



## Το ατομικό μοντέλο του Bohr Επιστημολογική ανάλυση - Εκπαιδευτική αξιοποίηση

Χατζηδάκη Π.

Διδάκτορας του τμήματος Μεθοδολογίας, Ιστορίας και Θεωρίας της Επιστήμης,  
Πανεπιστήμιο Αθηνών, Καθηγήτρια φυσικός, Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση,  
hadzidaki@otenet.gr

Ένα από τα πλέον αμφιλεγόμενα ζητήματα στη διδασκαλία των υποατομικών διαδικασιών είναι εάν πρέπει να διδάσκεται το μοντέλο του Bohr και, εάν ναι, με ποιόν τρόπο. Το ευρύτερο ερευνητικό μας πρόγραμμα υιοθετεί την καλώς θεμελιωμένη θέση της γνωσιακής ψυχολογίας ότι οι ιστορικές διαδικασίες προσφέρουν ένα μοντέλο της ίδιας της μαθησιακής δραστηριότητας, βοηθούν, επομένως, τους διδασκόμενους να συγκροτήσουν, ν' αλλάξουν και να επικοινωνήσουν επιστημονικές αναπαραστάσεις. Υπ' αυτήν την προοπτική, προχωρήσαμε σε μία διεξοδική επιστημολογική ανάλυση της ερευνητικής στρατηγικής του Bohr κατά την περίοδο γέννησης της κβαντικής θεωρίας, με σκοπό να κατανοήσουμε τη συμβολή του ατομικού του μοντέλου στις διαδικασίες εννοιολογικής αλλαγής από την κλασική στην κβαντική κοσμοθεώρηση. Παρουσιάζουμε εδώ τα κύρια αποτελέσματα της συγκεκριμένης ανάλυσης και προτείνουμε τρόπους ενσωμάτωσης και αξιοποίησής τους σε διδακτικές παρεμβάσεις ικανές να οδηγήσουν τους διδασκόμενους σε ουσιαστική κατανόηση τόσο της κβαντικής θεωρίας όσο και της 'Φύσης της Επιστήμης.

### Ερευνητικό πλαίσιο – Γενικοί στόχοι – Μεθοδολογία – Το υπό διερεύνηση αντικείμενο

Οι εμπειρικές εκπαιδευτικές έρευνες συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι ο παραδοσιακός τρόπος εισαγωγής θεμάτων της υποατομικής φυσικής στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση (μέσω κλασικών αναλόγων και ημι-κλασικών μοντέλων) ενισχύει την κλασική κοσμοθεώρηση – μία κοσμοθεώρηση που εναρμονίζεται, εν γένει, με τη βιωματική εμπειρία – και αποφέρει γνωσιακές δομές που χαρακτηρίζονται από την *αδόκιμη ανάμιξη* των εννοιολογικών πλαισίων της κλασικής και κβαντικής θεωρίας (π.χ. Kalkanis, Hadzidaki & Stavrou 2003). Οι εμπειρικές έρευνες καταδεικνύουν, επίσης, ότι οι ούτως διαμορφούμενες γνωσιακές δομές προβάλλουν στη συνέχεια *ισχυρή αντίσταση* σε οποιαδήποτε περαιτέρω προσπάθεια κατανόησης της κβαντικής θεωρίας (π.χ. Fischler & Lichtfeld 1992).

Οι διαπιστώσεις αυτές μάς έπεισαν ότι βιωματικές αντιλήψεις των διδασκομένων, ενισχυμένες από τις ρητές ή άρρητες παραδοχές της κλασικής θεωρίας, αντιπροσωπεύουν κάποιο είδος 'παραδοχών υποβάθρου' (Baltas 1986) που λειτουργούν ως κατά Bachelard 'επιστημολογικά εμπόδια' στην επιδιωκόμενη εννοιολογική αλλαγή. Η υπόθεση αυτή επιτάσσει τη διεξοδική μελέτη των επιστημολογικών στρατηγικών της επιστήμης σε περιόδους ευρείας έκτασης αλλαγών θεωρίας, ώστε να καταστεί δυνατή η κατάλληλη προσαρμογή τους στην εκπαιδευτική διαδικασία. Γιατί, σύμφωνα με έγκυρες μελέτες της γνωσιακής ψυχολογίας, «οι ιστορικές διαδικασίες παρέχουν ένα μοντέλο της ίδιας της μαθησιακής δραστηριότητας, βοηθούν, επομένως, τους διδασκόμενους να συγκροτήσουν, ν' αλλάξουν και να επικοινωνήσουν επιστημονικές αναπαραστάσεις» (Nersessian 1992, σ. 40).

Ακολουθώντας τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, το ευρύτερο ερευνητικό μας πρόγραμμα αποσκοπεί στη *θεωρητική θεμελίωση* μίας διδακτικής προσέγγισης στην κβαντική θεωρία (ΚΘ) με διπλή δυναμική (Hadzidaki, Kalkanis & Stavrou 2000): Από τη μία πλευρά, η εκπαιδευτική



ανασυγκρότηση υλικού που αντλείται από την ιστορία και φιλοσοφία της επιστήμης αναμένεται να δημιουργήσει ευνοϊκές προϋποθέσεις *εγνοιολογικής αλλαγής* προς μία εις βάθος κατανόηση της ΚΘ. Από την άλλη πλευρά, μία διδασκαλία υπό το συγκεκριμένο πρότυπο αναμένεται να οδηγήσει, παράλληλα, σε ουσιαστική εμβάθυνση στη 'Φύση της Επιστήμης' στο πλέγμα, δηλαδή, των εννοιών και διαδικασιών που χαρακτηρίζουν τη γέννηση και εξέλιξη της επιστημονικής γνώσης (π.χ. Matthews 1998).

