



Είναι δυνατό να βρεθεί το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση του έξω από τον χώρο που ορίζεται ως τροχιακό 1s; Νοηματικές δυσκολίες μαθητών λυκείου για βασικές κβαντοχημικές έννοιες και προσπάθειες εννοιολογικής αλλαγής

Παπαφώτης Γ., Τσαπαρλής Γ.

Μέση εκπαίδευση, 1ο Λύκειο Ιωαννίνων, gparafotis@sch.gr

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Χημείας, gtseper@cc.uoi.g

Αυτή η εργασία εξετάζει τη βαθειά κατανόηση και την κριτική σκέψη για βασικές κβαντοχημικές έννοιες που διδάσκονται στη γ' λυκείου θετικής κατεύθυνσης. Σκοπός μας ήταν να πετύχουμε εννοιολογική αλλαγή σε φοιτητές. Αρχικά έγινε μια ποσοτική μελέτη ($n = 125$) από τους οποίους επελέγησαν 23 φοιτητές/τριες για να πάρουν μέρος σε ημιδομημένες συνεντεύξεις, ατομικά ή σε μικρές ομάδες, έτσι ώστε να αλληλεπιδράσουν συντονιζόμενοι από τον ερευνητή. Σε αυτή την εργασία περιοριζόμαστε στα αποτελέσματα μιας μόνο ερώτησης: «Είναι δυνατό να βρεθεί το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση του έξω από τον χώρο που ορίζεται ως τροχιακό 1s; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας». Βρέθηκε ότι η πιθανολογική φύση της έννοιας του τροχιακού ήταν απύσχα από τη σκέψη αρκετών φοιτητών. Η προσέγγισή μας για την εννοιολογική αλλαγή στηριζόταν στον εποικοδομισμό και χρησιμοποιήθηκαν ενεργητικές και συνεργατικές μέθοδοι μάθησης που αποδείχτηκαν αποτελεσματικές σε ένα αριθμό περιπτώσεων. Η ποικιλία στις προσεγγίσεις των φοιτητών εξηγήθηκε με τη θεωρία του Ausubel για τη νοηματική και τη μηχανική μάθηση και από την ικανότητα χρήσης ανώτερης τάξεως γνωσιακών ικανοτήτων. Πάντως η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να είναι χρήσιμη για όλους τους φοιτητές, ανεξάρτητα από τη συμπεριφορά τους στις παραδοσιακές γραπτές εξετάσεις.

Εισαγωγή

Τα ατομικά τροχιακά, τα μοριακά τροχιακά, όπως και άλλες σχετικές έννοιες προέρχονται από τη κβαντομηχανική θεωρία για την ατομική και τη μοριακή δομή. Λόγω της νοηματικής δυσκολίας τους, αυτές οι έννοιες δεν διδάσκονται σε εισαγωγικά μαθήματα σχολικής χημείας, είναι όμως τώρα μέρος των περισσότερων αναλυτικών προγραμμάτων για τις μεγάλες τάξεις του λυκείου σε ανώτερα ή ειδικά επίπεδα και κατευθύνσεις. Διδάσκονται επίσης σε μαθήματα Γενικής Χημείας ή εισαγωγικά μαθήματα Ανόργανης Χημείας στα χημικά ή και σε άλλα πανεπιστημιακά τμήματα φυσικών επιστημών.

Ένας αριθμός ερευνητών έχει συνδέσει τις δυσκολίες και παρανοήσεις των φοιτητών με τα πολύπλοκα ατομικά και μοριακά μοντέλα που χρησιμοποιούνται. (Zoller, 1990, Harrison & Treagust, 2000, Ireson, 2001, Olsen, 2001, Taber, 2001, 2002a, 2002b, 2005, Nakiboglu, 2003). Ακόμη και φοιτητές πανεπιστημίου που έχουν περάσει το μάθημα της βασικής κβαντικής χημείας αντιμετωπίζουν δυσκολίες μάθησης και παρουσιάζουν αρκετές παρανοήσεις σε σχέση με τις βασικές κβαντικές έννοιες (Tsaparlis, 1997). Οι Coll and Treagust (2001, 2002) βρήκαν ότι ακόμη και μεταπτυχιακοί φοιτητές προτιμούν απλά πραγματιστικά μοντέλα και αναφέρονται σε πιο πολύπλοκα μοντέλα μόνο κατά τη διάρκεια των εξετάσεων. Σύμφωνα με τους Kalkanis, Hadzidaki, & Stavrou (2003), οι κυριότερες παρανοήσεις οφείλονται στην επικάλυψη/ανάμειξη των εννοιολογικών δομών της κλασικής και της κβαντικής φυσικής και από επιστημολογικά εμπόδια για την απόκτηση της κατάλληλης γνώσης.

Η παρούσα μελέτη

Σε προηγούμενη ποσοτική μελέτη που έγινε την ακαδημαϊκή χρονιά 1999 – 2000 (Παπαφώτης & Τσαπαρλής 2003, 2004, 2005) δόθηκε στους φοιτητές ένας αριθμός ερωτήσεων διαφορετικών από τις συνηθισμένες ερωτήσεις ανάκλησης γνώσεων ή εφαρμογής απλών αλγορίθμων που συνήθως δίνονται στις εξετάσεις και στις οποίες οι φοιτητές είχαν ασκηθεί. Οι ερωτήσεις στόχευαν στον έλεγχο της βαθειάς κατανόησης και της κριτικής σκέψης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι πολλοί φοιτητές σκέφτονται με όρους της παλιάς κβαντικής θεωρίας, υποθέτοντας ότι ο όρος «τροχιακό» είναι μια άλλη λέξη για την «τροχιά» και ότι τα ηλεκτρόνια γυρίζουν γύρω από τον πυρήνα όπως οι πλανήτες γύρω από τον ήλιο. Επιπλέον ένας αριθμός από αυτούς θεωρούν ότι τα τροχιακά είναι μοναδικά και αναπαριστούν ένα καθορισμένο με σαφή όρια χώρο. Πολλοί φοιτητές δεν κατανοούν την πιθανολογική φύση των ατομικών τροχιακών, περιγράφοντάς τα με μια ντετερμινιστική θεώρηση. Παρατηρήθηκε επίσης η παρανόηση ότι τα υδρογονικά τροχιακά είναι ακριβή και για τα πολυηλεκτρονικά άτομα.

