



Η Αξιοποίηση των νοητικών πειραμάτων στη διδασκαλία των θεωριών της Φυσικής του 20^{ου} αιώνα σε μαθητές του Λυκείου. Η περίπτωση «του ανελκυστήρα του Αϊνστάιν».

Βελέντζας Α., Χαλκιά Κ., Σκορδούλης Κ.

Υποψ. Δρ. Π.Τ.Δ.Ε. Παν/μιου Αθηνών, avelentz@gmail.com

Π.Τ.Δ.Ε. Παν/μιου Αθηνών, kxalkia@primedu.uoa.gr, kskordul@primedu.uoa.gr

Σε αυτή την εργασία διερευνάται κατά πόσο το νοητικό πείραμα (ΝΠ) «ο ανελκυστήρας του Αϊνστάιν» μπορεί να βοηθήσει αποτελεσματικά τους μαθητές του Λυκείου να προσεγγίσουν την «αρχή της ισοδυναμίας» και κάποιες από τις συνέπειές της. Αυτή η έρευνα είναι μία ποιοτική έρευνα στην οποία καταγράφονται οι διαδικασίες μάθησης κατά τη διδασκαλία της «αρχής της ισοδυναμίας» με τη βοήθεια του ΝΠ, στη μορφή που αυτό παρουσιάζεται σε βιβλία εκκλαίκευσης της Φυσικής από τον ίδιο τον Αϊνστάιν. Προέκυψε ότι οι μαθητές του Λυκείου, με αφετηρία την εμπειρία τους και με τη βοήθεια του ΝΠ «ο ανελκυστήρας του Αϊνστάιν», είναι δυνατόν να οδηγηθούν στη διατύπωση της «αρχής της ισοδυναμίας», να δίνουν εξηγήσεις σε φαινόμενα με βάση την αρχή αυτή και να συμπεραίνουν ότι η καμπύλωση του φωτός από τη δράση πεδίων βαρύτητας προκύπτει ως άμεση συνέπεία της.

Εισαγωγή

Τα νοητικά πειράματα (ΝΠ) έχουν χρησιμοποιηθεί από κορυφαίους επιστήμονες, όπως ο Γαλιλαίος, ο Νεύτωνας και ο Αϊνστάιν, των οποίων οι εργασίες αποτέλεσαν σταθμούς στην εξέλιξη και την ανάπτυξη της Φυσικής. Κατά τον Brown (1991, 2006) τα ΝΠ τα αναγνωρίζουμε όταν τα συναντούμε, μπορούμε να τα περιγράψουμε, αλλά είναι δύσκολο με ακρίβεια να πούμε τι ακριβώς είναι. Σύμφωνα με αυτόν μεταφορικά μπορούμε πούμε ότι τα ΝΠ είναι πειράματα που διεξάγονται «στο εργαστήριο του μυαλού» επειδή είναι αδύνατο για διαφόρους λόγους να γίνουν στην πραγματικότητα. Μερικά μόνο χαρακτηριστικά παραδείγματα ΝΠ αποτελούν «ο συνδεμένες μπάλες» του Γαλιλαίου που εκτελούν ελεύθερη πτώση (Galileo 1638/1914), «ο κάδος» και «το κανόνι» του Νεύτωνα (Newton 1729/1962 a & b), «ο ανελκυστήρας» του Αϊνστάιν (Einstein and Infeld 1938), «ο δαίμονας» του Maxwell (Maxwell 1871/2001), «το μικροσκόπιο» του Heisenberg (Heisenberg 1930/1949) και «η γάτα» του Schrödinger (Schrödinger 1935/1983). Τα ΝΠ συνεχίζουν να παίζουν σημαντικό ρόλο και στη σύγχρονη Φυσική. Αυτός ο ρόλος προκύπτει από το γεγονός ότι τα φυσικά συστήματα που εξετάζει κατά κόρον η σύγχρονη Φυσική είναι συστήματα στα οποία επικρατούν συνθήκες ή καταστάσεις που είναι πολύ δύσκολο, αν όχι ακατόρθωτο, να αναπαραχθούν προκειμένου να πραγματοποιηθεί ένα πραγματικό πείραμα, όπως, για παράδειγμα, οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή πλησίον μιας μαύρης τρύπας ή οι καταστάσεις σε περιοχές της τάξης μεγέθους της σταθεράς του Planck (Reiner&Burko 2003). Η χρήση των ΝΠ από τους επιστήμονες, σύμφωνα με τον Popper (1959/1999), μπορεί να τους οδηγήσει σε καινοτόμες θεωρίες, να τους βοηθήσει να διασαφηνίσουν υπάρχουσες θεωρίες, αλλά επίσης και να αντλήσουν επιχειρήματα προκειμένου να ασκήσουν κριτική σε υπάρχουσες θεωρίες.

Κατά τον Sorensen (1992) τα ΝΠ είναι οριακές περιπτώσεις πραγματικών πειραμάτων, δηλαδή τα ΝΠ εξελίσσονται από τα πραγματικά πειράματα με μια διαδικασία συνεχούς αφαίρεσης παραμέτρων και εξιδανίκευσης συσκευών και καταστάσεων. Συνεπώς μεταξύ των νοητικών και των πραγματικών πειραμάτων υπάρχουν ομοιότητες αλλά και διαφορές. Οι σημαντικότερες ομοιότητες είναι ότι

- τα ΝΠ όπως και τα πραγματικά πειράματα καθοδηγούνται από τη θεωρία και χρησιμοποιούνται για την καθιέρωση, το έλεγχο ή την εφαρμογή θεωριών.

