

ΝΟΗΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ: Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΗ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Κρυσταλλία Χαλκιά¹, Αθανάσιος Βελέντζας²

¹Ομότιμη Καθηγήτρια ΕΚΠΑ, ²ΕΔΙΠ ΕΜΠ

kxalkia@primedu.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στα Νοητικά Πειράματα (ΝΠ) και στον ρόλο τους στη διδασκαλία της φυσικής. Αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται μία προσπάθεια να απαντηθεί το ερώτημα: τι είναι ΝΠ, ποια η συμβολή του στην εξέλιξη της φυσικής, ποια τα χαρακτηριστικά του, ποιες οι χρήσεις του, ποιες οι ομοιότητες και διαφορές του από το πραγματικό πείραμα. Στο δεύτερο μέρος μελετάται η συμβολή του ΝΠ στη διδασκαλία της φυσικής, (η σημασία του για τον επιστημονικό γραμματισμό των μαθητών, τα οφέλη του από την χρήση του στη διδασκαλία της φυσικής, κ.λπ.). Επίσης, προτείνονται τρόποι για τη διδακτική αξιοποίησή του.

Λέξεις κλειδιά: Νοητικά πειράματα, θεωρίες φυσικής, διδασκαλία φυσικής

Αναφορά: Χαλκιά, Κ., & Βελέντζας, Α. (2025). *Νοητικά Πειράματα: Η Συμβολή τους στη Φυσική και στη Διδασκαλία της Φυσικής*, στο Κώτσης Κ.Θ. & Στύλος Γ., (Επιμέλεια), *Πείραμα και Διδασκαλία των Φυσικών Επιστημών, Επετειακός Τόμος για τα 40 χρόνια του ΠΤΔΕ Ιωαννίνων*, Εργαστήριο Εκπαίδευσης και Διδασκαλίας της Φυσικής, Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. ISBN: 978-618-82063-5-9

THOUGHT EXPERIMENTS: THEIR CONTRIBUTION TO PHYSICS AND THE TEACHING OF PHYSICS

Krystallia Halkia¹, Athanasios Velentzas²

¹Professor Emeritus in NKUA, ²Laboratory Teaching Staff in NTUA

kxalkia@primedu.uoa.gr

ABSTRACT

The present work refers to Thought Experiments (TEs) and to their role in physics education. It consists of two parts. The first part attempts to answer the question: what a TE is (its contribution to physics theories, its characteristics, its uses, as well as its similarities and differences from a real experiment). The second part attempts to show the contribution of TEs to physics education (its significance to students' science literacy, the benefits from its uses to physics teaching etc.). Also, ways of using TEs in science teaching are suggested.

Keywords: *Thought experiments, physics theories, teaching physics*

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Νοητικά Πειράματα (ΝΠ) αποτελούν μία ειδική κατηγορία πειραμάτων, που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των επιστημονικών θεωριών. Είναι «πειράματα» που, σε αντίθεση με τα ρεαλιστικά πειράματα, σχεδιάζονται και εξελίσσονται στο μυαλό του «πειραματιστή» (Brown, 1991).

Αν και έγιναν γνωστά στους πρόσφατους χρόνους ως ένα από τα βασικά εργαλεία της σύγχρονης φυσικής, τα ΝΠ «διεξάγονταν» από πολύ παλιά (ήδη από τους προ-Σωκρατικούς φιλόσοφους) και τα συναντάμε σε πολλά και διαφορετικά πεδία, όπως είναι η φυσική, τα μαθηματικά, η οικονομία, η πολιτική, κ.λπ. (Stuart et al., 2018).

Ο όρος «νοητικό πείραμα» (thought experiment) εισήχθη για πρώτη φορά στη φυσική φιλοσοφία το 1811 από τον Hans-Christian Ørsted (1777–1851), στην εργασία του με τίτλο «Prolegomenon to the General Theory of Nature» (Witt-Hansen, 2003; Klassen, 2006; Stuart, et al., 2018). Περίπου έναν αιώνα αργότερα, ο Ernst Mach (1838–1916) επανέφερε την ίδια έννοια, αλλά χρησιμοποίησε τον όρο στη γερμανική του εκδοχή 'Gedanken-experiment', επισημαίνοντας ότι «εκτός από τα φυσικά πειράματα υπάρχουν και άλλα που χρησιμοποιούνται εκτενώς σε υψηλό διανοητικό επίπεδο».

Όμως, ο συγκεκριμένος όρος (νοητικό πείραμα) σπάνια χρησιμοποιούνταν από τους επιστήμονες. Για παράδειγμα ο Niels Bohr τα αναφέρει ως τα “μέσα που προτάθηκαν από τον Einstein” και σχολιάζει το “ψευδο-ρεαλιστικό στυλ” τους (Bohr 1949/1959: 226, όπως αναφέρεται στο Galili 2009). Ο ίδιος ο Einstein, κατά περίπτωση, χαρακτήριζε τα ΝΠ του ως «παράδοξα» ή ως «αναλογίες», το δε πείραμα με τον ανελκυστήρα το

χαρακτηρίζει ως «εξιδανικευμένο πείραμα» (Einstein & Infeld, 1938, p. 226). Επίσης, διάφορα εκλαϊκευτικά βιβλία επιστήμης που χρησιμοποιούν συχνά τα ΝΠ, αποφεύγουν αυτόν τον όρο προτιμώντας να τα χαρακτηρίζουν «εννοιολογικά (ή φανταστικά) πειράματα» ή απλά «παράδοξα» (Park, 1988).

Είναι ενδιαφέρον ότι οι φιλόσοφοι της επιστήμης δεν ασχολήθηκαν ιδιαίτερος με τα ΝΠ, έως ότου ο Thomas Kuhn (1977) έγραψε μια εργασία με τίτλο «Μια λειτουργία για ΝΠ» (Özdemir, 2009). Έκτοτε, τον σημαντικό ρόλο των ΝΠ στη φυσική έχουν τονίσει διάφοροι σύγχρονοι φιλόσοφοι. Σύμφωνα με τον Popper (1934/1968) τα ΝΠ αποτελούν ένα βασικό εργαλείο του επιστημονικού λόγου. Ο δε Kuhn (1977) αναφέρει ότι τα ΝΠ έχουν διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη των θεωριών της φυσικής, καθώς αποτελούν δυναμικά εργαλεία του ανθρώπου στην προσπάθειά του να κατανοήσει τη φύση.

Θα πρέπει, όμως, να επισημανθεί ότι ήταν ο Einstein εκείνος που ουσιαστικά αναβάθμισε τα ΝΠ κάνοντάς τα ένα πρότυπο ερευνητικό εργαλείο θεμελιώδους σημασίας, ένα βασικό μέσο με τη βοήθεια του οποίου οι επιστήμονες αλλάζουν τις εννοιολογικές δομές τους (Nersessian, 1993).

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι, εφόσον τα ΝΠ αξιοποιούνται σε σημαντικό βαθμό από τους επιστήμονες για τη διερεύνηση και τη διαμόρφωση των επιστημονικών θεωριών, θα πρέπει η μελέτη τους να αποτελέσει μέρος των διδακτικών πρακτικών, προκειμένου οι μαθητές να εξοικειωθούν με την κουλτούρα των επιστημονικών πρακτικών (Gilbert & Reiner, 2000a· 2000b).

Στην παρούσα εργασία, θα σχολιάσουμε τη συμβολή των ΝΠ στη φυσική και στη διδακτική των φυσικών επιστημών.

ΜΕΡΟΣ 1^ο: Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΝΟΗΤΙΚΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Στην ενότητα αυτή θα προσπαθήσουμε να διερευνήσουμε, μέσω της σχετικής βιβλιογραφίας τι είναι ΝΠ (π.χ. πώς ορίζεται, ποια είναι τα χαρακτηριστικά του κ.λπ.).

