

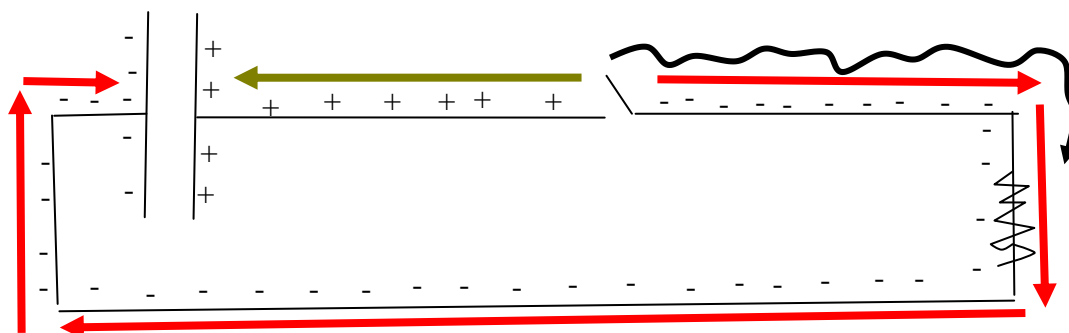
ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μερικές αιρετικές απόψεις

Στην επιστήμη ουδείς άσφαλτος. Έχει αποδειχθεί, πέρα από κάθε αμφιβολία, ότι ακόμη και ο Αϊστάιν είχε εσφαλμένη άποψη σχετικά με τον πιθανοκρατικό χαρακτήρα των φυσικών νόμων. Θεωρώ ότι το [βίντεο](#) του καναλιού Veritasium, ενός εξαιρετικού ομολογουμένως καναλιού που αναδεικνύει και αναλύει ορισμένα φυσικά φαινόμενα, καταλήγει σε λάθος συμπέρασμα σχετικά με τον μηχανισμό και με το χρόνο μετάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από καλώδια. Στο σημείωμα αυτό θα εκφράσω μερικές αιρετικές ίσως σκέψεις, που και αυτές είναι πολύ πιθανό να είναι εσφαλμένες.

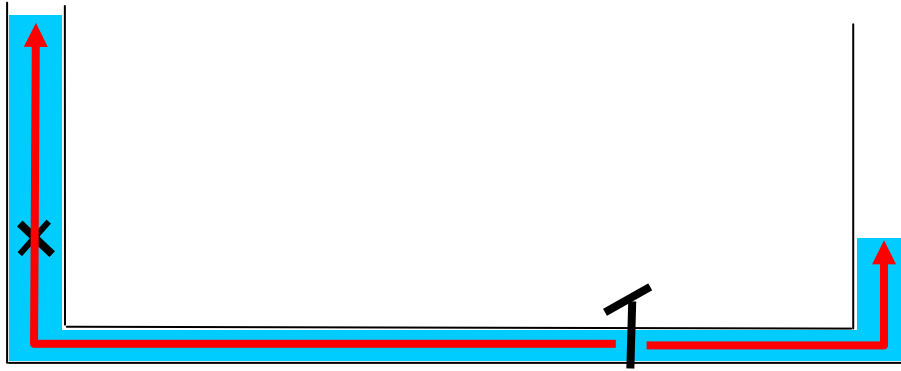
1. Ο πρώτος μου ισχυρισμός είναι ότι σε ένα απλό κύκλωμα με μία μπαταρία ένα διακόπτη και μία λάμπα, **ο χρόνος που θα κάνει ν' ανάψει η λάμπα δεν εξαρτάται από το πόσο απέχει η λάμπα από τη μπαταρία, αλλά από τη συντομότερη διαδρομή της λάμπας από το διακόπτη.**

Έστω για να απλοποιηθεί η κατάσταση ότι αντικαθιστούμε την μπαταρία με έναν φορτισμένο πυκνωτή. Πριν κλείσουμε τον διακόπτη, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού (έστω ότι $R_{αγ}=0$) βρίσκονται σε ισορροπία. Υπάρχει βέβαια μία θερμική κίνηση η οποία όμως δεν είναι προσανατολισμένη. Κλείνοντας τον διακόπτη, τα πρώτα ηλεκτρόνια που θα βρεθούν εκτός ισορροπίας και θα κινηθούν, θα είναι αυτά που βρίσκονται εκατέρωθεν του διακόπτη αφού σ' αυτό το σημείο δημιουργήθηκε η διαταραχή. Η κίνηση των ηλεκτρονίων στην περιοχή του διακόπτη, θα επηρεάσει τα διπλανά τους δημιουργώντας ένα κύμα μέσα στα καλώδια με κατεύθυνση εκατέρωθεν του διακόπτη μέχρις ότου διαδοθεί αυτό το σήμα σε όλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, οπότε θ' αρχίσουν την προσανατολισμένη τους κίνηση.



