

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

Κεφάλαιο ένα

Εισαγωγή-Bridgman

Ο ηλεκτρισμός είναι πολύ βαθύ φαινόμενο και η φυσική είναι ακόμα διχασμένη στην αντιμετώπισή του. Η ηλεκτρική θεωρία περιέγραψε έναν αριθμό ηλεκτρικών δυνάμεων από τη δύναμη Coulomb έως τις δυνάμεις Ampere, Grassman, Biot-Savart, Laplace, Weber, Gauss, Clausius, Lorentz έχοντας χαράξει δύο δρόμους για τη μελέτη του ηλεκτρισμού, που φαίνεται ότι εκπροσωπούν βαθύτερες διαφορές που φτάνουν μέχρι τις ρίζες της ανθρώπινης δυνατότητας για την περιγραφή αλλά και την κατανόηση της φύσης.

Στον έναν συνδέει τον ηλεκτρισμό με τα σώματα και μελετάει τις αμοιβαίες αλληλεπιδράσεις φορτισμένων σωμάτων από απόσταση χωρίς ενδιάμεσο, και στον άλλον η ηλεκτρική αλληλεπίδραση γίνεται εξ' επαφής δια μέσου ενός φορέα. Την επαφή την αποκαθιστούσε ο αιθέρας, που σήμερα αντικαταστάθηκε από το «πεδίο». Θα τους αποκαλούμε **σωματιδιακό** και **πεδιακό** ηλεκτρισμό αντίστοιχα.

Στην πορεία, η άποψη για δράση εξ' επαφής επικράτησε αλλά καταργήθηκε το μέσο της επαφής που ήταν ο αιθέρας, μιλήσαμε για κύματα χωρίς μέσο διάδοσης, κατέληξε στην έννοια του άυλου πεδίου που δε συνδέεται με σώματα, μια *super* πραγματικότητα που βρίσκεται πίσω απ' όλα, Αριστοτελική και νοητή χωρίς καμιά εκτελεστική επαλήθευση.

Μόχθησε πολύ η φυσική να αποκαλύψει την ατομικότητα του ηλεκτρισμού, μια αναμφισβήτητη πραγματικότητα, γιατί η πεδιακή θεωρία που είχε επικρατήσει, την απέριπτε! Το φορτίο έγινε τελικά αποδεκτό σαν μια παραμόρφωση του αιθέρα, η παραμόρφωση αυτή συμβαίνει πάνω σε συγκεκριμένο υλικό σωματίδιο, και αργότερα όταν ο αιθέρας απεδείχθη ανύπαρκτος το ηλεκτρόνιο έγινε μια πύκνωση του 'πεδίου' το οποίο ήταν άυλο.

Ταλαντεύτηκε η φυσική ανάμεσα στα μαθηματικά σύμβολα και στις φυσικές οντότητες, στα διαδιδόμενα δυναμικά και στην ταχύτητα διάδοσης της ηλεκτρικής δράσης, κατέγραψε εξισώσεις που η μαθηματική τους και μόνο επεξεργασία δημιουργούσε ατέλειωτες συζητήσεις για τη φύση του ηλεκτρισμού.

Τελικά οι θεωρίες του μέσου επαληθεύτηκαν με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του Hertz, αλλά ύστερα από αρκετά χρόνια μάθαμε ότι τα κύματα αυτά δεν ήταν σαν τα κύματα του νερού στη θάλασσα, αλλά ήταν τα ανάλογα των υλικών κυμάτων που συνοδεύουν το ηλεκτρόνιο, αυτά συνόδευαν το φωτόνιο, ήταν μάλλον κύματα πιθανότητας και το φως ήταν ένα πλήθος σωματιδίων, των φωτονίων.

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

Θα προσπαθήσω να διηγηθώ με τον απλούστερο δυνατό τρόπο την ιστορία της ηλεκτρικής θεωρίας, όσο γίνεται χωρίς μαθηματικά σύμβολα, και με ιστορικά στοιχεία για τους πρωταγωνιστές της, γιατί πιστεύω ότι αποτελεί ένα από τα ψηλότερα μνημεία του ανθρώπινου πνεύματος.

Θεωρώ όμως ότι η προσπάθεια για κατανόηση αυτής της ακραίας περιοχής της φύσης, της περιοχής του ηλεκτρισμού, θα χρειαστεί και ένα φιλοσοφικό υπόβαθρο που θα το θέσω εξ' αρχής.

Το βασικό δίπολο που πρέπει να έχουμε συνέχεια στο μυαλό για να αξιολογήσουμε την ηλεκτρική θεωρία είναι το δίπολο **έννοια-πραγματικότητα**.

Η άποψη της φυσικής για τη σχέση αυτή της πραγματικότητας με τις έννοιες, αποκρυσταλλώνεται στην πραγματεία του Μπρίτζμαν (Bridgman) «η λογική της σύγχρονης φυσικής» που μεταφράζεται στα Ελληνικά σαν εισαγωγή του βιβλίου.

Κατά το Bridgman οι έννοιες πρέπει να παράγονται από τις μετρήσεις, «με οποιαδήποτε έννοια δεν εννοούμε τίποτα άλλο από ένα σύνολο χειρισμών, είναι συνώνυμες (οι έννοιες) με ένα σύνολο χειρισμών», και όταν η φυσική ανάγεται σε «κάτι τι νοητό πέρα από τις αισθήσεις» μετατρέπεται καθαρά σε «μια αφηρημένη επιστήμη τόσο απομακρυσμένη από την πραγματικότητα όσο η αφηρημένη γεωμετρία των μαθηματικών, που είναι κτισμένη πάνω σε αξιώματα»¹. Έτσι θεμελιώνεται αυτό που στα Πανεπιστημιακά βιβλία γράφεται

«...η σύγχρονη φυσική, απαιτεί κάθε φυσικό μέγεθος να το ορίζουμε «εκτελεστικά» (operationally). Δηλαδή να το ορίζουμε περιγράφοντας μια αλληλουχία μετρήσεων ή χειρισμών με την οποία μπορεί κατ' αρχή να μετρηθεί το φυσικό μέγεθος. Επίσης ο χαρακτηρισμός «αληθινή» ή «ψεύτικη» μπορεί να αποδοθεί σε μια πρόταση μόνο «εκτελεστικά» δηλαδή μόνο με την περιγραφή μετρήσεων ή χειρισμών που επιτρέπουν να ελεγχθεί αν είναι ή όχι αληθινή η πρόταση....»

Η άποψη αυτή δοκιμάζεται ακριβώς στην έννοια του πεδίου. Γιατί είναι ο ίδιος ο Bridgman που αρνείται τη φυσική του ύπαρξη και δηλώνει

¹ Ο Bridgman αναφέρει σαν διαφωτιστικό παράδειγμα τις Νευτώνειες έννοιες του χώρου και του χρόνου.

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

..μια κριτική εξέταση θα δείξει ότι η απόδοση μιας φυσικής πραγματικότητας στο ηλεκτρικό πεδίο είναι τελείως αδικαιολόγητη. Δεν μπορώ να βρω ούτε ένα φυσικό φαινόμενο ή μια φυσική διαδικασία με την οποία να αποκαλύπτεται η ύπαρξη του πεδίου.....το πεδίο είναι μια επινόηση...

Δεν έχουμε βρει, ισχυρίζεται ο Bridgman, ακόμα χειρισμούς που να συνδέονται με την αντικειμενική υπόσταση του πεδίου, που να το μεταφέρουν στην πραγματικότητα της φυσικής.

Όμως για την πλειοψηφία των φυσικών το πεδίο είναι η ύψιστη πραγματικότητα έστω κι αν δεν αποκαλύπτεται στις αισθήσεις.

Ο Weyl στο βιβλίο του *Space Time Matter* αναφέρει

..Κρυμμένο πίσω απ' την ύλη που αποκαλύπτεται άμεσα ότι υπάρχει απ' τις αισθήσεις μας, βρίσκεται το πεδίο. Η ανακάλυψη των νόμων του πεδίου και των νόμων με τους οποίους αυτό καθορίζει την ύλη ξεκίνησε με τη θεωρία του Maxwell, και φαίνεται να έχει πολύ δρόμο. Όμως η ύπαρξη μιας ουσίας, έχει για πάντα εγκαταλειφθεί απ' τους καθορισμούς μας για την ύλη.

Το άυλο πεδίο βρίσκεται πίσω από την υλική συμπεριφορά των σωμάτων λέει ο Weyl.

Και ο απόστολος του Einstein, ο Minkowski γράφει

στην ανάπτυξη των μαθηματικών συμπερασμάτων θα εμφανιστούν άφθονες ευκαιρίες για πειραματικές επαληθεύσεις οι οποίες θα πείσουν ακόμα και αυτούς που δύσκολα εγκαταλείπουν τις παλιές κατεστημένες ιδέες , για την αρμονία που αναδεικνύεται να προϋπάρχει ανάμεσα στα καθαρά μαθηματικά και τη φυσική.....Minkowski.”

Είναι το αντίθετο της εκτελεστικής άποψης, ο Minkowski δεν ήταν φυσικός . Όμως τα 'νοητά' στη σύγχρονη φυσική θεωρία τα εγκαθιστά η μαθηματική μεταφυσική, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι μαθηματικό κατασκεύασμα και η 'προϋπάρχουσα αρμονία' του Minkowski, το καθιστά πραγματικό αν και μη αισθητό.