- και οι δύο τύποι πειραμάτων γνωστοποιούνται με παρόμοιους τρόπους στην επιστημονική κοινότητα (περιοδικά, συνέδρια κ.α.) προκειμένου να αξιολογηθούν και επίσης πολλές φορές έχουν αναπάντεχα αποτελέσματα (Gilbert and Reiner 2000).

Οι σημαντικές διαφορές νοητικών και πραγματικών πειραμάτων είναι ότι

- τα ΝΠ σχεδιάζονται και πραγματοποιούνται συνήθως από ένα και το αυτό πρόσωπο σε αντίθεση με τα πραγματικά πειράματα που, τουλάχιστο στις μέρες μας, πραγματοποιούνται από μεγάλες ομάδες επιστημόνων και τεχνικών.

- κατά τη διάρκεια των ΝΠ δεν λαμβάνονται ποσοτικές μετρήσεις προκειμένου να συμπληρωθούν, για παράδειγμα, πίνακες τιμών όπως συμβαίνει στα πραγματικά πειράματα.

- τα ΝΠ δεν περιλαμβάνουν πραγματικές συσκευές και συνεπώς δεν λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό παράγοντες που σχετίζονται με ιδιότητες των συσκευών, δεν προξενούνται καταστροφές (υλικών, αντικειμένων, περιβαλλοντικές κ.α.) και δεν είναι δυνατόν να αλλοιωθούν τα αποτελέσματά τους από απρόβλεπτους εξωτερικούς παράγοντες (Sorensen 1992).

Τα ΝΠ εκτός από σημαντικά εργαλεία των επιστημόνων, μπορεί να θεωρηθούν και σημαντικά εργαλεία στη διάθεση των δασκάλων της Φυσικής. Τα ΝΠ, αν και περιλαμβάνουν στοιχεία από το φυσικό κόσμο, συνήθως, υποθέτουν καταστάσεις που δεν υπάρχουν στην καθημερινή ζωή, έτσι είναι αναγκαίο ο πειραματιστής να φανταστεί και να προβλέψει οριακές καταστάσεις και να καταλήξει σε αποτελέσματα με βάση κάποιες υποθέσεις. Συνεπώς, η χρήση των ΝΠ στη σχολική τάξη ωθεί τους μαθητές να χρησιμοποιήσουν τη φαντασία τους, να σκεφτούν αφαιρετικά, να αναπτύξουν την κριτική τους ικανότητα, να κάνουν υποθέσεις και να βγάλουν συμπεράσματα, δηλαδή διαδικασίες που αποτελούν βασικές επιδιώξεις της σύγχρονης διδασκαλίας των Φυσικών Επιστημών (Matthews 1994). Για το λόγο αυτό οι εκπαιδευτικοί θεωρούν ότι τα ΝΠ είναι αναντικατάστατα εργαλεία προκειμένου να διδάξουν νόμους που περιλαμβάνουν σχέσεις με σημαντική αφαίρεση, όπως για παράδειγμα νόμους από τη θεωρία της σχετικότητας. Αυτοί διαισθάνονται ότι τα ΝΠ βοηθούν να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ των νέων εννοιών και νόμων που πρέπει να μάθουν οι μαθητές με την καθημερινή τους εμπειρία και την προϋπάρχουσα γνώση (Helm et al. 1985).

Ο Klassen (2006) υποστηρίζει ότι η παιδαγωγική αποτελεσματικότητα των ΝΠ προκύπτει από το γεγονός ότι τα ΝΠ περιέχουν το στοιχείο της αφήγησης. Τα ΝΠ περιλαμβάνουν αφενός μεν επιχειρήματα και αφετέρου αφήγηση. Το αφήγημα, είτε με μορφή ιστορίας, είτε όχι, είναι ο σπόρος του ανθρώπινου στοιχείου, ενώ το επίχειρημα περιλαμβάνει το επιστημονικό στοιχείο. Αυτές οι δύο πτυχές μπορούν να χωριστούν χάριν της ανάλυσης, αλλά στην αποτελεσματική παιδαγωγική χρήση του ΝΠ το επιστημονικό στοιχείο ενσωματώνεται μέσα στην ιστορία και τα δύο είναι απαραίτητα. Συνεπώς, όπως υποστηρίζει ο Klassen, όταν τα ΝΠ πρόκειται να παρουσιαστούν στους μαθητές θα πρέπει να ξαναγράφονται από τους δασκάλους σε μια μορφή αφήγησης που να ενεργοποιεί τους μαθητές και να τους οδηγεί στις καταστάσεις και τις διαδικασίες εκείνες που θα τους βοηθήσουν να κατανοήσουν σε ένα σημαντικό βαθμό το επιδιωκόμενο από τη διδασκαλία. Σε αυτή την κατεύθυνση, ο δάσκαλος της Φυσικής θα μπορούσε να αντλήσει σημαντικό εκπαιδευτικό υλικό από κείμενα επιστημόνων που προέρχονται από βιβλία εκλαΐκευσης της επιστήμης. Πράγματι, κορυφαίοι επιστήμονες αναγνώρισαν τη δυναμική των ΝΠ για την επικοινωνία με το κοινό, εξαιτίας του βασικού τους χαρακτηριστικού να περιέχουν αφήγηση (Nersessian 1993, Klassen 2006). Για παράδειγμα, ο Einstein (1917/1961), επινόησε ΝΠ όχι μόνο για την ανάπτυξη των θεωριών του αλλά και για την εκλαΐκευσή τους. Επίσης, διακεκριμένοι επιστήμονες, όπως ο Gamow (1966, 1990) ή ο Landau (1959), έγραψαν βιβλία προσπαθώντας να εκλαϊκεύσουν θεωρίες της φυσικής. Τα ΝΠ



