

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

Η ερευνητική μου δραστηριότητα υπάγεται στη θεωρητική φυσική της συμπεκνωμένης ύλης και έχει ως αντικείμενο τη θεωρητική/ υπολογιστική μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων μικρο- και νανοφασικών υλικών. Συγκεκριμένα, η θεωρητική/ υπολογιστική μελέτη των υλικών αυτών περιλαμβάνει την ανάπτυξη θεωρητικών/ υπολογιστικών μεθόδων και τεχνικών από πρώτες αρχές οι οποίες επιτρέπουν την απευθείας σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα χωρίς την ανάγκη εισαγωγής εξωτερικών παραμέτρων. Στόχος των μεθόδων αυτών είναι τόσο η ερμηνεία φυσικών φαινομένων και ιδιοτήτων υλικών που αναδεικνύονται από το πείραμα όσο και ο σχεδιασμός νέων υλικών με επιθυμητές ιδιότητες. Επιγραμματικά, τα ερευνητικά μου ενδιαφέροντα αφορούν στα εξής υλικά:

- Κολλοειδείς κρύσταλλοι
- Νανοδομημένα μέταλλα και πλασμονικά υλικά
- Μεταϋλικά αρνητικού δείκτη διάθλασης/ τεχνητά μαγνητικά μεταϋλικά
- Μεταϋλικά ισχυρής οπτικής χειρομορφίας
- Άτακτα φωτονικά υλικά και κράματα
- Υλικά για την οδήγηση/ καθυστέρηση φωτός και κβαντικούς υπολογισμούς
- Υλικά με νανοσωματίδια τροποποιημένα από υδροκρυσταλλικές μονάδες

Οι υπολογιστικές τεχνικές που έχω αναπτύξει κατά καιρούς για τη μελέτη των παραπάνω συστημάτων είναι οι παρακάτω:

- Στρωματική μέθοδος πολλαπλής σκέδασης για τη μελέτη ΗΜ ιδιοτήτων φωτονικών μικρο- και νανοδομών.
- Μέθοδος συμφώνου δυναμικού για άτακτα φωτονικά κράματα
- Τεχνική ΗΜ διαδότη για κυματοδήγηση σε φωτονικά υλικά
- Τεχνική τανυστή Green για τυχούσες συλλογές ΗΜ σκεδαστών
- Φορμαλισμός ηλεκτροδυναμικής διακυμάνσεων για τον υπολογισμό των δυνάμεων van der Waals σε κολλοειδή συστήματα
- Μέθοδος τρόπων Fourier για τη μελέτη φωτονικών μικρο- και νανοδομών που παράγονται με λιθογραφικές μεθόδους.

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

1. Θεωρητικές/ υπολογιστικές μέθοδοι για τη μελέτη φωτονικών μικρο- και νανοδομών

Οι φωτονικοί κρύσταλλοι και τα μεταϋλικά είναι τεχνητά υλικά στα οποία η διηλεκτρική συνάρτηση είναι περιοδική συνάρτηση του χώρου. Μια μεγάλη κατηγορία τέτοιων υλικών, αυτών που κατασκευάζονται με χημικές μεθόδους, αποτελούνται από σφαιρικά σωματίδια. Για τη θεωρητική μελέτη των συστημάτων αυτών από πρώτες αρχές αναπτύχθηκε κατάλληλος υπολογιστικός κώδικας, με το οποίο υπολογίζει κανείς τη δομή ζωνών συχνοτήτων ενός απείρου φωτονικού κρυστάλλου καθώς επίσης και τους συντελεστές διέλευσης, ανάκλασης και απορρόφησης από πεπερασμένα πλακίδια ενός τέτοιου κρυστάλλου. Ένας κρύσταλλος μπορεί να αποτελείται από μια συστοιχία ομοίων ομοιογενών πλακών ή/και από επίπεδα περιοδικά διατεταγμένων σφαιρικών σκεδαστών. Η θεωρητική μέθοδος και το πρόγραμμα βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων του Maxwell χρησιμοποιώντας τεχνικές πολλαπλής σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (εργασίες Νο. 2, 5 και 7). Η μέθοδος είναι γνωστή ως στρωματική μέθοδος πολλαπλής σκέδασης (ΣΜΠΣ).

Η ΣΜΠΣ επεκτάθηκε έτσι ώστε να είναι δυνατή και η μελέτη φωτονικών δομών που κατασκευάζονται με λιθογραφικές μεθόδους. Έτσι, αναπτύχθηκε μια υβριδική μέθοδος που συνδυάζει τη ΣΜΠΣ με τη μέθοδο τρόπων (καταστάσεων) Fourier (Fourier modal method). Η βασική παράμετρος που επέτρεψε τη συγχώνευση των δύο αυτών μεθόδων σε ένα κοινό

υπολογιστικό κώδικα είναι οι πίνακες σκέδασης (διέλευσης/ ανάκλασης) οι οποίοι εμφανίζονται στο μαθηματικό φορμαλισμό και των δύο παραπάνω μεθόδων. Ο αναπτυχθείς υπολογιστικός κώδικας επιτρέπει επίσης τη μελέτη ετεροπαφών δύο φωτονικών υλικών όπου το ένα έχει προέλθει με τεχνικές αυτο-οργάνωση (π.χ. τεχνητό οπάλιο) και το άλλο λιθογραφία (π.χ. 2Δ από μεταλλικές νανο-κολώνες) (εργασία Νο. 54).

2. Οπτική Περίθλαση από Κολλοειδείς Κρυστάλλους

Οι κολλοειδείς κρύσταλλοι παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον καθώς παρουσιάζουν φωτονικά χάσματα στην οπτική περιοχή καθιστώντας τους κατάλληλους για τεχνολογικές εφαρμογές στην οπτοηλεκτρονική. Για τον οπτικό χαρακτηρισμό αυτών των κρυστάλλων πραγματοποιούνται πειράματα διέλευσης/ανάκλασης φωτός. Η μέθοδος πολλαπλής σκέδασης που περιγράφηκε παραπάνω, επιτρέποντας την απευθείας σύγκριση θεωρίας – πειράματος, χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και ερμηνεία φασμάτων διέλευσης/ανάκλασης κολλοειδών κρυστάλλων αποτελούμενων από σφαίρες πολυστυρενίου σε νερό καθώς και κρυστάλλων από σφαίρες PMMA σε αέρα (εργασίες Νο.1 και 6).

3. Οπτικές Ιδιότητες Πλασμονικών Νανοδομημένων Υλικών

Στα πλαίσια της θεωρίας πολλαπλής σκέδασης μελετήθηκαν θεωρητικά οι μηχανισμοί με τους οποίους πλασμονικές (μεταλλικές) νανοσφαίρες (σφαίρες πλάσματος διαστάσεων 5-10 nm) απορροφούν φως όταν διατάσσονται περιοδικά μέσα σε μια διηλεκτρική μήτρα. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν μεγάλο τεχνολογικό ενδιαφέρον καθώς χρησιμοποιούνται κατά κόρο ως απορροφητές φωτός ή ως πηγές ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε θερμοβολταϊκές διατάξεις. Βρέθηκε ότι η απορρόφηση φωτός από τέτοια υλικά εξαρτάται τόσο από την τοπολογία του υλικού όπως επίσης και από τις οπτικές ιδιότητες μιας μεμονωμένης μεταλλικής νανοσφαίρας. Επίσης, υπό κατάλληλες συνθήκες και παραμέτρους, οι ιδιότητες των παραπάνω νανοςύνθετων υλικών (μεταλλικά νανοςωματίδια σε διηλεκτρική μήτρα) μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά από απλές θεωρίες ενεργού μέσου (εργασία Νο. 3). Η αντικατάσταση των μεταλλικών νανοσφαιρών από νανοκελύφη, δηλαδή διηλεκτρικές νανοσφαίρες μεταλλικής επικάλυψης (πάντοτε εμβαπτισμένες εντός διηλεκτρικής μήτρας και σε 3Δ διάταξη) επιτρέπει την απορρόφηση ΗΜ ακτινοβολίας από μέταλλα σε πολύ μεγαλύτερα μήκη κύματος, πέρα από την οπτική περιοχή (εργασία Νο.10). Τα μεταλλικά νανοκελύφη εντοπίζουν το φως είτε στην επιφάνειά τους είτε στη διεπιφάνεια μετάλλου-διηλεκτρικού σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με μια μεταλλική νανοσφαίρα ίσων διαστάσεων. Συγκεκριμένα έχει υπολογιστεί ότι μια 2Δ περιοδική συστοιχία από μεταλλικά νανοκελύφη Ag πάχους ~20nm πάνω σε νανοσφαίρα SiO₂ ακτίνας 35nm λειτουργεί ως υπερ-φακός εστιάζοντας υπέρυθρη ακτινοβολία στα 833nm σε μια περιοχή 12nm (70 φορές μικρότερη από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός!) (εργασία Νο. 37).