Αυτή η αναγωγή της φυσικής σε κάτι νοητό πέρα από τις αισθήσεις «που τη μετατρέπει σε μια αφηρημένη επιστήμη απομακρυσμένη από την πραγματικότητα» που αναφέρει ο Bridgman, φαίνεται να συμβαίνει συχνά στη φυσική.

Το εντοπίζει ο Einstein κρίνοντας την έννοια του απόλυτου χώρου του Νεύτωνα.

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

...Αυτό που είναι ουσιώδες είναι ότι εκτός από τα παρατηρήσιμα αντικείμενα, κάτι άλλο, που δεν είναι αισθητό, πρέπει να θεωρηθεί σαν πραγματικό, για να καταστούν πραγματικότητες η επιτάχυνση ή η περιστροφή . (Ο Einstein για τον απόλυτο χώρο του Νεύτωνα)

Είναι αυτό το νοητό κάθε φορά η εξηγητική συνιστώσα μιας φυσικής θεωρίας που αναφέρει ο Ντύεμ (Duhem) και συνδέεται με τα μεταφυσικά πιστεύω του ερευνητή.

...κατά τον Duhem μια φυσική θεωρία μπορεί να αναλυθεί σε δύο διακριτά μέρη: το «αναπαραστατικό» και το «εξηγητικό». Το πρώτο ταξινομεί τους νόμους (φαινόμενα) ενώ το δεύτερο είναι αυτό με το οποίο η επιστήμη επιδιώκει να «συλλάβει» την πραγματικότητα (reality) που βρίσκεται κάτω απ' τα φαινόμενα. Αυτό το δεύτερο το «εξηγητικό» δεν διαθέτει λογική δομή και σχετίζεται με τα **μεταφυσικά πιστεύω του ερευνητή**όταν η πρόοδος της πειραματικής φυσικής αντιτίθεται σε μια θεωρία και την αναγκάζει να τροποποιηθεί, τότε το εξηγητικό μέρος της παλιάς θεωρίας αποβάλλεται για να δώσει τη θέση του σε μια άλλη εξήγηση..... Δημοσθένης Δαγκλής, Ο συμβατισμός του Duhem και η επίδρασή του στο λογικό Εμπειρισμό, Διδακτορική διατριβή

Στο βιβλίο μου αυτό θα φανεί ότι πεδίο είναι η εξηγητική συνιστώσα της φυσικής του ηλεκτρισμού μέχρι νεωτέρας. Το μήνυμα του Bridgman που είναι και μήνυμα της πειραματικής φυσικής : «Μην πιστεύετε τίποτα εκτός από αυτό που μετράτε, κι αυτό ακόμα να το συνδέσετε με τον τρόπο μέτρησης (χειρισμοί), γιατί αν αλλάξει ο τρόπος αυτός, αλλάζει και το συμπέρασμα»² φαίνεται ότι μπαίνει βαθιά στα πράγματα όσον αφορά την οντότητα που ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ερωτήματα του τύπου «τι πράγματι συμβαίνει στο φυσικό κόσμο π.χ γιατί τα φορτία έλκονται» είναι μεταφυσικά ερωτήματα, χωρίς νόημα για τη φυσική, και προορίζονται για άλλη οντότητα με απεριορίστες εκτελεστικές προσβάσεις . Ο άνθρωπος ενδιαφέρεται για το τι αυτός μπορεί να καταγράψει ότι συμβαίνει. Η φυσική δεν ερμηνεύει αλλά περιγράφει. Έτσι θεμελιώνεται ο επιστημονικός αγνωστικισμός σε αντίθεση με τις μαθηματικές ερμηνείες και αιτίες του κόσμου των φαινομένων. Τα μαθηματικά είναι η σύγχρονη μεταφυσική και όπως εκείνη, ανέλαβαν την αποστολή της ερμηνείας του κόσμου.

² Θα πρέπει να απαιτήσουμε ότι το σύνολο των χειρισμών που ισοδυναμούν σε κάθε έννοια είναι μοναδικό, γιατί αλλιώς υπάρχουν πιθανότητες ασάφειας στις πρακτικές εφαρμογές, τις οποίες δεν πρέπει να επιτρέψουμε...._Αν έχουμε περισσότερα από ένα σύνολα χειρισμών , έχουμε περισσότερες από μία έννοιες , και σαφώς θα αντιστοιχεί ένα διαφορετικό όνομα σε κάθε διαφορετικό σύνολο χειρισμών.....Bridgman

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

Με βάση αυτές τις 'φιλοσοφικές' αφητηρίες θα προσπαθήσουμε να ταξιδέψουμε στον κόσμο των ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων, με το όχημα της πεδιακής θεώρησης.

(Συνέχεια εισαγωγής...)

Κεφάλαιο δεύτερο

Ο ηλεκτρομαγνητισμός πριν το Maxwell

Ο Michel Faraday έφερε την επανάσταση στη φυσική στα 1830 δείχνοντας ότι ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός είναι αλληλένδετα φαινόμενα. Κατόρθωσε να στηρίξει την ανατροπή αυτή πάνω σε μια προσεκτική πειραματική βάση. Ανάμεσα στα 1864 και 1873 ο James Clerk Maxwell πέτυχε μια παρόμοια επανάσταση μόνο με την καθαρή σκέψη³. Όμως αυτό έγινε δυνατό γιατί θεώρησε ως αφητηρία της θεωρίας του τα πειραματικά αποτελέσματα των Coulomb, Ampere, και Faraday οι οποίοι μέχρι το 1864 εξέφραζαν τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού σε ολοκληρωτική μορφή, σύμφωνα με τα μαθηματικά της εποχής τους.

Με τη διατύπωση του νόμου του Κουλόμπ, που έμοιαζε με τη δύναμη βαρύτητας του Νεύτωνα η οποία είχε οδηγήσει τη μηχανική σε θριάμβους από τα γήινα μέχρι τα ουράνια πράγματα, οι 'ηλεκτριστές' έβαλαν στόχο να οικοδομήσουν την ηλεκτρική θεωρία πάνω στην ίδια φιλοσοφία της δράσης από απόσταση, χωρίς καμιά υπόθεση για μέσο διάδοσης, πιστεύοντας σε ανάλογες εξελίξεις και στον ηλεκτρισμό.

Οι ερευνητές αυτοί, περιέγραψαν όλα τα φαινόμενα, θεμελιώνοντας μια πλήρη ηλεκτρική θεωρία, θεωρώντας τον ηλεκτρισμό αποτελούμενο από φορτισμένα σωματίδια, κατέστησαν το μαγνητισμό ηλεκτρικό φαινόμενο όπως ακριβώς τον θεωρούμε σήμερα, ερμήνευσαν με τα ηλεκτρόνια τους την επαγωγή, μέτρησαν τις δυνάμεις μεταξύ ρευμάτων, μεταξύ κινούμενων ηλεκτρονίων, επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων, τις δυνάμεις Coulomb, ...και μετά ξεχάστηκαν.

³ Πιστεύω ότι από το έργο του Maxwell ξεκινάει αυτή «η ευρέως σήμερα αισθητή υπεροψία των μαθηματικών φυσικών που δίνουν προτεραιότητα στο φορμαλισμό έναντι των πειραματικών γεγονότων» που αναφέρει ο George Galeczki.

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

Κυριάρχησε τελικά η Βρετανική σχολή της φυσικής δίνοντας όπως θα δούμε έντονο και συντονισμένο ιδεολογικό αγώνα. Η κεντρική της φιλοσοφία ήταν το πεδίο Maxwell που υλοποιούσε το πρόγραμμα της ηλεκτρικής φιλοσοφίας του Φαρανταίη, στη γραμμή της δράσης εξ' επαφής μέσω ενός μέσου.

Όμως ο αναγνώστης πρέπει να κατανοήσει ότι οι ανακαλύψεις του πρώτου μισού του 19^{ου} αιώνα που ξεκίνησαν στη Γαλλία και διαδόθηκαν στη Γερμανία με κέντρο το Gauss και τους φοιτητές του στο Γκαίτιγκεν, δεν ήταν κάποιο δευτερεύον ρεύμα στη φυσική. Παρέμειναν για σχεδόν ολόκληρο το 19^ο αιώνα η κεντρική γραμμή σκέψης.⁴ Το πώς θα εξελίσσονταν η σύγχρονη φυσική, και όχι μόνο η φυσική του ηλεκτρισμού, αν δεν επικρατούσε η Βρετανική σχολή, έχει μεγάλο ιστορικό και επιστημονικό ενδιαφέρον.

Η ηλεκτρική θεωρία αυτής της περιόδου δεν ανήκει στο θέμα αυτού του βιβλίου. Εμείς θα αρχίσουμε την εξιστόρησή μας από τη φιλοσοφία του μεγάλου Βρετανού πειραματιστή του Michael Faraday

Η έννοια του πεδίου πριν το Maxwell

Η ηλεκτροστατική ξεκινάει από την ηλεκτρική δύναμη του Coulomb, οποίος στα 1785, με τη βοήθεια του ζυγού στρέψεως που επινόησε ο ίδιος⁵, επαλήθευσε το νόμο του Priesley ότι:

⁴² Σήμερα, η ακαδημαϊκά αποδεκτή φυσική βασίζεται σε μια απομάκρυνση από τη γραμμή αυτή, κι αυτό όχι για άλλους λόγους, αλλά γιατί κινήθηκαν πολιτικές μηχανορραφίες. Κάθε άλλος λόγος που προβάλλεται δεν είναι παρά γραφειοκρατικά τεχνάσματα με τα οποία οι υποστηρικτές του υπολογίζουν στην καριέρα τους...” .Laurence Hecht, 21^o century science and Technology Magazine.