εκτός από σημαντική θέση στα επιστημονικά κείμενα μεγάλων επιστημόνων έχουν σημαντική θέση και στα βιβλία εκλαΐκευσης της Φυσικής, ειδικά των θεωριών του 20^{ου} αιώνα (Velentzas, Halkia, Scordoulis 2005). Συνεπώς τα κείμενα των παραπάνω βιβλίων μπορεί να αξιοποιηθούν κατά τη χρήση των ΝΠ στην σχολική τάξη.

Με βάση τα παραπάνω θεωρήθηκε ότι θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθεί κατά πόσο τα ΝΠ θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν αποτελεσματικά ως εργαλείο για τη διδασκαλία νόμων και αρχών της Φυσικής με υψηλό βαθμό αφάιρεσης, όπως είναι οι θεωρίες της φυσικής του 20^{ου} αιώνα, σε μαθητές του Λυκείου, με άντληση εκπαιδευτικού υλικού από βιβλία εκλαΐκευσης της Φυσικής διακεκριμένων επιστημόνων. Η παρούσα εργασία εντάσσεται στα πλαίσια μιας ευρύτερης έρευνας με τον παραπάνω σκοπό και σε αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διδασκαλίας της «αρχής της ισοδυναμίας» σε μαθητές της Β΄ Λυκείου με τη βοήθεια του ΝΠ «ο ανελκυστήρας του Αϊνστάιν», όπως αυτό παρουσιάζεται από τον ίδιο τον Αϊνστάιν, σε βιβλία εκλαΐκευσης της Φυσικής. (Einstein 1917, Einstein and Infeld 1938).

Το ΝΠ «ο ανελκυστήρας του Einstein»

Το ΝΠ που έχει επικρατήσει να ονομάζεται «ο ανελκυστήρας του Einstein» επινοήθηκε από τον Einstein, προκειμένου να παρουσιάσει στο ευρύ κοινό την αρχή της ισοδυναμίας, σε βιβλία εκλαΐκευσης της Φυσικής που έγραψε (Einstein 1917, Einstein and Infeld 1938). Καλεί τους αναγνώστες του να φανταστούν ένα (αδρανειακό) παρατηρητή σε μια περιοχή του διαστήματος πολύ μακριά από άλλες μάζες. Σε αυτή την περιοχή υπάρχει ένας θάλαμος με ένα επιβάτη. Στη σκεπή του θαλάμου είναι δεμένο ένα σχοινί το οποίο ένα παράξενο ον τραβά «προς τα πάνω» με σταθερή δύναμη. Στη συνέχεια ο Einstein περιγράφει διάφορα γεγονότα, όπως ότι ο άνθρωπος μπορεί να στηρίζεται όρθιος, ότι τα σώματα «πέφτουν» ταυτόχρονα προς το πάτωμα, ότι το σχοινί είναι τεντωμένο κ.α. και δίνει τις ερμηνείες τους τόσο για τον επιβάτη του θαλάμου όσο και για τον αδρανειακό παρατηρητή. Ο αδρανειακός παρατηρητής αποδίδει τα γεγονότα στην επιτάχυνση του θαλάμου, ενώ ο επιβάτης σε ένα πεδίο βαρύτητας. Στο σημείο αυτό ο Einstein διερωτάται

«...Άραγε έχουμε το δικαίωμα να χαμογελάσουμε και να πούμε ότι το συμπέρασμα αυτού του ανθρώπου(επιβάτη) είναι λάθος; Δεν το νομίζω, αν θέλουμε να μείνουμε συνεπείς με τους εαυτούς μας οφείλουμε μάλιστα ν' αναγνωρίσουμε ότι ο τρόπος του να αντιλαμβάνεται τα πράγματα δεν αμαρτάνει ούτε ενάντια στη λογική ούτε ενάντια στους γνωστούς νόμους της Μηχανικής...»

Έτσι καταλήγει στο ότι μπορούμε να θεωρήσουμε τον επιταχυνόμενο εκτός πεδίου βαρύτητας θάλαμο σαν ακίνητο μέσα σε βαρυτικό πεδίο. Οι δύο αυτές καταστάσεις είναι ισοδύναμες (αρχή ισοδυναμίας) και δεν υπάρχει πείραμα με το οποίο να μπορούμε να διαχωρίσουμε αυτές τις καταστάσεις.