Σύντομη ιστορική αναδρομή

Τα ΝΠ κατατάσσονται ανάμεσα στα κύρια διερευνητικά εργαλεία της επιστήμης, ήδη από τους αρχαίους Έλληνες, πολύ πριν από την επιστημονική επανάσταση του 17ου αιώνα (Galili, 2009· Kösem & Özdemir, 2014). Κυρίως όμως, τα ΝΠ έπαιξαν σημαντικό ρόλο κατά την περίοδο της επιστημονικής επανάστασης του 17ου και της διαμόρφωσης των μεγάλων θεωριών του 20ου αιώνα (θεωρία της Σχετικότητας, Κβαντομηχανική), καθορίζοντας έτσι την πορεία της επιστημονικής προσπάθειας (Velentzas et al., 2007). Αλλά ακόμη και σήμερα αποτελούν βασικό εργαλείο της φυσικής, όταν μελετά περιβάλλοντα στα οποία δεν μπορούν να υλοποιηθούν τα πειράματα στο εργαστήριο, όπως είναι η φυσική στην κλίμακα Planck ή στο εσωτερικό μιας μαύρης τρύπας (Reiner & Burko, 2003).

Ας θυμηθούμε όμως μερικά διάσημα παραδείγματα ΝΠ φιλοσόφων και επιστημόνων που επηρέασαν την πορεία της επιστήμης:

- το ΝΠ του Λουκρήτιου (Lucretius, 94/55 π.Χ.): πετώντας ένα δόρυ στην άκρη του σύμπαντος, (στοχεύει να δείξει ότι το σύμπαν είναι άπειρο),
- το ΝΠ του Stevin (Stevin 1548/1620): αλυσίδα με χάντρες γύρω από ένα κεκλιμένο επίπεδο,
- τα ΝΠ του Γαλιλαίου (Galileo 1638/1714): τα «σώματα σε ελεύθερη πτώση», τα «εκκρεμή», τα «κεκλιμένα επίπεδα» και το «πλοίο»,
- τα ΝΠ του Leibnitz (Leibnitz 1646/1716): όπου ο Θεός δημιουργεί το Σύμπαν σε ένα διαφορετικό χώρο, ή στον ίδιο χώρο αλλά περιστρεφόμενο, ή σε διαφορετικό χρόνο,
- τα ΝΠ του Νεύτωνα (Newton 1642/1727): «το κανόνι» και «ο κουβάς»,
- τα ΝΠ του Kant (Kant 1724-1804): που μας ζητούν να συλλάβουμε την υπόθεση της πλήρους απουσίας χώρου ή χρόνου,
- το ΝΠ του Maxwell (Maxwell 1831/1879): «ο δαίμονας»,
- τα ΝΠ του Einstein (Einstein 1879-1955): «ο ανελκυστήρας», «το τρένο», «το παράδοξο των διδύμων», «κυνηγώντας μια δέσμη φωτός», και το E.P.R.,
- το ΝΠ του Schrödinger (Schrödinger 1887/1961): «η γάτα»,
- το ΝΠ του Heisenberg (Heisenberg 1901/1976): «το μικροσκόπιο».

Περισσότερες πληροφορίες για τα νοητικά πειράματα μπορεί να εντοπίσει κανείς στη Stanford encyclopedia of philosophy (2023/ <https://plato.stanford.edu/entries/thought-experiment/>) και στο Βελέντζας (2013).

Η συνεισφορά της φιλοσοφίας στην κατανόηση των ΝΠ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ήταν ο Thomas Kuhn (1977) που επισήμανε την καθοριστική σημασία των ΝΠ στην εξέλιξη της φυσικής. Σύμφωνα με τους Stuart et al. (2018), ο Kuhn θεωρούσε ότι τα ΝΠ είναι ένα εργαλείο για την πρόκληση ή την αιτιολόγηση των επιστημονικών επαναστάσεων. Επιπλέον, θεωρούσε ότι τα ΝΠ είναι ένα από τα βασικά αναλυτικά εργαλεία που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας επιστημονικής κρίσης και τα οποία βοηθούν να προωθηθεί η βασική εννοιολογική αλλαγή (Kuhn, 1977, p. 263). Μάλιστα, παραθέτει το τρένο του Einstein, το μικροσκόπιο του Heisenberg, και διάφορα αποσπάσματα από ΝΠ του Γαλιλαίου ως παραδείγματα που παίζουν αυτό τον ρόλο στην αλλαγή της θεωρίας. Όμως, θα πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι ο Kuhn πιθανόν να συνειδητοποίησε τη σημασία και τον ρόλο των ΝΠ στην ανάδειξη μιας θεωρίας, επειδή επηρεάστηκε καθοριστικά από τον Heisenberg, κατά τις συνεντεύξεις που είχε μαζί του, ήδη από το 1963. Συγκεκριμένα, στην 6^η συνέντευξη, ο Heisenberg αναφέρει ρητά ότι, κατά την περίοδο που βρίσκονταν στην Κοπεγχάγη στις συζητήσεις του με τους Bohr, Sommerfeld και την υπόλοιπη ομάδα, τα ΝΠ (Gedanken-experiments) έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της κβαντικής θεωρίας (Kuhn 1963).

Ο Brown, αλλά και ο Norton, από διαφορετική οπτική ο καθένας, συμφώνησαν με τη θέση του Kuhn ότι τα ΝΠ μπορούν να παίξουν έναν ρόλο στην αιτιολόγηση των επιστημονικών επαναστάσεων. Όμως, διαφώνησαν ως προς το τι είναι τα ΝΠ και τι μπορούν να κάνουν. Ο Brown παρουσίασε μία πλατωνική θεωρία για τα ΝΠ, σύμφωνα με την οποία τα ΝΠ μπορούν να παρέχουν άμεση πρόσβαση σε αλήθειες για τους νόμους της φύσης. Αυτή την άποψη ο Norton χαρακτήρισε ως μαγεία. Ο ίδιος, βασιζόμενος στην εμπειρία, χαρακτήρισε τα ΝΠ ως επιχειρήματα (Stuart et al., 2018).

Ο Popper (1902/1994) μελέτησε τις χρήσεις των ΝΠ στην επιστήμη. Κατ' αυτόν τα ΝΠ χρησιμοποιήθηκαν από διάσημους επιστήμονες για τη διατύπωση καινοτόμων θεωριών, την ανάδειξη αντιφάσεων σε ήδη υπάρχουσες θεωρίες, την τροποποίηση παλαιών θεωριών σύμφωνα με τα νέα ευρήματα, ή ακόμη την αντικατάστασή τους από μία νέα θεωρία.

Ο ρόλος της αφαίρεσης και της θεωρητικής σκέψης στη δημιουργία ΝΠ

Ο ρόλος της αφαίρεσης είναι σημαντικός στη δημιουργία ενός ΝΠ. Σύμφωνα με τον Mach (1896/1976), στα ΝΠ συμβαίνει μία σημαντική διαδικασία όπου νοητικά ένας ή περισσότεροι παράγοντες, οι οποίοι ποσοτικά επηρεάζουν το αποτέλεσμα, παραλείπονται, έτσι ώστε να μπορεί να μελετηθεί η επίδραση των υπολοίπων παραγόντων.