⁵ Ο Coulomb έκανε τα πειράματά του ανάμεσα στα 1785 και 1787. Η δύναμή του όπως του Νεύτωνα, εξαρτάται από το αντίστροφο τετράγωνο της απόστασης, μόνο που εκείνη είναι πάντοτε ελκτική. Ακόμα τα μεγέθη των δύο δυνάμεων διαφέρουν κατά πολύ, προκύπτει ότι ο λόγος της ηλεκτρικής προς τη βαρυτική δύναμη είναι $4,17 \cdot 10^{42}$, ένας τεράστιος αριθμός. Και όμως σε αστρονομική κλίμακα διαστάσεων η βαρύτητα είναι η κυρίαρχη δύναμη γιατί η ηλεκτρική δύναμη ‘κρύβεται’ μέσα στα ουδέτερα άτομα, είναι ο κβαντικός ηλεκτρισμός. Η κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία που περιγράφουν οι εξισώσεις Maxwell περιγράφει φαινόμενα στα οποία, κάποια βία ασκείται στην ύλη, με αποτέλεσμα να διαρραγεί το ζευγάρι των θετικών και αρνητικών φορτίων της ατομικής κλίμακας έτσι ώστε οι ηλεκτρικές δυνάμεις να εκδηλώνονται σε μακροσκοπική κλίμακα.

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

η απωστική δύναμη μεταξύ δύο μικρών σφαιρών φορτισμένων με το ίδιο είδος ηλεκτρισμού, είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της αποστάσεως των κέντρων τους.

....όποια κι αν είναι η αιτία του ηλεκτρισμού, μπορούμε να εξηγήσουμε όλα τα φαινόμενα πάνω στην υπόθεση ότι υπάρχουν δύο ηλεκτρικά ρευστά που τα τμήματα του ίδιου ρευστού απωθούνται και έλκονται με τα τμήματα του άλλου ρευστού.....Coulomb

Η δύναμη Coulomb λοιπόν αναφέρεται μεταξύ των τμημάτων των ρευστών, δηλαδή μεταξύ των μορίων των ηλεκτρικών ρευστών, που ονομάζονται φορτία, και είναι η γνωστή από το Γυμνάσιο

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \dots\dots\dots(1)^6$$

Ο τύπος της δύναμης αυτής που έμοιαζε με τον τύπο του Νεύτωνα για τη βαρύτητα, έδωσε στον ηλεκτρισμό ένα παλιό μαθηματικό υπόβαθρο για να λύνει τα πρακτικά προβλήματα.

. Οι δύο κεντρικές μαθηματικές έννοιες της ηλεκτροστατικής είναι **το πεδίο και το δυναμικό**. Αυτές μας βοηθούσαν να λύνουμε πρακτικά προβλήματα υπολογισμού της ηλεκτρικής δύναμης στα σώματα, και... μέχρι εκεί.

Σε κάθε σημείο γύρω από ένα φορτίο **ορίζουμε** ⁷ ένα διάνυσμα E (δύναμη που ασκείται σε κάθε σημείο του ρευστού γύρω από τα φορτία).

Έτσι η δύναμη που ασκείται μεταξύ των φορτίων q_1 και q_2 είναι $F = Eq_2$ όπου E είναι το πεδίο του q_1 και F η δύναμη Coulomb. Όμως προσοχή, τη δύναμη την μετρούμε και το πεδίο το ορίζουμε.

Στη συνέχεια, η μαθηματική απόρροια του ηλεκτροστατικού πεδίου, είναι η συνάρτηση του **δυναμικού** που συνδέεται με την ένταση από τον καιρό του Λαγκράνζ με τη σχέση $E = -\nabla U \dots\dots\dots(2)$ μέσω του οποίου υπολογίζουμε το ηλεκτροστατικό πεδίο με πολύ απλούστερα βήματα από το υπολογισμό του E . Το μέγεθος αυτό είναι αριθμητικό και η φυσική του 'ερμηνεία' του είναι ότι κάθε ηλεκτρικό ή άλλο συντηρητικό σύστημα θεωρείται ότι συνοδεύεται από μια νοητή αποθήκη ενέργειας που είναι το δυναμικό, από την οποία αντλείται π.χ η δράση που μετακινεί τα φορτία, μέσω της (2). Όταν το σύστημα παράγει έργο, το αντλεί από την αποθήκη του δυναμικού άρα η

⁶ Μια παρόμοια σχέση επιβεβαίωσε ο Coulomb και για τη μαγνητική δύναμη επιβεβαιώνοντας τις περιγραφές του John Mitchel (1724-1793) όπου πάλι εμφανίζεται το μαγνητικό ρευστό και τα μόριά του.

⁷ Μιλούμε πάντα για ορισμό, αφού είμαστε στην περιοχή των μαθηματικών.

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36
δυναμική ενέργεια ελαττώνεται σε όσο ποσό ενέργειας έχει παραχθεί. Το αντίθετο συμβαίνει όταν δίνουμε στο σύστημα ενέργεια απέξω.

Το πεδίο λοιπόν πριν το Maxwell είναι μια απλή μαθηματική παράσταση, όπως ακριβώς ήταν και το Νευτώνιο πεδίο βαρύτητας. Δεν έχει υπόσταση ανεξάρτητη από την πηγή του, δεν έχει υλικό χαρακτήρα και δεν συνδέει εξελικτικά τα γεγονότα μέσα στο χώρο και στο χρόνο.

Αυτή η μαθηματική θεώρηση του πεδίου δεν θα παραμένει ίδια σήμερα που το πεδίο έχει καταστεί η πραγματικότητα του φυσικού κόσμου. Στον πεδιακό ηλεκτρομαγνητισμό, θεωρία που οικοδομήθηκε από τους Faraday και Maxwell, τα πεδία είναι βασικές φυσικές οντότητες και μπορούν να εξεταστούν χωρίς αναφορά σε υλικά σώματα. Σήμερα οι μαθηματικές εκφράσεις του Poisson και του Gauss (το δυναμικό και το πεδίο) έγιναν πραγματικότητες χωρίς να αλλάξει τίποτα στους τύπους. Τα παλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία μπορούν να μετακινούνται στο χώρο με τη μορφή ραδιοκυμάτων, φωτοκυματοραδιοκυμάτων, φωτοκυμάτων και άλλων ειδών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Το πεδίο είναι η κεντρική έννοια της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και συγχρόνως ο μεγαλύτερος γρίφος της.

Ο Νεύτων που πρώτος αντιμετώπισε το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης των σωμάτων από απόσταση, έγραφε

...είναι ασύλληπτο το πώς η άψυχη και άμορφη ύλη επενεργεί και επηρεάζει, χωρίς τη μεσολάβηση ενός παράγοντα που δεν είναι υλικός, άλλη ύλη.

Το ασύλληπτο για το Νεύτωνα που είναι η δράση από απόσταση, πήγε να καλύψει η έννοια του πεδίου, που πρώτα εμφανίστηκε ως υλικός αιθέρας και στη συνέχεια έγινε αυτό το ασύλληπτο που αναφέρει ο Νεύτων. Ο Bridgman προτείνει μια φιλοσοφική ερμηνεία του πεδίου για αυτό το ασύλληπτο, που στη συνέχεια θα την κρίνει εκτελεστικά.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της έννοιας του πεδίου διαπιστώνεται να είναι ότι μας απαλλάσσει απ' το να δεχτούμε αυτό το διανοητικό τερατούργημα της δράσης από απόσταση. Είναι περισσότερο αποδεκτό απ' τη λογική

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

σκέψη να συλλάβει για παράδειγμα τη βαρυτική δύναμη απ' τον ήλιο στη γη ότι διαδίδεται στον ενδιάμεσο χώρο επιδίδοντας κάποιο είδος επίδρασης από ένα σημείο στο άμεσο περιβάλλον του , απ' το να σκεφτούμε τη δράση να διασχίζει την ενδιάμεση απόσταση και να βρίσκει το στόχο της με ένα είδος τελεολογικής διαίσθησης...P.Bridgman

Η πραγματικότητα του πεδίου εγκαθιστά στη θεωρητική φυσική τις θεωρίες του μέσου , πάντα σε αντιπαράθεση με τις 'παλιές θεωρίες' της δράσεως από απόσταση, ερμηνεύοντας με κάποιο μηχανισμό τη διάδοση των ηλεκτρικών δράσεων .

Δώστε μου κίνηση και ύλη και θα κατασκευάσω το σύμπαν (Καρτέσιος)

Ο Καρτέσιος με την πρότασή του αυτή σαν γενική αρχή της φιλοσοφίας του, απέρριψε τη γνωστή σήμερα δράση από απόσταση , και θεώρησε ότι οι μόνες κατανοητές δράσεις μεταξύ των σωμάτων ήταν οι δράσεις εξ' επαφής, που μάλιστα διαδίδονται με δύο τρόπους 'με πίεση ή με κρούση' Οι δράσεις από απόσταση έμοιαζαν απόκρυφες στο σχέδιο του Καρτέσιου αλλά και αργότερα στα μάτια του Leibnitz και Huygens. Η ανθρωπότητα , μετά την έξοδο από το Μεσαίωνα , απέρριπτε κάθε τι το ανεξήγητο με μηχανικούς όρους.