Σε αυτήν την εργασία επεκτείνουμε την προηγούμενη εργασία μας, προσπαθώντας να πετύχουμε εννοιολογική αλλαγή στους φοιτητές. Αυτό επιδιώκεται με μια ποσοτική μελέτη, κατά την οποία έγιναν συνεντεύξεις με επιλεγμένους φοιτητές, ατομικά ή σε μικρές ομάδες, έτσι ώστε να αλληλεπιδράσουν συντονιζόμενοι από τους ερευνητές. Για να πετύχουμε εννοιολογική αλλαγή, χρησιμοποιήσαμε εποικοδομητικές μεθόδους διδασκαλίας, σύμφωνα με τις οποίες απαιτείται ο δάσκαλος κατ' αρχήν να γνωρίζει τις σχετικές παρανοήσεις των φοιτητών και στη συνέχεια να τις λάβει υπόψη, σχεδιάζοντας και προσαρμόζοντας τη διδασκαλία του. Η εννοιολογική αλλαγή συνίσταται στην αντικατάσταση ή υποκατάσταση των παρερμηνειών με τις σχετικές επιστημονικές έννοιες. Έρευνες έχουν δείξει ότι αυτή η αλλαγή είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί. Έννοιες με βαθιές ρίζες στα νοητικά σχήματα των μαθητών είναι δύσκολο να αντικατασταθούν από άλλα μοντέλα, υπάρχει δηλαδή μια έντονη αντίσταση στην αλλαγή. Η αντικατάσταση και η αναδιοργάνωση των νοητικών σχημάτων απαιτεί οι φοιτητές να έχουν γνωσιακές συγκρούσεις με τα υπάρχοντα μοντέλα (Posner et al., 1982). Οι Strike και Posner (1985) καταγράφουν τέσσερις συνθήκες για την επίτευξη της εννοιολογικής αλλαγής: (i) Η παλιά άποψη να είναι μη ικανοποιητική, να προκαλέσει στον μαθητή *δυσaréσκεια* (dissatisfaction): (ii) Η νέα άποψη να είναι *κατανοητή* (intelligibility): Οι μαθητές πρέπει να μπορούν να αναπαραστήσουν νοερά τη νέα έννοια, να έχει δηλαδή η νέα έννοια έστω κάποιο ελάχιστο νόημα γι' αυτούς. (iii) Η νέα άποψη να είναι *εύλογη* και *αληθοφανής* (plausibility): Η νέα έννοια πρέπει να φαίνεται ότι λύνει προβλήματα που η παλιά δεν μπορούσε. (iv) Η νέα άποψη να είναι *καρποφόρος* (fruitfulness): η νέα έννοια να οδηγεί στην πιθανότητα επιπρόσθετων εφαρμογών, να εμφανίζεται ότι έχει τη δυναμική να είναι ένα παραγωγικό εργαλείο σκέψης.

Μέθοδος

Η έρευνα έγινε σε νεοεισαχθέντες, με το νέο σύστημα (2000), πρωτοετείς φοιτητές των τμημάτων Χημείας (ΤΧ), Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών (ΤΒ) και Επιστήμης και Τεχνολογίας των Υλικών (ΤΥ) του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων τον Οκτώβριο του 2001. Οι νέοι αυτοί φοιτητές είχαν μόλις εισέλθει στο Πανεπιστήμιο και είχαν ήδη αρχίσει μαθήματα χημείας σε αυτό, δεν είχαν όμως διδαχθεί ακόμη την ύλη στην οποία αναφέρεται η έρευνα. Οι γνώσεις λοιπόν που είχαν οι φοιτητές αυτοί προέρχονταν από όσα είχαν διδαχθεί στη γ' λυκείου την προηγούμενη σχολική χρονιά, στα πλαίσια των μαθημάτων της χημείας θετικής κατεύθυνσης.

Εκατόν είκοσι πέντε (125) φοιτητές από τα προαναφερθέντα τμήματα συμμετέσχαν σε μια ποσοτική έρευνα που προηγήθηκε και απάντησαν σε ένα γραπτό ερωτηματολόγιο 14 ερωτήσεων. Από τις 15 ερωτήσεις, οι 5 απαιτούσαν απλή εφαρμογή γνωστών αλγορίθμων στους οποίους οι φοιτητές είχαν ασκηθεί ή ανάκληση γνώσεων, ενώ οι υπόλοιπες 9 ήταν πιο



απαιτητικές και απαιτούσαν νοηματική κατανόηση (Papaphotis & Tsaparlis, 2008a, 2008b). Ακολούθησε μια ποιοτική μελέτη στην οποία έλαβαν μέρος 23 επιλεγμένοι φοιτητές και από τα τρία τμήματα. Οι φοιτητές αυτοί έλαβαν μέρος σε ημιδομημένες συνεντεύξεις, κατά τις οποίες συζητήθηκαν οι εννέα πιο απαιτητικές ερωτήσεις. Οι φοιτητές επελέγησαν με βάση την επίδοσή τους στο γραπτό ερωτηματολόγιο, έτσι ώστε να λάβουν μέρος φοιτητές με διαφορετικές επιδόσεις στο γραπτό ερωτηματολόγιο: φοιτητές με καλή επίδοση γενικά, φοιτητές με καλή επίδοση στις ερωτήσεις ανάκλησης γνώσεων και τις αλγοριθμικές αλλά όχι τόσο καλή επίδοση στις πιο απαιτητικές ερωτήσεις και το αντίθετο. Η συμμετοχή των φοιτητών στις συνεντεύξεις ήταν εθελοντική. Συνολικά, κλήθηκαν 35 φοιτητές, από τους οποίους ανταποκρίθηκαν 23 (12 αγόρια και 11 κορίτσια). Οι συνεντεύξεις έγιναν ατομικά ή σε ομάδες των τριών ή τεσσάρων.

