

Προβληματισμοί σχετικά με τη διδακτική προσέγγιση των χημικών αλλαγών

Παπαγεωργίου Γ.

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, gparageo@eled.duth.gr

Παρά το γεγονός ότι οι χημικές αλλαγές διδάσκονται σε αρκετές τάξεις στο σύνολο των βαθμίδων της εκπαίδευσης, οι μαθητές εμφανίζονται να έχουν πολλές δυσκολίες, τόσο στην ερμηνεία, όσο και στην αναγνώρισή τους. Η εργασία θέτει προβληματισμούς σχετικά με τους λόγους που οδηγούν στο να υπάρχει σήμερα ένας αυξημένος βαθμός δυσκολίας, τόσο στην κατανόηση, όσο και στη διδακτική προσέγγιση των χημικών αλλαγών και αναζητά διεξόδους.

Εισαγωγή

Στο σύνολο των φαινομένων που διαχειρίζεται διδακτικά ο χώρος των Φυσικών Επιστημών, τα χημικά φαινόμενα εμφανίζονται να έχουν ένα μεγάλο βαθμό δυσκολίας, τόσο ως προς την ερμηνεία τους, όσο και ως προς την απλή αναγνώρισή τους από τους μαθητές ή και τους φοιτητές σχεδόν όλων των βαθμίδων της εκπαίδευσης. Ακόμη και αυτή καθαυτή η ιδέα της χημικής αλλαγής φαίνεται να είναι απόμακρη για τους περισσότερους μαθητές, ιδιαίτερα αυτούς των πρώτων βαθμίδων της εκπαίδευσης.

Αν και οι δυσκολίες των μαθητών στην κατανόηση των χημικών αλλαγών, όπως αυτές παρουσιάζονται στις αντίστοιχες έρευνες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια (π.χ. Andersson 1990, Johnson 2002, Papageorgiou et al. 2009), δεν είναι πάντα συνάρτηση της ηλικίας, ωστόσο θα μπορούσε κανείς να τις καταγράψει και να τις μελετήσει προσεγγιστικά σε μια ηλικιακή βάση. Έτσι, στις μικρές ηλικίες (περίπου 11-12 ετών) διαπιστώνεται γενικά ότι η χημική αλλαγή δεν αναγνωρίζεται καν από τους μαθητές. Τα παιδιά, είτε δεν δέχονται ότι άλλαξε κάτι στη διάρκεια ενός τέτοιου φαινομένου, είτε αν το δεχθούν, αυτό περιορίζεται σε φαινομενολογικά στοιχεία, όπως το χρώμα του υλικού ή το σχήμα του αντικειμένου που το περιέχει. Σε μεγαλύτερες ηλικίες, οι μαθητές «αντιλαμβάνονται» ότι κάτι άλλαξε κατά τη διάρκεια των χημικών αλλαγών, αλλά αυτό συνήθως έχει σχέση με κάποια φυσική αλλαγή. Οι προσεγγίσεις που κάνουν οι μαθητές σ' αυτό το στάδιο είναι περιγραφικές και όχι ερμηνευτικές. Σ' ένα επόμενο στάδιο οι μαθητές προχωρούν σε ερμηνείες, αλλά και πάλι αυτές κινούνται στο χώρο των φυσικών αλλαγών. Προσεγγίσεις που ερμηνεύουν τις χημικές αλλαγές πράγματι ως χημικές, εμφανίζονται σιγά - σιγά, αλλά πρόκειται συνήθως για ελλιπείς και μονόπλευρες ερμηνείες. Οι χημικές ουσίες για παράδειγμα, που λαμβάνουν μέρος σε ένα χημικό φαινόμενο και μακροσκοπικά δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές (π.χ. το οξυγόνο στις καύσεις), δεν συμμετέχουν συνήθως στα ερμηνευτικά σχήματα των μαθητών. Όσο για την πλήρη ερμηνεία των χημικών φαινομένων, αυτή συνήθως απουσιάζει ακόμη και από προσεγγίσεις μαθητών της τελευταίας τάξης της Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης (Solsona et al., 2003). Ακόμη και φοιτητές που έχουν διδαχθεί Χημεία στο Πανεπιστήμιο, φτάνουν σ' αυτό το ερμηνευτικό επίπεδο μόνο σ' ένα μικρό ποσοστό (Ahtee & Varjola, 1998).