Αντίστοιχα, κατά τους Miller (1986) και Galili (2009), το ΝΠ αντιπροσωπεύει μια νοητική δραστηριότητα που συνδυάζει τη φαντασία και τη θεωρητική σκέψη αναφερόμενο σε πραγματικά αντικείμενα. Ο «πειραματιστής» ελεύθερος από τους περιορισμούς της πραγματικότητας (όπως οι θερμικές απώλειες λόγω τριβής), δημιουργεί «εξιδανικευμένα πειράματα». Ο «πειραματιστής» επιτρέπεται να «ξεχάσει» όλους τους τεχνικούς περιορισμούς του απαραίτητου για ένα πραγματικό πείραμα εξοπλισμού, το κόστος που συνεπάγεται, τη δυνατότητα υλοποίησης, κ.λπ. (Asikainen & Hirvonen, 2014· Galili, 2009).

Σύμφωνα με τους (Stuart et al., 2018), ο Sorensen (όπως και ο Mach) θεώρησε τα ΝΠ ως ένα τύπο νοητικού συλλογισμού και τα ενέταξε σε ένα συνεχές με τα πραγματικά πειράματα. Επιχειρηματολόγησε ότι τα ΝΠ κυρίως εξαλείφουν ανορθολογισμούς στη σκέψη μας. Επιπλέον, (όπως και ο Mach) ισχυρίστηκε ότι τα ΝΠ λειτουργούν αντλώντας από τα αποθέματα της εμπειρικής γνώσης που συγκεντρώνουμε στη ζωή μας, συνδυαζόμενα με τις εσωτερικές ιδέες και δομές που έχουν προγραμματιστεί στο μυαλό μας ως προϊόντα της δαρβίνειας εξέλιξης.

Η εξιδανίκευση (idealization), σύμφωνα με τον Koyre (1968), απαιτείται για την “μαθηματική προσέγγιση στη φύση” που διεξάγεται στο μυαλό, και έτσι τα ΝΠ “κλείνουν το κενό ανάμεσα στο εμπειρικό γεγονός και στη θεωρητική έννοια». Αυτή η λειτουργία των ΝΠ είναι απαραίτητη στην επιστημονική σκέψη και καταδεικνύει την συνθετική φύση της επιστημονικής γνώσης (Koyre, 1968).

Ο ρόλος της φαντασίας, της αφήγησης και των απεικονίσεων στη δημιουργία νοητικών μοντέλων - Ο ρόλος της επικοινωνίας

Αλλά και ο ρόλος της φαντασίας, της αφήγησης και της επικοινωνίας είναι σημαντικός σε ένα ΝΠ. Πράγματι, στα ΝΠ χρησιμοποιείται η φαντασία για να στηθεί ένα «νοητικό σκηνικό», που συνήθως αναφέρεται σε οικείες καταστάσεις, παρά το γεγονός ότι οι συμβάσεις που απαιτούνται προχωρούν πέρα από τις καθημερινές εμπειρίες. Κατά τη Nersessian (1993, p. 27), σε ένα ΝΠ, ο επιστήμονας κατασκευάζει ένα δυναμικό μοντέλο στο μυαλό του, φαντάζεται μία διαδοχή γεγονότων και διαδικασιών και εξάγει συμπεράσματα. Κατόπιν, «κατασκευάζει μία αφήγηση για να περιγράψει το σκηνικό και την αλληλουχία των γεγονότων για να επικοινωνήσει» το ΝΠ σε άλλους. Η Nersessian ισχυρίζεται ότι η αφηγηματική παρουσίαση ενός ΝΠ δίνει το έναυσμα για τη δημιουργία ενός νοητικού μοντέλου, το οποίο είναι «ένα δομικό, συμπεριφορικό ή λειτουργικό ανάλογο με ένα φαινόμενο του πραγματικού κόσμου» (Nersessian, 2018, p.311).

Την επικοινωνιακή διάσταση των ΝΠ τονίζουν οι Brown & Fehige (2011, p. 1). Θεωρούν ότι τα ΝΠ χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία σε αφηγηματική μορφή, μερικές φορές με τη χρήση μέσων όπως μια απεικόνιση με σχήματα.

Η ερμηνευτική και επικοινωνιακή ισχύς των ΝΠ φαίνεται από το γεγονός ότι γνωστοί επιστήμονες, όπως ο Αϊνστάιν, ανέπτυξαν ΝΠ όχι μόνο για την ανάπτυξη των θεωριών τους αλλά και για να επικοινωνήσουν τόσο με άλλους επιστήμονες όσο και με το ευρύ κοινό, προκειμένου να εξηγήσουν τις θεωρίες τους (σε όλες τους τις διαστάσεις). Επιπλέον, αρκετοί γνωστοί επιστήμονες (όπως ο Gamow, 1990· οι Landau & Rumer, 1960· κ.ά.), έγραψαν δημοφιλή βιβλία φυσικής, όπου συχνά χρησιμοποιούν τα ΝΠ για να παρουσιάσουν κυρίως θεωρίες του 20ού αιώνα (Velentzas et al., 2007). Οι επιστήμονες αυτοί λοιπόν αντιμετωπίζουν τα ΝΠ ως δυναμικά μέσα εκλαΐκευσης, καθώς βοηθούν το κοινό να κατανοήσει αφενός τις θεωρίες της φυσικής και να αναπτύξει αφετέρου θετική στάση απέναντί της (Χαλκιά, 2013).

Τα βήματα για την υλοποίηση ενός ΝΠ

Προσπαθώντας να περιγράψει την πορεία ενός ΝΠ, η Reiner (1998) θεωρεί ότι το ΝΠ περιλαμβάνει 5 βήματα:

- α) τη διατύπωση ενός προβλήματος (ή μιας υπόθεσης),
- β) τον σχηματισμό ενός φανταστικού κόσμου,
- γ) τον νοητικό σχεδιασμό και τη (νοητική) εκτέλεση ενός πειράματος,
- δ) την εξαγωγή πειραματικού αποτελέσματος με την λογική, και
- ε) την εξαγωγή συμπεράσματος.

Απόπειρες περιγραφής και ορισμού του ΝΠ

Διατρέχοντας τη σχετική βιβλιογραφία διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει ένας κοινά αποδεκτός ορισμός και αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το ΝΠ έχει μελετηθεί από ερευνητές διαφορετικών επιστημονικών πεδίων (της φιλοσοφίας, της ιστορίας της επιστήμης, της γνωσιακής επιστήμης, των κοινωνικών επιστημών, κ.λπ.) και διαφόρων φιλοσοφικών παραδόσεων (εμπειρισμού, ιδεαλισμού, φυσιοκρατίας, κ.λπ.).

Στη βιβλιογραφία ανιχνεύονται διάφοροι ορισμοί, που από διαφορετική -πολλές φορές- σκοπιά διαφωτίζουν τη σημασία τους.

Ο Mach χρησιμοποίησε τα ΝΠ κατά την αναθεώρηση της Μηχανικής, προκειμένου να την εδραιώσει εμπειρικά (και όχι μεταφυσικά) (Galili, 2009). Κατά τον Mach (1883/1989), ένα ΝΠ αντιπροσωπεύει ένα πείραμα, που δεν χρειάζεται να εκτελεστεί εξαιτίας του προφανούς αποτελέσματός του.