Η έννοια του πεδίου Faraday

Η έννοια του πεδίου λοιπόν στη Φυσική χρησιμοποιείται για να εξηγηθεί η δράση των δυνάμεων από απόσταση. Πως γίνεται να ενεργούν δυνάμεις μεταξύ σωμάτων τα οποία δεν βρίσκονται σε επαφή; Ο Faraday ο μεγάλος πειραματιστής φιλόσοφος , ήταν ο πρώτος που συνέλαβε την έννοια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Σ' αυτό διέκρινε μια πραγματικότητα άλλης κατηγορίας απ' αυτήν της ύλης,(ηλεκτροτονική κατάσταση) ήταν κάτι πραγματικό που έπαιρνε μέρος στα ηλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα. Ήταν ικανό να μεταφέρει επιδράσεις από μέρος σε μέρος χωρίς όμως να αντιμετωπίζεται σαν μια μαθηματική κατασκευή όπως το πεδίο βαρύτητας της εποχής του. Κατά τη γνώμη του τα φαινόμενα του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού θα έπρεπε να προσεγγιστούν δια μέσου του πεδίου μάλλον παρά δια μέσου των φορτισμένων σωμάτων και των ρευμάτων. Με άλλα λόγια , σύμφωνα με τον Faraday, όταν ένα ρεύμα διέρρεε από έναν αγωγό , η πιο σπουδαία άποψη του φαινομένου δεν ήταν το ηλεκτρικό ρεύμα ,αλλά τα πεδία των ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων που κατανέμονταν στο χώρο γύρω απ' την περιοχή του ρεύματος

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

Στα 1835 έγραφε για τα ενδιάμεσα σωματίδια που με την επαφή τους μεταφέρεται η ηλεκτρική δράση.

....Μου φαίνεται δυνατό και πιθανό ότι η μαγνητική δράση μπορεί να μεταβιβαστεί σε μια απόσταση, μέσω της δράσης των ενδιάμεσων σωματιδίων με έναν τρόπο που και οι δυνάμεις του στατικού ηλεκτρισμού μεταφέρονται σε απόσταση. Τα παρεμβαλλόμενα σωματίδια, υποθέτουμε προς το παρόν ότι βρίσκονται σε μια ειδική κατάσταση την οποία έχω πολλές φορές εκφράσει (χωρίς μεγάλη επιτυχία) με τον όρο ηλεκτροτονική κατάσταση.

Με τη φράση αυτή ξεκινούν οι ηλεκτρικές θεωρίες του μέσου και τα παρεμβαλλόμενα σωματίδια με την ειδική κατάσταση είναι το προανάκρουσμα της σύνδεσης της Οπτικής με τον ηλεκτρισμό, αφού η έδρα των ηλεκτρικών φαινομένων θα ακουμπήσει σε κάποιον αιθέρα που τελικά θα ταυτιστεί με το φωτοβόλο αιθέρα της Οπτικής. Η άποψη αυτή του Faraday έγινε πεποίθηση για πολλές γενιές φυσικών αφού τα μηχανικά μοντέλα κυριαρχούσαν.⁸ Ο άνθρωπος που επεξεργάστηκα και τελειοποίησε με μαθηματικό σχεδιασμό τις απόψεις του Faraday, ο Maxwell έγραφε

...Δεν μπορούμε να συλλάβουμε μια διάδοση στο χρόνο παρά μόνο σαν μια μετακίνηση μιας υλικής ουσίας στο χώρο, ή σαν μια διάδοση των συνθηκών της κίνησης σε ένα μέσο που ήδη υπάρχει στο χώρο...Στην πραγματικότητα όταν μια ενέργεια εκπέμπεται από ένα σώμα σε ένα άλλο πρέπει να υπάρχει ένα μέσο ή μια ουσία στην οποία η ενέργεια να αποθηκεύεται κατά το χρόνο που αφήνει το ένα σώμα και πριν συναντήσει το άλλο.. Αν δεχτούμε το μέσο αυτό σαν υπόθεση θα πρέπει να το μελετήσουμε σταθερά και να αποκαλύψουμε όλες τις λεπτομέρειες της δράσης του...

Υπάρχει λοιπόν μια πραγματικότητα γύρω από τα φορτία και τα ρεύματα στο έργο των Maxwell και Faraday

.....Στις θεωρίες της δράσης εξ επαφής η ένταση του πεδίου είναι μια πραγματικότητα η οποία υπάρχει ακόμα κι αν τα αντιδρώντα φορτία απομακρυνθούν.....[P. Hertz](#)

Ακόμα

⁸ Η μηχανιστική θεώρηση, που βρίσκεται κάτω από την αρχική έννοια του πεδίου έχει ξεχαστεί. Σήμερα που «ο κόσμος είναι μια μεγάλη σκέψη παρά μια μεγάλη μηχανή» όπου το αὔλο και το μαθηματικό κυριαρχούν το πεδίο κατέληξε η «μεγάλη σκέψη»

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

....Η θεωρία του Maxwell συνεχίζει να αποδίδει στο δάνυσμα \mathbf{E} μια αυθύπαρκτη πραγματικότητα ανεξάρτητη από την παρουσία του δοκιμαστικού (δεύτερου) φορτίου.....

Abraham-Becker

Πως εκδηλώνεται αυτή η πραγματικότητα για το Faraday;

Με τις **δυναμικές γραμμές** τις οποίες φαντάστηκε να γεμίζουν όλο το χώρο.

Οι φυσικοί είχαν συνηθίσει να απεικονίζουν τις μαγνητικές δυνάμεις σκορπίζοντας ρινίσματα σιδήρου σε ένα χαρτί και παρατηρώντας τις γραμμές που σχηματίζονται κατά την επίδραση ενός μαγνήτη κάτω απ' το χαρτί.. Οι γραμμές αυτές υπέβαλλαν στο Faraday την ιδέα των **μαγνητικών δυναμικών γραμμών** με τις οποίες , ισχυρίστηκε, μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες όχι μόνο για τη διεύθυνση της μαγνητικής δύναμης αλλά και για το μέγεθός της. Η ένταση του πεδίου , χαρακτηρίζονταν από την πυκνότητα των δυναμικών γραμμών ανά μονάδα επιφανείας , κάθετης στη διεύθυνσή τους.

.....Δεν μπορώ να συγκρατηθώ ,έγραφε στα 1851 απ' το να εκφράσω και πάλι την πεποίθησή μου για την πληρότητα της απεικόνισης που παρέχει η εικόνα των δυναμικών γραμμών στη μελέτη της μαγνητικής δράσης.....

Αργότερα στη μελέτη των διηλεκτρικών μέσων μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο εισήγαγε και τις **ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές** , όπου η ελάττωση ή η αύξηση της πυκνότητας των δυναμικών γραμμών περιέγραφε τη συμπεριφορά των διηλεκτρικών

Οι δυναμικές γραμμές για το Faraday ήταν οι δρόμοι μεταφοράς της δράσης του παρεμβαίνοντος μέσου στα ηλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα , την οποία δράση όμως μετέφεραν οι ίδιες.

Πως λειτουργούσαν για παράδειγμα οι δυναμικές γραμμές στο νόμο του Coulomb ;

Κατά την άποψη του Faraday , το μέσο που παρεμβαίνει ανάμεσα στις ηλεκτρισμένες σφαίρες –ότι κι αν είναι αυτό– εκδηλώνει έλξεις και τάσεις οι οποίες απεικονίζονται σε «μάζεμα» ή «άπλωμα» των δυναμικών γραμμών καθώς και σε αμοιβαίες απωθήσεις τους και σε πλευρικές πιέσεις τους (πύκνωση ή αραίωση) . Έτσι όταν καταλήγουν στην άλλη σφαίρα, οι παραμορφώσεις τους αυτές μεταδίδονται σ' αυτήν και τη μετακινούν. Όταν το πεδίο είναι πιο ισχυρό οι δυναμικές γραμμές είναι περισσότερες και το φαινόμενο πιο έντονο. Οι δυναμικές γραμμές ασκούν μηχανικές δράσεις! Η ιδέα αυτής της διάδοσης της δράσης από σημείο σε σημείο δια ενός μέσου με την επίδραση γειτονικών και συνεχόμενων σωματιδίων , ήταν εφαρμόσιμη σε κάθε περιοχή της φυσικής για το Faraday

...Υπάρχουν έγραψε,(ο Faraday) οι δυναμικές γραμμές της βαρύτητας της ηλεκτροστατικής δράσης και της

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

μαγνητικής δράσης. Σε οποιοδήποτε τμήμα του χώρου , κενού ή γεμάτου με ύλη , δεν βλέπω παρά μόνο δυνάμεις και τις γραμμές πάνω στις οποίες ασκούνται.... ακόμα η ιδέα των δυναμικών γραμμών ήταν συμβιβαστή με τη θεωρία της εκπομπής του φωτός αλλά και με την κυματική άποψη ...το φως ήταν δονήσεις των δυναμικών γραμμών ⁹....

Έτσι οι δυναμικές γραμμές μετατρέπονται σε μια ανεξάρτητη πραγματικότητα , είναι τα «νεύρα» του μέσου που κινούσαν τα φορτισμένα και μαγνητισμένα σώματα.

