπει να έχει την δυνατότητα να «κλείσει» ή να «ανοίξει» (on, off), όπως π.χ. στους γερανούς που μεταφέρουν κατεστραμμένα οχήματα. Σήμερα η βιομηχανία κατασκευάζει ηλεκτρομαγνήτες κάθε μεγέθους. Χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις, όπως στις μηχανές που προσφέρουν εσωτερικά μαγνητικά πεδία, σε γερανούς για σήκωμα σιδηρούχων υλικών, στους τηλεγραφικούς δέκτες, στις αυτόματες ηλεκτρικές κλειδαριές, στα ηλεκτρικά κουδούνια, στους διακόπτες, στα μικρόφωνα, τα μεγάφωνα, τα μαγνητόφωνα κ.λπ.

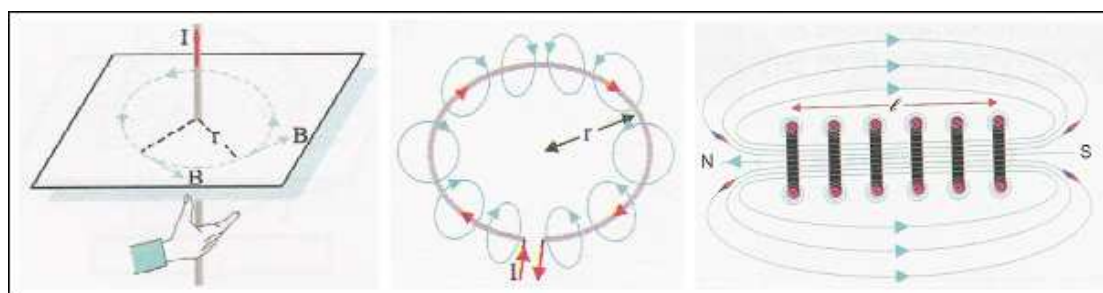


**ΣΧΗΜΑ 1.6:** Ο ηλεκτρομαγνήτης λειτουργεί σαν μαγνήτης μόνο όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δηλαδή περνάει ρεύμα από το πηνίο. Μερικοί ηλεκτρομαγνήτες, ανάλογα με τη χρήση τους, έχουν πεταλοειδές σχήμα.

**Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς:** Για την περίπτωση που ηλεκτρικό ρεύμα κινείται μέσω ενός σύρματος (ρευματοφόρο αγωγό), το προκύπτον πεδίο προσανατολίζεται σύμφωνα με τον "κανόνα του δεξιού χεριού." Εάν το δεξί χέρι χρησιμοποιείται ως πρότυπο, και ο αντίχειρας του δεξιού χεριού δείχνει κατά μήκος του καλωδίου από το θετικό προς το αρνητικό άκρο ("συμβατική φορά του ρεύματος", η αντίστροφη κατεύθυνση της πραγματικής κίνησης των ηλεκτρονίων), τότε το μαγνητικό πεδίο θα προσανατολίζεται γύρω από το σύρμα στην κατεύθυνση που υποδεικνύεται από τα δάχτυλα του δεξιού χεριού.

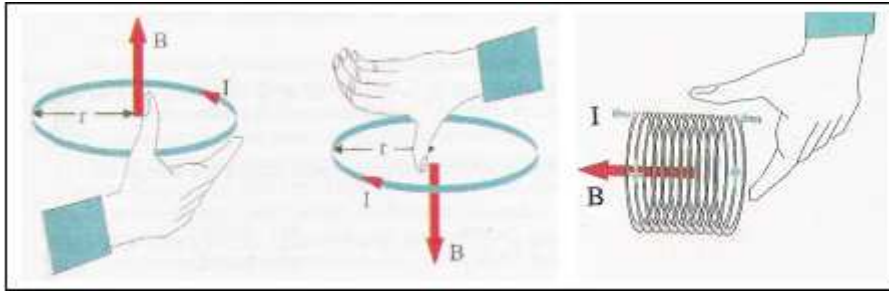
Το μαγνητικό πεδίο γύρω από ένα μακρύ ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό είναι ασθενές, εκτός και αν, ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα μεγάλης έντασης. Για παράδειγμα, ένας ευθύγραμμος αγωγός μεγάλου μήκους που διαρρέεται από ρεύμα έντασης 50A δημιουργεί σε απόσταση 1m από αυτόν μαγνητικό πεδίο έντασης μέτρου  $10^{-5}$  Tesla που είναι αρκετά ασθενές. Αν όμως, τον ίδιο αγωγό τον τυλίξουμε, έτσι ώστε να δημιουργήσουμε πολλούς μικρούς κυκλικούς αγωγούς (βρόγχους), τα πράγματα αλλάζουν ριζικά. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το ίδιο το σύρμα είναι πολύ ισχυρό. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος της προτίμησης που δείχνουμε για κυκλικούς ρευματοφόρους αγωγούς. Ένα σύνολο τέτοιων κυκλικών αγωγών αποτελεί ένα πηνίο. Κάθε ένας κυκλικός αγωγός λέμε ότι αποτελεί μια σπείρα. Αν τυλίξουμε πολλές σπείρες με τέτοιο τρόπο ώστε να ισαπέχουν, έχουμε φτιάξει ένα σωληνοειδές. Η ευθεία που ορίζεται από τα κέντρα των σπειρών λέγεται άξονας του σωληνοειδούς.

Όπως μπορεί να φανεί γεωμετρικά, εάν ένας βρόχος ή ο έλικας του καλωδίου διαμορφώνεται έτσι ώστε το ρεύμα να ταξιδεύει κυκλικά, τότε όλες οι δυναμικές γραμμές στο κέντρο του βρόχου έχουν την ίδια κατεύθυνση, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα μαγνητικό δίπολο του οποίου η ισχύς εξαρτάται από το ρεύμα γύρω από το βρόχο ή το ρεύμα στον έλικα. Το σημείο εξόδου των δυναμικών γραμμών το χαρακτηρίζουμε βόρειο πόλο, ενώ το σημείο εισόδου νότιο πόλο, δηλαδή το σωληνοειδές συμπεριφέρεται όπως ένας ευθύγραμμος μαγνήτης. Το μαγνητικό πεδίο πολλαπλασιάζεται ανάλογα με τον αριθμό στροφών του σύρματος. Στην περίπτωση ενός τέτοιου βρόχου, εάν τα δάχτυλα του δεξιού χεριού δείχνουν την κατεύθυνση της συμβατικής τρέχουσας ροής ρεύματος (θετικό προς αρνητικό, δηλαδή την αντίθετη κατεύθυνση από την πραγματική ροή των ηλεκτρονίων), ο αντίχειρας θα δείξει στην κατεύθυνση που αντιστοιχεί στο βόρειο πόλο του διπόλου.

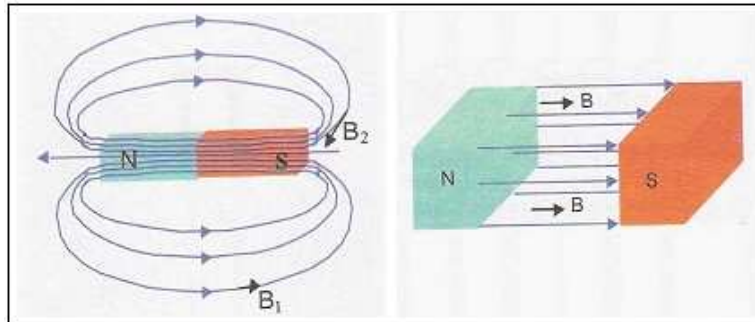


**ΣΧΗΜΑ 1.7:** Σωληνοειδές πηνίο. Έστω ότι έχουμε έναν ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό (α) και τον τυλίξουμε έτσι ώστε να δημιουργήσουμε ένα βρόγχο, το μαγνητικό του πεδίο ακολουθεί τον κανόνα του δεξιού χεριού, δηλαδή ο αντίχειρας δείχνει τη φορά του ρεύματος και τα υπόλοιπα δάχτυλα την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου (β). Έστω ότι τυλίξουμε το ρευματοφόρο αγωγό έτσι ώστε να δημιουργήσουμε ένα σπινάλ (σωληνοειδές πηνίο), η κάθε σπείρα αποτελεί (θεωρητικά) ένα βρόγχο. Το μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς (γ) προκύπτει από το συνδυασμό των μαγνητικών πεδίων του κάθε βρόχου ξεχωριστά.

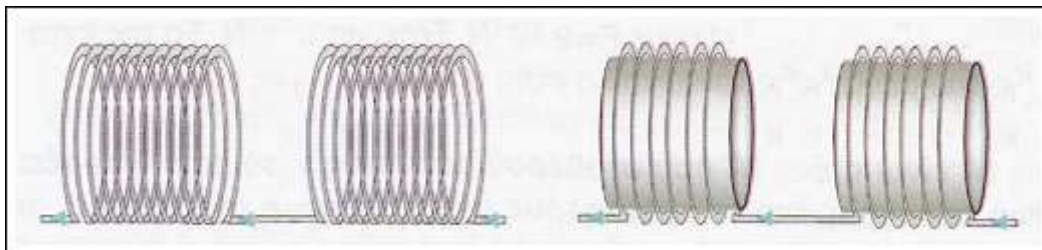




**ΣΧΗΜΑ 1.8:** Ο κανόνας του δεξιού χεριού στο σωληνοειδές πηνίο. Ο αντίχειρας δείχνει την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και τα υπόλοιπα δάκτυλα, τη φορά του ρεύματος στις σπείρες.



**ΣΧΗΜΑ 1.9:** (α) μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου μαγνήτη. Το μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς προσομοιάζει το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου μαγνήτη. (β) ομογενές μαγνητικό πεδίο. Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς οι δυναμικές γραμμές είναι παράλληλες με τον άξονα του σωληνοειδούς και ισαπέχουν, άρα το πεδίο είναι ομογενές, όπως συμβαίνει στο εσωτερικό του ευθύγραμμου μαγνήτη. Ομογενές μαγνητικό πεδίο καλείται το πεδίο εκείνο στο οποίο η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ίδια σε όλα τα σημεία του.



**ΣΧΗΜΑ 1.10:** Αν πλησιάσουν δύο σωληνοειδή, το μαγνητικό πεδίο στο μεταξύ τους χώρο προσομοιάζει το ομογενές. Όσο πιο κοντά βρίσκονται τα σωληνοειδή, τόσο πιο ομογενές είναι το πεδίο αυτό. (α) Σωληνοειδή χωρίς πυρήνα. (β) Σωληνοειδή με πυρήνα (ηλεκτρομαγνήτης). Ο πυρήνας αυξάνει το μαγνητικό πεδίο του ηλεκτρομαγνήτη.

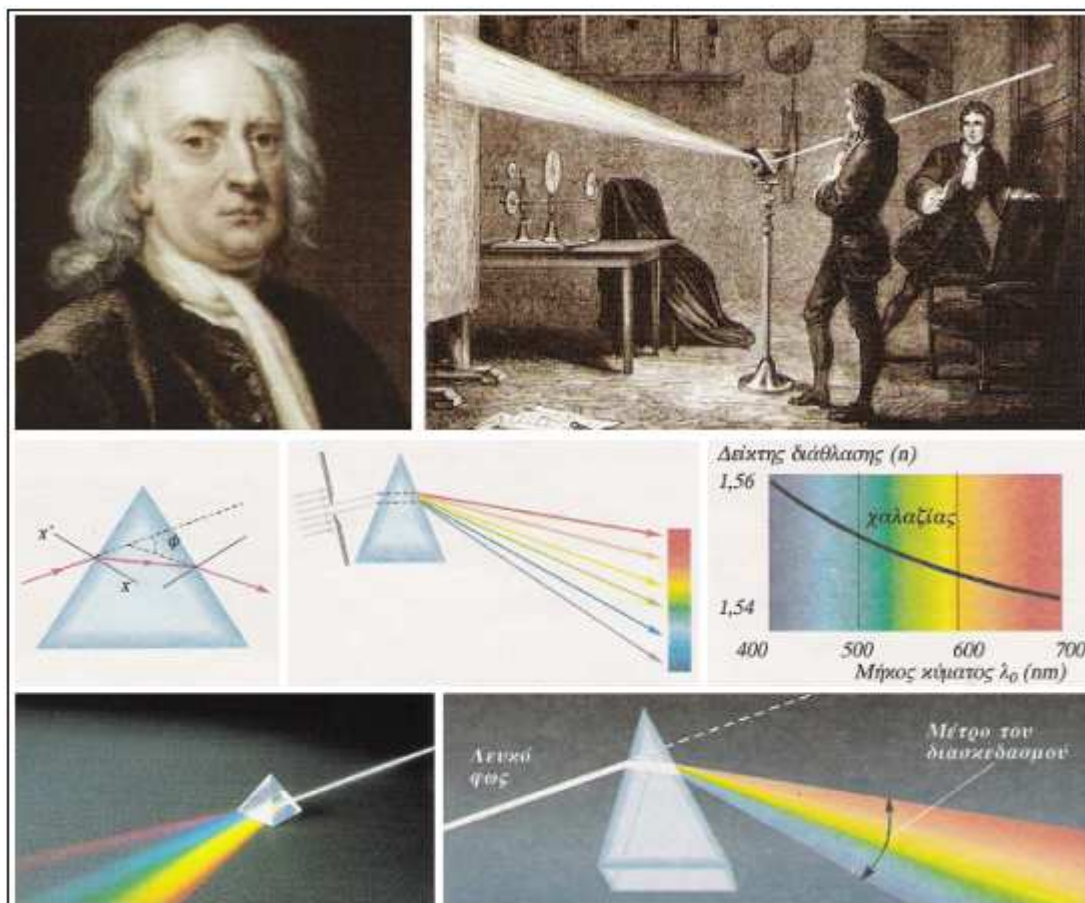
### 1.3. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ: ΑΠΟ ΤΟ ΦΩΣ ΣΤΑ LASER

Από πολύ παλιά, στους αρχαίους χρόνους, φιλόσοφοι και φυσιοδίφες προσπαθούσαν να κατανοήσουν και να ερμηνεύσουν τη «φύση» του φωτός. Για πολλά χρόνια ήταν αντικείμενο μακρόπνοων συζητήσεων, διαφωνιών, επιχειρημάτων και αντεπιχειρημάτων.

Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι είχαν αντιληφθεί και διατυπώσει αυτό που εμείς σήμερα ονομάζουμε «σωματιδιακή φύση» του φωτός και υποστήριζαν διάφορες ιδέες στις οποίες περιπλέκονταν οι έννοιες της όρασης και του φωτός. Πίστευαν δηλαδή ότι το φως που εκπέμπει ο Ήλιος, αλλά και κάθε φωτοβολούσα πηγή, αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται με μεγάλη ταχύτητα και, όταν πέφτουν στο μάτι του παρατηρητή, διεγείρουν το αισθητήριο όργανο της όρασης. Οι Πυθαγόρειοι πίστευαν ότι η όραση προκαλείται από σωματίδια που εκπέμπονται από τα παρατηρούμενα σώματα και οι Πλατωνικοί υποστήριζαν ότι ο οφθαλμός εκπέμπει σωματίδια που ανακλώνται στα αντικείμενα και επιστρέφουν πάλι στον οφθαλμό. Ο Εμπεδοκλής (494-434 π.Χ.) συνδύασε τις απόψεις αυτές υποστηρίζοντας ότι «το φως όντας κάτι σωματιδιακό, που απορρέει από το φωτίζον σώμα, φθάνει πρώτα στον μεταξύ Γης και ουρανού χώρο και ύστερα σε μας, μας διαφεύγει όμως η κίνηση του αυτή λόγω της ταχύτητάς του». Για το φως πίστευε ότι έχει πεπερασμένη ταχύτητα, γεγονός που αποδείχτηκε είκοσι αιώνες αργότερα από τον Ole Roemer (1644-1710). Ο Αριστοτέλης (384-322 π.Χ.) πίστευε ότι το φως απαιτεί κάποιο μέσο διάδοσης, ιδέα παρόμοια με αυτή του αιθέρα. Οι Πλατωνικές ιδέες επικράτησαν μέχρι τα μέσα του 17ου αιώνα με εξαίρεση τον Άραβα αλχημιστή Abu Ali al Hasan ibn al Haytham

(965-1038) ο οποίος υποστήριζε ότι το φως εκπέμπεται από φωτεινές πηγές. Οι απόψεις του al Haytham έγιναν γνωστές πολύ αργότερα (16ος αι.) στη Δύση και είχαν μεγάλη απήχηση.

Η νεότερη εποχή, κατά την οποία μπηκαν τα θεμέλια των σύγχρονων γνώσεων περί φωτός, άρχισε στα μέσα του 17ου αιώνα όταν ο Sir Isaac Newton (1642-1727) απέδειξε ότι το λευκό χρώμα συντίθεται από τα χρώματα της ίριδας (1666) και υποστήριξε ότι το φως αποτελείται από ελαστικά σωμάτια που εκπέμπονται από τις φωτεινές πηγές και ανακλώνται από τα διάφορα σώματα. Ως την εποχή του Newton, οι περισσότεροι επιστήμονες πίστευαν ότι το φως συνίστατο από ροή σωματιδίων (corpuscles, όπως τα ονόμαζαν) τα οποία εξέπεμπαν οι φωτεινές πηγές. Η σωματιδιακή θεωρία του Newton, με το τεράστιο κύρος που διέθετε ο δημιουργός της, εκτόπισε για μεγάλο διάστημα τις σχεδόν ταυτόχρονες ιδέες των R. Hooke και Christian Huygens (1629-1695) περί κυματικής φύσης του φωτός (1665). Κατ' αυτούς, το φως διαδίδεται ως κύμα πίεσης (διάμηκες) στον αιθέρα, ένα ρευστό απείρως ελαστικό και αβαρές που πληρεί το σύμπαν. Την ιδέα του αιθέρα είχε συλλάβει πρώτος ο Καρτέσιος (Rene Descartes 1595-1650).



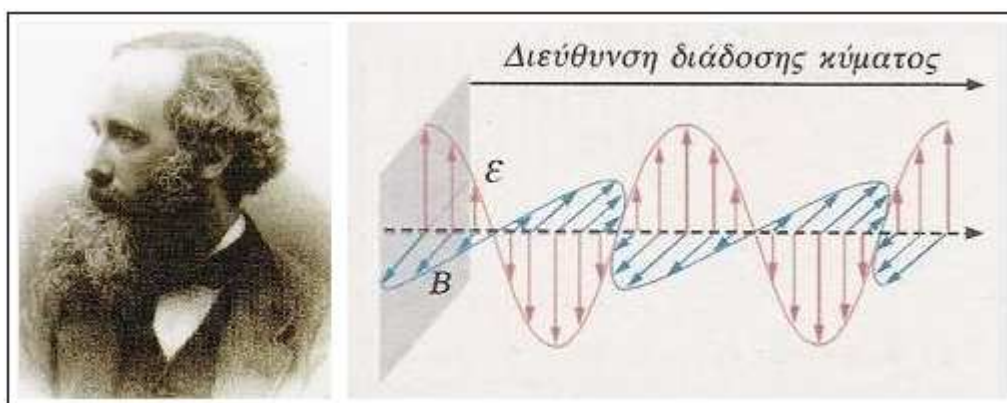
**ΣΧΗΜΑ 1.11:** Ο sir Isaac Newton και η ανάλυση του λευκού φωτός. Κάθε μονοχρωματική ακτίνα φωτός, όταν διαδίδεται σε ένα συγκεκριμένο οπτικό μέσο, χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό μήκος κύματος, που είναι η ταυτότητα του χρώματος για το μέσο αυτό. Ο δείκτης διάθλασης του οπτικού μέσου έχει διαφορετική τιμή για κάθε χρώμα. Η γωνία εκτροπής κάθε χρώματος, όταν αυτό διέρχεται από οπτικό μέσο, εξαρτάται από το μήκος κύματος του χρώματος και όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η γωνία εκτροπής. Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η εξάρτηση της ταχύτητας του φωτός και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος, ονομάζεται διασκεδασμός. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε για πρώτη φορά το 17ο αιώνα από τους Rene Descartes και Isaac Newton. Ο Newton προσπάθησε να αναλύσει περαιτέρω τις μονοχρωματικές ακτίνες του φάσματος σε άλλες απλούστερες αλλά δεν α κατάφερε. Το μόνο που παρατήρησε ήταν ότι το χρώμα διαχεόταν περισσότερο αλλά παρέμενε ως έχει.

Εκείνη την περίοδο έγιναν και οι πρώτες προσπάθειες να μετρηθεί η ταχύτητα του φωτός, επειδή όμως η ταχύτητα του φωτός στο κενό και τον αέρα είναι εξαιρετικά μεγάλη και τα μέσα της εποχής δεν επέτρεπαν μετρήσεις ακριβείας, οι προσπάθειες αυτές απέτυχαν. Ο Γαλιλαίος (Galileo Galilei 1564-1642) ήταν από τους πρώτους που προσπάθησε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός χρησιμοποιώντας απλά μέσα της εποχής. Έτσι τοποθέτησε δύο παρατηρητές πάνω σε δύο πύργους των τειχών της Πίζας, οι οποίοι απείχαν μεταξύ του 5 μίλια. Κάθε παρατηρητής κρατούσε από ένα φανάρι που ήταν κλειστό, και όποτε χρειαζόταν άνοιγε το παραθυράκι. Όταν ο

πρώτος άνοιγε το παραθυράκι του φαναριού του, ο δεύτερος ήταν συνεννοημένος να ανοίξει το δικό του αμέσως μόλις έβλεπε το φως του πρώτου. Αν λοιπόν μετρούσε κανείς το χρόνο που περνούσε από τη στιγμή που ο πρώτος άνοιγε το παραθυράκι έως τη στιγμή που έβλεπε το φως του δεύτερου παρατηρητή (και με γνωστή τη μεταξύ τους απόσταση), με μια απλή διαίρεση θα μπορούσε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός. Όμως ο χρόνος αντίδρασης των δύο παρατηρητών ήταν πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειαζόταν το φως για να διανύσει τη μεταξύ τους απόσταση και έτσι η μέθοδος αυτή δεν ήταν εφαρμόσιμη και οδήγησε σε αποτυχία. Έδειξε όμως ότι η ταχύτητα του φωτός είναι τόσο μεγάλη ώστε δεν μπορεί να μετρηθεί με τέτοια χονδροειδή μηχανικά μέσα.

Στις αρχές του 19ου αιώνα, επανήλθε η κυματική θεωρία, καλά επεξεργασμένη από τον Thomas Young (1773-1829), ο οποίος ερμήνευσε σωστά τα φαινόμενα συμβολής, που δεν μπορούσαν να ερμηνευτούν σωστά από την σωματιδιακή θεωρία. Τα κύματα κατά τον Young ήταν διαμήκη, πράγμα που, αν και δεν είναι σωστό, δεν επέδρασε ουσιαστικά στα αποτελέσματα των ερευνών του. Λίγο αργότερα ο A. Fresnel διατύπωσε την ιδέα των εγκάρσιων κυμάτων, ερμήνευσε το φαινόμενο της πόλωσης, που δεν ερμηνευόταν με τα διαμήκη κύματα, και επεξεργάστηκε άριστα το μαθηματικό μέρος της θεωρίας σε βαθμό που μέχρι και σήμερα παραμένει κατά βάση το ίδιο. Η κυματική θεωρία είχε κυριαρχήσει πλέον επί της σωματιδιακής, παρέμενε όμως άλυτο το πρόβλημα της φύσης και του μέσου διάδοσης των φωτεινών κυμάτων, που εξακολουθούσε να θεωρείται ο αιθέρας. Γύρω από αυτό το ζήτημα περιστράφηκε όλη η φυσική του 19ου αιώνα. Ο αιθέρας για να μεταδίδει εγκάρσια κύματα έπρεπε να παρουσιάζει ακαμψία, πως ήταν λοιπόν δυνατόν, το κενό ή ο αέρας που δεν έχουν ίχνοσ ακαμψίας, να επιτρέπουν τη διάδοση του φωτός; Παρ' όλες τις τεράστιες θεωρητικές προσπάθειες που έγιναν δεν δόθηκε καμία απάντηση.

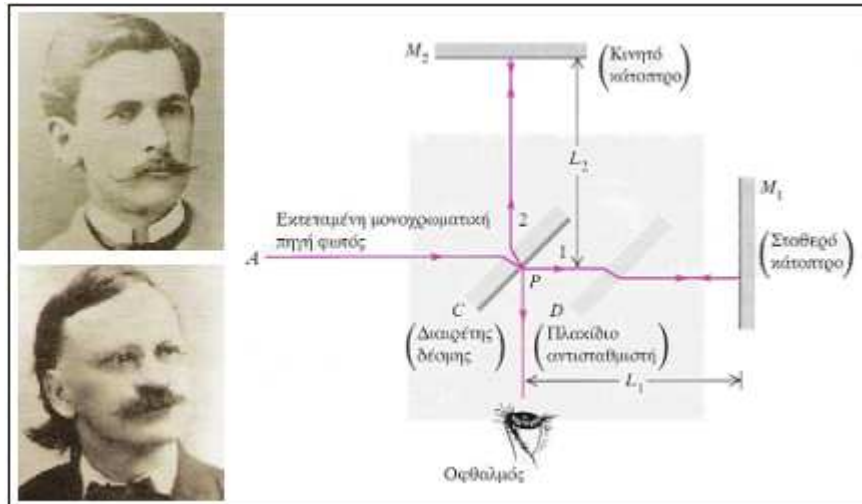
Το 1873 ο James Clerk Maxwell (1831-1879) πρόβλεψε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και υπολόγισε την ταχύτητα διάδοσης τους. Η εξέλιξη αυτή καθώς και η πειραματική έρευνα του Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) που άρχισε το 1867 απέδειξε, χωρίς καμιά αμφισβήτηση, ότι το φως είναι πράγματι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο Maxwell απέδειξε ότι, όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο ταλαντώνεται, παράγει ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Το κύμα αυτό αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό κύμα. Δηλαδή είναι ένα πεδίο με δύο χαρακτηριστικά, την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και την ένταση του μαγνητικού πεδίου, των οποίων τα διανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους και μεταβάλλονται χωρικά και χρονικά. Οι εντάσεις των πεδίων παίρνουν ταυτόχρονα την μέγιστη και ελάχιστη τιμή, δηλαδή έχουν την ίδια φάση και διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα. Επίσης εύκολα διαπιστώνεται ότι το φως μεταφέρει ενέργεια (οποιοδήποτε σώμα, αν εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία, θερμαίνεται). Η ενέργεια αυτή είναι ενέργεια ηλεκτρικού και ενέργεια μαγνητικού πεδίου, η οποία παράγεται από τις πηγές και μεταφέρεται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Την θεωρία του Maxwell απέδειξε πειραματικά ο Hertz το 1887, ο οποίος παρήγαγε, μέσω ταχέων ηλεκτρικών ταλαντώσεων, κύματα της ίδιας φύσης με αυτήν του φωτός αλλά με μικρότερη συχνότητα.



**ΣΧΗΜΑ 1.12:** Ο Maxwell ανακάλυψε το 19ο αιώνα ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Η θεωρία του Maxwell, που είναι αποδεκτή και σήμερα, έδινε απάντηση στο ζήτημα της φύσης του φωτός, παρέμενε όμως το πρόβλημα του αιθέρα, το οποίο δεν αρνήθηκε στη αρχή ούτε αυτή, ως το απαραίτητο μέσο διάδοσης. Σύντομα έγινε αντιληπτό από τον ίδιο τον Maxwell αλλά και από άλλους ότι αυτή η μηχανιστική αντίληψη περί αιθέρα δεν διευκόλυνε αλλά μάλλον περιέπλεκε τα πράγματα. Οι εξισώσεις του Maxwell ισχύουν και στο κενό, χωρίς καμιά μαθηματική δυσκολία. Την άποψη αυτή ενίσχυσε, το 1887, το περίφημο και πολυσυζητημένο πείραμα των Albert Abraham Michelson (1852-1931) και Edward Morley (1838-1923) με το οποίο διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει επίδραση του αιθέρα στη διάδοση του φωτός.

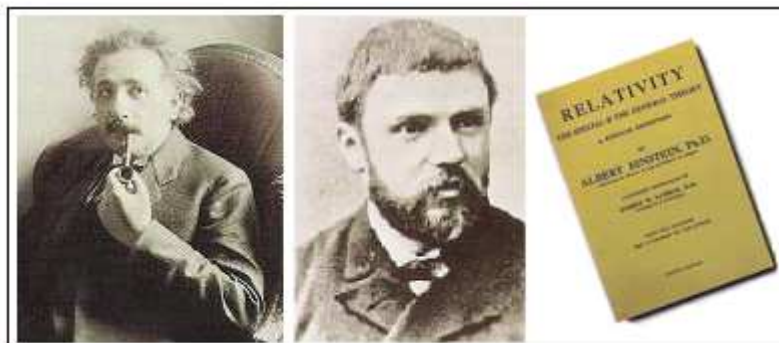




**ΣΧΗΜΑ 1.13:** Albert Michelson, Edward Morley και σχηματικό διάγραμμα του συμβολόμετρου του Michelson.

Οι Michelson και Morley χρησιμοποίησαν το συμβολόμετρο του Michelson σε μια προσπάθεια να ανιχνεύσουν την κίνηση της γης διαμέσου του αιθέρα. Υποθέτοντας ότι το συμβολόμετρο κινείται από τα δεξιά προς τα αριστερά και σύμφωνα με τις θεωρίες του 19ου αιώνα, αυτό θα οδηγούσε σε μεταβολή της ταχύτητας του φωτός στα τμήματα της διαδρομής που είναι παράλληλα προς την πορεία κίνησης. Θα υπήρχαν μετατοπίσεις κροσσών, ως προς τις θέσεις που θα είχαν οι κροσσοί εάν η συσκευή ήταν σε ηρεμία ως προς τον αιθέρα. Στη συνέχεια, όταν όλη η συσκευή στρεφόταν κατά  $90^\circ$ , τα άλλα τμήματα της διαδρομής θα επηρεάζονταν παρόμοια, δίνοντας μια μετατόπιση κροσσών στην αντίθετη κατεύθυνση. Οι Michelson και Morley ανέμεναν ότι η κίνηση της γης μέσω του αιθέρα θα προξενούσε μια μετατόπιση κροσσών περίπου  $4/10$  του κροσσού, όταν το όργανο περιστρέφονταν. Η μετατόπιση που στην πράξη παρατηρήθηκε, ήταν μικρότερη του  $1/100$  του κροσσού και, μέσα στα όρια της πειραματικής αβεβαιότητας, ήταν ουσιαστικά ακριβώς μηδέν. Παρά την περιστροφική της κίνηση γύρω από τον ήλιο, η γη εμφανιζόταν να ηρεμεί ως προς τον αιθέρα. Αυτό το αρνητικό αποτέλεσμα προβλημάτιζε τους φυσικούς, έως ότου ο Albert Einstein (1879-1955) ανέπτυξε την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας το έτος 1905.

Από το 1887 έως το 1905 καταβλήθηκαν αρκετές προσπάθειες, ιδιαίτερα από τον ολλανδό φυσικό Hendrick Antoon Lorentz (1853-1928), να εξηγηθεί το αποτέλεσμα του πειράματος των Michelson και Morley με διάφορες υποθέσεις, όπως ότι η κίνηση μέσα στον αιθέρα επηρέαζε τις συσκευές μέτρησης αποστάσεων, κάνοντας τις να συστέλλονται, ή τις συσκευές μέτρησης των χρονικών διαστημάτων, κάνοντας τις να επιβραδύνονται. Αλλά το 1905, σε ένα διάσημο άρθρο, ένας άγνωστος ως τότε υπάλληλος στο Ελβετικό Γραφείο Ευρεσιτεχνιών, ο Albert Einstein (1879-1955), έδειξε ότι η όλη ιδέα του αιθέρα δεν είναι αναγκαία αρκεί να είναι κανείς διατεθειμένος να εγκαταλείψει την ιδέα του απόλυτου χρόνου. Παρόμοια θέση υποστήριξε λίγες εβδομάδες αργότερα ο κορυφαίος γάλλος μαθηματικός Jules Henri Poincare (1854-1912). Τα επιχειρήματα όμως του Einstein ήταν πιο κοντά στη φυσική απ' ό,τι τα επιχειρήματα του Poincare, ο οποίος αντιμετώπισε το πρόβλημα ως πρόβλημα μαθηματικών.



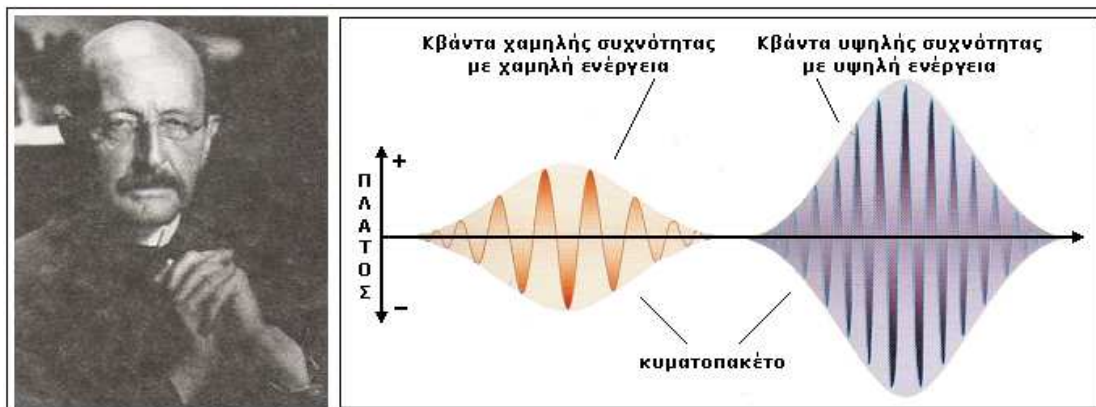
**ΣΧΗΜΑ 1.14:** Albert Einstein (1879-1955) και Henri Poincare (1854-1912). Στον Einstein αποδίδεται συνήθως η τιμή για την ανακάλυψη της Θεωρίας της Σχετικότητας αλλά μνημονεύεται και ο Poincare, του οποίου το όνομα έχει δοθεί σε κάποιο σημαντικό τμήμα της θεωρίας.



Η θεμελιώδης υπόθεση της Θεωρίας της Σχετικότητας, όπως ονομάστηκε η νέα θεωρία, ήταν ότι οι νόμοι της φυσικής πρέπει να παραμένουν οι ίδιοι για όλους του ελεύθερα κινούμενους παρατηρητές ανεξάρτητα από την ταχύτητα τους. Αυτή η ιδέα ίσχυε στους νόμους της κίνησης του Newton, τώρα όμως η ισχύς της επεκτάθηκε ώστε να συμπεριλαμβάνει τη θεωρία του Maxwell και την ταχύτητα του φωτός, ότι δηλαδή όλοι οι παρατηρητές πρέπει να μετρούν ότι το φως έχει την ίδια ταχύτητα, ανεξάρτητα με ποια ταχύτητα κινούνται οι ίδιοι. Πιο γενικά, ο Einstein έκανε την παραδοχή ότι η ταχύτητα ενός φωτεινού κύματος έχει το ίδιο μέτρο  $c$  ως προς όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς, ανεξάρτητα από το πόση είναι η ταχύτητα του ενός ως προς το άλλο. Συνεπώς ο υποτιθέμενος αιθέρας δεν παίζει κανένα ρόλο και η ιδέα του εγκαταλείφθηκε.

Η θεωρία της σχετικότητας είναι ένας ακλόνητα εδραιωμένος ακρογωνιαίος λίθος της σύγχρονης φυσικής. Εκ των υστέρων, το αρνητικό αποτέλεσμα του πειράματος των Michelson και Morley προσφέρει ισχυρή πειραματική στήριξη στην ειδική θεωρία της σχετικότητας και συχνά αναφέρεται ως το πιο σημαντικό πείραμα «αρνητικού αποτελέσματος» που έγινε ποτέ. Ταυτόχρονα ο Einstein, βασιζόμενος στην αρχική ιδέα του Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), θεμελίωσε την κβαντική θεωρία του φωτός και ερμήνευσε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο του απέδωσε το Βραβείο Nobel Φυσικής το 1921. Με τον όρο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο περιγράφεται η εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια των μετάλλων, όταν προσπίπτει πάνω τους κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό θεωρείται ο πρόδρομος των laser που θα περιγραφούν παρακάτω.

Το 1900, ο γερμανός φυσικός Max Planck, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που παράγει ένα θερμαινόμενο σώμα, εισήγαγε την θεωρία των κβάντα φωτός. Οι υπολογισμοί δύο βρετανών φυσικών, του John William Strutt (τρίτος Βαρόνος Rayleigh, 1842-1919) και του sir James Jeans, φαινόταν να οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ένα θερμό αντικείμενο, όπως ο ήλιος, πρέπει να ακτινοβολεί άπειρη ενέργεια. Σύμφωνα με ότι πίστευαν εκείνη την εποχή, ένα θερμό αντικείμενο έπρεπε να στέλνει στο περιβάλλον του ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε όλες τις συχνότητες με την ίδια ένταση, δηλαδή να ακτινοβολεί την ίδια ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε κάθε περιοχή συχνοτήτων. Επειδή όμως οι περιοχές συχνοτήτων είναι άπειρες (ο αριθμός των κυμάτων ανά δευτερόλεπτο μπορεί να αυξάνεται επ' άπειρον: περιοχή ραδιοκυμάτων, περιοχή ορατού φωτός, περιοχή ακτίνων X, κτλ.), είναι άπειρη και η συνολική ποσότητα ακτινοβολούμενης ενέργειας. Για να αποφύγει αυτό το προφανώς απαράδεκτο συμπέρασμα, ο Planck υπέθεσε ότι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπέμπεται κατά ορισμένα ποσά, που ονομάστηκαν κβάντα. Επιπλέον, κάθε κβάντο μεταφέρει ποσότητα ενέργειας που είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των κυμάτων που εκπέμπονται, έτσι σε αρκετά μεγάλες συχνότητες η εκπομπή ενός κβάντου θα απαιτούσε περισσότερη ενέργεια από όση θα ήταν διαθέσιμη. Άρα η εκπομπή ακτινοβολίας στις μεγάλες συχνότητες θα περιοριζόταν και έτσι η συνολική ποσότητα ακτινοβολούμενης ενέργειας θα ήταν πεπερασμένη και όχι άπειρη.



**ΣΧΗΜΑ 1.15:** Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία του Planck, το φως (και γενικότερα κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης όχι κατά συνεχή τρόπο αλλά ασυνεχώς. Δηλαδή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια. Από το άτομο λοιπόν δεν εκπέμπονται συνεχώς κύματα αλλά φωτόνια, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη συχνότητα και έχει συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας.

Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας σηματοδότησε την έναρξη της σύγχρονης εποχής των ιδεών περί φωτός, κατά την οποία η έννοια του μηχανικού κύματος αντικαταστάθηκε από την έννοια του κυμαινόμενου πεδίου. Από τις παραπάνω χρόνιες μελέτες, έρευνες και πειραματισμούς προέκυψε η έννοια του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού του φωτός, ότι δηλαδή το φως έχει δύο φύσεις, την σωματιδιακή και την κυματική. Αρκετά φαινόμενα που σχετίζονται με την εκπομπή και την απορρόφηση του φωτός αφήνουν να διαφανεί και η σωματιδιακή του όψη, κατά το ότι η ενέργεια που μεταφέρεται από τα φωτεινά κύματα είναι «συσκευασμένη» σε διακριτές δεσμίδες ή

πακέτα που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα. Αυτή η φαινομενική αντίφαση μεταξύ της κυματικής και σωματιδιακής υφής εξαλείφθηκε το 1930 με την ανάπτυξη της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής, μιας ευρύτερης θεωρίας που εμπεριέχει και ερμηνεύει τόσο τις κυματικές όσο και τις σωματιδιακές ιδιότητες του φωτός. Η διάδοση του φωτός περιγράφεται κάλλιστα από το κυματικό μοντέλο, αλλά η κατανόηση της εκπομπής και της απορρόφησης του φωτός επιζητεί ως απαραίτητη τη σωματιδιακή άποψη προσέγγισης.

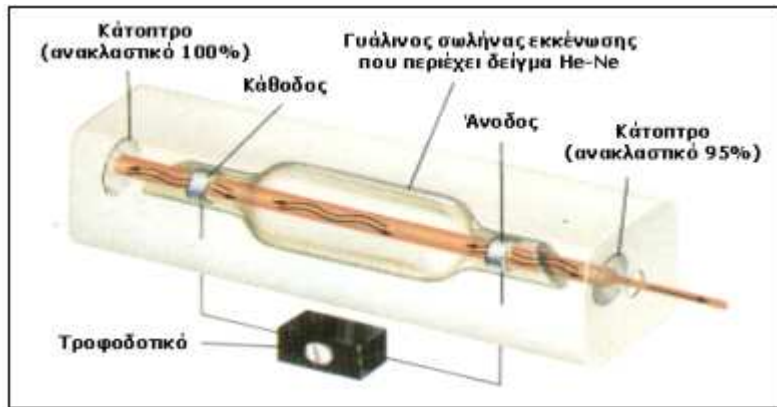
Αποκορύφωμα των σύγχρονων ιδεών που αφορούν τη φύση του φωτός είναι αναμφισβήτητα η κβαντομηχανική θεωρία του φωτός, στη θεμελίωση και ανάπτυξη της οποίας συνέβαλαν οι Niels Hendrik David Bohr (1885-1962, Nobel Φυσικής 1922), Luis-Victor Pierre Raymond, Prince de Broglie (1892-1987, Nobel Φυσικής 1929), Werner Karl Heisenberg (1901-1976, Nobel Φυσικής 1932), Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984, Nobel Φυσικής 1933), Erwin Schrodinger (1887-1961, Nobel Φυσικής 1933), Wolfgang Pauli (1900-1958, Nobel Φυσικής 1945), Max Born (1882-1970, Nobel Φυσικής 1954) κ.α.