Ο Brown κατά καιρούς έχει αποπειραθεί να δώσει κάποιου είδους ορισμό για το ΝΠ. Το 1991, αξιοποιώντας μία μεταφορά, θεωρεί ότι τα ΝΠ είναι πειράματα που διεξάγονται στο «εργαστήριο του μυαλού», καθώς είναι αδύνατον για διάφορους λόγους να γίνουν στην πραγματικότητα. Επιπλέον, θεωρεί ότι ΝΠ είναι ένας ειδικός τύπος νοητικού παραθύρου μέσω του οποίου το μυαλό μπορεί να κατανοήσει τον κόσμο. Το 2002 (ο Brown) σημειώνει: τα ΝΠ είναι μέσα της φαντασίας που χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση της φύσης. Αλλά το 2004, φθάνει να ομολογήσει την αδυναμία ορισμού των ΝΠ. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει: *Είναι δύσκολο να πεις ακριβώς τι είναι τα ΝΠ. Ευτυχώς, επίσης, δεν είναι και σημαντικό.* Και το 2006 επανέρχεται δίνοντας μια πρόχειρη περιγραφή, αναφέροντας ότι ο νοητικός πειραματιστής φαντάζεται «κάποιου είδους διάταξη» και «κατόπιν αφήνει να δει τι θα συμβεί» (Brown, 2006, p. 63).

Ο Norton (2004), όπως προαναφέραμε, θεωρεί ότι τα ΝΠ είναι απλώς επιχειρήματα, που μπορεί να θεωρηθούν ακόμη και γραφικά, και αφορούν μια υποθετική ή εναλλακτική πραγματικότητα.

Ο Gendler (2004) αντίστοιχα αναφέρει: Η εκτέλεση ενός ΝΠ είναι η ανάπτυξη επιχειρηματολογίας με αφορμή ένα φανταστικό σενάριο και με στόχο την επιβεβαίωση ή την απόρριψη κάποιας υπόθεσης ή θεωρίας για το φυσικό κόσμο.

Ο Sorensen (1992: 205) ορίζει το ΝΠ ως ένα πείραμα που ισχυρίζεται ότι μπορεί να επιτευχθεί ο στόχος του χωρίς να χρειαστεί να εκτελεστεί. Ερμηνεύει τα ΝΠ ως οριακή περίπτωση των ρεαλιστικών πειραμάτων, και τα ορίζει με όρους νοητικής προσομοίωσης ενός πειράματος χωρίς στην πραγματικότητα να το εκτελέσεις.

Οι Reiner & Gilbert (2000) θεωρούν ότι το ΝΠ είναι μία δημιουργική σκέψη που σκοπεύει να ελέγξει και/ή να πείσει άλλους για την εγκυρότητα ενός ισχυρισμού.

Από την πλευρά της γνωσιακής επιστήμης, η Nersessian (1993b) υποστηρίζει ότι τα ΝΠ είναι μία μορφή ενός προσομοιωμένου νοητικού συλλογισμού που εκτελείται από τον επιστήμονα. Τα ΝΠ είναι ειδικές περιπτώσεις των νοητικών προσομοιώσεων διότι αναφέρονται σε νοητικές αναπαραστάσεις ειδικά σε νοητικές εικόνες.

Ο Galili (2009), προσπαθώντας να συνοψίσει τους διάφορους ορισμούς, διατυπώνει τον ακόλουθο: ΝΠ είναι ένα σύνολο υποθετικο-επαγωγικών θεωρήσεων που αφορούν φαινόμενα του πραγματικού κόσμου, και βασίζονται σε μια έγκυρη θεωρία (αρχή ή άποψη).

Οι Moue, Masavetas, & Karayianni (2006), αποδελτιώνοντας τους ορισμούς ΝΠ από διαφορετικές σχολές σκέψης κατέληξαν στις εξής προσεγγίσεις των ΝΠ:

- ΝΠ ως εκ των προτέρων επιστήμη (τα ΝΠ μπορούν να παρέχουν άμεση πρόσβαση σε αλήθειες για τους νόμους της φύσης), όπως υποστηρίζει ο Brown (1991).

- ΝΠ ως επιχειρήματα, όπως υποστηρίζει ο Norton (2004)·
- ΝΠ ως οχήματα για εννοιολογική ανάπτυξη, όπως υποστηρίζει ο Gendler (1998)·
- ΝΠ ως «περιορισμένη περίπτωση» πραγματικών πειραμάτων, όπως υποστηρίζει ο Sorensen (1992, 205)·
- ΝΠ ως νοητικά μοντέλα, όπως υποστηρίζει η Nersessian (1993).

Λειτουργία και ταξινόμια των ΝΠ

Για μια καλύτερη ανάλυση των ΝΠ και κατανόηση του ρόλου τους στην επιστήμη, έχουν προταθεί διάφορα σχήματα ταξινόμησης. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα:

Ο Sorensen (1992) ταξινομεί τα ΝΠ, ανάλογα με τις αιτίες που δεν υλοποιούνται στην πραγματικότητα.

- (1) Επαρκή ΝΠ (Unimprovable TEs): ΝΠ, στα οποία η νοητική τους εκτέλεση απαντά στο ζητούμενο ερώτημα, ενώ η ενδεχόμενη πραγματική εκτέλεσή τους δεν συνεισφέρει στην απάντηση. Για παράδειγμα η εκτέλεση του ΝΠ «η γάτα του Schrödinger» δεν απαντά στο ερώτημα που έχει τεθεί, αλλά μεταθέτει το πρόβλημα στην πιθανοκρατική φύση του.
- (2) Υπερβολικά ΝΠ (Unaffordable TEs): ΝΠ στα οποία η πιθανή εκτέλεσή τους είναι υπερβολικά επιζήμια (τα κέρδη υπερβαίνουν τις απώλειες). Για παράδειγμα, τι θα συμβεί αν αφήσουμε έναν αστροναύτη στο διάστημα χωρίς τη στολή του.
- (3) Αδύνατον να εκτελεστούν ΝΠ (Impossible TEs): ΝΠ των οποίων η εκτέλεση είναι θεωρητικά δυνατή αλλά πρακτικά αδύνατη. Για παράδειγμα να αφεθεί ένα σώμα σε ένα τούνελ που διατρέχει τη Γη κατά μήκος μιας διαμέτρου της.

Ο Brown (1991), ταξινομεί τα ΝΠ σύμφωνα με τη χρήση τους ως:

- (1) Αποδομητικά ΝΠ (Destructive TEs): ΝΠ που αναδεικνύουν τις αδυναμίες μιας θεωρίας και που μπορεί να οδηγήσουν και στην κατάρριψή της (π.χ. η γάτα του Schrödinger).
- (2) Εποικοδομητικά ΝΠ (Constructive TEs): ΝΠ που βοηθούν στην καθιέρωση μιας θεωρίας και διαιρούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:
 - (2α) Διαμεσολαβητικά ΝΠ (Mediative TEs): ΝΠ που διευκολύνουν να εξαχθεί ένα συμπέρασμα από μία συγκεκριμένη και καλά διατυπωμένη θεωρία (π.χ. ο δαίμονας του Maxwell).
 - (2β) Υποθετικά ΝΠ (Conjectural TEs): ΝΠ που αναδεικνύουν μέσω νοητικού πειραματισμού ένα φαινόμενο. Κατόπιν ο επιστήμονας υποθέτει μία θεωρία που να εξηγεί το φαινόμενο (π.χ. ο κουβάς του Νεύτωνα).
 - (2γ) Άμεσα ΝΠ (Direct TEs): Δεν ξεκινούν από μία καλά διατυπωμένη θεωρία, αλλά τελειώνουν με μία τέτοια θεωρία (π.χ. τα κεκλιμένα επίπεδα του Stevin).
- (3) Πλατωνικά ΝΠ (Platonic TEs): ΝΠ που είναι ταυτόχρονα αποικοδομητικά (1) και άμεσα εποικοδομητικά (2γ), και οδηγούν στην ανάπτυξη μιας θεωρίας και στην κατάρριψη μιας άλλης (π.χ. η ελεύθερη πτώση των σωμάτων του Γαλιλαίου).