Σε κάθε επί μέρους μελέτη του ερευνητικού μας προγράμματος, εφαρμόζουμε την ακόλουθη μεθοδολογία: *Πρώτον*, επιλέγουμε ένα συγκεκριμένο επιστημολογικό ζήτημα, η μελέτη του οποίου φαίνεται ικανή να συμβάλει στην επίλυση των διδακτικών και μαθησιακών δυσκολιών της ΚΘ. *Δεύτερον*, προχωράμε σε διεξοδική ανάλυση του επιλεγέντος ζητήματος υπό το φως σχετικών φιλοσοφικών θεωρήσεων. *Τρίτον*, διερευνούμε τις εκφάνσεις του συγκεκριμένου ζητήματος κατά την περίοδο γέννησης της ΚΘ, καθώς και τη συμβολή του στις διαδικασίες εξέλιξης και εδραίωσης του περιεχομένου της. *Τέλος*, στηριζόμενοι στα πορίσματα της προηγηθείσας μελέτης, συγκροτούμε μία διδακτική πρόταση που προσβλέπει στην επίτευξη των γενικών εκπαιδευτικών μας στόχων.

Η μελέτη της περιόδου γέννησης της ΚΘ (1912-1927) καταδεικνύει ότι η μοντελοποίηση υπήρξε το κύριο ερευνητικό όχημα της επιστήμης για τη γνωσιακή προσέγγιση των υποατομικών διαδικασιών. Η παρούσα λοιπόν εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο μίας ευρύτερης μελέτης που διερευνά τη δυνατότητα εκπαιδευτικής αξιοποίησης των δυναμικότερων, σε σχέση με την ευρετική τους εμβέλεια, μοντέλων εκείνης της περιόδου. Η παρουσίαση της εργασίας μας ακολουθεί τα μεθοδολογικά βήματα που εκτέθηκαν παραπάνω.

### **Φιλοσοφικά ερωτήματα σε σχέση με τη φύση και λειτουργία των μοντέλων**

Η ουσιαστική συμβολή της μοντελοποίησης στην ανάπτυξη των επιστημών πιστοποιείται από την ευρεία και συστηματική της χρήση σε όλες σχεδόν τις ερευνητικές δραστηριότητες: η δόμηση, ο έλεγχος, η σύγκριση, η εφαρμογή, η αναθεώρηση και η ερμηνεία μοντέλων αποτελούν κυρίαρχες εκφάνσεις της σύγχρονης επιστημονικής πρακτικής. Εύλογα, λοιπόν, η φιλοσοφική διερεύνηση προβλημάτων που σχετίζονται με τη φύση και τη λειτουργία των μοντέλων συγκεντρώνει συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον.

Τα προβλήματα που διερευνώνται εμπίπτουν στο πεδίο της σημασιολογίας (τι είδους αναπαραστασιακή λειτουργία επιτελούν τα μοντέλα), της οντολογίας (τι είδους αντικείμενα είναι τα μοντέλα), της επιστημολογίας (πώς μαθαίνουμε μέσω των μοντέλων) και, βεβαίως, στο πεδίο της φιλοσοφίας της επιστήμης (πώς σχετίζονται τα μοντέλα με τη θεωρία, ποιες οι επιπτώσεις μίας μοντελο-κεντρικής θεώρησης της επιστήμης στα ζητήματα του επιστημονικού ρεαλισμού, του αναγωγισμού, της επιστημονικής εξήγησης και των νόμων της φύσης). Τα προβλήματα αυτά συνδέονται μεταξύ τους. Έτσι, παρότι η παρούσα εργασία επικεντρώνει το ενδιαφέρον της στην επιστημολογική διάσταση της μοντελοποίησης, ορισμένες όψεις των προαναφερθέντων προβλημάτων τίθενται επίσης υπό συζήτηση.

Στο επιστημολογικό πεδίο, το πρώτο που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι ότι σημαντικό μέρος της επιστημονικής έρευνας διενεργείται επί μοντέλων και όχι επί της πραγματικότητας καθαυτής. Η ερευνητική, συνεπώς, πρακτική εκφράζει έμπρακτα την αντίληψη ότι ο χειρισμός μοντέλων επιτρέπει την ανακάλυψη ιδιοτήτων και την πιστοποίηση γεγονότων που αφορούν το εκάστοτε αναπαριστώμενο σύστημα *καθαντό*. Μία τέτοια όμως αντίληψη, εάν τεθεί στο φιλοσοφικό στόχαστρο, εγείρει δύο κεντρικά ερωτήματα σε σχέση με τη γνωσιακή λειτουργία των μοντέλων: α) πώς οικοδομούμε και χειριζόμαστε ένα μοντέλο και β) πώς ο χειρισμός ενός μοντέλου αποφέρει γνώση για τον κόσμο.