Τα παραπάνω συστήματα συγκαταλέγονται στις μεταλλοδιηλεκτρικές δομές τοπολογίας κεραμομετάλλου (μεταλλικά εγκλείσματα σε διηλεκτρική μήτρα). Θεωρώντας την αντίστροφη τοπολογία (διηλεκτρικά εγκλείσματα σε μεταλλική μήτρα), μελετήθηκαν οι οπτικές ιδιότητες μεσοπορωδών μετάλλων: κρύσταλλοι από μη αλληλεπικαλυπτόμενες διηλεκτρικές σφαίρες (5-10 nm) εντός μεταλλικής (πλασμονικής) μήτρας. Προβλέφθηκε ότι τα υλικά αυτά παρουσιάζουν πολύ ενδιαφέρουσες, και εν πολλοίς, μη αναμενόμενες οπτικές ιδιότητες: πλακίδια πορώδους μετάλλου επιτρέπουν την διέλευση φωτός σε περιοχές του οπτικού φάσματος που καθορίζονται από τη διηλεκτρική σταθερά των σφαιρών και το ποσοστό του όγκου του κρυστάλλου που καταλαμβάνεται από τις σφαίρες. Η διέλευση του φωτός είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που προβλέπει η καθιερωμένη θεωρία οπών και οφείλεται σε καταστάσεις πλασμονίων στις σφαιρικές διεπιφάνειες διηλεκτρικού - μετάλλου. Επίσης, στις ίδιες περιοχές συχνοτήτων, βρέθηκε ότι τα πορώδη μέταλλα απορροφούν φως σε πολύ μεγάλο βαθμό σε αντίθεση με τα ομοιογενή μέταλλα που δεν απορροφούν καθόλου (εργασία Νο. 8).

Μια άλλη ενδιαφέρουσα κατηγορία πλασμονικών συστημάτων είναι περιοδικές διατάξεις νανοςωματιδίων που επικάθονται σε σύνθετα διηλεκτρικά υποστρώματα. Αν το διηλεκτρικό υπόστρωμα υποστηρίζει ΗΜ καταστάσεις κυματοδότησης στην φασματική περιοχή των

πλασμονικών διεγέρσεων των νανοσωματιδίων τότε λαμβάνει χώρα ισχυρή σύζευξη μεταξύ των δύο αυτών καταστάσεων (καταστάσεις κυματοδήγησης + πλασμονικές διεγέρσεις) με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων, υβριδοποιημένων HM καταστάσεων. Σε αυτές τις υβριδοποιημένες καταστάσεις, το φως εντοπίζεται τόσο στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων όσο και εντός του διηλεκτρικού υποστρώματος – κυματοδηγού. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου, είναι η απορρόφηση φωτός από τα μεταλλικά σωματίδια, πέρα από τις «παραδοσιακές» συχνότητες των επιφανειακών πλασμονίων (εργασίες No. 13, 15 και 17). Επιλέγοντας κατάλληλα τις πλεγματικές σταθερές ενός 2D ορθογωνικού πλέγματος νανοσωματιδίων που επικάθονται στο υπόστρωμα μπορούμε να δημιουργήσουμε μια φασματική «οπή» στην καμπύλη απορρόφησης των επιφανειακών πλασμονίων καθώς η ισχυρή σύζευξη των καταστάσεων κυματοδήγησης με τα πλασμόνια των νανοσωματιδίων «παγώνει» την κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στα νανοσωματίδια. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί ένα κλασσικό ανάλογο της ηλεκτρομαγνητικά επαγόμενης διαφάνειας που λαμβάνει χώρα σε άτομα και κβαντικές τελείες. Η παρουσία της φασματικής οπής μειώνει την ταχύτητα διάδοσης του φωτός μέσα από το υλικό κατά ένα παράγοντα 6000 σε σχέση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό. Παράλληλα, (και) λόγω του ισχυρού εντοπισμού του φωτός γύρω από τα νανοσωματίδια, η δομή αυτή μπορεί να βρει εφαρμογή ως προσωρινή μνήμη (buffer) επιτρέποντας την αποθήκευση (οπτικής) πληροφορίας σε ένα μήκος 100nm (εργασία No. 41). Μια άλλη ενδιαφέρουσα ιδιότητα που προβλέπεται για ένα 2D ορθογωνικό πλέγμα μεταλλικών νανοσωματιδίων είναι ο ισχυρός οπτικός διχρωϊσμός (χειρομορφία) η οποία λαμβάνει χώρα για μη κάθετη (πλάγια) πρόσπτωση φωτός σε μία τέτοια διάταξη (το είδος του υποστρώματος δεν παίζει ρόλο σε αυτή την περίπτωση). Σημειώνεται ότι το παραπάνω πλέγμα εμφανίζει οπτικό διχρωϊσμό (διαφορετικοί συντελεστές απορρόφησης για αριστερόστροφα και δεξιόστροφα πολωμένο φως) παρόλο που το ίδιο δεν έχει εγγενώς χειρόμορφη συμμετρία (εξωγενής χειρομορφία) (εργασία No. 38).

Όταν τα νανοσωματίδια είναι διατεταγμένα σε πυκνή δομή, τότε η οπτική απόκρισή τους παρουσιάζει φαινόμενα μη τοπικότητας, όπου η διηλεκτρική συνάρτηση που περιγράφει τα μεταλλικά σωματίδια εξαρτάται και από τον κυματόνισμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Λόγω της μη τοπικότητας της διηλεκτρικής συνάρτησης, το φάσμα απορρόφησης από μια 2D περιοδική διάταξη νανοσωματιδίων παρουσιάζει μετατόπιση προς υψηλότερες συχνότητες ενώ ταυτόχρονα εμφανίζονται καινούργιες κορυφές απορρόφησης λόγω διέγερσης πλασμονίων όγκου (εργασία No. 34).

4. Αταξία και Εντοπισμός Anderson του Φωτός σε Κολλοειδείς και Πλασμονικούς Κρυστάλλους

Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη της επιστήμης των κολλοειδών, έχει επιτευχθεί η κατασκευή λεπτών υμενίων από περιοδικά διατεταγμένες μεταλλικές σφαίρες μέσα σε μια διηλεκτρική μήτρα. Όμως, από τα υλικά αυτά, δεν λείπουν οι εγγενείς σημειακές ατέλειες όπως π.χ. τα πλεγματικά κενά και η διασπορά στα μεγέθη των σφαιρών. Στα πλαίσια αυτά, αναπτύχθηκε μια μέθοδος για τη σκέδαση HM ακτινοβολίας από μη περιοδικούς κρυστάλλους αποτελούμενους από σφαιρικούς σκεδαστές τυχαία κατανεμένους σε ένα πλέγμα. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην προσέγγιση του συμφώνου δυναμικού (coherent potential approximation) που έχει εφαρμοσθεί για τη μελέτη της ηλεκτρονικής δομής μη περιοδικών κραμάτων. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο αυτή σε μεταλλοδιηλεκτρικούς φωτονικούς κρυστάλλους παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της αταξίας (πλεγματικά κενά) ήταν πολύ πιο δραματική σε λεπτά υμένια (διδιάστατα συστήματα) από ότι στα πιο παχιά (τριδιάστατα συστήματα) επιβεβαιώνοντας τον κυρίαρχο ρόλο της διαστατικότητας στα φαινόμενα που προκαλεί η τυχαιότητα (εργασίες No. 4 και 10).

Η ίδια μέθοδος του συμφώνου δυναμικού εφαρμόστηκε σε άτακτα φωτονικά κράματα κολλοειδών κρυστάλλων όπως τα οπάλια και τα αντίστροφα οπάλια με αταξία αντικατάστασης, στο όριο του μεγάλου μήκους κύματος. Σκοπός της μελέτης αυτής ήταν η σύγκριση αναλυτικών θεωριών ενεργού μέσου (θεωρία ομογενοποίησης) με μια μέθοδο από πρώτες αρχές όπως είναι η μέθοδος του συμφώνου δυναμικού. Η σύγκριση αυτή επέτρεψε την διαμόρφωση των ορίων ισχύος των θεωριών αυτών (εργασία No. 19)