**ΣΧΗΜΑ 1.16:** (από αριστερά προς τα δεξιά) Bohr, Raymond, Heisenberg, Dirac, Schrodinger, Pauli και Born

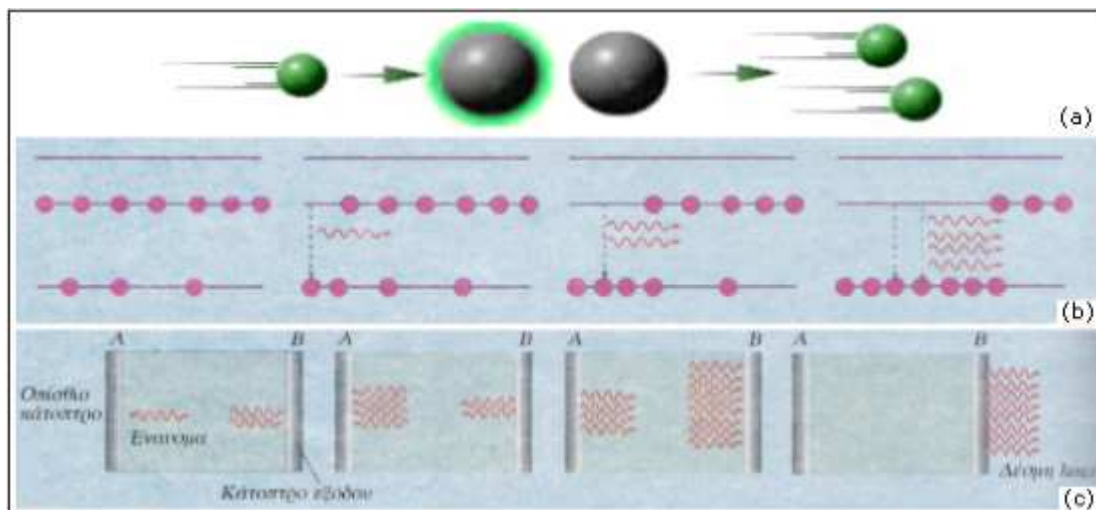
Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι μια θεμελιώδης σταθερά της φύσης. Οι πρώτες επιτυχείς μέθοδοι για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός ήταν βασισμένες σε αστρονομικές παρατηρήσεις. Η πρώτη κατά προσέγγιση μέτρηση επιτεύχθηκε το 1676 από το Δανό αστρονόμο Ole Christensen Roemer (1644-1710), από τις παρατηρήσεις της κίνησης ενός από τους δορυφόρους του πλανήτη Δία. Ο Roemer υπολόγισε ότι η ταχύτητα του φωτός είναι περίπου  $2 \times 10^8$  m/sec. Η μέτρηση αυτή έχει ιστορική αξία, διότι εκτός του ότι προσέγγιζε αρκετά την πραγματική τιμή της ταχύτητας, έδειξε για πρώτη φορά ότι η ταχύτητα του φωτός έχει πεπερασμένη τιμή. Η πρώτη επιτυχής επίγεια μέτρηση πραγματοποιήθηκε από τον Γάλλο επιστήμονα Armand Hippolyt Louie Fizeau (1819-1896) το 1849. Η βασική ιδέα της μεθόδου του Fizeau ήταν να μετρηθεί ο χρόνος που χρειάζεται το φως για να διανύσει την απόσταση, να πάει και να έρθει, μεταξύ μιας φωτεινής πηγής και ενός κατόπτρου που βρισκόταν σε μεγάλη απόσταση από την πηγή. Μεταξύ του κατόπτρου και του παρατηρητή παρεμβάλλεται οδοντωτός τροχός, ο οποίος περιστρέφεται με τέτοιο τρόπο, ώστε άλλοτε η ακτίνα φωτός να διακόπτεται και άλλοτε όχι. Όταν είναι γνωστή η απόσταση μεταξύ παρατηρητή και κατόπτρου, ο αριθμός των δοντιών του τροχού, η συχνότητα περιστροφής του τροχού, είναι δυνατό, με τους κατάλληλους τύπους, να μετρηθεί το μέτρο της ταχύτητας του φωτός. Η τιμή της ταχύτητας που εξήχθη από το πείραμα του Fizeau ήταν  $3,1 \times 10^8$  m/sec, η οποία βρίσκεται αρκετά κοντά στην πραγματική τιμή. Περισσότερο βελτιωμένες εκδόσεις του πειράματος αυτού πραγματοποιήθηκαν από τον Jean Bernard Foucault (1819-1868) και από τον Αμερικάνο φυσικό Albert Abraham Michelson (1852-1931). Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων όλων των μετρήσεων ως το 1983, η πλέον πιθανή τιμή της ταχύτητας του φωτός στο κενό ήταν  $c = 2,99792458 \times 10^8$  m/s

Οι πρωταρχικές πηγές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κάθε είδους είναι ηλεκτρικά φορτία, που εκτελούν επιταχυνόμενη κίνηση. Όλα τα σώματα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία λόγω της θερμικής κίνησης των μορίων τους. Η ακτινοβολία αυτή, που ονομάζεται θερμική ακτινοβολία, είναι ένα δείγμα διαφόρων μηκών κύματος. Η ύλη κάθε μορφής εκπέμπει αρκετό φως, καθιστάμενη αφεαυτής αυτοβόλος, αν η θερμοκρασία της είναι επαρκώς υψηλή (ένα πολύ θερμό σώμα φαίνεται «ερυθροπυρωμένο» ή ακόμα και «λευκοπυρωμένο»). Έτσι η θερμή ύλη οποιασδήποτε μορφής είναι μια πηγή φωτός. Γνώριμα παραδείγματα είναι η φλόγα ενός κεριού, τα πυρωμένα ξυλοκάρβουνα, οι πυρακτωμένες σπείρες της αντίστασης μιας ηλεκτρικής θερμάστρας και το λευκοπυρωμένο νήμα ενός λαμπτήρα. Φως παράγεται επίσης κατά την διάρκεια ηλεκτρικών εκκενώσεων διαμέσου ιονισμένων αερίων. Το υποκύανο φως των λυχνιών τόξου υδραργύρου, το πορτοκαλοκίτρινο χρώμα των λυχνιών ατμών νατρίου και τα ποικίλα χρώματα των επιγραφών «νέον» μας είναι γνώριμα. Το 1960 κατασκευάστηκε εργαστηριακά μια νέα πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η οποία λειτουργούσε και ως ενισχυτής φωτός, τα ευρέως διαδεδομένα στην εποχή μας laser.



**ΣΧΗΜΑ 1.17:** Δομή σύγχρονου laser.

Το laser είναι μια πηγή φωτός, διάταξη παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, της οπτικής περιοχής συχνοτήτων (ορατό, υπέρυθρο, υπεριώδες). Το L.A.S.E.R είναι ακρωνύμια από τα αρχικά γράμματα των λέξεων «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», δηλαδή, «Ενίσχυση Φωτός με Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας» (ΕΦΕΕΑ), το οποίο προέρχεται από το M.A.S.E.R., δηλαδή, «Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation», από το οποίο διατηρεί τη φυσική αρχή λειτουργίας. Στην πραγματικότητα το laser είναι ένας ενισχυτής φωτός που μετατρέπεται σε πηγή όταν μέρος της ισχύος εξόδου επαναφέρεται με κατάλληλη φάση στη είσοδο.



**ΣΧΗΜΑ 1.18:** Διαδικασία δημιουργίας δέσμης ακτίνων laser. (a) Ένα φωτόνιο χτυπάει ένα διεγερμένο άτομο (αριστερά) και το άτομο εκπέμπει ένα ακριβώς όμοιο φωτόνιο (δεξιά). (b) Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε διεγερμένο άτομο (εξαναγκασμένη αποδιέγερση), οπότε τα συμφασικά φωτόνια πολλαπλασιάζονται ραγδαία. (c) Το φως που εκπέμπεται όταν ηλεκτρόνια επιστρέφουν στις καταστάσεις χαμηλής ενέργειας, ανακλάται ανάμεσα σε δύο κάτοπτρα (A και B), έτσι ώστε να συνεχίσει να προκαλεί την εξαναγκασμένη εκπομπή περισσότερου σύμφωνου φωτός. Ένα από τα κάτοπτρα είναι διαπερατό σε κάποιο μικρό βαθμό, επιτρέποντας την έξοδο της έντονης δέσμης φωτός από την κοιλότητα του laser.

Το laser επινοήθηκε το 1958 από τους Αμερικανούς φυσικούς Arthur L. Schawlow και Charles H. Townes Είναι πολύ παράδοξο το γεγονός ότι τα laser δεν ανακαλύφθηκαν πολύ πριν το 1960. Τη χρονιά αυτή είχαν περάσει ήδη 43 χρόνια από τότε που είχαν τεθεί τα θεωρητικά θεμέλια της κατασκευής ενός ενισχυτή φωτός, δηλαδή ενός laser. Ο Einstein το 1917 έδωσε την έννοια της εξαναγκασμένης εκπομπής, ότι δηλαδή μια δέσμη από φως μπορεί να εξαναγκάσει άτομα να δώσουν εκπομπή φωτός με χαρακτηριστικά όμοια με το αρχικό φως. Κανείς όμως δεν συνειδητοποίησε τότε ότι η έννοια αυτή θα οδηγούσε στην πραγματοποίηση μιας συσκευής ενίσχυσης του φωτός. Από το 1920 μέχρι το 1950 οι επιστήμονες ήταν απασχολημένοι με τις νέες ανακαλύψεις της κβαντομηχανικής, της φυσικής των σωματιδίων και της πυρηνικής φυσικής και η ιδέα της κατασκευής ενός laser έμενε παραμελημένη παρόλο που όχι μόνο η αρχή λειτουργίας των laser ήταν γνωστή αλλά και η τεχνολογία της κατασκευής τους ήταν απλούστατη. Είναι πολύ πιθανό κάποιος που έκανε πειράματα με σωλήνες αίγλης παλαιότερα, να δημιούργησε συνθήκες ενίσχυσης φωτός. Δεν παρατήρησε όμως ακτινοβολία laser είτε από έλλειψη οπτικού αντηχείου, που θα μετέτρεπε τον ενισχυτή φωτός σε ταλαντωτή-πηγή φωτός, είτε γιατί τα πειράματα αυτά

έγιναν σε γυάλινους σωλήνες που είναι σκοτεινοί στο υπέρυθρο, περιοχή όπου συναντάμε τα πιο ισχυρά laser αερίων.

Το 1960 τελικά, έγινε ένα πολύ σημαντικό πείραμα στα εργαστήρια Hughes Aircraft Corporation στην Καλιφόρνια, που κατέληξε στην κατασκευή του πρώτου laser. Ο αμερικανός φυσικός Theodore Harold Maiman ασχολήθηκε αρχικά με τα maser τα οποία είναι ενισχυτικές διατάξεις μικροκυμάτων, με μήκη κύματος μεγαλύτερα από αυτά που αντιστοιχούν στην ορατή περιοχή. Ορμώμενος από τη σκέψη ότι οι αρχές με τις οποίες τα maser παράγουν μικροκύματα καθορισμένου μήκους κύματος, ο Maiman κατασκεύασε το πρώτο «οπτικό maser» ή «laser» που παρήγαγε μονοχρωματικό φως με δέσμη πολύ λεπτή, αυστηρά παράλληλη και μεγάλης ισχύος. Το πείραμα αυτό ήταν πάρα πολύ απλό. Ένας συνθετικός κρύσταλλος Ruby (ρουβινίου), μήκους 2cm και διαμέτρου 9mm, με γυαλισμένες οπτικά τις δύο έδρες του και επιστρωμένες με άργυρο, τοποθετήθηκε μέσα σε ένα ελικοειδή σωλήνα φλας. Όταν το φλας τέθηκε σε λειτουργία, λούζοντας τον κρύσταλλο με πολυχρωματικό φως, μία πολύ λεπτή ακτίνα από κόκκινο μονοχρωματικό φως, βγήκε από το ένα άκρο του κρυστάλλου. Αυτή ήταν η πρώτη επιτυχής λειτουργία ενός laser, του πρώτου από μία σειρά εντυπωσιακών συσκευών, με μοναδικές ιδιότητες, που μεταμόρφωσαν ή δημιούργησαν ολόκληρες περιοχές έρευνας και τεχνολογίας. Το πρώτο laser λειτουργούσε ασυνεχώς (laser παλμών) αλλά το 1961 κατασκεύασε το πρώτο laser συνεχούς λειτουργίας. Με τη χρήση των laser έγινε δυνατή η ραγδαία ανάπτυξη της οπτικής των φωτεινών πηγών που προκάλεσε κυριολεκτικά επανάσταση στις τηλεπικοινωνίες.

Το πόσο σημαντική ήταν η ανακάλυψη αυτή του Ruby Laser από τον Theodore H. Maiman, φαίνεται και από το γεγονός ότι μέσα στα επόμενα 10 χρόνια εμφανίστηκαν 5000 δημοσιεύσεις πάνω σε θέματα ανάπτυξης συστημάτων laser στον διεθνή επιστημονικό τύπο. Τα έξοδα για έρευνα στον ίδιο τομέα, στην ίδια χρονική περίοδο, ξεπέρασαν τα 500 εκατομμύρια λίρες Αγγλίας. Το 1961 ένα laser αερίου ηλίου-νέου (He-Ne) φτιάχτηκε από τον γεννημένο στο Ιράν αμερικανό φυσικό Ali Javan. Κατόπιν το 1966 ένα υγρό laser κατασκευάστηκε από τον επίσης αμερικανό φυσικό Peter Sorokin. Το πρώτο παλμικό laser ημιαγωγών, που ολοκληρώθηκε το 1962, πραγματοποιήθηκε από τις αμερικανικές εταιρίες «General Electric», «International Business Machine (IBM)» και από το εργοστάσιο «Lincoln». Μια σημαντική ανακάλυψη εμφανίστηκε το 1970, όταν πέτυχαν ταυτόχρονα ο Dr. Alferon στη Ρωσία (στο παρελθόν η Σοβιετική Ένωση), και οι Dr. Hayashi και Dr. Panish στις Ηνωμένες Πολιτείες, στην επίτευξη συνεχούς λειτουργίας των laser ημιαγωγών.

Η επιβράβευση όλων αυτών που ασχολήθηκαν με την κατασκευή, εξέλιξη και εφαρμογή των laser ήρθε με τον θεσμό των Βραβείων Nobel Φυσικής. Το 1964 οι τρεις πρωτοπόροι ερευνητές, ο αμερικανός φυσικός Charles Hard Townes, ο σοβιετικός φυσικός Nikolai Gennadiievich Basov και ο επίσης σοβιετικός φυσικός Alexander Mikhailovich Prokhorov, μοιράστηκαν το βραβείο Nobel φυσικής. Ο Townes τιμήθηκε με Nobel για το θεμελιακό έργο του στο πεδίο της κβαντικής ηλεκτρονικής, που οδήγησε στην κατασκευή ταλαντωτών και ενισχυτών βασιζόμενων στην αρχή του maser-laser, ο Basov τιμήθηκε με Nobel για το έργο του στους ταλαντωτές και ενισχυτές που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ακτίνων laser, ενώ ο Prokhorov τιμήθηκε με Nobel για το έργο του στην κβαντική ηλεκτρονική, που οδήγησε στην κατασκευή των maser και laser. Το 1981, αμερικανός φυσικός Arthur Leonard Schawlow και ο ολλανδικής καταγωγής αμερικανός φυσικός Nicolas Bloembergen, μοιράστηκαν το βραβείο Nobel φυσικής για τη συμβολή τους στην ανάπτυξη της φασματοσκοπίας laser.



**ΣΧΗΜΑ 1.19:** Οι πρωτοπόροι των laser, Townes, Basov, Prokhorov, Bloembergen και Schawlow

### 1.3.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ L.A.S.E.R.

Εκείνο που έκανε τα laser μια από τις πιο σημαντικές ανακαλύψεις της επιστήμης είναι οι μοναδικές ιδιότητες της ακτινοβολίας τους, οι οποίες είναι οι εξής:

**Κατευθυντικότητα:** Η δέσμη φωτός είναι πολύ λεπτή και μένει σχεδόν παράλληλη, ακόμα και αν ταξιδέψει μεγάλες αποστάσεις, όπως από τη γη στη σελήνη (δηλαδή η διάμετρος της δέσμης ελάχιστα διευρύνεται με την αύξηση των αποστάσεων). Η ιδιότητα αυτή παρέχεται από τη γεωμετρική κατασκευή της διάταξης. Πράγματι, τα εκπεμπόμενα φωτόνια με κάθετη διεύθυνση προς τον άξονα του σωλήνα λείζερ εγκαταλείπουν το σύστημα και διασκορπίζονται,



ενώ εκείνα που εκπέμπονται παράλληλα προς τον άξονα διαδίδονται ώσπου να φτάσουν στα κάτοπτρα που είναι τοποθετημένα στα άκρα του σωλήνα. Εδώ αυτά διατρέχουν επανειλημμένα ολόκληρο το μήκος του σωλήνα πριν εξέλθουν τελικά μέσα από το ημιδιαφανές κάτοπτρο. Κριτήριο για την Κατευθυντικότητα της δέσμης είναι το λεγόμενο "άνοιγμα" της, που στην πράξη είναι το διπλάσιο της γωνίας που σχηματίζει η εξωτερική ακτίνα της δέσμης με την κεντρική ακτίνα. Συνήθίζεται να εκφράζεται σε mrad. Για ένα κλασσικό μικρό laser το άνοιγμα της δέσμης του είναι περίπου 1mrad, πράγμα που αντιστοιχεί σε αύξηση της διαμέτρου της δέσμης του laser κατά 1mm ανά μέτρο διαδρομής.

**Μονοχρωματικότητα:** Το φως που εκπέμπεται από μια πηγή laser έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα (χρώμα). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι είναι πολύ συγκεκριμένες οι ενεργειακές στάθμες από τις οποίες διεγείρονται ή αποδιεγείρονται τα ηλεκτρόνια του ενεργού υλικού του laser. Το εύρος της φασματικής γραμμής εκπομπής είναι πρακτικά μηδέν (κάτω του  $10^{-9}$  Å). Αν και μια πηγή φωτός δεν μπορεί να δώσει απόλυτα μονοχρωματικό φως, τα laser δίνουν την καλύτερη υπαρκτή προσέγγιση προς το ιδανικό μονοχρωματικό φως.

**Λαμπρότητα:** Η συγκέντρωση μεγάλης οπτικής ισχύος σε μια πολύ λεπτή δέσμη προσδίδει στην ακτίνα laser λαμπρότητα χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από εκείνη του ηλιακού φωτός. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η λαμπρότητα της δέσμης ενός laser He-Ne που έχει ισχύ 1mWatt είναι τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερη από τη λαμπρότητα του ήλιου. Γι' αυτό το λόγο δεν πρέπει να κατευθύνεται η δέσμη στα μάτια.

**Συμφωνία φάσης (ή συνεκτικότητα φάσης):** Στα laser βρίσκουμε τον υψηλότερο δυνατό βαθμό συμφωνίας από οποιαδήποτε άλλη φωτεινή πηγή. Το φωτόνιο που προκαλεί την αποδιέγερση αναδύεται μαζί με το φωτόνιο που εκπέμπεται. Αυτό συμβαίνει σε όλες τις διαδοχικές αποδιεγέρσεις, το οποίο συνεπάγεται ότι όλα τα φωτόνια της δέσμης έχουν την ίδια φάση με το αρχικό φωτόνιο. Η συμφωνία φάσης χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, τη χωρική και τη χρονική. Αν μια πηγή φωτός είναι τελείως σύμφωνη και στο χώρο και στον χρόνο, υπάρχει απόλυτη και σταθερή συσχέτιση μεταξύ των μεταβολών του ηλεκτρικού πεδίου της φωτεινής ακτινοβολίας σ' ένα σημείο του χώρου μ' αυτές σε κάθε άλλο σημείο του. Αν η μεταβολή αυτή του ηλεκτρικού πεδίου μετρηθεί και στα δύο σημεία αυτά, μπορεί να πει κανείς με μεγάλη βεβαιότητα σε κάθε επόμενη χρονική στιγμή τι κάνει το ηλεκτρικό πεδίο σ' ένα δεύτερο σημείο, απλώς και μόνο μετρώντας το πεδίο στο πρώτο σημείο. Η συνεκτικότητα φάσης των laser οδηγεί σε ένα πλήθος εφαρμογών όπως η συμβολομετρική μέτρηση αποστάσεων και η ολογραφία. Μεγαλύτερη συνεκτικότητα φάσης εμφανίζουν τα laser αερίου.

**Εστίαση:** Επειδή η ακτίνα laser έχει μεγάλη κατευθυντικότητα και είναι μονοχρωματική, μπορεί να εστιαστεί με κατάλληλους φακούς χωρίς απώλειες ισχύος και να δώσει, στην εστία, τιμές πυκνότητας ισχύος πάνω από 100KW/m<sup>2</sup>.

**Πόλωση:** Το φως των ηλεκτρικών λαμπτήρων, των λαμπτήρων φθορισμού, του ήλιου και των πολλών άλλων φωτεινών πηγών συμπεριφέρεται γενικά σαν "μη πολωμένο" ή "τυχαία πολωμένο". Αντίθετα, πολλά laser παράγουν πολωμένο φως. Θα μπορούσαμε λοιπόν να πούμε, ότι η ακτινοβολία τους έχει και αυτή την ιδιότητα σαν χαρακτηριστικό της. Στην πράξη η πόλωση της δέσμης του laser επιτυγχάνεται με την χρήση ενός οπτικού πολωτικού στοιχείου που τοποθετείται μέσα στο οπτικό αντηχείο. Τα πιο συνηθισμένα από αυτά στοιχεία είναι οπτικές επιφάνειες σε γωνίες Brewster, (που συνήθως ονομάζονται "παράθυρα Brewster"), πρίσματα, φράγματα ανάκλασης, οπτικοί πολωτές κλπ.

**Κοκκίδωση:** Η κοκκίδωση laser είναι φανερή όταν παρατηρούμε φως laser που σκεδάζεται από ένα τοίχο ή διαφανή διαχύτη. Το σκεδασμένο φως φαίνεται να αποτελείται από μια τυχαία συλλογή σκοτεινών και φωτεινών κηλίδων (κοκκίδων). Παρά την τυχαιότητα, μπορούμε να διακρίνουμε ένα μέσο μέγεθος κοκκίδων. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ενισχυτική και αποσβεστική συμβολή της ακτινοβολίας που προέρχεται από μικρά κέντρα σκέδασης στην επιφάνεια του τοίχου ή του διαφανούς διαχύτη. Επειδή το φαινόμενο εξαρτάται από την ύπαρξη υψηλού βαθμού συμφωνίας φάσης, είναι ένα ενδογενές χαρακτηριστικό του φωτός laser.

### 1.3.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ L.A.S.E.R.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν τα laser, οι οποίοι σχετίζονται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά (το είδος του ενεργού μέσου που χρησιμοποιείται για την άντληση), τον τρόπο διάδοσης της δέσμης laser (παλμικά ή συνεχούς ακτινοβολίας), ή ακόμα και τις βιολογικές βλάβες που μπορούν να προκαλέσουν (οφθαλμολογικούς ή δερματικούς τραυματισμούς). Σ' αυτή την ενότητα περιγράφονται οι πιο αντιπροσωπευτικές κατηγορίες των laser καθώς η τεχνολογία τους εξελίσσεται ραγδαία και αυξάνονται οι τρόποι κατηγοριοποίησης με ανεξέλεγκτο ρυθμό.

Ο πρώτος τρόπος κατηγοριοποίησης θα γίνει σύμφωνα με το ενεργό μέσο και τις μεθόδους άντλησης που χρησιμοποιούνται στην εποχή μας για την δημιουργία της δέσμης laser. Ο κάθε τρόπος έχει αναπτυχθεί έτσι ώστε τα τεχνικά χαρακτηριστικά των laser να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις της τεχνολογίας και κατά συνέπεια της κοινωνίας. Πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχουν πολύ περισσότερα lasers από αυτά που περιγράφονται εδώ. Σ' αυτή την

ενότητα όμως, ασχολούμαστε με εκείνους τους τύπους lasers που περισσότερο χρησιμοποιούνται και τα χαρακτηριστικά τους είναι αντιπροσωπευτικά μιας ολόκληρης κατηγορίας lasers.

<p><b>1. L.A.S.E.R. ΣΤΕΡΕΩΝ</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Laser Ρουβινίου</li><li>➤ Laser Νεοδυμίου (laser σπανίων γαιών)</li><li>➤ Laser Δυσπρόσιου (laser σπανίων γαιών)</li></ul> <p><b>2. L.A.S.E.R. ΑΕΡΙΩΝ</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Laser ουδετέρων ατόμων</li><li>➤ Laser ιόντων<ul style="list-style-type: none"><li>○ Laser αερίων ιόντων</li><li>○ Laser μεταλλικών ατμών</li></ul></li><li>➤ Laser μοριακών αερίων<ul style="list-style-type: none"><li>○ Δονητικά-περιστροφικά laser</li><li>○ Δονητρονικά laser</li><li>○ Laser διεγερμένων διμερών</li></ul></li></ul> <p><b>3. L.A.S.E.R. ΥΓΡΩΝ</b></p> <p><b>4. L.A.S.E.R. ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Laser ημιαγωγών ομοιογενούς δομής</li><li>➤ Laser ημιαγωγικών ετεροδομών</li></ul> <p><b>5. L.A.S.E.R. ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ</b></p>
--

**ΣΧΗΜΑ 1.20:** Είδη laser.

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι laser. Παρακάτω παρουσιάζονται λεπτομέρειες όσον αφορά τα τεχνικά ή μη χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας και υποκατηγορίας laser.

**Lasers στερεάς κατάστασης** (ή laser στερεού μονωτή με προσμίξεις): Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για εκείνα τα lasers που έχουν σαν ενεργό μέσο είτε ένα μονωτικό κρύσταλλο ή γυαλί. Τα laser στερεάς κατάστασης συχνά χρησιμοποιούν σαν ενεργά συστατικά ιόντα πρόσμιξης που εισάγονται σε ένα ιοντικό κρύσταλλο. Συνήθως το ιόν ανήκει σε μια από τις σειρές των μεταπτωσηκών στοιχείων του περιοδικού πίνακα ( $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$  κτλ). Η άντληση επιτυγχάνεται με λευκό φως από σωλήνες λάμπης ξένου, λαμπτήρες τόξων, ή λαμπτήρες μετάλλου-ατμού. Το φάσμα συχνότητας έχει επεκταθεί από την υπέρυθρη (IR) ως την υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Τα laser αυτά χαρακτηρίζονται από αντοχή, ευκολία στη συντήρηση και σχετικά μεγάλη ισχύ εξόδου.

**Laser ρουβινίου:** Ενεργό υλικό είναι το ρουβίνιο (ruby), δηλαδή το τριοξειδίο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) με περίπου 0,05% κατά βάρος προσμίξεις χρωμίου (Cr). Το κρυσταλλικό πεδίο αίρει τον εκφυλισμό των μεμονωμένων ατόμων χρωμίου προσφέροντας τρεις κατάλληλες στάθμες για άντληση και δράση laser. Η άντληση είναι οπτική και γίνεται με απορρόφηση του πράσινου και κυανού τμήματος του φάσματος μιας λυχνίας ξένου που φωτίζει το ρουβίνιο με λευκό φως. Το οπτικό αντηχείο σχηματίζεται με κατάλληλη μετατροπή δύο αντικειμένων εδρών της ράβδου ρουβινίου σε διηλεκτρικά κάτοπτρα. Το εκπεμπόμενο φως laser είναι βαθύ κόκκινο (μήκος κύματος 0,6943μm) με ισχύ που, κατά παλμούς, μπορεί να ξεπεράσει τα 10 KW.

**Laser νεοδύμιου:** Το ενεργό υλικό είναι η σπάνια γαία νεοδύμιο, σαν αραιή πρόσμιξη στον κρύσταλλο YAG (Yttrium Aluminium Garnet, με χημικό τύπο  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ). Μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα, το νεοδύμιο προσφέρει τέσσερις ενεργειακές στάθμες κατάλληλες για δράση laser. Η οπτική άντληση γίνεται πάλι με μια λυχνία ξένου, ενώ το εκπεμπόμενο φως laser έχει μήκος κύματος 1,06μm (εγγύς υπέρυθρο) και ισχύ της τάξης των 10KW σε συνεχή λειτουργία.

**Lasers αερίων:** Το ενεργό υλικό ενός laser αερίου μπορεί να είναι ένα καθαρό αέριο, ένα μίγμα αερίων ή ακόμα και ατμός μετάλλων και περιορίζεται συνήθως σε έναν κυλινδρικό σωλήνα γυαλιού ή χαλαζία. Δύο καθρέφτες βρίσκονται έξω από τις άκρες του σωλήνα για να διαμορφώσουν την κοιλότητα laser. Γενικά για τα αέρια η διεύρυνση των ενεργειακών επιπέδων είναι μάλλον μικρή (της τάξης των λίγων GHz ή λιγότερο) επειδή οι μηχανισμοί διεύρυνσης της γραμμής είναι ασθενέστεροι από ότι στα στερεά. Τα laser αερίων διεγείρονται όχι οπτικά, αλλά συνήθως με ηλεκτρικά μέσα, δηλαδή η άντληση επιτυγχάνεται περνώντας ένα αρκετά μεγάλο ρεύμα (dc ή παλμικό) δια μέσου του αερίου (κρούσεις ηλεκτρονίων σε ένα χώρο ηλεκτρικής εκκένωσης). Η άντληση μπορεί να επιτευχθεί, επίσης, με υπεριώδες φως ή χημικές αντιδράσεις. Τα laser αερίου μπορούν να παράγουν μια σειρά γαλαζοπράσινων μηκών κύματος φωτός. Είναι ο πλέον κοινός τύπος laser, με ευρύτετη χρήση τόσο για διδακτικούς όσο και για ερευνητικούς και βιομηχανικούς σκοπούς. Έχουν, επίσης, πολλές ιατρικές χρήσεις, όπως στη χειρουργική επέμβαση ματιών και τη σκλήρυνση-πήξη των σφραγισμάτων των δοντιών, αλλά χρησιμοποιούνται και στην παραγωγή ολογραφικών εικόνων.

**Ατομικά laser – το laser He-Ne:** Ενεργό υλικό είναι το αέριο νέο (Ne) σε μίγμα με αέριο ήλιο (He), με αναλογία ένα μέρος νέου σε δέκα μέρη ηλίου. Η άντληση γίνεται με ηλεκτρική εκκένωση μέσα στο αέριο μίγμα, που προκαλείται με την εφαρμογή υψηλής τάσης. Με την εκκίνηση της ηλεκτρικής εκκένωσης, διεγείρονται αρχικά τα άτομα του ηλίου, τα οποία στη συνέχεια, διεγείρουν με κρούση τα άτομα του νέου. Η εκπομπή γίνεται, τυπικά, σε μήκος κύματος 0,633μm, ενώ σύγχρονα laser He-Ne εκπέμπουν και άλλες φασματικές γραμμές όπως π.χ. 1,03μm και 1,55μm (υπέρυθρο). Η ισχύς της δέσμης laser είναι μικρή, της τάξης των, λίγων μόνο, mW σε συνεχή λειτουργία, με το πλεονέκτημα όμως της μεγάλης συγκεντρωτικότητας, την υψηλή σταθερότητα συχνότητας (μεγάλη συνεκτικότητα) και την αγνότητα χρώματος (υψηλή μονοχρωματικότητα).

**Ιοντικά laser – το laser αργού:** Στην περιοχή του ορατού φωτός τα πλέον ισχυρά laser είναι αυτά που χρησιμοποιούν αδρανή αέρια, όπως το αργό ή το κρυπτό, σε κατάσταση ιονισμού, που προκαλείται από κρούσεις ηλεκτρονίων σε χώρο ισχυρών ηλεκτρικών εκκενώσεων. Η ισχύς εξόδου αυτών των laser φτάνει κατά παλμούς μέχρι το 1KW και σε συνεχή λειτουργία μέχρι αρκετά Watts. Επειδή η άντληση γίνεται προς τις ιοντικές στάθμες υψηλής ενέργειας, απαιτούνται ρεύματα μεγάλης πυκνότητας, που επιτυγχάνονται με τη χρήση μαγνητικού πεδίου σωληνοειδούς που περιβάλλει το σωλήνα του αερίου και συγκεντρώνει την εκκένωση κατά τον άξονα του. Οι μεγάλες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται απαιτούν ψύξη του όλου συστήματος. Προκειμένου για laser αργού, το εκπεμπόμενο φως καλύπτει μια σειρά φασματικών γραμμών από 351 έως 520nm, με εντονότερες τις γραμμές των 488 και 514,5nm.

**Μοριακά laser – το laser CO<sub>2</sub>:** Στα laser αυτά οι ενεργειακές στάθμες για δράση laser προκύπτουν από την κβάντωση της ενέργειας ταλάντωσης και στροφής των μορίων του αερίου. Οι στάθμες αυτές χωρίζονται από μικρά ενεργειακά χάσματα γι' αυτό και η ακτινοβολία laser που εκπέμπουν τα μοριακά laser είναι στη φασματική περιοχή του υπέρυθρου. Το αντιπροσωπευτικότερο από τα μοριακά laser είναι το laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), που είναι και το σπουδαιότερο γενικά laser, από την άποψη των τεχνολογικών εφαρμογών. Η άντληση γίνεται με ηλεκτρική εκκένωση μέσα σε σωλήνα που περιέχει μίγμα διοξειδίου του άνθρακα, αζώτου και ηλίου, σε αναλογία 1:4:5. Από την εκκένωση διεγείρονται αρχικά τα μόρια του αζώτου, τα οποία στη συνέχεια μεταφέρουν, με κρούσεις, ενέργεια στα μόρια του CO<sub>2</sub>. Η ακτινοβολία laser που εκπέμπεται έχει μήκος κύματος 10,6μm, ενώ η ισχύς, για μήκος σωλήνα 1m και σε συνεχή λειτουργία, φτάνει τα 100W. Έχουν ωστόσο κατασκευαστεί και laser CO<sub>2</sub> με μήκος πολλών δεκάδων μέτρων και ισχύ, σε συνεχή πάλι λειτουργία, της τάξης των δεκάδων KW. Σε μια παραλλαγή laser διοξειδίου του άνθρακα, το ατμοσφαιρικό laser εγκάρσιας διέγερσης (laser TEA), η ισχύς φτάνει, κατά παλμούς, στην περιοχή των GW με περίπου 20 παλμούς/sec, ενώ σε μια άλλη παραλλαγή, το laser αέριας δυναμικής (gas dynamic laser), η ισχύς, σε συνεχή λειτουργία, υπερβαίνει τα 100KW. Τα laser διοξειδίου του άνθρακα είναι πολύ αποδοτικά και συνεπώς είναι τα ισχυρότερα laser συνεχών κυμάτων (CW). Άλλα μοριακά laser είναι το laser αζώτου και τα laser διεγερμένων διμερών (excited dimer ή excimer), όπου τα ενεργά μόρια προκύπτουν από το συνδυασμό ενός διεγερμένου ατόμου και ενός ατόμου που είναι στη βασική (κατώτατη) στοιβάδα.

**Χημικά laser:** ορίζονται συνήθως σαν lasers στα οποία η αντιστροφή πληθυσμών παράγεται «άμεσα» μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Τα χημικά lasers συνήθως περικλείουν μια χημική αντίδραση μεταξύ αερίων στοιχείων. Σ' αυτή την περίπτωση ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας αντίδρασης παραμένει υπό τη μορφή δονητικής ενέργειας των μορίων.

**Lasers υγρών χρωστικών (dye laser):** Από τα υγρά που βρέθηκαν κατάλληλα για δράση laser, τα σπουδαιότερα είναι τα διαλύματα οργανικών χρωστικών (όπως αιθυλική αλκοόλη, μεθυλική αλκοόλη κ.α.), που παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας εκπομπής φωτός laser. Στα laser υγρών χρωστικών η άντληση είναι οπτική, στο διάλυμα προσπίπτει το φως ενός βοηθητικού laser (laser άντλησης) μικρού μήκους κύματος, οπότε το διάλυμα εκπέμπει δευτερογενή ακτινοβολία (φθορισμός) μεγαλύτερου μήκους κύματος. Η ρύθμιση της συχνότητας εξόδου γίνεται με της παρεμβολή πρίσματος ή φράγματος περίθλασης σε συνδυασμό με σειρά κατάλληλων χρωστικών. Έτσι καλύπτεται ολόκληρη η περιοχή του ορατού καθώς και τμήματα του υπέρυθρου και υπεριώδους φάσματος. Λόγω της επιλεκτικότητας του μήκους κύματος, της κάλυψης ευρείας φασματικής περιοχής και της απλότητας τους, τα lasers οργανικών χρωστικών παίζουν έναν αυξανόμενο σπουδαίο ρόλο σε διάφορα πεδία εφαρμογών (από τη φασματοσκοπία ως τη φωτοχημεία).

**Laser ημιαγωγών** (ή διοδικά laser): Έως τώρα έχουμε συζητήσει μόνο ατομικά και μοριακά συστήματα των οποίων τα ενεργειακά επίπεδα συνδέονται με εντοπισμένες κυματοσυναρτήσεις, δηλαδή ανήκουν σε ένα μόνο μόριο ή άτομο. Στα lasers ημιαγωγών δεν είναι δυνατόν να μιλάμε για κυματοσυναρτησης ενός επιμέρους ατόμου, αντίθετα είναι αναγκαίο να δουλεύουμε με μια κυματοσυναρτησης που σχετίζεται με τον κρύσταλλο στην ολότητα του. Στα laser αυτά, ως ενεργό υλικό χρησιμοποιείται η περιοχή απογύμνωσης της επαφής p-n μιας κρυσταλλοδιοδίου. Η ευρύτερα σήμερα χρησιμοποιούμενη κρυσταλλοδιοδος laser είναι η GaAs η οποία εκπέμπει στα 0,82μm και αποτελεί ιδανική οπτική πηγή για οπτικές επικοινωνίες. Όταν η διοδος είναι ορθά πολωμένη τότε εκπέμπει ακτινοβολία ενέργειας ίση με αυτή του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού και μήκος κύματος που συνήθως βρίσκεται στη περιοχή του ορατού ή του εγγύς υπέρυθρου. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας εξαναγκάζονται να

επανασυνδεθούν με θετικές οπές που ανήκουν στη ζώνη σθένους. Όταν συμβαίνει αυτό τα ηλεκτρόνια αποδίδουν υπό μορφή φωτονίων την ενέργεια που αντιστοιχεί στο ενεργειακό χάσμα μεταξύ των δύο ζωνών. Αν δημιουργηθεί τώρα μια αναστροφή πληθυσμών τότε η εκπομπή θα είναι εξαναγκασμένη και θα έχουμε εκπομπή laser. Αν η εκπομπή είναι αυθόρμητη τότε θα έχουμε εκπομπή LED και όχι laser. Το μήκος κύματος εκπομπής ορίζεται από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Η πιο συμπαγής ακτινοβολία laser είναι αυτή των laser ημιαγωγών. Οι περισσότεροι δίοδοι εκπέμπουν κόκκινο ή πορτοκαλί χρώμα. Η τεχνολογία laser ημιαγωγών ή διόδων στηρίζεται πρωτίστως στις ομάδες III και V του περιοδικού πίνακα στοιχείων. Το αρσενίδιο γαλλίου είναι ο πιο κοινός ημιαγωγός χρησιμοποιούμενος για αυτού του είδους τα laser. Το μέγεθος των laser ημιαγωγών μπορεί να είναι αρκετά μικρό, της τάξης του 1mm. Για παράδειγμα μερικά laser διόδων έχουν κατά προσέγγιση το μέγεθος ενός κόκκου του άλατος. Χρόνοι ζωής λειτουργίας που ξεπερνούν τις  $10^6$  h έχουν επιτευχθεί με laser GaAs διπλής ετεροεπαφής. Τα laser ημιαγωγών θεωρούνται ως η τελευταία κατηγορία των οπτικών ταλαντωτών και χρησιμοποιούνται σε ποικίλες στρατιωτικές, βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές εφαρμογές, εξαιτίας της ευκολίας τους στη χρήση, της αποδοτικότητά τους και της συμβατότητά τους με τη μοντέρνα ηλεκτρονική. Τα laser ημιαγωγών έχουν το ειδικό χαρακτηριστικό ότι μπορούν να κωδικοποιήσουν και να στείλουν πληροφορίες με τη μορφή φασματικά καθαρών οπτικών κυμάτων. Δύο από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των laser ημιαγωγών είναι η αναπαραγωγή CD, η οποία εφαρμόστηκε για πρώτη φορά πριν 20 χρόνια, καθώς και η χρήση τους σε εκτυπωτές laser. Τέλος αξ σημειωθεί ότι τα laser ημιαγωγών λειτουργούν και σε θερμοκρασίες εργαστηρίου, οπότε μπορούν να εκπέμπουν μέχρι και 10W παλμικά, με παλμούς διάρκειας 100nsec, αλλά και σε χαμηλές θερμοκρασίες, της τάξης των 77°K όπου η ισχύς μπορεί να φθάσει τα 400W, αλλά βέβαια δημιουργείται το πρόσθετο πρόβλημα των χαμηλών θερμοκρασιών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν laser συνεχών κυμάτων με καλύτερη από 50% αποδοτικότητα.

**Laser ελεύθερης ακτινοβολίας:** Τα laser που χρησιμοποιούν ηλεκτρόνια ασύνδετα στα άτομα, αντλούν την ικανότητα από μια σειρά μαγνητών, αναπτύχθηκαν αρχικά το 1977 και γίνονται τώρα σημαντικά ερευνητικά όργανα. Είναι παρόμοια με τα laser χρωστικών ουσιών και θεωρητικά, ένας μικρός αριθμός θα μπορούσε να καλύψει ολόκληρο το φάσμα από τις υπέρυθρες ακτίνες στις ακτίνες X. Τα laser ελεύθερων ηλεκτρονίων πρέπει επίσης να γίνουν ικανά να παράγουν πολύ υψηλής ισχύος ακτινοβολία που είναι αυτήν την περίοδο πάρα πολύ ακριβή για να παραχθεί.

Ο δεύτερος τρόπος κατηγοριοποίησης θα γίνει σύμφωνα με το μέγεθος επικινδυνότητας της ακτινοβολίας laser. Σε πειράματα που γίνονται με laser υπάρχει πάντα ο κίνδυνος να προκληθεί κάποια ζημιά κυρίως στα μάτια από την έκθεση στη δέσμη. Για το λόγο αυτό πρέπει πάντα να ακολουθούνται κάποιοι κανόνες ασφαλούς χρήσης. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούμε για να ταξινομήσουμε τα διάφορα laser είναι τα παρακάτω:

- Το μήκος κύματος. Αν το laser είναι σχεδιασμένο να εκπέμπει σε πολλά μήκη κύματος, η ταξινόμηση βασίζεται στο πιο επιβλαβές,
- Η μέση ισχύ εξόδου και ο χρόνος έκθεσης, τόσο για τα συνεχούς λειτουργίας (CW) όσο και για τα παλμικά laser.
- Για τα παλμικά laser, η συνολική ενέργεια ανά παλμό (Joule), η διάρκεια του παλμού, η συχνότητα επανάληψης των παλμών και η ένταση της δέσμης.

Τα laser είναι ταξινομημένα σε τέσσερις ευρείες περιοχές ανάλογα με τη δυνατότητα πρόκλησης βιολογικής ζημιάς. Οι κατηγορίες αυτές συνήθως δίνονται με ρωμαϊκούς αριθμούς από I μέχρι IV.

**Τάξη I:** Αυτά τα laser δεν μπορούν να εκπέμπουν την ακτινοβολία laser σε γνωστά επίπεδα κινδύνου, θεωρούνται ότι δεν μπορούν να προκαλέσουν βλάβη ακόμη κι αν προσπέσουν στο μάτι για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Δεν έχουν ειδική σήμανση όπως όλες οι υπόλοιπες κατηγορίες. Είναι συνήθως στο ορατό (He-Ne) με ισχύ μικρότερη από μερικά mW.

**Τάξη Ia:** Είναι τα laser που μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού όταν υπάρχει έκθεση για περισσότερα από 20min αλλά δεν έχουν αρκετή ισχύ για να προκαλέσουν τραυματισμό. Αυτή η τάξη είναι ένας ειδικός προσδιορισμός που ισχύει μόνο για τα laser που προορίζονται "μη για την όψη," όπως ένας σαρωτής laser υπεραγορών. Η ανώτερη ανοχή ισχύος της τάξης αυτής είναι περίπου 4,0mW.

**Τάξη II:** Είναι τα laser τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ζημιά αν υπάρχει άμεση έκθεση για περισσότερο από 0,25sec. Αυτά είναι χαμηλής ισχύος ορατά laser που εκπέμπουν επάνω από την τάξη I αλλά σε μια ακτινοβολία ισχύς όχι επάνω από 1mW. Η έννοια είναι ότι η ανθρώπινη αντίδραση αποστροφής στο φωτεινό φως θα προστατεύσει ένα πρόσωπο.