Στόχος μας στις ομαδικές συνεντεύξεις ήταν να φέρουμε αντιμέτωπους φοιτητές που είχαν δώσει αντίθετες απαντήσεις στο γραπτό ερωτηματολόγιο, έτσι ώστε να τους εμπλέξουμε σε μια συζήτηση και να παρακολουθήσουμε την αλληλεπίδρασή τους. Στις συνεντεύξεις αναμείχθηκαν και οι δύο συγγραφείς αυτής της εργασίας. Σε αυτήν την ανακοίνωση παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα σε μια μόνο ερώτηση: *«Είναι δυνατό να βρεθεί το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάστασή του έξω από τον χώρο που ορίζεται ως τροχιακό 1s; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.»* Λεπτομερή δεδομένα για πέντε από τις ερωτήσεις έχουν δημοσιευθεί τελευταία (Tsaparlis & Papaphotis, 2008).

Αποτελέσματα και σχόλια

Πολλοί φοιτητές ήταν δύσκολο να κατανοήσουν την πιθανολογική φύση του τροχιακού. Επιπρόσθετα όρισαν το τροχιακό ως τον χώρο που περικλείεται από το σχήμα του τροχιακού που χρησιμοποιείται κάθε φορά, δηλαδή το σχήμα που αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη πιθανότητα. (ή ακόμη μόνο από την επιφάνεια του σχήματος αυτού): *«Δεν είναι δυνατό [να βρεθεί έξω από το χώρο που ορίζεται ως 1s], διότι το τροχιακό ορίζεται ο χώρος που μπορεί να βρεθεί το ηλεκτρόνιο – είναι βασικά ο χώρος όπου το ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί, δηλαδή οι θέσεις όπου το ηλεκτρόνιο βρίσκεται οριοθετούν το 1s τροχιακό.»*

Αλλά ας δούμε πρώτα μερικά παραδείγματα σωστών απαντήσεων:

- *«Είναι δυνατό. Το τροχιακό είναι ο χώρος μέσα στον οποίο υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να βρεθεί ένα ηλεκτρόνιο. Άρα σε κάποια ειδική περίπτωση είναι δυνατό να μη βρίσκεται στο χώρο (τροχιακό) αυτό»*
- *«Εγώ απάντησα σύμφωνα μ' αυτά που είχαμε μάθει στο λύκειο. Δεν είμαι σίγουρη αν είναι σωστός ο αριθμός που έχω βάλει αλλά είπα ότι η πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο στο χώρο που ορίζεται ως τροχιακό 1s στη θεμελιώδη κατάσταση είναι 95%. Άρα υπάρχει ένα 5% πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο και έξω από το χώρο του τροχιακού 1s στη θεμελιώδη κατάσταση πάντα έστω και αν η πιθανότητα αυτή είναι μικρή, πάντως υπάρχει.»*
- *«Και βέβαια γιατί το ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί οπουδήποτε. Πουθενά η πιθανότητα δεν είναι μηδενική. Άπλα κοντά στον πυρήνα έχει τις περισσότερες πιθανότητες γύρω στα 90 με 97%».*

Ο Στάθης (ομάδα TB2) που είχε γενικά μια πιθανολογική προσέγγιση, είχε μια κριτική στάση απέναντι στην ίδια την ερώτηση, υπογράμμισε επίσης τη διάκριση μεταξύ του τροχιακού και του ηλεκτρονιακού νέφους (ενώ οι έννοιες της πιθανότητας ηλεκτρονίων και της ηλεκτρονιακής πυκνότητας είναι ουσιαστικά ισοδύναμες):

«Ναι, λοιπόν εγώ πιστεύω ότι η παγίδα στην οποία θέλετε να εξετάσετε τους μαθητές είναι αν έχουνη μπερδέψει την έννοια του τροχιακού με την έννοια του ηλεκτρονιακού νέφους. Το τροχιακό είναι ο χώρος στον οποίο υπάρχει πιθανότητα νομίζω 95 ή 99% να βρεθεί το ηλεκτρόνιο, ενώ το ηλεκτρονιακό νέφος από την άλλη όλες οι πιθανές θέσεις τις οποίες μπορεί να λάβει, ξέρω 'γω, το ηλεκτρόνιο. Όποτε από την στιγμή που... εξ ορισμού από αυτό που είπα θεωρώ ότι μπορεί να βρεθεί και έξω από το τροχιακό.»

Η δυσκολία της σύλληψης αυτής της ερώτησης έγινε πολύ προφανής στην περίπτωση του

Παύλου (TX) που έδωσε ατομική συνέντευξη και του ζητήθηκε να ορίσει με μορφή ηλεκτρονιακού νέφους το τροχιακό 1s. (Ο Παύλος είχε χαμηλή επίδοση στο εννοιολογικό τμήμα του γραπτού ερωτηματολογίου.) Στην περίπτωση του, οι εκπαιδευτικοί χρησιμοποίησαν τη θεωρητική γνώση ότι: «*Το ακριβές μέγεθος των τροχιακών δεν μπορεί να παρουσιαστεί, δεδομένου ότι η πιθανότητα της εύρεσης του ηλεκτρονίου δεν γίνεται μηδέν ακόμη και στις μεγάλες αποστάσεις από τον πυρήνα. Αυτό παρουσιάζεται στα σχήματα των τροχιακών με ένα πυκνό ηλεκτρονιακό νέφος κοντά στον πυρήνα, που γίνεται αραιότερο όπως απομακρυνόμαστε από τον πυρήνα.*» Είναι σημαντικό ότι εκείνα τα σημεία που ήταν έξω από τον κύκλο που ζωγράφησε ο Παύλος για «να καθορίσει το τροχιακό», θεώρησε ότι άνηκαν σε άλλα τροχιακά, «*αυτά είναι σε άλλο, ... είναι σε άλλα τροχιακά.*» Ενώ δέχτηκε ότι τα αραιά σημεία σήμαιναν ότι η πιθανότητα για το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται εκεί είναι μικρότερη, αλλά όχι μηδέν, αρνήθηκε μέχρι το τέλος να δεχτεί ότι το ηλεκτρόνιο ήταν ακόμα στο τροχιακό 1s: «*Έξω από τη σφαίρα, όχι, αυτό δεν θα είναι, ή θα είναι σε ένα άλλο τροχιακό.*»