Έτσι είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι ο χρόνος που θα κάνει ν' ανάψει η λάμπα εξαρτάται από τη συντομότερη απόσταση του καλωδίου που φθάνει από τον διακόπτη στη λάμπα.

Αυτός ο ισχυρισμός ενισχύεται από το αντίστοιχο μηχανικό ανάλογο των συγκοινωνούντων δοχείων. Έστω ότι έχουμε δύο συγκοινωνούντα δοχεία που περιέχουν νερό διαφορετικού ύψους. Ανάμεσά τους υπάρχει ένας διακόπτης και αριστερά ένας μύλος.



Αν ανοίξουμε τον διακόπτη τότε θ' αρχίσει να περιστρέφεται ο μύλος; Ανοίγοντας τον διακόπτη τα πρώτα μόρια νερού που θα κινηθούν θα είναι αυτά που βρίσκονται εκατέρωθεν του διακόπτη αφού σε αυτά παύει η συνολική δύναμη να είναι μηδέν. Η κίνηση αυτών των μορίων θα επηρεάσει τα διπλανά τους και έτσι θα δοθεί η εντολή μέσω ενός κύματος πίεσης να κινηθούν όλα τα μόρια του νερού. Η κόκκινη γραμμή δείχνει την πορεία αυτού του κύματος.

Επομένως ο χρόνος που θα περάσει μετά το κλείσιμο του διακόπτη ώστε να κινηθεί ο μύλος θα εξαρτηθεί από την απόσταση που απέχει ο μύλος από τον διακόπτη. Κάτι ανάλογο υποθέτω ότι συμβαίνει και στον ηλεκτρισμό.

Ας υιοθετήσουμε τώρα την άποψη του Veritasium ότι δηλαδή το άναμμα της λάμπας εξαρτάται από την απόσταση της από τη μπαταρία όπως ισχυρίζεται το βίντεο. Τότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μία πληροφορία μπορεί να διαδοθεί ταχύτερα από το φως!!!. Πράγματι, αν τον διακόπτη τον είχαμε στον Φεγγάρι και τη λάμπα δίπλα στη μπαταρία, κλείνοντας τον διακόπτη η λάμπα θ' ανάψει σε χρόνο d/c όπου d η απόσταση της λάμπας από τη μπαταρία. Τότε όμως, κάποιος παρατηρητής που βρίσκεται δίπλα σ' αυτήν θα καταλάβει ότι έκλεισε ο διακόπτης πιο γρήγορα από ότι θα χρειαζόταν το φως να φθάσει από τον διακόπτη που βρίσκεται στο Φεγγάρι σε αυτόν !

Τέλος, ας μην ξεχνάμε ότι και στους μαθητές μας, όταν τους ρωτάμε σε πόσο χρόνο ανάβει η λάμπα του δωματίου τους μετά το κλείσιμο του διακόπτη, τους δίνουμε την απάντηση ότι ανάβει μετά από το χρόνο που χρειάζεται το φως για να πάει από τον διακόπτη στη λάμπα και όχι για να πάει από το εργοστάσιο της ΔΕΗ στη λάμπα.

2. Ο δεύτερος ισχυρισμός είναι ότι **το διάνυσμα Poynting δεν εφαρμόζεται σωστά στην περίπτωση μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτρικών ρευμάτων, μολονότι οδηγεί στους σωστούς τύπους**. Θα προσπαθήσω να ερμηνεύσω γιατί συμβαίνει αυτό. Ισχυρίζομαι δηλαδή ότι μολονότι στην άσκηση 3.5 της σελίδας 232 της αναφοράς καταλήγουμε στο σωστό αποτέλεσμα, η φυσική ερμηνεία που δίνουμε είναι λανθασμένη.