Κατόπιν ο Einstein δείχνει, με το ΝΠ, ότι αν θέλουμε να είμαστε συνεπείς με την «αρχή της ισοδυναμίας» πρέπει να δεχτούμε ότι το φως καμπυλώνεται από την επίδραση του βαρυτικού πεδίου. Φαντάζεται ότι μία ακτίνα φωτός εισχωρεί στον προηγούμενο θάλαμο από ένα μικρό παράθυρο του τοιχώματος. Η ακτίνα θα πέσει στο απέναντι τοίχωμα ακολουθώντας κατά τον επιβάτη όχι μια ευθεία γραμμή αλλά μια καμπύλη. Την «εκτροπή» της ακτίνας ο αδρανειακός παρατηρητής την αποδίδει στην επιτάχυνση του θαλάμου, ενώ ο επιβάτης στο πεδίο βαρύτητας. Συνεπώς, κατά τον Einstein μια ακτίνα φωτός πρέπει να κυρτώνεται από την δράση ενός πεδίου βαρύτητας. Μάλιστα στο προαναφερθέν βιβλίο του (1917) γράφει προφητικά

«...Η εξέταση της ακρίβειας ή όχι αυτής της συνέπειας είναι υπόθεση μέγιστης σημασίας, της οποίας ελπίζουμε ότι οι αστρονόμοι θα μας δώσουν προσεχώς τη λύση...»

Το ερευνητικό ερώτημα

Το ερευνητικό ερώτημα της παρούσας έρευνας είναι:

Σε ποιο βαθμό μπορούν οι μαθητές του Λυκείου, με τη βοήθεια του ΝΠ «ο ανελκυστήρας του Αϊνστάιν», να προσεγγίσουν την «Αρχή της Ισοδυναμίας» και κάποιες από τις συνέπειές της;

Πιο συγκεκριμένα κατά πόσο είναι δυνατόν, με τη βοήθεια του ΝΠ, οι μαθητές να οδηγηθούν

(i) στη διατύπωση της «Αρχής της Ισοδυναμίας» και να είναι σε θέση να δίνουν εξηγήσεις για γεγονότα και φαινόμενα που σχετίζονται με αυτή την αρχή.

(ii) στο συμπέρασμα ότι άμεση συνέπεια της «Αρχής της Ισοδυναμίας» είναι η καμπύλωση του φωτός από τα Βαρυτικά Πεδία και να είναι σε θέση να το εφαρμόζουν ποιοτικά.

Η μεθοδολογία της έρευνας

Η εμπειρική έρευνα που πραγματοποιήθηκε ήταν μια ποιοτική έρευνα η οποία είχε ως σκοπό την καταγραφή των μαθησιακών δυνατοτήτων και των δυσκολιών των μαθητών κατά την απόκτηση της επιστημονικής γνώσης η οποία επιχειρήθηκε με τη βοήθεια του ΝΠ «ο ανελκυστήρας του Einstein».

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε 40 μαθητές (11 ομάδες 3-4 μαθητών) της Β΄ τάξης του ενιαίου Λυκείου θετικής ή τεχνολογικής κατεύθυνσης. Οι ομάδες επιλέχθηκαν από 6 διαφορετικά Λύκεια του νομού Αττικής στα οποία υπάρχει πρόσβαση. Κάθε ομάδα συγκροτήθηκε από εθελοντές μαθητές, όσο το δυνατόν μικτής απόδοσης στο μάθημα της Φυσικής σύμφωνα με την εκτίμηση του καθηγητού τους.

Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του *διδασκτικού πειράματος* (teaching experiment) (Komorek & Duit 2004), η οποία περιλαμβάνει ημι-δομημένες συνεντεύξεις - διδασκαλίες μεμονωμένων ή μικρών ομάδων μαθητών. Ο ερευνητής σύμφωνα με το teaching experiment έχει δύο ρόλους, αφενός μεν του ερευνητή και αφετέρου του δασκάλου. Στην περίπτωση των μικρών ομάδων 3-4 μαθητών ο ρόλος του ερευνητή/δασκάλου είναι να συντονίζει το διάλογο μεταξύ των μαθητών, να ενθαρρύνει την αλληλεπίδρασή τους και να παρεμβαίνει μόνο όταν ο διάλογος δεν είναι αποδοτικός. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και ερωτηματολόγια που δόθηκαν στους μαθητές δύο εβδομάδες μετά κάθε παρέμβαση.

Οι συνεντεύξεις

Η διάρκεια κάθε μιας από τις 11 συνεντεύξεις (μία σε κάθε ομάδα μαθητών) είχε διάρκεια δύο (2) διδακτικών ωρών. Μαγνητοφωνήθηκε το σύνολο κάθε συνέντευξης και κατόπιν έγινε απομαγνητοφώνηση των κειμένων προκειμένου να ακολουθήσει ποιοτική ανάλυση του περιεχομένου (Fischler 2005).

Για το σχεδιασμό αυτών των συνεντεύξεων μελετήθηκε η σχετική βιβλιογραφία και λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα πιλοτικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε καθώς και οι διδακτικοί στόχοι που αναφέρθηκαν στο ερευνητικό ερώτημα. Σε κάθε συνέντευξη έγινε χρήση γραπτών και προφορικών ερωτήσεων, σωκρατικών διαλόγων, εικόνων καθώς και αποσπασμάτων από τα προαναφερθέντα κείμενα του Einstein.