Στην ομαδική συνέντευξη TB3, η Ισιδώρα φαίνεται να έχει μια πιθανολογική θεώρηση, αλλά δεν αναμείχθηκε πάρα πολύ στη συζήτηση της ομάδας. Η Δήμητρα απάντησε επί τη βάσει διηγεμένων καταστάσεων, ενώ η Ιωάννα επί τη βάσει ενεργειών. Αξιοπρόσεκτο εδώ είναι ότι Δήμητρα οδηγήθηκε μόνη της στην αποδεκτή απάντηση, με την επίκληση του σχεδίου που η ίδια είχε κάνει για το άτομο του υδρογόνου (ηλεκτρονιακό νέφος). Επίσης έκανε μια σωστή επέμβαση, συνδέοντας τις ενέργειες και τις αποστάσεις από τον πυρήνα (EP1, EP2: οι δύο ερευνητές):

Δήμητρα: Λέω όχι και λέω ότι για να βρεθεί το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου έξω από τον χώρο που ορίζεται τροχιακό 1s θα πρέπει να είναι σε διηγεμένη κατάσταση, γιατί γνωρίζουμε ότι κάθε τέτοια περιοχή ενός τροχιακού χαρακτηρίζεται και από μια συγκεκριμένη ενέργεια.

EP1: Όταν είναι διηγεμένη χαρακτηρίζεται από 1s ή κάτι άλλο;

Δήμητρα: Κάτι άλλο, ξέρω 'γω να είναι 2s, 3s.

EP1: Η ερώτηση όμως εδώ ρωτά για το 1s.

Δήμητρα: Βέβαια με βάση αυτό που έχω κάνει, που έχω σχεδιάσει πίσω [ερώτηση C0], μάλλον ο χώρος τον οποίο ορίζει το τροχιακό 1s ίσως να είναι και αυτές οι μία δύο κουκίδες στο άπειρο που ουσιαστικά έχω βάλει στο πρώτο. [ερώτηση C0]

EP2: Δηλαδή εννοείς ότι ο χώρος του τροχιακού 1s είναι όλος ο χώρος;

Δήμητρα: Όχι, απλά πιστεύω ότι ναι μεν είναι ένας χώρος, είναι σαν μια κλειστή σφαίρα που ορίζει ένα κάποιο χώρο, αλλά παράλληλα το τροχιακό είναι και αυτά τα υπόλοιπα τα πιθανά σημεία που μπορεί να βρεθεί το ηλεκτρόνιο

EP1: Επομένως οι δύο απαντήσεις σου εσένα στην ερώτηση C0 και στην ερώτηση C4 νομίζεις ότι βρίσκονται σε σύγκρουση;

...Δήμητρα: Όχι, όχι τότε, τώρα θεωρώ ότι είναι το ίδιο πράγμα, οπότε αν ζητούσατε πάλι να την απαντήσω ξανά [ερώτηση C4], θα 'λεγα ότι ναι μπορεί το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου να βρεθεί εκτός του τροχιακού 1s, όπως έχω σχεδιάσει αυτές τις τελίτσες στην 1.

...EP1: Η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου από τι εξαρτάται;

Ιωάννα: Από την απόσταση νομίζω.

...EP1: Ένα ηλεκτρόνιο που είναι στο 1s τροχιακό είναι δυνατό να βρεθεί, είναι δυνατό να είναι πιο μακριά από τον πυρήνα από ένα ηλεκτρόνιο που είναι στο 2s;

Ιωάννα: Σύμφωνα με τον ορισμό του τροχιακού πιστεύω πως ναι είναι δυνατό.



...EPI: Κατ' ουσία να είναι πιο κοντά στον πυρήνα από ό,τι το 1s, κάποια στιγμή δηλαδή το 2s να είναι πιο κοντά στον πυρήνα απ' ό,τι το 1s, κάποια στιγμή, είναι δυνατό αυτό;

Δήμητρα: Στιγμαία, ναι. Σύμφωνα με τον ορισμό του τροχιακού που έχουμε πει, ότι είναι αυτό που έχω σχεδιάσει μπροστά, ότι ναι μεν όσο πλησιάζουμε προς τον πυρήνα τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο εκεί, αλλά αυτό δεν μας αποκλείει ότι μπορούμε να το βρούμε και κάπου προς τα έξω.

Στην ομαδική συνέντευξη ΤΧ, η ομάδα ήταν αντιπροσωπευτική των διαφόρων θεωρήσεων. Έτσι ο Μανώλης, όπως ανέφερθηκε στην αρχή αυτής της ενότητας, έχει την αποδεκτή πιθανολογική προσέγγιση, ο Αντώνης από την άλλη έχει απορρίψει την αρχικά σωστή απάντηση που έδωσε στο γραπτό ερωτηματολόγιο, ενώ η Χριστίνα ενώ αρχικά είχε δώσει λανθασμένη απάντηση, αναφερόμενη σε διηγεμένες καταστάσεις, άλλαξε αμέσως άποψη. Πρέπει στο σημείο αυτό να υπογραμμίσουμε την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης αυτής για την επίτευξη της εννοιολογικής αλλαγής, χρησιμοποιώντας δηλαδή την αλλαγή του μεγέθους του τροχιακού σε σχέση με την τιμή της πιθανότητας εύρεσης του ηλεκτρονίου:

Χριστίνα: Δεν είναι δυνατό γιατί η θεμελιώδης κατάσταση υφίσταται στην υποστιβάδα με την μικρότερη ενέργεια και η 1s έχει την ελάχιστη, άρα σε κάθε άλλη δεν θα είναι θεμελιώδης.

...Χριστίνα: Ναι το υδρογόνο είναι στη θεμελιώδη κατάσταση τέλος πάντων και μας λέει ότι να είναι έξω από το χώρο που ορίζεται ως 1s τροχιακό και, αφού είναι θεμελιώδης εκεί, έχει και την μικρότερη ενέργεια, οπότε δεν μπορεί να πάει σε άλλο τροχιακό επομένως...