Αυτό βέβαια δεν είναι πρωτόγνωρο για τη φυσική. Κλασικό παράδειγμα ο τύπος της οσμωτικής πίεσης. Μολονότι ο τύπος είναι ακριβώς ο ίδιος με το νόμο των ιδανικών αερίων $PV=nRT$ δεν έχει καμία σχέση με τα ιδανικά αέρια. Έτσι αν συνδυάσει κάποιος την οσμωτική πίεση με το μοντέλο των ιδανικών αερίων προφανώς θα έχει κάνει λάθος. Άλλη μία περίπτωση είναι αυτή του φαινομένου της διάθλασης. Θεωρώντας ότι το φως αποτελείται από ελαστικά σωματίδια και εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ορμής καταλήγουμε στη

$$\text{σχέση: } \frac{\eta_{\mu\alpha}}{\eta_{\mu\beta}} = \text{σταθερό}$$

Μολονότι η σχέση είναι σωστή, η φυσική της ερμηνεία ότι το φως αποτελείται από μικρά ελαστικά σφαιρίδια, είναι λανθασμένη.

ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΔΙΚΛΩΝΟΥ ΚΑΛΩΔΙΟΥ

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας στον ηλεκτρομαγνητισμό εκφράζεται ως εξής:

$$\int_V \vec{E} \vec{J}_i dV = \frac{d}{dt} \int_V \left(\frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 + \frac{1}{2\mu} B^2 \right) dV + \int_V \vec{E} \vec{J}_r dV + \oint_S \left(\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu} \right) d\vec{S} \quad (1)$$

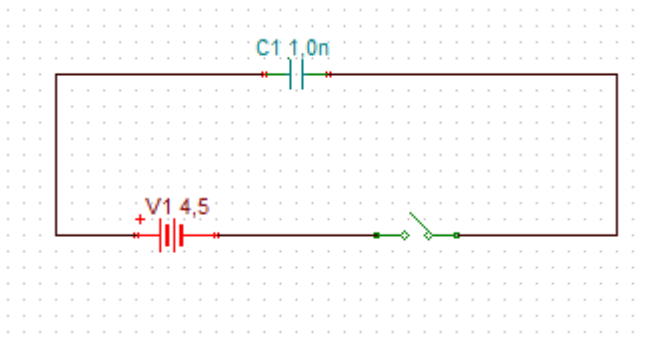
Το J_i είναι το ρεύμα επιβολής το οποίο δημιουργείται από μία πηγή (Ηλεκτρογεννήτρια ή μπαταρία). Το ρεύμα αυτό παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια. Το J_r είναι το ρεύμα απόκρισης το οποίο αν διαρρέει έναν αντιστάτη, η ισχύς που μεταφέρεται από αυτό γίνεται θερμική. Αν το ρεύμα απόκρισης αποτελείται από ελεύθερα φορτία τότε η ισχύς που απορροφάται μετατρέπεται σε αύξηση της κινητικής ενέργειας των φορτίων.

Με ποιο απλά λόγια η εξίσωση (1) που εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας, μας λέει ότι σε ένα σύστημα η ηλεκτρική ενέργεια που μπαίνει στο σύστημα μέσω ρευματοφόρων αγωγών μπορεί να μετατραπεί σε 4 διαφορετικές μορφές.

1. Σε ενέργεια ηλεκτροστατικού πεδίου
2. Σε ενέργεια μαγνητοστατικού πεδίου
3. Σε θερμική ενέργεια
4. Σε ενέργεια ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Τώρα θ' αναφερθώ που γίνεται το λάθος της χρήσης του διανύσματος Poynting σε πολλά πανεπιστημιακά συγγράμματα

1. ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΥΚΝΩΤΗ



Κλείνοντας τον διακόπτη στο παραπάνω κύκλωμα ενεργειακά λέμε ότι η πηγή μέσω του ρεύματος επιβολής φορτίζει “ακαριαία” τον πυκνωτή, αφού η ωμική αντίσταση του κυκλώματος είναι μηδέν (Σταθερά χρόνου $RC=0$). Η εξίσωση (1) θα πάρει τη μορφή:

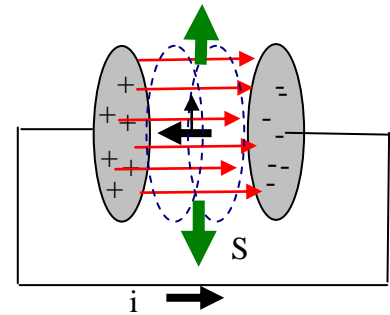
$$\int_V \vec{E} \vec{J}_i dV = \frac{d}{dt} \int_V \frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 dV$$

αφού οι υπόλοιποι όροι είναι μηδέν. Όλα καλά.