....Αντί για μια απαραβίαστη δράση από απόσταση μεταξύ δύο ηλεκτρισμένων σωμάτων , ο Faraday θεώρησε ολόκληρο το χώρο ανάμεσα στα σώματα γεμάτο από τεντωμένες και αμοιβαία απωθούμενες θηλιές.....Η έννοια των δυναμικών γραμμών είναι κατά τη γνώμη μου μια απ' τις μεγαλύτερες υπηρεσίες του Faraday στην επιστήμη...[J.J Thomson¹⁰](#)

.....Η άποψη την οποία εδραίωσαν οι απόψεις του Faraday αποδίδει μια πραγματική ύπαρξη στις δυναμικές γραμμές με την έννοια ότι αυτές υπάρχουν σαν ανεξάρτητη οντότητα.... [Grimsehl-Tomaschek](#)

....Σαν αποτέλεσμα των ερευνών των Faraday και Maxwell θεωρούμε ότι οι ιδιότητες των φορτισμένων σωμάτων οφείλονται στις δυναμικές γραμμές οι οποίες σκορπίζονται απ' τα σώματα στο περιβάλλον μέσο... [E.W.Barnes](#)

Είναι εύλογο να φανταστεί κανείς (για να καταλάβουμε το Faraday) ότι αυτοί οι 'ενεργειακοί δρόμοι' που εμφανίζονται με την παρουσία των ρινισμάτων του σιδήρου δεν εγκαταστάθηκαν εκεί μαζί με τα ρινίσματα , αλλά υπήρχαν σαν τοπίο γύρω απ' το μαγνήτη , και τώρα απλώς εμφανίζονται γιατί παρασύρουν τα ρινίσματα στην τοπογραφία τους. Η εικόνα αυτή , διαισθητικά ακουμπάει καλύτερα στη φαντασία του ανθρώπου παρά η

⁹ Η γλώσσα του Faraday είναι περιγραφική, δεν ήταν μαθηματικός. Ο Faraday ήταν ο συνεχιστής των Aepinus και Priestley.

¹⁰ Σήμερα η άποψη αυτή φαίνεται υπερβολική που γίνεται μάλλον για τον εγκωμιασμό της φιλοσοφίας του πεδίου παρά για το Faraday . Οι μεγαλύτερες υπηρεσίες του Faraday στην επιστήμη είναι το απέραντο πειραματικό του έργο με το οποίο γνωρίσαμε τα ηλεκτρικά φαινόμενα, κι όχι τις ερμηνείες τους

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36
αντίληψη ότι γύρω απ' το μαγνήτη δεν υπάρχει τίποτα και ότι όλο το φαινόμενο εμφανίζεται με την τοποθέτηση των ριζισμάτων. Αυτή είναι η αιτία που οι θεωρίες του μέσου πέρασαν τελικά στη συνείδηση των φυσικών..

Σήμερα γνωρίζουμε ότι οι δυναμικές γραμμές δεν είναι τόσο μια υπηρεσία στην επιστήμη όσο μια συνεισφορά στην εκπαιδευτική μέθοδο. Η φυσική υπόθεση στην οποία στηρίζονταν –το μέσο- έχει καταργηθεί. Η κατάσταση περιγράφεται στο παρακάτω απόσπασμα που μας επαναφέρει στον εκτελεστικό ορισμό των εννοιών στη φυσική.

....Κάθε ερμηνεία τέτοιου είδους , η οποία αποδίδει μηχανικές ιδιότητες στις δυναμικές γραμμές είναι τελείως εσφαλμένη καθώς δεν υπάρχει απόδειξη για την ύπαρξή τους. Τη σημερινή εποχή, οι φυσικοί αποφεύγουν τελείως τέτοιες ερμηνείες. Έτσι η μηχανική ερμηνεία της αλληλεπίδρασης ηλεκτρισμένων σωμάτων γρήγορα πέφτει σε αχρηστία. Οπωσδήποτε ακόμα αναφέρεται στα διδακτικά βιβλία αλλά είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε το αυθαίρετο του πράγματος.....[J. Piley](#)

Ο Maxwell συνέχισε και περιέγραψε μαθηματικά ακριβώς τις ιδέες του Faraday των δυναμικών γραμμών, για το πεδίο που παρεμβαίνει στα ηλεκτρικά φαινόμενα. Οι δυναμικές γραμμές έγιναν πεδίο που εγκαταστάθηκε σαν μια αυθύπαρκτη (υλική στη γένεσή του) πραγματικότητα. Ο Faraday επιστήμονας καθαρά πειραματικός με ελάχιστες γνώσεις θεωρίας, δεν μπορούσε να αντιληφθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο με τον καθαρά μαθηματικό τρόπο . Γι' αυτό εισήγαγε τις δυναμικές γραμμές. Πίστευε όπως είδαμε στην υλική υπόσταση των δυναμικών γραμμών. Θεωρούσε ότι οι δυναμικές γραμμές υπάρχουν όπως υπάρχουν και τα φορτία. Ο Maxwell περιέγραψε το πεδίο με μαθηματικό τρόπο, πιστεύοντας όμως κι αυτός ότι είναι πραγματικό , όπως οι δυναμικές γραμμές για το Faraday.

....Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ο χώρος γύρω από τα ηλεκτρισμένα σώματα στον οποίο αναφέρονται τα ηλεκτρικά φαινόμενα...[Maxwell](#)

Όμως είναι κάτι περισσότερο από το χώρο, είναι κάτι μέσα στο χώρο.

.....Ο χώρος μέσα στον οποίο ο αιθέρας διαταράσσεται αισθητά και στον οποίο ασκούνται μετρήσιμες δυνάμεις ονομάζεται ηλεκτροστατικό πεδίο....[Drude](#)

...Ο χώρος μέσα στον οποίο εκδηλώνονται αυτές οι τάσεις του Faraday ονομάζεται το πεδίο...[Schaefer](#)

....Ονομάζεται ηλεκτρικό πεδίο ένας χώρος που διασχίζεται από δυναμικές γραμμές....[Bragg](#)

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

..Το E δεν είναι η πραγματική δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο όπου τοποθετείται το φορτίο e , αλλά μάλλον η πεδιακή δύναμη που θα υπήρχε σ' αυτό το σημείο, έστω κι αν το φορτίο e ήταν απόν...[Planck](#)

.....πρέπει να υποθέσουμε ότι το E υπάρχει σε όλα τα σημεία γύρω από το q έστω κι αν το δοκιμαστικό μας φορτίο δεν υπάρχει. Αλλά μπορούμε να αποδείξουμε την ύπαρξή του μόνο φέροντας το δοκιμαστικό φορτίο στη θέση A[White](#).

....Η ιδέα του Faraday για ένα πεδίο δυνάμεων –το πεδίο- έχει αλλάξει θεμελιωδώς την εικόνα μας για τον κόσμο...[B. Bavik](#)

. Η ουσία της παραπάνω πεδιακής θεώρησης στην αντίληψη του Faraday βρίσκεται στην παραδοχή του ότι όταν δεν υπάρχει δεύτερο φορτίο οι δυναμικές γραμμές υπάρχουν και κινούνται προς το άπειρο. Οι ιδιότητες των φορτισμένων σωμάτων οφείλονται στις δυναμικές γραμμές οι οποίες σκορπίζονται από τα σώματα στο περιβάλλον μέσο. Η ροή του Gauss στο πεδίο Coulomb είναι φανταστική, είναι ένα μαθηματικό τέχνασμα για την απλούστευση των αποτελεσμάτων. Όμως στο πεδίο Faraday γίνεται πραγματική, είναι ο υλικός (ηλεκτροτονικός) παράγων που ρέει και παράγει τα φαινόμενα. Πόσο πιστευτά είναι αυτά;

.....Οποιαδήποτε πρόταση γίνεται για το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή ενός φορτισμένου σώματος, δεν μπορεί, αν θέλουμε να ακριβολογούμε, να σημαίνει τίποτα περισσότερο παρά ότι αν ένα δεύτερο φορτισμένο σώμα τοποθετηθεί εκεί θα συμπεριφερθεί με έναν συγκεκριμένο τρόπο.. Η φυσική πραγματικότητα του μαγνητικού όσο και του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει αμφίβολη....[J. Piley](#)

Ακόμα πιο αποφασιστικά ο Leech μας επαναφέρει στην προ –Φαρανταίου εποχή

.....Οι πεδιακές μεταβλητές ϕ και E δεν υπόκεινται σε άμεση παρατήρηση αλλά οι τιμές τους μπορούν να εξαχθούν από παρατηρήσεις σε υλικά συστήματα. Η σαφής αντίληψη του γεγονότος αυτού θα μπορούσε να αποτρέψει ερωτηματικά για τη φύση αυτών των μεταβλητών. Η πραγματικότητά τους θα πρέπει να αποδίδεται ως εξής: πρέπει να θεωρούνται σαν μαθηματικές οντότητες των οποίων η σημασία έγκειται στη δυνατότητα να τις χρησιμοποιούμε για την περιγραφή και την πρόβλεψη

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

παρατηρήσιμων μεταβολών στη συμπεριφορά αποκλειστικά υλικών συστημάτων.....Leech

Αυτό ακριβώς συνέβη στη Νευτώνεια φυσική, όπου το πεδίο της βαρύτητας δεν απαίτησε την υλική παρουσία κάποιου μέσου. Τα ερωτηματικά για τη φύση αυτών των μεταβλητών που αναφέρει ο Leech παράγουν το διχασμό της φυσικής θεωρίας στα φαινόμενα του ηλεκτρισμού, όπου η άποψη που κυριάρχησε είναι ότι τα μαγνητοστατικά και ηλεκτροδυναμικά φαινόμενα μπορούν να μεταφερθούν σε μια απόσταση μέσω της διάδοσης μοριακών κινήσεων και δυνάμεων σε ένα ελαστικό μέσο που πληρεί όλο το χώρο.....