Η ιστορική διάσταση της ευρετικής μοντελοποίησης και η πολλαπλότητα των στόχων της απαλείφει τη δυνατότητα διατύπωσης μίας συνολικής απάντησης στα παραπάνω ερωτήματα. Γι' αυτό, ο Hughes (1997) σχηματοποιεί ένα γενικό επιστημολογικό πλαίσιο για τη συζήτηση συναφών ερωτημάτων. Συγκεκριμένα, θεωρεί ότι η μαθησιακή λειτουργία της μοντελοποίησης συμπεριλαμβάνει τρεις φάσεις: α) 'Δήλωση' ('Denotation'): δεχόμαστε μία συγκεκριμένη αναπαραστασιακή σχέση μεταξύ μοντέλου και υπό διερεύνηση συστήματος. β) 'Κατάδειξη' ('Demonstration'): διερευνούμε τις ιδιότητες του μοντέλου για να καταδείξουμε ορισμένους θεωρητικούς ισχυρισμούς σε σχέση με την εσωτερική του συγκρότηση ή τους μηχανισμούς που εμπεριέχει. Με αυτόν τον τρόπο, μαθαίνουμε για *το ίδιο* το μοντέλο. Τέλος, γ) 'Ερμηνεία' ('Interpretation'): η γνώση που αποκτήθηκε στις προηγούμενες φάσεις μετασχηματίζεται σε ισχυρισμούς για το αναπαριστώμενο σύστημα.

Στη συνέχεια, θα επιχειρήσουμε να προσδώσουμε σαφές περιεχόμενο στις προτεινόμενες από τον Hughes φάσεις στην περίπτωση του ατομικού μοντέλου του Bohr, ενός μοντέλου που λειτούργησε ως *εφαλτήριο* της επιστημονικής έρευνας για την προσέγγιση της ΚΘ.

### Το ατομικό μοντέλο του Bohr

*A) Δήλωση: Σημείο εκκίνησης για μία συνεκτική θεωρία των υποατομικών διαδικασιών*

Το ατομικό μοντέλο του Bohr (1913) αναδύθηκε από την επιδίωξη του εμπνευστή του να διασφαλίσει τη σταθερότητα των ατόμων στο πλανητικό μοντέλο του ατόμου του Rutherford. Για την εκπλήρωση του συγκεκριμένου στόχου, ο Bohr ενσωμάτωσε μία *μη-κλασική* έννοια σταθερότητας στον ορισμό της 'στάσιμης κατάστασης'. Οι στάσιμες καταστάσεις υπάκουαν στις ακόλουθες αξιωματικές παραδοχές:

1. Το άτομο παραμένει σταθερό σε μία *ασυνεχή* σειρά στάσιμων καταστάσεων (το λεγόμενο 'κβαντικό αξίωμα'). Οι μεταπτώσεις μεταξύ στάσιμων καταστάσεων είναι *αιφνίδιες* και, συνεπώς, η περιγραφή τους με κλασικούς όρους είναι αδύνατη.
2. Η κίνηση των ηλεκτρονίων σε μία στάσιμη κατάσταση μελετάται δια της εφαρμογής της κλασικής μηχανικής στο μοντέλο του Rutherford.
3. Η συχνότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται/απορροφάται κατά τη διάρκεια μίας μετάπτωσης μεταξύ δύο στάσιμων καταστάσεων δίνεται από την ενεργειακή διαφορά των καταστάσεων αυτών διαιρεμένη με τη σταθερά του Planck (ο λεγόμενος 'κανόνας συχνότητας'  $\Delta E = h\nu$ ).

Η παραδοχή (2) ήταν προφανώς ασύμβατη με τις υπόλοιπες δύο. Γιατί η παραδοχή (1) εγκατέλειπε την κλασική επιταγή της συνεχούς μεταβολής της κατάστασης των φυσικών συστημάτων και η παραδοχή (3) την κλασική επίσης επιταγή της ταύτισης της συχνότητας κίνησης μίας πηγής με τη συχνότητα της εκπεμπόμενης, από την πηγή, ακτινοβολίας.

Παρά τη λογική και εννοιολογική του ασυνέπεια, το ατομικό μοντέλο του Bohr συνάντησε την καθολική σχεδόν αποδοχή της επιστημονικής κοινότητας, κυρίως επειδή ορισμένες προβλέψεις του, σε σχέση με τα φάσματα εκπομπής, επιβεβαιώθηκαν πειραματικά λίγες εβδομάδες μετά τη δημοσίευση της σχετικής εργασίας (Bohr 1913). Εν τούτοις, ο ίδιος ο Bohr, έχοντας πλήρη επίγνωση του 'προκαταρκτικού' χαρακτήρα του μοντέλου του, διευκρίνιζε ότι στόχος του δεν ήταν «η εξήγηση των φασματικών νόμων», αλλά «η συγκρότηση μίας βάσης για την προσέγγιση μίας συνεκτικής θεωρίας περί της συγκρότησης των ατόμων» (στο ίδιο, σ. 162). Ποια ήταν όμως τα επιστημολογικά χαρακτηριστικά του μοντέλου του Bohr που το κατέστησαν, πράγματι, *βάση εκκίνησης* της μακράς πορείας προς την ΚΘ; Υπό μία άκρως συνοπτική παρουσίαση, επισημαίνουμε τα ακόλουθα:



- Η κλασική θεωρία παρέχει τα εφόδια για την ανάπτυξη του ατελούς κβαντικού σχήματος. Παρά τη ρητή αναγνώριση της μη-εφαρμοσιμότητας των κλασικών ιδεών στο υποατομικό επίπεδο, ο Bohr φρόντισε να διασφαλίσει τη μεθοδολογικά έγκυρη εισαγωγή των τυπικών σχέσεων και υπολογιστικών τεχνικών της κλασικής θεωρίας στο ατομικό του μοντέλο, για να τα καταστήσει *κινητήριο μοχλό* για την ανάπτυξη του υπό διαμόρφωση κβαντικού σχήματος. Έτσι, μέσω της παραδοχής (2), περιόρισε τη χρήση τους στις στάσιμες καταστάσεις και οροθέτησε την εφαρμογή τους ορίζοντας μία *τυπική αναλογία* μεταξύ της κλασικής θεωρίας και των κβαντικών παραδοχών. Η αναλογία αυτή ονομάστηκε αργότερα (1920) ‘Αρχή της Αντιστοιχίας’ (ΑΑ).
- Η Αρχή της Αντιστοιχίας. Οι παραδοχές του ατομικού μοντέλου δεν επαρκούσαν για τον προσδιορισμό της ενέργειας των στάσιμων καταστάσεων. Έτσι, ο Bohr έθεσε, για πρώτη φορά, σ’ εφαρμογή την ΑΑ, για να επιλέξει τις δυνατές στάσιμες καταστάσεις εξ όλων των κλασικώς δυνατών. Η ΑΑ είχε ποιοτικό κατά βάση χαρακτήρα και όριζε τα ακόλουθα: κάθε κβαντική μετάπτωση μπορεί να συσχετιστεί με μία συνιστώσα Fourier της κλασικής κίνησης του ηλεκτρονίου σε μία στάσιμη κατάσταση και η υπολογιζόμενη, μέσω της παραδοχής (3), συχνότητα οφείλει να προσεγγίζει, στο όριο των μεγάλων κβαντικών αριθμών (στο πεδίο κοινής εφαρμογής των κλασικών και κβαντικών νόμων), την κλασική συχνότητα εκπομπής της ‘αντίστοιχης’ συνιστώσας Fourier.
- Η Αρχή της Αντιστοιχίας προσέδιδε στα πειραματικά αποτελέσματα τον χαρακτήρα ενός ‘διάδλου επικοινωνίας’ μεταξύ της κλασικής θεωρίας και του κβαντικού σχήματος. Η ΑΑ ήταν, επομένως, μία αναλογία που έθετε σε συστηματική επικοινωνία τις κλασικές και κβαντικές παραδοχές στο κοινό πεδίο εφαρμογής τους. Με αυτόν τον τρόπο, όριζε ως κριτή της εκάστοτε προτεινόμενης, μέσω αυτής, αναλογίας τα καλώς επιβεβαιωμένα αποτελέσματα της εμπειρικής έρευνας. Το γεγονός αυτό προωθούσε τη δική της, αφενός, μετεξέλιξη και τη σταδιακή, αφετέρου, ανάπτυξη του ατελούς κβαντικού σχήματος. Η δυνατότητα προσαρμογής της ΑΑ στα νέα θεωρητικά και πειραματικά δεδομένα την κατέστησε οδηγό της επιστημονικής έρευνας για δέκα και πλέον χρόνια.
- Προς μίας ριζικώς νέα κοσμοθεώρηση. Το ατομικό μοντέλο του Bohr, έχοντας δομηθεί υπό την υπόνοια ότι η υπό αναζήτηση ΚΘ ήταν δυνατό να είναι συντακτικά, εννοιολογικά και οντολογικά ασύμβατη με την κλασική, άφηνε το περιθώριο ριζικής διαφοροποίησης των δύο θεωριών. Η ΑΑ ήταν λοιπόν μία τυπική αναλογία, υπό την έννοια ότι οι κλασικές έννοιες που εισάγονταν στο κβαντικό πλαίσιο (π.χ. ορμή, στροφορμή) αντιμετωπίζονταν ως σύμβολα που ανέμεναν να προσλάβουν το νόημά τους από το εννοιολογικό πλαίσιο μίας συνεκτικά θεμελιωμένης και ερμηνευμένης ΚΘ.

Το ατομικό μοντέλο του Bohr μπορεί λοιπόν να ειπωθεί ως *αφετηριακό σημείο* της πορείας προς την ΚΘ για δύο κυρίως λόγους: α) επειδή διαμόρφωσε ένα εναλλακτικό, προς την κλασική θεωρία, θεωρητικό πλαίσιο, το οποίο υπέβαλε μία ριζικώς διαφορετική θέαση των πειραματικών δεδομένων. Και, β) επειδή εμπεριείχε ένα μεθοδολογικό εργαλείο (την ΑΑ) που δημιουργούσε τις προϋποθέσεις για την υπέρβαση των εγγενών του αντιφάσεων.

*Β) Κατάδειξη: Το ατομικό μοντέλο του Bohr διερευνάται και εξελίσσεται*

Η ΑΑ, ενώ έθετε τα κλασικά επιτεύγματα στην υπηρεσία της επιστημονική έρευνας, διάνοιγε παράλληλα τη δυνατότητα προοδευτικής διάβρωσης του *αυτονόητου* καθεστώτος των ‘παραδοχών υποβάθρου’ της κλασικής θεωρίας. Ας δούμε την κορυφαία περίπτωση.

Η αρμονική συνύπαρξη των συνεχών χωρο-χρονικών νόμων και των νόμων διατήρησης (ενέργειας και ορμής) εντός του κλασικού πλαισίου επιτρέπει τον αυστηρώς αιτιακό χωρο-χρονικό προσδιορισμό τόσο της κατάστασης όσο και της εξέλιξης των φυσικών συστημάτων.

Κατά την εισαγωγή όμως των κλασικών αυτών νόμων στο κβαντικό πλαίσιο, η ‘αυτονόητη’, έως τότε, συνύπαρξή τους φαινόταν να τίθεται υπό διαρκή επερώτηση. Το ατομικό μοντέλο του Bohr διάνοιξε, επομένως, ένα πεδίο αντιπαράθεσης δύο εκ των κεντρικών ‘παραδοχών υποβάθρου’ της κλασικής κοσμοθεώρησης, των παραδοχών της συνέχειας και της αυστηρής αιτιότητας. Κατά την σταδιακή του δε ανάπτυξη, μέσω της ΑΑ, έγινε φανερό ότι η αντιπαράθεση αυτή επεκτεινόταν στις κλασικές εικόνες του ‘κύματος’ και του ‘σωματιδίου’.