EPI: Για να βρεθεί έξω απ' αυτό τον χώρο πρέπει να πάει σε άλλο τροχιακό, συμφωνείς Μανώλη μ' αυτό;

Μανώλης: Όχι, γιατί ο χώρος ας πούμε περιλαμβάνει και το 2s τροχιακό ή ακόμα και το p ή το d τροχιακό.

Χριστίνα: Δεν θα είναι θεμελιώδης όμως, δεν θα είναι θεμελιώδης κατάσταση.

Μανώλης: Ναι δεν θα είναι θεμελιώδης, αλλά το ηλεκτρόνιο κινείται γύρω από μια περιοχή γύρω από το πυρήνα, δηλαδή και αυτό το θέμα το πώς κινείται το ηλεκτρόνιο είναι κάτι σχετικό ας πούμε.

...Μανώλης: Όταν λέμε χώρος τροχιακού ας πούμε είναι κάτι πολύ μεγάλο, ο χώρος που καταλαμβάνει το 1s τροχιακό, κάποιο μέρος του χώρου αυτού καταλαμβάνει και το 2s τροχιακό και πιο ευρύτερα ή και το p τροχιακό.

...EPI: Εντάξει, λοιπόν Αντώνη, σχόλια δικά σου σ' αυτά που άκουσες.

Αντώνης: Το 1s είναι μια σφαίρα μικρή και το 2s είναι μια σφαίρα μεγαλύτερη και το 2s περιέχει το 1s, άρα στο 2s η πιθανότητα θα 'ναι μεγαλύτερη, γιατί καταλαμβάνει μεγαλύτερο χώρο.

[Αυτή είναι μια παρανόηση]

EPI: Ξαναγυρνάμε στην απάντησή σου τώρα.

Αντώνης: Στη θεμελιώδη κατάσταση, όσο μακριά και αν είναι το ηλεκτρόνιο απ' τον πυρήνα, αν είναι σε θεμελιώδη κατάσταση, λέμε ότι είναι στο τροχιακό το 1s.

EPI: Το οποίο έχει καθορισμένη απόσταση, καθορισμένο σχήμα, έτσι; Άρα δεν μπορεί να βρεθεί έξω απ' αυτό;

Αντώνης: Όχι

EPI: Τον ορισμό του τροχιακού πώς τον δίνεις εσύ, πες τον ζανά.

Αντώνης: Είναι ο χώρος που μπορεί να βρεθεί το ηλεκτρόνιο.

EPI: Εσύ τι λες για τον ορισμό του τροχιακού, Μανώλη; Είναι ο χώρος...

Μανώλης: Που υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να βρεθεί ...

EPI: Πόση πιθανότητα μπορούμε να την ορίσουμε αυτήν;

...Χριστίνα: Είναι 95%.

EPI: 95, πού το έχεις ακούσει εσύ αυτό;

Χριστίνα: Στο βιβλίο, απ' ό,τι θυμάμαι στο Λιοδάκη.

EPI: Άρα βάζουμε εμείς, μπορούμε να πούμε και 98 ή όχι; ...Αν θα βάλω 90, φτάνει μέχρι ένα σημείο, αν θα βάλω 95, πάει μέχρι ένα άλλο σημείο.... Αν βάλω 100%, μέχρι πού θα πάει;

Χριστίνα: Στο άπειρο.

EP2: Όλος ο χώρος δηλαδή, άρα αν θα ορίσουμε ένα τροχιακό, έτσι όπως το ορίζουμε ,μειώνουμε τις πιθανότητες. Δεν βάζουμε το 100%.

EP2: Μήπως αυτά που έσβησες τελικά ήταν πιο σωστά από αυτά που έγραψες;

EP1: Τι έσβησες, για προσπάθησε να διαβάσεις εκεί.

Αντώνης: «Το τροχιακό ορίζεται ως ο χώρος με τη μεγαλύτερη πιθανότητα εύρεσης του ηλεκτρονίου, οπότε υπάρχει πάντα μια ελάχιστη πιθανότητα να βρεθεί εκτός του χώρου αυτού» ...Εξαρτάται πώς θα το ορίσουμε το τροχιακό, άμα το ορίσουμε να έχει ένα ορισμένο μέγεθος,, κάπου να σταματάει, τότε υπάρχει μια πολύ μικρή πιθανότητα...

EP1: Άρα πρέπει να τη βάλουμε λιγότερο, αναγκαστικά, οπότε του δίνουμε κάποιο σχήμα. Αφήνουμε την πιθανότητα να βρεθεί έξω σ' αυτή την περίπτωση ας πούμε λέμε 90%, υπάρχει ένα 10% να είναι έξω, άρα ποια είναι η σωστή απάντηση εδώ;

A9: Αυτό που είπε ο Μανώλης.

EP1: Για να δούμε τώρα η Χριστίνα τι μας λέει.

EP1: Δηλαδή όταν λέμε ότι έχει πιθανότητα 90% να βρεθεί, αυτό του δίνει κάποιο σχήμα, σφαιρικό, υπάρχει και ένα 10% να είναι απ' έξω. Συμφωνείς με αυτό;

Χριστίνα: Ναι.

EP1: Και εξακολουθεί να είναι τροχιακό 1s;

Χριστίνα: Εξακολουθεί.

...EP1: Άρα το 2s απ' το 1s τι διαφέρει;

Μανώλης: Διαφέρει στο ότι στο 2s το ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί σε μεγαλύτερη απόσταση από τον πυρήνα με μεγαλύτερες πιθανότητες.

EP1: Με μεγαλύτερη πιθανότητα, συμφωνείς Αντώνη;

Αντώνης: Ναι. ...Αν το είχαμε ορίσει διαφορετικά το τροχιακό, θα υπήρχε διαφορετική πιθανότητα να βρεθεί έξω απ' αυτό.

EP1: ... Δηλαδή αν εγώ το όριζα στο 95%, τι θα άλλαζε από το 90 για το τροχιακό 1s, σχετικά με το χώρο, τι θα άλλαζε;

Αντώνης: Το μέγεθος, θα 'ταν λίγο πιο μεγάλο.