Στην επικράτηση των θεωριών του ηλεκτρικού μέσου που ξεκίνησε με τις διαισθητικές ερμηνείες του Faraday βασικοί πρωταγωνιστές εκτός απ τον ίδιο , ήταν ολόκληρη τη «σχολή του Κάιμπριτζ» (οι Tait, W.Thomson, Heavyside, κ.α και ο ίδιος ο Maxwell) που ιδρύθηκε πνευματικά με τα έργα των Green, Stokes και W. Thomson στην οποία κυρίαρχη πεποίθηση ήταν ότι κάθε φυσική δράση θεμελιώνεται στη δυναμική¹¹.

Την εποχή που αναφέρει ο Thomson, άρχισε να ερευνάει τις αναλογίες των ηλεκτρικών φαινομένων με την ελαστικότητα. Με τις έρευνες αυτές παρουσίαζε μια εικόνα της διάδοσης της ηλεκτρικής και μαγνητικής δράσης. Έκανε την υπόδειξη ότι αυτές διαδίδονται όμοια με τη διάδοση της ελαστικής μετατόπισης σε ένα ελαστικό στερεό. Όμως δεν μπόρεσε να προχωρήσει τις υποδείξεις του αυτές , ούτε να συνδέσει τις ιδέες του Faraday με τις μαθηματικές αναλογίες που είχε επινοήσει. Ήταν ο Maxwell αυτός που έδειξε πως η «ηλεκτροτονική κατάσταση» του Faraday μπορεί να παρασταθεί με μαθηματικά σύμβολα δανειζόμενος ιδέες απ' τις έρευνες του Thomson.

Έτσι προς το τέλος της ζωής του στα 1896 μετά τις αποτυχίες σύνδεσης του ηλεκτρομαγνητισμού με μηχανικά μοντέλα έγραφε (ο Thomson)

...μια μόνο λέξη χαρακτηρίζει τις δραστήριες προσπάθειές μου για την επιστημονική έρευνα τα τελευταία πενήντα χρόνια. Δεν ξέρω τίποτα περισσότερο για την ηλεκτρική και τη μαγνητική δύναμη , για τη σχέση του αιθέρα του ηλεκτρισμού και της ύλης απ' ότι ήξερα και δίδασκα στους φοιτητές μου πριν πενήντα χρόνια.....

¹¹ ...Ποτέ δεν ικανοποιούμαι αν δεν μπορέσω να κατασκευάσω ένα μηχανικό μοντέλο κάποιου πράγματος. Τότε μόνο μπορώ να το κατανοήσω. Κι αυτός είναι ο λόγος που δεν μπόρεσα να συλλάβω την ηλεκτρομαγνητική θεωρία.....Δεν είχα ούτε στιγμή γαλήνης ή ευτυχίας σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία απ' το Νοέμβριο του 1846...W. Thomson

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

Τη σκυτάλη της «σχολής του Καίμπριτζ» παρέλαβε ο Maxwell του οποίου η ηλεκτρική φιλοσοφία παρουσιάστηκε το Δεκέμβριο του 1864 στη παρουσίαση του βιβλίου του 'Μια δυναμική θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου'. Είπε τότε

....Συμβαίνει λοιπόν μια πλειάδα φαινομένων στον ηλεκτρισμό και στο μαγνητισμό να οδηγούν στο ίδιο συμπέρασμα με αυτό της Οπτικής, ότι δηλαδή υπάρχει ένα αιθερικό μέσο που εμποτίζει όλα τα σώματα και διαφοροποιείται μόνο απ' την παρουσία τους. Ότι τα τμήματα αυτού του μέσου μπορούν να τεθούν σε κίνηση από τα ηλεκτρικά ρεύματα και τους μαγνήτες, ότι αυτή η κίνηση μπορεί να μεταδοθεί από ένα τμήμα του μέσου στο άλλο μέσω δυνάμεων που παράγονται απ' τις συνδέσεις των μέσων αυτών, ότι από την επίδραση των δυνάμεων αυτών δημιουργούνται παραμορφώσεις που εξαρτώνται απ' την ελαστικότητα αυτών των συνδέσεων και ότι τελικά σαν συνέπεια όλων αυτών υπάρχει η δυνατότητα να εμφανιστεί η ενέργεια στο μέσο αυτό υπό δύο μορφές, μία ως κινητική ενέργεια των τμημάτων του και η άλλη σαν δυναμική ενέργεια των συνδέσεών του σαν απόρροια της ελαστικότητάς τους.

Έτσι στη συνέχεια θα δούμε πως οδηγούμαστε στην παραδοχή ενός πολύπλοκου μηχανισμού ικανού για ένα πλήθος κινήσεων, αλλά συγχρόνως διαθέτοντας τέτοιες συνδέσεις ώστε η κίνηση του ενός τμήματος να εξαρτάται σύμφωνα με συγκεκριμένες σχέσεις με την κίνηση άλλων τμημάτων, οι οποίες κινήσεις συνδέονται με δυνάμεις που γεννιούνται απ' τη μετακίνηση των συνδεόμενων τμημάτων, χάρις στην ελαστικότητά τους. Ένας τέτοιος μηχανισμός πρέπει να είναι το αντικείμενο των γενικών νόμων της Δυναμικής.

Κεφάλαιο τρίτο

Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ MAXWELL ¹²

Η θεωρία του Maxwell, που υπήρξε μια επαναστατική πρόοδος για τον ηλεκτρομαγνητισμό ανάμεσα στα 1864 και 1873, μπορεί να διαβαστεί σε δύο συνέχειες.

¹² Ο Maxwell ήταν γιος γαιοκτήμονα που πήρε την πρώτη του μόρφωση στο Εδιμβούργο, κατόπιν στο Καίμπριτζ, όπου για πρώτη φορά ανακοίνωσε τις σκέψεις του να δημιουργήσει ένα μηχανικό μοντέλο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

1. σαν μια μαθηματική εξέλιξη των γνωστών νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού ως τότε, μέσω της διανυσματικής ανάλυσης, η οποία είχε εν τω μεταξύ εξελιχτεί από τη σχολή του Καίμπριτζ¹³

2. σαν μια επιχείρηση ερμηνείας των μαθηματικών συμβόλων των πεδίων που προέκυψαν, μέσω εικόνων από τη μηχανική των ρευστών αφού, τα μαθηματικά σύμβολα της διανυσματικής ανάλυσης ήταν άμεσα ερμηνεύσιμα στη μηχανική των ρευστών.

Το μαθηματικό μέρος

Στο μέρος αυτό θα παρουσιάσω τη μαθηματική εξέλιξη της θεωρίας του Maxwell που είναι απαραίτητο για να κατανοηθεί η γέννηση και η απόδοση φυσικών χαρακτηριστικών σε μαθηματικές διαδικασίες, μέχρι το σημείο να θεωρούνται ως φυσική πραγματικότητα.

Η περιληπτική τους έκφραση είναι ότι οι κλασσικοί νόμοι του Coulomb, Ampere Faraday, άλλαξαν μαθηματική μορφή μέσω θεωρημάτων της Ανάλυσης (Stokes) και με τη νέα μαθηματική μορφή φαίνεται να περιγράφουν ένα ασυμπύεστο ρευστό που ρέει ανάμεσα στα σώματα. Επί πλέον το ρευστό αυτό αποδεικνύεται μαθηματικά ότι διαδίδεται με τη μορφή κυμάτων στον κενό χώρο, πράγμα που πιστοποιείται πειραματικά από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του Hertz οπότε όλα τα μαθηματικά άλματα δικαιώνονται. Βασικές δυσκολίες της θεωρίας παραβλέπονται ή «εξηγούνται» μυθολογικά. Συγχρόνως ο Feynman μας παροτρύνει να ξεχάσουμε την κυματική φύση για το φως που μάθαμε στο Γυμνάσιο, δεν υπάρχει κανένα κύμα φωτός αλλά ένα πλήθος σωματιδίων, τα φωτόνια.

Το **πρώτο μαθηματικό (ευφυές) άλμα**¹⁴ του Maxwell ήταν η κατανόηση ότι οι πειραματικοί νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού, οι οποίοι ήταν εκφρασμένοι σε ολοκληρωτική μορφή, θα μπορούσαν να γραφούν σαν ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων. Έτσι οι νόμοι αυτοί τώρα αναφέρονταν σε ένα τρισδιάστο συνεχές που ήταν ο αιώρας, ή αργότερα ο κενός χώρος.

Οι κλασσικές εξισώσεις ήταν οι

¹³ Αυτή θεμελιώθηκε στο μαθηματικό έργο των Green, Stokes, W.Thomson κ.α με σπουδαία αποτελέσματα στις δυναμότητες της διανυσματικής ανάλυσης, και με κυρίαρχη φιλοσοφία ότι κάθε φυσική δράση θα έπρεπε να θεμελιώνεται στη δυναμική. Η αξία ενός δυναμικού μοντέλου βρίσκεται στο ότι θα έχει τελικά άλλες ιδιότητες από αυτές που συνέβαλλαν στην κατασκευή του. Και το ερώτημα είναι αν οι ιδιότητες αυτές βρίσκονται στη φύση.

¹⁴ Δανειζομαι τον όρο από τον Heaviside ο οποίος μίλησε για το «ευφυές άλμα» του Maxwell να θεμελιώσει το ρεύμα μετατοπίσεως.