Οι φωτονικοί κολλοειδείς κρύσταλλοι που εμφανίζουν αταξία αποτελούν συστήματα-πρότυπα για τη μελέτη του φαινομένου του εντοπισμού καθώς λείπουν οι συσχετισμοί μεταξύ των φωτονίων (για χαμηλές εντάσεις του ΗΜ πεδίου η διηλεκτρική συνάρτηση δεν εξαρτάται από το ηλεκτρικό πεδίο) σε αντίθεση με τους φυσικούς κρυστάλλους ηλεκτρονίων. Όμως, για τη μελέτη του φαινομένου του εντοπισμού, θα πρέπει να θεωρήσει κανείς συστήματα που αποτελούνται από συστατικά που δεν απορροφούν φως. Μια τέτοια κατηγορία υλικών είναι τα αντίστροφα οπτικά: σφαιρικές κοιλότητες αέρα σε διάταξη πυκνής δομής μέσα σε ένα διηλεκτρικό μεγάλο δείκτη διάθλασης (π.χ. πυρίτιο), τα οποία παρουσιάζουν απόλυτο χάσμα συχνοτήτων στην οπτική περιοχή. Το συνηθέστερο είδος αταξίας που παρουσιάζεται στους κρυστάλλους οπαλίων είναι τα σφάλματα επιστοίβασης. Για τη συστηματική μελέτη της επίδρασης του φαινομένου αυτού έγιναν μεγάλης κλίμακας υπολογισμοί της διέλευσης φωτός από μακροσκοπικά πλακίδια αντιστρόφων οπαλίων με τυχαία κατανομημένα σφάλματα επιστοίβασης. Βρέθηκε ότι τα χάσματα συχνοτήτων, όπως μπορούν να παρατηρηθούν σε πειράματα διέλευσης φωτός, εμφανίζονται μεγαλύτερα υπό την παρουσία σφαλμάτων επιστοίβασης ως συνέπεια της ύπαρξης εντοπισμού Anderson λόγω αταξίας. Το φαινόμενο αυτό πιστοποιείται με την ύπαρξη (χαρακτηριστικού) μήκους εντοπισμού το οποίο εξαρτάται από τη συχνότητα καθώς και από τη γωνία πρόσπτωσης της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας. Για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία, αναδείχθηκε ότι σε κάποιες φασματικές περιοχές είναι δυνατό να συνυπάρχουν εντοπισμένες και απεντοπισμένες καταστάσεις γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την καθιερωμένη θεωρία του εντοπισμού η οποία προβλέπει ότι σε ένα άτακτο στερεό τα δύο είδη καταστάσεων βρίσκονται σε διαφορετικές φασματικές περιοχές οι οποίες διαχωρίζονται από την ακμή ευκινησίας (εργασίες Νο. 9 και 12).

5. Κυματοδήγηση και Καθυστέρηση Φωτός μέσω Αλυσίδων Πλεγματικών Ατελειών σε Υλικά Αργού Φωτός (Συστήματα Ισχυρά Δέσμιων Φωτονίων)

Μία από τις πολλές εφαρμογές των φωτονικών δομών έγκειται στην δυνατότητα οδήγησης του φωτός χωρίς απώλειες. Η επίτευξη αυτού του στόχου πιστεύεται ότι θα οδηγήσει σε μια νέα τεχνολογία τη βιομηχανία των οπτικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και των οπτικών ινών. Η πιο φιλόδοξη προσπάθεια κυματοδήγησης φωτός συνίσταται στην οδήγηση ΗΜ ακτινοβολίας μέσω συζευγμένων σημειακών ατελειών σε περιβάλλον φωτονικού κρυστάλλου. Σε ένα τέτοιο σύστημα οι καταστάσεις του ΗΜ πεδίου περιγράφονται από ένα πρότυπο ισχυρά δέσμιων φωτονίων. Η διάδοση ενός ΗΜ παλμού φωτός κατά μήκος μιας τέτοιας αλυσίδας γίνεται μέσω ενός μηχανισμού διαπήδησης από ατέλεια σε ατέλεια, οδηγώντας σε μικρές ομαδικές ταχύτητες (αργό φως). Στα πλαίσια αυτά, αναπτύχθηκε μια μέθοδος πολλαπλής σκέδασης δύο σταδίων για τον υπολογισμό των φωτονικών ζωνών συχνοτήτων που δημιουργούνται από αλυσίδες σημειακών ατελειών σε φωτονικούς κρυστάλλους αποτελούμενους από σφαιρικούς σκεδαστές καθώς επίσης και τον υπολογισμό από πρώτες αρχές της διέλευσης φωτός μέσω κυματοδηγών τέτοιου είδους. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε σε ένα συγκεκριμένο σύστημα όπου διαπιστώθηκε η διέλευση φωτός χωρίς απώλειες και με την ίδια απόδοση τόσο για ευθύγραμμους όσο και για κυρτούς κυματοδηγούς (εργασία Νο.11).

6. Αλληλεπίδραση Κβαντικών Συστημάτων – Φωτός σε Υλικά Αργού Φωτός και Πλασμονικά Υλικά – Εφαρμογή στους Κβαντικούς Υπολογιστές

Πέρα από τις ιδιότητες κυματοδήγησης που αναδεικνύονται σε συστήματα ισχυρά δέσμιων φωτονίων (βλέπε παραπάνω εδάφιο), μια άλλη κατηγορία φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε τέτοια συστήματα είναι αυτά που έχουν να κάνουν με την αλληλεπίδραση ύλης – φωτός. Συγκεκριμένα όταν ένα άτομο/ κβαντική τελεία εμβαπτιστούν σε ένα σύστημα αργού φωτός όπως είναι μια αλυσίδα ατελειών σε ένα φωτονικό κρύσταλλο, στις συχότητες στις οποίες το φως σταματά τη διάδοσή του (σχεδόν μηδενική ομαδική ταχύτητα) η αυθόρμητη αποδιέγερση του ατόμου/ κβαντικής τελείας αναστέλλεται ή επιταχύνεται (ανάλογα με το είδος του ατόμου, π.χ. δισταθμικό, τρισταθμικό, κλπ) λόγω του (θεωρητικού) απειρισμού της πυκνότητας καταστάσεων των φωτονίων στις συχότητες μηδενικής ομαδικής ταχύτητας (εργασία Νο. 14). Στις ίδιες συχότητες εμφανίζεται το

φαινόμενο της οπτικής διαφάνειας (μηδενική απορρόφηση) ενός αερίου ατόμων με τη χρήση καταλλήλου λέιζερ και πάλι λόγω της ιδιομορφίας της πυκνότητας καταστάσεων στις συχνότητες μηδενικής ομαδικής ταχύτητας (εργασία No. 23). Στις συχνότητες αυτές, η (μη γραμμική) αλληλεπίδραση μεταξύ φωτός και ατόμου/ κβαντικής τελείας μεγιστοποιείται επιτρέποντας τον χειρισμό του φωτός από εξωτερικά στατικά ηλεκτρικά πεδία εφαρμοζόμενα στο άτομο/ κβαντική τελεία (π.χ. φαινόμενο Stark). Αυτή η έντονη μη γραμμική αλληλεπίδραση ατόμου – φωτός, συνδυαζόμενη με ένα συμβολόμετρο Mach – Zehnder που υλοποιείται (λιθογραφικά) από αλυσίδες ατελειών σε 2D φωτονικό κρύσταλλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή λογικών πυλών για την εκτέλεση κβαντικών υπολογισμών (εργασία No. 24).