**Τάξη IIIa:** Αυτά είναι laser ενδιάμεσης ισχύος (1-5mW), τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στο μάτι, είτε με άμεση έκθεση της δέσμης είτε από ανάκλαση. Τυπικά laser Class IIIa είναι τα πιο πολλά εργαστηριακά He-Ne καθώς και τα περισσότερα pen-like laser pointers του εμπορίου.

**Τάξη IIIb:** Είναι laser μέτριας-ισχύος (με ισχύ 5-500mW). Τυπικά laser αυτής της κατηγορίας είναι τα laser Αργού που χρησιμοποιούνται στα show, τα διοδικά laser για οπτική οδήγηση και τα υψηλής ανάλυσης laser printers.

**Τάξη IV:** Αυτά είναι υψηλής ισχύος laser (πάνω από 500 mW), που είναι επικίνδυνα να εμφανίσουν τραυματισμό υπό οποιοδήποτε περίπτωση έκθεσης (άμεση έκθεση, ανάκλαση ή ακόμη και διάχυση της δέσμης), και είναι ένας πιθανός κίνδυνος πυρκαγιάς και δερματικών



εγκαυμάτων. Σημαντικοί έλεγχοι απαιτούνται για την Class IV στις εγκαταστάσεις laser. Τυπικά laser Class IV είναι τα laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και τα νεοδυμίου-γυαλιού (Nd:Glass).

#### 1.4. ΜΑΓΝΗΤΟΟΠΤΙΚΗ

Τα Μαγνητο-Οπτικά Φαινόμενα (Magneto-Optic effects) ανήκουν στον κλάδο της φυσικής που ονομάζεται Μαγνητο-οπτική ο οποίος μελετά την επίδραση του μαγνητικού πεδίου στις οπτικές ιδιότητες της ύλης. Υπάρχει αντίστοιχος κλάδος που μελετά την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου στις οπτικές ιδιότητες της ύλης και ονομάζεται Ηλεκτρο-οπτική. Τα Μαγνητο-Οπτικά Φαινόμενα χωρίζονται σε πέντε γενικές κατηγορίες που φέρουν τα ονόματα αυτών που τα ανακάλυψαν, δηλαδή, Φαινόμενο Zeeman του Ολλανδού φυσικού Pieter Zeeman (1865-1943), Φαινόμενο Faraday του Άγγλου φυσικού και χημικού Michael Faraday (1791-1867), Φαινόμενο Voigt, Φαινόμενο Cotton-Mouton και Φαινόμενο Kerr του Σκώτου φυσικού John Kerr (1824-1907).

**Φαινόμενο Zeeman:** Συνίσταται στον διαχωρισμό των φασματικών γραμμών εκπομπής ή απορρόφησης ενός υλικού όταν αυτό τοποθετηθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο οφείλεται στην αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου με τα τροχιακά ηλεκτρόνια. Αυτό οδηγεί στο διαχωρισμό της ενεργειακής στάθμης που καταλαμβάνει ένα ζεύγος ηλεκτρονίων, σε δύο στάθμες που αντιστοιχούν στις δύο δυνατές διευθύνσεις του spin, παρουσία μαγνητικού πεδίου. Το φαινόμενο Zeeman διακρίνεται σε ομαλό και ανώμαλο.

**Φαινόμενο Voigt:** Συνίσταται στη μετατροπή ενός ανισότροπου υλικού σε διπλοθλαστικό, για την ακτίνα του φωτός που διαδίδεται κάθετα στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Αυτό οφείλεται στη μεταβολή που επιφέρει το μαγνητικό πεδίο στο δείκτη διάθλασης του υλικού μόνο για την ακτίνα του πολωμένου φωτός, του οποίου το επίπεδο πόλωσης είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο.

**Φαινόμενο Cotton-Mouton:** Είναι η μετατροπή ενός υγρού δε διπλοθλαστικό, παρουσία εγκάρσιου μαγνητικού πεδίου. Είναι ανάλογο του ηλεκτροοπτικού φαινομένου Kerr. Παρατηρείται σε υγρά με σύνθετη μοριακή δομή, όπως το νιτροβενζόλιο και οι αρωματικές οργανικές ουσίες.

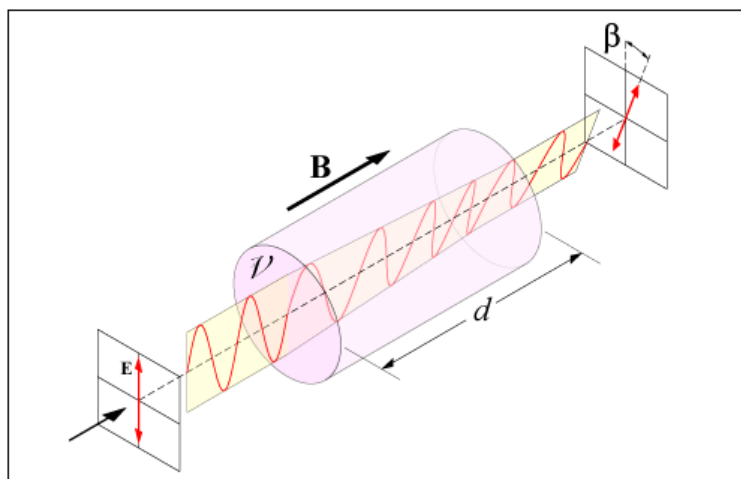
**Μαγνητοοπτικό φαινόμενο Kerr:** Είναι η μεταβολή της ανακλαστικότητας της επιφάνειας ενός σιδηρομαγνητικού υλικού όταν αυτό μαγνητιστεί. Το φαινόμενο αποδίδεται στο γεγονός ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της επιφάνειας του μετάλλου που εκτελούν εξαναγκασμένη ταλάντωση, λόγω του προσπίπτοντος φωτός, παρουσία μαγνητικού πεδίου, κινούνται σε καμπύλες τροχιές. Έτσι γραμμικά πολωμένο φως μετατρέπεται σε ελλειπτικά πολωμένο μετά την ανάκλαση.

**Φαινόμενο Faraday:** Είναι το φαινόμενο το οποίο πραγματεύεται η παρούσα πτυχιακή και θα αναλυθεί εκτενώς στα παρακάτω κεφάλαια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FARADAY

### 2.1. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FARADAY

Στη φυσική το **Φαινόμενο Faraday** (Faraday effect) ή **Περιστροφή Faraday** (Faraday rotation) συνίσταται στην περιστροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός όταν αυτό διέρχεται μέσα από ένα υλικό παράλληλα προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Είναι, δηλαδή, μια αλληλεπίδραση μεταξύ του φωτός και ενός μαγνητικού πεδίου, κατά την οποία το επίπεδο πόλωσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος περιστρέφεται υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου παράλληλου στην κατεύθυνση της διάδοσης. Το φαινόμενο Faraday οφείλεται στην **ανισοτροπία** που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο. Η περιστροφή του επιπέδου της **πόλωσης** είναι ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση της δέσμης φωτός.



ΣΧΗΜΑ 2.1: Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου Faraday.

Το φαινόμενο Faraday, επίσης γνωστό και ως **Μαγνητο-Οπτικό Φαινόμενο** (Magneto-Optic effect) που ανακαλύφθηκε από τον Michael Faraday πριν από περισσότερα από 150 χρόνια (στις 13 Σεπτεμβρίου του 1845), ήταν η πρώτη πειραματική απόδειξη ότι το φως και ο μαγνητισμός συσχετίζονται. Η θεωρητική βάση αυτής της σχέσης, που τώρα είναι γνωστή ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αναπτύχθηκε από τον James Clerk Maxwell στις δεκαετίες των 1860 και 1870. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διαμόρφωση ενός κύματος φωτός.

Το φαινόμενο Faraday μπορεί να παρατηρηθεί σε στερεά, υγρά ή αέρια αλλά εμφανίζεται συχνότερα στα αέρια. Γενικά, το φαινόμενο αυτό, συμβαίνει στα περισσότερα οπτικά διαφανή **διηλεκτρικά υλικά** όταν αυτά υποβάλλονται σε ισχυρά μαγνητικά πεδία.

Το φαινόμενο Faraday είναι αποτέλεσμα **σιδηρομαγνητικού συντονισμού** όταν η **μαγνητική διαπερατότητα** του υλικού αντιπροσωπεύεται από ένα τανυστή (tensor). Αυτός ο συντονισμός προκαλεί στα κύματα να αποσυντεθούν σε δύο **κυκλικά πολωμένες** δέσμες οι οποίες μεταδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες, μία έννοια γνωστή ως κυκλική ανάκλαση δέσμης σε δύο δέσμες (circular birefringence). Οι δέσμες μπορεί να θεωρηθεί ότι ενώνονται μετά την έξοδο από το μέσον, αλλά λόγω της διαφορετικής ταχύτητας μετάδοσης, ενώνονται με κάποια διαφορά φάσης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφή της γωνίας της **γραμμικής πόλωσης**.

Το μέγεθος περιστροφής εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος από το οποίο περνάει μέσα το φως, την ισχύς του μαγνητικού πεδίου και μια αναλογική σταθερά που λέγεται σταθερά Verdet (Verdet constant). Η σχέση μεταξύ της γωνίας περιστροφής της πόλωσης και του μαγνητικού πεδίου ενός **διαμαγνητικού** υλικού είναι:

$$\beta = V \cdot B \cdot d \quad (2.1)$$

όπου:  $\beta$  είναι η γωνία περιστροφής (σε rad)

$B$  είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής (σε Tesla)

$d$  το μήκος της διαδρομής (σε μέτρα) όπου το φως και το μαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρούν

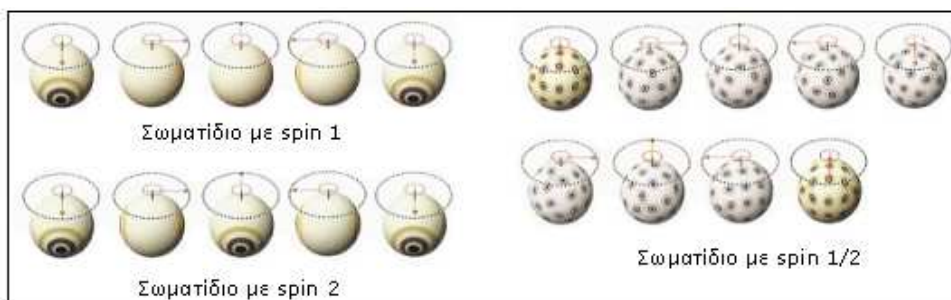
$V$  είναι η σταθερά Verdet

## 2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΝΝΟΙΩΝ

Πριν προχωρήσουμε στην περαιτέρω περιγραφή και ανάλυση του φαινομένου Faraday, είναι ορθότερο να ασχοληθούμε με τις πρωταρχικές έννοιες και φαινόμενα που σχετίζονται με το φαινόμενο μας. Θα ασχοληθούμε με τις μορφές και καταστάσεις της ύλης και πως αυτή αλληλεπιδρά με ένα εξωτερικό μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο (διηλεκτρικά υλικά, παραμαγνητικά, διαμαγνητικά, σιδηρομαγνητικά, αντισιδηρομαγνητικά υλικά, οπτικά ενεργά υλικά), αφού πρώτα περιγράψουμε τις έννοιες της ιδιοστροφορμής και τροχιακής στροφορμής και τι σχέση έχουν με την πόλωση της ύλης. Θα συνεχίσουμε με την περιγραφή εννοιών που αφορούν τα κύματα (πόλωση του φωτός, ταχύτητα φάσης), όπως επίσης και τα οπτικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του φαινομένου Faraday (διάθλαση, ανάκλαση, συμβολή). Τέλος, θα περιγράψουμε έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για το φαινόμενο Faraday, τη σταθερά Verdet.

### 2.2.1. ΤΟ SPIN ΚΑΙ Η ΠΟΛΩΣΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ

Το spin είναι το σημαντικότερο φυσικό χαρακτηριστικό των θεμελιωδών σωματιδίων της φύσεως, μετά τη μάζα τους. Όπως θα υπέθετε κανείς από την ονομασία του, το spin θα πρέπει να περιγράφει την ιδιότητα των σωματιδίων να περιστρέφονται γύρω από τον άξονα τους, δηλαδή θα μπορούσε να θεωρηθεί η στροφορμή ενός σωματιδίου που οφείλεται στην ιδιοπεριστροφή του, δηλαδή η **ιδιοστροφορμή** του. Εντούτοις η μεγάλη ιδιοτυπία του spin, ως φυσικής ιδιότητας, έγκειται ακριβώς στο γεγονός ότι δεν μπορεί να αποδοθεί κανενός είδους κλασσική περιστροφή του σωματιδίου περί το άξονα του. Παρά την ελκυστικότητα της, η κλασσική αυτή εικόνα είναι απόλυτα λαθεμένη. Το spin είναι μια καθαρά κβαντική ιδιότητα των σωματιδίων, χωρίς κανένα κλασσικό ανάλογο. Η ιδιοστροφορμή αφορά τον τρόπο με τον οποίο φαίνεται το σωματίδιο από διαφορετικές κατευθύνσεις. Όσο μεγαλύτερο είναι το spin, τόσο μικρότερο γίνεται το κλάσμα της πλήρους περιστροφής υπό την οποία το σωματίδιο θα φαίνεται το ίδιο. Ένα σωματίδιο που έχει **spin 0**, φαίνεται το ίδιο από όλες τις κατευθύνσεις. Τα σωματίδια που χρειάζονται μισό κύκλο ( $180^\circ$ ) για να φανούν το ίδιο, λέμε ότι έχουν **spin 2**, ενώ τα σωματίδια που χρειάζονται ένα πλήρη κύκλο ( $360^\circ$ ) για να φανούν το ίδιο, λέμε ότι έχουν **spin 1**. Το αξιοσημείωτο είναι ότι υπάρχουν σωματίδια που φαίνονται τα ίδια μόνο αν περιστραφούν κατά δύο ολόκληρους κύκλους ( $720^\circ$ ). Τα σωματίδια αυτά λέμε ότι έχουν **spin 1/2**.

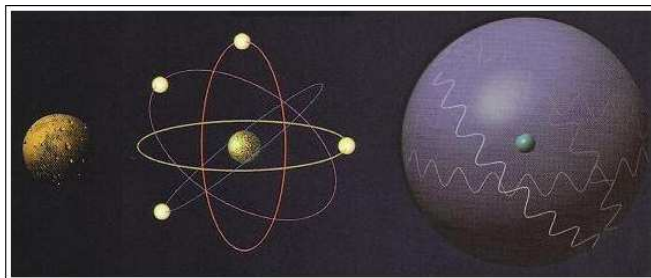


ΣΧΗΜΑ 2.2: Είδη spin των σωματιδίων.

Πέρα από τον καθαρά κβαντικό χαρακτήρα του, το spin είναι ταυτόχρονα και μια εγγενώς σχετικιστική ιδιότητα της ύλης. Μπορεί να εξηγηθεί πλήρως μόνο μέσα στο πλαίσιο της Σχετικιστικής Κβαντομηχανικής όπου συντίθενται οι θεμελιώδεις απαιτήσεις τόσο της Κβαντικής Μηχανικής όσο και της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας. Για spin  $s=1/2$  ειδικότερα, η πλήρης εξήγηση των ιδιοτήτων του, επιτυγχάνεται μέσα στο πλαίσιο της **εξίσωσης Dirac**, οποία αντικαθιστά την **εξίσωση Schrodinger** στην περίπτωση που οι ταχύτητες των σωματιδίων γίνονται αρκετά μεγάλες ώστε τα σχετικιστικά φαινόμενα να έχουν μετρήσιμες συνέπειες. Η Εξίσωση Schrodinger είναι η θεμελιώδης εξίσωση της Κβαντικής Μηχανικής η οποία περιγράφει την κυματική συμπεριφορά των μικροσκοπικών σωματιδίων. Η εξίσωση Dirac εξηγεί, μεταξύ άλλων, και την περίφημη **μαγνητική ανωμαλία του spin**. Για ίσες ποσότητες στροφορμής εκείνη που συνδέεται με το spin δημιουργεί διπλάσια μαγνητική ροπή. Το spin είναι κατά κάποιο τρόπο, δύο φορές «πιο μαγνητικό» από την τροχιακή στροφορμή. Στο πλαίσιο της εξίσωσης Dirac, όπου η εμφάνιση του spin είναι αναγκαστική, αυτή η ιδιότητα είναι επίσης αναγκαστική συνέπεια της θεωρίας.

Όλα τα γνωστά σωματίδια του σύμπαντος ανήκουν είτε στα φερμιόνια είτε στα μποζόνια. Τα **φερμιόνια** έχουν ημιακέραιο spin και συνθέτουν τη συνήθη ύλη. Οι ενέργειες της θεμελιώδους κατάστασης τους είναι αρνητικές. Τα **μποζόνια** είναι σωματίδια με ακέραιο spin και αποτελούν τους φορείς των δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των φερμιονίων, όπως η βαρυτική δύναμη και το φως. Οι ενέργειες της θεμελιώδους κατάστασης τους είναι θετικές. Η βαθύτερη φυσική εκδήλωση που σχετίζεται με το spin είναι η **απαγορευτική αρχή του Pauli**. Όπως διαπιστώνεται πειραματικά όλα τα σωματίδια με ακέραιο spin (όπως 0, 1, 2) μπορούν να ενοικίσουν απεριόριστα μια δεδομένη κβαντική κατάσταση, ενώ αντίθετα, εκείνα με ημιακέραιο spin (όπως 1/2) δεν έχουν καν τη δυνατότητα διπλής κατάληψης. Θα πρέπει να διαφέρουν τουλάχιστον ως προς έναν από τους κβαντικούς αριθμούς που περιγράφουν τις δυνατές καταστάσεις κίνησης σε ένα δεδομένο κβαντικό σύστημα (άτομο, μόριο, πυρήνας κτλ.). Η ύπαρξη αυτών των δύο κατηγοριών (μποζόνια, φερμιόνια)

σωματιδίων είναι θεμελιώδους σημασίας για τη δομή του κόσμου μας. Αν, παραδείγματος χάριν, τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονταν ως μποζόνια αντί ως φερμιόνια, τότε θα ήταν δυνατή η απεριόριστη συγκατοίκηση τους στη θεμελιώδη κατάσταση των ατόμων με προφανείς συνέπειες για τη δομή και τις ιδιότητες της ύλης. Μεταξύ άλλων δεν θα υπήρχε περιοδικό σύστημα, αρά δεν θα υπήρχε η χημική πολυπλοκότητα στην οποία οφείλεται η δομή του κόσμου μας.



**ΣΧΗΜΑ 2.3:** Η «εξέλιξη» του ατόμου. (1) το κοκκοειδές άτομο αντικείμενο του Δημόκριτου (2) το μοντέλο του Rutherford, όπου τα ηλεκτρόνια κινούνται σε τροχιές γύρω από τον πυρήνα (3) το κβαντομηχανικό μοντέλο του Schrodinger.

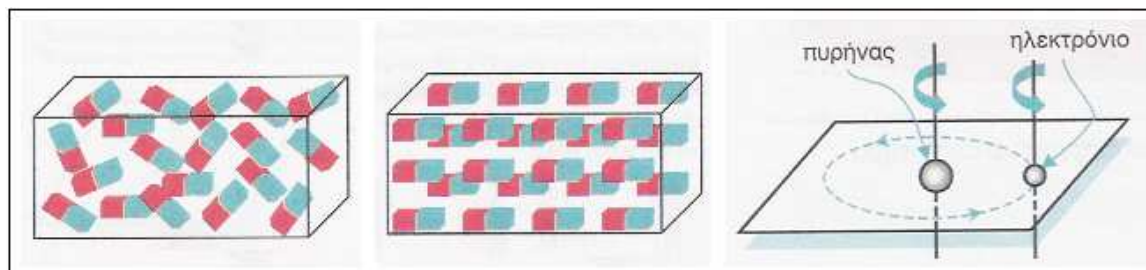
Σε ένα φορμαλιστικό επίπεδο, το spin έχει μαθηματικές ιδιότητες τελείως ανάλογες με εκείνες τις τροχιακής στροφορμής η οποία προέρχεται από την τροχιακή κίνηση του σωματιδίου γύρω από κάποιο σταθερό σημείο (συνήθως κάποιο ατομικό πυρήνα). Στην Κβαντική Μηχανική η **τροχιακή στροφορμή** είναι μια κβαντωμένη ποσότητα που χαρακτηρίζεται πλήρως από το τετράγωνο του μήκους της (ως διανύσματος) και την τιμή της προβολής της σε κάποιο άξονα.

**Ηλεκτρική πόλωση της ύλης** είναι το φαινόμενο της μετατροπής των ατόμων ή μορίων της ύλης σε ηλεκτρικά δίπολα προσανατολισμένα κατά τη διεύθυνση ενός ηλεκτρικού πεδίου, είτε εξαιτίας της διαταραχής της κίνησης των ηλεκτρονίων τους, είτε εξαιτίας του προσανατολισμού των μόνιμων διπόλων τους. Η ηλεκτρική πόλωση ενός υλικού ορίζεται ως η ηλεκτρική διπολική ροπή του μέσου ανά μονάδα όγκου. **Μαγνητική πόλωση της ύλης** είναι το φαινόμενο κατά το οποίο διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά αναπτύσσουν μαγνητική ροπή ανάλογη προς το εφαρμζόμενο πεδίο και ορίζεται ως η μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου. Καλείται επίσης και **μαγνήτιση**.

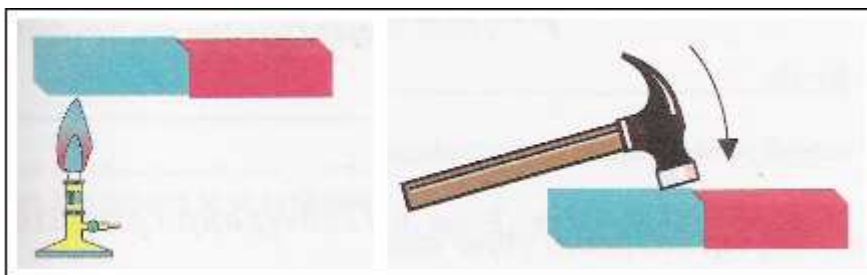
Η (θεωρητική) περιστροφή του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα κυκλικό ρεύμα (ρεύμα σε κυκλικό βρόγχο), το οποίο θεωρήσαμε αρχικά ότι ήταν υπεύθυνο για τις μαγνητικές ιδιότητες των σωμάτων (δηλαδή το άτομο μετατρέπεται σε μαγνητικό δίπολο, σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού για κυκλικό βρόγχο). Σύντομα όμως επικράτησε η άποψη, ότι οι μαγνητικές ιδιότητες σε πολλά σώματα οφείλονται κυρίως στο spin (το spin είναι δύο φορές πιο μαγνητικό από την τροχιακή στροφορμή).

Το spin είναι εγγενές χαρακτηριστικό όλων των ηλεκτρονίων. Στις περισσότερες περιπτώσεις σχηματίζουν ζευγάρια με αντίθετο spin (**συζευγμένα ηλεκτρόνια**), με αποτέλεσμα η συνολική μαγνητική τους επίδραση να εξουδετερώνεται. Το άτομο του σιδήρου, για παράδειγμα, έχει συνολικά 26 ηλεκτρόνια, από τα οποία τα 22 είναι συζευγμένα, άρα έχουν μηδενική μαγνητική επίδραση. Στην εξωτερική όμως στοιβάδα του ατόμου του σιδήρου υπάρχουν 4 ηλεκτρόνια τα οποία έχουν ίδιο spin, οπότε η συνολική μαγνητική τους επίδραση αθροίζεται. Στα 4 αυτά ηλεκτρόνια οφείλονται κυρίως οι μαγνητικές ιδιότητες του σιδήρου.

Μέσα στα υλικά, δημιουργούνται με πολύπλοκο τρόπο, μικροσκοπικές μαγνητικές περιοχές που συμπεριφέρονται σαν μικροί μόνιμοι μαγνήτες. Κάθε τέτοια μαγνητική περιοχή περιέχει  $10^{10}$  άτομα και έχει εύρος  $10^{-3}$ mm περίπου. Ένα κομμάτι μαγνητίσιμου υλικού που δεν είναι μαγνητισμένο έχει αυτές τις μαγνητικές περιοχές σε κατάσταση αταξίας. Όταν όμως, το υλικό αυτό μαγνητιστεί τότε όλες οι μαγνητικές περιοχές προσανατολίζονται ομοίμορφα (δηλαδή το υλικό αποκτά κάτι σαν μαγνητικούς πόλους, μακροσκοπικά, γι' αυτό και η διαδικασία ονομάζεται μαγνητική πόλωση της ύλης).



**ΣΧΗΜΑ 2.4:** (α) Οι μαγνητικές περιοχές πριν προσανατολιστούν. (β) Οι μαγνητικές περιοχές αφού προσανατολιστούν (μαγνητική πόλωση του υλικού). (γ) Ως στοιχειώδεις μαγνήτες (στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα) μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι τα άτομα του υλικού. Η ύπαρξη των μαγνητικών διπόλων οφείλεται αφενός στην περιστροφή του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα (τροχιακή στροφορμή) και αφετέρου στην περιστροφή του πυρήνα και του ηλεκτρονίου γύρω από τον άξονα τους (spin).



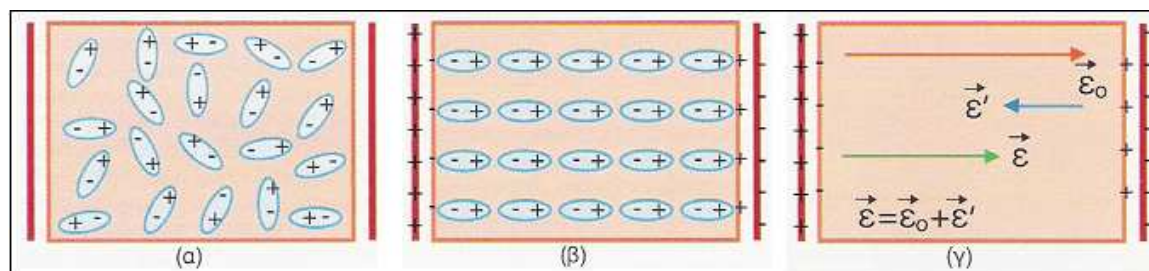
**ΣΧΗΜΑ 2.5:** Τρόποι απομαγνήτισης υλικών. (α) Απομαγνήτιση με θέρμανση. Οι μαγνητικές περιοχές ενός μαγνητισμένου υλικού χάνουν τον προσανατολισμό τους (πόλωση) πάνω από κάποια θερμοκρασία (θερμοκρασία Curie), έτσι το υλικό απομαγνητίζεται. (β) Απομαγνήτιση με κρούση. Η σφυρηλάτηση καταστρέφει τη διάταξη που είχαν οι μαγνητικές περιοχές με αποτέλεσμα την απομαγνήτιση του υλικού.

### 2.2.2. ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

**Διηλεκτρικά** είναι υλικά τα οποία μπορούν να πολώνονται από εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, δηλαδή τα άτομα ή τα μόρια τους να γίνονται ηλεκτρικά δίπολα και να προσανατολίζονται κατά τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Είναι η άλλη ονομασία των **μονωτών ηλεκτρισμού**, επειδή τα υλικά αυτά επιτρέπουν να διέρχονται μέσω αυτών οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου, σε αντίθεση με τους αγωγούς, στο εσωτερικό των οποίων δεν υπάρχουν δυναμικές γραμμές, αφού το ηλεκτρικό πεδίο εκεί είναι μηδέν.

Εξετάζοντας το φαινόμενο της πόλωσης των διηλεκτρικών, διαπιστώνεται ότι τα μόρια ή τα άτομα των υλικών είτε διαθέτουν μόνιμη ηλεκτρική διπολική ροπή είτε όχι. Όσα μόρια ή ιόντα κρυσταλλικού πλέγματος διαθέτουν μόνιμη ηλεκτρική διπολική ροπή, τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα προς το εξωτερικό πεδίο, εξαιτίας της μηχανικής ροπής που ασκείται σε αυτά. Αλλά και τα μόρια που δεν διαθέτουν μόνιμες ηλεκτρικές διπολικές ροπές, λόγω της συμμετρικής κατανομής του ηλεκτρικού φορτίου σε αυτά, όταν τοποθετηθούν μέσα σε εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, πολώνονται (δηλαδή εμφανίζουν πόλους, γίνονται ηλεκτρικά δίπολα) αποκτώντας διπολική ροπή εξ επαγωγής κατά τη διεύθυνση του πεδίου, η οποία οφείλεται σε διαταραχή της κίνησης των ηλεκτρονίων που προκαλεί το ηλεκτρικό πεδίο.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι, ούτως ή άλλως, ένα κομμάτι του διηλεκτρικού υλικού που τοποθετείται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται ηλεκτρικά. Αυτή η ηλεκτρική πόλωση προκαλεί την εμφάνιση ενός θετικού φορτίου στη μια επιφάνεια του διηλεκτρικού και ενός αρνητικού στην αντίθετη επιφάνεια του χωρίς να καταργείται η ηλεκτρική ουδετερότητα του διηλεκτρικού. Γι' αυτό το λόγο τα φορτία που εμφανίζονται λόγω πόλωσης στις δύο επιφάνειες του διηλεκτρικού είναι αντίθετα (ίσου μέτρου και αντίθετης πολικότητας), ονομάζονται **επιφανειακά φορτία** και είναι **δέσμια**. Τότε όμως το κομμάτι του διηλεκτρικού λειτουργεί ως ένα μεγάλο ηλεκτρικό δίπολο, το οποίο τείνει να κινηθεί κατά τη φορά της αύξησης του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου.



**ΣΧΗΜΑ 2.6:** Παράλληλεπίπεδο διηλεκτρικό πριν (α) και αφού (β) τοποθετηθεί μεταξύ των οπλισμών φορτισμένου επίπεδου πυκνωτή (δηλαδή μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο).

### 2.2.3. ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ - ΔΙΑΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

**Παραμαγνητισμός** (paramagnetism) είναι η ιδιότητα που έχουν ορισμένα υλικά όταν βρεθούν μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο να μαγνητίζονται παράλληλα και σύμφωνα με τη φορά του πεδίου αυτού. Στα παραμαγνητικά υλικά η μαγνητική επιδεκτικότητα έχει μικρή τιμή.

Τα άτομα ή μόρια σ' ένα παραμαγνητικό αέριο ή διάλυμα εμφανίζουν, ανεξάρτητα από την παρουσία μαγνητικού πεδίου, μια ενδογενή μαγνητική ροπή. Αυτό οφείλεται καταρχήν στην ιδιοστροφορμή (spin) του ηλεκτρονίου. Αν τα ηλεκτρόνια του ατόμου είναι όλα συζευγμένα, η ολική μαγνητική ροπή του ατόμου λόγω του spin είναι μηδέν, διαφορετικά ένα ασύζευκτο ηλεκτρόνιο προσδίδει στο άτομο εμφανείς παραμαγνητικές ιδιότητες. Η περιφορά, εξάλλου, ενός ηλεκτρονίου έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας μαγνητικής ροπής με διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της τροχιάς και φορά που εξαρτάται από τη φορά περιστροφής του κάθε ηλεκτρονίου. Αν οι τροχιές των ηλεκτρονίων δεν είναι συμμετρικές, η ολική μαγνητική ροπή του ατόμου, λόγω περιφοράς των

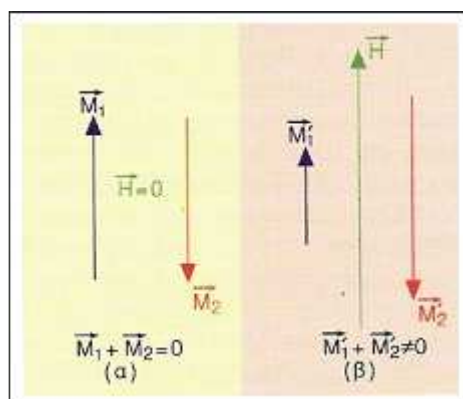


ηλεκτρονίων, είναι διάφορη του μηδενός, φαινόμενο που επίσης συντελεί στην εκδήλωση παραμαγνητικών ιδιοτήτων. Παρ' ότι τα άτομα του παραμαγνητικού υλικού είναι στοιχειώδεις μαγνήτες, το υλικό ως σύνολο δεν παρουσιάζει, μακροσκοπικά, καμία μαγνήτιση όταν βρίσκεται έξω από κάποιο μαγνητικό πεδίο, επειδή οι στοιχειώδεις μαγνητικές ροπές των διαφόρων ατόμων είναι τυχαία προσανατολισμένες και αλληλοεξουδετερώνονται. Με την επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι στοιχειώδεις μαγνητικές ροπές προσανατολίζονται προς την διεύθυνση και φορά του πεδίου (κατάσταση ελάχιστης ενέργειας) και το υλικό εμφανίζεται συνολικά μαγνητισμένο. Στον τέλειο προσανατολισμό αντιτίθεται η άτακτη θερμική κίνηση των ατόμων, οπότε η μαγνητική επιδεκτικότητα μικραίνει όσο αυξάνεται η απόλυτη θερμοκρασία  $T$ .

**Διαμαγνητισμός** (diamagnetism) είναι η ιδιότητα ορισμένων υλικών να μαγνητίζονται, όταν βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο, αντίθετα από τη φορά του πεδίου. Τα διαμαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από αρνητική μαγνητική επιδεκτικότητα, δηλαδή από μαγνητική διαπερατότητα μικρότερη της μονάδας. Η διαμαγνητική επιδεκτικότητα δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία.

Στα άτομα των διαμαγνητικών υλικών, τα ηλεκτρόνια κινούνται στις τροχιές τους κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνητικές τους ροπές να αλληλοεξουδετερώνονται, οπότε η συνολική μαγνητική ροπή, και επομένως η μαγνήτιση του ατόμου αλλά και του υλικού, εκτός μαγνητικού πεδίου, να είναι μηδέν. Όταν όμως το διαμαγνητικό υλικό βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, οι μαγνητικές ροπές των ηλεκτρονίων μεταβάλλονται σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, δηλαδή έτσι ώστε να αντιτίθεται στο εξωτερικό πεδίο. Επομένως οι ομόρροπες προς το εξωτερικό πεδίο μαγνητικές ροπές των ηλεκτρονίων μειώνονται, ενώ οι αντίρροπες αυξάνονται, οπότε η συνολική πλέον μαγνήτιση του υλικού είναι διάφορη του μηδενός και αντίρροπη προς το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Στην πραγματικότητα όλα τα υλικά αποκρίνονται στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο με ένα διαμαγνητικό τρόπο, συχνά όμως υπερκαλύπτεται από τον παραμαγνητισμό που είναι ισχυρότερο φαινόμενο, το οποίο φαινόμενο θα επικρατήσει έχει να κάνει με την επιδεκτικότητα του υλικού. Στα παραμαγνητικά άτομα τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται έτσι ώστε να προκύπτει ολική μαγνητική ροπή που δεν είναι μηδέν, η οποία προσανατολίζεται σύμφωνα (θετικά) και όχι αντίθετα (αρνητικά) προς τη φορά του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η συνολική, κατά συνέπεια, επιδεκτικότητα ενός υλικού έχει δύο όρους, ένα διαμαγνητικό και ένα παραμαγνητικό, δηλαδή  $\kappa = \kappa_s + \kappa_p$ . Αντίθετα με τη μικρή αρνητική διαμαγνητική επιδεκτικότητα, η θετική επιδεκτικότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι σχετικά μεγάλη. Έτσι παρόλο που όλα τα υλικά εκδηλώνουν διαμαγνητισμό, μόνο εκείνα που  $\kappa_p = 0$  λέγονται διαμαγνητικά, γιατί ο παραμαγνητισμός, όταν υπάρχει, επικρατεί και η ολική μαγνητική απόκριση του υλικού είναι παραμαγνητική. Η συνθήκη για καθαρό διαμαγνητισμό πραγματοποιείται όταν όλα τα spin του ατόμου είναι ζευγαρωμένα και όλες οι τροχιακές στροφορμές αλληλοεξουδετερωμένες.



**ΣΧΗΜΑ 2.7:** Σχηματική ερμηνεία του διαμαγνητισμού.

#### 2.2.4. ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ - ΑΝΤΙΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

**Σιδηρομαγνητισμός** (ferromagnetism) ονομάζεται η ιδιότητα ορισμένων υλικών στα οποία, για θερμοκρασίες μικρότερες από τη θερμοκρασία Curie, οι ατομικές μαγνητικές ροπές τείνουν να ευθυγραμμιστούν προς κοινή διεύθυνση. Η ευθυγράμμιση των ατομικών μαγνητικών ροπών έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλης μαγνήτισης αν εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η διαφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών από τα διαμαγνητικά είναι αφενός η γρήγορη, για μικρά πεδία, αύξηση της μαγνήτισης (μεγάλη τιμή μαγνητικής επιδεκτικότητας) και αφετέρου, ο παρατηρούμενος μαγνητικός κόρος για μια χαρακτηριστική τιμή του μαγνητικού πεδίου, πάνω από την οποία η μαγνήτιση των σιδηρομαγνητικών υλικών παραμένει πρακτικά σταθερή. Η μέγιστη αυτή τιμή της μαγνήτισης λέγεται μαγνήτιση κόρου. Για τα σιδηρομαγνητικά υλικά η μαγνητική διαπερατότητα μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές, πάνω από 4.000.

Στα παραμαγνητικά υλικά, οι μαγνητικές ροπές των ατόμων έχουν τυχαίο προσανατολισμό εφόσον δεν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η χαρακτηριστική, αντιθέτως, ιδιότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ότι εμφανίζουν, κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία, περιοχές όπου, αυθόρμητα, χωρίς την παρουσία εξωτερικού πεδίου, οι μαγνητικές ροπές είναι προσανατολισμένες παράλληλα με ορισμένη διεύθυνση και φορά. Οι περιοχές αυτές, η ύπαρξη των οποίων έχει αποδειχτεί πειραματικά, ονομάζονται περιοχές Weiss και έχουν διαστάσεις της τάξεως 0,1-1mm. Η διεύθυνση και

φορά παραλληλισμού των στοιχειωδών μαγνητικών ροπών των ατόμων διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Σε καθεμιά από τις περιοχές Weiss η μαγνήτιση έχει την τιμή της μαγνήτισης κόρου. Ο τυχαίος προσανατολισμός των ροπών στις περιοχές Weiss έχει ως αποτέλεσμα η ολική μαγνήτιση του υλικού που παρατηρείται μακροσκοπικά, χωρίς την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, να είναι μηδέν. Με την εφαρμογή, όμως, ενός εξωτερικού πεδίου, οι διευθύνσεις μαγνήτισης των περιοχών Weiss τείνουν να παραλληλιστούν με τη διεύθυνση και φορά του εξωτερικού πεδίου, οπότε το υλικό εμφανίζει μακροσκοπική μαγνήτιση. Για μεγαλύτερες τιμές της έντασης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου επέρχεται πλήρης παραλληλισμός των μαγνητικών ροπών των περιοχών Weiss με το εξωτερικό πεδίο, οπότε ολόκληρο το υλικό αποκτά μαγνήτιση κόρου. Αν σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητισμένο μέχρι κορεσμού μηδενιστεί ξαφνικά το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι περιοχές Weiss επαναδημιουργούνται, επειδή αυτός είναι ο μόνος τρόπος για να ελαχιστοποιήσει το σύστημα την ενέργεια του και να επανακτήσει την ευστάθεια του. Η επαναδιάταξη των στοιχειωδών μαγνητών του υλικού για την επανασύνδεση των περιοχών Weiss γίνεται σε αλληλεπίδραση με τις ελαστικές ιδιότητες του κρυστάλλου.

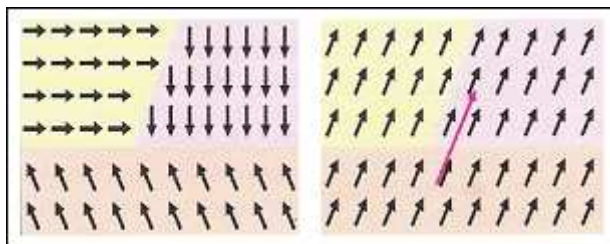
Οι σιδηρομαγνητικές ιδιότητες των υλικών διατηρούνται μόνο μέχρι μια ανώτατη θερμοκρασία, χαρακτηριστική για κάθε υλικό, που λέγεται **θερμοκρασία Curie** (Pier Curie 1859-1906). Πάνω από αυτήν, ο αυθόρμητος προσανατολισμός των στοιχειωδών μαγνητών διαλύεται και οι περιοχές Weiss εξαφανίζονται, το σύστημα μεταβαίνει από μια κατάσταση τάξης σε κατάσταση αταξίας, ή διαφορετικά, από τον σιδηρομαγνητισμό στον παραμαγνητισμό. Κάτω από τη θερμοκρασία Curie εμφανίζονται οι αλληλεπιδράσεις εκείνες που παραλληλίζουν τους στοιχειώδεις μαγνήτες σε κάθε περιοχή Weiss και οι οποίες αποδίδονται σε ένα εσωτερικό μαγνητικό πεδίο, το **μοριακό επίπεδο του Weiss**, που είναι ανάλογο της μαγνήτισης της περιοχής. Έτσι το ενεργό πεδίο που «βλέπει» μια στοιχειώδη μαγνητική ροπή στο σιδηρομαγνητικό υλικό είναι το άθροισμα του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και του πεδίου Weiss.

Το μοριακό πεδίο των περιοχών Weiss προέρχεται από ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ των ατόμων, κάτω από τους περιορισμούς της **απαγορευτικής αρχής του Pauli**, μιας αρχής της φυσικής σύμφωνα με την οποία η συνύπαρξη στο ίδιο άτομο δύο ή περισσότερων ηλεκτρονίων με τα ίδια ακριβώς φυσικά χαρακτηριστικά είναι αδύνατη. Τα ηλεκτρόνια πρέπει να διαφέρουν τουλάχιστον ως προς ένα από τα τέσσερα φυσικά μεγέθη (ενέργεια, μέτρο στροφορμής, προβολή στροφορμής και προβολή του spin σε κάποιο άξονα) που είναι αναγκαία για τον πλήρη καθορισμό της κίνησης τους γύρω από τον πυρήνα. Λόγω της αρχής αυτής, δεν επιτρέπεται η παρουσία ηλεκτρονίων με παράλληλα spin σε μικρή σχετικά απόσταση μεταξύ τους. Η αναγκαστική αυτή απομάκρυνση τέτοιων ηλεκτρονίων μειώνει τις μεταξύ τους ηλεκτροστατικές δυνάμεις Coulomb και καθιστά την κατάσταση παραλληλισμού κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, δηλαδή ισορροπίας. Υπερβολική σχετικά απομάκρυνση των ηλεκτρονίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των κινητικών ενεργειών τους, οπότε η ενέργεια ελαχιστοποιείται στην κατάσταση αντιπαραλληλισμού, οπότε έχουμε το φαινόμενο του αντισιδηρομαγνητισμού. Από την έκβαση των δύο αυτών φαινομένων κρίνεται, κάθε φορά, αν το υλικό είναι σιδηρομαγνητικό ή αντισιδηρομαγνητικό.