Η έννοια της ερμηνείας μιας χημικής αλλαγής

Μέσα από αυτή την ηλικιακή προσέγγιση, η ίδια η έννοια της ερμηνείας μιας χημικής αλλαγής φαίνεται να μην είναι απόλυτη. Δεν μπορεί δηλαδή, να περιμένει κανείς την ίδια προσέγγιση από ένα μαθητή δημοτικού και από ένα φοιτητή στην τριτοβάθμια εκπαίδευση -



διαφέρει το συνολικό πλαίσιο προσέγγισης, τα σημεία εστίασης, το επίπεδο ανάλυσης, κ.λ.π (π.χ. Taber 2001, Coll & Treagust 2001, Cokelez et al. 2008, Johnson & Parageorgiou 2009). Αν και σ' αυτήν την περίπτωση, επίσης δεν υπάρχουν σαφείς διαχωριστικές γραμμές, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε τρία βασικά επίπεδα προσέγγισης:

- Σ' ένα πρώτο εισαγωγικό επίπεδο, που αναφέρεται στις μικρότερες από τις ηλικίες που μπορεί να διδαχθεί η χημική αλλαγή, το επίκεντρο είναι η ίδια η ιδέα της χημικής αλλαγής. Μια ικανοποιητική ερμηνεία θα έπρεπε να συνδυάζει τις μακροσκοπικές αλλαγές που συμβαίνουν στις ιδιότητες των ουσιών που μετέχουν στο φαινόμενο, με τις αντίστοιχες μικροσκοπικές αλλαγές που συμβαίνουν στις δομές τους. Στο μακροσκοπικό επίπεδο η έμφαση είναι στην κατανόηση της μετατροπής των προϋπαρχόντων ουσιών σε άλλες νέες ουσίες. Στο μικροσκοπικό επίπεδο δεν ασχολούμαστε με την υπόσταση του ατόμου ή του ιόντος, αυτών καθ'αυτών, αλλά με την αναδιοργάνωσή τους. Οι έννοιες του μορίου και της γιγάντιας δομής δεν έχουν ιδιαίτερο νόημα.
- Σ' ένα δεύτερο επίπεδο προσέγγισης, που περισσότερο ταιριάζει με τα δεδομένα της ελληνικής δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, οι χημικές αλλαγές προσεγγίζονται έρα από το μακροσκοπικό επίπεδο, στο μικροσκοπικό και το ηλεκτρικό επίπεδο. Η έμφαση βρίσκεται στα δύο τελευταία, από τα οποία, το ηλεκτρικό προσεγγίζεται με βάση απλά πρότυπα για τη δομή του ατόμου (Bohr). Το άτομο και το ιόν αντιμετωπίζονται πλέον ως χωριστές οντότητες. Δίνεται έμφαση στους δεσμούς και στη διάκρισή τους σε ιοντικούς και μοριακούς. Οι έννοιες του μορίου και των γιγάντιων δομών έχουν πλέον νόημα.
- Σ' ένα τρίτο επίπεδο που σχετίζεται πιο πολύ με την τριτοβάθμια εκπαίδευση, οι χημικές αλλαγές εστιάζονται περισσότερο στις ενεργειακές μεταβολές των δεσμών που υπολογίζονται με βάση τη σύγχρονη κβαντική θεώρηση, όπως για παράδειγμα, στην περίπτωση της δημιουργίας μοριακών τροχιακών από ατομικά τροχιακά.

Οι μαθητές, τόσο της πρωτοβάθμιας, όσο και της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, δυσκολεύονται να ερμηνεύσουν τις χημικές αλλαγές ακόμη και σε σχέση με το πρώτο από τα παραπάνω επίπεδα προσέγγισης. Όπως αναφέρουν χαρακτηριστικά οι Liu και Lesniak (2006), μπορεί η ιδέα της χημικής αλλαγής να αρχίσει να αναπτύσσεται από την ηλικία περίπου των 11 ετών, αλλά η ικανότητά των μαθητών να ερμηνεύουν χημικά φαινόμενα, έστω και στοιχειωδώς, δεν ξεκινά νωρίτερα από τα 14 τους χρόνια. Θεωρώντας λοιπόν, το πρώτο αυτό επίπεδο ερμηνείας ως ουσιώδους σημασίας, θα αναπτυχθεί στη συνέχεια ένας προβληματισμός σχετικά με τις δυσκολίες που υπάρχουν στη διδακτική προσέγγιση των χημικών αλλαγών σε σχέση με αυτό το επίπεδο.