Αντίστοιχα ο Popper θεωρεί ότι η επινόηση ΝΠ στην επιστήμη ικανοποιεί τις εξής χρήσεις:

- 1) Κριτική χρήση (critical use): Τα ΝΠ χρησιμοποιούνται για την άσκηση κριτικής σε υπάρχουσες θεωρίες.
- 2) Καινοτομική/ευρετική χρήση (heuristic use): Τα ΝΠ χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή καινοτόμων θεωριών.
- 3) Απολογητική χρήση (apologetic use): Τα ΝΠ χρησιμοποιούνται ως επιχειρήματα υπεράσπισης μιας θεωρίας.

Η κριτική και η ευρετική χρήση των ΝΠ, σύμφωνα με τον Popper, αντιστοιχεί στα αποδομητικά και τα εποικοδομητικά ΝΠ σύμφωνα με τον Brown.

Διαφορές και ομοιότητες μεταξύ ΝΠ και πραγματικών πειραμάτων

Ένα επιστημονικό πείραμα μπορεί να είναι είτε ένα ΝΠ που εκτελείται στη σκέψη ή ένα ρεαλιστικό πείραμα που εκτελείται στο εργαστήριο (Asikainen & Hirvonen, 2014). Επομένως, το ΝΠ αποτελεί μία ειδική περίπτωση του επιστημονικού πειράματος. Μπορεί να προηγείται του πραγματικού πειράματος και βοηθά τον πειραματιστή να το εκτελέσει. Σε μερικές περιπτώσεις, ένα πραγματικό πείραμα μπορεί να μην είναι δυνατόν να εκτελεστεί και τότε το ΝΠ μπορεί να είναι ο μόνος τρόπος να πειραματιστεί κανείς. Το ρεαλιστικό πείραμα είτε επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα ενός ΝΠ είτε καταδεικνύει ότι το ΝΠ είναι λανθασμένο. Όμως, αλλά και τα δύο είδη πειραμάτων είναι σημαντικά για την κατασκευή της επιστημονικής γνώσης (Asikainen & Hirvonen, 2014).

Ο Buzzoni (2009) ισχυρίζεται ότι τα ΝΠ και τα πειράματα του πραγματικού κόσμου σχηματίζουν μια διαλεκτική ενότητα: χωρίς τα ΝΠ δεν θα υπήρχαν τα πραγματικά πειράματα γιατί δεν θα γνωρίζαμε πώς να θέσουμε ερωτήσεις για τη φύση, και χωρίς τα ρεαλιστικά πειράματα δεν θα μπορούσαμε να βρούμε απαντήσεις σε αυτές τις ερωτήσεις. Δηλαδή, όπως το θέτει: «πραγματικά πειράματα χωρίς ΝΠ είναι τυφλά, και ΝΠ χωρίς πραγματικά πειράματα είναι κενά» (Buzzoni 2018).

Τα ΝΠ, όπως και τα ρεαλιστικά πειράματα, οδηγούνται από τη θεωρία και στοχεύουν στην εγκαθίδρυση, τον έλεγχο και την εφαρμογή της θεωρίας. Επίσης και οι δύο τύποι πειραμάτων εμφανίζονται για αξιολόγηση από την επιστημονική κοινότητα με όμοιους τρόπους, για παράδειγμα σε συνέδρια, σε περιοδικά, κ.λπ. και συχνά έχουν απρόβλεπτες συνέπειες (Gilbert & Reiner, 2000a).

Όμως, παρόλο ότι «στα αρχικά τους στάδια, όλα τα πειράματα είναι νοητικά», τα ΝΠ έχουν κάποιες διαφορές από τα συνήθη πειράματα. Τα ΝΠ συνήθως απαιτούν έναν νοητικό πειραματιστή, ενώ τα ρεαλιστικά πειράματα, ειδικά στις μέρες μας, εκτελούνται από μία ομάδα επιστημόνων και τεχνικών. Επίσης, αντίθετα με τα ρεαλιστικά πειράματα, τα ΝΠ δεν απαιτούν πραγματικές συσκευές και επομένως είναι αδύνατον να προκύψει κάποια βλάβη, ή τα αποτελέσματα να επηρεαστούν από κάποιον εξωτερικό παράγοντα.

Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης ενός ΝΠ, ο πειραματιστής δεν παίρνει ποσοτικές μετρήσεις (Sorensen, 1992).

Τελικά τι είναι τα ΝΠ;

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα ΝΠ (Χαλκιά, 2013):

- είναι εννοιολογικά εργαλεία που βοηθούν στην ανάπτυξη και την κατανόηση επιστημονικών θεωριών (συνήθως της φυσικής),
- λειτουργούν ως επιχειρήματα που στοχεύουν στην υποστήριξη, τον έλεγχο ή την ανατροπή μιας επιστημονικής θεωρίας,
- δεν απαιτούν πραγματικές συσκευές, όπως τα ρεαλιστικά πειράματα, και επομένως ο «πειραματιστής» δεν χρειάζεται να λάβει υπόψη του τους πρακτικούς περιορισμούς των εργαστηριακών πειραμάτων,
- ακολουθούν παρόμοια μεθοδολογία με τα κανονικά πειράματα (π.χ. εντοπισμός και έλεγχος μεταβλητών, εξαγωγή συμπερασμάτων, κ.λπ.),
- δεν υλοποιούνται σε πραγματικές συνθήκες, αλλά στο μυαλό του ερευνητή (ή μαθητή),
- αξιοποιούν τη φαντασία και τη λογική για να δοκιμάσουν την ισχύ των προτεινόμενων θεωριών σε περιοχές έξω από τα όρια της καθημερινής εμπειρίας (π.χ. σε έναν κόσμο χωρίς τριβές ή χωρίς βαρύτητα, στο μικρόκοσμο, στο μεγάκοσμο, κ.ά.),
- αξιοποιούν τη φόρμα και τις τεχνικές της αφήγησης για να αναπτύξουν μία νοητική προσομοίωση, ώστε να μπορέσουν να την επικοινωνήσουν σε άλλους (π.χ. τα μέλη της επιστημονικής κοινότητας, τους μαθητές μιας τάξης),
- λειτουργούν ως μέσα πρόκλησης της σκέψης, αιφνιδιάζοντας τον κοινό νου και οδηγώντας σε συμπεράσματα που βρίσκονται έξω από την καθημερινή εμπειρία και τρόπο σκέψης,
- χρησιμοποιούνται ως μέσα εκλαΐκευσης της επιστήμης.

ΜΕΡΟΣ 2^ο: Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΝΠ ΣΤΗ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΝΠ και επιστημονικός γραμματισμός

Τα ΝΠ, όπως προαναφέρθηκε, αποτελούν εγγενές στοιχείο της επιστημονικής σκέψης και απαραίτητο εργαλείο για τη διαμόρφωση των επιστημονικών θεωριών. Στη σύγχρονη εποχή, αποτελούν ένα από τα μέσα που χρησιμοποιούν τόσο οι μαθητές όσο και οι επιστήμονες όταν προσπαθούν να επιλύσουν προβλήματα (Dönertas & Özdemir, 2014; Stephens & Clement, 2006; Reiner, 2006).

Ιστορικά, πρώτος ο Mach (1896/1976), τόνισε τη σημασία των ΝΠ στην εκπαίδευση.

Τα ΝΠ στη διδασκαλία των φυσικών επιστημών μπορούν να αξιοποιηθούν με δύο βασικά τρόπους: α) ως μέσο για τη διδασκαλία της γνώσης περιεχομένου, καθώς

αποτελούν βασικό συστατικό των μεγάλων επιστημονικών θεωριών, και β) ως διδακτικό εργαλείο, καθώς αποτελούν βασική συνιστώσα της επιστημονικής διερεύνησης. Είναι προφανές ότι, επιπλέον, ασκούν τους μαθητές στη φύση της επιστήμης.