Τα βασικά βήματα κάθε συνέντευξης ήταν:

(1) Οι μαθητές, ξεκινώντας από την εμπειρία τους σε κατακόρυφα επιταχυνόμενο θάλαμο (π.χ. στο λούνα παρκ), οδηγούνται στο συμπέρασμα ότι η επιτάχυνση προς τα πάνω/κάτω (στη Γη) προσθέτει/αφαιρεί βαρύτητα. Στη συνέχεια, αυξάνοντας νοητικά, συνεχώς, την επιτάχυνση προς τα κάτω οδηγούνται στην κατάσταση «συνθηκών έλλειψης βαρύτητας».



(2) Με τη βοήθεια του ΝΠ, κατά το οποίο γίνεται νοητική αφαίρεση του πεδίου βαρύτητας από το χώρο της επιτάχυνσης ενός θαλάμου, οι μαθητές οδηγούνται στο συμπέρασμα ότι η επιτάχυνση «μιμείται» τη βαρύτητα.

(3) Με τη βοήθεια του κειμένου του Αϊνστάιν οι μαθητές οδηγούνται στη διατύπωση της αρχής της ισοδυναμίας. Γίνεται εφαρμογή στην περίπτωση της επιτάχυνσης ενός διαστημόπλοιου εκτός πεδίου βαρύτητας με διάφορους προσανατολισμούς και γίνεται συζήτηση για την έννοια του πάνω – κάτω.

(4) Το ΝΠ της εισόδου μιας ακτίνας φωτός στον επιταχυνόμενο θάλαμο και η αρχή της ισοδυναμίας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το φως καμπυλώνεται από τη δράση ενός πεδίου βαρύτητας. Γίνεται εφαρμογή με ακτίνες φωτός που περνούν κοντά από τον Ήλιο.

Η ανάλυση των δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε ο χαρακτήρας αυτής της έρευνας είναι διερευνητικός σχετικά με τις δυνατότητες αλλά και τα εμπόδια στη μάθηση της «αρχής της ισοδυναμίας» και συνεπειών της με τη βοήθεια του ΝΠ. Γιαυτό το λόγο, για την ανάλυση των δεδομένων εφαρμόστηκαν μέθοδοι ποιοτικής ανάλυσης του περιεχομένου (Erickson 1998).

Συγκεκριμένα για κάθε βήμα των συνεντεύξεων / διδασκαλιών, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα

- οι ιδέες των μαθητών καταγράφηκαν και κατηγοριοποιήθηκαν και επίσης εντοπίστηκαν πιθανές αλλαγές σε αυτές τις ιδέες κατά τη διάρκεια της εφαρμογής.

- καταγράφηκαν πιθανές δυσκολίες και εμπόδια καθώς επίσης και ο τρόπος με τον οποίο έγινε (εφόσον έγινε) η υπέρβαση αυτών των εμποδίων.

- καταγράφηκαν οι απαντήσεις των μαθητών σε ερωτήσεις που είχαν ως σκοπό τη διερεύνηση του κατά πόσο οι μαθητές ήταν σε θέση να διατυπώνουν και να εφαρμόζουν την αρχή της ισοδυναμίας.

Επίσης καταγράφηκαν και κατηγοριοποιήθηκαν οι απαντήσεις των μαθητών στις ερωτήσεις των ερωτηματολογίων που τους δόθηκαν 15 μέρες μετά την κάθε εφαρμογή.

Αποτελέσματα

1. Το ΝΠ βοήθησε τους μαθητές, ξεκινώντας από την εμπειρία τους, να εξαγάγουν το συμπέρασμα ότι η επιτάχυνση προς τα πάνω /κάτω στη Γη προσθέτει / αφαιρεί βαρύτητα και στη συνέχεια να «οδηγηθούν νοητικά» στις συνθήκες έλλειψης βαρύτητας.

Σε αυτή την 1^η φάση του ΝΠ φάνηκε καθαρά ότι το ΝΠ βοήθησε τους μαθητές να καταφέρουν, ξεκινώντας από την εμπειρία τους, με συνεχείς μεταβολές ή αφαιρέσεις να φτάσουν νοητικά σε καταστάσεις που δεν άπτονται της καθημερινής εμπειρίας.

Συγκεκριμένα, η αφετηρία της συζήτησης από εμπειρίες των μαθητών σε ασανσέρ ή λούνα παρκ έπαιξε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του ΝΠ. Όλοι οι μαθητές περιέγραψαν ή συμφώνησαν με περιγραφή κάποιας εμπειρίας (κυρίως από το λούνα πάρκ) ότι η επιτάχυνση προς τα πάνω είναι «σα να προσθέτει βαρύτητα», ενώ η επιτάχυνση προς τα κάτω «σα να αφαιρεί βαρύτητα».

Τέλος η φάση αυτή του ΝΠ βοήθησε τους μαθητές να φτάσουν ως τις συνθήκες έλλειψης βαρύτητας. Πράγματι ενώ ισχυρίζονταν (με βάση την εμπειρία) ότι όταν είναι σε θάλαμο που επιταχύνεται προς τα κάτω νοιώθουν πιο ελαφριοί, τους ζητήθηκε να προχωρήσουν τη σκέψη τους έως ότου κοπεί το σχοινί που κρατά το θάλαμο. Όλες οι ομάδες κατέληξαν ότι θα είναι σαν να μην υπάρχει βαρύτητα.