Ο Heisenberg, υιοθετώντας τη σωματιδιακή εικόνα των κβαντικών συστημάτων και απαλείφοντας από αυτήν κάθε χωρο-χρονική περιγραφή, διαμόρφωσε ένα συνεκτικό μαθηματικό μοντέλο (τη ‘θεωρία των μητρών’, 1925), το οποίο «διατύπωνε με ακρίβεια τις φερόμενες από την ΑΑ τάσεις» (Bohr, 1925, σ. 280). Αντίθετα, ο Schrödinger, υιοθετώντας την κυματική εικόνα και προτάσσοντας το αίτημα των συνεχών χωρο-χρονικών περιγραφών, κατέληξε, το 1926, στη διατύπωση της κυματικής μηχανικής, ενός συνεκτικού, επίσης, μαθηματικού μοντέλου που, όπως σύντομα αποδείχθηκε από τον ίδιο (1926), ήταν λογικά ισοδύναμο με τη θεωρία των μητρών. Το σύγχρονο ατομικό μοντέλο, υπό τη μαθηματική του έκφραση, είχε πλέον αναδυθεί. Η φυσική του όμως ερμηνεία βρισκόταν ακόμη σε αναμονή.

*Γ) Ερμηνεία: Η συσσώρευση γνώσης για το ατομικό μοντέλο αποφέρει γνώση για τον κόσμο*

Η αποκτηθείσα από τον χειρισμό του ατομικού μοντέλου γνώση, σε συνδυασμό με την προσπάθεια φυσικής ερμηνείας των ανισοτήτων του Heisenberg (1927), οδήγησαν τελικά τον Bohr στην ιδέα μίας τεχνητά διενεργούμενης ‘τομής’ σε μία μη-διαχωρίσιμη εκ λόγων αρχής ολότητα, μία ιδέα που προσέδιδε στην παραδοχή (1) του ατομικού μοντέλου μία εντελώς καινούργια σημασία. Το ‘κβαντικό αξίωμα’ δεν περιοριζόταν στην επιβολή της κβαντικής ασυνέχειας, όπως έως τότε εικαζόταν, αλλά υποδείκνυε κάτι ουσιωδώς σημαντικότερο: την *περιορισμένη διαχωρισιμότητα* των υποατομικών διαδικασιών και τον απορρέοντα από αυτήν *ολιστικό χαρακτήρα* της κβαντικής μέτρησης.

Η διαπίστωση αυτή αποκάλυπτε τη θεμελιακή πλέον ‘παραδοχή υποβάθρου’ της κλασικής θεωρίας, μία παραδοχή που είναι εγγεγραμμένη στη *διαχωρίσιμη* λογική της δομή και υποβάλλει μία συγκεκριμένη αντίληψη για τον κόσμο: την *παραδοχή των εξατομικευμένων*, παρά τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, φυσικών οντοτήτων, την παραδοχή που εδραιώνει την κλασική αντίληψη περί της δυνατότητας *πλήρους διαχωρισμού* του υπό μελέτη συστήματος από το μετρητικό του περιβάλλον. Η παραδοχή αυτή, καθώς εναρμονίζεται με την κοινή ανθρώπινη εμπειρία, λειτουργούσε, έως τότε, ως αυτονόητη προϋπόθεση της επιστημονικής έρευνας, λειτουργούσε, επομένως, ως, κατά Bachelard, ‘επιστημολογικό εμπόδιο’ που πρόβαλε ισχυρή *αντίσταση* στην εννοιολογική αλλαγή.

Η αποκάλυψη της συγκεκριμένης παραδοχής φώτισε άπλετα το καθεστώς των κλασικών εννοιών, νόμων και εικόνων εντός του κβαντικού πλαισίου και απέφερε την πρώτη συνεκτική φυσική ερμηνεία της ΚΘ μέσω της έννοιας συμπληρωματικότητας, μία ερμηνεία που δικαιώνεται επίμονα από τις μεταγενέστερες εξελίξεις. Η ερμηνεία του Bohr μετασχημάτιζε τη συσσωρευμένη για το ατομικό μοντέλο γνώση σε γνώση τόσο για τις έννοιες της φυσικής όσο και για τον κόσμο. Σύμφωνα, λοιπόν, με τη θεωρητική θεμελίωση του ερευνητικού μας προγράμματος, η κατάλληλη εκπαιδευτική αξιοποίηση του ατομικού μοντέλου αναμένεται ν’ αποφέρει ανάλογα αποτελέσματα και στο εκπαιδευτικό πλαίσιο.

### **Εκπαιδευτική Αξιοποίηση**

Στο εκπαιδευτικό πλαίσιο, το μοντέλο του Bohr έχει διχάσει τους ερευνητές. Από τη μία πλευρά, είναι εκείνοι που, αναγνωρίζοντας τη ριζική ρήξη της ΚΘ με την κλασικές ιδέες,



υποστηρίζουν ότι ο ημι-κλασικός χαρακτήρας του συγκεκριμένου μοντέλου προκαλεί σοβαρές παρανοήσεις, οι οποίες, στη συνέχεια, είναι δύσκολο να απαλειφθούν. Υπ' αυτήν την προοπτική, οι Fischler και Lichtfeld (1992), λόγου χάριν, εισηγούνται την εξ αρχής διδακτική επικοινωνία του ατομικού μοντέλου του Schrödinger με εστίαση της προσοχής στην αποσαφήνιση του εννοιολογικού του υποβάθρου. Από την άλλη πλευρά, οι ερευνητές που αναγνωρίζουν στοιχεία σώρευσης στην ανάπτυξη της επιστημονικής γνώσης θεωρούν ότι το μοντέλο του Bohr αποτελεί αναγκαίο βήμα μίας γνωσιακής διαδικασίας που οδηγεί σταδιακά στη κατανόηση του σύγχρονου ατομικού μοντέλου (π.χ. Petri & Niedderer 1998).