EP1: Πιο μεγάλος ο χώρος, το καταλαβαίνεις αυτό Χριστίνα;

Χριστίνα: Ναι, γιατί όταν λέμε ότι έχουμε 95% πιθανότητα να βρίσκεται το ηλεκτρόνιο έναντι του 90, σημαίνει ότι έχουμε 5% περισσότερο χώρο. [Αυτή είναι μια παρανόηση]

Η μελέτη του σχηματισμού ιόντος όταν το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε άπειρη απόσταση από τον πυρήνα παρέχει μια άλλη ενδιαφέρουσα θεώρηση εννοιολογικής προσέγγισης. Η συνέντευξη με την ομάδα ΤΥ παρέχει ένα παράδειγμα. Στις γραπτές ερωτήσεις, μόνο η Ναταλία εμφανίστηκε να κρατά μια πιθανολογική προσέγγιση, ενώ η Τάνια και Λάμπης έδωσαν λανθασμένες απαντήσεις. Σχετικά με τον σχηματισμό των ιόντων, ο Λάμπης αρχικά σκέφτηκε ότι όταν το ηλεκτρόνιο είναι στο άπειρο, έχουμε τον σχηματισμό του ιόντος, αλλά στη συνέχεια πρόσθεσε μια προϋπόθεση σε αυτό: την παρουσία ενός άλλου ατόμου που χρειάζεται να πάρει το ηλεκτρόνιο:

Λάμπης: ... εφόσον βρίσκεται στο τροχιακό 1s, μπορεί να βρίσκεται και στο άπειρο, αλλά πάλι βρίσκεται στο τροχιακό 1s ούτε σε 2s ούτε σε...

....EP1: ... σχεδιάζουμε κάπου μια σφαίρα και λέμε αυτή τη σφαίρα, τη λέμε τροχιακό 1s..... Μπορεί [το ηλεκτρόνιο] να βρεθεί έξω από αυτή τη σφαίρα και να είναι ακόμη 1s;

Λάμπης: Το ηλεκτρόνιο; Όχι μετά θα είναι ιόν μετά.

EP2: Αφού μπορεί, δεν μπορεί να βρεθεί και στο άπειρο;

Λάμπης: Ναι, αλλά εφόσον εκείνο εκεί πέρα θεωρείται 1s. Δηλαδή αν δεν υπήρχαν άλλα ηλεκτρόνια, άλλα γειτονικά άτομα τα οποία ασκούν δυνάμεις...

EP1: Είπες να είναι ιόν, ιόν είναι - θεωρείται να πάει στο άπειρο, αλλά να πάει στο άπειρο, πότε για μια στιγμή ή για πάντα; ... Αν πάει για πάντα θα έχω ιόν, αν γυρίζει πίσω δεν έχω ιόν.

Λάμπης: Ναι αλλά το ηλεκτρόνιο αυτό πρέπει να πάει κάπου, πρέπει να υπάρχει ένα άλλο γειτονικό άτομο που να χρειάζεται αυτό το ηλεκτρόνιο.



Πολλές φοιτητές είχαν εναλλακτικές ιδέες. Η Μάρθα (TB) έδωσε ατομική συνέντευξη και παρουσίασε πολλές από τις σχετικές εναλλακτικές ιδέες, καθώς επίσης και δυσκολία και αντίσταση στο να δεχτεί την επιστημονική άποψη. Η συνέντευξη άρχισε με τον εκπαιδευτικό να ζητά να παρουσιάσει το πραγματικό τροχιακό $1s$. Ανταποκρίθηκε, κυκλώνοντας τη σκοτεινότερη περιοχή σε ένα σχήμα ηλεκτρονιακού νέφους $1s$, υποθέτοντας ότι το ηλεκτρόνιο $1s$ θα μπορούσε να κινηθεί μόνο στην αντίστοιχη σφαιρική επιφάνεια, αλλά όχι μέσα ή έξω από αυτό το όριο:

Μάρθα: Το ηλεκτρόνιο... νομίζω στην επιφάνεια, γιατί τροχιακό είναι...

EP2: Τι είναι τροχιακό;

Μάρθα: Είναι αυτοί οι τρεις κβαντικοί αριθμοί, n , l m_l που... είναι σ' ένα τρισδιάστατο χώρο, οπότε δεν μπορεί να βρεθεί νομίζω μέσα... που έχει ορισμένο μέγεθος, προσανατολισμό και σχήμα.

EP1: Άρα κινείται μόνο πάνω στην επιφάνεια, άρα έχει καθορισμένη απόσταση απ' τον πυρήνα.

Μάρθα: Ναι.

EP1: Είναι αυτό σύμφωνο με την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg;

... Μάρθα: Ε.. η αρχή της αβεβαιότητας λέει ότι είναι αδύνατος ο προσδιορισμός της θέσης του ηλεκτρονίου, δηλαδή πάμε σύμφωνα με πιθανότητες.

EP2: Ας μιλήσουμε λοιπόν με πιθανότητες, υπάρχει πιθανότητα να το βρω μέσα στη σφαίρα που έχεις ζωγραφίσει;

Μάρθα: Ε.. ανάλογα με την πυκνότητα του ηλεκτρονιακού νέφους; ... Όσο πιο πυκνές... όσο πιο πυκνές είναι οι κουκίδες ...

EP1: Κάθε κουκίδα τι παριστάνει ... έχει σχέση η κουκίδα με το ηλεκτρόνιο;

Μάρθα: Όχι, έχει σχέση γενικότερα με τον χώρο, δηλαδή...

EP1: Δηλαδή κάπου που έχω πολλές κουκίδες, τι σημαίνει αυτό;

Μάρθα: Υπάρχει πιθανότητα να βρεθεί εκεί το ηλεκτρόνιο. ... μας βοηθάει όταν δούμε πάρα πολλές κουκίδες, μεγάλη πυκνότητα, εκεί πέρα ίσως υπάρχει, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα...