2. Το ΝΠ βοήθησε τους μαθητές να συμπεράνουν ότι η επιτάχυνση εκτός Βαρυτικού Πεδίου (ΒΠ) «μεινύται» τη βαρύτητα, να διατυπώνουν (με τη βοήθεια του αντίστοιχου κειμένου) την Αρχή της Ισοδυναμίας (ΑΙ) και να δίνουν εξηγήσεις για σχετικά φαινόμενα.

Οι περισσότεροι μαθητές (32/40) μπόρεσαν χωρίς δυσκολία να προχωρήσουν στο νοητικό βήμα αφαίρεσης του ΒΠ και ισχυρίστηκαν, δίνοντας ικανοποιητική εξήγηση (ή συμφώνησαν με εξήγηση συμμαθητή), ότι ένας άνθρωπος σε θάλαμο που επιταχύνεται έξω από ΒΠ «στέκεται» / «πατάει». Οι υπόλοιποι μαθητές (8/40) είχαν αρχικά δισταγμό ή είπαν «αιωρείται» αλλά το ξεπέρασαν με βοήθεια συμμαθητών με βασικότερο επιχείρημα ότι «ο άνθρωπος είναι εκτός ΒΠ και λόγω αδρανείας διατηρεί την κινητική του κατάσταση οπότε τον πιέζει το πάτωμα του επιταχυνόμενου θαλάμου». Κατόπιν, όλοι οι μαθητές ήταν σε θέση να προβλέπουν την «πτώση» των αντικειμένων στον ανελκυστήρα. Στο τέλος αυτής της φάσης της διαδικασίας οι μαθητές ισχυρίζονταν ότι ο επιβάτης του θαλάμου του ΝΠ αισθάνεται σαν να είναι ακίνητος ο θάλαμος στη Γη.

Η παραπάνω διαδικασία και στη συνέχεια η ανάγνωση του αντίστοιχου κειμένου του Einstein φάνηκε να βοήθησε τους μαθητές ώστε να είναι σε θέση να διατυπώνουν με δικά τους λόγια την «αρχή της ισοδυναμίας». Επίσης, όπως φάνηκε από τη διαδικασία, οι μαθητές ήταν σε θέση να δίνουν εξηγήσεις για φαινόμενα και γεγονότα σε συστήματα που επιταχύνονταν, ως προς αδρανειακό σύστημα αναφοράς, εντός ή εκτός πεδίου βαρύτητας. Πρέπει να σημειωθεί ότι 15 μέρες μετά την εφαρμογή, όπως φάνηκε από τις απαντήσεις των μαθητών στο ερωτηματολόγιο, στη συντριπτική τους πλειοψηφία (38/40) προέβλεπαν σωστά διάφορα φαινόμενα σε επιταχυνόμενο σύστημα εκτός πεδίου βαρύτητας. Εξήγηση για τις προβλέψεις τους έγραψαν οι 31 μαθητές. Από αυτούς οι 15 χρησιμοποίησαν τον όρο «αρχή ισοδυναμίας». Οι υπόλοιποι 16 έδιναν ικανοποιητική εξήγηση προτιμώντας όμως να περιγράφουν τα φαινόμενα ως προς τον αδρανειακό παρατηρητή. Ίσως αυτό να οφείλεται σε δύο παράγοντες, ο ένας σχετίζεται με το γεγονός ότι αυτοί οι μαθητές θεώρησαν ότι η απάντηση θα ήταν πληρέστερη αν δεν χρησιμοποιήσουν άμεσα την αρχή της ισοδυναμίας αλλά τη δικαιολογήσουν με βάση τα βήματα της «εκτέλεσης» του ΝΠ και ο δεύτερος να σχετίζεται με πιθανή εμμένουσα ιδέα των μαθητών ότι την «καθαρή» αλήθεια την γνωρίζει ο εξωτερικός παρατηρητής.

Ενώ η εμπειρία φάνηκε να έχει αρχικά ευεργετικό ρόλο στην εξέλιξη του ΝΠ, σε μια από τις παραπάνω εφαρμογές, όπου το αποτέλεσμα ήταν σε κραυγαλέα αντίθεση με την καθημερινή εμπειρία (ο θάλαμος ήταν σε «οριζόντια» θέση στο σχήμα) φάνηκε να αποτελεί εμπόδιο για μια μερίδα μαθητών (17/40). Παρόλο που στην εκφώνηση γινόταν λόγος περί του αντιθέτου, αυτοί οι μαθητές θεωρούσαν ότι η εκκίνηση γίνεται από τη Γη ή ότι υπάρχει ταυτόχρονα και η Γη κάτω, όπως βλέπουν στο χαρτί. Άρα, ένας αστροναύτης «πατάει στο πάτωμα αριστερά» (στο σχήμα κατακόρυφο) αλλά «πρέπει να βάζει και πλάτη» στον κάτω τοίχο «για να καταφέρει να σταθεί αρχικά». Αυτό το εμπόδιο ξεπεράστηκε με τη συζήτηση και όταν δόθηκε η διευκρίνιση από το διδάσκοντα ότι «δεν συζητάμε το ξεκίνημα», έστω ότι υπάρχει μηχανισμός στο σκάφος που ο πιλότος αρχικά τοποθετεί το σώμα του όπως επιθυμεί και κατόπιν λύνεται. Σε επόμενη παρόμοια εφαρμογή οι μαθητές στο σύνολό τους απάντησαν σωστά χωρίς δυσκολία και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η έννοια του πάνω – κάτω σχετίζεται με την κατεύθυνση του ισοδύναμου βαρυτικού πεδίου.