Οι εμπειρικές έρευνες δείχνουν, πράγματι, ότι ο παραδοσιακός τρόπος εισαγωγής του μοντέλου του Bohr στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση συντελεί στη δημιουργία παρανοήσεων. Εν τούτοις, η μελέτη της περιόδου γέννησης της ΚΘ αποκαλύπτει, όπως είδαμε, ότι ήταν ακριβώς ο ημι-κλασικός χαρακτήρας του ατομικού μοντέλου, σε συνδυασμό με τα στέρα επιστημολογικά του ερείσματα, εκείνος που προώθησε την προσέγγιση της ΚΘ. Η ιστορία της επιστήμης, δείχνει, επομένως, το πώς η υφιστάμενη γνώση μπορεί να μετατραπεί, μέσω της κατάλληλης γνωσιακής στρατηγικής, από 'επιστημολογικό εμπόδιο' σε σημαντικό 'εφόδιο' για την προσέγγιση *ριζικά καινούργιας* γνώσης. Σύμφωνα, λοιπόν, με τις γενικές αρχές του ερευνητικού μας προγράμματος, θεωρούμε ότι το μοντέλο του Bohr μπορεί να συμβάλει στην ουσιαστική κατανόηση της ΚΘ υπό την προϋπόθεση, όμως, της συστηματικής του σύνδεσης με μία 'ισχυρώς εξειδικευμένη' επικοινωνία της 'Φύσης της Επιστήμης', μία επικοινωνία, που διαπλέκει το περιεχόμενο της επιστημονικής γνώσης με την ιστορική του εξέλιξη, το επιστημολογικό του υπόβαθρο και τις φιλοσοφικές του προεκτάσεις.

Ακολουθώντας αυτήν την κατεύθυνση, προτείνουμε μία διδακτική παρέμβαση που θεμελιώνεται στις υποδεικνυόμενες από τον Hughes φάσεις, με το περιεχόμενο που αυτές προσέλαβαν από την επιστημολογική μας ανάλυση. Μέσω της συστηματικής υποκίνησης *μετα-επιστημονικού* και *μετα-γνωσιακού* αναστοχασμού, η παρέμβαση αυτή συνδέει άρρηκτα το επιστημονικό περιεχόμενο της γνώσης με σημαντικές πτυχές της 'Φύσης της Επιστήμης'.

Η προτεινόμενη παρέμβαση, λόγω της ποιοτικής της κατά βάση θεμελίωσης, μπορεί να προσαρμοστεί, ανάλογα με τον βαθμό μαθηματικής τυποποίησης του περιεχομένου της, σε εκπαιδευτικά προγράμματα που αφορούν μαθητές λυκείου, φοιτητές θετικών επιστημών στα αρχικά έτη σπουδών τους ή ευρύτερα ακροατήρια (π.χ. φοιτητές παιδαγωγικών τμημάτων ή ανθρωπιστικών επιστημών) που επιθυμούν να προσεγγίσουν το φυσικό περιεχόμενο, αλλά και τις ρηξικέλευθες επιστημολογικές και φιλοσοφικές συνέπειες της σύγχρονης φυσικής.

*Το μοντέλο του Bohr: μία δυναμική γνωσιακή γέφυρα μεταξύ κλασικής και κβαντικής θεωρίας*

*Α) Δήλωση.* Οι διδασκόμενοι οδηγούνται, κατ' αρχήν, να διαπιστώσουν την αδυναμία της κλασικής θεωρίας να ερμηνεύσει μία σειρά εμπειρικών δεδομένων που σχετίζονται με τις ιδιότητες των στοιχείων (περιοδικό σύστημα, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ακτίνες Röntgen, εμπειρικοί φασματικοί νόμοι). Η διαδικασία αυτή, πέραν της μαθησιακής της σημασίας, υποκινεί τη διερεύνηση οντολογικών και σημασιολογικών ερωτημάτων της μοντελοποίησης. Γιατί, μία παρουσίαση του ατομικού μοντέλου, κατά το πρότυπο της επιστημολογικής μας ανάλυσης, επιτρέπει στους διδασκόμενους να διακρίνουν ότι το μοντέλο του Bohr υπήρξε μία εμπειρικά ενημερωμένη κατασκευή του ανθρώπινου νου (*οντολογικό ερώτημα*), μεθοδολογικά απογυμνωμένη από κάθε απεικονιστική επιδίωξη (*σημασιολογικό ερώτημα*): η αναπαραστασιακή του λειτουργία ήταν δοκιμαστική, προορισμένη να θέσει μία βάση για τη κατανόηση των υποατομικών διαδικασιών. Η φάση της 'δήλωσης' ολοκληρώνεται με τη διαπίστωση των προβλεπτικών επιτυχιών του ατομικού μοντέλου, τον εντοπισμό των εγγενών

του αντιφάσεων, την αναγνώριση της εξηγητικής του ανεπάρκειας και τον προσδιορισμό των μεθοδολογικών αρχών που προδιέγραφαν την επιστημολογική του δυναμική.