Τι θα συμβεί όμως αν βραχυκυκλώσουμε έναν φορτισμένο πυκνωτή; Που θα πάει η αποθηκευμένη ηλεκτρική του ενέργεια; Προφανώς δεν θα μετατραπεί σε θερμική αφού θεωρήσαμε ότι τα καλώδια έχουν μηδενική αντίσταση. Σ' αυτή την περίπτωση η ηλεκτροστατική ενέργεια του πυκνωτή θα γίνει ηλεκτρομαγνητικό κύμα και θα δραπετεύσει στο χώρο. Η εξίσωση (1) θα πάρει τη μορφή :

$$\frac{d}{dt} \int \frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 + \oint_S \left(\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu} \right) d\vec{S} = 0$$

Απόδειξη



$$S = \frac{1}{\mu} \vec{E} \cdot \vec{B} = \frac{1}{\mu} \frac{V}{\ell} \mu \frac{2i}{4\pi R} = \frac{V}{2\pi R \ell} \frac{dq}{dt} = \frac{q dq}{AC dt} \rightarrow \frac{1}{A} \int \frac{dW}{dt} = \int \frac{1}{AC dt} q dq \rightarrow W = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

Η φορά του διανύσματος Poynting είναι όπως τα πράσινα βελόνια έξω από την παράπλευρη επιφάνεια του κυλινδρικού πυκνωτή όπως και το αναμέναμε. Με άλλα λόγια αποδείξαμε ότι η ενέργεια του πυκνωτή στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια η οποία δραπετεύει στο χώρο.

Νομίζω ότι έγινε σαφές ότι είναι λάθος τη σχέση αυτή που αποδείξαμε μόλις τώρα να τη χρησιμοποιήσουμε και στη φόρτιση του πυκνωτή. Και αυτό γιατί όπως προαναφέραμε η φόρτιση του πυκνωτή δεν γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αλλά μέσω του ρεύματος επιβολής.

Αν βέβαια υπολογίζαμε το διάνυσμα Poynting και κατά τη φόρτιση, θα καταλήγαμε στο σωστό τύπο της ηλεκτρικής ενέργειας του πυκνωτή, αφού κατά την εκφόρτισή του θα χαθεί μέσω Η/Μ ακτινοβολίας η ίδια ενέργεια που είχε αποκτήσει μέσω του ρεύματος επιβολής κατά τη φόρτιση. Αυτό λοιπόν που πρέπει να τονιστεί είναι ότι η **διαδικασία φόρτισης δεν είναι ίδια με την διαδικασία εκφόρτισης.** Ο πυκνωτής φορτίζεται αποκλειστικά με ρεύματα επιβολής. Με άλλα λόγια για να φορτιστεί πρέπει ν' αποκτήσει φορτία. Εκτός όμως του βραχυκυκλώματος στο οποίο αναφερθήκαμε μπορεί να εκφορτιστεί και με άλλους τρόπους όπως:

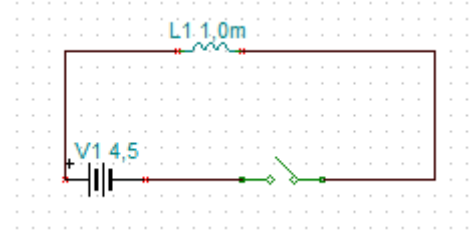
- Μέσω αντιστάτη οπότε η ενέργεια του πυκνωτή θα μετατραπεί σε θερμική
- Μέσω ενός άλλου πυκνωτή πολύ μεγαλύτερης χωρητικότητας οπότε η ενέργειά του θα μεταβιβαστεί στον άλλον πυκνωτή.
- Μέσω πηνίου, οπότε η ενέργειά του θα μετατραπεί σε μαγνητική, αλλά και η μαγνητική ενέργεια θα επιστρέψει ξανά στον πυκνωτή και έτσι θα δημιουργηθεί μία ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση.

Σε καμία από αυτές τις περιπτώσεις δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το διάνυσμα Poyntig. Στην τελευταία περίπτωση βέβαια, στο κύκλωμα LC μπορούμε επαγωγικά να πάρουμε την ενέργεια και να την οδηγήσουμε σε μία κεραία, οπότε η ενέργεια θα δραπετεύσει υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον αέρα. Τότε για το κύμα που δραπετεύει στον αέρα, (και όχι για το κύκλωμα LC) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το διάνυσμα Poynting.