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \iint \vec{B} d\vec{S} \dots\dots (Faraday) \dots\dots (A.1)$$

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu \iint \vec{j} d\vec{S} \dots\dots (Ampere) \dots\dots (A.2)$$

$$\iint \vec{E} d\vec{S} = q / \epsilon \dots\dots (Gauss) \dots\dots (A.3)..$$

$$\iint \vec{B} d\vec{S} = 0 \dots\dots (A.4)$$

και μετασχηματίστηκαν στις

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots\dots (B.1.) \quad \nabla \times \vec{B} = \mu \vec{j} \dots\dots (B.2.)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon \dots\dots (B.3.) \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \dots\dots (B.4.)$$

Για την κατανόηση του άλματος αυτού του Maxwell, παρατηρούμε ότι ο δρόμος ολοκληρώσεως c , του πρώτου μέλους της (A.1) παριστάνει κλειστό αγωγό που περικλείει την τυχούσα επιφάνεια S ολοκληρώσεως (διάφραγμα) του β μέλους μέσω της οποία υπολογίζεται η μαγνητική ροή (Faraday). Ο κλειστός αυτός αγωγός μπορεί και να μετακινείται μέσα σε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, γι' αυτό και η παράγωγος ως προς το χρόνο είναι ολική. Το πρώτο μέλος μετατρέπεται μέσω του θεωρήματος Stokes σε $\iint \text{rot} E dS$, όπου S η επιφάνεια του β μέλους.

Όμως η ολική παράγωγος δεν μπορεί να εισαχθεί στις εξισώσεις Maxwell αφού τώρα το θεώρημα Stokes είναι θεώρημα της γεωμετρίας άρα η επιφάνεια και ο περιβάλλον αγωγός βρίσκονται σε ηρεμία, είναι ακίνητα στο χώρο. Άρα η ολική παράγωγος της A1 γίνεται μερική παράγωγος στη B1 αφού η γνωστή σχέση της

διανυσματικής ανάλυσης $\frac{dr}{dt} = \frac{\partial r}{\partial t} + w \cdot \nabla r$ για $w=0$ δίνει την ισότητα της μερικής με την ολική παράγωγο.¹⁵

Έτσι η (A.1) γράφεται

$$\iint \nabla \times E dS = - \iint \frac{\partial B}{\partial t} dS$$

για κάθε επιφάνεια S . Δηλαδή έχουμε τη μορφή B1 να ισχύει σε κάθε σημείο του χώρου. Με την ίδια διαδικασία (Stokes) η A.2 γίνεται η B.2

15 $H \cdot E / \bullet t$ αναφέρεται στη μεταβολή της E ως προς το χρόνο σε κάποιο σημείο ενός συνεχούς μέσου (μερική παράγωγος). Αν το σημείο αυτό γίνει υλικό σωματίδιο, με κίνηση και ιστορία, η μερική παράγωγος δεν αποδίδει τη διαδικασία μεταβολής. Απαιτείται η ολική παράγωγος. Όμως η ολική παράγωγος δεν μπορεί να εισαχθεί στις εξισώσεις Maxwell, λόγω μαθηματικών περιορισμών απ' τα θεώρηματα Stokes και Green.

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

Στην Α.3 π.χ έχουμε ότι η ροή του πεδίου Gauss δια μέσου μιας κλειστής επιφάνειας είναι ανάλογη του φορτίου που περιέχεται στον όγκο που περικλείει η επιφάνεια αυτή. Αν υποθέσουμε ότι μέσα σε έναν όγκο V δεν έχουμε διακεκριμένα σημειακά φορτία, αλλά μια συνεχή κατανομή φορτίων ρ και συνδυάζοντας το θεώρημα Green με το θεώρημα Gauss έχουμε

$$\iiint \nabla \cdot E dV = \iint E dS = q / \epsilon = \iiint \rho / \epsilon dV \text{ αντιπαράθεσης}^{16}$$

Η σχέση αυτή ισχύει για οποιοδήποτε όγκο. Αυτό σημαίνει ότι οι ποσότητες που ολοκληρώνονται είναι ίσες σε κάθε σημείο του χώρου, δηλαδή ισχύει η B3

Έχουμε λοιπόν την καινοτομία ότι $q = \iiint \rho dV$ δηλαδή το σημειακό φορτίο γίνεται μια κατανομή στον όγκο.

Η αλλαγή της μαθηματικής έκφρασης των νόμων της παλιάς θεωρίας έφερε και την αλλαγή της θεώρησης της φυσικής πραγματικότητας. Τα θεωρήματα (της απόκλισης και του Stokes) της διανυσματικής ανάλυσης, άλλαξαν τον κόσμο! Νέες φυσικές έννοιες γεννιούνται, όχι απ' το πείραμα ή την παρατήρηση, αλλά απ' τη μαθηματική ανάλυση. Όπως φαίνεται τα σημειακά φορτία γίνονται κατανομές στο χώρο, μόνο από τη μαθηματική συλλογιστική!.

Τι υπόθεση είναι αυτή;

Τώρα δεν μιλούμε πια για σημειακά φορτία e αλλά για μια πεπερασμένη πυκνότητα ρ στο χώρο ώστε το απειροστό φορτίο $\Delta e = \rho \Delta t$, περιέχεται σε ένα στοιχείο όγκου Δt , που τείνει στο μηδέν...

Ο ηλεκτρισμός τώρα γίνεται ουσία, ένα συνεχές (αργότερα και ασυμπύεστο) ρευστό που διεισδύει παντού.

Όσο για το ρεύμα, αυτό είναι η κίνηση του προηγούμενου όγκου

.....αν θεωρήσουμε έναν όγκο V που περιέχει φορτία του ίδιου προσήμου, που κινείται με ταχύτητα u στο Σ . Η ταχύτητα μετατρέπει την πυκνότητα του στατικού φορτίου σε κατανομή ρεύματος μεταφοράς, πυκνότητας $J = \rho u$ στο σύστημα Σ ...Ε.Παπαδημητράκη –Χλίχλια, Ηλεκτρομαγνητισμός

Συμβαίνει λοιπόν, (ας το καταλάβουμε καλά) μια αναθεώρηση των εννοιών του κλασσικού ηλεκτρομαγνητισμού εν όψει της νέας μαθηματικής μορφής των εξισώσεών του.

...το φορτίο στην ιστορική του προέλευση είναι μια έννοια βασισμένη στη δράση από απόσταση. Για να την

¹⁶ Η ιστορία της αντιπαράθεσης αυτής είναι χαρακτηριστικά αρνητική για την Αγγλική σχολή της θεωρητικής φυσικής..

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

προσαρμόσουμε στην έννοια της δράσης δια μέσου του πεδίου, είναι αναγκαίο να φανταστούμε μια διέγερση στο περιβάλλον μέσο, που προκαλείται απ' τα κέντρα των φορτίων η οποία διέγερση περιγράφεται απ' το διάνυσμα D ...Για ένα σημειακό φορτίο e φανταζόμαστε 'D γραμμές' που ξεκινούν απ' το e ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, με τέτοια πυκνότητα ώστε

$$\oint D_n d\sigma = e \quad \text{όπου } d\sigma \text{ είναι ένα στοιχείο επιφανείας που περικλείει το}$$

e[Sommerfield. Electrodynamics σελ. 18](#)

Ακόμα

...ομολογώ ότι θα ήμουν σε πραγματικά σε αδυναμία να εξηγήσω χωρίς τη χρήση των μαθηματικών συμβόλων τι θεωρεί (ο Maxwell) σαν ποσότητα ηλεκτρισμού, ή γιατί μια τέτοια ποσότητα είναι σταθερή σαν τις ποσότητες μιας ουσίας...[Helmholtz](#)

....στη θεωρία του Maxwell η 'ποσότητα του ηλεκτρισμού είναι μόνο η συντομογραφία αυτού του ολοκληρώματος ...δεν είναι μια φυσική ποσότητα ή τουλάχιστον δεν είναι κατ' ανάγκη...[Shafer](#)

Πόσο μπορεί μια μαθηματική εναλλακτική έκφραση, να αποτελέσει διαφορετική φυσική πραγματικότητα; Αυτό θα σήμαινε ότι η φυσική πραγματικότητα είναι νοητική πραγματικότητα, και ο κόσμος στο βάθος είναι Πλατωνικές μορφές: πραγματικό είναι αυτό που σκεφτόμαστε λογικά. Έτσι όμως επιστρέφουμε στη φυσική (μαθηματική) φιλοσοφία.

Η επιστροφή αυτή στη φιλοσοφία μέσα σε αυτόν τον κυκλώνα των μαθηματικών συμπερασμάτων αποδίδεται στα παρακάτω αποσπάσματα.