*Β) Κατάδειξη.* Η ΑΑ επιτρέπει την *απόσπαση* των τυπικών σχέσεων και υπολογιστικών τεχνικών της κλασικής θεωρίας από το εννοιολογικό τους υπόβαθρο και την *προσαρμογή* τους στις επιταγές της κβαντικής ασυνέχειας. Η διαδικασία αυτή εξοικειώνει τους διδασκόμενους με την *αφαιρετική* λειτουργία της μοντελοποίησης, μία λειτουργία με εξαιρετική γνωσιακή δυναμική (Nersessian 1992). Εάν δε οι διδασκόμενοι έχουν επαρκές μαθηματικό υπόβαθρο, μπορούν να διαπιστώσουν ότι η συγκεκριμένη λειτουργία είναι κατ' εξοχήν εκείνη που επιτρέπει την κατασκευή μαθηματικών μοντέλων (Heisenberg - Schrödinger), τα οποία όμως στερούνται σημασιολογικού περιεχομένου – και, κατ' επέκταση, εξηγητικής ισχύος – εάν δεν ενταχθούν στο θεωρητικό πλαίσιο μίας φυσικώς ερμηνευμένης θεωρίας.

Κατά την φάση της 'κατάδειξης', η πολύπλευρη διερεύνηση των κλασικών νόμων και εικόνων στο κβαντικό πλαίσιο πιστοποιεί την τάση αμοιβαίου αποκλεισμού τους. Έτσι, οι διδασκόμενοι καλούνται να διερευνήσουν τις 'αυτονόητες', υπό το πρίσμα της βιωματικής τους εμπειρίας, παραδοχές της κλασικής θεωρίας (τις παραδοχές της χωρο-χρονικής συνέχειας και της αυστηρής αιτιότητας), καθώς και το 'παράδοξο' του δυϊσμού κύματος - σωματιδίου, ένα ζήτημα που προκαλεί ισχυρές εννοιολογικές παρανοήσεις (π.χ. Olsen 2002).

*Γ) Ερμηνεία.* Η εκπαιδευτική διαδικασία, μέσω του υποκινούμενου από την ΑΑ διαλόγου μεταξύ πειράματος και θεωρίας, μεταξύ παλιάς και νέας γνώσης, οδηγεί τους διδασκόμενους να διαπιστώσουν ότι οι εγγενείς αντιφάσεις του ατομικού μοντέλου απορρέουν, εν τέλει, από την άκριτη μεταφορά της κλασικής διαχωρισσιμότητας στο κβαντικό πλαίσιο.

Η διαπίστωση αυτή αποκαλύπτει τη θεμελιακή 'παραδοχή υποβάθρου' της κλασικής θεωρίας, την παραδοχή του *οντολογικά διαχωρίσιμου* κόσμου, μία παραδοχή που, καθώς εναρμονίζεται με την κοινή ανθρώπινη εμπειρία, αποτέλεσε – στο πεδίο της ενεργού επιστήμης – και αποτελεί – στο εκπαιδευτικό πλαίσιο – το ισχυρότερο 'επιστημολογικό εμπόδιο' για την κατανόηση των υποατομικών διαδικασιών. Η εκπαιδευτική διαδικασία αναδεικνύει το γεγονός ότι η ΚΘ είναι η μόνη λογικώς συνεκτική, ως προς τη μαθηματική της θεμελίωση, και καλώς επιβεβαιωμένη, ως προς τις εμπειρικές της προβλέψεις, *ολιστική* φυσική θεωρία. Κι' αυτό, γιατί φέρει ως εγγενές χαρακτηριστικό της λογικής της δομής τη *μη-διαχωρισσιμότητα* (non-separability) του 'όλου' σε 'μέρη' (για μία διεξοδική ανάλυση βλ. Karakostas 2004). Υπ' αυτήν την προοπτική, τα κρίσιμα ερμηνευτικά προβλήματα της ΚΘ τίθενται υπό διερεύνηση και συζήτηση (μία αναλυτική παρουσίαση διδακτικής παρέμβασης με άξονα την κβαντική μη-διαχωρισσιμότητα στο Hadzidaki 2008).

Η φυσική ερμηνεία της ΚΘ επιτρέπει στους διδασκόμενους να προσδώσουν σαφές φυσικό περιεχόμενο στο σύγχρονο ατομικό μοντέλο *συγκεκριμενοποιώντας* τους γενικούς νόμους της ΚΘ στην ατομική δομή. Αναφέρουμε ενδεικτικά ότι συγκεκριμενοποιούνται: α) Ο ολιστικός χαρακτήρας της κβαντικής μέτρησης. β) Η ανάγκη διενέργειας από το γνωρίζον υποκείμενο μίας *μεθοδολογικής τομής* της διαμορφούμενης, κατά τη μέτρηση, κβαντικής ολότητας σε 'μετρητική συσκευή'/'υπό παρατήρηση σύστημα', ώστε να καταστεί δυνατή η αναφορά σε πειραματικώς προσιτά γεγονότα (εφόσον, εκ της φύσεως των ανθρώπινων δυνατοτήτων προς παρατήρηση, η πειραματική διαδικασία προϋποθέτει τον *πλήρη διαχωρισμό* της συσκευής μέτρησης από το υπό παρατήρηση σύστημα). γ) Η συνεπαγόμενη, από τη συγκεκριμένη τομή, απώλεια γνώσης και, κατ' επέκταση, ο *εγγενής* πιθανοκρατικός χαρακτήρας της ΚΘ, όπως αποτυπώνεται στις ανισότητες Heisenberg. (δ) Η *πλαισιακή εξάρτηση*, ο συμπληρωματικός χαρακτήρας και το νόημα των κλασικών νόμων και εννοιών ('χωρο-χρονική συνέχεια' - 'κλασική αιτιότητα', 'θέση' - 'ορμή', 'σωματίδιο' - 'κύμα') στο κβαντικό πλαίσιο.