Η ενέργεια που απαιτείται για τη μαγνήτιση μέχρι κορεσμού ενός σιδηρομαγνητικού υλικού εξαρτάται από τη διεύθυνση, ως προς τους κρυσταλλογραφικούς άξονες, που επιχειρείται η μαγνήτιση. Υπάρχουν, δηλαδή, εύκολες και δύσκολες διευθύνσεις μαγνήτισης. Για παράδειγμα, στους κυβικής συμμετρίας μονοκρυστάλλους του σιδήρου, οι ακμές του κύβου είναι διευθύνσεις εύκολης μαγνήτισης, ενώ οι διαγώνιοι του κύβου είναι διευθύνσεις δύσκολης μαγνήτισης. Η διαφορά στην ενέργεια μαγνήτισης ανάμεσα στις δύο διευθύνσεις, λέγεται **ενέργεια ανισοτροπίας**.

Η θεωρητική ερμηνεία του φαινομένου της ανισοτροπίας στηρίζεται στο κβαντομηχανικό φαινόμενο της αλληλεπίδρασης spin και τροχιακής στροφορμής. Καθώς τα spin στρέφονται, προσανατολίζονται κάθε φορά κατά τη διεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, η αντίσταση από τη σε σύζευξη τροχιακή στροφορμή εξαρτάται κάθε φορά (**ανισοτροπία**) από τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με τις διευθύνσεις των διανυσμάτων spin και τροχιακής στροφορμής.

Σύμφυτο με την ανισοτροπία είναι το φαινόμενο της **μαγνητοσυστολής**, της μεταβολής δηλαδή των διαστάσεων ενός σιδηρομαγνητικού υλικού όταν βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Καθώς το εξωτερικό πεδίο προσανατολίζει τα spin, συμπαρασύρει ανάλογα, τη συζευγμένη με τα spin τροχιακή στροφορμή. Η κατανομή, τότε, του ηλεκτρονικού νέφους στο χώρο αλλάζει, κατά συνέπεια μεταβάλλονται και οι δυνάμεις Coulomb μεταξύ των ιόντων του κρυστάλλου, με αποτέλεσμα τη μεταβολή των διαστάσεων του.

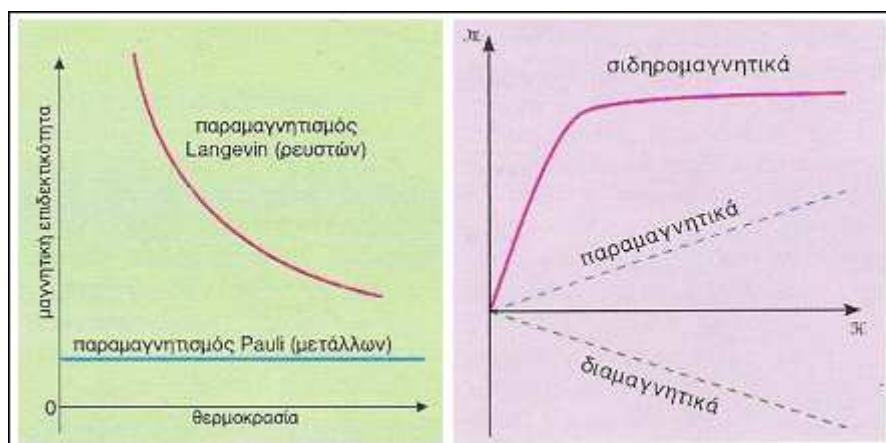


**ΣΧΗΜΑ 2.8:** Οι περιοχές Weiss απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (α) και εντός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (β).

**Αντισιδηρομαγνητισμός** (antiferromagnetism) είναι η ιδιότητα μερικών κρυστάλλων να διατάσσουν τις μαγνητικές ροπές των ατόμων τους σε δύο ομάδες, με τις μαγνητικές ροπές της μίας αντιπαράλληλες με της άλλης. Η ιδιότητα αυτή ονομάστηκε αρχικά από τον Neel σιδηριμαγνητισμός (ferrimagnetism), αλλά αργότερα τα σιδηριμαγνητικά υλικά έγιναν μια ξεχωριστή κατηγορία. Όταν το αποτέλεσμα του αντιπαράλληλισμού είναι η εμφάνιση μηδενικής ολικής μαγνητικής ροπής, γίνεται λόγος για ισοσταθμισμένο σιδηρομαγνητισμό (balanced antiferromagnetism). Παραδείγματα αντισιδηρομαγνητικών υλικών είναι κυρίως οι φερρίτες ή σιδηρίτες (ferrites). Οι φερρίτες έχουν μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα, περίπου 12.000. Το φαινόμενο του αντισιδηρομαγνητισμού εμφανίζεται πάνω από μια χαρακτηριστική για κάθε υλικό θερμοκρασία που λέγεται **θερμοκρασία Neel** (από τον γάλλο φυσικό Louis Eugene Felix Neel).

Σιδηρομαγνητικά υλικά	Θερμοκρασία Curie (Kelvin)	Σιδηριμαγνητικά υλικά	Θερμοκρασία Curie (Kelvin)
Co	1388	FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	858
Fe	1043	NiOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	858
MnBi	630	CuOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	728
Ni	627	MgOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	713
MnSb	587	MnOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	573
CrO <sub>2</sub>	386	Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	560
MnAs	318	-	-
Gd	292	-	-
Dy	88	-	-
EuO	69	-	-

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1**



**ΣΧΗΜΑ 2.9:** (α) Γραφική παράσταση της μαγνητικής επιδεκτικότητας παραμαγνητικών υλικών συναρτήσει της απόλυτης θερμοκρασίας. (β) Διάγραμμα μαγνήτισης συναρτήσει του μαγνητίζοντος πεδίου για μαγνητικά υλικά.

### 2.2.5. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ - ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΑΣΗΣ

**Κύμα** είναι γενικά κάθε διαταραχή της φυσικής κατάστασης ενός συστήματος (μέσου) που διαδίδεται σ' αυτό μεταφέροντας ενέργεια. Υπάρχουν διάφορα είδη κυμάτων, υδάτινα, σεισμικά, γνωστά στον άνθρωπο από εμπειρία, αλλά και άλλα, όπως τα «κύματα de Broglie», «κύματα ιξώδους», «κύματα θερμότητας» και αυτά που μας ενδιαφέρουν ιδιαίτερα στην παρούσα πτυχιακή, τα **ηλεκτρομαγνητικά κύματα**. Η δημιουργία ενός κύματος προϋποθέτει την ύπαρξη αφενός κάποιου κατάλληλου **συστήματος** (μέσου) και αφετέρου κάποιου **διεγείροντος αιτίου**, δηλαδή τη διαβίβαση αρχικής διέγερσης στο σύστημα με τη βοήθεια μιας εξωτερικής διαταραχής. Όταν δημιουργηθεί διαταραχή της φυσικής κατάστασης του συστήματος σε κάποιο σημείο του, οι φυσικές ιδιότητες του συστήματος «διευκολύνουν» τη διάδοση της διαταραχής αυτής σε άλλα σημεία του χώρου του συστήματος, με αποτέλεσμα να διαταραχθούν και σε αυτά οι συνθήκες φυσικής κατάστασης, και έτσι να δημιουργηθεί ένα κύμα (που αλληλεπιδρά με το μέσο). Τα κύματα συνήθως αντιστοιχούν σε ορισμένα είδη κίνησης των σωματιών (ατόμων ή μορίων) του μέσου στο οποίο διαδίδονται (στη περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μεταβάλλεται χρονικά κάποιο διανυσματικό πεδίο, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό). Τα άτομα ή μόρια του συστήματος, εκτελώντας ταλαντώσεις, κατά μέσο όρο, παραμένουν στις θέσεις ισορροπίας τους, έτσι δεν μεταφέρεται η ύλη αλλά η κατάσταση της ύλης, μια δυναμική κατάσταση που διαδίδεται από μια περιοχή του μέσου προς άλλες, μεταφέροντας ορμή και ενέργεια, κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.



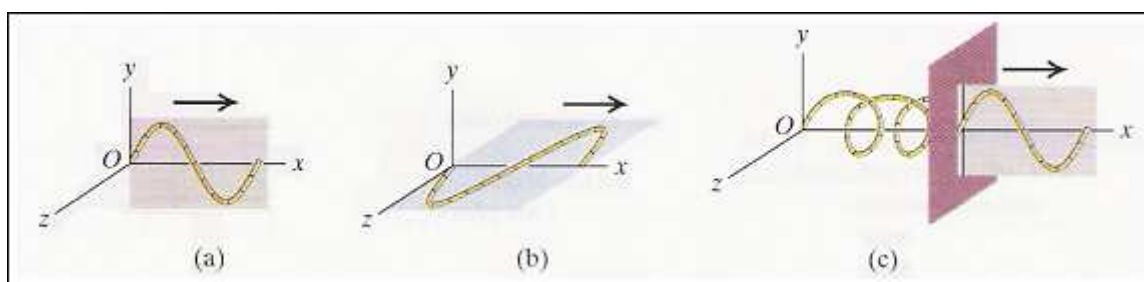
Τα κύματα διακρίνονται, ανάλογα με την διεύθυνση κατά την οποία συντελείται η διαταραχή της φυσικής κατάστασης του μέσου ως προς την διεύθυνση διάδοσης της διαταραχής σε διαμήκη και εγκάρσια. Όταν η μετατόπιση των σωματιδίων ή η μεταβολή του διανυσματικού πεδίου γίνονται παράλληλα προς την διεύθυνση διάδοσης, το κύμα ονομάζεται **διάμηκες**, ενώ όταν γίνεται κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης, το κύμα ονομάζεται **εγκάρσιο**. Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται σε όλες τις καταστάσεις της ύλης, στερεά υγρά, αέρια ή πλάσμα. Τα εγκάρσια μηχανικά κύματα διαδίδονται μόνο στα στερεά. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, εκτός από ειδικές περιπτώσεις, είναι εγκάρσια.

**Ταχύτητα φάσης ή ταχύτητα διάδοσης κύματος** είναι η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται οποιαδήποτε ιδιαίτερη φάση ενός κύματος. Η ταχύτητα φάσης, για όλων των ειδών τα κύματα, εξαρτάται από την ελαστικότητα και την αδράνεια του μέσου. **Αδράνεια** είναι η ιδιότητα που έχουν τα υλικά σώματα να διατηρούν αναλλοίωτη την κινητική τους κατάσταση, όταν δεν ασκούνται πάνω τους εξωτερικές δυνάμεις ή όταν οι ασκούμενες δυνάμεις αλληλοεξουδετερώνονται. **Ελαστικότητα** είναι η ιδιότητα των υλικών να ανακτούν το μέγεθος (όγκο) ή το σχήμα τους μετά την απομάκρυνση των αιτιών που προκαλούν την παραμόρφωσή τους.

## 2.2.6. ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ - ΟΠΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ

**Πόλωση** είναι το φαινόμενο που συνίσταται στην μη ισοδυναμία των διαφόρων διευθύνσεων πάνω στο επίπεδο που είναι κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης ενός κύματος. Έτσι, στο επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου επιλέγουν ορισμένες διευθύνσεις ταλάντωσης οι οποίες είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η συγκεκριμένη σχέση που συνδέει τα πλάτη και τις φάσεις των δύο ανεξάρτητων πεδίων λέγεται ότι περιγράφει την **κατάσταση πόλωσης**. Το μη πολωμένο φως συνίσταται σε ακτίνες που ταλαντώνονται σε όλα τα επίπεδα. Το φως είναι **γραμμικά πολωμένο**, όταν το πεδίο ταλάντωσης του ηλεκτρικού του πεδίου έχει ένα καθορισμένο προσανατολισμό στο χώρο και μια καθορισμένη διεύθυνση διάδοσης. Τα εγκάρσια κύματα μπορεί να χαρακτηριστούν ως γραμμικά πολωμένα κύματα εφόσον η μετατόπιση παριστάνει μια ταλάντωση πάνω σε μια σταθερή διεύθυνση κάθετη στην ευθεία διάδοσης του κύματος. Η διεύθυνση πόλωσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, συμπίπτει πάντοτε εξ ορισμού με τη διεύθυνση του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου (πεδίο E) και όχι του μαγνητικού πεδίου (πεδίο B), επειδή οι περισσότεροι κοινοί ανιχνευτές (φωρατές) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπινου ματιού) είναι ευαίσθητοι στις ηλεκτρικές δυνάμεις που ασκούνται στα ηλεκτρόνια των υλικών και όχι στις μαγνητικές δυνάμεις.

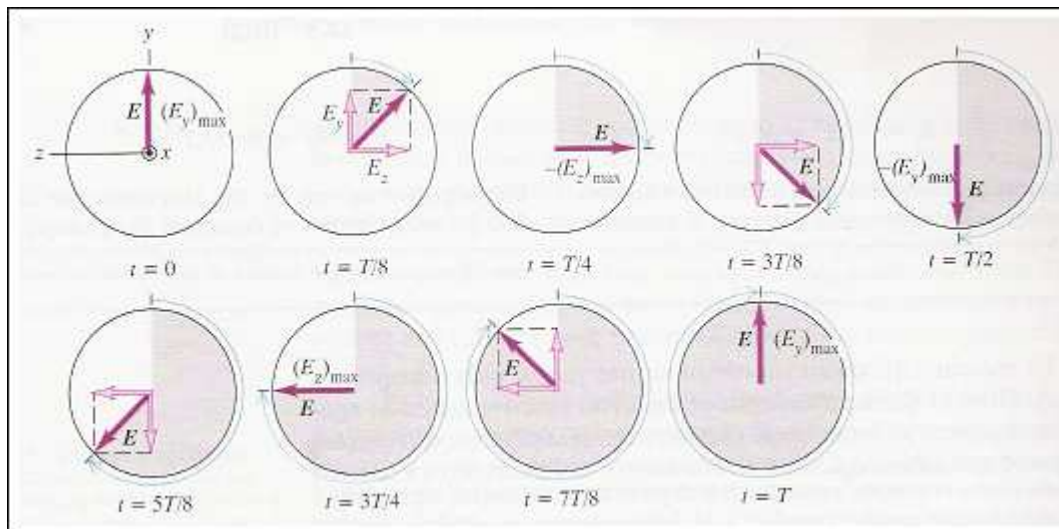
Το φως αλλά και γενικά η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί ακόμη να έχει κυκλική ή ελλειπτική πόλωση. Ας υποθέσουμε, στο σχήμα 2.10, ότι τα δύο γραμμικά πολωμένα κύματα είναι σε φάση και ότι έχουν ίσα πλάτη. Αν θεωρήσουμε την επαλληλία τους, κάθε σημείο της χορδής υφίσταται ταυτόχρονες μετατοπίσεις κατά μήκος των διευθύνσεων y και z που έχουν το ίδιο μέτρο. Οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το προκύπτον συνιστάμενο κύμα βρίσκεται σε ένα επίπεδο που σχηματίζει  $45^\circ$  με τους άξονες y και z, δηλαδή σε επίπεδο που σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με τα επίπεδα xy και xz. Το συνιστάμενο κύμα είναι γραμμικώς πολωμένο.



**ΣΧΗΜΑ 2.10:** (α) Εγκάρσιο κύμα σε χορδή πολωμένο κατά την διεύθυνση y. (β) Κύμα πολωμένο κατά την διεύθυνση z. (γ) Ένα φράγμα στο οποίο έχει εγκοπή μια λεία κάθετη σχισμή που επιτρέπει την διέλευση των συνιστωσών που είναι πολωμένες κατά την διεύθυνση y, αλλά παρεμποδίζει τις συνιστώσες που είναι πολωμένες κατά την διεύθυνση z, συμπεριφερόμενο ως πολωτικό φίλτρο.

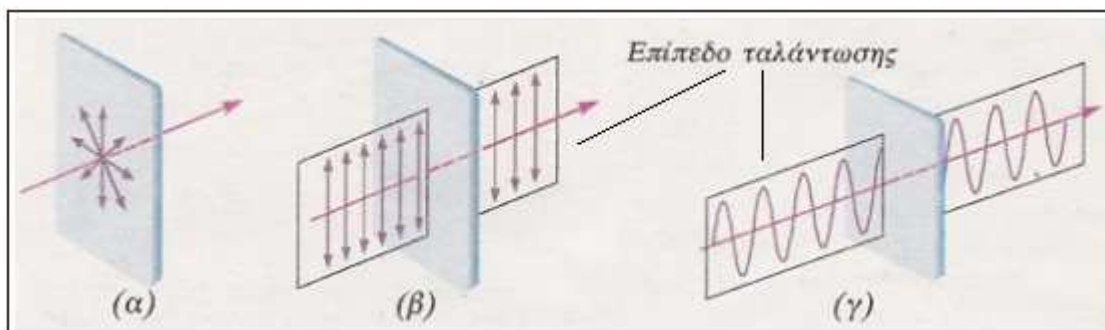
Ας υποθέσουμε τώρα ότι τα δύο κύματα ίσου πλάτους έχουν διαφορά φάσης  $\pi/2$ , που ισοδυναμεί με διαφορά φάσης τεταρτοκυκλίου. Σ' αυτή την περίπτωση η συνιστάμενη κίνηση κάθε σημείου περιγράφεται από μια υπέρθεση δύο απλών αρμονικών κινήσεων κατά μήκος δύο κάθετων αξόνων, ενώ η διαφορά φάσης τους είναι  $\pi/2$ . Η μετατόπιση y ενός σημείου είναι μέγιστη τη χρονική στιγμή κατά την οποία η μετατόπιση z είναι μηδέν, και αντιστρόφως. Επομένως η κίνηση της χορδής δεν βρίσκεται σε ένα επίπεδο. Κάθε σημείο της χορδής διαγράφει περιφέρεια κύκλου επί επιπέδου παράλληλου προς το επίπεδο yz. Συνεχόμενα σημεία τις χορδής έχουν διαδοχικές διαφορές φάσης, με αποτέλεσμα η συνολική κίνηση της χορδής να έχει τη μορφή μιας περιστρεφόμενης κυλινδρικής έλικας. Αυτή η συγκεκριμένη υπέρθεση δύο γραμμικά πολωμένων κυμάτων ονομάζεται **κυκλική πόλωση**. Συμβατικά λέμε ότι το κύμα είναι κυκλικά πολωμένο δεξιόστροφα αν η φορά της κίνησης ενός σωματιδίου της χορδής συμπίπτει με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, για έναν παρατηρητή με κατεύθυνση παρατήρησης από μπρος προς τα πίσω και κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης. Αν συμβαίνει το αντίθετο, τότε το κύμα είναι αριστερόστροφα πολωμένο. Μια γραμμικά πολωμένη ακτίνα

φωτός, δηλαδή έχει ένα μοναδικό διάνυσμα  $E$ , μπορεί να χωριστεί σε δύο κυκλικά πολωμένες ακτίνες ίδιας έντασης. Αυτές οι δεξιά και αριστερά κυκλικά πολωμένες ακτίνες διαδίδονται ταυτόχρονα, αλλά είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους (ορθογώνια). Αν η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο συνιστωσών κυμάτων δεν είναι ίση με  $\pi/2$  ή αν τα συνιστάμενα κύματα έχουν διαφορετικό πλάτη, τότε το κάθε σημείο της χορδής διαγράφει μια έλλειψη, οπότε το προκύπτον κύμα έχει **ελλειπτική πόλωση**.



**ΣΧΗΜΑ 2.11:** Κυκλική πόλωση. Η συνιστώσα  $y$  του  $E$  καθυστερεί, σε σχέση με τη συνιστώσα  $z$ , ο δε χρόνος καθυστέρησης ισοδυναμεί με ένα τεταρτοκύκλιο. Αυτή η διαφορά φάσης οδηγεί σε δεξιόστροφη κυκλική πόλωση αν το κύμα οδεύει προς τον αναγνώστη.

Κατά την αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με την ύλη, οι διάφορες καταστάσεις πόλωσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας δεν αλληλεπιδρούν με τον ίδιο τρόπο και μάλιστα αλλάζουν ή τροποποιούνται με την αλληλεπίδραση. Έτσι γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός της κατάστασης πόλωσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ένα γνωστό υλικό, ή αντίστροφα, προσδιορίζοντας την τροποποίηση που προκαλεί σε μια γνωστή κατάσταση πόλωσης ένα υλικό, μπορεί να εξαχθούν πληροφορίες για αυτό.

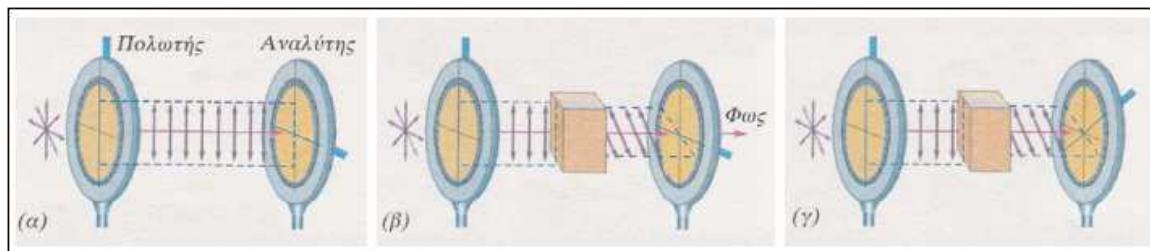


**ΣΧΗΜΑ 2.12:** (α) το φυσικό φως και (β),(γ) το γραμμικά πολωμένο φως.

Στο φως η διαφορά φάσης μπορεί να εισαχθεί αν χρησιμοποιηθεί ένα υλικό που εμφανίζει **διπλοθλαστικότητα**, δηλαδή ένα υλικό που παρουσιάζει διαφορετικούς δείκτες διάθλασης για διαφορετικές διευθύνσεις πόλωσης. Όταν δύο κύματα με κάθετες διευθύνσεις πόλωσης εισέρχονται σε ένα διπλοθλαστικό υλικό, οδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες. Αν έχουν την ίδια φάση όταν εισέρχονται στο υλικό, οι φάσεις τους δεν συμπίπτουν πλέον, στη γενική περίπτωση, όταν εξέρχονται από το υλικό. Αν ο κρύσταλλος είχε ακριβώς το απαιτούμενο πάχος, ώστε να επιτευχθεί η εισαγωγή διαφοράς φάσης  $\pi/2$ , τότε ο κρύσταλλος μετατρέπει γραμμικά πολωμένο φως σε κυκλικά πολωμένο. Ένας τέτοιος κρύσταλλος ονομάζεται πλακίδιο  $\lambda/4$ . Ένα τέτοιο πλακίδιο μπορεί να μετατρέψει, επίσης, κυκλικά πολωμένο φως σε γραμμικά πολωμένο.

Υπάρχουν ορισμένα διαφανή σώματα που έχουν την ιδιότητα να στρέφουν το επίπεδο του πολωμένου φωτός, όταν αυτό περάσει από μέσα τους. Τα σώματα αυτά ονομάζονται **οπτικά ενεργά**. Τέτοια είναι, για παράδειγμα οι κρύσταλλοι χαλαζία, το διάλυμα ζάχαρης, το διάλυμα γαλακτικού οξέως κ.α. Το φαινόμενο της στροφής του επιπέδου πόλωσης, όταν παρατηρείται στο ορατό και στις παραπλήσιες περιοχές (υπερύθρο, υπεριώδες) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ονομάζεται **οπτική ενεργότητα**. Όταν μια δέσμη γραμμικά πολωμένου φωτός περάσει μέσα από μια τέτοια ουσία, το διερχόμενο φως είναι γραμμικά πολωμένο σε επίπεδο που σχηματίζει γωνία  $\theta$  με το αρχικό επίπεδο πόλωσης. Η τιμή της  $\theta$  είναι ανάλογη με την απόσταση που διανύει η δέσμη μέσα στην ουσία και εξαρτάται από την φύση της ουσίας. Οι ουσίες αυτές διακρίνονται σε αριστερόστροφες

και δεξιόστροφες, ανάλογα με το αν η φορά του επιπέδου πόλωσης έχει τη φορά των δεικτών του ρολογιού ή αντίστροφη προς αυτή, σύμφωνα με έναν παρατηρητή που δέχεται το διερχόμενο φως. Η οπτική ενεργότητα είναι αποτέλεσμα μιας ορισμένης παραμόρφωσης των ηλεκτρικών τροχιών στα μόρια ή στους κρυστάλλους εξαιτίας της δράσης ενός ταλαντευόμενου εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η οπτική ενεργότητα υπάρχει σε κάθε φυσική κατάσταση ή διάλυμα. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της γωνίας στρέψης του πολωμένου φωτός ονομάζονται πολωσίμετρα.



**ΣΧΗΜΑ 2.13:** Θεωρούμε πολωτή και αναλύτη (δεύτερο όμοιο πολωτή με τον πρώτο) διασταυρωμένους, ώστε η μονοχρωματική ακτίνα που προσπίπτει στο πολωτή να ανακόπτεται από τον αναλύτη (σχήμα α). Αν μεταξύ του πολωτή και του αναλύτη παρεμβάλουμε κρύσταλλο χαλαζία ή διάλυμα ζάχαρης, θα παρατηρήσουμε ότι από τον αναλύτη περνάει φως (σχήμα β). Αν στρίψουμε τον αναλύτη, τότε για ορισμένη γωνία το φως ανακόπτεται και πάλι (σχήμα γ). Είναι φανερό ότι η παρεμβολή ενός οπτικά ενεργού σώματος έστρεψε το επίπεδο πόλωσης του φωτός κατά ορισμένη γωνία δεξιά ή αριστερά.

### 2.2.7. ΔΙΑΘΛΑΣΗ – ΑΝΑΚΛΑΣΗ

**Διάθλαση** είναι το φαινόμενο της απότομης μεταβολής της διεύθυνσης διάδοσης των κυμάτων, το οποίο παρατηρείται όταν τα κύματα, προσπίπτοντας στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, αλλάζουν μέσο διάδοσης. **Ανάκλαση** είναι το φαινόμενο της απότομης αλλαγής της διεύθυνσης διάδοσης κυμάτων. Η ανάκλαση παρατηρείται όταν τα κύματα προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, χωρίς να αλλάξουν μέσο διάδοσης. Στην περίπτωση της διάθλασης, η διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών μέσων ονομάζεται **δίοπτρο**, ενώ η λεία διαχωριστική επιφάνεια η οποία δημιουργεί το φαινόμενο της ανάκλασης, ονομάζεται **κάτοπτρο**. Όταν μια φωτεινή δέσμη, που διαδίδεται σε ένα μέσο, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια που χωρίζει το αρχικό μέσο διάδοσης από ένα άλλο οπτικό μέσο, τότε ένα μέρος της ανακλάται προς το αρχικό μέσο διάδοσης, ενώ ένα άλλο μέρος συνεχίζει να διαδίδεται στο δεύτερο μέσο, δηλαδή διαθλάται.

Από τα μέσα του 17ου αιώνα είναι γνωστοί οι δύο **νόμοι της διάθλασης**. Αν σε κάποιο σημείο (Σ) λείας διαχωριστικής επιφάνειας δύο διαφανών οπτικών μέσων προσπέσει μια φωτεινή ακτίνα, τότε παρατηρούνται τα εξής:

α) η προσπίπτουσα ακτίνα (ΠΣ), η διαθλώμενη ακτίνα (ΣΔ), και η κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια (ΣΚ) βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, το οποίο ονομάζεται **επίπεδο διάθλασης** και είναι κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια.

β) ο λόγος των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης ( $\eta$ ) και διάθλασης ( $\delta$ ), δηλαδή των γωνιών που σχηματίζουν η προσπίπτουσα ακτίνα (ΠΣ) και η διαθλώμενη ακτίνα (ΣΔ) με την κάθετη (ΣΚ), είναι σταθερός και δεν εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή  **$\eta\mu\eta/\eta\mu\delta = \text{σταθερό}$  (νόμος του Snell)**

Επίσης οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο λόγος των ημιτόνων της παραπάνω σχέσης είναι ίσος προς τον λόγο των ταχυτήτων του φωτός στα δύο μέσα, από το οποίο γίνεται φανερό ότι η διάθλαση οφείλεται στη διαφορετική ταχύτητα διάδοσης του φωτός στα δύο μέσα. Η συχνότητα ( $f$ ) όμως παραμένει αμετάβλητη, διότι αν δεν συνέβαινε αυτό, η διαχωριστική επιφάνεια θα έπρεπε να δημιουργεί νέα κύματα ή να εξαφανίζει τα ήδη υπάρχοντα. Ο σταθερός λόγος των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης ονομάζεται **σχετικός δείκτης διάθλασης ( $n_{2,1}$ )** του μέσου 2 ως προς το μέσο 1, είναι σταθερός αριθμός και αποτελεί μέτρο της «κάμψης» που υφίσταται το φως κατά τη διέλευση του από ένα μέσο σε ένα άλλο. Η τιμή του σχετικού δείκτη διάθλασης εξαρτάται από τη φύση του κύματος και τις (μηχανικές, ηλεκτρομαγνητικές κ.α.) ιδιότητες των δύο μέσων. Αν το μέσο 1 είναι το κενό ή, κατά προσέγγιση, ο αέρας, ο δείκτης διάθλασης ονομάζεται **απόλυτος δείκτης διάθλασης ( $n=c_0/c$  ή  $n=\lambda_0/\lambda$ )** του υλικού μέσου και ισούται με τον λόγο της ταχύτητας του φωτός στο κενό ( $c_0=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) προς την ταχύτητα του φωτός στο μέσο ( $c$ ). Κάθε οπτικό μέσο έχει τι δικό του απόλυτο δείκτη διάθλασης, με τιμή μεγαλύτερη από τη μονάδα, ο οποίος εξαρτάται από το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) του φωτός και τη (σχετική) διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon$ ) του μέσου, γεγονός που αποδεικνύει την εξάρτηση των οπτικών ιδιοτήτων του μέσου με τις ηλεκτρικές ιδιότητες του. Για το κενό, ο απόλυτος δείκτης διάθλασης είναι μονάδα.

Το φαινόμενο της διάθλασης είναι στενά συνδεδεμένο με το αυτό της ανάκλασης. Εφόσον, λοιπόν, ισχύουν συγχρόνως οι νόμοι που διέπουν και τα δύο φαινόμενα, τα επίπεδα ανάκλασης και διάθλασης πρέπει να συμπίπτουν. Για το φως το φαινόμενο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αν διαδίδεται φως από αραιότερο προς πυκνότερο μέσο, τότε η ενέργεια της προσπίπτουσας φωτεινής

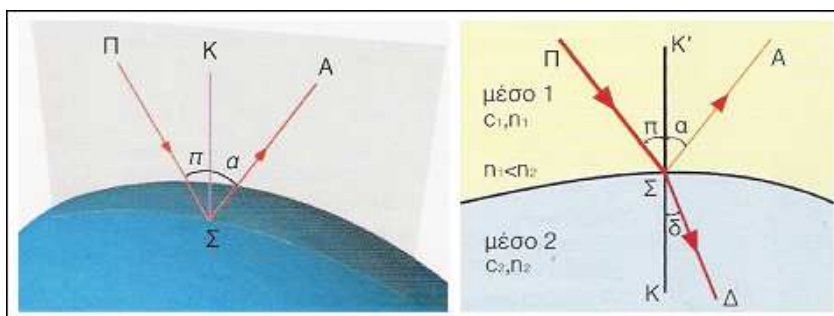
δέσμης κατανέμεται στην ανακλώμενη και τη διαθλώμενη δέσμη, σε ποσοστά που εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης. Για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι  $50^\circ$  ανακλάται λιγότερο από 10% της φωτεινής ενέργειας, για γωνίες γύρω στις  $80^\circ$  τα ποσοστά ανακλώμενης και διαθλώμενης ενέργειας είναι περίπου ίσα. Όταν όμως η διάδοση γίνεται από πυκνότερο σε αραιότερο μέσο, εφόσον η πρόσπτωση γίνει κατά γωνία μεγαλύτερη από μια ορισμένη οριακή, δεν συντελείται διάθλαση αλλά παρατηρείται **ολική ανάκλαση**.

Το φαινόμενο της ανάκλασης, όπως και το φαινόμενο της διάθλασης, διέπεται από δύο νόμους οι οποίοι είναι γνωστοί ως **νόμοι της ανάκλασης**. Αν σε κάποιο σημείο ( $\Sigma$ ) λείας διαχωριστικής επιφάνειας δύο οπτικών μέσων πέσει κάποια φωτεινή ακτίνα, τότε παρατηρείται ότι:

α) η προσπίπτουσα ακτίνα ( $\Pi\Sigma$ ), η ανακλώμενη ακτίνα ( $\Sigma\Lambda$ ) και η κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια ( $\Sigma\kappa$ ) βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, το οποίο ονομάζεται **επίπεδο ανάκλασης** και είναι κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια.

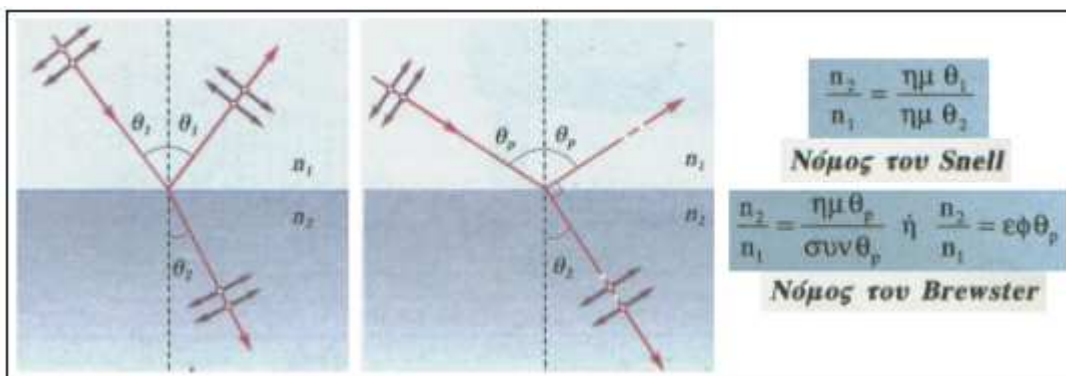
β) οι γωνίες που σχηματίζουν η προσπίπτουσα ακτίνα ( $\Pi\Sigma$ ) και η ανακλώμενη ακτίνα ( $\Sigma\Lambda$ ) με την κάθετη ( $\Sigma\kappa$ ), δηλαδή οι γωνίες πρόσπτωσης ( $\pi$ ) και ανάκλασης ( $\alpha$ ) είναι ίσες ( $\pi=\alpha$ ).

Γενικά το φαινόμενο της ανάκλασης δεν είναι παρά εκδήλωση κάποιου είδους αλληλεπίδρασης ύλης και διαδιδόμενης ενέργειας, δύο στενά αλληλοσυνδεδεμένων οντοτήτων. Οι ανακλαστικές ιδιότητες των διαφόρων υλικών εξαρτώνται από το σχήμα τους και το είδος της ακτινοβολίας που ανακλούν. Κάθε επιφάνεια που ανακλά κύματα χαρακτηρίζεται από το **συντελεστή ανάκλασης ( $r$ )**, δηλαδή το λόγο της έντασης του ανακλώμενου κύματος προς αυτόν του προσπίπτοντος. Αν ο συντελεστής αυτό έχει την τιμή 1, η ανακλαστική επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως ιδανική και επανεκπέμπει όση ενέργεια προσπίπτει σε αυτήν. Στην περίπτωση που  $r < 1$ , ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας απορροφάται από την ανακλαστική επιφάνεια. Το ποσοστό αυτό περιγράφεται από τον συντελεστή **απορρόφησης ( $\alpha$ )**. Οι συντελεστές ανάκλασης και απορρόφησης εξαρτώνται από τις ηλεκτρικές και μαγνητικές ή τις μηχανικές ιδιότητες της ανακλαστικής επιφάνειας, ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας που ανακλάται.



**ΣΧΗΜΑ 2.14:** Σχηματική αναπαράσταση (α) ανάκλασης και (β) διάθλασης.

**Πόλωση από ανάκλαση** (φυσική πόλωση). Οι έννοιες της ανάκλασης και της διάθλασης είναι αλληλένδετες με την έννοια της πόλωσης. Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει πάνω σε διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών υλικών μέσων με δείκτες διάθλασης  $n_1, n_2$  τότε εν μέρει διαθλάται και εν μέρει ανακλάται. Από το πρώτο νόμο της διάθλασης και τον πρώτο νόμο της ανάκλασης βγαίνει λογικά το συμπέρασμα ότι η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτινοβολία βρίσκονται πάνω στο ίδιο επίπεδο. Αν εξετάσουμε με αναλυτή την ανακλώμενη δέσμη θα παρατηρήσουμε ότι όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι περίπου  $0^\circ$  ή περίπου  $90^\circ$ , το ανακλώμενο φως δεν είναι πολωμένο. Για ενδιάμεσες γωνίες πρόσπτωσης το ανακλώμενο φως είναι μερικώς πολωμένο δηλαδή αποτελείται από γραμμικά πολωμένο φως και μη πολωμένο φως. Υπάρχει μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, που ονομάζεται **γωνία ολικής πόλωσης ( $\theta_p$ )**, για την οποία το ανακλώμενο φως είναι πλήρως πολωμένο. Η γωνία ολικής πόλωσης  $\theta_p$  συνδέεται με τους δείκτες διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$  των δύο οπτικών υλικών. Η σύνδεση αυτή προκύπτει από το νόμο του Snell.



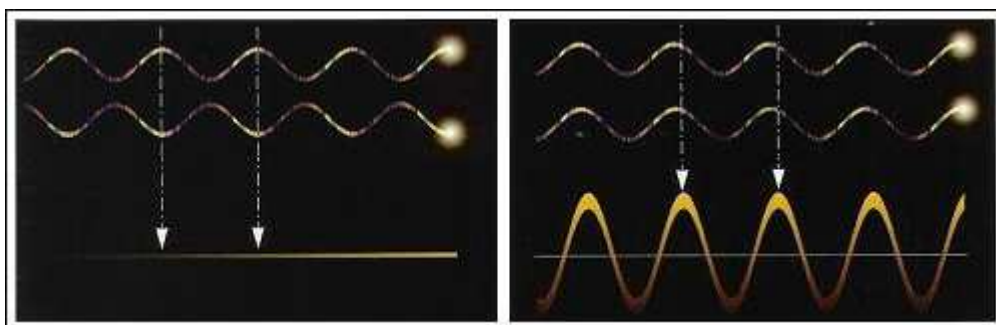
**ΣΧΗΜΑ 2.15:** Πόλωση από ανάκλαση.



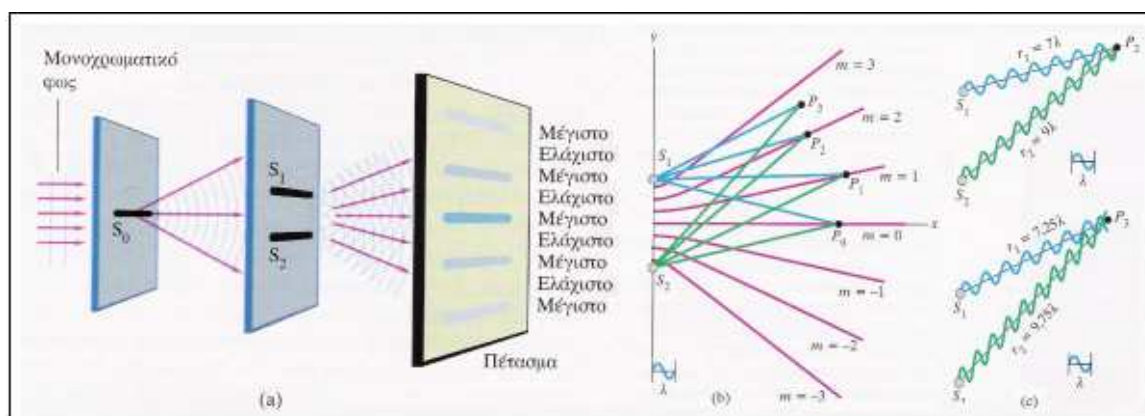
Η τελευταία σχέση είναι γνωστή ως νόμος του Brewster και η γωνία ολικής πόλωσης ονομάζεται γωνία Brewster. Άρα η γωνία ολικής πόλωσης του φωτός, για κάθε μέσο, είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη ακτίνα και η διαθλώμενη είναι κάθετες μεταξύ τους.

### 2.2.8. ΣΥΜΒΟΛΗ

Ο όρος **συμβολή** αναφέρεται σε κάθε περίπτωση κατά την οποία δύο ή περισσότερα κύματα αλληλεπικαλύπτονται στο χώρο. Όταν υπάρχει αυτή η αλληλοεπικάλυψη, η ολική μετατόπιση σε οποιοδήποτε σημείο και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή υπολογίζεται από την αρχή της γραμμικής επαλληλίας. Η **αρχή της γραμμικής επαλληλίας** ορίζει τα εξής: όταν δύο ή περισσότερα κύματα αλληλεπικαλύπτονται, η προκύπτουσα μετατόπιση σε οποιοδήποτε σημείο και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή μπορεί να βρεθεί αν προστεθούν οι στιγμιαίες μετατοπίσεις που θα παράγονταν στο σημείο αυτό από τα κύματα, αν το καθένα από αυτά υφίστατο αφεαυτού.



**ΣΧΗΜΑ 2.16:** Οι κορυφές και οι κοιλίες των κυμάτων αλληλοαναιρούνται όταν τα κύματα βρίσκονται σε αντίθεση φάσης, ενώ αντίθετα, συμπίπτουν και αλληλοενισχύονται όταν τα κύματα βρίσκονται σε συμφωνία φάσης.



**ΣΧΗΜΑ 2.17:** Θεωρούμε ότι έχουμε δύο πανομοιότυπες πηγές μονοχρωματικών κυμάτων που βρίσκονται σε ορισμένη απόσταση μεταξύ τους οι οποίες είναι μόνιμα σε φάση (ταλαντώνονται συγχρονισμένα). Σε ορισμένη απόσταση από τις πηγές θεωρούμε ότι υπάρχει πέτασμα στο οποίο προσπίπτουν οι φωτεινές ακτίνες των δύο πηγών. Η πρόσθεση των πλατών που προκύπτει όταν τα κύματα των δύο πηγών φτάνουν στο πέτασμα σε φάση, ονομάζεται **ενισχυτική συμβολή**. Εάν τα κύματα, όταν προσπίπτουν στο πέτασμα, έχουν διαφορά μισού κύκλου (δηλαδή το ένα παρουσιάζει κορυφή και το άλλο κοιλία) τότε το ολικό πλάτος είναι μηδέν. Αυτή η περίπτωση ονομάζεται **αναιρετική συμβολή**. Έτσι στο πέτασμα εμφανίζονται εναλλάξ φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί συμβολής.

### 2.2.9. ΣΤΑΘΕΡΑ VERDET

Η σταθερά Verdet πήρε το όνομα της από τον Γάλλο φυσικό Émile Verdet. Αυτή η εμπειρική αναλογική σταθερά (σε μονάδες λεπτών τόξου ανά gauss ανά εκατοστά απόστασης ή στο διεθνές σύστημα SI μονάδες rad ανά tesla ανά μέτρο), αλλάζει με το μήκος κύματος και την θερμοκρασία και κατηγοριοποιείται για διάφορα υλικά. Η σταθερά Verdet είναι μια οπτική σταθερά η οποία περιγράφει την δύναμη του φαινομένου Faraday για κάποιο συγκεκριμένο υλικό και ορίζεται ως η περιστροφή ανά μονάδα απόστασης ανά μονάδα μαγνητικής ισχύος. Λειτουργεί, δηλαδή, ως αναλογική σταθερά μεταξύ της γωνίας περιστροφής και του γινομένου του μαγνητικού πεδίου και πάχους του υλικού.