EP1: Η κάθε μια κουκίδα τι είναι επομένως;

Μάρθα: Ένα ηλεκτρόνιο; ... Μια πιθανή θέση [για το ηλεκτρόνιο]

Έπειτα από μια μεγάλη περαιτέρω συζήτηση, η Μάρθα δέχτηκε ότι υπάρχει μια πιθανότητα να βρει το ηλεκτρόνιο στο εσωτερικό της σφαίρας και μια μικρή πιθανότητα να το βρει έξω από τη σφαίρα. Αλλά τότε μια νέα περιπλοκή προέκυψε:

EP1: Όταν είναι έξω από την σφαίρα, θα 'ναι στο $1s$, θα εξακολουθεί να είναι στο $1s$ τροχιακό;

Μάρθα: Νομίζω πως φεύγει από το $1s$.

EP1: Αλλά όλη αυτή την ώρα μιλούσαμε για το $1s$.

Μάρθα: Δεν ξέρω, μπορεί και να είναι, μπορεί και να ... είναι κάπου ενδιάμεσα.

Τελικά φθάσαμε σε ένα αδιέξοδο, με τη Μάρθα να καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το ηλεκτρόνιο θα διεγερθεί. (Η άποψη ότι το ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί έξω από τον χώρο που ορίζεται ως το τροχιακό $1s$ μόνο όταν διεγείρεται ήταν πολύ κοινή.) Σημειωτέον ότι σύμφωνα με την απόδοσή της στο γραπτό ερωτηματολόγιο, η Μάρθα είχε υψηλή επίδοση στις αλγοριθμικές ερωτήσεις και χαμηλή στις εννοιολογικές.



Συμπεράσματα και διδακτικές επιπτώσεις

Πολλοί σπουδαστές δυσκολεύονται να καταλάβουν την πιθανολογική φύση της έννοιας του τροχιακού. Επιπλέον προσδιορίζουν το τροχιακό μόνο ως τον χώρο που περικλείεται από το χρησιμοποιούμενο σχήμα για το τροχιακό (ή μόνο την επιφάνεια του σχήματος αυτού), δηλαδή τη μορφή του τροχιακού που αναφέρεται σε μια ορισμένη πιθανότητα. Μια αποτελεσματική προσέγγιση για εννοιολογική αλλαγή ήταν μέσω της αλλαγής του μεγέθους του τροχιακού, σε σχέση με την τιμή της πιθανότητας να βρεθεί εκεί το ηλεκτρόνιο.

Οι έννοιες και οι διαδικασίες της κβαντικής χημείας είναι αφηρημένες και σύνθετες, έτσι η μάθηση είναι δύσκολη χωρίς μια λεπτομερή κατανόηση του θέματος. Διαφορετικά, οι φοιτητές πρέπει να προσφύγουν στη αποστήθιση των ορισμών, των τύπων, και των διαδικασιών. Ο Ausubel (2000) έχει διακρίνει μεταξύ της νοηματικής μάθησης και της μηχανικής μάθησης (αποστήθισης). Σύμφωνα με τον Novak (2002), η νοηματική μάθηση απαιτεί την καλά οργανωμένη δομή της σχετικής γνώσης και έντονη προσπάθεια για να συσχετισθεί η νέα με την υπάρχουσα γνώση. Αντίθετα, η αποστήθιση απαιτεί λίγη σχετική γνώση, χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις οργάνωσης και ελάχιστη ή καμιά προσπάθεια για να συσχετισθεί η νέα με την υπάρχουσα γνώση. Από μια άλλη οπτική, τα ζητήματα που συζητήθηκαν σε αυτήν την εργασία είναι ιδιαίτερα απαιτητικά, απαιτώντας ό,τι έχει ονομαστεί ως ανώτερης τάξεως γνωσιακές ικανότητες (higher-order cognitive skills, HOCS, Zoller & Tsaparlis, 1997).

Αυτή η μελέτη μαζί με άλλες παρόμοιες μελέτες (Tsaparlis & Papaphotis, 2002, Stefani & Tsaparlis, 2008, Στεφανή & Τσαπαρλής, 2009) αποκαλύπτει τη φτωχή κατανόηση των κβαντικών εννοιών (συμπεριλαμβανομένων των μαθηματικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων τους - δείτε Tsaparlis & Papaphotis, 2008), και τον σχηματισμό εναλλακτικών ιδεών και παρερμηνειών. Τα προβλήματα αυτά που προκύπτουν εν μέρει από τα εγχειρίδια και τη διδασκαλία και εν μέρει από την ίδια την φύση της κβαντικής θεωρίας (Bodner, 1991, Fishler & Lichtfeldt, 1992, Tsaparlis & Papaphotis, 2002, Kalkanis, Hadzidaki, & Stavrou, 2003) είναι πολύ σοβαρά. Η παραδοσιακή διδακτική μεθοδολογία διδασκαλίας είναι δύσκολο να τα ξεπεράσει, αντίθετα η εποικοδομητική παιδαγωγική η οποία παρέχει ενεργές και συνεργατικές μορφές μάθησης, και στοχεύει στην εννοιολογική σύγκρουση και την εννοιολογική αλλαγή, φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματική στη μείωση ή στο ξεπέρασμά τους.

Σε αυτήν την μελέτη, υιοθετήσαμε ενεργές μεθόδους διδασκαλίας και μάθησης, με τους φοιτητές να εργάζονται υπό την επίβλεψη και την καθοδήγηση του εκπαιδευτικού, κυρίως όμως με τους σπουδαστές να συνεργάζονται σε μικρές ομάδες για να επιτύχουν έναν ορισμένο κοινό μαθησιακό στόχο. Ερευνητικά δεδομένα υποστηρίζουν ότι αυτές οι μέθοδοι παρέχουν ένα καλύτερο μαθησιακό περιβάλλον και συμβάλλουν στη βαθύτερη κατανόηση και την ανάπτυξη ικανοτήτων μάθησης (Duncan-Hewitt, Mount & Apple, 1995, Johnson, Johnson, & Smith, 1991, Stamovlasis, Dimos & Tsaparlis, 2006).