Κατά τη φάση της 'ερμηνείας', η κατ' αντιπαράθεση εξέταση του μοντέλου του Bohr με το σύγχρονο ατομικό μοντέλο (μέσω οπτικοποιημένων προσομοιώσεών τους, όπως αυτές



συναντώνται στο εκπαιδευτικό λογισμικό, Kalkanis, Hadzidaki & Stavrou 2003, Dimopoulos & Kalkanis 2005, Κοντογεωργίου, Κώτσης & Μικρόπουλος 2007) υποστηρίζει ενεργά τον μετα-γνωσιακό και μετα-επιστημονικό αναστοχασμό. Γιατί μία τέτοια εξέταση καταδεικνύει την ισχυρή διαφοροποίηση των δύο μοντέλων, όσον αφορά την επιστημολογική, σημασιολογική και οντολογική τους διάσταση, ενώ προβάλλει, παράλληλα, τις γνωσιακές διαδικασίες που οδήγησαν την επιστήμη – αλλά και τους ίδιους τους διδασκόμενους – από μία υποθετική νοητική κατασκευή (από το μοντέλο του Bohr) σε αυθεντική γνώση για τον κόσμο (για την ατομική δομή, όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από την ΚΘ).

Εκ της συνοπτικής αυτής παρουσίασης γίνεται φανερό ότι η προτεινόμενη διδακτική παρέμβαση χρησιμοποιεί το μοντέλο του Bohr ως *γνωσιακή γέφυρα* μεταξύ της κλασικής και κβαντικής θεωρίας, μία γέφυρα, όμως, που αντί ν' αποκρύπτει, υποκινεί την αναγνώριση της θεμελιακής ασυμβατότητας των δύο θεωριών. Εύλογα, λοιπόν, μία παρέμβαση υπό το συγκεκριμένο πρότυπο αναμένεται ν' αποφέρει τη *σαφή διάκριση* της κλασικής και κβαντικής θεωρίας, τη συγκρότηση μίας *συνεκτικής εικόνας* για τον φυσικό κόσμο, τη διαμόρφωση μίας *κοινής βάσης* για τη διδασκαλία της φυσικής και χημείας (για την ικανοποίηση του αιτήματος αυτού στο γυμνάσιο, βλ. Tsaparlis & Kampourakis 2000), και, ως εκ του τρόπου σχεδιασμού της, την *ουσιαστική εμπάθουση* σε σημαντικές πτυχές της 'Φύσης της Επιστήμης'.

## Βιβλιογραφία

Κοντογεωργίου, Α., Κώτσης, Κ. & Μικρόπουλος, Τ. (2007). Είναι κβαντικό το άτομο; Η νοητική εικόνα των φοιτητών. Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Συνεδρίου, ΚοΔιΦΕΕΤ, Τόμος Β', 538-547.

Baltas, A. (1986). Ideological assumptions in physics: Social determinations of internal structures. *Philosophy of Science Association (PSA), Volume II*, 130-151.

Bohr, N. (1913). On the constitution of atoms and molecules. Εργασία δημοσιευμένη σε τρία μέρη. U. Hoyer (ed) (1981). *Niels Bohr Collected Works, Vol. 2*. North Holland Publishing Company, Amsterdam, 161-185, 188-214, 215-233.

Bohr, N. (1925). *Atomic theory and mechanics*. K. Stolzenburg (ed) (1984). *Niels Bohr Collected Works, Vol. 5*. North Holland Publishing Company, Amsterdam, 273-280.

Dimopoulos V. & Kalkanis G. (2005). Simulating quantum states of the atom of hydrogen - A simulation program for non-physics major's students. 5<sup>th</sup> ESERA Conference, Barcelona, Spain.

Fischler, H. & Lichtfeld, M. (1992). Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, 14(2), 181-190.

Hadzidaki, P., Kalkanis, G. & Stavrou, D. (2000). Quantum Mechanics: A systemic component of the modern physics paradigm. *Physics Education*, 35(6), 386-392.

Kalkanis, G., Hadzidaki, P. & Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, 87, 257-280.

Hadzidaki, P. (2008). Quantum mechanics and scientific explanation: An explanatory strategy aiming at providing understanding. *Science & Education*, 17(1), 49-73.



- Hughes, R. I. G. (1997). Models and representation. *Philosophy of Science*, 64, 325-336.
- Karakostas, V. (2004). Forms of quantum nonseparability and related philosophical consequences. *Journal for General Philosophy of Science*, 35, 285-312.
- Matthews, R. (1998). The nature of science and science education. B. Fraser & K. Tobin (eds) (1998). *International Handbook of Science Education*. Kluwer Academic Publishers, 981-999.
- Nersessian, N. (1992). How do scientists think? Capturing the dynamics of conceptual change in science. R.N. Giere (ed) (1992). *Cognitive Models of Science*. University of Minnesota Press, 3-40.
- Olsen, R. (2002). Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: A study in Norway. *International Journal of Science Education*, 24(6), 565-574.
- Petri, J. & Niedderer, H. (1998). A learning pathway in high school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education*, 20(9), 1075-1088.
- Tsaparlis, G. & Kampourakis, K. (2000). An integrated physical-science (physics and chemistry) introduction for lower-secondary level. *Chemistry Education: Research and Practice*, 1, 281-294.