Όπως αναφέρει η Χαλκιά (2013), η αξιοποίηση των ΝΠ στο μάθημα της φυσικής έχει ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Αυτό στο γεγονός ότι τα ΝΠ συνδυάζουν με μοναδικό τρόπο τη λογική και τη φαντασία, που απαιτούν δύο - εν μέρει - συγκρουόμενα είδη σκέψης: τη συγκλίνουσα σκέψη (χαρακτηριστικό στοιχείο της νοητικής πειθαρχίας) και την αποκλίνουσα σκέψη (χαρακτηριστικό στοιχείο κάθε είδους δημιουργίας). Και ενώ στο μάθημα της φυσικής οι μαθητές ασκούνται στη νοητική πειθαρχία (π.χ. μαθηματικός φορμαλισμός), δεν φαίνεται να ασκούνται το ίδιο στη δημιουργική φαντασία, η οποία όμως αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό κάθε μεγάλης επιστημονικής θεωρίας. Έτσι, τα ΝΠ καλύπτουν το έλλειμμα αυτό.

Επιπλέον, καθώς η παρουσίαση των ΝΠ βασίζεται στις τεχνικές και τη φόρμα της αφήγησης, και αποφεύγει τον σύνθετο μαθηματικό φορμαλισμό (ιδίως στη σχολική ή την εκλαϊκευμένη τους εκδοχή), είναι πολύ ελκυστική για τους μαθητές οι οποίοι μπορούν να παρακολουθήσουν τη λογική και τα επιχειρήματα που εκτίθενται, χωρίς να αποθαρρύνονται από τις απαιτήσεις που έχει η κατανόηση των σχετικών μαθηματικών τύπων (Χαλκιά, 2013). Κατά τον Klassen (2006), μάλιστα, η παιδαγωγική αποτελεσματικότητα των ΝΠ βασίζεται σε αυτές ακριβώς τις δύο όψεις τους, στο γεγονός δηλαδή ότι αναπτύσσουν επιχειρήματα (επιστημονικός Λόγος) τα οποία εκθέτουν με τη μορφή της αφήγησης (καθημερινός κοινωνικός Λόγος).

Ως εκ τούτου, τα ΝΠ συμβάλλουν καθοριστικά στον επιστημονικό γραμματισμό των μαθητών (Özdemir, 2009). Όπως επισημαίνει ο Matthews (1994), αυτό συμβαίνει διότι κάποια χαρακτηριστικά που απαιτούνται από τον νοητικό πειραματιστή, όπως «η φαντασία, η διατύπωση υποθέσεων, η κριτική σκέψη», αποτελούν επίσης βασικές επιδιώξεις για τη διδασκαλία των φυσικών επιστημών, εφόσον αναπτύσσουν την κριτική σκέψη των μαθητών και τη φαντασία τους, ενώ τους βοηθούν να διατυπώσουν προβλέψεις και υποθέσεις, και να φτάσουν σε αξιόπιστα συμπεράσματα.

Τα οφέλη της αξιοποίησης των ΝΠ στη διδασκαλία της φυσικής

Κατά τον Galili (2009), αλλά και άλλους ερευνητές, τα πιθανά οφέλη από τη χρήση των ΝΠ στην εκπαίδευση συνοψίζονται στα εξής:

A) ΝΠ και γνώση περιεχομένου: Τα ΝΠ, και ιδιαίτερα τα ιστορικά ΝΠ, συχνά εστιάζουν στα βασικά χαρακτηριστικά των επιστημονικών θεωριών. Αναδεικνύουν τις πυρηνικές έννοιες των θεωριών της φυσικής, μέσω απλοποιημένων μοντέλων που εστιάζουν στις βασικές όψεις του προβλήματος, παρακάμπτοντας τις τεχνικές λεπτομέρειες και τα πειραματικά σφάλματα και αποκλείοντας τους παράγοντες που αποτελούν εμπόδιο σε ένα πραγματικό πείραμα (θέρμανση, τριβή, κ.λπ). Επιπλέον, τα ΝΠ είναι ανεκτίμητα στην παρουσίαση της σύγχρονης φυσικής, όπως είναι η θεωρία της σχετικότητας και η κβαντομηχανική, όπου τα πραγματικά πειράματα αποκλείονται πρακτικά από τις σχολικές αίθουσες (Galili, 2009).

Ακολουθως παρατίθενται διάφορες έρευνες που έγιναν για τη διδασκαλία διαφόρων περιοχών της φυσικής με τη βοήθεια των σχετικών ΝΠ.

Κλασική Μηχανική: Οι Velentzas & Halkia (2013a), σε έρευνά τους δίδαξαν δορυφορική φυσική με τη βοήθεια του ΝΠ «το κανόνι» του Νεύτωνα σε μαθητές του Λυκείου. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η πλειοψηφία των μαθητών μπόρεσε: α) να τροποποιήσει τις εναλλακτικές ιδέες της σχετικά με το βαρυτικό πεδίο της Γης, β) να «τρέξει» μια νοητική προσομοίωση ώστε να καταλήξει στο αποτέλεσμα ότι εάν σε ένα αντικείμενο δοθεί η κατάλληλη ταχύτητα, μπορεί να τεθεί σε τροχιά γύρω από τη Γη ή γύρω από ένα άλλο βαρύ σώμα και να το υποστηρίξει με κατάλληλα επιχειρήματα και γ) να συνειδητοποιήσει ότι οι ίδιοι φυσικοί νόμοι ισχύουν τόσο στη Γη, όσο και οπουδήποτε στο σύμπαν.

Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας και Κβαντομηχανική: Σε σχετικές έρευνες που διεξήγαγαν, οι Velentzas & Halkia (2011, 2013b), χρησιμοποίησαν τα ΝΠ ως διδακτικό εργαλείο για τη διδασκαλία θεωριών της φυσικής του 20ου αιώνα σε μαθητές Λυκείου. Συγκεκριμένα δίδαξαν την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg μέσω του ΝΠ «το μικροσκόπιο του Heisenberg» και τη Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας μέσω των ΝΠ «ο ανελκυστήρας» του Einstein και «το τρένο» του Einstein. Στην πρώτη περίπτωση, οι μαθητές μπόρεσαν να εξάγουν την αρχή της αβεβαιότητας και να κατανοήσουν ότι η αρχή της αβεβαιότητας αφορά μια γενική αρχή της φύσης. Στη δεύτερη περίπτωση, οι μαθητές μπόρεσαν να συνειδητοποιήσουν καταστάσεις που συνδέονται με τον κόσμο πέρα από την καθημερινή εμπειρία και να κατανοήσουν σε βασικό επίπεδο την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας. Πολύ πιο εστιασμένα, οι Dimitriadi & Halkia (2012), σε έρευνά τους δίδαξαν τη Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας σε 40 μαθητές του Λυκείου, μέσω μιας διδακτικής σειράς που βασίζονταν στο ΝΠ «το τρένο» του Einstein. Συγκεκριμένα δίδαξαν το πρώτο αξίωμα (την αρχή της σχετικότητας), το δεύτερο αξίωμα (το αμετάβλητο της ταχύτητας του φωτός), τη σχετικότητα του ταυτόχρονου, τη σχετικότητα του χρόνου και τη σχετικότητα του μήκους. Η έρευνα έδειξε ότι όλοι οι μαθητές μπόρεσαν να ακολουθήσουν τους απαραίτητους συλλογισμούς. Επίσης, μπόρεσαν να χειριστούν τα δύο αξιώματα της θεωρίας και οι περισσότεροι μπόρεσαν να τα εφαρμόσουν για να αντιμετωπίσουν τις συνέπειες της θεωρίας.