Μια θετική σταθερά Verdet αντιστοιχεί σε περιστροφή με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού όταν η κατεύθυνση του γινομένου είναι παράλληλη του μαγνητικού πεδίου και σε περιστροφή με τη φορά των δεικτών του ρολογιού όταν η κατεύθυνση του γινομένου είναι αντι-παράλληλη του μαγνητικού πεδίου. Οπότε, αν μια ακτίνα φωτός περάσει μέσα από ένα υλικό και ανακλαστεί πάλι στο εσωτερικό του, η περιστροφή διπλασιάζεται.

Η σταθερά Verdet, για τα περισσότερα υλικά, είναι εξαιρετικά μικρή και εξαρτάται από το μήκος κύματος και την θερμοκρασία. Είναι ισχυρότερη σε ουσίες που περιέχουν παραμαγνητικά ιόντα όπως τέρβιο (terbium). Οι μεγαλύτερες σταθερές Verdet βρίσκονται σε μεγάλης πυκνότητας γυαλιά πυρόλιθου (τσακμακόπετρα) εμπλουτισμένα με τέρβιο ή σε κρυστάλλους τερβίου-γαλλίου-γρανάτη (terbium gallium garnet - TGG). Αυτό το υλικό έχει εξαιρετικές ιδιότητες, όσον αφορά τη διαφάνεια, και είναι πολύ ανθεκτικό σε φθορές από laser. Παρόλο που το φαινόμενο Faraday δεν είναι χρωματικό (π.χ. δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος), η σταθερά Verdet είναι ισχυρά εξαρτώμενη από το μήκος κύματος. Στα 632,8nm, η σταθερά Verdet για το TGG αναφέρεται να είναι  $-134 \text{ rad/T}\cdot\text{m}$  ενώ για τα 1064nm, πέφτει στα  $-40 \text{ rad/T}\cdot\text{m}$ . Τοποθετώντας μια ράβδο αυτού του υλικού σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο μπορεί να επιτευχθεί μια γωνία περιστροφής Faraday πάνω από  $0,78 \text{ rad}$  ( $45^\circ$ ). Αυτή η συμπεριφορά σημαίνει ότι οι συσκευές που κατασκευάζονται για ένα συγκεκριμένο βαθμό περιστροφής σε κάποιο μήκος κύματος, θα δημιουργήσουν πολύ μικρότερη περιστροφή σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Πολλοί περιστροφείς και απομονωτές Faraday (Faraday rotators and isolators) προσαρμόζονται διαφοροποιώντας τον βαθμό στον οποίο οι ράβδοι ενεργού, εμπλουτισμένου με τέρβιο, γυαλιού ή οι ράβδοι κρυστάλλου TGG εισέρχονται στο μαγνητικό πεδίο της συσκευής. Με αυτό τον τρόπο, οι συσκευές μπορούν να συντονιστούν για την χρησιμοποίηση μεγάλου εύρους από lasers, σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές της κάθε συσκευής. Πραγματικά ευρείας ζώνης πηγές, όπως τα υπερβραχέων παλμών laser (ultra-short pulse lasers) και τα συντονιζόμενα δονητικά laser (tunable vibronic lasers), δεν θα «δουν» την ίδια περιστροφή σε όλο το εύρος μηκών κύματος.

Η θεωρία που εξηγεί γιατί το φαινόμενο Faraday δουλεύει βρίσκεται στη κβαντική μηχανική αλλά μπορεί να κατανοηθεί σε ένα πιο απλοποιημένο επίπεδο χρησιμοποιώντας κλασσική ηλεκτροδυναμική. Η ακρίβεια της **γωνιακής ορμής** ενός ηλεκτρονίου που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από το πυρήνα οδηγεί σε διαφορετικούς δείκτες διάθλασης για δεξιόστροφο ή αριστερόστροφο πολωμένο φως. Αυτό οδηγεί στην περιστροφή του επιπέδου του πολωμένου φωτός. Για να κατανοηθεί καλύτερα πως δουλεύει το φαινόμενο Faraday, μια προσέγγιση με τη κλασσική ηλεκτροδυναμική δίνει μια έκφραση της σταθεράς Verdet η οποία είναι συνάρτηση του μήκους κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται στο πείραμα (μήκος κύματος για το κενό) και στην μεταβολή του δείκτη διάθλασης ανά μεταβολή του μήκους κύματος:

$$V = \frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (2.2)$$

όπου  $e$  : το φορτίο του ηλεκτρονίου,  
 $m$ : η μάζα του ηλεκτρονίου,  
 $c$  : η ταχύτητα του φωτός,  
 $\lambda$  : το μήκος κύματος του φωτός  
 $n$  : ο δείκτης διάθλασης του υλικού.

### 2.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ FARADAY

#### 2.3.1. Η ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ FARADAY

Τα μαγνητο-οπτικά φαινόμενα (ΜΟ) περιγράφονται καλύτερα με όρους διηλεκτρικών ταυστών  $\epsilon$  του μέσου στο οποίο αλληλεπιδρά το φως και το μαγνητικό πεδίο (ή η εσωτερική μαγνήτιση του μέσου).

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \begin{pmatrix} \mathcal{E}_{xx} & \mathcal{E}_{xy} & \mathcal{E}_{xz} \\ \mathcal{E}_{yx} & \mathcal{E}_{yy} & \mathcal{E}_{yz} \\ \mathcal{E}_{zx} & \mathcal{E}_{zy} & \mathcal{E}_{zz} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Σε ένα ισότροπο υλικό (όπως το συνηθισμένο γυαλί) τα τρία στοιχεία της διαγωνίου είναι ίδια και, με την παρουσία μαγνητικού πεδίου κατά τον άξονα  $z$ , υπάρχει ένα μη μηδενικό μη διαγώνιο στοιχείο  $\epsilon'$ , το οποίο ενώνει τις  $x$  και  $y$  συνιστώσες του οπτικού πεδίου  $E$ , το οποίο είναι

$$\begin{aligned} \epsilon & & \epsilon' & 0 \\ \epsilon &= -\epsilon' & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \epsilon \end{aligned}$$

Γενικά τα  $\epsilon$  και  $\epsilon'$  εξαρτώνται από το μήκος κύματος αλλά για μια στενή περιοχή μηκών κύματος θα μπορούσαν να θεωρηθούν σαν σταθερές. Σε ένα διαφανές υλικό, όπου δεν υπάρχει οπτική απορροφητικότητα, το  $\epsilon$  είναι πραγματικό και το  $\epsilon'$  φανταστικό. Παρόλα αυτά, στη γενικότερη περίπτωση ενός απορροφητικού MO υλικού, το  $\epsilon$  και το  $\epsilon'$  μπορούν να είναι πολύπλοκοι αριθμοί. Για τα διαμαγνητικά και παραμαγνητικά μέσα, το  $\epsilon'$  είναι ανάλογο του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$ , ενώ για τα σιδηρομαγνητικά και αντισιδηρομαγνητικά υλικά η ιδιοστροφορμή σύζευξης είναι η κυρίαρχη πηγή της MO αλληλεπίδρασης, κάνοντας το  $\epsilon'$  ανάλογο της μαγνήτισης  $M$  του μέσου. Αφού  $\mathbf{B}=\mathbf{H}+4\pi\mathbf{M}$  (σε μονάδες CGS) συμπεραίνουμε ότι το πεδίο  $B$  εντός του μέσου είναι η πηγή των MO φαινομένων.

Όταν μια πολωμένη ακτίνα φωτός διαδίδεται σε ένα μέσο κατά τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου  $B$ , το υλικό αλληλεπιδρά με το δεξιά και αριστερά πολωμένο [right-circularly polarized (RCP), left-circularly polarized (LCP)] μέρος της ακτίνας με διαφορετικό δείκτη διάθλασης:

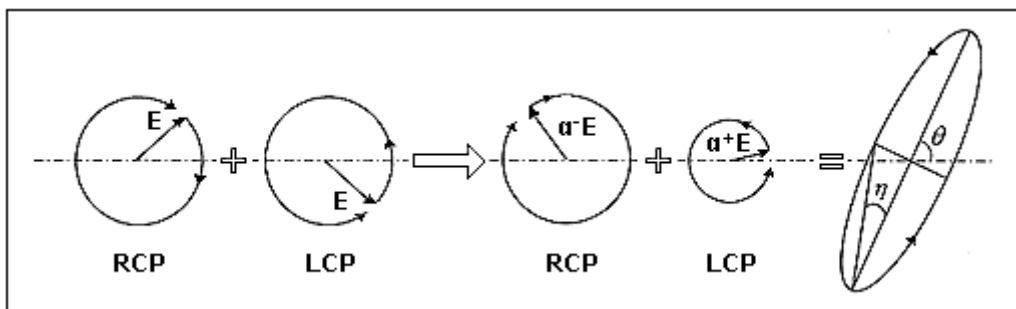
$$n^{\pm}(\epsilon \pm i\epsilon')^{1/2} \quad (2.3)$$

Για γραμμικά πολωμένο φως που διασχίζει το μήκος  $L$  του υλικού υπό την επήρεια του πεδίου  $B$ , τα δύο κυκλικά πολωμένα μέρη «νιώθουν» μια σχετική διαφορά φάσης:

$$\Delta\Phi = 2\pi L(n^+n^-) / \lambda \quad (2.4)$$

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18, η αλλαγή της σχετικής φάσης μεταξύ των RCP και LCP ισοδυναμεί με μια περιστροφή του επιπέδου κατά την γωνία Faraday:

$$\theta_F = \frac{1}{2}\Delta\Phi \quad (2.5)$$

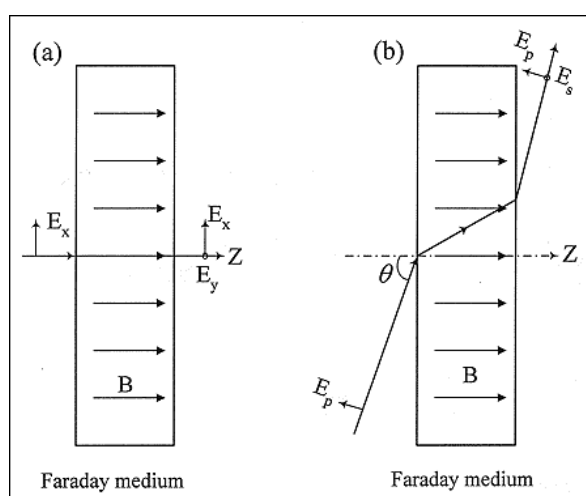


**ΣΧΗΜΑ 2.18:** Μια γραμμικά πολωμένη ακτίνα φωτός μπορεί να θεωρηθεί ως ο συνδυασμός δύο ίσων αλλά αντίθετα κυκλικά πολωμένων ακτίνων. Κατά το πέρασμα μέσα από μια κάθετα μαγνητισμένη πλάκα υλικού με κανονική πρόσπτωση, τα δύο κυκλικά πολωμένα μέρη «νιώθουν» διαφορετικούς δείκτες διάθλασης, και έτσι κάθε ένα αναδύεται από το μέσο με διαφορετική φάση και πλάτος. Τα πλάτη των αναδυόμενων ακτίνων μπορούν να θεωρηθούν ως  $a^+$  και  $a^-$  και η διαφορά φάσης τους ως  $\Delta\Phi$ . Ο συνδυασμός των αναδυόμενων κυκλικά πολωμένων καταστάσεων αποδίδει ελλειπτική πόλωση. Η γωνία περιστροφής του μεγάλου άξονα της ελλειψης από τον οριζόντιο άξονα (δηλαδή τον άξονα της διεύθυνσης της γραμμικής πόλωσης) δίνεται ως  $\theta=(1/2)\Delta$  και η ελλειπτικότητα  $\eta$  ως  $\tan\eta=(a^+-a^-)/(a^++a^-)$ .

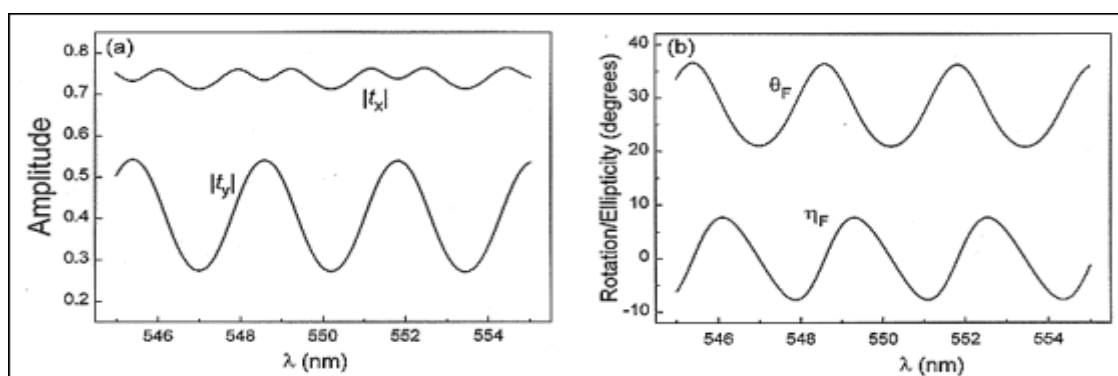
Συγκεκριμένα μαγνητικά υλικά (π.χ. μαγνητικό ορυκτό πυρίτιο, δηλαδή ο γρανάτης) είναι αρκετά διαφανή ώστε να μεταδώσουν ένα μεγάλο μέρος του φωτός ενώ ταυτόχρονα να παράγουν σχετικά μεγάλη περιστροφή Faraday. Τέτοια υλικά μπορούν να μαγνητιστούν σε μια δοσμένη κατεύθυνση και να διατηρήσουν την μαγνήτιση τους όταν απομακρυνθούν από το μαγνητικό πεδίο. Οπότε, το φαινόμενο Faraday σ' αυτά τα μέσα μπορεί να παρατηρηθεί κατά την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Για  $\lambda=550\text{nm}$ , για παράδειγμα, ένας τυπικός κρύσταλλος βισμούθιου-γρανάτη (bismuth-substituted rare-earth iron garnet) μπορεί να έχει  $\epsilon=5,5+0,25i$  και  $\epsilon'=0,002-0,01i$ . Οι σύνθετοι δείκτες διάθλασης για RCP και LCP είναι τότε  $(n+ik)^+=2,347+0,006i$  και  $(n+ik)^-=2,343+0,005i$ , δίνοντας μια γωνία Faraday  $\theta_F=1,3^\circ$  για πάχος υλικού  $1\mu\text{m}$ . Ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού είναι  $a=4\pi kL/l$ , όπου το  $k$  είναι το φανταστικό μέρος του σύνθετου δείκτη διάθλασης. Για τον παραπάνω γρανάτη, λοιπόν, ισχύει  $a=0,12/\mu\text{m}$ , το οποίο ισοδυναμεί με 1dB απώλειας του φωτός για κάθε  $2\mu\text{m}$  πάχους του κρυστάλλου, δηλαδή αυτός ο γρανάτης προσδίνει  $2,6^\circ$  περιστροφή της πόλωσης για κάθε dB απώλειας του φωτός. Αυτοί οι κρύσταλλοι μπορούν να φτιαχτούν σε μια ποικιλία διαφορετικών παχών από 1-100 $\mu\text{m}$ . Τα παχύτερα κρύσταλλα είναι χρήσιμα σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, όπου οι απώλειες είναι μικρές, αλλά η περιστροφή Faraday μειώνεται, γενικά, όσο αυξάνεται το μήκος κύματος.

### 2.3.2. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ FARADAY ΣΕ ΜΙΑ ΔΙΑΦΑΝΗ ΠΛΑΚΑ

Χάριν της απλότητας αγνοούμε τις επιδράσεις της απορρόφησης στο μέσο Faraday και θεωρούμε μια διαφανή πλάκα μαγνητικού υλικού που έχει ένα πραγματικό  $\epsilon$  και ένα καθαρά φανταστικό  $\epsilon'$ . Έτσι, θεωρούμε μια πλάκα πάχους  $20\mu\text{m}$  να έχει  $\epsilon=5,5$  και  $\epsilon'=0,01i$ . Το υλικό είναι μαγνητισμένο κάθετα στο επίπεδο της επιφάνειάς του, και μια γραμμικά πολωμένη ακτίνα του φωτός (ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του άξονα  $x$  με κανονική πρόσπτωση μέσω της πλάκας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19(a)). Οι πραγματικές πηγές φωτός, φυσικά, δεν είναι ποτέ τέλεια μονοχρωματικές και, επομένως, υποθέτουμε ένα πεπερασμένο φασματικό εύρος ζώνης για την πηγή φωτός, που καλύπτει ένα εύρος  $\lambda=545-555\text{nm}$ . Το σχήμα 2.20 παρουσιάζει υπολογισμένα διαγράμματα των μεταδιδόμενων ευρών,  $|t_x|$  και  $|t_y|$ , καθώς επίσης και τις περιστροφές πόλωσης και ελλειπτικές γωνίες,  $\theta_F$  και  $\eta_F$ , ανά μήκος κύματος. Λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων στις μπροστινές και οπίσθιες απόψεις της πλάκας αυτές οι λειτουργίες διαφέρουν περιοδικά με το  $\lambda$ . (Τα ίδια παρασιτικά φαινόμενα είναι αρμόδια για τις μη μηδενικές τιμές του  $\eta_F$ , οι οποίες ειδάλλως θα ήταν απύσες σε ένα διαφανές μέσο). Η καθαρή γωνία περιστροφής Faraday είναι η μέση τιμή της  $\theta_F$  ανάλογα με το σχετικό εύρος μηκών κύματος, αλλά πρέπει να λάβουμε υπόψη, επίσης, και το γεγονός ότι η εξαρτώμενη από το μήκος κύματος προκύπτουσα πόλωση μπορεί να προκαλέσει ένα ορισμένο ποσό αποπόλωσης στην προκύπτουσα ακτίνα. Η περιστροφή Faraday σε συνδυασμό με το φασματικό εύρος ζώνης της πηγής φωτός προκαλεί έτσι τη μερική αποπόλωση ως άμεση συνέπεια των παρεμβολών κατά τις πολλαπλές αντανακλάσεις.



**ΣΧΗΜΑ 2.19:** Επίδραση Faraday στην πολική γεωμετρία. (α) Περνώντας μέσα από μια πλάκα μαγνητικού υλικού, μια γραμμικά πολωμένη ακτίνα φωτός με το ηλεκτρικό πεδίο της κατά μήκος του άξονα  $x$  αποκτά μια συνιστώσα της πόλωσης κατά μήκος του άξονα  $y$ . Οι γραμμές του πεδίου  $B$  που φαίνονται μέσα στο μέσο αντιπροσωπεύουν είτε ένα εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο είτε την εγγενή μαγνήτιση του μέσου. (β) Το φαινόμενο παρατηρείται επίσης στην πλάγια πρόσπτωση. Παρουσιάζεται εδώ μια  $p$ -πολωμένη προσπίπτουσα ακτίνα, η οποία αποκτά μια συνιστώσα  $s$  κατά τη μετάδοση μέσω του μαγνητικού μέσου. (Εάν η προσπίπτουσα ακτίνα ήταν  $s$ -πολωμένη, η μαγνητο-οπτικά παραγόμενη πόλωση θα ήταν στην κατεύθυνση  $p$ ). Γενικά, αν αντιστρέψουμε το πεδίο  $B$  από  $+Z$  σε  $-Z$ , η μαγνητο-οπτικά παραγόμενη συνιστώσα αλλάζει φορά.

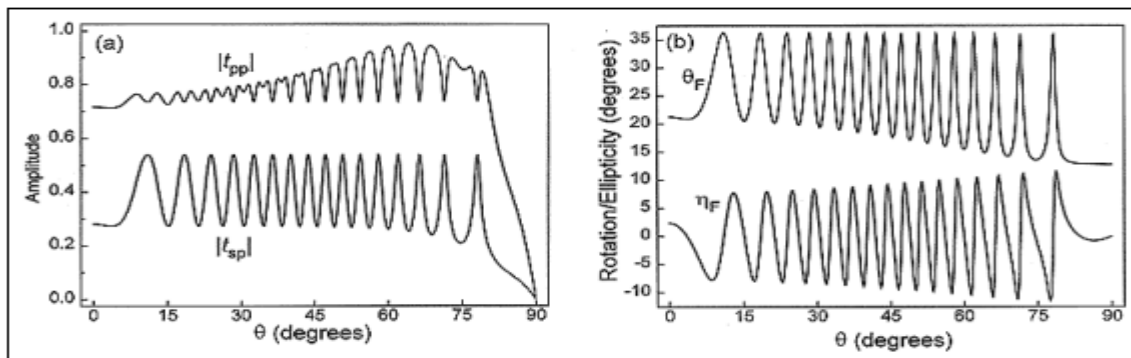


**ΣΧΗΜΑ 2.20:** Ένα επίπεδο κύμα, πολωμένο γραμμικά κατά μήκος του άξονα  $x$ , προσπίπτει κανονικά σε μια πλάκα πάχους  $20\mu\text{m}$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19(a). Η πλάκα είναι μαγνητισμένη κατά μήκος του άξονα  $z$ . (α) Διαγράμματα των  $|t_x|$  και  $|t_y|$ , τα οποία είναι οι μεταδιδόμενες συνιστώσες της πόλωσης κατά μήκος των  $x$  και  $y$  αξόνων, σαν συνάρτηση του  $\lambda$ . (β) Διαγράμματα της γωνίας περιστροφής της πόλωσης  $\theta_F$  και της ελλειπτικότητας  $\eta_F$  προς το  $\lambda$ .



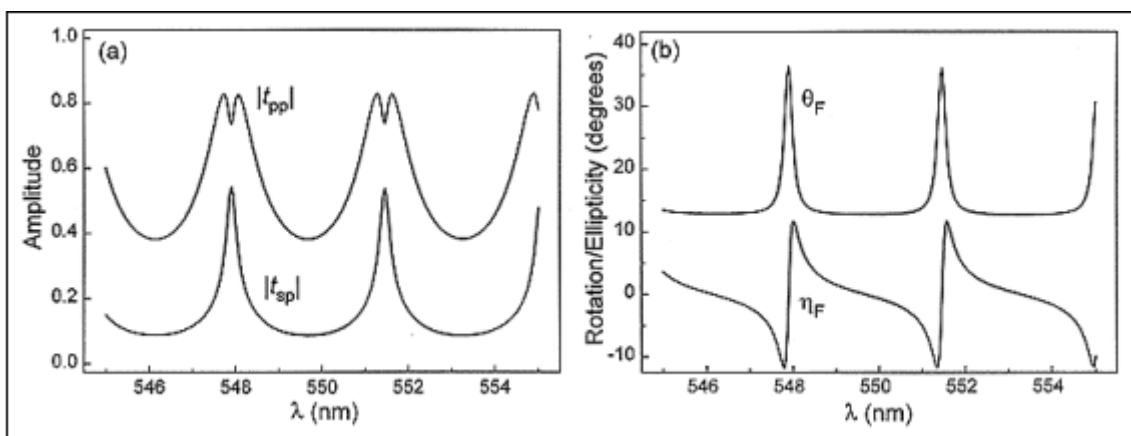
### 2.3.3. ΠΛΑΓΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ

Το σχήμα 2.21 παρουσιάζει τα μεταδιδόμενα πλάτη και γωνίες πόλωσης προς την γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  στην περίπτωση μιας πλάκας πάχους  $20\mu\text{m}$ , μαγνητισμένη κατά τον άξονα  $z$  όπου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19(b), ένα  $p$ -πολωμένο επίπεδο κύμα με μοναδικό μήκος κύματος  $\lambda=550\text{nm}$  προσπίπτει πάνω στην πλάκα. Οι ταλαντώσεις στα μεταδιδόμενα πλάτη / γωνίες πόλωσης προκαλούνται από τις παρεμβολές από τις πολλαπλά ανακλώμενες ακτίνες στις μπροστινές και οπίσθιες όψεις της πλάκας. Εκτός από τα φαινόμενα παρεμβολών, η επίδραση Faraday δεν παρουσιάζει εξασθένηση με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Ο λόγος είναι ότι, ενώ η κατεύθυνση της διάδοσης της ακτίνας παρεκκλίνει όλο και περισσότερο από την κατεύθυνση του πεδίου  $B$ , ταυτόχρονα αυξάνεται η απόσταση διάδοσης, διατηρώντας την αλληλεπίδραση μεταξύ του μαγνητικού υλικού και της ακτίνας σταθερή.



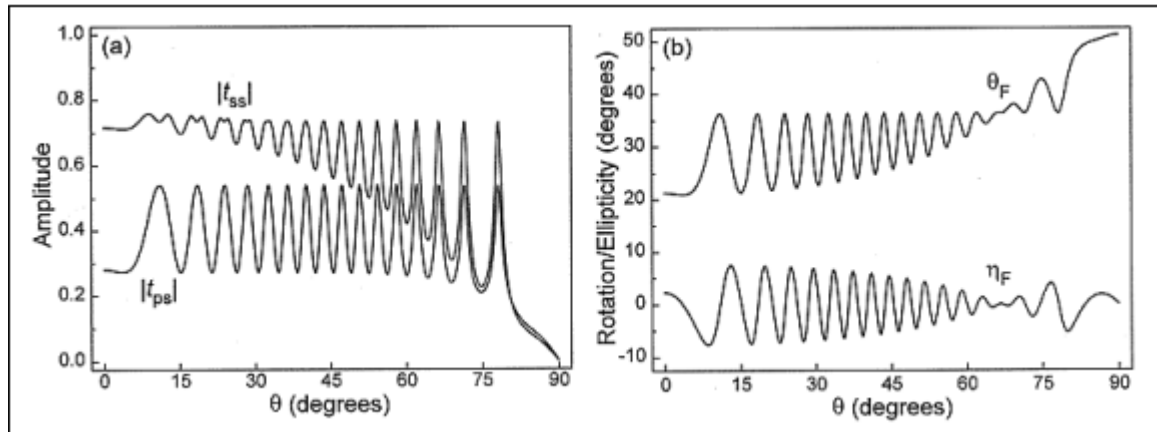
**ΣΧΗΜΑ 2.21:** Ένα  $p$ -πολωμένο επίπεδο κύμα ( $\lambda = 550\text{nm}$ ) προσπίπτει με πλάγια γωνία  $\theta$  σε μια πλάκα πάχους  $20\mu\text{m}$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19(β). Η πλάκα είναι μαγνητισμένη κατά μήκος του άξονα  $z$ . (α) Διαγράμματα των  $|t_{pp}|$  και  $|t_{sp}|$ , τα οποία είναι οι μεταδιδόμενες συνιστώσες της πόλωσης κατά τις κατευθύνσεις  $p$  και  $s$ , σαν συνάρτηση του  $\theta$ . (β) Διαγράμματα της γωνίας περιστροφής της πόλωσης  $\theta_F$  και της ελλειπτικότητας  $\eta_F$  προς το  $\theta$ .

Το σχήμα 2.22 παρουσιάζει την περίπτωση πλάγιας πρόσπτωσης  $\theta=85^\circ$  στην ίδια πλάκα με πριν στο εύρος μηκών κύματος από  $\lambda=545-555\text{nm}$ . Όπως και στην περίπτωση της κανονικής πρόσπτωσης, που απεικονίζεται στο σχήμα 2.20, σημειώνουμε μια σημαντική διαφορά στις γωνίες Faraday / πλάτη μέσα σε αυτήν την στενή περιοχή μηκών κύματος. Αν και η ακτίνα μέσα στην πλάκα ταξιδεύει με  $\sim 25^\circ$  σχετικά με την κατεύθυνση μαγνήτισης του υλικού, η μέγιστη επίδραση του Faraday όπως εξηγείται από το  $|t_{sp}|$  είναι η ίδια όπως στην κανονική πρόσπτωση, επειδή η απόσταση διάδοσης προσαρμόζεται αντίστοιχα. Η κατά μήκος κύματος υπολογιζόμενη περιστροφή Faraday μπορεί να είναι χαμηλότερη σε μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης, αλλά αυτό είναι ακριβώς μια συνέπεια των παρεμβολών, δεν προκαλείται από τη μείωση της εγγενούς οπτικής δραστηριότητας της πλάκας. Εάν, παραδείγματος χάριν, οι όψεις της πλάκας είναι επικαλυμμένες με μη ανακλαστικά υλικά ή εάν η ακτίνα εισάγεται και βγαίνει μέσω σφαιρικών επιφανειών που έχουν ίδιους δείκτες διάθλασης, τότε οι πολλαπλές ανακλάσεις εξαλείφονται και η περιστροφή Faraday γίνεται ανεξάρτητη από τη γωνία πρόσπτωσης.



**ΣΧΗΜΑ 2.22:** Ένα  $p$ -πολωμένο επίπεδο κύμα προσπίπτει με γωνία  $\theta=85^\circ$  στην πλάκα που περιγράφεται στο σχήμα 2.21. (α) Διαγράμματα των  $|t_{pp}|$  και  $|t_{sp}|$ , τα οποία είναι οι μεταδιδόμενες συνιστώσες της πόλωσης κατά τις κατευθύνσεις  $p$  και  $s$ , σαν συνάρτηση του  $\lambda$ . (β) Διαγράμματα της γωνίας περιστροφής της πόλωσης  $\theta_F$  και της ελλειπτικότητας  $\eta_F$  προς το  $\lambda$ .

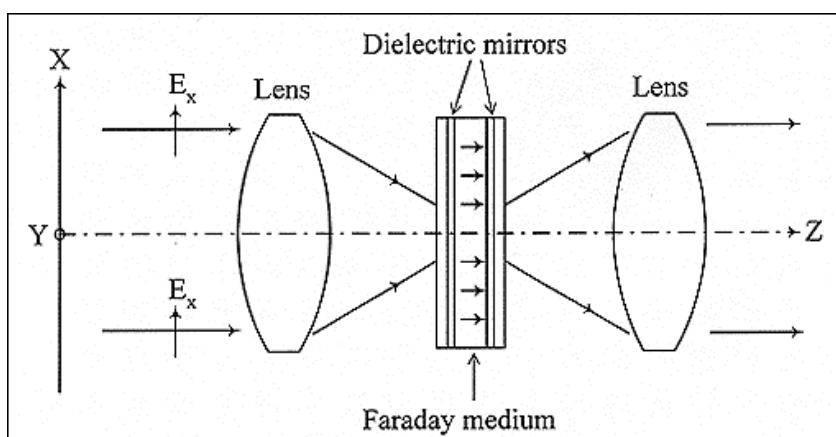
Οι ανωτέρω συζητήσεις περιορίστηκαν στην περίπτωση  $p$ -πολωμένης προσπίπτουσας ακτίνας, αλλά τα συμπεράσματα παραμένουν έγκυρα και για το  $s$ -πολωμένο φως επίσης. Παραδείγματος χάριν, το σχήμα 2.23 είναι το αντίστοιχο του σχήματος 2.21, που παρουσιάζει τα μεταδιδόμενα πλάτη και γωνίες πόλωσης προς τη γωνία της πρόσπτωσης για μια  $s$ -πολωμένη προσπίπτουσα ακτίνα. Η μαγνητο-οπτικά παραγόμενη συνιστώσα της πόλωσης  $t_{ps}$  στο σχήμα 2.23 είναι ίδια με  $t_{sp}$  στο σχήμα 2.21. Αυτό είναι ένα σημαντικό και απολύτως γενικό αποτέλεσμα, που δείχνει ότι η ποσότητα του φωτός που μετατρέπεται από μια πόλωση σε άλλη είναι ανεξάρτητο από την κατάσταση της προσπίπτουσας πόλωσης.



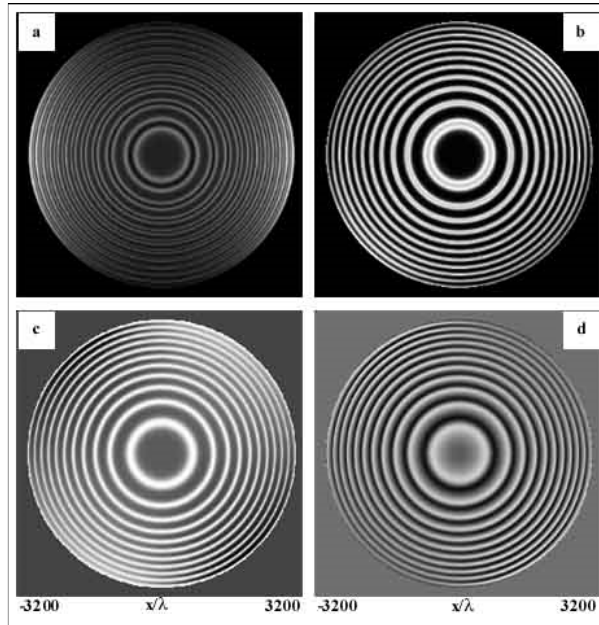
**ΣΧΗΜΑ 2.23:** Όπως το σχήμα 2,21, εκτός από το ότι η ακτίνα πρόσπτωσης στην παρούσα περίπτωση είναι  $s$ -πολωμένη.

#### 2.3.4. ΜΕΣΟ FARADAY ΣΕ ΕΝΑ ΑΝΤΗΧΕΙΟ FABRY - PEROT

Επειδή το φαινόμενο Faraday ενισχύεται ως αποτέλεσμα της διάδοσης της ακτίνας πέρα δώθε μέσα σε ένα μαγνητισμένο μέσο, είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί η αύξηση της επίδρασης του Faraday σε ένα αντηχείο Fabry- Perot. Το σχήμα 2.24 παρουσιάζει το διάγραμμα ενός συστήματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει τέτοια αύξηση για μια σειρά των γωνιών της πρόσπτωσης. Ο πρώτος φακός ( $NA=0.8$ ) στρέφει μια γραμμικά πολωμένη ακτίνα του φωτός επάνω στο αντηχείο Fabry- Perot, και ο δεύτερος, ίδιος φακός ευθυγραμμίζει τη μεταδιδόμενη ακτίνα. Για ένα κομμάτι πάχους  $20\mu\text{m}$  διαφανές μαγνητικού υλικού που τοποθετείται μεταξύ ενός ζευγαριού διηλεκτρικών καθρεφτών, το σχήμα 2.25 παρουσιάζει διαγράμματα των γωνιών έντασης και πόλωσης στην έξοδο του οπτικού αντηχείου. Αυτό το σχήμα δείχνει ότι οι κροσσοί μέγιστης μετάδοσης αντιστοιχούν επίσης στις θέσεις της μέγιστης περιστροφής πόλωσης. Οι μέγιστες και ελάχιστες γωνίες περιστροφής στο σχήμα 2.25(c) είναι  $+63^\circ$  και  $-23^\circ$ , αντίστοιχα, μεγαλύτερες από τις περιστροφές που παρατηρήθηκαν για τη σκέτη πλάκα. Επίσης παρατηρούμε στο σχήμα 2.25(c,d) την ασυμμετρική φύση των γωνιών πόλωσης στο πρώτο και τρίτο τεταρτοκύκλιο αφ' ενός και στο δεύτερο και τέταρτο τεταρτοκύκλιο αφ' ετέρου.



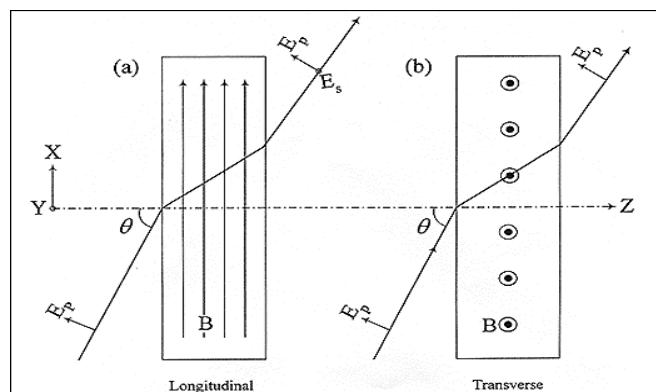
**ΣΧΗΜΑ 2.24:** Ένα μέσο (υλικό) Faraday στο αντηχείο Fabry-Perot τοποθετείται σε έναν συγκλίνοντα κώνω του φωτός. Το προσπίπτων επίπεδο κύμα είναι γραμμικά πολωμένο κατά μήκος του άξονα  $x$ , και ο  $0.8NA$  εστιακός φακός είναι απαλλαγμένος από τις παρεκκλίσεις. Το  $20\mu\text{m}$  πάχους μέσο Faraday ( $\epsilon=5,5$ ,  $\epsilon' = 0.01i$ ) είναι ομοιόμορφα μαγνητισμένο κατά μήκος του άξονα  $z$ . Οι καθρέφτες επιστρώνονται στις μπροστινές και πίσω πλευρές της πλάκας Faraday, κάθε ένας αποτελείται από 10 εναλλασσόμενα στρώματα με υψηλό δείκτη ( $n=2$ ) και χαμηλό δείκτη ( $n=1.5$ ) διηλεκτρικά πάχους  $\lambda/4$ . Ο φακός ευθυγράμμισης είναι πανομοιότυπος με το εστιακό φακό και η προκύπτουσα ακτίνα παρατηρείται στην έξοδο του οπτικού αντηχείου.



**ΣΧΗΜΑ 2.25:** Δείγματα έντασης και πόλωσης στην έξοδο του φακού ευθυγράμμισης του σχήματος 2.24(a). Κατανομή έντασης της προκύπτουσας Χ-πολωμένης συνιστώσας. Οι φωτεινοί κροσσοί δείχνουν τις περιοχές όπου οι συνθήκες συντονισμού αντήχησης ικανοποιούνται και το φως περνάει μέσω του αντηχείου. (b) Κατανομή έντασης του προκύπτουσας Υ-πολωμένης συνιστώσας. Οι φωτεινοί κροσσοί συμπίπτουν με εκείνους του (a), δείχνοντας ότι οι συνθήκες συντονισμού για τη συνεπαγόμενη πόλωση είναι οι ίδιες με εκείνες για τη μαγνητο-οπτική επαγόμενη πόλωση. (c) Η γωνία περιστροφής της πόλωσης  $\theta_F$  της προκύπτουσας ακτίνας φαίνεται στη γκριζα περιοχή. Το εύρος των τιμών του  $\theta_F$  είναι  $-23^\circ$  (μαύρο) με  $+63^\circ$  (άσπρο). (d) Η ελλειπτικότητα της πόλωσης  $\eta_F$  της προκύπτουσας ακτίνας φαίνεται στη γκριζα περιοχή. Το εύρος των τιμών του  $\eta_F$  είναι  $-32^\circ$  (μαύρο) με  $+42^\circ$  (άσπρο).

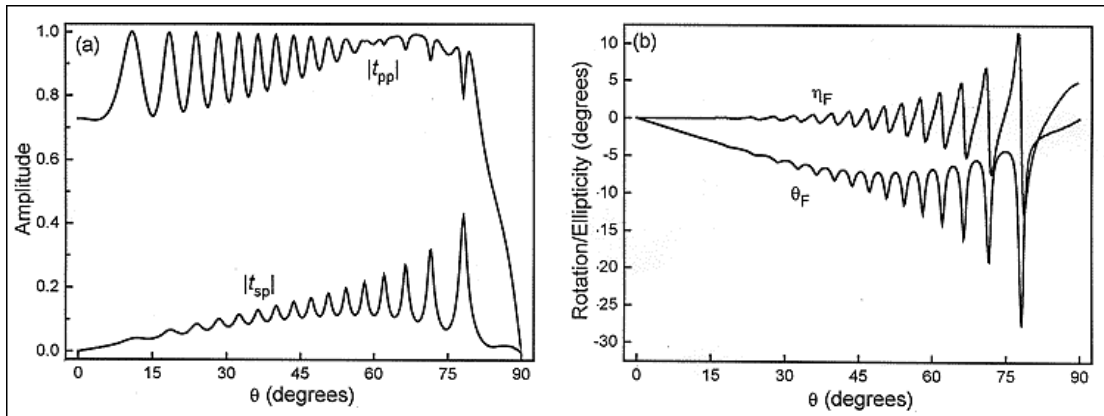
### 2.3.5. ΔΙΑΜΗΚΕΣ ΚΑΙ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Όταν η κατεύθυνση πεδίου B είναι στο επίπεδο της πλάκας καθώς επίσης και στο επίπεδο της γωνίας πρόσπτωσης, όπως στο σχήμα 2.26(a), παρατηρείται το διάμηκες φαινόμενο Faraday. Σε αυτήν την περίπτωση το  $\epsilon'$  καταλαμβάνει τη θέση του  $\epsilon_{yz}$  στο διηλεκτρικό ταχυστή. Η εγκάρσια επίδραση εμφανίζεται όταν το πεδίο B, είναι κάθετο στο επίπεδο της γωνίας πρόσπτωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.26(b). Σε αυτήν την περίπτωση το  $\epsilon'$  καταλαμβάνει τη θέση του  $\epsilon_{xz}$ .



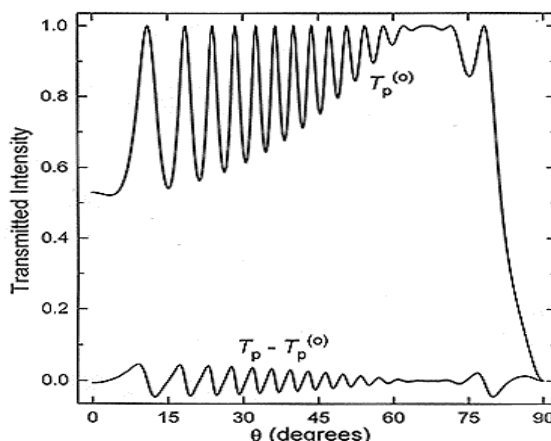
**ΣΧΗΜΑ 2.26:** (α) Το διάμηκες φαινόμενο Faraday παρατηρείται όταν η κατεύθυνση του πεδίου B μέσα στην πλάκα του υλικού είναι παράλληλη και στην επιφάνεια της πλάκας και στο επίπεδο της πρόσπτωσης. Η περιστροφή της πόλωσης εμφανίζεται σε αυτήν την περίπτωση μόνο στην πλάγια πρόσπτωση, όπου, επάνω στη μετάδοση, μια p-πολωμένη ακτίνα αποκτά μια s-συνιστώσα και αντιστρόφως. Εάν η κατεύθυνση του B αντιστραφεί, η μαγνητο-οπτικά παραγόμενη συνιστώσα της πόλωσης θα αλλάξει πρόσημο. (β) Η εγκάρσια επίδραση εμφανίζεται όταν βρίσκεται το πεδίο B βρίσκεται στο επίπεδο της κάθετου δειγμάτων του επιπέδου της πρόσπτωσης. Η αλληλεπίδραση MO εμφανίζεται σε αυτήν την περίπτωση μόνο όταν η συνεπαγόμενη ακτίνα είναι p-πολωμένη. Ακόμα και τότε που δεν υπάρχει καμία περιστροφή πόλωσης, μια αλλαγή στο μέγεθος του μαγνητικού πεδίου B προκαλεί μια μικρή αλλαγή στο μέγεθος του μεταδοδόμενου p-φωτός. Η εγκάρσια επίδραση είναι μικρή και δεν είναι διπολική, με αποτέλεσμα η αντιστροφή της κατεύθυνσης του B να μην έχει επιπτώσεις στην προκύπτουσα ακτίνα.