Βιβλιογραφία

Παπαφώτης Γ. & Τσαπαρλής Γ. (2003). «Παρανοήσεις μαθητών γ' λυκείου στις έννοιες της κβαντικής χημείας», Πρακτικά 1^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου της «Ενωσης για την Διδακτική των Φυσικών Επιστημών (ΕΔΙΦΕ)» σσ. 715 – 720, Εκδόσεις Γρηγόρη, Αθήνα.

Παπαφώτης Γ. & Τσαπαρλής Γ. (2004). «Μοντέλα ατομικής δομής στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση». Πρακτικά 4^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου «Διδακτική Φυσικών Επιστημών και Νέες Τεχνολογίες στην Εκπαίδευση», σσ. 41 – 49, Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Παπαφώτης Γ. & Τσαπαρλής Γ. (2005). «Προβλήματα και παρανοήσεις κατά τη διδασκαλία κβαντομηχανικών εννοιών στη Χημεία Γ' Λυκείου». Πρακτικά του 20^{ου} Συνεδρίου Χημείας της ΕΕΧ, σ. 129, Ιωάννινα.



Στεφανή Χ. & Τσαπαρλής Γ. (2009). Επίπεδα εξηγήσεων και επίπεδα μοντέλων στις βασικές έννοιες της κβαντικής χημείας. 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο «Διδακτική Φυσικών Επιστημών και Νέες Τεχνολογίες στην Εκπαίδευση», Φλώρινα.

Ausubel, D. P. (2000). *The Acquisition and retention of knowledge: A cognitive view*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic.

Bodner, G.M. (1991). I have found you an argument – The conceptual knowledge of beginning chemistry graduate students. *Journal of Chemical Education*, 68, 385-388.

Coll, R.K., & Treagust, D.F. (2001). Learners' mental models of chemical bonding. *Research in Science Education*, 31, 357-382.

Coll, R. K., & Treagust, D. F. (2002). Exploring tertiary students' understanding of covalent bonding. *Research in Science and Technological Education*, 20, 241-267.

Duncan-Hewitt, W.; Mount, D. L.; Apple, D. A. (1995). *A handbook on cooperative learning*, 2nd ed. Corvallis, OR: Pacific Crest.

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

Harrison, A.G. & Treagust, D.F. (2000). Learning about atoms, molecules, and chemical bonds: A case study of multiple-model use in grade 11 chemistry. *Science Education*, 84, 352-381.

Ireson, G. (2001). In: *Research in science education – Past, present, and future* (pp. 83-88). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.

Johnson, D.W.; Johnson, R. T.; Smith, K. A. (1991). *Active learning cooperation in the learning classroom*; Edina, MN: Interaction Book Co.

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

Nakiboglu, C. (2003). Instructional misconceptions of Turkish prospective chemistry teachers about atomic orbitals and hybridization, *Chemistry Education Research and Practice*, 4, 171-188.

Novak, J.D., (2002). Meaningful learning: The essential factor for conceptual change in limited or inappropriate propositional hierarchies leading to empowerment of learners. *Science Education*, 86, 548-571.

Olsen, R. V. (2001). A study of Norwegian upper secondary physics specialists' understanding of quantum physics. Paper presented at the 3rd ESERA Conference, Thessaloniki, Greece.

Papaphotis G. & Tsaparlis G. (2008a). Conceptual versus algorithmic learning in high school chemistry: the case of basic quantum chemical concepts, Part 1. Statistical analysis of a quantitative study. *Chemistry Education Research and Practice*, 8 (4) 323-331.

Papaphotis G. & Tsaparlis G. (2008b). Conceptual versus algorithmic learning in high school chemistry: the case of basic quantum chemical concepts, Part 2. Students' common errors, misconceptions, and difficulties in understanding. *Chemistry Education Research and Practice*, 8 (4) 332-340.

Posner, G.J., Strike, K.A., Hewson, P.W., & Gertzog, W.A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.

Stamovlasis, D., Dimos, A., Tsaparlis, G. (2006). A study of group interaction processes on learning lower secondary physics. *Journal of Research in Science Teaching*. 43, 556-576.



- Stefani Ch. & Tsaparlis G. (2008). Students' levels of explanations, models, and misconceptions in basic quantum chemistry: a phenomenographic study. *Journal of Research in Science Teaching*, Έχει γίνει η δεκτή για δημοσίευση (30-06-2008).
- Strike, K. A.; Posner, G. J. (1985). In *Cognitive structure and conceptual change*. L. West, & A. Pines (Eds.). Academic Press.
- Taber, K.S. (2001). Building the structural concepts of chemistry: Some considerations from educational research. *Chemistry Education Research and Practice*, 2, 123-158.
- Taber, K.S. (2002a). Conceptualizing quanta - Illuminating the ground state of student understanding of atomic orbitals. *Chemistry Education Research and Practice*, 3, 145-158.
- Taber, K.S. (2002b). Compounding quanta – Probing the frontiers of student understanding of molecular orbitals. *Chemistry Education Research and Practice*, 3, 159-173.
- Taber, K. S. (2005). Learning quanta: Barriers to stimulating transitions in student understanding of orbital ideas. *Science Education*, 89, 94-116.
- Tsaparlis, G. (1997). Atomic orbitals, molecular orbitals and related concepts: Conceptual difficulties among chemistry students. *Research in Science Education*, 27, 271-287.
- Tsaparlis, G., & Papaphotis, G. (2002). Quantum-chemical concepts: Are they suitable for secondary students? *Chemistry Education Research and Practice*, 3, 125-144.
- Tsaparlis G. & Papaphotis G. (2008). High-School Students' Conceptual Difficulties and Attempts at Conceptual Change: The Case of Basic Quantum Chemical Concepts. *International Journal of Science Education*, 1-36 IFirst article (DOI: 10.180/09500690801891908)
- Zoller, U. (1990). Students' misunderstandings and misconceptions in college freshman chemistry (general and organic). *Journal of Research in Science Teaching*, 27, 1053-1065.
- Zoller, U., & Tsaparlis, G. (1997). Higher and lower-order cognitive skills: The case of chemistry. *Research in Science Education*, 27, 117-130.