2. « ΦΟΡΤΙΣΗ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗ ΠΗΝΙΟΥ»

Έστω ότι έχουμε ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει ένα ιδανικό πηνίο και μία πηγή. Κλείνοντας το διακόπτη το ρεύμα θα αποκατασταθεί πάρα πολύ γρήγορα σχεδόν ακαριαία ($I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$ με $R \rightarrow 0$) και ενεργειακά θα ισχύει η εξίσωση:

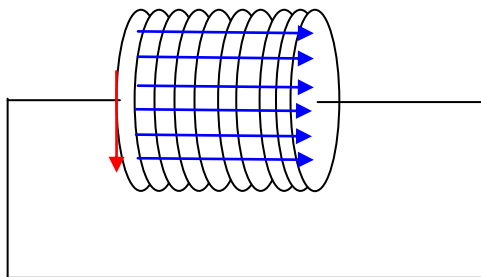
$$\int_V \vec{E} \cdot \vec{J}_i dV = \frac{d}{dt} \int \frac{1}{2\mu} B^2 dV$$



Η παραπάνω σχέση μας λέει απλά ότι μέσω του ρεύματος επιβολής η πηγή έδωσε στο πηνίο ενέργεια ίση με $\frac{1}{2} Li^2$ η οποία παραμένει σταθερή εφόσον το πηνίο διαρρέεται από σταθερό ρεύμα.

Τι θα γίνει όμως αυτή η μαγνητική ενέργεια αν ανοίξω τον διακόπτη; Σ' αυτή την περίπτωση θα μηδενιστεί "ακαριαία" το ρεύμα (η σταθερά χρόνου $\tau = L/R \rightarrow 0$) και η μαγνητική ενέργεια θα δραπετεύσει στο χώρο υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αυτό το φαινόμενο το αντιλαμβανόμαστε κάθε φορά που σβήνουμε το φως και ακούμε παράσιτα σε κάποιο ανοικτό τρανζίστορακι.

Απόδειξη:

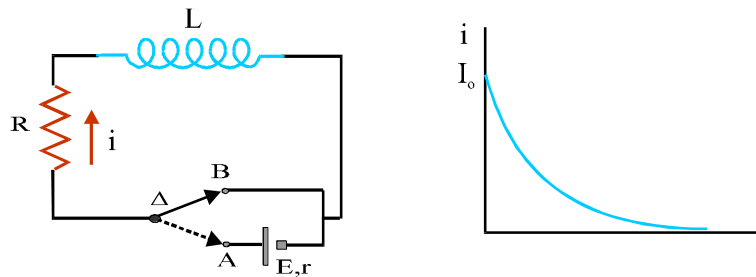


$$S = \frac{1}{\mu} E \cdot B = \frac{1}{\mu} \frac{V}{\ell_{ολ}} \left(\mu \frac{iN}{\ell} \right) = \frac{V}{N2\pi R} \frac{i}{\ell} = \frac{1}{A} \frac{L di}{dt} \rightarrow \frac{1}{A} \int \frac{dW}{dt} = \int \frac{1}{A dt} L i di \rightarrow W = \frac{1}{2} Li^2$$

Είναι και πάλι λάθος να χρησιμοποιήσουμε το διάνυσμα Poynting και για τη «φόρτιση» του πηνίου μολονότι θα καταλήξουμε στον σωστό τύπο ενέργειας. Και αυτό γιατί όπως προαναφέραμε ο μηχανισμός φόρτισης είναι διαφορετικός. Το πηνίο φορτίζεται από το ρεύμα επιβολής που επιβάλει η πηγή και όχι από κάποιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Ένα άλλο λάθος που γίνεται σε πολλά συγγράμματα, όπως πχ στο βιβλίο της Β' Λυκείου είναι το εξής: Το βιβλίο όπως φαίνεται και στην εικόνα αναφέρει ότι μεταφέροντας τον