Εκτός από περιβάλλοντα αργού φωτός (ισχυρά δέσμια φωτόνια), ενδιαφέρον παρουσιάζει το φαινόμενο της αυθόρμητης αποδιέγερσης ατόμων/ μορίων/ κβαντικών τελειών μέσα σε πεπερασμένες συλλογές διηλεκτρικών ή μεταλλικών σκεδαστών. Αναπτύσσοντας μια τεχνική τανυστή Green για το HM πεδίο, υπολογίστηκε από πρώτες αρχές η τοπική πυκνότητα καταστάσεων των φωτονίων και συνεπακόλουθα, ο ρυθμός αυθόρμητης αποδιέγερσης ατόμων και κβαντικών τελειών εμβαπτισμένων στα παραπάνω περιβάλλοντα. Έτσι, ανάλογα με την τοποθέτηση του ατόμου ως προς μια, π.χ. περιοδική διάταξη διηλεκτρικών σφαιρών, η αυθόρμητη εκπομπή μπορεί να ενισχυθεί ή να περιοριστεί. Στην περίπτωση όπου το άτομο/ μόριο/ κβαντική τελεία εμβαπτίζεται σε μια συστοιχία μεταλλικών (πλασμονικών) νανοσωματιδίων, ο ρυθμός αποδιέγερσης μπορεί να είναι 4-5 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος απ' ό,τι τον αντίστοιχο ρυθμό αποδιέγερσης στον ελεύθερο χώρο. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην ισχυρή σύζευξη του ατόμου με τα επιφανειακά πλασμόνια που διεγείρονται στα γειτονικά νανοσωματίδια κατά την αποδιέγερση του ατόμου (εργασίες No. 25 και 27). Από την άλλη μεριά, η ισχυρή σύζευξη ατόμων/ μορίων/ κβαντικών τελειών με τις πλασμονικές διεγέρσεις μπορεί να οδηγήσει και σε δραματική μείωση του ρυθμού αυθόρμητης εκπομπής. Για παράδειγμα, όταν ένα ατομικό δίπολο τοποθετηθεί κοντά σε μια τετραγωνική συστοιχία μεταλλικών νανοκελύφων έτσι ώστε να είναι παράλληλο στη συστοιχία τότε ο ρυθμός αυθόρμητης αποδιέγερσης απομειώνεται κατά ένα παράγοντα 100 σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό στο κενό. Ταυτόχρονα, ο αντίστοιχος ρυθμός αυξάνεται για ατομικό δίπολο το οποίο είναι προσανατολισμένο κάθετα στη συστοιχία από νανοκελύφη. Αν τα παραπάνω δύο φαινόμενα λαμβάνουν ταυτόχρονα χώρα στο ίδιο ατομικό σύστημα (π.χ., τρισταθμικό κβαντικό σύστημα τύπου V), μπορεί κανείς να παρατηρήσει το φαινόμενο της κβαντικής συμβολής των δύο παραπάνω καναλιών αυθόρμητης εκπομπής (εργασία No. 43). Η εμφάνιση κβαντικής συμβολής επηρεάζει σημαντικά τη δυναμική των πληθυσμών των ενεργειακών επιπέδων για κατάλληλα επιλεγμένες αρχικές ατομικές καταστάσεις (εργασία 57). Παρόμοια φαινόμενα κβαντικής συμβολής εμφανίζονται και σε κβαντικά συστήματα 4 επιπέδων (εργασία No. 51). Επίσης, η μείωση του ρυθμού αυθόρμητης εκπομπής σε σχέση με το κενό, πέρα από την εμφάνιση φαινομένων κβαντικής συμβολής, ενισχύει και τη μη γραμμική επιδεκτικότητα ατόμων/ κβαντικών τελειών που βρίσκονται σε μια συστοιχία μεταλλικών νανοκελύφων (εργασία No. 47). Ένα άλλο ενδιαφέρον φαινόμενο που λαμβάνει χώρα παρουσία μιας περιοδικής συστοιχίας νανοκελύφων είναι η ενίσχυση της φωτο-επαγόμενης μεταφοράς ενέργειας μεταξύ δύο κβαντικών συστημάτων. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί το βασικό μηχανισμό μεταφοράς ενέργειας σε διαμοριακές φωτο-φυσικές διαδικασίες (π.χ., φωτοσύνθεση). Στα πλαίσια αυτά μελετήθηκε η ενίσχυση της φωτο-επαγόμενης μεταφοράς ενέργειας μεταξύ δύο φουλλεριδίων καθώς και μεταξύ μορίων πυρίνης και διθειοπυρίνης (εργασία No. 53). Επίσης, προτάθηκε ένας μηχανισμός ελέγχου της φωτο-επαγόμενης μεταφοράς φορτίου μέσω ενός μοριακού νανο-δρομολογητή βασισμένου σε ένα μόριο πορφυρίνης το οποίο συνδέεται με ηλεκτρόδια χρυσού (εργασία No. 36).

Ένας από τους πιο διαδεδομένους τρόπους χειρισμού των κβαντικών μεταβάσεων σε ένα ατομικό ή μοριακό σύστημα είναι ο σύμφωνος έλεγχος. Συγκεκριμένα, ένας κατάλληλα διαμορφωμένος παλμός στο χρόνο (π.χ. chirped pulse) μπορεί να διαμορφώσει την τελική κβαντική κατάσταση ενός ατόμου/ μορίου μέσω κβαντικής συμβολής που επάγεται λόγω των διαφορετικών φάσεων στις οποίες αντιστοιχούν οι διαφορετικές συχνότητες οι οποίες συνθέτουν τον παλμό. Τεχνικές συμφώνου ελέγχου μπορούν να εφαρμοστούν και σε

κλασσικά συστήματα, όπως, π.χ. συστήματα μικρο- και νανοσωματιδίων όπου το ρόλο των κβαντικών καταστάσεων παίζουν οι καταστάσεις οπτικού συντονισμού (επιφανειακά πλασμόνια/ πολαριτόνια) των σωματιδίων. Για παράδειγμα, ένας παλμός κατάλληλης χρονικής διαμόρφωσης (chirped pulse) μπορεί να επιτρέψει τον χωροχρονικό έλεγχο της διέγερσης εξιτονικών πολαριτονίων σε νανοσωματίδια CuCl διαφορετικού μεγέθους, δηλαδή τον εντοπισμό του φωτός σε διαφορετικά σημεία του χώρου για διαφορετικές χρονικές στιγμές, χωρίς να είναι χωρικά διαμορφωμένος ο παλμός (είναι διαμορφωμένος μόνο χρονικά) (εργασία No. 55).

7. Τεχνητός Μαγνητισμός και Αρνητικός Δείκτης Διάθλασης σε Μεταλλικά αποτελούμενα από Μικρο- και Νανοσωματίδια

Τα τελευταία χρόνια, μία από τις γρηγορότερα αναπτυσσόμενες περιοχές έρευνας της επιστήμης των υλικών είναι και αυτή των μεταλλικών. Μεταλλικά είναι σύνθετα υλικά τα οποία έχουν ιδιότητες οι οποίες δεν συναντώνται στα υλικά από τα οποία παρασκευάζονται. Τα μεταλλικά δεν απαντώνται ελεύθερα στη φύση αλλά είναι τεχνητά υλικά τα οποία, ανάλογα με τη χαρακτηριστική τους διάσταση, κατασκευάζονται είτε με λιθογραφία είτε με χημικές μεθόδους. Κύρια κατηγορία τέτοιων υλικών είναι εκείνα τα τεχνητά μαγνητικά υλικά τα οποία μπορεί να είναι παραμαγνητικά, διαμαγνητικά ή ακόμα και να παρουσιάζουν αρνητική μαγνητική διαπερατότητα. Τα υλικά αυτά, παρόλο ότι κατασκευάζονται από μη μαγνητικά υλικά, παρουσιάζουν την παραπάνω απόκριση σε εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο λόγω γεωμετρικής κατασκευής ή λόγω της διηλεκτρικής τους απόκρισης. Μάλιστα, η εμφάνιση μαγνητικής απόκρισης μπορεί να λαμβάνει χώρα σε συχνότητες όπου δεν απαντώνται φυσικά μαγνητικά υλικά όπως είναι το υπέρυθρο φάσμα. Όταν ένα μεταλλικό με αρνητική μαγνητική διαπερατότητα συνδυαστεί με ένα υλικό το οποίο παρουσιάζει αρνητική ηλεκτρική επιδεκτικότητα σε μια κοινή φασματική περιοχή, τότε το σύνθετο υλικό που προκύπτει έχει αρνητικό δείκτη διάθλασης. Σε υλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης λαμβάνουν χώρα μια πληθώρα νέων και, εν πολλοίς, αναπάντεχων φυσικών φαινομένων, όπως είναι η αρνητική διάθλαση, το αντίστροφο φαινόμενο Doppler και η αντίστροφη ακτινοβολία Cherenkov, η ενίσχυση του κοντινού πεδίου, η δυνατότητα για κατασκευή οπτικού φακού ικανού να διακρίνει αντικείμενα σε ατομικό επίπεδο, κ.α. Σημειώνεται ότι για την εμφάνιση φαινομένων που σχετίζονται με τον αρνητικό δείκτη διάθλασης απαραίτητη είναι η εμφάνιση μικρών απωλειών (μικρό φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης) των (φυσικών) υλικών με τα οποία είναι κατασκευασμένο το μεταλλικό. Διαφορετικά, αν το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης είναι αρνητικό αλλά συνοδεύεται ταυτόχρονα με μεγάλο φανταστικό μέρος, δεν μπορούμε να μιλάμε για αρνητική διάθλαση αλλά μόνο για ανώμαλη διασπορά καθώς ένας παλμός φως κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του έχει απορροφηθεί από το μεταλλικό πριν διαδοθεί σε κάποια σημαντική απόσταση μέσα στο μεταλλικό ώστε να έχει νόημα η ομαδική ταχύτητα διάδοσης και το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης (εργασία No. 44).

Οι πρώτες προσπάθειες για την επίτευξη τεχνητού μαγνητισμού ή/ και αρνητικού δείκτη διάθλασης επικεντρώθηκαν στην κατασκευή συστοιχιών μεταλλικών διαχωρισμένων δακτυλίων συντονισμού (μικρομετρικών διαστάσεων) σε συνδυασμό με πολύ λεπτά μεταλλικά σύρματα (μικρομετρικού πάχους). Χρησιμοποιώντας εξελιγμένες τεχνικές, οι επιστήμονες μπόρεσαν να μειώσουν περαιτέρω τις διαστάσεις των παραπάνω δομών οι οποίες μπορούν να παρουσιάζουν αρνητικό δείκτη διάθλασης στο υπέρυθρο. Παράλληλα όμως με τις δομές αυτές (μεταλλικά διαχωρισμένοι δακτύλιοι συντονισμού + λεπτά μεταλλικά σύρματα) εμφανίστηκαν και περιοδικές δομές από σωματίδια απλούστερου σχήματος (π.χ. συστοιχίες σφαιρών μικρομετρικών διαστάσεων) οι οποίες επίσης παρουσιάζουν αρνητικό δείκτη διάθλασης, όχι όμως λόγω γεωμετρίας αλλά λόγω των μεγάλων ρευμάτων πόλωσης που αναπτύσσονται πάνω στα σωματίδια όταν σε αυτά προσπέσει φως κατάλληλης συχνότητας (εργασία 16). Καθώς η παρασκευή νανοσωματιδίων με χημικές μεθόδους επιτυγχάνεται με ευκολία στις μέρες μας, περιοδικές δομές με νανοσωματίδια ημιαγωγών που παρουσιάζουν εξιτονικούς συντονισμούς, προτάθηκαν ως τεχνητά μαγνητικά μεταλλικά τα οποία παρουσιάζουν αρνητική μαγνητική διαπερατότητα στην οπτική περιοχή ή/ και στο υπεριώδες (εργασία 21). Όταν τα σωματίδια ημιαγωγών