B) ΝΠ και αξιοποίηση της φαντασίας ως μέσον προσέλευσης του ενδιαφέροντος των μαθητών: Τα ΝΠ εκτελούνται στη φαντασία των μαθητών, επιτρέποντάς τους να αναπαραστήσουν καταστάσεις που είναι αδύνατον να αναπαραχθούν στο εργαστήριο (π.χ. μεγάλες αποστάσεις, υψηλές ταχύτητες, υπερβολικές θερμοκρασίες, ισχυρά πεδία, κ.λπ.). Επίσης, ανοίγουν ένα μοναδικό παράθυρο στους παράξενους και άγνωστους κόσμους των υπερ-μεγάλων και υπέρ-μικρών κλιμάκων, μακρινών και μη οικείων, αιχμαλωτίζοντας τη φαντασία των μαθητών. Έτσι προσελκύουν τους μαθητές, γιατί τα περιβάλλοντα στα οποία εκτυλίσσονται μοιάζουν με τα περιβάλλοντα που δημιουργεί η επιστημονική φαντασία (π.χ. το τούνελ διαμέσου της Γης, με αποτέλεσμα να αυξάνει το ενδιαφέρον των μαθητών για τις θεωρίες της φυσικής (Galili, 2009)). Όπως επισημαίνουν

οι Gilbert & Reiner (2000β), τα ΝΠ είναι ισχυρά εκπαιδευτικά εργαλεία, καθώς οι μαθητές χρησιμοποιούν μεν τη φαντασία τους, σε μια μορφή όμως «δομημένη, προσανατολισμένη σε συγκεκριμένο στόχο, βασισμένη σε προηγούμενες εμπειρικές αναπαραστάσεις τους και εσωτερικά συνεπή»

Γ) ΝΠ και Φύση της επιστήμης: Τα ΝΠ εισάγουν τους μαθητές στην κουλτούρα της επιστήμης, αποκαλύπτοντας την αυθεντική εικόνα της (Reiner & Burko, 2003· Galili, 2009). Πολλά από τα ιστορικά ΝΠ συνδέονται με το ήθος της επιστήμης, αντανακλούν τους σκοπούς της, το πνεύμα, τις αξίες και τις παραδόσεις της. Τα ΝΠ εισάγουν τη δημόσια συζήτηση, την επιχειρηματολογία και τη μάχη των ιδεών. Η χρήση των ΝΠ στη σχολική αίθουσα εξοικειώνει τους μαθητές με τη μεθοδολογία της επιστήμης (Asikainen & Hirvonen, 2014), καθώς μπορεί να σχεδιαστούν δραστηριότητες που εστιάζουν: «στην κατανόηση των εννοιολογικών συμβάσεων, στις στρατηγικές της διερεύνησης στις φυσικές επιστήμες, στα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία των αποτελεσμάτων αυτής της διερεύνησης, και στον ρόλο και στους μηχανισμούς της συνεργατικής δουλειάς μεταξύ των επιστημόνων (Gilbert & Reiner, 2000α). Επιπρόσθετα, τα ΝΠ είτε επειδή δεν απαιτούν καθόλου μαθηματικό φορμαλισμό, είτε επειδή απαιτούν περιορισμένο (μαθηματικό φορμαλισμό), είναι ικανά να προκαλέσουν την περιέργεια στο ευρύ κοινό, εκθέτοντας τους μαθητές στα πιο προκλητικά και βασικά επιστημονικά ζητήματα (Galili, 2009).

Δ) ΝΠ και εναλλακτικές αντιλήψεις μαθητών: Τα ΝΠ και η κατασκευή των φανταστικών κόσμων που προϋποθέτουν, βοηθούν στην αποκάλυψη των άδηλων αντιλήψεων που έχουν οι μαθητές για τα σχετικά επιστημονικά ζητήματα. Ο υποθετικο-επαγωγικός συλλογισμός που συνδέεται με τα ΝΠ ενθαρρύνει τα άτομα να εκφράσουν τις αντιλήψεις τους. Αυτό το χαρακτηριστικό κάνει τα ΝΠ ένα ισχυρό εργαλείο για τη διερεύνηση της γνώσης των μαθητών και του σχεδιασμού συναρπαστικών διδακτικών εργαλείων κονστрукτιβιστικού τύπου (Dönertas & Özdemir, 2014· Galili, 2009· Reiner, 2006· Gilbert & Reiner, 2004· Reiner & Gilbert, 2000· Camp & Clement, 1994· Clement, 1983).

Όπως επισημαίνει ο Matthews (1994), είναι πολύ σημαντικό οι εκπαιδευτικοί να ζητούν από τους μαθητές να προβλέψουν το αποτέλεσμα ενός ΝΠ, ιδίως όταν διδάσκονται σύνθετα φαινόμενα και θεωρίες φυσικής. Θεωρεί ότι η διαδικασία αυτή κινητοποιεί τη σκέψη του μαθητή και φανερώνει τι πιστεύει ο μαθητής για τις έννοιες που μελετώνται. Κατόπιν, εάν οι μαθητές εκτελέσουν το σχετικό ΝΠ, μπορεί να διαπιστώσουν ότι τα αποτελέσματα δεν συμφωνούν με τις προβλέψεις τους (τις εναλλακτικές ιδέες τους), και αυτό ίσως αποτελέσει κίνητρο για την αναδόμηση των ιδεών τους (Helm et al., 1985). Μάλιστα, επειδή η διεξαγωγή ενός ΝΠ οδηγεί συχνά σε απρόβλεπτες για τον κοινό νου καταστάσεις, κάτι που κεντρίζει το φαντασιακό των μαθητών, οι μαθητές εμπλέκονται με ευχαρίστηση στην όλη διαδικασία. Επιπλέον, τα αποτελέσματα ενός ΝΠ συχνά αιφνιδιάζουν τον «καθημερινό» τρόπο σκέψης και μπορεί να οδηγήσουν σε τροποποίηση των αρχικών απόψεων των μαθητών (Χαλκιά, 2013). Τα ΝΠ λοιπόν

μπορούν να αξιοποιηθούν στις περιπτώσεις εκείνες όπου επιδιώκεται εννοιολογική αλλαγή.

Ε) ΝΠ και επίλυση προβλημάτων:

α) Εμπειρικός πειραματισμός και νοητικός πειραματισμός: Σε σχετική έρευνα φάνηκε ότι καθώς οι μαθητές σχεδίαζαν λύσεις για τα προβλήματα που τους τέθηκαν, έτειναν σε μεγάλο βαθμό να εκτελούν ΝΠ που διαπλέκονταν με τη διαδικασία των πραγματικών πειραμάτων. Οι ερευνητές συμπεράναν ότι η διαδικασία της εναλλαγής μεταξύ του εμπειρικού πειραματισμού και του νοητικού πειραματισμού οδηγούσε σε αποδοχή των επιστημονικά αποδεκτών εννοιών (Reiner & Gilbert, 2004).