Δυσκολίες στη διδασκαλία των χημικών αλλαγών

Γιατί λοιπόν, ενώ οι μαθητές διδάσκονται στις δύο πρώτες βαθμίδες της εκπαίδευσης τις χημικές αλλαγές, η διδασκαλία αυτή δεν φαίνεται να είναι αποτελεσματική ως προς την ικανοποιητική ερμηνεία των αλλαγών, ακόμη και σε σχέση με το πρώτο από τα παραπάνω επίπεδα;

1. Αδυναμία συστηματικής ομαδοποίησης

Η μεγαλύτερη ίσως διαφορά μεταξύ χημικών και φυσικών αλλαγών σε σχέση με τον τρόπο διδασκαλίας τους, είναι ότι στις χημικές αλλαγές δεν υπάρχουν σαφή πλαίσια ομαδοποίησής τους και ένας ενιαίος συστηματικός τρόπος προσέγγισής τους. Για παράδειγμα, το σύνολο των φυσικών αλλαγών που διδάσκονται στις δύο πρώτες βαθμίδες της εκπαίδευσης

μπορεί να ομαδοποιηθεί σε: αλλαγές κατάστασης (τήξη-πήξη, εξάτμιση, βρασμός και συμπύκνωση), διάλυση και λιγότερο συστολή-διαστολή. Κάτι αντίστοιχο δεν μπορεί να γίνει με τις χημικές αλλαγές. Στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση γίνεται βέβαια μια προσπάθεια, ταξινομώντας τις χημικές αντιδράσεις σε σύνθεσης, αποσύνθεσης, απλής αντικατάστασης, διπλής αντικατάστασης και πολύπλοκης μορφής. Αυτή όμως η ταξινόμηση δε διευκολύνει στην ουσία, γιατί αφορά μόνο απλές χημικές αλλαγές (χημικές αντιδράσεις), γίνεται στην πράξη με κριτήριο την μορφή της αντίστοιχης εξίσωσης (κάτι που επιπλέον προϋποθέτει χρήση συμβολισμού), ενώ οι αντιδράσεις που χαρακτηρίζονται ως πολύπλοκης μορφής και δεν εντάσσονται σε κανένα ενιαίο σχήμα, είναι και η πλειονότητα.

2. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε χημικής αλλαγής

Αφού λοιπόν κάθε χημική αλλαγή χρειάζεται μια ιδιαίτερη διδακτική προσέγγιση, από ποια θα ήταν σκόπιμο να ξεκινήσει κανείς σε μια πρώτη προσπάθεια ερμηνείας; Αν ανατρέξουμε σε αντίστοιχες προσπάθειες διδακτικών προσεγγίσεων που έχουν κατά καιρούς γίνει σε ερευνητικό επίπεδο (π.χ. Abraham et al. 1992, Ahtee & Varjola, 1998, Johnson 2002, Solsona et al. 2003, Ardac & Akaygun 2005, Παπαγεωργίου & Γκαβάκη, 2008), μπορούμε να έχουμε μια γενική εικόνα για τις χημικές αλλαγές που συνήθως χρησιμοποιούνται και για τα αντίστοιχα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι η μελέτη της καύσης με τη χρήση ενός κεριού. Στην περίπτωση αυτή, οι αλλαγές γίνονται σε μοριακές ουσίες, κάτι που διευκολύνει στην ερμηνεία τους, αλλά η συνολική πορεία είναι πολύπλοκη περιλαμβάνοντας αρκετές επιμέρους φυσικές και χημικές αλλαγές.