καλυφθούν με κατάλληλο μεταλλική επικάλυψη νανομετρικού πάχους, τότε το μεταϋλικό μπορεί να παρουσιάσει και αρνητικό δείκτη διάθλασης (εργασία Νο. 29). Σημειώνεται, ότι η περιοδική διάταξη των σφαιρών δεν είναι απαραίτητη για την επίτευξη αρνητικού δείκτη διάθλασης αφού το φάσμα μηκών κύματος για τα οποία ο δείκτης διάθλασης καθίσταται αρνητικός είναι πολύ μεγαλύτερα από τη χαρακτηριστική διάσταση (π.χ. απόσταση πρώτων γειτόνων) της δομής (εργασίες Νο. 22 και 26). Καθώς η επίτευξη αρνητικού δείκτη διάθλασης βασίζεται στη διέγερση επιφανειακών συντονισμών (πλασμονία, πολαριτόνια) των σωματιδίων, το φως είναι ισχυρά εντοπισμένο στην επιφάνεια του σωματιδίου χωρίς να διαχέεται στο χώρο μεταξύ των σωματιδίων. Ως εκ τούτου, η διάδοση του φωτός γίνεται μέσω ενός μηχανισμού διαπήδησης από σωματίδιο σε σωματίδιο με ταχύτητες σημαντικά μικρότερες από την ταχύτητα του φωτός στο κενό. Έτσι, οι ζώνες συχνοτήτων με αρνητικό δείκτη διάθλασης σε περιοδικό ένα μεταϋλικό είναι ταυτόχρονα και ζώνες αργού φωτός (εργασία Νο. 50).

Μια διαφορετική προσέγγιση στο θέμα το αρνητικού δείκτη διάθλασης είναι και δομές που προκύπτουν από την τοποθέτηση μεταλλικών νανοσωματιδίων με τέτοιο τρόπο ώστε η τελική δομή να έχει ελικοειδή συμμετρία. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να προκύψουν περισσότερες της μίας ζώνες αρνητικού δείκτη διάθλασης γύρω από τη συχνότητα των επιφανειακών πλασμονίων μιας μεμονωμένης μεταλλικής σφαίρας (εργασία Νο. 20).

Μια από τις κύριες εφαρμογές των μεταϋλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης είναι και η απεικόνιση. Συγκεκριμένα, λόγω του αρνητικού δείκτη διάθλασης, ένα μεταϋλικό μπορεί να απεικονίσει ένα αντικείμενο με λεπτομέρεια μερικών νανομέτρων (κάτω από το κλασικό όριο περίθλασης) λόγω: (α) αρνητικής διάθλασης και (β) λόγω ενίσχυσης κοντινού πεδίου. Στην εργασία Νο. 33 εξετάζεται η ικανότητα απεικόνισης μιας περιοδικής διάταξης νανοσωματιδίων ημιαγωγού (CuCl) καλυμμένων από φλοιό κοκκώδους μετάλλου. Η οπτική απεικόνιση μέσω του εν λόγω υλικού επιτρέπει την διάκριση δύο φωτεινών πηγών που απέχουν απόσταση ίση με το ένα τρίτο του μήκους κύματος, ανεξαρτήτως της κατάστασης πόλωσης του φωτός (εργασία Νο. 33).

8. Θερμική Ακτινοβολία στη Νανοκλίμακα – Θερμικές Διακυμάνσεις – Δυνάμεις van der Waals μεταξύ Νανοσωματιδίων

Οι πλασμονικές νανοδομές, εκτός από το χειρισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που προσφέρουν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον έλεγχο της θερμικής ακτινοβολίας μέλανος σώματος. Συγκεκριμένα, όταν θερμάνουμε μια μεταλλική νανοδομή, π.χ. μια διάταξη σφαιρών, κυλίνδρων ή μια κατάλληλα νανοδομημένη επιφάνεια, τότε η ακτινοβολία μέλανος σώματος η οποία εκπέμπεται έχει φασματική και γωνιακή κατανομή οι οποίες εξαρτώνται από τη διάταξη των σφαιρών ή από τη νανοδόμηση της επιφάνειας. Με αυτό τον τρόπο, η εκπεμπόμενη ισχύς της θερμική ακτινοβολίας μπορεί να μεγιστοποιηθεί σε μια επιθυμητή, ενδεχομένως στενή φασματική περιοχή και να ελαχιστοποιηθεί σε άλλες. Αν λοιπόν η (στενή) φασματική περιοχή στην οποία ενισχύεται η θερμική ακτινοβολία μέλανος σώματος συμπέσει με το ενεργειακό χάσμα ενός ημιαγωγού, είναι δυνατή η υλοποίηση μιας θερμοβολταϊκής διάταξης, όταν τοποθετηθούν μαζί το πλακίδιο του ημιαγωγού με την πλασμονική νανοδομή. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως π.χ. στους λαμπτήρες πυρακτώσεως, η μεγιστοποίηση της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας είναι επιθυμητό να επιτυγχάνεται σε μια ευρεία φασματική περιοχή ή πάνω από ένα κατώφλι συχνότητας. Ένα είδος δομής που χαρακτηρίζεται από μια τέτοια φασματική συμπεριφορά είναι οι τρισδιάστατοι κρύσταλλοι από μεταλλικές σφαίρες χρυσού οι οποίες παρουσιάζουν ενισχυμένη θερμική εκπομπή πάνω από τη συχνότητα των επιφανειακών πλασμονίων μιας μεμονωμένης σφαίρας χρυσού (εργασία Νο. 18).

Η ακτινοβολία μέλανος σώματος είθισται να θεωρείται ως μια ασύμφωνη πηγή ακτινοβολίας αφού παράγεται από την τυχαία κίνηση των φορτίων η οποία δημιουργεί μια τυχαία κατανομή ρευμάτων μέσα σε ένα (αγώγιμο) υλικό. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία έχει καταστήσει δυνατή την υλοποίηση μικρο- και νανοδομών οι οποίες όταν θερμανθούν ενεργούν σε μεγάλο βαθμό ως σύγχρονες πηγές ακτινοβολίας προσομοιάζοντας τις πηγές ακτινοβολίας λείζερ. Μια τέτοια περίπτωση είναι και οι περιοδικές αλυσίδες μεταλλικών νανοσωματιδίων. Λόγω της περιοδικότητάς τους αλλά και

λόγω των καταστάσεων συζευγμένων πλασμονίων τις οποίες υποστηρίζουν, αποδείχθηκε θεωρητικά ότι η ακτινοβολία μέλανος σώματος που προέρχεται από τέτοιες δομές είναι σε μεγάλο βαθμό σύμφωνη ενώ παρουσιάζει και μεγάλη κατευθυντικότητα. Η θεωρητική μελέτη των συστημάτων αυτών έγινε μέσω της τεχνικής πολλαπλής σκέδασης για τον HM τανυστή Green και του φορμαλισμού ηλεκτροδυναμικής διακυμάνσεων ο οποίος επέτρεψε τον υπολογισμό των τανυστών συσχέτισης της θερμικής ακτινοβολίας από πρώτες αρχές. Αποδείχθηκε ότι παλαιότερες αναλυτικές θεωρήσεις που βασίζονταν σε συγκεκριμένα μοντέλα τυχαίων κατανομών ρευμάτων σε μεταλλικά σωματίδια δεν επαρκούν για την πλήρη περιγραφή των τανυστών συσχέτισης της θερμικής ακτινοβολίας (εργασία No.28). Πέρα από το μεγάλο βαθμό συμφωνίας και κατευθυντικότητας που μπορεί να έχει η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από μεταλλικά νανοσωματίδια για συχνότητες γύρω από τους πλασμονικούς συντονισμούς, η θερμική ακτινοβολία διατηρεί ένα μεγάλο βαθμό πόλωσης (εργασίες No. 42, 49)

Κάνοντας χρήση του ίδιου φορμαλισμού (τεχνική πολλαπλής σκέδασης για τον τανυστή Green + φορμαλισμός ηλεκτροδυναμικής διακυμάνσεων) καθώς επίσης και του τανυστή Maxwell για το HM πεδίο, έγινε κατορθωτή για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία, ο υπολογισμός από πρώτες αρχές των δυνάμεων van der Waals που αναπτύσσονται μεταξύ δύο η περισσοτέρων μακροσκοπικών σωματιδίων. Ως υπολογισμός από πρώτες αρχές, περιγράφει με ακρίβεια φαινόμενα πολλών σωματιδίων, επιβράδυνσης, κοντινού πεδίου, καθώς και πολυπολικής συνεισφοράς. Αποδείχθηκε η ανεπάρκεια περιγραφής του νόμου με τον οποίο φθίνει η δύναμη van der Waals μεταξύ δύο νανοσωματιδίων κατά το πρότυπα αλληλεπιδράσεων ζεύγους όπως είναι η θεωρία Hamaker (εργασία No. 30).