3. Οι μαθητές με τη βοήθεια του ΝΠ οδηγήθηκαν στην συνέπεια της «αρχής της ισοδυναμίας» ότι το φως εκτρέπεται από τη δράση βαρυτικών πεδίων.

Οι μαθητές στην τρίτη φάση του ΝΠ έπρεπε να διαπραγματευτούν την μορφή της «πορείας» μιας ακτίνας φωτός που εισέρχεται (από μια οπή του τοιχώματος) σε επιταχυνόμενο θάλαμο εκτός ΒΠ και με δεδομένη την ΑΙ να συμπεράνουν ότι το φως θα πρέπει να καμπυλώνεται από ΒΠ. Όλοι οι μαθητές υποστήριξαν κατά την «εκτέλεση» του ΝΠ ότι η ακτίνα εκτρέπεται προς



κατεύθυνση αντίθετη της επιτάχυνσης. Υπήρξε, ωστόσο, δυσκολία στους 25/40 μαθητές να εξηγήσουν την μορφή (καμπυλότητα) της πορείας του φωτός. Όμως δεν φάνηκε να δυσκολεύονται να το κατανοήσουν όταν άκουσαν τις εξηγήσεις συμμαθητών τους ή τους ζητήθηκε από το διδάσκοντα να σχεδιάσουν τη θέση του θαλάμου σε ίσα χρονικά διαστήματα. Στη συνέχεια οι μαθητές όλων των ομάδων ισχυρίζονταν ότι ο επιβάτης του ανελκυστήρα θα αποδώσει την εκτροπή της ακτίνας στη δράση κάποιου πεδίου βαρύτητας. Επίσης το κείμενο του Einstein που χρησιμοποιήθηκε βοήθησε τους μαθητές να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι - δεδομένης της ισχύος της «αρχής της ισοδυναμίας»- το φως εκτρέπεται από την ευθύγραμμη πορεία του εξαιτίας της δράσης του πεδίου βαρύτητας. Οι μαθητές, τόσο από την εφαρμογή όσο και από το ερωτηματολόγιο, φάνηκε ότι είναι σε θέση να εφαρμόζουν ποιοτικά το παραπάνω συμπέρασμα σε ακτίνες φωτός που περνούν πολύ κοντά από τον Ήλιο. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι, αν και δεν αποτελούσε στόχο της διδασκαλίας, ζητήθηκε από τους μαθητές να διαβάσουν ένα κείμενο του Einstein σχετικό με την πειραματική επαλήθευση της εκτροπής του φωτός από το πεδίο βαρύτητας του Ήλιου και να το εξηγήσουν με δικά τους λόγια. Φάνηκε ότι οι περισσότεροι μαθητές (35/40) αγνοούσαν φαινόμενα σχετικά με την έκλειψη Ηλίου (π.χ. ότι στην ολική έκλειψη φαίνονται άστρα) και χρειάστηκε η καθοριστική παρέμβαση του διδάσκοντα προκειμένου να εξηγηθεί ο τρόπος με τον οποίο έγινε η πειραματική επαλήθευση της εκτροπής του φωτός από το πεδίο του Ήλιου.

Συμπεράσματα - προοπτικές

Η προτεινόμενη διαδικασία κατά την οποία αξιοποιήθηκε ένα «ιστορικό» ΝΠ, στη μορφή που παρουσιάζεται σε βιβλία εκλαΐκευσης της φυσικής, φάνηκε να βοηθά αποτελεσματικά στην προσέγγιση της επιστημονικής γνώσης από τους μαθητές. Οι μαθητές κατάφεραν ξεκινώντας από την εμπειρία τους να προσεγγίσουν νοητικά (να φανταστούν) καταστάσεις που είναι πέρα από το επιστητό τους, χωρίς να είναι ανάγκη να χρησιμοποιήσουν άλλες θεωρίες ή περίπλοκες μαθηματικές φόρμες. Συγκεκριμένα, οι μαθητές στην πλειονότητά τους, με τη βοήθεια του ΝΠ «ο ανελκυστήρας του Αϊνστάιν» όπως αυτό παρουσιάζεται σε κείμενα εκλαΐκευσης της επιστήμης από τον ίδιο το Αϊνστάιν, ήταν σε θέση να διατυπώνουν με δικά τους λόγια την «αρχή της ισοδυναμίας» να κάνουν προβλέψεις και να δίνουν εξηγήσεις για φυσικά φαινόμενα με βάση την αρχή αυτή.