Στη διαμήκη περίπτωση σε κανονική πρόσπτωση καμία περιστροφή πόλωσης δεν εμφανίζεται, αλλά η επίδραση αρχίζει να παρουσιάζεται με μια αυξανόμενη γωνία πρόσπτωσης. Για ένα p-πολωμένο κύμα ( $\lambda=550\text{nm}$ ) πλάγια σε μια πλάκα πάχους  $20\mu\text{m}$  ενός μαγνητικού υλικού, το σχήμα 2.27 παρουσιάζει υπολογισμένα εύρη του μεταδιδόμενου p και s πολωμένου φωτός καθώς επίσης και τις γωνίες περιστροφής και ελλειπτικότητα προς τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ . Θα μπορούσαν εύκολα να υπολογιστούν παρόμοια αποτελέσματα για μια s πολωμένη προσπίπτουσα ακτίνα επίσης. Και στις δύο περιπτώσεις το αποτέλεσμα MO είναι διπολικό, με αποτέλεσμα η αντιστροφή της κατεύθυνσης του πεδίου B να αντιστρέφει τα  $\theta_F$  και  $\eta_F$ . Επιπλέον, όπως στην αντίθετη περίπτωση που συναντήσαμε νωρίτερα, η μαγνητο-οπτικά παραγόμενη συνιστώσα της πόλωσης αποδεικνύεται η ίδια και για τις δύο κατευθύνσεις της προσπίπτουσας πόλωσης, δηλαδή  $t_{sp} = t_{ps}$ .



**ΣΧΗΜΑ 2.27:** Το διάμηκες φαινόμενο Faraday, προκύπτει όταν ένα p-πολωμένο επίπεδο κύμα ( $\lambda=550\text{nm}$ ) προσπίπτει πλάγια με γωνία  $\theta$  σε μια  $20\mu\text{m}$  πάχους πλάκα. Η πλάκα μαγνητίζεται κατά τον άξονα x, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.26(a). (a) Μεταδιδόμενα πλάτη  $|t_{pp}|$  and  $|t_{sp}|$  προς  $\theta$ . (b) Γωνία περιστροφής πόλωσης  $\theta_F$  και ελλειπτικότητα  $\eta_F$  προς  $\theta$ .

Η εγκάρσια επίδραση είναι πολύ διαφορετική από τη πολική και τη διαμήκη επίδραση. Για το s-πολωμένο φως, όπου το ηλεκτρικό πεδίο του φωτός είναι παράλληλο στην κατεύθυνση του πεδίου B, δεν υπάρχει MO επίδραση, αλλά για το p-πολωμένο φως το μέσο εμφανίζει ένα αποτελεσματικό δείκτη διάθλασης  $n=[\epsilon+(\epsilon'/\epsilon)]^{1/2}$ . Κατά συνέπεια κατά την εγκάρσια περίπτωση ούτε η s ούτε η p πολωμένες ακτίνες υποβάλλονται σε περιστροφή πόλωσης, αλλά το μέγεθος του μεταδιδόμενου p-φωτός παρουσιάζει μικρή εξάρτηση στη μαγνήτιση, η οποία είναι,  $T_p=|t_p|^2$  και καθίσταται συνάρτηση της ισχύος του B πεδίου. Η εγκάρσια επίδραση δεν είναι διπολική, έτσι μεταβάλλοντας την κατεύθυνση του πεδίου B από +Y σε -Y δεν αλλάζει το μέγεθος του  $T_p$ . Για πλάκες διαφανούς υλικού πάχους  $20\mu\text{m}$  με μεγάλο συντελεστή MO ( $\epsilon=5.5$ ,  $\epsilon'=0.1$ ) το σχήμα 2.28 δείχνει υπολογισμένη παράσταση του  $T_p^{(0)}$  (για παράδειγμα, μετάδοση λόγω της έλλειψης του μαγνητικού πεδίου B, όταν  $\epsilon'=0$ ) και  $\Delta T_p = T_p - T_p^{(0)}$  προς τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι  $\Delta T_p=0$  γύρω από τη γωνία Brewster  $\theta_B = 66.9^\circ$ , όπου η εκμηδένιση της ανακλαστικότητας της επιφάνειας έχει ως αποτέλεσμα ελάχιστες επιδράσεις παρεμβολών.



**ΣΧΗΜΑ 2.28:** Το εγκάρσιο φαινόμενο Faraday, προκύπτει όταν ένα p-πολωμένο επίπεδο κύμα ( $\lambda=550\text{nm}$ ) προσπίπτει πλάγια με γωνία  $\theta$  σε μια πλάκα πάχους  $20\mu\text{m}$ . Η πλάκα ( $\epsilon=5.5$ ) είναι μαγνητισμένη κατά μήκος του άξονα y, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.26(b). Ελλείψει του πεδίου B,  $\epsilon'=0$ , και η μετάδοση της πλάκας για μια p-πολωμένη προσπίπτουσα ακτίνα δείχνονται από το  $T_p^{(0)}$ . Όταν ένα ισχυρό πεδίο B παρουσιάζεται (αντίστοιχα το  $\epsilon'=0.1$  σε αυτήν την περίπτωση), η μετάδοση αλλάζει σε  $T_p$ . Παρουσιάζεται εδώ η διαφορική εξίσωση  $\Delta T_p = T_p - T_p^{(0)}$  ως συνάρτηση του  $\theta$ .

#### 2.4. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FARADAY (IFE)

Η αλματώδης ανάπτυξη της ενοποιημένης θεωρίας πεδίων έχει φτάσει σε ένα τέτοιο επίπεδο έως τώρα, έτσι ώστε απλές τελικές περιγραφές να δίνονται από τις πρώτες αρχές θεμελιωδών φαινομένων όπως το αντίστροφο φαινόμενο Faraday (Inverse Faraday Effect - IFE) και το φαινόμενο Aharonov Bohm (Aharonov Bohm Effect). Το αντίστροφο φαινόμενο Faraday είναι ουσιαστικά η μαγνήτιση οποιουδήποτε υλικού από μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία οποιασδήποτε συχνότητας η οποία έχει κάποιο βαθμό κυκλικής πόλωσης. Είναι αυστηρά αναπαραγόμενο και επαναλαμβανόμενο. Χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση σε μικροσκοπικό επίπεδο, η μαγνήτιση ενός διαφανούς μέσου λόγω του αντιστρόφου φαινομένου Faraday προσδιορίζεται ως αποτέλεσμα μικροσκοπικών σωληνοειδών ρευμάτων που παράγονται από ένα υψηλής συχνότητας, κυκλικά πολωμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η επεξεργασία σε μικροσκοπικό επίπεδο παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την εξάρτηση της συχνότητας με το αντίστροφο φαινόμενο Faraday. Αρχικά τεκμηριώθηκε θεωρητικά από τον Piekara και τον Kielich σε άρθρα στο Acta Physica Polonica από τα μέσα μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ξαναδιατυπώθηκε με ένα διαφορετικό τρόπο από τον Pershan στο Harvard στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και παρατηρήθηκε για πρώτη φορά πειραματικά περίπου το 1965 από τους Van Der Ziel, Pershan και Malmstorm στο Harvard, για διάφορα υλικά σε ορατές συχνότητες. Επαληθεύτηκε πειραματικά σε plasma σε συχνότητα 3GHz το 1970 από τους Deschamps, Fitairie και Lagoutte. Η θεωρία ενοποιημένου πεδίου του Evans (Evans united field theory) έδειξε για πρώτη φορά ότι το αντίστροφο φαινόμενο Faraday είναι η θεμελιώδεις υπογραφή της περιστροφής του ίδιου του χωροχρόνου, ένα απλό αλλά πανίσχυρο επακόλουθο της αντικειμενικής φυσικής (γενική σχετικότητα).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

### 3.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ FARADAY

#### 3.1.1. Η ΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΟΛΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LCD

**Υγρός κρύσταλλος:** Είναι όρος που χρησιμοποιείται για να αποδώσει την ενδιάμεση, μεταξύ στερεού και ισότροπου υγρού, φυσική κατάσταση ανισότροπου ρευστού, την οποία αποκτούν με την τήξη ή τη διάλυση τους πολλές οργανικές κρυσταλλικές ουσίες.

**Δημιουργία, δομή και ιδιότητες των υγρών κρυστάλλων:** Κατά την αποδιάταξη που προκαλεί η τήξη σε μοριακούς κρυστάλλους μακρομορίων πολικών οργανικών ουσιών, τα επιμήκη ραβδόμορφα μόρια τους, σε πολλές περιπτώσεις, εξακολουθούν και στη ρευστή κατάσταση να διατηρούν μέρος της κρυσταλλικής τάξης, διατεταγμένα σε συνδυασμούς παράλληλων μορίων. Το υγρό στη φάση αυτή είναι θολό και διπλοθλαστικό και η ρευστότητα του εξαρτάται από τη φύση του. Με την αύξηση της θερμοκρασίας τα μόρια αποκτούν μεγαλύτερη ενέργεια, αποσπώνται από το υποτυπώδες κρυσταλλικό πλέγμα και κινούνται ελεύθερα. Όταν όλα τα μόρια αποκτήσουν ελεύθερη κίνηση, το ρευστό αποκτά πλέον τα χαρακτηριστικά ισότροπου υγρού. Με την ψύξη το ισότροπο υγρό μετατρέπεται σε ανισότροπο υγρό κρύσταλλο, ο οποίος, με περαιτέρω ελάττωση της θερμοκρασίας στερεοποιείται στην αρχική κρυσταλλική δομή. Ανάλογο φαινόμενο παρατηρείται κατά τη διάλυση οργανικών κρυσταλλικών ουσιών σε κατάλληλους διαλύτες, για όσες από αυτές διαθέτουν υδρόφιλες ομάδες στα υδατικά τους διαλύματα. Η παρουσία του διαλύτη, σε μικρή σχετικά συγκέντρωση, προκαλεί την καταστροφή του κρυστάλλου έτσι ώστε να αποσπώνται τμήματα του που περιέχουν έναν αριθμό παράλληλα προσανατολισμένων, πολικών, ραβδόμορφων μορίων, προσδίδοντας στο σύστημα ουσίας και διαλύτη τη χαρακτηριστική ανισοτροπία του υγρού κρυστάλλου. Με αύξηση της ποσότητας του διαλύτη αυξάνεται και ο αριθμός των μορίων που κινούνται ανεξάρτητα και ελαττώνεται η ανισοτροπία του συστήματος ωστόσο αυτό μετατραπεί σε ισότροπο διάλυμα. Με την απομάκρυνση του διαλύτη το ισότροπο υγρό αποκτά εκ νέου τις ιδιότητες υγρού κρυστάλλου και τελικά στερεοποιείται. Οι κρύσταλλοι της πρώτης κατηγορίας ονομάζονται θερμοτροπικοί και της δεύτερης λυοτροπικοί. Και οι δύο κατηγορίες περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό οργανικών ουσιών, με κοινό χαρακτηριστικό την ύπαρξη ενός υδρόφοβου κορμού, που έχει συνήθως τη μορφή μακράς αλυσίδας ατόμων άνθρακα και άλλων (αζώτου, οξυγόνου), στην οποία παρεμβάλλονται και αρωματικοί δακτύλιοι, και η οποία καταλήγει σε μια υδρόφιλη ομάδα. Η δομή αυτή προσδίδει στις μακρομοριακές ενώσεις πολικότητα, η οποία ευνοεί τον προσανατολισμό τους κατά παράλληλες δέσμες πολικών μορίων στο τήγμα και στο διάλυμα. Οι θερμοτροπικοί υγροί κρύσταλλοι χωρίζονται σε σμηκτικούς (smectic) και νηματικούς (nematic), υποδιαιρώντας τους τελευταίους σε κανονικούς (normal) νηματικούς και χοληστερικούς (cholesteric) νηματικούς. Οι τελευταίοι οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι, στην πλειονότητα τους, είναι εστέρες της χοληστερόλης.

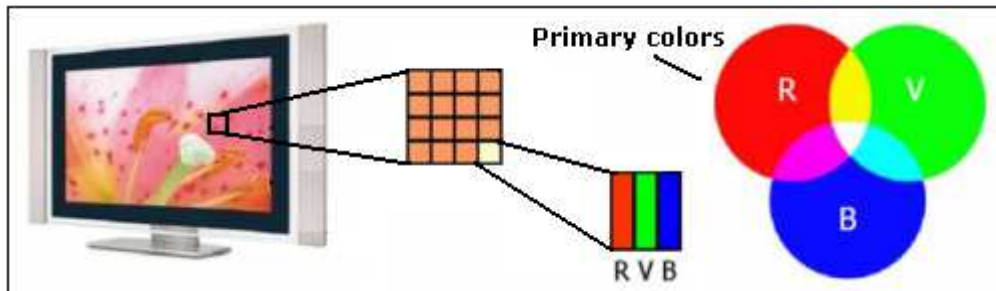
Στους χοληστερικούς υγρούς κρυστάλλους τα μόρια κατανέμονται σε επάλληλα στρώματα, σε ομοιότητα με τους σμηκτικούς, οι άξονες τους όμως δεν σχηματίζουν γωνία με το επίπεδο του στρώματος αλλά βρίσκονται σε αυτό. Τα μόρια κάθε επιπέδου είναι προσανατολισμένα μεταξύ τους, ο προσανατολισμός όμως διαφέρει από επίπεδο σε επίπεδο και η μεταβολή αυτή της κατεύθυνσης των αξόνων είναι σταθερή, προσδίδοντας συνολικά το χαρακτήρα ελικοειδούς δομής (twisted nematic). Η κίνηση των μορίων μέσα στο επίπεδο είναι ελεύθερη, όπως στους κανονικούς νηματικούς, και επομένως οι χοληστερικοί είναι δισδιάστατοι κανονικοί υγροί κρύσταλλοι. Όταν προσπέσει πολωμένο φως στον χοληστερικό κρύσταλλο με κατεύθυνση που σχηματίζει γωνία με τα επάλληλα επίπεδα, το φως θα υποστεί στροφή του επιπέδου πόλωσης, οποία προκαλείται από την ελικοειδή διάταξη των μορίων στα επίπεδα. Με την εφαρμογή ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου κάθετου προς τα επίπεδα, τα μόρια όλων των στρωμάτων προσανατολίζονται προς τις δυναμικές γραμμές του πεδίου και αίρεται η στροφική ικανότητα του υγρού κρυστάλλου.

**Οι οθόνες υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Display - LCD):** Ο όρος "υγρός κρύσταλλος" χρονολογείται από τον προ-προηγούμενο αιώνα, ανακαλύφθηκε το 1888 από τον H. Reinitzer, και έρχεται σε μας όχι μέσω της ηλεκτρονικής, αλλά της βοτανικής. Εντούτοις, δεν ήταν πριν από το 1968 όπου το RCA έγινε ενδιαφέρον σαν φαινόμενο και εφευρέθηκε η πρώτη οθόνη υγρών κρυστάλλων. Το 1969, ο James Fergason ανακάλυψε την επίδραση στριμμένου-νήματος. Αυτό ήταν μια θεμελιώδης ανακάλυψη, δεδομένου ότι όλες οι οθόνες LCD που συμβάδιζαν με αυτόν τον νόμο, ήταν βασισμένες σε αυτήν την αρχή της περιστροφής του επιπέδου της πόλωσης. Το 1973, ο George Gray εφηύρε τον υγρό κρύσταλλο διφαινυλίου, ο οποίος τον κατέστησε ικανό να εφαρμόσει τις λύσεις υγρών κρυστάλλων που ήταν σταθερές υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Και από το 1986, η Nec παρήγαγε τον πρώτο φορητό υπολογιστή με οθόνη υγρών κρυστάλλων. Το 1995, οι οθόνες LCD με μεγάλες διαγώνιους (πάνω από 28", 71cm) άρχισαν να παράγονται.

Οι κατασκευαστές ξεκίνησαν από την αρχή για να απεικονίσουν το πλήρες φάσμα των χρωμάτων, το οποίο ήταν δύσκολο να γίνει. Παρά το σχεδιασμό των σύνθετων εικονοκυττάρων (pixels) ικανών να απεικονίσουν ένα πλήθος σκιάων, κάθε εικονοκύτταρο αποτελείται από τρία υπο-εικονοκύτταρα (sub-pixels), όπου κάθε ένα απεικονίζει ένα από τα βασικά χρώματα: κόκκινο, πράσινο ή μπλε.

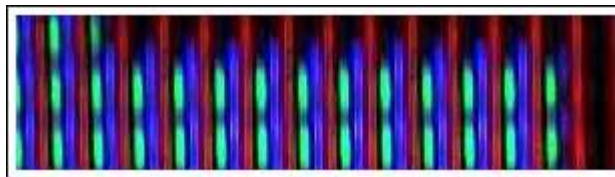


**ΣΧΗΜΑ 3.1:** Οθόνες LCD.



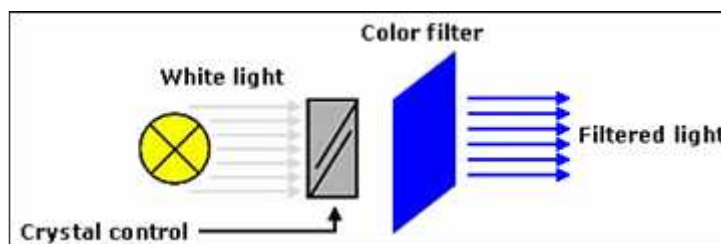
**ΣΧΗΜΑ 3.2:** Βασικά χρώματα στα pixels.

Όταν ο χρήστης βρίσκεται σε μια ορισμένη απόσταση από την οθόνη, δεν είναι ικανός να ξεχωρίσει κάθε sub-pixel, αλλά μόνο τη σύνθεση των τριών. Αυτό το κάνει ικανό να αναπαραγάγει μια ολόκληρη παλέτα χρωμάτων από διαφορετικές συνθέσεις κόκκινου, πράσινου και μπλε. Όλες οι σκιές του γκριζου μπορούν επίσης να αναπαραχθούν, από το απόλυτο μαύρο στο ανοιχτό λευκό, με τη χρήση όλων των τριών αρχικών χρωμάτων σε ίσες ποσότητες. Αναφερόμαστε στα βασικά προσθετικά χρώματα και σύμφωνα με το προσθετικό χρωματικό μοντέλο τα βασικά χρώματα είναι το κόκκινο, πράσινο και μπλε (RGB). Όλες οι σύγχρονες τεχνολογίες απεικόνισης (CRT, LCD, plasma) βασίζονται σε αυτήν την αρχή.



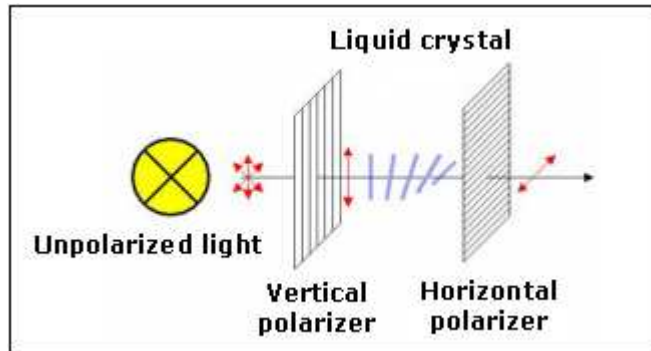
**ΣΧΗΜΑ 3.3:** Εδώ ένα παράδειγμα της εφαρμογής του μοντέλου καθοδικού σωλήνα (CRT). Μπορείτε να δείτε τα χωριστά sub-pixels σε κάθε βασικό χρώμα.

Η κύρια διαφορά μεταξύ του πλάσματος και της τεχνολογίας LCD είναι ότι τα LCD pixels δεν εκπέμπουν οποιοδήποτε φως. Όλες οι ιδιότητες αλλά και όλα τα ελαττώματα της τεχνολογίας προέρχονται από εκείνο το βασικό χαρακτηριστικό.



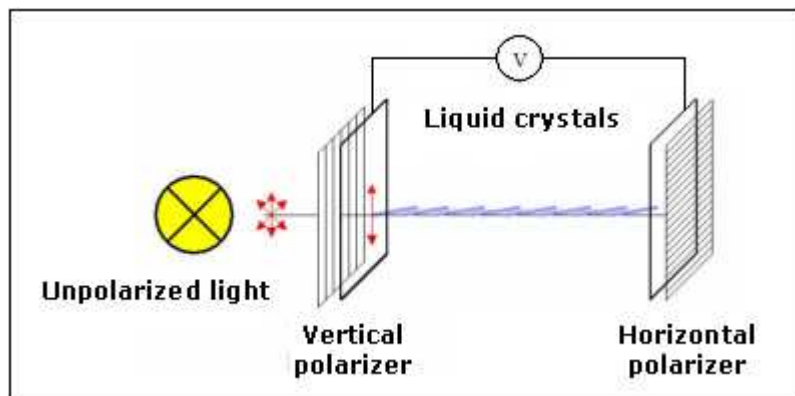
**ΣΧΗΜΑ 3.4**

Όπως με άλλες τεχνολογίες, ένα LCD pixel αποτελείται από τρία sub-pixel στα στοιχειώδη χρώματα. Η αρχή λειτουργίας είναι ενδιαφέρουσα εν τούτοις, η LCD δεν εκπέμπει το φως, αλλά ενεργεί ως διακόπτης και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι οθόνες LCD χρειάζονται λευκό οπίσθιο φωτισμό (backlight). Το φως εκπέμπεται μέσω του backlight, περνά μέσω του υγρού κρυστάλλου και χρωματίζεται έπειτα από ένα φίλτρο. Κάθε sub-pixel έχει την ίδια αρχιτεκτονική, μόνο το χρώμα των φίλτρων αλλάζει ανάλογα με το pixel. Ο υγρός κρύσταλλος κάθε sub-pixel μπορεί να ελεγχθεί ηλεκτρικά όπως μια βαλβίδα. Λίγο πολύ το φως επιτρέπεται να περάσει μέσω του κρυστάλλου για να ελέγξει πόσο κόκκινο, πράσινο και μπλε εκπέμπεται για κάθε pixel. Δείτε πώς αυτός ο διακόπτης φωτός λειτουργεί:



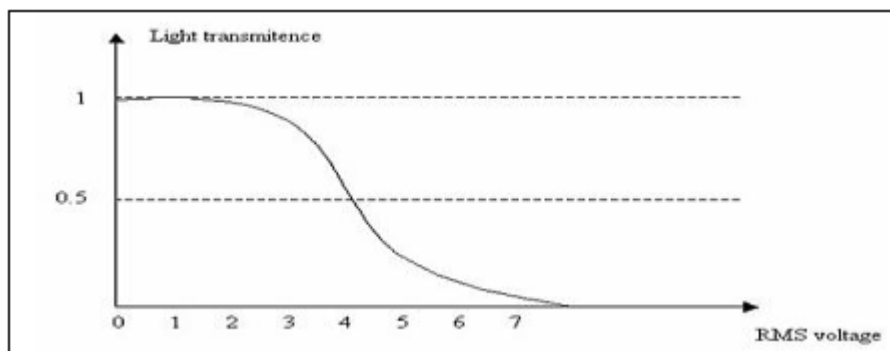
ΣΧΗΜΑ 3.5

Το backlight εκπέμπει φυσικό, μη-πολωμένο, λευκό φως. Η πόλωση του φωτός καθορίζεται από τον προσανατολισμό του διανύσματος ηλεκτρικών πεδίων της. Ένας λαμπτήρας εκπέμπει το μη-πολωμένο φως, έτσι ο ηλεκτρικός τομέας μπορεί να ταξιδέψει σε οποιαδήποτε κάθετη κατεύθυνση στον άξονα της διάδοσης του φωτός. Όταν το φως περνά μέσω ενός πολωτή, το φως που βγαίνει από την άλλη πλευρά προσανατολίζει ένα διάνυσμα ηλεκτρικών πεδίων σε μια γνωστή κατεύθυνση (κατακόρυφος στο παράδειγμά μας). Εάν το φως περνά έπειτα μέσω ενός δεύτερου πολωτή, που είναι κάθετος στον πρώτο (οριζόντιος σε αυτό το παράδειγμα), κανένα φως δεν μπορεί να περάσει διαμέσου. Αλλά εάν τοποθετηθεί ένας υγρός κρύσταλλος μεταξύ των δύο πολωτών, ο κρύσταλλος γυρίζει το επίπεδο της πόλωσης του φωτός για να ευθυγραμμιστεί με το δεύτερο πολωτή, και έπειτα το φως μπορεί να περάσει διαμέσου. Αυτή η φυσική ιδιότητα των υγρών κρυστάλλων είναι αυτό που αποτελεί την επιτυχία τους στις τεχνολογίες οθονών.



ΣΧΗΜΑ 3.6

Τώρα, εάν ένα συνεχές ρεύμα εισάγεται σε κάθε άκρο του υγρού κρυστάλλου, οι κρύσταλλοι προσανατολίζονται με τη διαφορά δυναμικού, όπως και ένας μαγνήτης προσανατολίζεται στο γήινο μαγνητικό πεδίο. Με το να αποτρέψει την περιστροφή του επιπέδου της πόλωσης κατ' αυτό τον τρόπο, οι κρύσταλλοι αποτρέπουν το φως από το να περάσει μέσω του οριζόντιου πολωτή, δεδομένου ότι παραμένει κάθετα πολωμένο. Η ακτίνα του φωτός διακόπτεται. Με την μεταβολή της τάσης στα άκρα του υγρού κρυστάλλου, το κλείσιμο του "διακόπτη" μπορεί να διαμορφωθεί για να παράγει λεπτομερέστερα τις ενδιάμεσες καταστάσεις.



ΣΧΗΜΑ 3.7

### 3.1.2. ΗΛΕΚΤΡΟ-ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (KERR, POCKELS ΚΑΙ FARADAY)

Τα συμβατικά μέσα μέτρησης υψηλών τάσεων και ρευμάτων στηρίζονται στη μέτρηση καταναλώνοντας ένα (ενδεχομένως) μικρό ποσό της ισχύος από το σύστημα. Παραδείγματος χάριν, ένας ωμικός διαιρέτης σύρει κάποιο μικρό ποσό ρεύματος. Στην εφαρμοσμένη μηχανική ισχύος, αυτή η μικρή ισχύς καλείται "φορτίο"(burden). Αντί να μετρήσουμε άμεσα την ποσότητα που μας ενδιαφέρει, μπορούμε να μετρήσουμε τις αλλαγές στις ιδιότητες κάποιου υλικού ως αποτέλεσμα του περιβάλλοντος ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου. Η ισχύς που απαιτείται για την μέτρηση παρέχεται από τον ίδιο τον εξοπλισμό μέτρησης. Μια κατηγορία τέτοιων τεχνικών στηρίζεται στις αλλαγές στις οπτικές ιδιότητες ορισμένων υλικών μέσα σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία: η επίδραση Kerr, η επίδραση Pockels, και η επίδραση του Faraday.

Όλες αυτές οι τεχνικές στηρίζονται στους διάφορους μηχανισμούς με τους οποίους ένα υλικό περιστρέφει την πόλωση του φωτός που περνά από μέσα του. Το μέγεθος της περιστροφής εξαρτάται από το ηλεκτρικό ή το μαγνητικό πεδίο. Η διαδικασία καθορίζεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από πόσο καλά μπορούμε να μετρήσουμε την αλλαγή στην πόλωση του φωτός. Εάν κάποιος θελήσει να μετρήσει το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από ένα πηνίο Tesla, καθώς επίσης και τις κυματομορφές, το ηλεκτροοπτικό αισθητήριο θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε μια μακριά μονωμένη ράβδο με καλώδια οπτικών ινών για να στείλει το φως από και προς το κύτταρο μέτρησης. Μια εναλλακτική τεχνική θα μπορούσε να είναι να χρησιμοποιηθεί ένα laser και κατάλληλα πρίσματα ή καθρέφτες για να σταλεί το φως έξω στο κύτταρο κατά μήκος της στήριξης και να επιστρέψει σε έναν ανιχνευτή. Στην τελευταία περίπτωση, ο ίδιος ο αισθητήρας θα μπορούσε να τοποθετηθεί στο άκρο υψηλής τάσης, με το laser και τον ανιχνευτή τοποθετημένα σε κάποια απόσταση μακριά.

**Κύτταρα Kerr (Kerr Cells):** Το φαινόμενο Kerr είναι μια ανισότροπη αλλαγή στο δείκτη διάθλασης μιας ουσίας εξαιτίας της αλληλεπίδρασης της με ένα ηλεκτρικό πεδίο. Μια πρακτική εφαρμογή έχει την ουσία Kerr (συχνά νιτροβενζόλιο, το οποίο έχει μια πολύ υψηλή σταθερά Kerr) μεταξύ δύο κάθετων πολωτών. Η πόλωση του φωτός περιστρέφεται αναλογικά προς το τετράγωνο του πεδίου-E, επιτρέποντας κάποιο μέρος του φωτός να περάσει μέσω των πολωτών. Το πρόβλημα με ένα κύτταρο Kerr είναι ότι το νιτροβενζόλιο είναι ένας πτητικός διαλύτης που είναι εξαιρετικά τοξικός, η επίδραση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του πεδίου-E, το οποίο δεν είναι κατάλληλο για μετρητικές εφαρμογές.

**Κύτταρα Pockels (Pockels Cells):** Η επίδραση Pockels είναι παρόμοια με αυτήν της επίδρασης Kerr, εκτός από το ότι η αλλαγή στο δείκτη είναι γραμμικά ανάλογη προς το ηλεκτρικό πεδίο. Οι ουσίες όπως KDP (Potassium Dihydrogen Phosphate - Κάλιο Διυδρογόνο Φωσφορικό άλας), KD\*P (δευτερογενές KDP) και LiNbO<sub>3</sub> (νιόβιο λιθίου) παρουσιάζουν μεγάλη επίδραση Pockels και είναι πολύ δημοφιλείς ως ηλεκτροοπτικοί διαμορφωτές για εργασίες με laser. Ένα πρόβλημα με τους αισθητήρες Pockels είναι το κόστος των κρυστάλλων, ιδιαίτερα στα μεγάλα μεγέθη. Ένας μικρός κρυστάλλος με διάμετρο 1cm, κατάλληλος για το άνοιγμα και κλείσιμο μιας ακτίνας laser, δεν είναι ιδιαίτερα ακριβός (μερικές εκατοντάδες δολάρια), αλλά ένας μεγαλύτερος κρυστάλλος για τη χρήση ως φωτογραφικό διάφραγμα θα ήταν απαγορευτικά ακριβός. Για μια εφαρμογή μέτρησης HV, το κύτταρο θα μπορούσε να είναι στην κλίμακα των χιλιοστών, ιδιαίτερα εάν χρησιμοποιούνται καλώδια οπτικών ινών.

**Περιστροφή Faraday (Faraday Rotation):** Η περιστροφή του Faraday είναι μια μαγνητική επίδραση. Ιδιαίτερα για το υψηλής πυκνότητας γυαλί μολύβδου, η περιστροφή είναι ανάλογη προς το μαγνητικό πεδίο. Ένα χοντρό κομμάτι γυαλιού μολύβδου πάχους 1" και διαμέτρου 2" θα χρειαζόταν ένα πεδίο έντασης 0,5 Tesla (5000 Gauss) για να περιστραφεί η πόλωση 90° (αυτά είναι περίπου 10.000 στροφές ampere για εκείνο το φυσικό μέγεθος). Η περιστροφή είναι ανάλογη προς το μήκος της διαδρομής του φωτός προς το μαγνητικό πεδίο, έτσι ένα πιο μακρύ κομμάτι γυαλιού κάνει έναν πιο ευαίσθητο ανιχνευτή. Η περιστροφή Faraday παρέχει έναν πρακτικό τρόπο να μετρηθεί το ρεύμα στα ηλεκτροφόρα καλώδια EHV ή UHV. Ένα κομμάτι γυαλιού μολύβδου (που μπορεί να είναι αρκετά μακρύ) τοποθετείται κοντά στο καλώδιο ισχύος και ένα πολωμένο laser χρησιμοποιείται για να μετρηθεί η περιστροφή. Σε μια εφαρμογή πηνίων Tesla, αισθητήρες γυαλιού μολύβδου που συνδέθηκαν με καλώδια οπτικά ινών θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν το ρεύμα στα διάφορα μέρη του πηνίου. Για αυτό το λόγο, ο υαλοβάμβακας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας ο ίδιος.

### 3.1.3. Η ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ FARADAY ΣΤΟ ΔΙΑΣΤΡΙΚΟ ΧΩΡΟ

**Διαστρικό διάστημα:** Είναι ο χώρος μέσα στους γαλαξίες. Ο χώρος αυτό δεν είναι απολύτως κενός. Η ύλη που περιέχεται στο διαστρικό διάστημα κάθε γαλαξία είναι περίπου ίση με το 1/10 της γαλαξιακής μάζας. Η μεγαλύτερη ποσότητα της διαστρικής ύλης είναι συγκεντρωμένη κοντά στο δίσκο του γαλαξία, σε πάχος μέχρι μερικές εκατοντάδες έτη φωτός, και κυρίως στις σπείρες του. Η πυκνότητα ποικίλλει σημαντικά από περιοχή σε περιοχή. Οι κύριες συστατικές της ύλης του διαστρικού διαστήματος είναι υδρογόνο και ήλιο σε μικρότερη συγκέντρωση (εκτός από μόρια χημικών ενώσεων υπάρχει και σκόνη). Το υλικό αυτό είναι πρωτογενές και προέρχεται από τη Μεγάλη Έκρηξη ή δευτερογενές και προέρχεται από τα άστρα.

**Διαστρικά μαγνητικά πεδία:** Το μαγνητικό πεδίο του διαστρικού χώρου είναι «παγωμένο» μέσα στο ιονισμένο διαστρικό αέριο, το οποίο, επειδή έχει πολύ μικρή αντίσταση, διατηρεί για πάντα το μαγνητικό πεδίο που υπήρχε στο σημείο του αερίου όπου γεννήθηκε. Όταν ένα διαστρικό νέφος κινηθεί ή συσταλεί, ως αποτέλεσμα της αυτοβαρύτητας του, οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού

του πεδίου κινούνται μαζί του, επειδή είναι «παγωμένες» μέσα του. Αν ο όγκος τους μικρύνει, η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνει ως αποτέλεσμα της διατήρησης της μαγνητικής ροής. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του διαστρικού διαστήματος του γαλαξία ακολουθούν λίγο-πολύ τις σπείρες του γαλαξία.

**Το φαινόμενο Faraday στο διαστρικό μέσο:** Η επίδραση Faraday επιβάλλεται στο φως κατά τη διάρκεια της διάδοσής του από την πηγή προέλευσής του ως την γη, μέσω του διαστρικού χώρου. Εδώ, η επίδραση προκαλείται από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια διαφορά στο δείκτη διάθλασης που φαίνεται από τους δύο κυκλικά πολωμένους τρόπους διάδοσης. Ως εκ τούτου, σε αντίθεση με την επίδραση Faraday στα στερεά ή τα υγρά, η διαστρική περιστροφή Faraday έχει μια απλή εξάρτηση από το μήκος κύματος του φωτός ( $\lambda$ ), δηλαδή:

$$\beta = RM\lambda^2 \quad (2.6)$$

όπου η ολική ισχύς του φαινομένου χαρακτηρίζεται από το RM (Rotation Measure – μέτρο περιστροφής), το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από το B και την πυκνότητα των ηλεκτρονίων,  $n_e$ , και τα δύο από τα οποία μπορεί να αλλάζουν κατά το μήκος της διάδοσης. Δηλαδή:

$$RM = \frac{e^3}{2\pi m^2 c^4} \int_0^d n_e B ds \quad (2.7)$$

όπου  $e$  είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου  
 $m$  είναι η μάζα του ηλεκτρονίου  
 $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό

Η περιστροφή Faraday είναι ένα σημαντικό εργαλείο στην αστρονομία για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων, τα οποία μπορούν να υπολογιστούν από τις μετρήσεις της περιστροφής αν είναι γνωστός ο αριθμός της πυκνότητας των ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση των ράδιο pulsars, η διασπορά που προκαλείται από αυτά τα ηλεκτρόνια οδηγεί σε μια χρονική καθυστέρηση μεταξύ των παλμών που παραλαμβάνονται στα διαφορετικά μήκη κύματος, τα οποία μπορούν να μετρηθούν από την άποψη της πυκνότητας στηλών ηλεκτρονίων, ή του μέτρου διασποράς. Μια μέτρηση του μέτρου διασποράς και του μέτρου περιστροφής επομένως παράγει το σταθμισμένο μέσο όρο του μαγνητικού πεδίου κατά το πεδίο της όρασης μας. Οι ίδιες πληροφορίες μπορούν να ληφθούν και από τα άλλα αντικείμενα εκτός των pulsars, εάν το μέτρο διασποράς μπορεί να υπολογιστεί βασισμένο στις λογικές εικασίες για το μήκος διάδοσης και τις χαρακτηριστικές πυκνότητες ηλεκτρονίων.

### 3.1.4. Η ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ FARADAY ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

**Η ατμόσφαιρα της Γης:** Ατμόσφαιρα είναι το αεριώδες στρώμα που περιβάλλει τη Γη και συμμετέχει σε όλες τις κινήσεις της. Θεωρητικά το ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας ισούται με το ύψος, στο οποίο η ταχύτητα διαφυγής (για τη Γη: 11,2Km/sec) δεν είναι ικανή να απομακρύνει το ελαφρότερο στοιχείο της ατμόσφαιρας (το πρωτόνιο) από το πεδίο βαρύτητας της Γης, δηλαδή τα 28.000Km πάνω από τους πόλους και 42.000Km πάνω από τον ισημερινό. Το «πάχος» της ατμόσφαιρας χαρακτηρίζεται από την κλίμακα ύψους της ατμόσφαιρας, η οποία ισούται με το ύψος της ατμόσφαιρας, στο οποίο περιέχονται τα 2/3 της μάζας της, δηλαδή στα 100Km περίπου.

**Διάρθρωση της ατμόσφαιρας:** Ένα στοιχείο με βάση το οποίο μπορούν να διακριθούν διάφορες περιοχές στην ατμόσφαιρα είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος. Σήμερα με βάση την παραπάνω αρχή, διακρίνονται στην ατμόσφαιρα μέχρι τα 500Km περίπου, τέσσερις περιοχές, που ονομάζονται Τροπόσφαιρα, Στρατόσφαιρα, Μεσόσφαιρα και Θερμόσφαιρα. Το τμήμα της ατμόσφαιρας πάνω από τα 500Km, όπου η μέση ελεύθερη διαδρομή των στοιχείων της ατμόσφαιρας είναι δεκάδες χιλιόμετρα, λέγεται Εξώσφαιρα. Τα ελαφρότερα συστατικά της Εξώσφαιρας κινούνται με μεγάλες ταχύτητες και διαφεύγουν πολλές φορές το γήινο βαρυτικό πεδίο.

Η ύπαρξη ιόντων στην ατμόσφαιρα οφείλεται σε φωτοϊονισμό από την ακτινοβολία του Ήλιου (υπεριώδη και X), στην κοσμική ακτινοβολία και στη ραδιενεργό διάσπαση υλικών στην επιφάνεια της Γης. Λόγω της ελάττωσης της πυκνότητας της ατμόσφαιρας με το ύψος, τα παραγόμενα με τους ιονισμούς ελεύθερα ηλεκτρόνια έχουν στην ανώτερη ατμόσφαιρα αρκετά μεγάλο χρόνο ζωής, με αποτέλεσμα πάνω από τα 60Km η συγκέντρωσή τους να είναι τέτοια, ώστε να επηρεάζει την διάδοση των ραδιοκυμάτων. Η περιοχή στην οποία παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων ονομάζεται Ιονόσφαιρα και παρουσιάζει μέγιστο πυκνότητας ηλεκτρονίων στα 300Km περίπου. Πάνω από τα 400Km η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων ελαττώνεται λόγω της εξαιρετικά μικρής πυκνότητας της ατμόσφαιρας.

**Επίδραση Faraday στην ιονόσφαιρα:** Τα ραδιοκύματα που περνούν μέσω της γήινης ιονόσφαιρας υπόκεινται επίσης στην περιστροφή Faraday όπως η ανωτέρω εξίσωση δείχνει, η επίδραση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του μήκους κύματος. Στα 435MHz (UHF), αναμένεται περιστροφή της τάξεως των 1,5 πλήρων περιστροφών του κυματομετώπου καθώς διέρχεται την ιονόσφαιρα, ενώ στα 1.2GHz λιγότερο από τέταρτο μιας περιστροφής είναι πιθανό.



## 3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FARADAY

Παρακάτω αναφέρονται δύο πειράματα που διεξήχθησαν σε εργαστήρια, πανεπιστήμια και ινστιτούτα του εξωτερικού. Το πρώτο πείραμα αναφέρεται στο *Φαινόμενο Faraday* ενώ το δεύτερο στο *Αντίστροφο Φαινόμενο Faraday*.

### 3.2.1. ΠΕΙΡΑΜΑ 1: ΣΤΑΘΕΡΑ VERDET ΓΙΑ ΕΛΑΦΡΥ ΓΥΑΛΙ ΠΥΡΙΤΟΛΙΘΟΥ

**Περίληψη:** Μερικά οπτικά ανενεργά υλικά μπορούν να γίνουν οπτικά ενεργά όταν τοποθετηθούν σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Η οπτική δραστηριότητα των υλικών προκαλεί τα επίπεδα του πολωμένου φωτός να περιστρέφονται. Η γωνία περιστροφής είναι ανάλογη του γινομένου του μαγνητικού πεδίου, του πάχους του υλικού και μια σταθερά που είναι γνωστή ως σταθερά Verdet (Verdet constant). Ο σκοπός του εργαστηρίου ήταν η μέτρηση της σταθεράς Verdet για ένα δείγμα ελαφρύ γυαλιού πυριτόλιθου (τσακμακόπετρα) και να συγκριθεί η τιμή με μια θεωρητικά υπολογισμένη τιμή της σταθεράς. Η πειραματική τιμή ήταν  $V = (4,13 \pm 0,04) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-1} \text{ G}^{-1}$  ενώ η θεωρητική τιμή ήταν  $V = 1,18 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1} \text{ G}^{-1}$ . Η πραγματική τιμή για τα 578,0nm βρέθηκε να είναι  $V = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1} \text{ G}^{-1}$ . Οι διαφορές μεταξύ των τριών τιμών μπορεί να αποδοθεί σε ένα μη ομογενές μαγνητικό πεδίο στην περιοχή όπου τοποθετήθηκε το δείγμα και εφαρμόζεται στον χρησιμοποιούμενο διαγώνιο πολωτή/αναλυτή.

**Εισαγωγή:** Οι ενώσεις chiral είναι ενώσεις στις οποίες η μοριακή τους δομή δεν είναι συμμετρική. Για τις ενώσεις άνθρακα αυτό το αποτέλεσμα δημιουργείται από ένα άτομο άνθρακα που έχει τέσσερα διαφορετικά υποκατάστατα ενωμένα πάνω του. Πολλά συγγράμματα εισαγωγής στην οργανική χημεία περιγράφουν πως μια chiral ένωση θα περιστρέφει το επίπεδο πολωμένου φωτός μέσω μιας δοσμένης γωνίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ενδεικτική τεχνική μεταξύ των enantiomers (ίδια μοριακή φόρμουλα αλλά διαφέρουν στην chirality). Ένα enantiomer θα περιστρέφει το επίπεδο του φωτός σε μια θετική κατεύθυνση ενώ το άλλο enantiomer περιστρέφει το φως κατά τις ίδιες μοίρες αλλά στην αντίθετη κατεύθυνση.