Ο παραπάνω φορμαλισμός γενικεύεται για τον υπολογισμό των δυνάμεων van der Waals που ασκούνται μεταξύ των μικκυλίων σε κolloειδή συστήματα στα οποία προκύπτει μη μηδενική συνισταμένη δύναμη. Τέτοια είναι τα πεπερασμένα πλακίδια κolloειδών κρυστάλλων ή άπειροι κρύσταλλοι οι οποίοι περιέχουν σημειακές ατέλειες (εργασία No. 31).

Υπολογίζοντας τον τανυστή Green στα πλαίσια της στρωματικής μεθόδου πολλαπλής σκέδασης μπορεί κανείς να υπολογίσει την ενέργεια και τη δύναμη Casimir ανάμεσα σε δύο στρωματικές περιοδικές νανοδομές ή ανάμεσα σε ένα άτομο και μια νανοδομή (δυναμικό Casimir – Polder) (εργασία No. 48). Βασίζόμενοι στον φορμαλισμό του τανυστή Green για περιοδικές νανοδομές αποδείχθηκε θεωρητικώς για πρώτη φορά ότι μπορεί κανείς να επιτύχει *απωστική* δύναμη Casimir ανάμεσα σε ένα μαγνητοηλεκτρικό μεταϋλικό και μια μεταλλική επιφάνεια. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τη θεωρία Lifshitz η δύναμη Casimir μεταξύ δύο μη μαγνητικών επιφανειών είναι πάντοτε ελκτική (εργασία No. 45). Απωστική δύναμη Casimir είναι δυνατόν να αναπτυχθεί ανάμεσα στις επιφάνειες δύο μη μαγνητικών υλικών, συγκεκριμένα ανάμεσα σε δύο νανοδομές από μεταλλικές νανο-κολώνες οι οποίες, αν πλησιάσουν μεταξύ τους, η μία «κουμπώνει» στην άλλη (εργασία No. 46).

9. Οπτικές δυνάμεις και οπτικές παγίδες σε νανοδομημένα μεταϋλικά

Σύμφωνα με τη φαινομενολογία των μεταϋλικών, όταν σε ένα σωματίδιο τοποθετημένο εντός ενός μέσου με αρνητικό δείκτη διάθλασης, προσπέσει HM ακτινοβολία, τότε στο σωματίδιο επάγεται ελκτική δύναμη αντί άπωσης όπως γίνεται στα συνήθη υλικά με θετικό δείκτη διάθλασης. Η εξήγηση για αυτό το φαινόμενο έγκειται στο γεγονός ότι η φασική ταχύτητα είναι αντίθετη από την ομαδική ταχύτητα σε ένα υλικό αρνητικού δείκτη διάθλασης. Μέχρι τώρα, δεν έχει δείχθει πειραματικά το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής έλξης σε ένα μεταϋλικό. Έτσι λοιπόν, προσπαθήσαμε να σχεδιάσουμε ένα υπολογιστικό πείραμα για να διερευνήσουμε το παραπάνω φαινόμενο. Συγκεκριμένα, τοποθετήσαμε μια μικρή κβαντική τελεία στο μέσο ενός πλακιδίου μεταϋλικού. Το μεταϋλικό είναι ένας κρύσταλλος νανοσωματιδίων CuCl με μεταλλική επικάλυψη. Όπως έδειξαν υπολογισμοί από πρώτες αρχές, στις φασματικές περιοχές όπου ο δείκτης διάθλασης είναι αρνητικός, ένα προσπίπτον επίπεδο HM κύμα ασκεί ελκτική δύναμη στην κβαντική τελεία, σε συμφωνία με την φαινομενολογία. Η παρουσία απωλειών στο μεταϋλικό δεν επηρεάζει την παρατήρηση του φαινομένου (εργασία No.32).

Επίσης, αποδείχθηκε θεωρητικά ότι παχιά (3Δ) υμένα φωτονικών κρυστάλλων αλλά και διδιάστατα πλέγματα μεταλλικών νανοσφαιριδίων υπό την επίδραση προσπίπτουσας ακτινοβολίας, είναι δυνατό να παγιδεύσουν νανοςωματίδια (εργασίες Νο. 35 και 39) και άτομα εξουδετερώνοντας τις δυνάμεις van der Waals και βαρυτική δύναμη επιτρέποντας τον σχηματισμό συμπυκνωμάτων Bose-Einstein στην περίπτωση πολλών ατόμων (εργασία Νο. 40).

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Σε περιοδικά με κριτές

1. V. Yannopoulos, N. Stefanou, and A. Modinos, "Theoretical analysis of the photonic band structure of face-centred colloidal crystals", J. Phys.: Condens. Matter 9, 10261-10270 (1997).

Αναφορές: 37

2. N. Stefanou, V. Yannopoulos, and A. Modinos, "Heterostructures of photonic crystals: frequency bands and transmission coefficients", Comput. Phys. Commun. 113, 49-77 (1998).

Αναφορές: 155

3. V. Yannopoulos, A. Modinos, and N. Stefanou, "Optical properties of metallodielectric photonic crystals", Phys. Rev. B 60, 5359-5365 (1999).

Αναφορές: 73

4. A. Modinos, V. Yannopoulos, and N. Stefanou, "Scattering of electromagnetic waves by nearly periodic structures", Phys. Rev. B 61, 8099-8107 (2000).

Αναφορές: 16

5. N. Stefanou, V. Yannopoulos, and A. Modinos, "MULTEM 2: A new version of the program for transmission and band-structure calculations of photonic crystals", Comput. Phys. Commun. 132, 189-196 (2000).

Αναφορές: 106

6. A. Modinos, N. Stefanou, and V. Yannopoulos, "Applications of the layer-KKR method to photonic crystals", Opt. Expr. 8, 197 (2001) (INVITED ARTICLE).

Αναφορές: 36

7. A. Modinos, N. Stefanou, I. E. Psarobas and V. Yannopoulos, "On wave propagation on inhomogeneous systems", Physica B 296, 167-173 (2001).

Αναφορές: 22

8. N. Stefanou, A. Modinos, and V. Yannopoulos, "Optical transparency of mesoporous metals", Solid State Commun. 118, 69-73 (2001).

Αναφορές: 26

9. V. Yannopoulos, N. Stefanou, and A. Modinos, "Effect of stacking faults on the optical properties of inverted opals", Phys. Rev. Lett. 86, 4811-4814 (2001).

Αναφορές: 51

10. V. Yannopoulos, A. Modinos, and N. Stefanou, "Scattering and absorption of light by periodic and nearly periodic metallodielectric structures", Opt. Quant. Elec. 34, 227-234 (2002).

Αναφορές: 22

11. V. Yannopoulos, A. Modinos, and N. Stefanou, "Waveguides of defect chains in photonic crystals", Phys. Rev. B 65, 235201 (2002).
Αναφορές: 21
12. V. Yannopoulos, A. Modinos, and N. Stefanou, "Anderson localization of light in inverted opals", Phys. Rev. B 68, 193205 (2003).
Αναφορές: 27
13. V. Yannopoulos and N. Stefanou, "Optical excitation of coupled waveguide-plasmon modes: a theoretical analysis", Phys. Rev. B 69, 012408 (2004).
Αναφορές: 4
14. V. Yannopoulos, "Spontaneous emission through heavy photon bands", J. Opt. B: Quantum and Semiclass. Opt. 6, 283 (2004).
Αναφορές: 1
15. G. Gatzounis, N. Stefanou, and V. Yannopoulos, "Optical response of a periodic monolayer of metallic nanospheres on a dielectric waveguide", J. Phys.: Condens. Matter 17, 1791-1802 (2005).
Αναφορές: 11
16. V. Yannopoulos and A. Moroz, "Negative refractive index metamaterials from inherently non-magnetic materials for deep infrared to terahertz frequencies", J. Phys.: Condens. Matter 17, 3717 - 3734 (2005).
Αναφορές: 78
17. N. Stefanou, G. Gatzounis, and V. Yannopoulos, "Scattering of light by a periodic array of metallic nanoparticles on a waveguide", J. Phys.: Conf. Series 10, 131 – 134 (2005).
18. V. Yannopoulos, "Thermal emission from three-dimensional arrays of gold nanoparticles", Phys. Rev. B 73, 113108 (2006).
Αναφορές: 18
19. V. Yannopoulos, "Effective medium description of disordered photonic alloys", J. Opt. Soc. Am. B 23, 1414-1419 (2006)
Αναφορές: 2
20. V. Yannopoulos, "Negative index of refraction in artificial chiral materials", J. Phys.: Condens. Matter 18, 6883-6890 (2006).
(2006 Top journal papers - http://ej.iop.org/pdf/jpcm/2006_top_papers.pdf)
Αναφορές: 23
21. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, "Photoexcitation-induced magnetism in arrays of semiconductor nanoparticles with a strong excitonic oscillator strength", Phys. Rev. B 74, 193304 (2006).
Αναφορές: 22
22. V. Yannopoulos, "Negative refraction in random photonic alloys of polaritonic and plasmonic microspheres", Phys. Rev. B 75, 035112 (2007).
Αναφορές: 20
23. V. Yannopoulos, A. Kanaki, J. Boviatsis, and E. Paspalakis, "Coherent effects in coupled resonator optical waveguides", Phys. Stat. Sol. C 4, 537-539 (2007).