διακόπτη από τη θέση A στη θέση B το ρεύμα δεν θα μηδενιστεί ακαριαία. Αυτό είναι λάθος. Το ρεύμα θα μηδενιστεί ακαριαία. Και αυτό γιατί κατά τη μεταφορά του διακόπτη από τη θέση A στη θέση B, ο διακόπτης περνάει από τον αέρα. Τότε όμως η αντίσταση απειρίζεται και το ρεύμα μηδενίζεται ακαριαία. Η μαγνητική ενέργεια του πηνίου μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα δραπέτευοντας από τα καλώδια στον αέρα. Το λάθος μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί και πειραματικά αφού αν στη θέση του αντιστάτη τοποθετηθεί ένα λαμπάκι, τότε μεταφέροντας το διακόπτη από τη θέση A στη B θα δούμε το λαμπάκι να σβήνει ακαριαία. Δεν θα διαπιστώσουμε καμία καθυστέρηση στο σβήσιμο της λάμπας, αφού δεν αναπτύσσεται καμία ΗΕΔ από αυτεπαγωγή όπως ισχυρίζεται το κείμενο.



Σχ. 5.37 Η μετακίνηση του μεταγωγού από τη θέση A στη θέση B δε μηδενίζει αμέσως το ρεύμα στο κύκλωμα εξαιτίας της ηλεκτρεγερτικής δύναμης από αυτεπαγωγή που αναπτύσσεται στο πηνίο.

Γενικότερα μελετώντας κυκλώματα RC και LC θεωρούμε ότι εάν $R=0$ ή $R \rightarrow \infty$ οι αποκαταστάσεις των ρευμάτων γίνονται ακαριαία. Διαπιστώνουμε με άλλα λόγια ότι στον κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό δεν αναφερόμαστε στο μηχανισμό διάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από τα καλώδια θεωρώντας ότι αυτό γίνεται ακαριαία. Προσοχή αναφερόμαστε σε καλώδια και όχι σε κυματοδηγούς στους οποίους η μεταφορά της ενέργεια μπορεί να γίνει και από ένα μονόκλωνο καλώδιο ή από ένα Fiber.

Ερωτήματα όπως:

- Πως δημιουργούνται H/M κύματα στο ορατό και το υπεριώδες χωρίς ταλάντωση κυκλωμάτων LC;
- Τι αναγκάζει τα ρέοντα ηλεκτρόνια να ακολουθούν τροχιές σύμφωνες με τις καμπές του αγωγού (μακριά από τη μπαταρία) σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα;
- Πως μία μπαταρία διαμορφώνει το κατάλληλο ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος όλου του κυκλώματος ώστε να κινηθούν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα σ' αυτό;
- Γιατί όλα τα υλικά δεν παρουσιάζουν την ίδια αγωγιμότητα; Που οφείλεται η τεράστια διαφορά αγωγιμότητας των υλικών;

δεν νομίζω ότι μπορούν ν' απαντηθούν στο επίπεδο της κλασικής ηλεκτροδυναμικής. Νομίζω ότι για την απάντηση των παραπάνω ερωτήσεων θα πρέπει να καταφύγουμε στη κβαντική ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Το κλασικό μοντέλο των εξισώσεων Maxwell που αναφέρεται στην παραγωγή H/M κυμάτων χαμηλής συχνότητας από LC κυκλώματα και κεραίες κλπ είναι ανεπαρκές για την ερμηνεία παραγωγής H/M κυμάτων από θερμά σώματα ή ιονισμένα αέρια. Το ίδιο βέβαια ισχύει και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το φαινόμενο Compton. Ακόμη όμως και η αγωγιμότητα δεν μπορεί να ερμηνευτεί στα πλαίσια της κλασικής ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας!

Πιστεύω ότι στην πραγματικότητα η φύση δεν διαχωρίζει τον κλασσικό ηλεκτρομαγνητισμό με τη κβαντική φυσική. Απλά εμείς οι άνθρωποι χρησιμοποιούμε διαφορετικά μοντέλα και μεθόδους ερμηνείας των φαινομένων ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής.

http://ekfe.ker.sch.gr/epiloges/6_artra/68_theory_zonwn.pdf

Αναφορά:

-Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία: *Καρούμπαλος Βαλεοντής 1979*

Το βιβλίο μπορείτε να το κατεβάσετε από τη διεύθυνση:

<https://www.openbook.gr/efarmosmenos-ilektromagnitismos/>

Σημ:

Το σημείωμα αυτό το αφιερώνω στη μνήμη του καθηγητή μου Κωνσταντίνου Καρούμπαλου που αποτελούσε τη ψυχή του μεταπτυχιακού τμήματος της Ραδιοηλεκτρολογίας και ενέπνευσε μία σειρά αξιόλογων συναδέλφων.