Μια άλλη συχνά μελετώμενη περίπτωση είναι αυτή της οξειδωσης ενός μετάλλου, με πιο συνηθισμένη το σκούριασμα του σιδήρου (συνήθως σε καρφί). Αν και το φαινόμενο της δημιουργίας σκουριάς είναι στην ουσία περίπλοκο, συνήθως παρουσιάζεται υπεραπλουστευμένο ως μια απλή οξειδωση. Ακόμη όμως και σ' αυτήν την προσέγγιση, η δυσκολίες είναι πολλές, αφού θα πρέπει κανείς να διαχειριστεί έννοιες ιοντικών κρυστάλλων. Για να παρακαμφτεί αυτό, μπορεί βέβαια να δουλέψει με μεμονωμένες δομικές μονάδες σε επίπεδο ατόμων, χάνοντας όμως έτσι στην ολότητα του φαινομένου. Παρόμοιες είναι οι περιπτώσεις της οξειδωσης του χαλκού και της καύσης του μαγνησίου.

Η θέρμανση της ζάχαρης είναι μια ακόμη χρησιμοποιούμενη περίπτωση χημικής αλλαγής. Και στην περίπτωση αυτή, το συνολικό φαινόμενο είναι περίπλοκο, περιλαμβάνοντας αντιδράσεις καραμελοποίησης, αλλά συνήθως εξετάζεται η απλοποιημένη θερμική διάσπασή της σε άνθρακα και νερό. Οι αλλαγές που περιλαμβάνονται σ' αυτήν την περίπτωση είναι μοριακές, αλλά η ίδια η ζάχαρη ως δομή δεν είναι απλή, ενώ η συνολική πορεία περιλαμβάνει και παράλληλα φυσικά φαινόμενα.

Δύο ακόμη χημικές αλλαγές, που μάλιστα χρησιμοποιήθηκαν σε βιβλία της πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης στο παρελθόν, είναι η σύνθεση του θείουχου σιδήρου και η ηλεκτρόλυση του νερού. Πρόκειται για αλλαγές που μπορούν να περιγραφούν ως απλές χημικές αντιδράσεις, αλλά στην ουσία έχουν αυξημένη πολυπλοκότητα. Η πρώτη περιλαμβάνει τη δημιουργία ιοντικών κρυστάλλων, ενώ ο μηχανισμός της δεύτερης είναι ιδιαίτερα περίπλοκος.

Παρά το γεγονός ότι οι παραπάνω περιπτώσεις αντιδράσεων είναι απλούστερες σε σχέση με άλλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δεύτερο χρόνο (αντιδράσεις εξουδετέρωσης, επιδράσεις οξέων σε μέταλλα, κ.λ.π.), κοινός τόπος για όλες είναι, ότι έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, γεγονός που καθιστά την καθεμιά τους μια ανεξάρτητη περίπτωση.



3. Οι πολλές προϋποθέσεις σε πρότερες γνώσεις

Πέρα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε χημικής αλλαγής, η συνολική προσέγγισή τους προαπαιτεί αρκετές ακόμη γνώσεις. Καταρχήν, για να καταλάβει κανείς τις αλλαγές στη δομή των ουσιών που συμβαίνουν στη διάρκεια των χημικών φαινομένων, θα πρέπει πρώτα να έχει καταλάβει την ίδια τη δομή των ουσιών. Πέρα από αυτό όμως, θα πρέπει να κατανοήσει και τα φυσικά φαινόμενα που συνήθως εξελίσσονται πριν ή και παράλληλα με τα χημικά. Ακόμη, με εξαίρεση ίσως τις περιπτώσεις διάσπασης, μια διαδικασία ανάμιξης προηγείται πάντα των χημικών φαινομένων. Επομένως, η πορεία προσέγγισης των χημικών αλλαγών περνάει μέσα από θέματα δομής των ουσιών, θέματα που αφορούν στις αλλαγές κατάστασης των ουσιών, θέματα μίξης των ουσιών (διαφοροποίηση μίγματος και χημικής ένωσης) και καταλήγει στις ίδιες τις αλλαγές των ουσιών.