24. D. G. Angelakis, M. F. Santos, V. Yannopoulos, and A. Ekert, “A proposal for the implementation of quantum gates with photonic-crystal waveguides”, Phys. Lett. A 362, 377-380 (2007).

Αναφορές: 14

25. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, “Spontaneous emission of a two-level atom placed within clusters of metallic nanoparticles”, J. Phys.: Condens. Matter 19, 096210 (2007).

Αναφορές: 5

26. V. Yannopoulos, “Artificial magnetism and negative refractive index in three-dimensional metamaterials of spherical particles at near-infrared and visible frequencies”, Appl. Phys. A 87, 259-264 (2007).

Αναφορές: 21

27. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, “Green’s tensor and local density of states calculations for collections of spherical electromagnetic scatterers”, Phys. Rev. B 75, 115124 (2007).

Αναφορές: 6

28. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, “Fluctuational Electrodynamics in the Presence of Finite Thermal Sources”, Phys. Rev. Lett. 99, 053901 (2007).

Αναφορές: 3

29. V. Yannopoulos, “Negative refractive index in the near-UV from Au-coated CuCl nanoparticle superlattices”, Phys. Stat. Sol. (RRL) 1, 208-210 (2007)

(Editor’s selection –

<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/116325209/PDFSTART>)

Αναφορές: 10

30. V. Yannopoulos and N.V. Vitanov, “First-Principles Theory of van der Waals Forces between Macroscopic Bodies”, Phys. Rev. Lett. 99, 120406 (2007).

Αναφορές: 2

31. V. Yannopoulos, “General theory based on fluctuational electrodynamics for van der Waals interactions in colloidal systems”, Phys. Rev. B 76, 235415 (2007).

Αναφορές: 2

32. V. Yannopoulos and P. G. Galiatsatos, “Electromagnetic forces in negative-refractive-index metamaterials: a first-principles study”, Phys. Rev. A 77, 043819 (2008).

Αναφορές: 1

33. V. Yannopoulos, “Subwavelength imaging of light by arrays of metal-coated semiconductor nanoparticles: a theoretical study”, J. Phys.: Condens. Matter 20, 255201 (2008).

Αναφορές: 7

34. V. Yannopoulos, “Non-local optical response of two-dimensional arrays of metallic nanoparticles”, J. Phys.: Condens. Matter 20, 325211 (2008).

Αναφορές: 10

35. V. Yannopoulos, “Optical forces near a plasmonic nanostructure”, Phys. Rev. B 78, 045412 (2008).

Αναφορές: 9

36. I. Thanopoulos, E. Paspalakis, and V. Yannopoulos, “Optical switching of electric charge transfer pathways in porphyrin: A light-controlled nanoscale current router”, *Nanotechnology* 19, 445202 (2008).

Αναφορές: 3

37. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, “Ultra-subwavelength focusing of light by a monolayer of metallic nanoshells with an adsorbed defect”, *phys. stat. sol. (RRL)* 2, 287 (2008).

Αναφορές: 3

38. V. Yannopoulos, “Circular dichroism in planar nonchiral plasmonic metamaterials”, *Opt. Lett.* 34, 632 (2009).

Αναφορές: 2

39. P. G. Galiatsatos and V. Yannopoulos, “Optical manipulation of a particle placed within a planar dielectric cavity”, *J. Mod. Opt.* 56, 744 (2009).

40. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, “All-optical nanotraps for atoms atop flat metamaterial lenses: a theoretical study”, *J. Phys.: Condens. Matter* 21, 245901 (2009). (Included in IOP’s SELECT)

Αναφορές: 1

41. V. Yannopoulos, E. Paspalakis and N. V. Vitanov, “Electromagnetically induced transparency and slow light in an array of metallic nanoparticles”, *Phys. Rev. B* 80, 035104 (2009).

Αναφορές: 38

42. V. Yannopoulos, and N. V. Vitanov, “Degree of polarization of the thermal near field generated by arrays of metallic nanoparticles”, *Phys. Rev. B* 80, 035410 (2009).

Αναφορές: 1

43. V. Yannopoulos, E. Paspalakis and N. V. Vitanov, “Plasmon-Induced Enhancement of Quantum Interference Near Metallic Nanostructures”, *Phys. Rev. Lett.* 103, 063602 (2009).

Αναφορές: 9

44. V. Yannopoulos, “Sign of the refractive index in lossy metamaterials”, *Opt. Commun.* 282, 4152 (2009).

Αναφορές: 3

45. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, “First-Principles Study of Casimir Repulsion in Metamaterials”, *Phys. Rev. Lett.* 103, 120401 (2009).

Αναφορές: 17

46. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, “Neutralization of quantum stiction with interlocking arrays of gold nanopillars”, *phys. stat. sol. (RRL)* 4, 19 (2010).

Also at: <http://www.materialsviews.com/matview/display/en/1384/TEXT>

47. V. Yannopoulos, “Enhancement of nonlinear susceptibilities near plasmonic metamaterials”, *Opt. Commun.* 283, 1647 (2010).

Αναφορές: 2

48. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, “Casimir-Polder interaction between an atom and a periodic nanostructure”, *Phys. Rev. A.* 81, 042506 (2010).

Αναφορές: 1

49. V. Yannopoulos, “Effect of material spatial dispersion in the degree of polarization of thermal radiation emitted by a spherical source”, *Opt. Commun.* 283, 4494 (2010).
50. V. Yannopoulos and E. Paspalakis, “Backward-propagating slow light in Mie resonance-based metamaterials”, *J. Opt.* 12, 104017 (2010).
Αναφορές: 1
(2011 Top journal papers - [http://iopscience.iop.org/2040-8986/page/Highlights of 2010](http://iopscience.iop.org/2040-8986/page/Highlights%20of%202010))
51. S. Evangelou, V. Yannopoulos and E. Paspalakis, “Modifying free-space spontaneous emission near a plasmonic nanostructure”, *Phys. Rev. A* 83, 023819 (2011).
Αναφορές: 1
52. V. Yannopoulos, “Photonic analog of a spin-polarized system with Rashba spin-orbit coupling”, *Phys. Rev. B* 83, 113101 (2011).
53. I. Thanopoulos, E. Paspalakis, and V. Yannopoulos, “Enhancement of Ultraviolet Photoinduced Energy Transfer Near Plasmonic Nanostructures”, *J. Phys. Chem. C* 115, 4370 (2011).
54. V. Yannopoulos, “A hybrid layer-multiple-scattering/ Fourier modal method for photonic structures based on lithographic and/ or self-assembly techniques”, *J. Mod. Opt* 58, 400 (2011). (INVITED ARTICLE)
55. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, “Coherent control of surface exciton-polaritons in collections of semiconductor nanoparticles: a theoretical study”, *Phot. Nanostruct.: Fund. Appl.* 9, 196 (2011).
56. S. Mühlig, C. Rockstuhl, V. Yannopoulos, T. Bürgi, N. Shalkevich, and F. Lederer, “Optical properties of a fabricated self-assembled bottom-up bulk metamaterial”, *Opt. Express* 19, 9607 (2011).
Αναφορές: 1
57. S. Evangelou, V. Yannopoulos and E. Paspalakis, “Simulating quantum interference in spontaneous decay near plasmonic nanostructures: Populations dynamics”, *Phys. Rev. A* 83, 055805 (2011).
58. V. Yannopoulos and A.G. Vanakaras, “Dirac point in the photon dispersion relation of a negative/zero/positive-index plasmonic metamaterial”, *Phys. Rev. B* 84, 045128 (2011).
59. V. Yannopoulos and A.G. Vanakaras, “Layer-multiple-scattering theory for metamaterials made from clusters of nanoparticles”, *Phys. Rev. B* 84, 085119 (2011).