Με τη χρήση του προαναφερθέντος ΝΠ, θα ήταν πολύ χρήσιμο να αναδειχθεί στους μαθητές η σημασία της ισότητας βαρυτικής και αδρανειακής μάζας. Ωστόσο αυτό δεν ήταν δυνατό, όπως φάνηκε από την πιλοτική εφαρμογή, να πραγματοποιηθεί στα χρονικά πλαίσια της παρέμβασής μας, μιας και θα χρειαζόταν ειδικό μάθημα για τον ορισμό των δύο μαζών, που όπως φάνηκε δεν είχε κατανοηθεί επαρκώς από τους μαθητές στα πλαίσια της Α΄ Λυκείου. Συνεπώς, η προτεινόμενη διαδικασία θα μπορούσε να επεκταθεί με την προσθήκη μιας ακόμα διδακτικής ώρας με το παραπάνω αντικείμενο.

Από την παρούσα έρευνα προκύπτει ότι η διδασκαλία της «αρχής της ισοδυναμίας» και των συνεπειών της σε μαθητές του Λυκείου με τη βοήθεια του ΝΠ «ο ανελκυστήρας του Αϊνστάιν» είχε θετικά αποτελέσματα. Απομένει η διερεύνηση του οφέλους από τη χρήση και άλλων ΝΠ στην διδασκαλία θεωριών της Φυσικής με υψηλό βαθμό αφάιρεσης, όπως αυτά παρουσιάζονται από επιστήμονες σε βιβλία εκλαΐκευσης της Φυσικής, ώστε να διατυπωθεί ένα γενικότερο συμπέρασμα.

Βιβλιογραφία

- Brown, J.: (2006) The Promise and Perils of Thought Experiments. *Interchange*, Vol. 37/1-2, 63-75
- Brown, J.: (1991) *The Laboratory of the Mind. Thought Experiments in the Natural Sciences* Routledge, London.
- Einstein, A., Infeld, L.: (1938) *The Evolution of Physics*, Simon and Schuster, New York
- Einstein, A.: (1917/1961), *Relativity: The Special and the General theory, A popular Exposition*, Grown publishers, New Yourk
- Fischler, H.: (2005) Interviews in science education research. In *Developing Standards in Research on Science Education. The ESERA Summer School 2004*. Taylor & Francis Grup plc, London, UK, 29-38.
- Galileo, G.: (translated by Crew H., Salvio A) (1638/1914) *Dialogue Concerning Two New Sciences*, Dover, New York
- Gamow, G.: (1966) *Thirty years that shook Physics*, Doubleday and Co.
- Gamow, G.: (1990) *Mr Tompkins in paperback*, Cambridge University Press
- Gilbert, J. and Reiner, M.: (2000). Thought experiments in science education: potential and current realization, *International Journal of Science Education*, 22(3), 265-283
- Heisenberg, W.: (1930, translation by Eckart C., Hoyt F., 1949) *The principles of the quantum theory*, Dover, New York
- Helm, H., Gilbert, J., Watts, D.M.: (1985) Thought experiments and physics education-Part 2. *Physics Education*, 20, 211-17.
- Klassen, S. (2006) The science thought experiments: How Might it be Used Profitably in the Classroom?, *Interchange*, Vol. 37/1-2, 77-96
- Komorec M., Duit R.: (2004) The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non- linear systems. *Int. J. sci. educ.*, vol.26, 5: 619-633
- Landau, L., Rumer, Y.: (1959) *What is relativity?* Basic Books, New York
- Matthews, M.: (1994) Thought experiments in M. Matthews *Science Teaching. The Role of History and Philosophy of Science*, Routledge, New York-London, 99-105
- Maxwell, J.: (1871/ 2001) *Theory of Heat*, Dover, New York
- Erickson, F.: (1998), Qualitative Research Methods for Science Education. In *International Handbook of Science Education*. Fraser B.J and Tobin K.G. (eds) pp. 1155-1173
- Nersessian, N.: (1993) In the Theoretician's Laboratory: Thought Experimenting as Mental Modeling. *Proceedings of the Biennial Meetings of the Philosophy of Science Association*, vol. 2, pp. 291-301
- Newton, I. (translated by Motte A. 1729/ 1962b) *Mathematical principles of natural philosophy and his system of the world*, Volume two: *the system of the world*, University of California press.
- Newton, I.: (translated by Motte A. 1729/ 1962a) *Mathematical principles of natural philosophy and his system of the world*, Volume one: *the motion of bodies*, University of California press.
- Popper, K.: (1959/1999) On the use of imaginary experiments especially in quantum theory, in K.Popper *The logic of scientific discovery*, Routledge, New York-London, 442-456.
- Reiner, M. and Burko, L.: (2003). On the Limitations of Thought Experiments in Physics and the consequences for Physics Education. *Science & Education*, (12), 385-58.



Schrodinger, E.: (1935), Die Gegenwartige Situation in der Quantemnechanik, *Die Naturwissenschaften* 23, 807-12, 823-8, 844-9. (In English «The Present Situation in Quantum Mechanics» in *Wheeler and Zurek, 1983, 152-67*)

Sorensen, R.: (1992) *Thought Experiments*, Oxford University Press, New York and London.

Velentzas A., Halkia K., Skordoulis C.: (2007), Thought experiments in the theory of relativity and in quantum mechanics: Their presence in textbooks and in popular science books. *Science & Education*, 16: 353-370