Ακόμη, σημαντικό είναι να αναλογιστεί κανείς, ότι η όποια ερμηνεία μιας χημικής αλλαγής, ακόμη και σ' ένα πρώτο επίπεδο, προϋποθέτει διδακτική προσέγγιση σε μικροσκοπικό επίπεδο με βάση την αναδιοργάνωση των ατόμων (σωματιδίων γενικότερα). Αυτό σημαίνει πρακτικά, ότι θα πρέπει να μιλήσει κανείς για κατάργηση και δημιουργία δεσμών, έννοιες που προβληματίζουν ιδιαίτερα τους μαθητές. Η δημιουργία μάλιστα ενός νέου δεσμού φαίνεται να είναι ακόμη πιο απόμακρη έννοια συγκριτικά με την κατάργηση ενός προϋπάρχοντος δεσμού, γεγονός που αντανακλά και τη δυσκολία των μαθητών στην ιδέα της δημιουργίας νέων ουσιών κατά τη διάρκεια μιας χημικής αλλαγής (Παπαγεωργίου & Γκαβάκη, 2008).

4. Η αυξημένη πολυπλοκότητα των χημικών αλλαγών

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ακόμη και οι απλούστερες από τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες διδακτικά χημικές αλλαγές έχουν πολλές ιδιαιτερότητες, που τις περισσότερες φορές τις καθιστούν πολύπλοκες. Για παράδειγμα, η πιο συνηθισμένη περίπτωση της καύσης του κεριού έχει μια αυξημένη πολυπλοκότητα, ακόμη κι αν θεωρήσουμε την απλή περίπτωση με 18 άνθρακες στην αλυσίδα του μορίου του κεριού. Αυτή καταρχήν οφείλεται στην εξέλιξη των αλλαγών κατάστασης του κεριού (από την στερεή μέχρι και την αέρια κατάσταση) και την ανάμιξη των ατμών του με το οξυγόνο του αέρα, πριν από την καθαυτή διαδικασία της καύσης. Ακόμη, το γεγονός ότι το οξυγόνο του αέρα είναι κάτι που ο μαθητής δεν μπορεί να δει, έχει πολύ συχνά ως αποτέλεσμα τον μη συνυπολογισμό του στη διαδικασία της αλλαγής (Liu & Lesniak 2006, Papageorgiou et al. 2009). Επιπλέον, ο αριθμός των διαφορετικών δεσμών που προϋπάρχουν (άνθρακα- άνθρακα, άνθρακα-υδρογόνου και οξυγόνο-οξυγόνο) στα μόρια του κεριού και του οξυγόνου, σε σχέση με τους δεσμούς οξυγόνου-υδρογόνου και άνθρακα-οξυγόνου στα μόρια νερού, διοξειδίου ή μονοξειδίου του άνθρακα που δημιουργούνται (ανάλογα, για τις περιπτώσεις τέλει ή ατελούς καύσης) ή και την παραγωγή αιθάλης (άνθρακα), δυσκολεύουν τους μαθητές (Παπαγεωργίου & Γκαβάκη, 2008).

Γενικότερα υπάρχει μια δυσκολία στην επιλογή απλών χημικών αλλαγών για διδακτικούς σκοπούς, εξαιτίας αυτής της πολυπλοκότητας. Αν κάποιος επιλέξει χημικές αλλαγές που μπορεί να εντάσσονται στις καθημερινές εμπειρίες ενός μαθητή (όπως το παραπάνω παράδειγμα της καύσης του κεριού) ή στις οποίες περιλαμβάνονται γνωστές/προσιτές στο μαθητή ουσίες (όπως η περίπτωση της θέρμανσης της ζάχαρης), αυτές συνήθως εξελίσσονται με πολύπλοκο τρόπο. Αν πάλι επιλέξει απλές χημικές αντιδράσεις (όπως η σύνθεση του θειούχου σιδήρου), τόσο οι ουσίες, όσο και η όλη διαδικασία δεν είναι συνήθως οικεία στους μαθητές, κάτι που τους κάνει να τις βλέπουν αποκομμένα από την καθημερινότητα, δυσκολεύοντας έτσι την προσέγγισή τους.