Σε τόμους

V. Yannopoulos, “Photo-induced magnetism in nanoparticles”, in *Handbook of Nanophysics*, Taylor & Francis, 2011.

Σε πρακτικά συνεδρίων

1. V. Yannopoulos, A. Modinos, and N. Stefanou, "Effect of moderate disorder on the absorbance of plasma spheres distributed in a host dielectric medium", *Proceedings of the NATO ASI: "Photonic Crystals and Light Localization"*, Kluwer (Dordrecht) p.383 (2001).
Αναφορές: 1

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

Αφίσες

1. V. Yannopoulos, A. Modinos, and N. Stefanou, "Scattering and absorption of light by periodic and nearly periodic metallodielectric structures", International Workshop on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, March 8-10, 2000, Sendai, Miyagi, Japan.
2. A. Modinos, N. Stefanou, I. E. Psarobas and V. Yannopoulos, "On wave propagation on inhomogeneous systems", 60th birthday symposium in honor of E. N. Economou on Wave Propagation and Electronic Structure in Disordered Systems, June 15-17, 2000, FORTH, Heraklion, Crete, GREECE.
3. V. Yannopoulos, A. Modinos, and N. Stefanou, "Effect of moderate disorder on the absorbance of plasma spheres distributed in a host dielectric medium", NATO ASI on Photonic Crystals and Light Localization, June 19-30, 2000, Limin Hersonissou, Crete, Greece.
4. V. Yannopoulos, N. Stefanou, and A. Modinos, "Anderson localization in inverted opals due to stacking faults", Euresco Conference on Electromagnetic Crystal Structures, June 9-14, 2001, St. Andrews, Scotland, UK.
5. V. Yannopoulos, N. Stefanou, and A. Modinos, "Photonic band structure and enhanced optical transmittance of mesoporous metals", Euresco Conference on Surface Plasmon Photonics, September 20-25, 2003, Granada, Spain.
6. V. Yannopoulos and N. Stefanou, "Influence of waveguide modes on the extinction spectrum of metallic nanoparticles on a dielectric substrate", Euresco Conference on Surface Plasmon Photonics, September 20-25, 2003, Granada, Spain
7. V. Yannopoulos, "Coupled-resonator optical waveguides as functional components in all-optical quantum computers", NATO ASI on Quantum Computation and Information, May 2-13, 2005, Chania, Crete, Greece.
8. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, "Atom decay within clusters of dielectric and metallic nanoparticles", 9th European Conference on Atoms, Molecules and Photons (ECAMP 9), May 6-11, 2006, Limin Hersonissou, Crete, Greece.
9. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, "Spatial coherence of the thermal radiation field in the presence of finite sources", Thermal Radiation at the Nanoscale (TRN 07), May 21-25, 2006, École de Physique, Les Houches, France.
10. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, "*Ab initio* theory of the van der Waals interactions among macroscopic bodies", Thermal Radiation at the Nanoscale (TRN 07), May 21-25, 2006, École de Physique, Les Houches, France.

Ομιλίες

1. V. Yannopoulos, M. C. K. Wiltshire and J. B. Pendry, "Theoretical analysis of the lensing properties of magnetic metamaterials", PIERS Conference, March 28-31, 2004, Pisa, Italy (INVITED).

2. V. Yannopoulos, , "Coherent-Potential-Approximation Multiple-Scattering Scheme for the Study of Photonic Crystals with Substitutional Disorder", PIERS Conference, March 26-29, 2006, Cambridge MA, USA.
3. V. Yannopoulos, , "Plasmonic-polaritonic photonic-crystal superlattices as left-handed metamaterials", PIERS Conference, March 26-29, 2006, Cambridge MA, USA.
4. V. Yannopoulos, "Artificial magnetism and negative refraction in electromagnetic metamaterials", CAMEL Workshop 06, 31 Aug – 5 Sep, 2006, Nessebar, Bulgaria (INVITED).
5. V. Yannopoulos, "Negative index of refraction and artificial magnetism in metamaterials with strongly dispersive components", 3^ο Συνέδριο Ελληνικής Κρυσταλλογραφικής Εταιρείας, 22-24 Σεπ, 2006, Πάτρα (INVITED).
6. V. Yannopoulos, "An introduction to fluctuational electrodynamics: dyadic Green's tensor, vacuum fluctuations, spatial coherence, thermal radiation and van der Waals forces", CAMEL Workshop 07, 13-17 Jun, 2007, Sozopol, Bulgaria (INVITED TUTORIAL).
7. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, "Applications of multiple-scattering Green's tensor formalism: spontaneous emission, vacuum fluctuations, spatial coherence and van der Waals forces", EMALI Workshop 08, 21-25 May, 2008, Vienna, Austria.
8. V. Yannopoulos, "Optical trapping via nanostructured metamaterials", CAMEL Workshop 08, 23-29 Jun, 2008, Nessebar, Bulgaria (INVITED).
9. V. Yannopoulos, "Optical trapping via nanostructured metamaterials", XXIV Panhellenic Conference on Solid State Physics and Materials Science, Heraklion, Crete, September 21-24, 2008 (INVITED)
10. V. Yannopoulos, E. Paspalakis, and N. V. Vitanov, "Classical analogue of electromagnetically induced transparency slow light, and zero refractive index in an array of gold nanoparticles", ICO-Photonics 2009, Delphi, Fokida, October 7-9, 2009.
11. V. Yannopoulos, "Negative refractive index, subwavelength imaging and related phenomena in the optical regime with arrays of metal-coated dielectric and semiconductor nanoparticles", 2nd Mediterranean Conference on Nano-photonics (MEDINANO 2), National Hellenic Research Foundation, Athens, October 26-27, 2009.
12. E. Paspalakis, V. Yannopoulos, N. V. Vitanov, "Quantum interference in spontaneous emission near plasmonic nanostructures", 2nd Mediterranean Conference on Nano-photonics (MEDINANO 2), National Hellenic Research Foundation, Athens, October 26-27, 2009.
13. V. Yannopoulos, E. Paspalakis, and N. V. Vitanov, "Transparency, slow light and negative refractive index in an array of gold nanoparticles atop a guiding substrate", PhoNa Workshop (Photonic Nanomaterials) 2010, Jena, Germany, March 24-25, 2010.
14. V. Yannopoulos, A. Vanakaras, and D. J. Photinos, "Layer-multiple scattering method for periodic metamaterials made from aggregates of metallic nanoparticles", NANOGOLD Workshop 2010, Aegina, Greece, May 19-22, 2010.
15. T. Kallos, V. Yannopoulos, A. Vanakaras, and D. J. Photinos, "Electromagnetic Simulations of Nanospheres embedded in Uniaxial Liquid Crystals", NANOGOLD Workshop 2010, Aegina, Greece, May 19-22, 2010.

16. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, "Coherent phenomena in the vicinity of metallic nanostructures", CAMEL 6, 28 Jun-2 Jul, 2010, Varna, Bulgaria (INVITED).
17. V. Yannopoulos, "Plasmon-induced transparency and coherence near metallic nanostructures", Virtual Conference on Nanoscale Science and Technology (VCNST), 30-31 Aug 2010, Sydney, Australia (INVITED).
18. V. Yannopoulos and N. V. Vitanov, "Classical analogues of quantum coherent phenomena in light-matter interactions at the nanoscale", EMALI (Engineering, Manipulation and Characterization of Quantum States of Matter and Light) Workshop, 23-25 Sep, 2010, Barcelona, Spain (INVITED).
19. V. Yannopoulos "Nanostructured Mie-based metamaterials", Micro & Nano 2010, 12-15 Dec, 2010, NCSR Demokritos, Athens, Greece.
20. V. Yannopoulos, "Topological photonic modes in metamaterials", CAMEL 7, 3 -9 Jul, 2011, Nessebar, Bulgaria.

ΠΡΟΣΚΕΚΑΛΗΜΕΝΕΣ ΟΜΙΛΙΕΣ (ΕΚΤΟΣ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ)

1. "Stacking faults in colloidal photonic crystals", 28/2/2001, Institut fuer Festkoerperphysik, Forschungszentrum Juelich, Germany.
2. "Imaging with left-handed metamaterials", 25/3/2004, Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, UK.
3. "Negative refraction in metamaterials with plasmonic and polaritonic constituents", 20/12/2005, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary.
4. "Optical trapping via nanostructured metamaterials", 4/12/2008, Physics Department, University of Sofia, Bulgaria.
5. "Atom and particle traps via nanostructured metamaterials", 28/4/2009, Physics Department, Technische Universitaet Kaiserslautern, Germany.
6. INVITED COLLOQUIUM: "Coherent phenomena in light absorption by metallic nanostructures", 7/1/2010, Cyprus Institute, Lefkosia, Cyprus.
7. "Σύμφωνα φαινόμενα στην απορρόφηση φωτός από μεταλλικές νανοδομές", 28/1/2010, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα.
8. "Σύμφωνος έλεγχος εντοπισμένου φωτός σε μεταλλικές νανοδομές", 26/10/2010, Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», Αθήνα.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ	:	59
ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΑΠΟ ΑΛΛΟΥΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΕΣ (ΕΤΕΡΟΑΝΑΦΟΡΕΣ)	:	944
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ (ΟΜΙΛΙΕΣ + ΑΦΙΣΕΣ)	:	29
ΠΡΟΣΚΕΚΛΗΜΕΝΕΣ ΟΜΙΛΙΕΣ	:	15