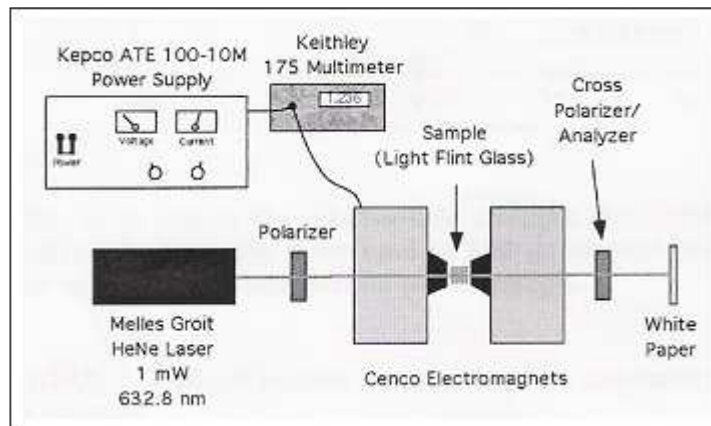
Οι περιστροφές του πολωμένου φωτός δεν περιορίζονται απλά στις chiral ενώσεις. Ο Michael Faraday ανακάλυψε το 1845 ότι όταν μερικά οπτικά ανενεργά υλικά εκτεθούν σε ισχυρά μαγνητικά πεδία θα περιστρέφουν το επίπεδο του πολωμένου φωτός. Αντίθετα με τις chiral ενώσεις, η περιστροφή στην θετική ή αρνητική κατεύθυνση εξαρτάται από το κατά πόσον το προσπίπτων φως ταξιδεύει παράλληλα ή αντιπαράλληλα της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί σε στερεά, υγρά ή αέρια αλλά εμφανίζεται συχνότερα στα αέρια.

Ένα από τα θέματα για κατανόηση πάνω στο φαινόμενο Faraday είναι η σταθερά Verdet, η οποία είναι συγκεκριμένη για κάθε δείγμα (κατά τον ίδιο τρόπο όπως η μοριακή απορρόφηση ενός υλικού και εξαρτάται από το υλικό). Η σταθερά Verdet "ορίζεται ως η περιστροφή ανά μονάδα απόστασης ανά μονάδα μαγνητικής ισχύος". Λειτουργεί επίσης και ως αναλογική σταθερά μεταξύ της γωνίας περιστροφής και του γινομένου του μαγνητικού πεδίου και πάχους του υλικού. Ο σκοπός του εργαστηρίου ήταν η μέτρηση της σταθεράς Verdet για ένα δείγμα ελαφρύ γυαλιού τσακμακόπετρας και να συγκριθεί η τιμή με μια θεωρητικά υπολογισμένη τιμή της σταθεράς.

**Πειραματική διαδικασία:** Για να καθορίσουμε τη σταθερά Verdet για ελαφρύ γυαλί τσακμακόπετρας, ένα δείγμα 38mm γυαλιού τοποθετήθηκε σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο και μετρήθηκε η περιστροφή του επιπέδου του πολωμένου φωτός. Αυτό επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας ένα ζευγάρι Cenco ηλεκτρομαγνητών τα οποία τροφοδοτήθηκαν από μια Keoco ATE 100-10M γεννήτρια ισχύος. Ένα πολύμετρο Keithley 175 Multimeter συνδέθηκε σε σειρά με τους ηλεκτρομαγνήτες για να παρατηρήσουμε το ρεύμα εξόδου της γεννήτριας ισχύος ώστε να είναι δυνατός ο καθορισμός της σχέσης μεταξύ του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου στο δείγμα αυτό (γυαλί). Η Melles Groit HeNe ακτίνα laser μήκους κύματος 632,8nm πέρασε μέσω ενός πολωτή τους μαγνήτες με το δείγμα στο κέντρο και μέσα από τον διαγώνιο πολωτή/αναλυτή, όπως φαίνεται στο γράφημα 1. Οι πόλοι έχουν μια τρύπα περίπου 6mm που επιτρέπει στην ακτίνα laser να περνάει από μέσα. Ένα φύλλο λευκού χαρτιού τοποθετημένο κοντά στον διαγώνιο πολωτή χρησιμοποιήθηκε για να βοηθήσει στην ανίχνευση του ελάχιστου του μεταδιδόμενου φωτός.

Οι ηλεκτρομαγνήτες δεν παρήγαγαν ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο στην περιοχή που ήταν τοποθετημένο το δείγμα. Για να καθοριστεί το μαγνητικό πεδίο που "νιώθει" το δείγμα, ένα Applied Magnetics Laboratory, Inc Gaussmeter GM1A χρησιμοποιήθηκε για να μετρήσουμε το μαγνητικό πεδίο σε Gauss στο κέντρο των δύο πόλων για διάφορα ρεύματα και για δύο ρεύματα των 3A και 7A, το μαγνητικό πεδίο χαρακτηρίστηκε ως 9 πόντοι μεταξύ του διαστήματος των δύο πόλων. Αυτό μετά χρησιμοποιήθηκε για το καθορισμό ενός μέσου όρου μαγνητικού πεδίου που "νιώθει" το δείγμα.

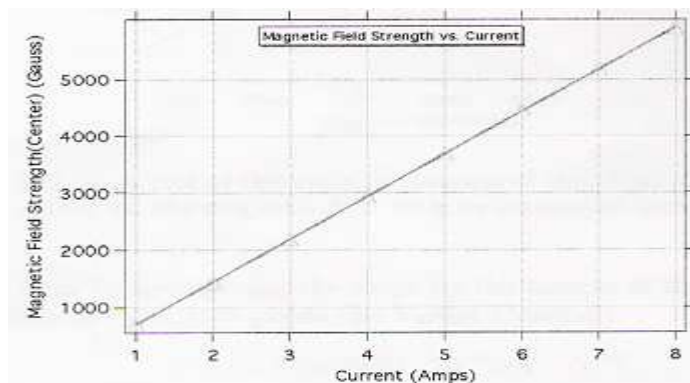
Τα δεδομένα για το ελαφρύ γυαλί τσακμακόπετρας πάρθηκαν αρχικά κεντράροντας το γυαλί ανάμεσα στους πόλους. Έπειτα το laser τέθηκε σε λειτουργία και ελέγχθηκε η ευθυγράμμιση για να είμαστε σίγουροι ότι η ακτίνα δεν κτύπησε την κυλινδρική τρύπα που βρίσκεται στο κέντρο του κομματιού του γυαλιού. Σταθερή ροή νερού χρησιμοποιήθηκε για να ψυχθούν οι ηλεκτρομαγνήτες. Η γεννήτρια ισχύος ενεργοποιήθηκε και το ρεύμα αυξήθηκε αργά ως την επιθυμητή τιμή. Για κάθε τιμή ρεύματος από 1A έως 8A, η περιστροφή του πολωμένου φωτός μετρούνταν από το διαγώνιο πολωτή περιστρέφοντας τον μέχρι το ελάχιστο του μεταδιδόμενου φωτός μπορούσε να καθοριστεί πάνω στο λευκό φύλλο χαρτιού.



**Αποτελέσματα:** Εφόσον οι ηλεκτρομαγνήτες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου για το πείραμα, μία συσχέτιση μεταξύ του ρεύματος που εφαρμόζεται στους ηλεκτρομαγνήτες και του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου στο διάστημα μεταξύ των πόλων χρειαζόταν να εξαχθεί. Το μαγνητικό πεδίο στο κέντρο των πόλων μετρήθηκε για κάθε ακέραιο αριθμό ρεύματος μεταξύ 1Α και 8Α. Από τα δεδομένα εξήχθη η γραφική του σχήματος 2.

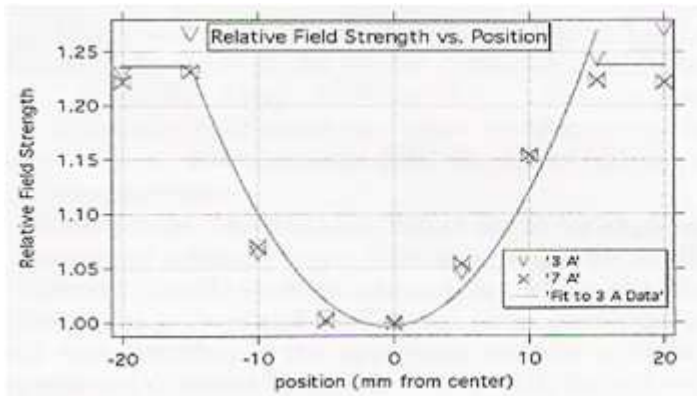
$$B = -51.8 \pm 11 + (747 \pm 2.1) * I \quad (3)$$

Αυτή η εξίσωση χρησιμοποιήθηκε για να μετατρέψει τα δεδομένα του εφαρμοσμένου ρεύματος σε μαγνητικά πεδία.



Το μαγνητικό πεδίο μεταξύ των πόλων δεν είναι σταθερό και έτσι για να καθοριστούν οι μεταβολές του μαγνητικού πεδίου, σε δύο ρεύματα, 9 σημεία δεδομένων πάρθηκαν σε ίσα διαστήματα μεταξύ των πόλων. Μία γραφική για τη σχετική ισχύς του πεδίου του πεδίου  $B/B_0$ , όπου το  $B$  είναι η ισχύς του πεδίου στο σημείο που μετρήθηκε (για παράδειγμα 10mm αριστερά του κέντρου) και  $B_0$  είναι η ισχύς του πεδίου στο κέντρο των πόλων. Αυτή η γραφική έδειχνε ότι για τη μέγιστη απόσταση μεταξύ των πόλων η σχετική ισχύς του πεδίου ακολουθούσε μια παραβολή με το ελάχιστο κοντά στο κέντρο των πόλων. Αυτή η γραφική (εικόνα 3) παρουσιάζει τα δύο σύνολα της σχετικής ισχύς του πεδίου σαν συνάρτηση της θέσης και του γεγονότος ότι είναι κοντά να συμπίπτουν το οποίο καταδεικνύει ότι το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κατά το ίδιο ποσοστό ανεξάρτητα από το ρεύμα που εφαρμόζεται. Για να βρεθεί μια μέση τιμή για το μαγνητικό πεδίο που "νοιώθει" το δείγμα, μια παραβολή προσαρμόστηκε στα δεδομένα των 3Α. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτά μεταξύ των  $x = -15\text{mm}$  και  $x = 15\text{mm}$  εφόσον τα δύο ακριανά σημεία δείχνουν ότι το πεδίο εξισώνεται και εφόσον το μεγαλύτερο μέρος του δείγματος βρίσκεται μέσα στους δρομείς, μια γραφική προσαρμοσμένη σε αυτά τα σημεία δεδομένων είναι δικαιολογημένη. Ολοκληρώνοντας την εξίσωση που προκύπτει από τα χωρικά διαστήματα και διαιρώντας με τα διαστήματα, μία μέση τιμή του μαγνητικού πεδίου που "νοιώθει" το δείγμα είναι 1.08 φορές η τιμή του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο. Μία αβεβαιότητα των 0.07 υποθέεται για τη μέση τιμή του μαγνητικού πεδίου.

Τα δεδομένα για τη γωνία περιστροφής προς το ρεύμα που εφαρμόζεται μας δίνουν μια ιδέα στο κατά πόσο ή όχι το φαινόμενο Faraday παρατηρείται. Τα δεδομένα αυτά βρίσκονται στον πίνακα I. Εφόσον η γωνία περιστροφής μεγαλώνει όσο το ρεύμα αυξάνεται και όσο το ρεύμα αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται γραμμικά, το φαινόμενο Faraday παρατηρήθηκε σ' αυτό το πείραμα.



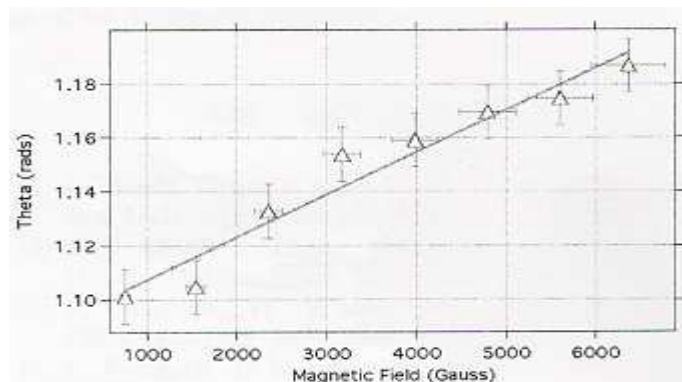
Current (A)	$\theta$ (rad)
1.000	1.10
2.000	1.10
3.000	1.13
4.000	1.15
5.000	1.16
6.000	1.17
7.000	1.17
8.000	1.19

**Ανάλυση και συζήτηση:** Με τη σχέση μεταξύ του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου εδραιωμένη από την εξίσωση 3, τα ρεύματα από τον πίνακα I μπορούν να μετατραπούν σε μαγνητικά πεδία με κάποιο σχετικό σφάλμα. Η αβεβαιότητα στο  $B$  προέρχεται από την μέση τιμή του μαγνητικού πεδίου στο διάστημα μεταξύ των πόλων. Η αβεβαιότητα στις μετρήσεις του  $\theta$  βρέθηκε να είναι μία σταθερή τιμή των 0.01 rad (μία καλή προσέγγιση για τη λειτουργία του διαγώνιου αναλυτή) και το σφάλμα στο μαγνητικό πεδίο δεν μεταφέρθηκε στο σφάλμα του  $\theta$ . Το σφάλμα στο ρεύμα που εφαρμόστηκε από την πηγή ισχύος είναι αμελητέο καθώς παρατηρήθηκαν παρεκκλίσεις των μερικών mA. Μία γραφική της γωνίας περιστροφής προς το μαγνητικό πεδίο φαίνεται στην εικόνα 4 καθώς και το σφάλμα (ευθεία ελαχίστων τετραγώνων). Η εξίσωση που ταιριάζει στα  $\theta$  προς τα δεδομένα για το μαγνητικό πεδίο είναι η εξίσωση 4.

$$\theta = 1,091 \pm 0,006 + ((1,57 \pm 0,15) \times 10^{-5}) \times \bar{B} \quad (4)$$

Η σταθερά Verdet μπορεί να εκτιμηθεί από τη κλίση της ευθείας.

$$V = \frac{1}{l} \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta B} \right) \quad (5)$$



Οπότε πολλαπλασιάζοντας την κλίση επί τον αντίστροφο της απόστασης  $l = 3.8\text{cm}$  αποδίδεται η σταθερά Verdet.

$$V = (4.13 \pm 0.04) \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1} \text{ G}^{-1} \quad (6)$$

Με μια σχετική αβεβαιότητα της τάξης των 9.6%, η σταθερά Verdet γίνεται:

$$V = 0.40 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1} \text{ G}^{-1}.$$

Αυτή η τιμή μπορεί να συγκριθεί με μια θεωρητική τιμή αξιολογώντας το σχήμα 2 με καθορισμένες τιμές για τον πίνακα διάθλασης ενός δοσμένου μήκους κύματος. Ο τύπος του γυαλιού που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα ήταν ένα ελαφρύ γυαλί τσακμακόπετρας και η πειραματική τιμή της σταθεράς Verdet βρέθηκε στα 0.40 ενώ η θεωρητική τιμή της σταθεράς Verdet για ελαφρύ γυαλί τσακμακόπετρας ήταν 1.18. Αυτή η τιμή καθορίζεται από το γράφημα γνωστών πινάκων διάθλασης με το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιήσαμε. Από τα δεδομένα προέκυψε η εξίσωση (7), όπου  $n_d$  είναι ο δείκτης διάθλασης.

$$n_d = 1.56 + 8083.6 \lambda^{-2} \quad (7)$$

Για να καταλήξουμε στη σταθερά Verdet από την εξίσωση (7) υπολογίστηκε η παράγωγος της εξίσωσης (7) και βρέθηκε στα 632.8nm. Αυτή η τιμή της παραγωγού αντικαταστάθηκε στην εξίσωση (2) και μετατράπηκε από min/Gcm σε rad/Gcm. Η τιμή για το  $e/2mc$  είναι 1.0083. Αυτή η θεωρητική τιμή είναι  $1.18 \cdot 10^{-5}$  rad/Gcm. Η τιμή CRC για την σταθερά Verdet του ελαφρύ γυαλιού τσακμακόπετρας δεν ήταν καταχωρημένο για τα 632.8nm αλλά παρουσιάστηκε στα 578nm το οποίο αποδίδει μια προσέγγιση της πραγματικής τιμής της  $V$  στα 632.8nm. Σ' αυτό το μήκος κύματος η σταθερά Verdet είναι  $V = 1 \cdot 10^{-5}$  rad/Gcm.

**Συμπεράσματα:** Οι επιδράσεις της περιστροφής του επιπέδου του πολωμένου φωτός χρησιμοποιούνται καθημερινά ειδικότερα στην οργανική χημεία οι οποία χρησιμοποιεί τις οπτικές ιδιότητες των chiral ενώσεων για συγκεκριμένες περιπτώσεις. Λιγότερο χρησιμοποιείται η μαγνητικά επαγόμενη οπτική δραστηριότητα που παρατηρείται στο φαινόμενο Faraday. Στο εργαστήριο το φαινόμενο Faraday εξετάστηκε για ένα δείγμα ελαφρύ γυαλιού τσακμακόπετρας και η σταθερά Verdet υπολογίστηκε να είναι ίση με:

$$V = (4.13 \pm 0.04) \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1} \text{ G}^{-1} \quad (8)$$

Η εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου προκαλεί το γυαλί να γίνει οπτικά ενεργό και καθώς το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται μεγαλώνει και η γωνία περιστροφής.

Στο μέλλον το φαινόμενο Faraday θα μπορεί να εξεταστεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Αρχικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα διαφορετικό δείγμα όπως το υγρό για το οποίο η σταθερά Verdet είναι γνωστή και να βρεθεί ένας τρόπος να αυξηθεί η ακρίβεια του εξοπλισμού που θα χρησιμοποιείται έτσι ώστε να υπολογιστούν πειραματικές τιμές οι οποίες να ταιριάζουν περισσότερο με τις θεωρητικές. Επιπλέον, αντί να μετράται μόνο η σταθερά Verdet, θα ήταν ενδιαφέρον να μετράται και ο πίνακας διάθλασης του υλικού γνωρίζοντας την σταθερά Verdet αυτού του υλικού, αλλά χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος φωτός (διαφορετικές συχνότητες laser) ώστε να καθοριστεί το  $\lambda$  ( $dn/d\lambda$ ).

### 3.2.2. ΠΕΙΡΑΜΑ 2: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ FARADAY ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ LASER ΜΕ ΥΠΟ-ΠΥΚΝΟ ΠΛΑΣΜΑ

**Εισαγωγή:** Μαγνητικά πεδία ισχυρότερα των 7MG έχουν μετρηθεί με ισχυρή χωρική και χρονική ακρίβεια κατά την διάρκεια αλληλεπιδράσεων με ένα κυκλικό πολωμένο παλμό laser με υπό-πυκνο (underdense) πλάσμα ηλίου σε εντάσεις μέχρι  $1 \times 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$ . Τα πεδία, ενώ έχουν την αναμενόμενη μορφή από το αντίστροφο φαινόμενο Faraday σε ψυχρό πλάσμα, είναι ισχυρότερα από το αναμενόμενο και έχουν διάρκεια που προσεγγίζει αυτή των υψηλής έντασης παλμικών laser (<3psec). Αυτές οι παρατηρήσεις μπορούν να εξηγηθούν με 3D particle-in-cell προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι το μαγνητικό πεδίο παράγεται από ταχεία ηλεκτρόνια τα οποία έχουν ελικοειδή τροχιά γύρω από τον άξονα του τούνελ που δημιουργείται από το πεδίο laser.

**Αριθμητικές "particle-in-cell" μέθοδοι (PIC):** Αλγόριθμοι γνωστοί ως σωματιδιακές μέθοδοι ("particle" methods) των οποίων χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι η τεχνική διάκρισης όταν η ομάδα των διακριτών αντικειμένων παρουσιάζεται, τα οποία είναι μοντέλα "σωματιδίων" που θεωρούνται ως κάποιο δίκτυο από κινούμενους κόμβους, τα οποία γίνονται όλο και πιο διαδεδομένα στην μαθηματική μοντελοποίηση. Μέχρι πρόσφατα, οι σωματιδιακές μέθοδοι αναπτύχθηκαν κυρίως ως εναλλακτικές των κλασσικών αριθμητικών μεθόδων για τη λύση προβλημάτων στη φυσική πλάσματος. Μια προσέγγιση για την δημιουργία τέτοιων αλγορίθμων έχει ως εξής: διασπάμε το αρχικό πρόβλημα έτσι ώστε το βοηθητικό πρόβλημα να διαχωρίζεται με μια υπερβολική (αποκλίνουσα) συνάρτηση. Μετά από ειδική διάκριση της λύσης, τέτοια διάσπαση φυσικά οδηγεί στα πολύ γνωστά πλάνα των "particle-in-cell" μεθόδων. Η πιο γνωστή "particle-in-cell" μέθοδος είναι το συνδυασμένο πλάνο Lagrange-Euler.

**Γενικά στοιχεία για το πλάσμα:** Πλάσμα είναι κάθε κατάσταση της ύλης που αποτελείται εν μέρει ή εν όλω από φορτισμένα στοιχειώδη σωματίδια, άλλα με θετικό και άλλα με αρνητικό φορτίο, υπό την προϋπόθεση ότι τουλάχιστον ένα μέρος από αυτά είναι ελεύθερα να κινηθούν σε όλο το διαθέσιμο χώρο ώστε να υπάρχει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το πλάσμα είναι μια κατάσταση της ύλης διαφορετική από τις άλλες τρεις καταστάσεις (στερεό, υγρό και αέριο), γι' αυτό καλείται συχνά "τέταρτη κατάσταση της ύλης". Σε μία σταθερή κατάσταση, περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα. Σε μία ασταθή κατάσταση το πλάσμα αποτελείται από ηλεκτρόνια, ιόντα και διεγερμένα σωματίδια. "Η πυκνότητα των ιόντων" είναι η αναλογία των ιόντων απέναντι στα άλλα σωματίδια. Εκτός του ότι είναι σημαντικό σε πολλές πτυχές της καθημερινής μας ζωής, το πλάσμα υπολογίζεται ότι αποτελεί περισσότερο από το 99% του ορατού κόσμου.

Η δημιουργία πλάσματος είναι απλή, μετατρέποντας μη αντιδραστικά σωματίδια σε αντιδραστικά παρέχοντας τους ενέργεια, για παράδειγμα με ηλεκτρική φόρτιση. Το υπερβολικά ενεργό πλάσμα μπορεί να δημιουργηθεί με αυτόν τον τρόπο διασπώντας αδρανή αέρια όπως το φρέον. Σε ένα συνηθισμένο αέριο κάθε άτομο περιέχει έναν ίσο αριθμό θετικών και αρνητικών φορτίων. Τα θετικά φορτία στον πυρήνα περιβάλλονται από έναν ίσο αριθμό αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων, έτσι κάθε άτομο είναι ηλεκτρικά "ουδέτερο". Τα συνηθισμένα αέρια αποτελούνται από ουδέτερα άτομα ή μόρια που διασχίζουν αλληλοσυγκρουόμενα όλο το διαθέσιμο χώρο, σε πολύ

υψηλές θερμοκρασίες όμως, ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια αποσπώνται από κάθε άτομο (τα μόρια έχουν συνήθως ήδη διασπαστεί σε άτομα), έτσι τα στοιχειώδη συστατικά του αερίου δεν είναι πια τα ουδέτερα άτομα αλλά τα αποσπασμένα ηλεκτρόνια (με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο) και τα εναπομείναντα ιόντα με (με θετικό ηλεκτρικό φορτίο). Εκείνα τα άτομα και το προκύπτων ηλεκτρικά φορτισμένο αέριο θεωρούνται "ιονισμένα". Όταν αρκετά άτομα ιονίζονται για να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του αερίου, τότε έχουμε πλάσμα.

Σε πολλές περιπτώσεις οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φορτισμένων μορίων και των ουδέτερων μορίων είναι σημαντικές στον καθορισμό της συμπεριφοράς και της χρησιμότητας του πλάσματος. Ο τύπος των ατόμων στο πλάσμα, η αναλογία των ιονισμένων έως ουδέτερων μορίων και όλες οι ενέργειες μορίων οδηγούν σε ένα ευρύ φάσμα τύπων, χαρακτηριστικών και συμπεριφορών πλάσματος. Αυτές οι μοναδικές συμπεριφορές κάνουν το πλάσμα να είναι χρήσιμο σε έναν μεγάλο και συνεχώς αυξανόμενο αριθμό σημαντικών εφαρμογών στην ζωή μας.

**Πειραματική διαδικασία:** Η πρόοδος στην τεχνολογία υψηλής ισχύος laser ήταν γοργή τα τελευταία χρόνια, και πρόσφατα, επιτραπέζια συστήματα laser μπορούν συστηματικά να παράγουν παλμούς ισχύος πολλών terawatts. Για εφαρμογές όπως επιτάχυνση σωματιδίων, παραγωγή ακτίνων X και σύντηξη αδρανειακού περιορισμού (inertial confinement fusion), εξαιρετικά μεγάλη πρόοδος έχει επιτευχθεί. Παρόλα αυτά, η θεμελιώδης φυσική αυτών των αλληλεπιδράσεων δεν έχει κατανοηθεί απόλυτα ακόμα.

Η παραγωγή μαγνητικών πεδίων μέσα σε πλάσμα το οποίο δημιουργήθηκε από υψηλής έντασης laser, έχει γίνει πρόσφατα αντικείμενο αυξανόμενης προσοχής. Ένα συγκεκριμένο φαινόμενο, το αντίστροφο φαινόμενο Faraday (Inverse Faraday Effect - IFE), έχει γίνει η αιτία αμφισβήτησης καθώς οι θεωρητικές προβλέψεις δεν συμφωνούν. Το αντίστροφο φαινόμενο Faraday είναι ένα μαγνητο-οπτικό φαινόμενο στο οποίο η διάδοση της κυκλικά πολωμένης ακτινοβολίας μέσω ενός μη γραμμικού μέσου προκαλεί ένα αξονικό μαγνητικό πεδίο κατά την διεύθυνση της διάδοσης, λόγω της μεταφοράς της γωνιακής ορμής από το κύμα στο μέσο (στην περίπτωση μας στα ηλεκτρόνια του πλάσματος). Οι μέτρηση σχετικά μικρών πεδίων που δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο αναφέρονται σε μετρήσεις μικρής ισχύος και κάποια πρόσφατα πειράματα είχαν ως αποτέλεσμα εντάσεις μέχρι  $10^{16} \text{Wcm}^{-2}$  οι οποίες διαφέρουν σημαντικά με τη θεωρία. Για μήκος κύματος  $1 \mu\text{m}$ ,  $I=10^{19} \text{Wcm}^{-2}$  και πυκνότητα πλάσματος  $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  συνεπάγεται ένα μαγνητικό πεδίο μεγαλύτερο του 1MG, το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί στο χώρο στο κέντρο της περιοχής της έντασης του παλμού του laser. Μια κατά προσέγγιση έκφραση για τα πεδία αυτά σε ομοιόμορφο plasma δίνεται ως εξής:

$$B_{uniform} = \frac{1}{2} B_c \frac{\omega_p^2}{\omega_o^2} \left( \frac{3|a|^2}{2\gamma^2} - \frac{1}{2} \ln \gamma^2 \right) \quad (1)$$

όπου  $B_c$  είναι το είναι το μαγνητικό πεδίο Compton,  $\omega_p$  είναι η συχνότητα του πλάσμα,  $\omega_o$  είναι η συχνότητα του laser,  $a$  είναι το δυναμικό του διανύσματος του πεδίου του laser και  $\gamma$  είναι ο συντελεστής Lorentz της κυκλικής τροχιάς του ηλεκτρονίου του laser. Η έκφραση αυτή διαφέρει ελαφρά όταν το μαγνητικό πεδίο συμπεριφέρεται ως αυτό-διατηρούμενο.

Η παραπάνω περίπτωση είναι περισσότερο πολύπλοκη όταν ένας ισχυρός παλμός laser περνάει μέσω πλάσματος έτσι ώστε η πυκνότητα των ηλεκτρονίων να μη παραμείνει σταθερή. Το laser απωθεί ψυχρά ηλεκτρόνια έξω από το κανάλι και η προκύπτουσα κλίση της πυκνότητας μπορεί να προκύψει ως μια επιπλέον πηγή μαγνητικού πεδίου, η οποία είναι συγκρίσιμη σε μέγεθος με αυτό της εξίσωσης (1) αλλά με αντίθετη κατεύθυνση.

Ωστόσο η διάδοση ισχυρών παλμών laser σε πλάσμα είναι γνωστό ότι παράγει αξονικά επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια. PIC εξομοιώσεις υποδηλώνουν ότι αυτά τα ταχέα ηλεκτρόνια είναι ακτινωτά περιορισμένα και πραγματοποιούν ταλαντώσεις επιταχυντή πεδίου στα πεδία των καναλιών. Το πεδίο του laser υπολογίστηκε έτσι ώστε να μεταδίδει μαζί τη γραμμική και τη γωνιακή ταχύτητα κατευθείαν σε αυτά τα συντονισμένα σωματίδια. Στη περίπτωση ενός κυκλικά πολωμένου πεδίου laser, οι ταλαντώσεις του επιταχυντή πεδίου είναι σπειροειδής γύρω από τον άξονα του καναλιού με αποτέλεσμα τα θερμά ενεργά ηλεκτρόνια να παρέχουν μια επιπλέον πηγή για το αξονικό μαγνητικό πεδίο. Χρησιμοποιώντας την έκφραση για ένα απλό πηνίο σωληνοειδούς μπορούμε να υπολογίσουμε το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο:

$$B_{hot} = a B_c \frac{\omega_p}{\omega_o} \frac{n_{hot}}{n_o} (k_p R) \quad (2)$$

όπου  $a$  είναι ο μέσος όρος κλίσης της γωνίας της σπειροειδούς τροχιάς των θερμά ενεργών ηλεκτρονίων,  $n_{hot}$  είναι η πυκνότητα των θερμά ενεργών ηλεκτρονίων,  $R$  είναι η ακτίνα των καναλιών και  $k_p = \omega_p/c$ . Για τα ηλεκτρόνια που είναι σε συντονισμό με την ακτίνα laser μπορούμε να θέσουμε  $a = \omega_p/\omega_o$ . Για σχετικές εντάσεις ( $a \gg 1$ ) υπολογίζουμε κατά προσέγγιση την ακτίνα των καναλιών  $R \sim \pi a/k_p$  και βρίσκουμε ότι :

$$B_{hot} = \pi \alpha B_c \frac{\omega_p^2}{\omega_p^2} \times \frac{n_{hot}}{n_0} \quad (3)$$

Αυτό το πεδίο μπορεί να γίνει μεγαλύτερο από τα πεδία της εξίσωσης 1, αν συνεχίζει να αναπτύσσεται με ένταση ακόμα και για  $a > 1$ .

Σ' αυτό το χαρτί αναφέρουμε τις πρώτες χρονικές και χωρικές αναλυμένες μετρήσεις, μαγνητικών πεδίων τις τάξης των Megagauss (μέχρι 7MG) που δημιουργούνται από θερμά ενεργά ηλεκτρόνια τύπου IFE σε πλάσμα χρησιμοποιώντας έναν αυτοκαναλικό παλμό laser σχετικής έντασης.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ενός laser υψηλής έντασης VULCAN. Το μήκος κύματος αυτού του Laser είναι 1.054μm και η ενέργειά του φτάνει τα 40 Joule ανά παλμό ενώ η διάρκεια του παλμού είναι μεταξύ 0,9-1,2ps. Το κεντρικό σημείο ήταν περίπου 3 φορές πιο περιθλαστικά περιορισμένο. Σ' αυτά τα πειράματα ο παλμός του laser εστιάστηκε σε αέριο ηλίου χρησιμοποιώντας ένα f/4 παραβολικό κάτοπτρο. Η ένταση του «κενού» έφτασε τα  $10^{19} \text{Wcm}^{-2}$ . Ένα επίπεδο κύμα  $\lambda/4$  τοποθετήθηκε στο χώρο που περιέχει το αέριο για να αλλάξει τη πολικότητα του laser από γραμμική σε κυκλική, για τη διεξαγωγή αυτών των πειραμάτων.

Ένα μικρό μέρος του παλμού διαχωρίστηκε από τη κεντρική ακτίνα με αποτέλεσμα η συχνότητα να διπλασιαστεί σε 527nm για τη χρησιμοποίηση της ως διερευνητική ακτίνα. Η ενέργεια αυτής της ακτίνας ήταν περίπου 100mJ και η διάρκεια του παλμού μεταξύ 2-15ps. Μια κάμερα αστραπιαίας λήψης (2-3ps) Hamamatsu χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της διάρκειας του παλμού της εξεταζόμενης ακτίνας και τη σύγκριση αυτής με την κύρια ακτίνα.

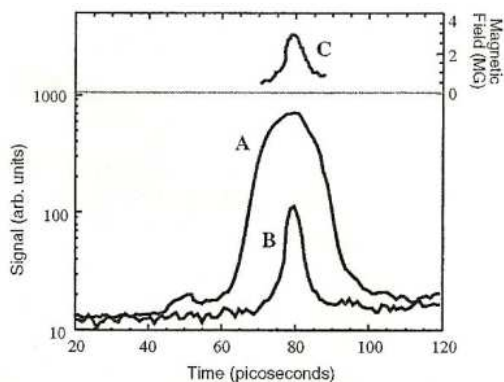
Στη συνέχεια διαχωρισμός Raman χρησιμοποιήθηκε για το καθορισμό της πυκνότητας του ηλεκτρονίου πλάσματος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να δοθούν πυκνότητες οι οποίες είναι σύμφωνες με τον πλήρη ιονισμό των ουδετέρων του ηλίου. Η αρχική πυκνότητα του ηλεκτρονίου του πλάσματος μπορεί να προσαρμοστεί στο εύρος  $4 \cdot 10^{18} - 4 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$ , αλλάζοντας την ενίσχυση της πίεσης του αερίου που βρίσκεται υπό πίεση. Οπτική εξέταση της αλληλεπίδρασης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την ίδια εξεταζόμενη ακτίνα διερχόμενη εγκάρσια της κατεύθυνσης της διάδοσης του laser. Αυτό έδωσε μια μέτρηση για την έκταση της αλληλεπίδρασης η οποία βρέθηκε να είναι 1nm με απόκλιση  $\pm 0,2$ .

Ομοαξονική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα με εγκάρσια διερεύνηση. Ο ομοαξονικός εξεταζόμενος παλμός ήταν γραμμικά πολωμένος και κατευθύνθηκε στο ίδιο παραβολικό κάτοπτρο που χρησιμοποιήθηκε για να εστιάσει τη γραμμικά πολωμένη αλληλεπίδραση της ακτίνας μέσα στο χώρο του συμπιεσμένου αερίου. Απεικονίζοντας το κεντρικό επίπεδο εξασφαλίζεται ότι οι δύο ακτίνες αλληλεπικαλύπτονται. Παρεμβαίνοντα φίλτρα χρησιμοποιήθηκαν μετά την αλληλεπίδραση, για την απομόνωση της εξεταζόμενης ακτίνας από τη κύρια ακτίνα. Η εξεταζόμενη αναπαράστηκε επί ενός σχίσματος της κάμερας γρήγορης απόκρισης, που χρησιμοποιήθηκε ως ανιχνευτής. Ένα ζευγάρι υψηλής εξάλειψης ανάλογων πολωτών χρησιμοποιήθηκαν για τη παρατήρηση της περιστροφής της πόλωσης της εξεταζόμενης ακτίνας που οφείλεται στα αξονικά μαγνητικά πεδία που παράγονται από την αντλούμενη ακτίνα στη περιοχή της αλληλεπίδρασης.

Το γράφημα 1 παρουσιάζει το ολοκληρωτικό χωρικό σήμα της κάμερας του εξεταζόμενου σήματος. Η γραμμή (A) παρουσιάζει την ακτίνα φωτός όταν ο αναλυτής είναι ευθυγραμμισμένος παράλληλα με τη πόλωση της εξεταζόμενης ακτίνας, έτσι ώστε η κάμερα αστραπιαίας λήψης να φωτογραφίσει το μη στρεφόμενο εξεταζόμενο φως. Η διάρκεια ήταν η αναμενόμενη στα 15ps. Η χαμηλότερη γραμμή (B) αναπαριστά το σήμα όταν ο αναλυτής έχει διασταυρωθεί σε σχέση με την πόλωση της εξεταζόμενης ακτίνας. Εκ τούτου είχε ρυθμιστεί να μεταδίδει μόνο φως το οποίο έχει περιστρεφθεί εξαιτίας της παρουσίας ενός αξονικού μαγνητικού πεδίου. Η διάρκεια του περιστρεφόμενου πολωμένου σήματος ήταν λιγότερο από 3 ps, η οποία είναι συγκρίσιμη με τη διάρκεια ενός παλμού Laser υψηλής έντασης. Κατά την απουσία ενός αξονικού μαγνητικού πεδίου, η πολικότητα των εξεταζόμενων εκπεμπόμενων μαγνητικών κυμάτων θα παραμείνει αμετάβλητη και για το λόγο αυτό το φως δεν θα μεταδοθεί μέσω του αναλυτή. Λήψεις με μόνο τη εξεταζόμενη ακτίνα να απεικονίζεται χωρίς περιστροφή αποδεικνύετε ότι η μη περιστροφή οφείλεται στα οπτικά. Λήψεις με το παραγόμενη ακτίνα πλάσματος αλλά χωρίς την εξεταζόμενη ακτίνα πάθθηκαν και μόνο σήμα σε επίπεδο θορύβου παρατηρήθηκε. Τέτοιες λήψεις με background σήματα (θορύβου) πάθθηκαν μετά από κάθε λήψη δεδομένων, ώστε να μετρηθούν αυτά τα background σήματα. Όταν η υψηλής έντασης ακτίνα αλληλεπίδρασης πολώθηκε γραμμικά, έτσι ώστε να μην υπάρχει αξονικό πεδίο, δεν παρατηρήθηκε περιστροφή της εξεταζόμενης πόλωσης. Αυτό προεξοφλεί την αποπόλωση εξαιτίας της κλίσης της πυκνότητας στο πλάσμα και καταδεικνύει ότι η πηγή του μεταδιδόμενου σήματος ήταν τα IFE πεδία τροφοδοτούμενα από τον έντονα κυκλικά πολωμένο παλμό του laser στο πλάσμα.

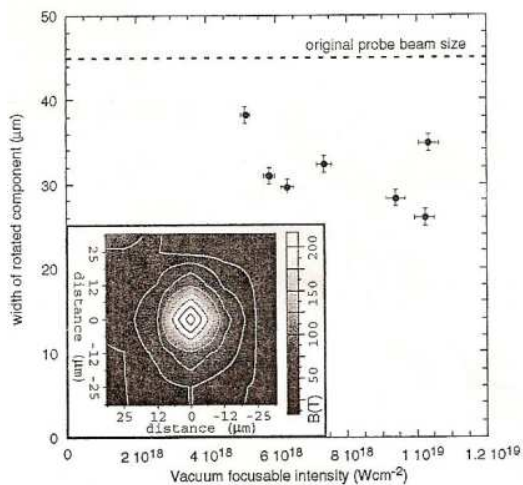
Με τη ταυτόχρονη μέτρηση της πυκνότητας του ηλεκτρονίου, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση έντασης μεταξύ των λήψεων με του σ αναλυτές διασταυρωμένους και τις λήψεις με τους αναλυτές παράλληλους στην εξεταζόμενη πόλωση. Η μέγιστη (peak) γωνία περιστροφής Faraday βρέθηκε  $22^\circ$  με μια απόκλιση  $+3$ , η οποία δίνει μαγνητικό πεδίο 2,6 MG με μια απόκλιση  $+0,6$  (Γραφ.1) και πυκνότητα ηλεκτρονίου  $2,8 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$ . Μια σημαντική όψη των μετρήσεων αυτών είναι ότι μας δείχνουν ότι η διάρκεια του μαγνητικού πεδίου εξαιτίας του IFE πλησιάζει τη διάρκεια του έντονα κυκλικά πολωμένου παλμού laser, ο οποίος δημιουργεί το πεδίο. Αυτή η απώλεια (μεταγωγή θερμότητας) του χρόνου είναι πολύ μικρή της τάξης του ενός psec.





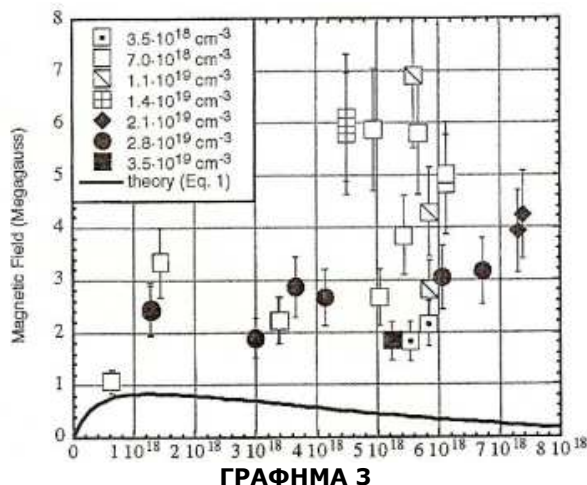
**ΓΡΑΦΗΜΑ 1**

Στο πείραμα αυτό, έχουμε απεικονίσει το μέγεθος των πλευρικών του αξονικού μαγνητικού πεδίου στη περιοχή της αλληλεπίδρασης. Μετά τη περιοχή της αλληλεπίδρασης, ένας παραβολικός καθρέπτης μεταβίβασε the collinear probe του πλάσμα σε ένα 16 bit CCD το οποίο παρατάσσετε πίσω από τον αναλυτή (Wollaston prism). Το πρίσμα χρησιμοποιήθηκε για να χωρίσει τα περιστρεφόμενα και τα μη περιστρεφόμενα μέρη της εξεταζόμενης ακτίνας έτσι ώστε να μην παραβάλλονται. Το χωρικό μέγεθος της εξεταζόμενης ακτίνας συνεπώς ταιριάζει σε μια μέτρηση του μεγέθους του μαγνητικού πεδίου στο πλάσμα, αφού το μέγεθος της κηλίδας του εξεταζόμενου παλμού ήταν πολύ μεγαλύτερο από το μέγεθος της ακτίνας Laser υψηλής έντασης. Παρατηρήσεις του ακτινικού μεγέθους του μαγνητικού πεδίου φαίνονται στο γράφημα 2. Η κορυφή (peak) του μαγνητικού πεδίου παρατηρείται πάντα στον άξονα και σημειώνεται ότι το ακτινικό μέγεθος του πεδίου μειώθηκε καθώς αυξήθηκε η ένταση. Ομοίως, το χωρικό μέγεθος της περιοχής υψηλού πεδίου μειώθηκε σε πυκνότητες οι οποίες παράγονται από μεγάλα μαγνητικά πεδία. Το γράφημα 2 δείχνει ότι το μαγνητικό πεδίο περιορίζεται στα 13μm με απόκλιση  $\pm 2$ , που είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό του κεντρικού σημείου laser στο κενό (περίπου 20μm). Περιστρέφοντας το πρίσμα Wollaston 45 μοίρες κατά τη πόλωση της εξεταζόμενης ακτίνας, η κατεύθυνση της πόλωσης της εξεταζόμενης ακτίνας και η κατεύθυνση του μαγνητικού, δεν μπορούν να υπολογιστούν.