..Η φυσική πλευρά της επιστήμης συμφωνεί σε έναν μεγάλο βαθμό και σχεδόν ομόφωνα ότι ο χείμαρρος της γνώσης κατευθύνεται σήμερα προς μία μη μηχανική αλήθεια. Το σύμπαν αρχίζει να φαίνεται περισσότερο σαν μια μεγάλη σκέψη παρά σαν μια μεγάλη μηχανή.....[James Jeans](#)

...Κρυμμένο πίσω απ' την ύλη που αποκαλύπτεται άμεσα ότι υπάρχει απ' τις αισθήσεις μας, βρίσκεται το πεδίο¹⁷
Η ανακάλυψη των νόμων του πεδίου και των νόμων με τους οποίους αυτό καθορίζει την ύλη ξεκίνησε με τη θεωρία του

¹⁷ Ότι οι ουσίες και όσα υπάρχουν απολύτως προέρχονται από κάποιο υποκείμενο τούτο είναι φανερό εις τον εξετάζοντα. Διότι πάντα υπάρχει κάτι που στέκεται αποκάτω, από το οποίον γίνεται το γινόμενο, όπως τα φυτά και τα ζώα γίνονται απ' το σπέρμα. Φυσικά 190 β 1

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

Maxwell, και φαίνεται να έχει πολύ δρόμο. Όμως η ύπαρξη μιας ουσίας, έχει για πάντα εγκαταλειφθεί απ' τους καθορισμούς μας για την ύλη.....Weyl

....Το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένος ο κόσμος μας είναι νοητικό υλικό....Eddington

Αυτό είναι το πρώτο μαθηματικό άλμα του Maxwell, που στηριγμένο στα πορίσματα της διανυσματικής ανάλυσης, απομακρύνεται από πειραματικές περιγραφές και χειρισμούς. Πως η κλειστή καμπύλη και η επιφάνεια που την έχει ως όριο, έγιναν όγκος και στη συνέχεια σημείο; Ρευστοποιώντας τον ηλεκτρισμό και φανταζόμενοι διεγέρσεις (Sommerfeld) σε ένα συνεχές μέσο! Που ήταν αυτό το μέσο; Στη φαντασία του Maxwell.

Το **δεύτερο μαθηματικό άλμα** του Maxwell, ήταν η διαπίστωση ότι οι παραπάνω εξισώσεις περιείχαν μια μαθηματική ασυνέπεια.

Στη σχέση (B.2), ενώ η απόκλιση του πρώτου μέλους είναι εκ ταυτότητας μηδέν (πόρισμα της διανυσματικής ανάλυσης), δεν συμβαίνει το ίδιο για το δεύτερο μέλος. Γιατί ισχύει $\text{div} \vec{j} \neq 0$ στη γενική περίπτωση;

Ας θεωρήσουμε τη ροή του \vec{j} από μια κλειστή επιφάνεια σ η οποία περικλείει έναν όγκο V . Η ροή αυτή ισοδυναμεί με τη ροή των φορτίων από την επιφάνεια. Αν ισχύει η αρχή διατηρήσεως του φορτίου (η οποία ήταν ακρογωνιαίος λίθος του ηλεκτρομαγνητισμού, από την αρχή του 19^{ου} αιώνα), θα πρέπει η ροή των φορτίων από την επιφάνεια να ισούται με το ποσό μείωσης των φορτίων που περιέχονται στον όγκο. Δηλαδή

$$\iint_S \vec{j} d\vec{S} = - \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV \Rightarrow \text{Stokes} \quad \nabla \cdot \vec{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \dots \dots \dots (1.1)$$

Η (1.1) εκφράζει την αρχή διατηρήσεως του φορτίου (εξίσωση συνεχείας) και η $\text{div} \vec{j} = 0$ ισχύει μόνο στη στατική περίπτωση.

Με αυτή την ασυνέπεια στο μυαλό, θεώρησε την (B.3) η οποία αν λυθεί ως προς ρ δίνει $\rho = \text{div} E$

$$\text{Άρα } \frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{div} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Και αντικαθιστώντας στην (1.1) έχουμε

$$\nabla \cdot \vec{j} + \text{div} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 = \text{div} \left(\vec{j} + \text{div} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36

Δηλαδή το διάνυσμα μέσα στην παρένθεση είναι ένα κυκλοειδές διάνυσμα (circuital vector) ¹⁸ σαν συνέπεια της αρχής της διατηρήσεως του φορτίου, και ο νόμος του Ampere (B.2) συμπληρώνεται

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \left(\vec{j} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \dots \dots \dots (1.2)$$

Έτσι τελικά οι εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητισμού γίνονται

$$\begin{array}{ll} \nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots \dots (\Gamma .1) & \nabla \times \vec{B} = \mu \left(\vec{j} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \dots \dots (\Gamma .2) \\ \nabla \cdot \vec{E} = \rho / \varepsilon \dots \dots (\Gamma .3) & \nabla \cdot \vec{B} = 0 \dots \dots (\Gamma .4) \end{array}$$

Η μαθηματική λοιπόν παρέμβαση στην εξίσωση του Ampere την τροποποιεί και οι εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητισμού παίρνουν την τελική τους μορφή

Ο όρος $\varepsilon \partial E / \partial t$ ονομάστηκε απ' το Maxwell ρεύμα μετατοπίσεως¹⁹, αλλά έχει σχέση με τη γέννηση μαγνητικών πεδίων απ' τα χρονικώς μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία που τώρα καθίστανται δίδυμα αδέρφια.. Το άκρως παραπλανητικό αυτό όνομα δόθηκε απ το Maxwell, γιατί πολλές απ' τις ιδέες του που αφορούσαν τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία ήταν τελείως εσφαλμένες. Πίστευε όπως θα δούμε στον αιθέρα και θεωρούσε τα πεδία ότι ήταν παραμορφώσεις αυτού του αιθέρα. Ακόμα πίστευε ότι αυτό το ρεύμα μετατοπίσεως, συνδέονταν με μετατοπίσεις του αιθέρα (η αιτία του ονόματος).

Το ότι το ρεύμα μετατοπίσεως δεν παρατηρήθηκε απ' τους πειραματιστές, μπορούσε να το ξεπεράσει με την παρατήρηση ότι ο νέος όρος περιγράφει ένα

¹⁸ Δηλαδή έχει απόκλιση μηδέν. Η κατά λέξη απόδοση είναι περιφερειακό διάνυσμα αλλά η γεωμετρική του συμπεριφορά αποδίδεται καλύτερα με το κυκλοειδές διάνυσμα.

¹⁹ Το ρεύμα μετατοπίσεως, ήταν η μόνη συνεισφορά του Maxwell στις τέσσερις εξισώσεις που φέρουν το όνομά του. Την ακριβή του σημασία και λειτουργία στη θεωρία θα τη δούμε στα πειράματα του Hertz. Ο Maxwell δεν ήταν πειραματιστής, αλλά θεωρητικός, και δεινός μαθηματικός. Είδε τη σχέση ανάμεσα στους νόμους των Ampere, Faraday και Gauss και κατάλαβε ότι υπήρχε ένα κενό για να συμπληρωθεί η αλυσίδα. Είχε δειχτεί ότι ένα κύκλωμα με έναν πυκνωτή κρατούσε το ρεύμα ανοικτό ενώ δεν περνούσε φυσικό ρεύμα δια μέσου του πυκνωτή, παρόλο που υπήρχε μαγνητικό πεδίο στο χώρο ανάμεσα στους οπλισμούς του. Έτσι ο νόμος του Αμπέρ φαίνονταν άκυρος. Το πείραμα όμως είχε αποδείξει ότι τα ρεύματα είναι που παράγουν τα μαγνητικά πεδία. Ο Maxwell, καθοδηγούμενος από τη μαθηματική οδό που έχω αναπτύξει, για να ερμηνεύσει τον επί πλέον όρο απάντησε στο πρόβλημα θεωρώντας ότι πράγματι ένα ρεύμα διέρχονταν δια μέσου του πυκνωτή που το ονόμασε ρεύμα μετατοπίσεως. Αυτό φαινονταν να είναι ο ρυθμός μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στις πλάκες του πυκνωτή. Το ρεύμα αυτό έδωσε τη μαθηματική δυνατότητα στο Maxwell να συνδυάσει όλους τους νόμους σε ένα μαθηματικό σύνολο. Δεν υπάρχει πράγματι ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που να μπορεί να ερμηνευτεί στα πλαίσια της θεωρίας του χωρίς το ρεύμα μετατοπίσεως.

το πεδίο πριν το Maxwell 33, η έννοια του πεδίου 35, το πεδίο Faraday 36 αποτέλεσα πολύ μικρό , για να παρατηρηθεί στα εργαστήρια του 19^{ου} αιώνα. Απαιτούνται ταχύτατες μεταβολές για να παρατηρηθεί το παράξενο ρεύμα! Τότε γιατί να το περιλάβουμε στις εξισώσεις; Γιατί η συμμετοχή του στην (Γ.2) είναι ο όρος που επιτρέπει στις εξισώσεις Maxwell να δίνουν λύσεις οι οποίες να διαδίδονται κυματοειδώς. Για να αποδοθεί το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, πρέπει το ρεύμα μετατοπίσεως (η μαθηματική του έκφραση) να συμπεριληφθεί στην εξίσωση Γ2.

Το **τρίτο μαθηματικό άλμα** του Maxwell ήταν η διαπίστωση (το αρχικό του όραμα) ότι τα μεγέθη E και B αντιπροσωπεύονται από κυμάνσεις που διαδίδονται στο χώρο με ταχύτητα c όπου βλέπουμε τον καθοριστικό ρόλο του ρεύματος μετατοπίσεως στη δημιουργία της κυματικής εξίσωσης.²⁰ Οι εξισώσεις Γ.1 και Γ2 είναι οι βασικές της νέας θεωρίας. Απ' αυτές παράγονται οι άλλες δύο .

Αυτή είναι η μαθηματική θεωρία του Maxwell. Έτσι στήνεται το σκηνικό της ουσιοποίησης του ηλεκτρισμού και του διαχωρισμού του απ' την ύλη, για να αποδοθεί φυσική σημασία στις εξισώσεις.

Η φυσική θεωρία του Maxwellσυνέχεια

²⁰ Το ρεύμα μετατοπίσεως είναι μια *ad hoc* εισαγωγή για να πετύχει την κυματική εξίσωση , που ήταν η αρχική του ιδέα.