Πιθανολογώντας διεξόδους

Αν αναζητήσει κανείς διεξόδους διαφυγής από την κατάσταση που περιγράφεται παραπάνω, είναι σίγουρο ότι δεν θα βρει «μαγικές συνταγές». Ωστόσο, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι οι χημικές αλλαγές είναι το απώτερο στάδιο μιας πιθανής διδακτικής προσέγγισης που αναφέρεται στη δομή των ουσιών και των αλλαγών τους. Το πρωταρχικό είναι η κατάκτηση της ίδιας της έννοιας της ουσίας, ενώ η κατανόηση των φυσικών αλλαγών είναι επίσης προαπαιτούμενο. Από την άλλη, αν η προσέγγιση αυτή θέλουμε να περιέχει σημαντικά ερμηνευτικά χαρακτηριστικά, θα πρέπει να είναι συνυφασμένη με την ανάλυση του φαινομένου σε μικροσκοπικό επίπεδο και την αντιστοίχιση των αλλαγών των μικροσκοπικών συμπεριφορών με τις αλλαγές στις ιδιότητες των ουσιών.

Συνεπώς, αυτό που ενδεχομένως θα βοηθούσε, είναι ίσως ένα ανασχεδιασμένο αναλυτικό πρόγραμμα των δύο πρώτων βαθμίδων της εκπαίδευσης, που θα ξεκινά με την μακροσκοπική - μικροσκοπική προσέγγιση της ίδιας της έννοιας της ουσίας από μικρή ηλικία. Έτσι, θα μπορούσαν να ερμηνευτούν αρχικά οι ιδιότητες των διαφόρων ουσιών και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν αυτές για να γίνουν ερμηνείες φυσικών φαινομένων. Στη συνέχεια θα μπορούσε να γίνει και μια πρώτη ερμηνευτική προσέγγιση των χημικών αλλαγών πριν από την αποχώρηση του μαθητή από την Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση. Αν η προσέγγιση αυτή συνεχιζόταν σταδιακά και στις πρώτες τάξεις της Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης, με όσο το δυνατόν περισσότερες αναλύσεις χημικών αλλαγών, τότε οι πιθανότητες να γίνουν κατανοητές οι χημικές αλλαγές θα ήταν ιδιαίτερα αυξημένες.

Βιβλιογραφία

Παπαγεωργίου, Γ., & Γκαβάκη, Λ. (2008). Αναγνώριση και ερμηνεία χημικών φαινομένων από μαθητές Στ' Δημοτικού. *Θέματα Επιστημών και Τεχνολογίας στην Εκπαίδευση*, 1(2), 123-142.

Abraham, M. R., Gizybowski, E. B., Renner, J. W., & Marek, E. A. (1992). Understandings and misunderstandings of eighth graders of five chemistry concepts found in textbooks. *Journal of research in science teaching*, 29(2), 105-120.

Ahtee, M., & Varjola, I. (1998). Students Understanding of Chemical Reaction. *International Journal of Science Education*, 20, 305-316

Andersson, B. (1990), Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). *Studies in science education*, 18, 53-85

Ardac, D., & Akaygun, S. (2005). Using static and dynamic visuals to represent chemical change at molecular level. *International Journal of Science Education*, 27 (11), 1269-1298

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

Cokelez, A., Dumon, A., & Taber, K.S. (2008). Upper secondary French students' chemical transformation and the 'Register of models': A cross-sectional study. *International Journal of Science Education*, 30(6), 807-836.

Johnson, P. M., & Papageorgiou, G. (2009). Rethinking the introduction of particle theory: A substance-based framework. *Journal of research in science teaching*, in press.

Johnson, P. (2002). Children's understanding of substances, part 2: explaining chemical change. *International journal of science education*, 24(10), 1037-1054



Liu, X., & Lesniak, K. (2006). Progression in children's understanding of the matter concept from elementary to high school. *Journal of research in science teaching*, 43(3), 320-347

Papageorgiou, G., & Johnson, P. (2005). Do particle ideas help or hinder pupils' understanding of phenomena? *International journal of science education*, 27, 11, 1299-1317.

Papageorgiou, G., Grammatikopoulou, M., & Johnson, P.M. (2009) Helping pupils to explain chemical phenomena - Eliciting particle ideas using software. Submitted for publication.

Solsona, N. J., Izquierdo, M., & De Jong, O. (2003). Exploring the development of students' conceptual profiles of chemical change. *International journal of science education*, 25(1), 3-12

Taber, K.S. (2001). Building the structural concepts of Chemistry: Some considerations from educational research. *Chemistry Education Research and Practice*, 2(2), 123-158.