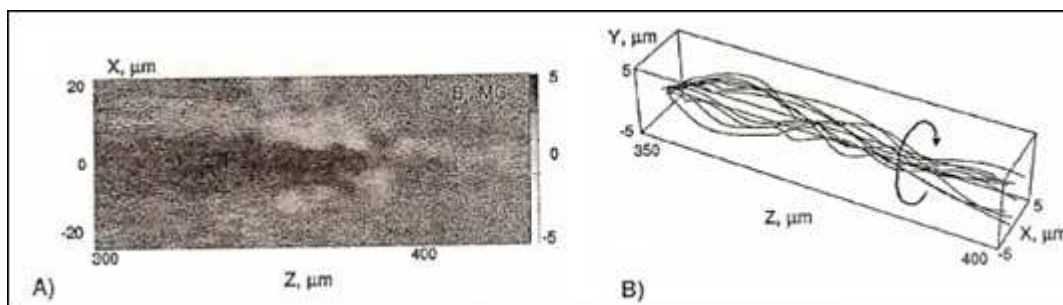
**ΓΡΑΦΗΜΑ 2**

Μετρήσεις της ισχύος του μαγνητικού πεδίου σε σύγκριση με τη ένταση ενός χώρου που περιέχει αέριο σε υψηλή πίεση φαίνονται στο γράφημα 3, για διάφορες πιέσεις αερίων και είναι φανερό ότι το πεδίο αυξάνεται ανάλογα την ένταση του laser. Η θεωρητική έκφραση για ομοιόμορφο πλάσμα (Εξ. 1) με πυκνότητα  $3,5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  φαίνεται στο γράφημα 3. Αυτή η έκφραση εύκολα υπερβαίνεται από τα στοιχεία πειραμάτων. Όντως σε μικρές συχνότητες αυτή η ασυμφωνία είναι περισσότερο από μια τάξη μεγέθους. Το μαγνητικό πεδίο έχει μικρό πλάτος εξαιτίας του φαινομένου κένωσης της πυκνότητας του ηλεκτρονίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο γράφημα 3 καθώς η πυκνότητα του πλάσμα αυξάνεται, το μέγιστο σημείο του πεδίου δεν είναι αναγκαίο να αυξηθεί.



ΓΡΑΦΗΜΑ 3

Το ανώμαλο μεγάλο αξονικό μαγνητικό πεδίο που παρατηρήσαμε μπορεί να εξηγηθεί από το φαινόμενο των ταχέων ηλεκτρονίων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια των αλληλεπιδράσεων (Εξ. 3). Σε παρόμοια πειράματα ρυθμισμένα έτσι ώστε τα ταχύ ηλεκτρόνια να μπορούν να ανιχνευθούν, παρατηρήσαμε κινούμενα προς τα εμπρός επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια με ενέργεια 100MeV. Συνεπώς, συγκρίναμε τις μετρήσεις μας με τη βοήθεια ενός 3D PIC εξομοιωτή χρησιμοποιώντας τον κωδικό VLPL. Στην εξομοίωση, μια ακτίνα Laser 30TW προσπίπτει σε ομοιόμορφο πλάσμα με πυκνότητα  $3,5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Η ακτίνα του κεντρικού σημείου του laser είναι 10 $\mu\text{m}$ , η οποία ισοδυναμεί με την αρχική ένταση των  $10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$ . Λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων του υπολογιστή, η εξομοίωση έγινε για ένα παλμό laser διάρκειας 200 fs.

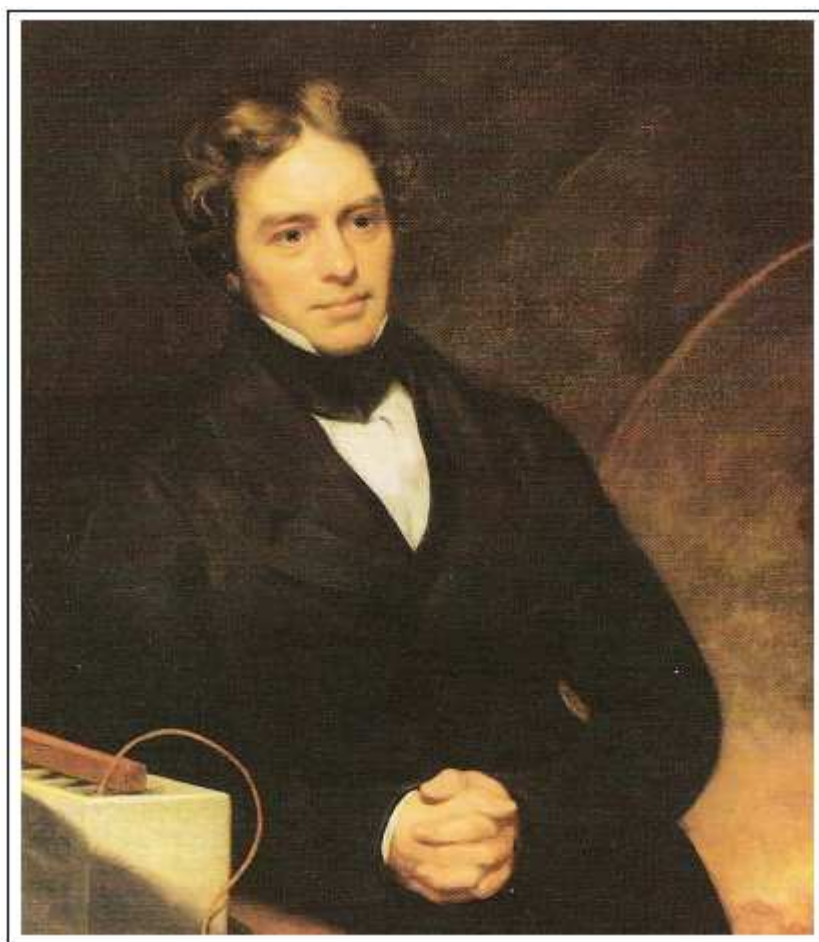


ΓΡΑΦΗΜΑ 4

Το αξονικό μαγνητικό πεδίο το οποίο προήλθε από την εξομοίωση φαίνεται στο σχήμα 4. Το μέγιστο παραγόμενο πεδίο είναι περίπου 5MG, αρκετά μεγαλύτερο από ότι προβλέπει η (Εξ 1), αλλά σύμφωνα με την εκτίμηση (3). Η αρχική διαφορά σχετίζεται με την τροχιά των ηλεκτρονίων στο πεδίο laser. Η παραγωγή της Εξ.1 υποδηλώνει ότι τα πλάσμα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τις αρχικές εγκάρσιες θέσεις τους λόγω του laser πεδίου ενώ η (3) στηρίζεται στην υπόθεση ότι τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τον άξονα του καναλιού. Αυτές οι ισχυρές διακυμάνσεις των βητατρονίων έχουν πολύ μεγαλύτερο μέγεθος χώρου στα κανάλια πεδίου από τη τρεμάμενη κίνηση των απλών ηλεκτρονίων στο πεδίο του Laser. Στην εξομοίωση PIC, ηλεκτρόνια παγιδεύτηκαν μέσα στο κανάλι και τροχιές 10 αυθαιρέτων απλών ηλεκτρονίων φαίνονται στο γράφημα 4. Φαίνεται καθαρά ότι τα ηλεκτρόνια κυκλοφορούν γύρω από το διάυλο του άξονα. Οι χαρακτηριστικές ακτίνες των τροχιών είναι 5 $\mu\text{m}$ . Ο μεγάλος αριθμός των ενεργών ηλεκτρονίων που απαιτούνται για την ερμηνεία τέτοιων μαγνητικών πεδίων (μεγαλύτερος από 10% των περιβάλλοντων ηλεκτρονίων) είναι λογικά ακόλουθος με την υψηλή απόδοση των ηλεκτρονίων η οποία υπολογίστηκε από τις μετρήσεις αυτών των πειραμάτων. Η σπειροειδής κατεύθυνση των ηλεκτρονίων ταιριάζει με τη κατεύθυνση της περιστροφής τη πόλωσης του laser και του σημείου του μαγνητικού πεδίου που εξετάσαμε.

Τέλος ερμηνεύσαμε τις πρώτες μετρήσεις του φαινομένου inverse Faraday στις οποίες μετρήσαμε τα μέγιστα των πεδίων 7 MG με απόκλιση  $\pm 0,8$  από τις αλληλεπιδράσεις, για σχετικές εντάσεις. Το πεδίο δημιουργήθηκε από έναν παλμό laser διάρκειας 0.9psec και διήρκεσε λιγότερο από 0.3psec. Το πεδίο που μετρήθηκε ήταν πολύ μεγαλύτερο από αυτό που προβλεπόταν από πρόσφατες θεωρητικές προβλέψεις για IFE σε ψυχρό πλάσμα. Ωστόσο 3-D εξομοιώσεις παράγουν μαγνητικά πεδία παρόμοιοι πλάτους, αποδεικνύοντας ότι για τέτοιες εντάσεις το αξονικό μαγνητικό πεδίο οφείλεται στις τροχιές των επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων μέσα στο πλάσμα κανάλι το οποίο παράγεται από το κυκλικά πολωμένο laser. Τέτοια μαγνητικά πεδία έχουν μεγάλη σημασία για την έρευνα στην μείωση της αστάθειας στην πλάσμα διάδοση ακτίνων που παράγονται από laser και στην πιθανή βελτίωση αυτής της διάδοσης.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΒΙΟΓΡΑΦΙΑ MICHAEL FARADAY**



Michael Faraday. Ελαιογραφία του T. Phillips  
(Λονδίνο, National portrait gallery)

**Michael Faraday (1791–1867):** Άγγλος φυσικός και χημικός, ο μεγαλύτερος πειραματικός φυσικός όλων των εποχών και ένας από τους θεμελιωτές των σύγχρονων αντιλήψεων για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ανακάλυψε την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, τις ηλεκτρομαγνητικές περιστροφές, το μαγνητο-οπτικό φαινόμενο, το διαμαγνητισμό, τη θεωρία πεδίου κ.α.

**Σύντομο βιογραφικό:** Ο Michael Faraday γεννήθηκε στις 22 Σεπτεμβρίου 1791 στο Newington Butts του Surrey (μια περιοχή του Λονδίνου τώρα γνωστή ως Elephant and Castle) και από πολύ μικρός γνώρισε τη φτώχεια. Ο πατέρας του, James, ήταν σιδεράς και μέλος της χριστιανικής σέκτας των Sandemanians. Ο James Faraday είχε κατέβει στο Λονδίνο στα τέλη της δεκαετίας του 1780 από την βορειοδυτική Αγγλία. Πολύ λίγα είναι γνωστά για τα πρώτα χρόνια της ζωής του Faraday. Σε ένα αυτοβιογραφικό σημείωμα, ο ίδιος θυμάται, ότι παρακολούθησε ημερήσιο σχολείο και έμαθε «τις βασικές γνώσεις της γραφής, ανάγνωσης και αριθμητικής».

Ο Michael, αφού τελείωσε το δημοτικό σχολείο άρχισε, σε ηλικία 14 χρόνων, να εργάζεται ως μαθητευόμενος στο βιβλιοπωλείο/βιβλιοδετείο του George Riebau στο Blandford Street του Λονδίνου (1804). Κατά τη διάρκεια της επτάχρονης μαθητείας του, ανέπτυξε ενδιαφέρον στη επιστήμη και ιδιαίτερα στη χημεία. Διάβασε τις «*Συζητήσεις πάνω στη Χημεία*» (*Conversations on Chemistry*) της Jane Marcet και τα επιστημονικά λήμματα της εγκυκλοπαίδειας Britannica, την οποία βιβλιοδετούσαν στο εργαστήριο που εργαζόταν. Ήταν, επίσης, ικανός να πραγματοποιεί τα δικά του χημικά πειράματα και έφτιαξε την δική του ηλεκτροστατική μηχανή. Παράλληλα προσπαθώντας να μορφωθεί μόνος του, συνδέθηκε, το 1810, με τη Φιλοσοφική Εταιρία (City Philosophical Society, ένα είδος λαϊκού πανεπιστημίου) και τότε ανέπτυξε και τα πρώτα επιστημονικά του ενδιαφέροντα. Στη Φιλοσοφική Εταιρία, η οποία ήταν αφιερωμένη στη αυτοβελτίωση του ατόμου, μια ομάδα νεαρών κυρίως, ανδρών και γυναικών μαζεύονταν κάθε εβδομάδα και παρακολουθούσαν διαλέξεις πάνω σε επιστημονικά θέματα ή συζητούσαν

επιστημονικά θέματα που τους ενδιέφεραν. Εκεί είναι που, μελλοντικά, θα δώσει τις πρώτες του διαλέξεις ο Faraday.

Κατά το τέλος της μαθητείας του, το 1812, θα δοθούν στον Faraday, από ένα πελάτη του Riebau, τον William Dance, ιδρυτικό μέλος της Βασιλικής Φιλαρμονικής Εταιρίας (Royal Philharmonic Society), τέσσερα εισιτήρια για να παρακολουθήσει τις τέσσερις τελευταίες διαλέξεις του sir Humphry Davy (1778–1829) στο Βασιλικό Ινστιτούτο του Λονδίνου (Royal Institution). Οι διαλέξεις αυτές θα παίξουν καθοριστικό ρόλο για τη μετέπειτα ζωή του Faraday, οι οποίες έσπρωξαν τον αυτοδίδακτο νέο στην απόφαση να αφοσιωθεί στην επιστήμη. Μαγεμένος από τον κόσμο της επιστήμης που ανοιγόταν μπροστά του, ο Faraday απευθύνθηκε στον τότε πρόεδρο της Βασιλικής Εταιρίας του Λονδίνου Joseph Banks, ζητώντας του να τον βοηθήσει να εργαστεί σε κάποια θέση εκεί, δεν πήρε όμως απάντηση. Σύντομα όμως του χαμογέλασε η τύχη. Στις αρχές του 1813, υπήρξε μια διαμάχη στην βασική αίθουσα διαλέξεων, μεταξύ του υπευθύνου κατασκευής οργάνων (Instrument Maker) και του βοηθού χημικού (Chemical Assistant) η οποία κατέληξε στην απόλυση του τελευταίου. Το γεγονός αυτό ανάγκασε τον Davy να ζητήσει έκτακτο βοηθό και ο Banks, που θυμήθηκε τον Faraday, τον προσέλαβε ως Βοηθό Χημικό στο Βασιλικό Ινστιτούτο (1η Μαρτίου 1813). Τότε εκείνος του έδειξε τις σημειώσεις, βιβλιοδετημένες, που είχε κρατήσει από τις διαλέξεις του και ενθουσιασμένος από αυτές, ο Davy, κινητοποιήθηκε για την πρόσληψη του ως μόνιμου βοηθού του.

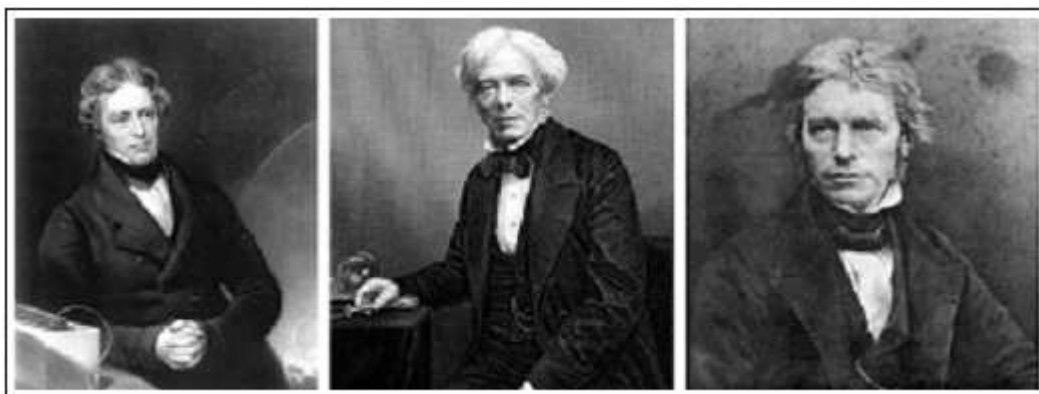
Ο Faraday πέρασε όλη του την ερευνητική σταδιοδρομία στο Βασιλικό Ινστιτούτο (Royal Institution of Great Britain), από το οποίο αποσύρθηκε το 1861. Το μεγαλύτερο μέρος των δεκαετιών 1810 και 1820 δούλεψε κάτω από την εποπτεία του αναπληρωτή του Davy ως Καθηγητή Χημείας, William Thomas Brande. Την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1813 ως τον Απρίλιο του 1815 συνόδευε τον Davy σε μια επιστημονική περιήγηση στην Ευρώπη. Ο Ναπολέων είχε παραχωρήσει διαβατήριο στον Davy για τον ίδιο, την γυναίκα του, την ακόλουθο της και έναν υπηρέτη. Ο Faraday δέχτηκε με επιφύλαξη να αναλάβει και τον ρόλο του τελευταίου. Αυτό οδήγησε σε εντάσεις τον Faraday και την Jane Davy που θεωρούσε το πρώτο ως υπηρέτη ο οποίος φυσικά μόνο αυτό δεν ήταν. Ο Davy προσπαθούσε να διατηρήσει την ειρήνη ανάμεσα στη σχετικά καινούρια σύζυγο του και στον εξαιρετικά ταλαντούχο βοηθό του. Κατά τη διάρκεια της περιήγησης τους, επισκέφτηκαν το Παρίσι (όπου ο Faraday παρακολούθησε την πρώτη του πραγματική επιστημονική έρευνα, όταν ο Davy σύγχυσε τους Γάλλους χημικούς παρουσιάζοντας ηλεκτροχημικά την στοιχειώδη φύση του ιωδίου), την Ιταλία (όπου συνάντησαν τον μεγάλο πια σε ηλικία Alessandro Volta (1745-1827), επισκέφτηκαν το Βεζούβιο όπου ο Davy ήταν ικανός να αποσυνθέσει ένα διαμάντι σε άνθρακα χρησιμοποιώντας το μεγάλο φακό του Δούκα της Tuscany), την Ελβετία (όπου συνάντησαν τον De La Rives) και την νότια Γερμανία. Ο Davy είχε σκοπό να συνεχίσει το ταξίδι στην Τουρκική Αυτοκρατορία, να επισκεφτεί την Αθήνα και την Κωνσταντινούπολη, αλλά λόγω των εντάσεων μεταξύ των μελών της παρέας ή της απόδρασης του Ναπολέοντα από την Elba, γύρισαν στην Αγγλία τον Απρίλιο του 1815.

Το έτος 1821 είναι από πολλές απόψεις το πιο σημαντικό στη ζωή του Faraday. Στις 21 Μαΐου 1821 προάχθηκε από το Βασιλικό Ινστιτούτο σε Διευθύνων του Οίκου (Superintendent of the House). Στις 2 Ιουνίου 1821 παντρεύτηκε την αγαπημένη του, Sarah Barnard, η οποία ήταν μέλος ενός εκ των ηγετικών οικογενειών της σέκτας των Sandemanian στο Λονδίνο και στις 15 Ιουλίου έκανε την Ομολογία Πίστης του στην Εκκλησία των Sandemanian.

Ο Faraday αρχικά ασχολήθηκε με τη χημεία και οι επιδόσεις του στον τομέα αυτό είχαν σαν αποτέλεσμα να γίνει το 1815 επόπτης και το 1825 διευθυντής του εργαστηρίου. Από τον επόμενο χρόνο άρχισε να δίνει τις περίφημες εβδομαδιαίες βραδινές «Διαλέξεις της Παρασκευής» για τα μέλη του Ινστιτούτου και τις ετήσιες «Χριστουγεννιάτικες διαλέξεις» για νέους (θεσμός που ισχύει ως σήμερα), με τις οποίες αποδείχτηκε έξοχος εκλαϊκευτής της επιστήμης. Ήδη το 1824, ο Faraday έγινε μέλος της Βασιλικής Εταιρίας του Λονδίνου, παρά τις σφοδρές αντιρρήσεις του τότε προέδρου της Davy, οποίος μάλιστα από ζηλοτυπία προς τον βοηθό του, του είχε ζητήσει να αποσύρει την υποψηφιότητα του και, όταν αυτός αρνήθηκε, ψήφισε εναντίον του. Αντίθετος προς κάθε βράβευση πνευματικής προσπάθειας, ο Faraday αρνήθηκε να δεχτεί τον τίτλο του ιππότη (sir) και δύο φορές την προεδρία της Βασιλικής Εταιρίας του Λονδίνου. Αρνήθηκε επίσης το 1827 την έδρα της Χημείας στο Πανεπιστημιακό Κολέγιο του Λονδίνου. Καθώς οι αποδοχές του στο Βασιλικό Ινστιτούτο ήταν χαμηλές, άρχισε να διδάσκει στην Βασιλική Στρατιωτική Ακαδημία, το 1831 όμως υποχρεώθηκε, λόγω φόρτου εργασίας, να διακόψει την έκτακτη αυτή απασχόληση και να ζητήσει κρατική επιχορήγηση. Αντιμετώπισε τότε το χλευασμό του υπουργού Οικονομικών λόρδου Melburn, που χαρακτήρισε το αίτημα του ως «χοντρή αγυρτία». Ο ίδιος ωστόσο, τέσσερα χρόνια αργότερα, αναγνωρίζοντας το λάθος του, απολογήθηκε γι' αυτό, και του ζήτησε να δεχτεί την επιχορήγηση. Στο μεταξύ, ο Faraday είχε ονομαστεί (1833) ισόβιος καθηγητής στη νέο-ιδρυμένη τότε έδρα Χημείας του Βασιλικού Ινστιτούτου.

Η έντονη ερευνητική δραστηριότητα του Faraday, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1830, τον εξάντλησε και έτσι το 1841 αναγκάστηκε να αποσυρθεί στην εξοχή για να ξεκουραστεί. Επέστρεψε στην εργασία του το 1844, η ανεξάντλητη όμως δημιουργικότητα του τον είχε πια εγκαταλείψει. Υποφέροντας από απώλεια μνήμης, αναγκάστηκε να σταματήσει τις έρευνες του το 1855 και τελικά να αποσυρθεί το 1861 στο Hampton Court.

**Επιστημονικό έργο:** Η μεγαλύτερη ανακάλυψη του Faraday είναι το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η πορεία που ακολούθησε για να φτάσει ως εκεί ήταν εξαιρετικά δύσκολη. Η επικρατούσα επιστημονική άποψη της εποχής ήταν ότι το φως, η θερμότητα, ο μαγνητισμός και ο ηλεκτρισμός οφείλονταν σε αβαρή ρευστά. Το καλοκαίρι του 1820 ο Δανός φυσικός Hans Christian Oersted (1777–1851), σε ένα σύντομο κείμενο, ανακοίνωσε τη συναρπαστική ανακάλυψη του ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μπορούσε να επηρεάζει μια μαγνητική βελόνα και έτσι ο ηλεκτρισμός εμφανιζόταν να δημιουργεί μαγνητικά φαινόμενα. Το ερώτημα που γεννήθηκε τότε ήταν να και αντίστροφα ο μαγνητισμός θα μπορούσε να παράγει ηλεκτρισμό. Ο Faraday, από διαίσθηση αρχικά, αντιμετώπισε το ερώτημα θετικά και άρχισε να εργάζεται για την απόδειξη του. Η πρώτη του ανακάλυψη στον ηλεκτρομαγνητισμό έγινε ήδη το Σεπτέμβριο του 1821. αρχικά επανέλαβε το «πείραμα Oersted» και για την περιγραφή του, ο Faraday χρησιμοποίησε τον όρο «δυναμικές γραμμές», αναφέροντας ότι ο αγωγός περιβάλλεται από κυκλικές δυναμικές γραμμές ή από ένα κυκλικό μαγνητικό πεδίο. Η «δυναμική γραμμή» (λιγότερο γνωστή και ως δυναμική ροή) αποδείχτηκε για τη φυσική ένα πολύτιμο εργαλείο και στα χρόνια που ακολούθησαν βοήθησε τους φυσικούς να εκφράσουν με άνεση όλα τα φαινόμενα του ηλεκτρομαγνητικού χώρου. Ακολούθησε η ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής περιστροφής από τον Faraday, ο οποίος τοποθέτησε σε δοχείο με υδράργυρο ένα μαγνήτη, έτσι ώστε ο ένας πόλος του να βρίσκεται έξω από τον υδράργυρο και βύθισε σε αυτόν ένα σύρμα. Όταν περνούσε ρεύμα μέσα από το σύρμα και τον υδράργυρο, εφόσον ο μαγνήτης ήταν στερεωμένος το σύρμα περιστρεφόταν γύρω από αυτόν. Αν το σύρμα ήταν στερεωμένο και ο μαγνήτης ελεύθερος να περιστραφεί γύρω από τον άξονα του, τότε το ρεύμα προκαλούσε περιστροφή του μαγνήτη. Έτσι κατασκευάστηκε ο πρώτος ηλεκτρικός κινητήρας.



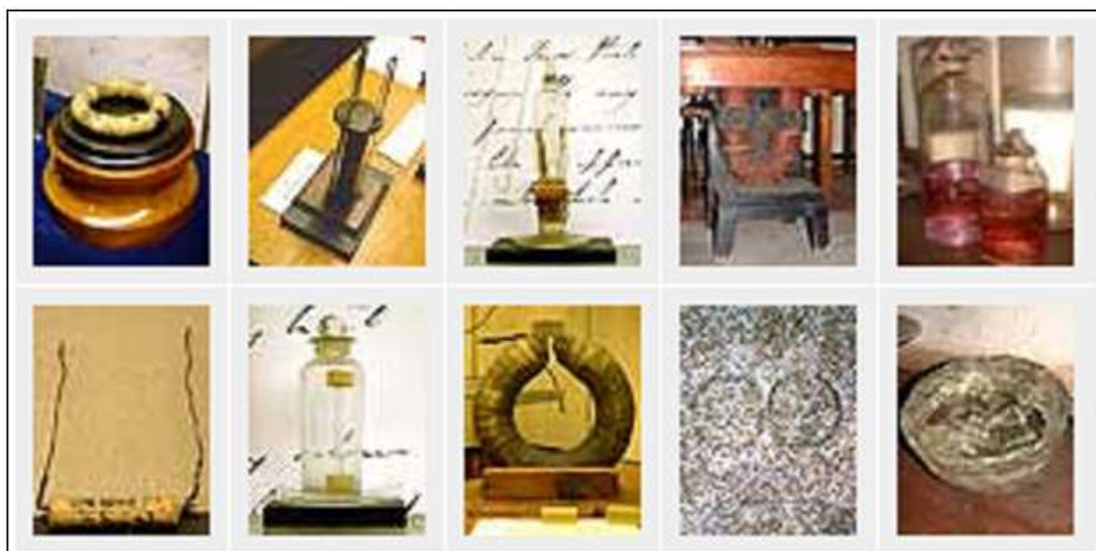
Στη συνέχεια, ο Faraday εξέτασε την περίπτωση παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με την τοποθέτηση ενός αγωγού κοντά σε έναν ισχυρό μαγνήτη. Συγχρόνως μελέτησε και την περίπτωση παραγωγής ρεύματος σε ένα αγωγό, ο οποίος βρισκόταν κοντά σε ένα άλλο, ρευματοφόρο όμως, αγωγό. Οι έρευνες αυτές, συστηματικές, κοπιαστικές και μακροχρόνιες, δεν οδηγούσαν πουθενά. Στο ημερολόγιο του μεγάλου φυσικού βρίσκονται πολυάριθμες περιγραφές των πειραμάτων αυτών, όλες όμως καταλήγουν περίπου στην ίδια παρατήρηση «Δεν δημιουργήθηκε καμία ένδειξη». Χρειάστηκε τεράστια πίστη, μεγάλο πείσμα, υπομονή και εξαντλητική εργασία μιας δεκαετίας περίπου για να φτάσει για πρώτη φορά το 1831 σε θετικά αποτελέσματα. Αυτό έγινε κατά τη διάρκεια ενός πειράματος με δύο πηνία περιτυλιγμένα γύρω από ένα σιδερένιο δακτύλιο, οπότε, τροφοδοτώντας με ρεύμα μόνο το ένα πηνίο, ο Faraday διαπίστωσε ότι, όταν διέκοπτε το ρεύμα αυτό, εμφανιζόταν ρεύμα στο άλλο πηνίο. Το ρεύμα στο δεύτερο πηνίο διαρκούσε όσο χρόνο γινόταν η μεταβολή του ρεύματος στο πρώτο και μηδενιζόταν όταν σ' αυτό γινόταν σταθερό. Ο Faraday δεν περιορίστηκε στις παρατηρήσεις αυτές και δεν έσπευσε να ανακοινώσει τα συμπεράσματα του αλλά αναζήτησε τις βαθύτερες αιτίες που δημιουργούσαν το «επαγωγικό» ρεύμα στο δεύτερο πηνίο. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ήταν ότι η μεταβολή της μαγνητικής ροής δημιουργεί ηλεκτρεγερτική δύναμη «εξ' επαγωγής», η οποία με τη σειρά της, σε κλειστό κύκλωμα, προκαλεί επαγωγικό ρεύμα. Ο Faraday προχώρησε παραπέρα στη διατύπωση του νόμου, στον οποίο «πειθαρχούσε» το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, επεξήγησε τη σχέση μεταξύ του επαγωγικού ρεύματος και των μαγνητικών ιδιοτήτων του μέσου και μελέτησε το φαινόμενο της αυτεπαγωγής και τα ρεύματα διακοπής και αποκατάστασης του κυκλώματος. Η ανακάλυψη του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής είναι ανυπολόγιστης αξίας, αφού στην εκμετάλλευση του στηρίζεται σχεδόν όλος ο σύγχρονος τεχνικός πολιτισμός.

Η ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής είναι η σπουδαιότερη, όχι όμως και η μοναδική συνεισφορά του Faraday στην επιστήμη. Οι πρώτες ερευνητικές του επιτυχίες ήταν στη χημεία, όπου το 1823 κατόρθωσε να υγροποιήσει το χλώριο και στη συνέχεια και άλλα αέρια. Ακόμη, το 1825 ανακάλυψε την παρασκευή του βενζολίου ( $C_6H_6$ , οργανική ένωση, αρωματικός υδρογονάνθρακας). Εξάλλου ως εργαστηριακός χημικός ήταν από τους καλύτερους της εποχής του, ο πρώτος που κατόρθωσε να δημιουργήσει στο εργαστήριο θερμοκρασίες κατώτερες των



-15°C, γεγονός που τον κατατάσσει στους πρωτοπόρους της κρυογονικής. Στη φυσική πάλι, εστιάζοντας την προσοχή του στη μελέτη του στατικού ηλεκτρισμού, απέδειξε την αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου, διατύπωσε την θεωρία της ηλέκτρισης από επαγωγή, έδειξε ότι οι καλοί αγωγοί σχηματίζουν στο εσωτερικό τους προστατευτική ασπίδα έναντι των ηλεκτρικών αλληλεπιδράσεων (ο γνωστός «κλωβός του Faraday») και ανακάλυψε ότι η ηλεκτροστατική ενέργεια συγκεντρώνεται τοπικά στα διηλεκτρικά, πράγμα που του επέτρεψε να ορίσει την «ειδική επαγωγική ισχύ», δηλαδή την επιδεκτικότητα των μονωτών. Ακόμη, μελετώντας τις μαγνητικές ιδιότητες διαφόρων υλικών, ανακάλυψε τα φαινόμενα του παραμαγνητισμού και του διαμαγνητισμού.

Στο θεωρητικό τομέα της φυσικής, που ο ίδιος αποκαλούσε «φυσική φιλοσοφία», ο Faraday διατύπωσε πολλές νέες απόψεις για τη φύση του ηλεκτρισμού, του μαγνητισμού και για το μηχανισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, οι οποίες δικαιώθηκαν αργότερα. Έχοντας την πεποίθηση ότι τα διάφορα είδη ηλεκτρισμού, δηλαδή ο στατικός ηλεκτρισμός, ο βολταϊκός, ο ζωικός, ο μαγνητικός και ο θερμοηλεκτρικός ήταν της ίδιας φύσης, κατόρθωσε να αποδείξει πειραματικά ότι, «οποιαδήποτε κι αν είναι η αιτία του ηλεκτρισμού, αυτός έχει πάντα την ίδια φύση». Στην προσπάθειά του να βρει ποσοτικές σχέσεις μεταξύ των διαφόρων ειδών ηλεκτρισμού, συνέχισε τις έρευνες του Davy πάνω στο φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης, εισήγαγε στον τομέα αυτό τη ορολογία που χρησιμοποιείται και σήμερα (άνοδος, κάθοδος, ανιόν, κατιόν, ηλεκτρόδιο) και κατέληξε στους δύο ποσοτικούς νόμους της ηλεκτρόλυσης («Νόμοι του Faraday», 1833–1834). Οι νόμοι της ηλεκτρόλυσης αποτέλεσαν σημαντικό επιχείρημα προς την κατεύθυνση της άποψης της ασυνέχειας της ύλης και του ηλεκτρικού φορτίου. Επιπλέον, το 1840 πριν ακόμη ανακαλυφθεί η αρχή της διατήρησης της ενέργειας, διατύπωσε την άποψη για την ενότητα όλων των «δυνάμεων της φύσεως», των διαφόρων δηλαδή μορφών ενέργειας, και για την αμοιβαία μετατροπή της. Τέλος, διατύπωσε την άποψη ότι η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων είναι κυματική διαδικασία που γίνεται με πεπερασμένη ταχύτητα.



**ΣΧΗΜΑ:** Το Μουσείο Faraday του Βασιλικού Ινστιτούτου, το οποίο δημιουργήθηκε από την Βασίλισσα της Αγγλίας το 1973, περιέχει μια ανακατασκευή με τον αρχικό εξοπλισμό, στην αρχική τοποθεσία, ενός από τα εργαστήρια του Faraday. Ανάμεσα στα εκθέματα που παρουσιάζονται είναι και τα παρακάτω: (πρώτη σειρά, από αριστερά προς τα δεξιά): Δακτυλίδι ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday. Μπαταρία που δόθηκε στον Faraday από τον Volta. Εξάρτημα από τον ηλεκτροχημικό εξοπλισμό του Faraday. Πειραματική διάταξη που αποδεικνύει φαινόμενο του διαμαγνητισμού. Κολλοειδείς λύσεις του χρυσού του Faraday. (δεύτερη σειρά, από αριστερά προς τα δεξιά): Η πρώτη ηλεκτρική γεννήτρια του Faraday. Το πρώτο δείγμα βενζίνης που δημιουργήθηκε. Η πρώτη πειραματική διάταξη με την οποία ο Faraday ανακάλυψε το μαγνητοοπτικό φαινόμενο. Το πρώτο διάγραμμα ρινισμάτων σιδήρου που φτιάχτηκε ποτέ από τον Faraday. Δείγμα γυαλιού που φτιάχτηκε από τον Faraday.

**Συγγράμματα και Ημερολόγιο:** Ο Faraday περιέγραψε τα περίφημα πειράματα του στον ηλεκτρισμό και τον ηλεκτρομαγνητισμό σε τρεις τόμους με τίτλο *Πειραματικές έρευνες στον ηλεκτρισμό* (*Experimental researches in Electricity*, 1839, 1844, 1855) και την πειραματική του εργασία στη χημεία στο έργο του *Πειραματικές έρευνες στη χημεία και τη φυσική* (*Experimental Researches in Chemistry and Physics*, 1858). Άλλο σπουδαίο έργο του είναι το *Για τις διάφορες δυνάμεις της φύσης και τις μεταξύ τους σχέσεις* (*On the Various Forces of Nature and their Relation to Each Other*). Από τις σημειώσεις του για τις «Χριστουγεννιάτικες διαλέξεις» ξαναγράφτηκαν και δημοσιεύτηκαν: *Η χημική ιστορία ενός κεριού* (*The Chemical History of a Candle*) και *Διαλέξεις για τις διάφορες δυνάμεις της ύλης* (*Lectures on Various Forces of Matter*).



Εκτός από τις πολυάριθμες δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά, το πιο σημαντικό έγγραφο που αφορά τις έρευνες του Faraday, είναι το ημερολόγιο του, το οποίο κρατούσε συστηματικά από το 1820 έως το 1862. Το ημερολόγιο του Faraday δημοσιεύτηκε το 1932 από το Βασιλικό Ινστιτούτο σε επτά τόμους οι οποίοι περιείχαν συνολικά 3236 σελίδες, με μερικές χιλιάδες σχέδια στα περιθώρια τους.

Στις 13 Σεπτεμβρίου 1845, ο Faraday ανακάλυψε το μαγνητο-οπτικό φαινόμενο που φέρει, προς τιμήν του, το όνομα του, δηλαδή το φαινόμενο Faraday. Ασχολήθηκε με την οπτική ύαλο και διατύπωσε την αρχή της περιστροφής του επιπέδου πόλωσης του φωτός, όταν αυτό διέρχεται μέσα από ένα μαγνητικό πεδίο. Εκείνης της μέρας η καταχώρηση στο ημερολόγιο του ήταν: «Σήμερα δούλεψα με τις γραμμές μαγνητικής δύναμης, περνώντας τις μέσα από διαφορετικά σώματα (διαφανή σε διαφορετικές κατευθύνσεις) και τη ίδια στιγμή περνώντας μια πολωμένη ακτίνα φωτός μέσα τους και εξετάζοντας μετά την ακτίνα με ένα προσοφθάλμιο φακό Nichol (Nichol's Eyepiece) ή άλλα μέσα». Μετά την περιγραφή αρκετών αρνητικών αποτελεσμάτων κατά τις οποίες η ακτίνα φωτός είχε περάσει διαμέσου αέρα και διαφόρων άλλων υλικών, συνεχίζει της ίδιας μέρας την καταχώρηση: «Ένα κομμάτι βαριού γυαλιού το οποίο είχε διαστάσεις 2x1,8 ίντσες και 0,5 ίντσες πάχος, το οποίο ήταν πυρίτιο βορικό άλας του μολύβδου, γυαλισμένο στις δύο πιο κοντινές άκρες, χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα. Δεν έδωσε κανένα αποτέλεσμα όταν οι ίδιοι μαγνητικοί πόλοι ή οι αντίθετοι πόλοι ήταν στις απέναντι πλευρές (σύμφωνα με την πορεία της πολωμένης ακτίνας), ούτε όταν ήταν οι ίδιοι πόλοι στην ίδια πλευρά, ούτε εφαρμόζοντας συνεχές ή ασυνεχές ρεύμα, ΑΛΛΑ, όταν ήταν οι αντίθετοι μαγνητικοί πόλοι ήταν στην ίδια πλευρά, υπήρξε μια επίδραση πάνω στην πολωμένη ακτίνα, και έτσι αποδείχθηκε ότι η μαγνητική δύναμη και το φως έχουν σχέση η μια με την άλλη. Αυτό το γεγονός ίσως αποδειχθεί εξαιρετικά χρήσιμο και μεγάλης αξίας στην έρευνα και για τις δύο καταστάσεις της φυσικής δύναμης».



**Επίλογος:** Το μεγαλείο όμως του Faraday βρίσκεται στο γεγονός ότι, αν και αυτοδίδακτος, χωρίς σοβαρό μαθηματικό υπόβαθρο, βασιζόμενος μόνο στο χάρισμα με το οποίο ήταν προικισμένος, να διαισθάνεται την αλήθεια, είχε το σθένος να απορρίψει την παραδοσιακή φυσική και να δημιουργήσει μια άλλη, εντελώς καινούρια. Οι δυναμικές γραμμές, τις οποίες εισήγαγε για να περιγράψει τα πειράματα του στον ηλεκτρομαγνητισμό (και που απορρίφθηκαν αρχικά από τους άλλους φυσικούς, οι οποίοι πίστευαν ότι τα ηλεκτρικά φορτία αλληλεπιδρούν από απόσταση), εισήγαγαν την εικόνα ενός σύμπαντος το οποίο δομείται από πεδία. Βασισμένος στις απόψεις του, ο μεγάλος Σκώτος φυσικός James Clerk Maxwell (1831-1879), θεμελίωσε στο δεύτερο μισό του 19ου αιώνα μια αυστηρή θεωρία που κράτησε ως την εποχή του Albert Einstein (1879-1955).

Προς τιμήν του μεγάλου φυσικού, ονομάστηκε «σταθερά Faraday» ή «αριθμός Faraday» (F) το ποσό του ηλεκτρικού φορτίου (96500cb) που χρειάζεται να διέλθει από ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη για να απελευθερωθεί στην άνοδο ή την κάθοδο ποσότητα στοιχείου ίση προς ένα γραμμοίσοδύναμο.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΜΟΝΑΔΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟ S.I.**

Σύμβολο	Ονομασία ποσότητας	Μονάδες		Κύριες μονάδες
I	Ρεύμα (current)	ampere	A	A
q	Ηλεκτρικό φορτίο (electric charge), Ποσότητα ηλεκτρισμού (quantity of electricity)	coulomb	C	A·s
V	Διαφορά δυναμικού (potential difference)	volt	V	J/C = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup> ·A <sup>-1</sup>
R, Z, X	Αντίσταση (resistance), Σύνθετη αντίσταση (impedance), Άεργη αντίσταση (reactance)	ohm	Ω	V/A = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup> ·A <sup>-2</sup>
ρ	Ειδική αντίσταση (resistivity)	ohm metre	Ω·m	kg·m <sup>3</sup> ·s <sup>-3</sup> ·A <sup>-2</sup>
P	Ηλεκτρική ισχύς (electrical power)	watt	W	V·A = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup>
C	Χωρητικότητα (capacitance)	farad	F	C/V = kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·A <sup>2</sup> ·s <sup>4</sup>
	Αντίστροφη χωρητικότητα (elastance)	αντίστροφο farad	F <sup>-1</sup>	V/C = kg·m <sup>2</sup> ·A <sup>-2</sup> ·s <sup>-4</sup>
ε	Διηλεκτρική σταθερά (permittivity)	farad ανά metre	F/m	kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-3</sup> ·A <sup>2</sup> ·s <sup>4</sup>
χ <sub>e</sub>	Ηλεκτρική επιδεκτικότητα (electric susceptibility)	(α δ ι ά σ τ α τ ο)		
G, Y, B	Αγωγιμότητα (conductance), Admittance, Susceptance	siemens	S	Ω <sup>-1</sup> = kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>3</sup> ·A <sup>2</sup>
σ	Conductivity	siemens ανά metre	S/m	kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-3</sup> ·s <sup>3</sup> ·A <sup>2</sup>
H	Μαγνητικό πεδίο (magnetic field), Ένταση μαγνητικού πεδίου (magnetic field intensity)	ampere ανά metre	A/m	A·m <sup>-1</sup>
Φ <sub>m</sub>	Μαγνητική ροή (magnetic flux)	weber	Wb	V·s = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ·A <sup>-1</sup>
B	Ένταση μαγνητικής ροής (magnetic flux density), Μαγνητική επαγωγή (magnetic induction), Ισχύς μαγνητικού πεδίου (magnetic field strength)	tesla	T	Wb/m <sup>2</sup> = kg·s <sup>-2</sup> ·A <sup>-1</sup>
	Μαγνητική αντίσταση (reluctance)	στροφές ampere ανά weber	A/Wb	kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>2</sup> ·A <sup>2</sup>
L	Επαγωγή (inductance)	henry	H	Wb/A = V·s/A = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ·A <sup>-2</sup>
μ	Μαγνητική διαπερατότητα (permeability)	henry ανά metre	H/m	kg·m·s <sup>-2</sup> ·A <sup>-2</sup>
χ <sub>m</sub>	Μαγνητική επιδεκτικότητα (magnetic susceptibility)	(α δ ι ά σ τ α τ ο)		