β) Τρόποι χρήσης των ΝΠ κατά την επίλυση προβλημάτων: Στόχος διαφόρων ερευνών ήταν οι τρόποι χρήσης των ΝΠ από τους μαθητές καθώς εργαζόντουσαν στην επίλυση προβλημάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ενώ οι επιστήμονες χρησιμοποιούν τα ΝΠ για να διατυπώσουν υποθέσεις ή ως ένα εργαλείο αξιολόγησης (Gendler, 2004 · Reiner & Gilbert 2000), οι μαθητές τα χρησιμοποιούν ως ένα εργαλείο που τους κάνει νόημα ή ως ένα μέσον πρόβλεψης (Dönertas & Özdemir, 2014 · Gilbert & Reiner, 2004 · Stephens & Clement, 2012). Επιπλέον, η Reiner (2006) έδειξε με την έρευνά της που αφορούσε την επίλυση προβλημάτων εντός πλαισίου από τους μαθητές, ότι οι μαθητές χρησιμοποιούν ΝΠ «ως ένα εργαλείο για να βγάλει νόημα το πλαίσιο» παρά ως ένα μέσον για την παραγωγή επιχειρημάτων, όπως στην περίπτωση των ερευνητών φυσικών. Επομένως, τα προβλήματα εντός πλαισίου θεωρούνται ισχυρά εργαλεία για την κινητοποίηση της αισθητηριακής μνήμης ώστε οι μαθητές να εκτελούν ΝΠ.

γ) Πρακτικές μαθητών: Τα ΝΠ που διεξάγονται στις σχολικές αίθουσες, σε αντίθεση με αυτά που εκτελούνται από τους επιστήμονες, φαίνεται να προκύπτουν ως αποτέλεσμα μιας συνεργατικής επίλυσης προβλήματος, όπου κάθε συμμετέχων συμβάλλει με μία διαφορετική άποψη (Reiner 1998). Πράγματι, σε έρευνά τους οι Bancong & Song (2020) έδειξαν ότι κατά την επίλυση προβλημάτων φυσικής, οι μαθητές σχεδίαζαν ΝΠ, τα οποία συχνά μοιράζονταν με τους συμμαθητές τους, και τα αξιολογούσαν από κοινού. Επομένως, συμπεραίνουν ότι τα ΝΠ των μαθητών μπορεί να οικοδομηθούν με έναν συνεργατικό τρόπο, παρά το γεγονός ότι τα ΝΠ των επιστημόνων προκύπτουν μέσα από προσωπικές και σιωπηρές διαδικασίες πειραματισμού κατά την κατασκευή μιας επιστημονικής θεωρίας.

Σε έρευνα που διεξήγαγαν οι Dönertas & Özdemir (2014), διαπίστωσαν ότι όλοι οι συμμετέχοντες - ανεξάρτητα από το επίπεδο της γνώσης τους - ήταν ικανοί να πειραματιστούν νοητικά. Όμως, παρατηρήθηκαν κάποιες διαφορές στη φύση των ΝΠ που χρησιμοποιούσαν οι συμμετέχοντες. Οι διαφορές είχαν να κάνουν με την ικανότητα χειρισμού μεταβλητών που αφορούσαν συγκεκριμένα αντικείμενα (π.χ. τραπέζι, αυτοκίνητο, άνθρωπος) και αφηρημένες έννοιες (π.χ. μάζα, δύναμη, ταχύτητα). Ο νοητικός πειραματισμός των μαθητών που δυσκολεύονταν στους αφηρημένους συλλογισμούς περιοριζόταν στον χειρισμό αντικειμένων, ενώ των μαθητών που είχαν ευχέρεια στους αφηρημένους συλλογισμούς επεκτείνονταν αποτελεσματικά και στα δύο

είδη ΝΠ. Παραδείγματα της δουλειάς επιστημόνων από την ιστορία της επιστήμης επίσης περιγράφουν την εκτέλεση των ΝΠ μέσω του χειρισμού των μεταβλητών και του χειρισμού των αντικειμένων. Για παράδειγμα, ο Νεύτωνας προοδευτικά αύξανε την οριζόντια ταχύτητα εκτόξευσης μιας μπάλας κανονιού σε ακραίες συνθήκες ενώ εκτελούσε το γνωστό ΝΠ του. Ομοίως ο Γαλιλαίος χειρίστηκε τη μάζα στο ΝΠ με την ελεύθερη πτώση των σωμάτων.

Προτάσεις διδακτικής αξιοποίησης των ΝΠ

Οι εκπαιδευτικοί θεωρούν τα ΝΠ αναγκαία όταν πρόκειται να διδάξουν φυσικούς νόμους που περιλαμβάνουν αφαιρετικούς μαθηματικούς τύπους (π.χ. όπως συμβαίνει στην ειδική θεωρία της σχετικότητας), διότι αισθάνονται ότι τους δίνουν την ευκαιρία να χτίσουν γέφυρες ανάμεσα στη γνώση των μαθητών τους και την καθημερινή εμπειρία τους, αφενός, και τις νέες έννοιες και αρχές τις οποίες πρέπει να μάθουν, αφετέρου (Helm et al., 1985).

Σε όλες τις περιπτώσεις, όπως κατέδειξαν έρευνες που προαναφέραμε, οι μαθητές καλό είναι να εργάζονται σε ομάδες, ώστε να μεγιστοποιείται το διδακτικό όφελος.

Δύο φαίνεται να είναι οι βασικές εκπαιδευτικές χρήσεις των ΝΠ (Χαλκιά, 2013):

Α) η διδασκαλία των ιστορικών ΝΠ, με στόχο την κατανόηση του περιεχομένου και της μεθοδολογίας της επιστήμης: Για παράδειγμα, το ΝΠ «το κανόνι» του Νεύτωνα μπορεί να μελετηθεί στο πλαίσιο των κοινωνικο-ιστορικών συνθηκών της εποχής, καθώς ερμηνεύει τον τρόπο κίνησης σωμάτων που περιφέρονται ως δορυφόροι άλλου σώματος στο πλαίσιο της νευτώνειας σκέψης (το κανόνι δορυφόρος της Γης, η Σελήνη δορυφόρος της Γης, οι πλανήτες δορυφόροι του Ήλιου, κ.λπ.). Πολλά σχετικά παραδείγματα έχουν αναφερθεί παραπάνω.

Β) ο σχεδιασμός και η διεξαγωγή ΝΠ για καθαρά διδακτικούς σκοπούς (για τη διδασκαλία διαφόρων φαινομένων της φυσικής για τα οποία δεν έχουν αναπτυχθεί ιστορικά ΝΠ): συχνά, τόσο οι συγγραφείς διδακτικών εγχειριδίων όσο και οι εκπαιδευτικοί της τάξης αισθάνονται την ανάγκη εκτός από τα ιστορικά ΝΠ να προτείνουν νέα ΝΠ προκειμένου να κινητοποιήσουν τη σκέψη των μαθητών τους και να τους εμπλέξουν (είτε στο στάδιο της πρόβλεψης, είτε στο στάδιο της αξιολόγησης) στο πλαίσιο της θεωρίας που αποτελεί το αντικείμενο διδασκαλίας. Για παράδειγμα, ο εκπαιδευτικός θα μπορούσε να δώσει σε ομάδες μαθητών να επεξεργαστούν διάφορα ερωτήματα όπως:

α) με αφορμή την παρατηρούμενη εναλλαγή των εποχών στη Γη και τη διερεύνηση του σχετικού φαινομένου: Φανταστείτε ότι ο άξονας της Γης, αντί να σχηματίζει γωνία 23,5ο με την κάθετο στην εκλειπτική, ήταν κάθετος στο επίπεδο της εκλειπτικής ή ήταν πάνω στο επίπεδο της εκλειπτικής· τι είδους εποχές θα είχαμε σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις στη Γη και πώς θα ήταν η ζωή μας;

β) με αφορμή τη μελέτη και συνειδητοποίηση των συνθηκών στη Σελήνη: Φανταστείτε ότι πηγαίνουμε εκδρομή στη Σελήνη· τι διαφορές θα παρουσίαζε η ζωή εκεί σε σχέση με τη ζωή στη Γη;

γ) με αφορμή τη μελέτη του φαινομένου του βρασμού σε συνθήκες χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης: Εάν πηγαίναμε εκδρομή στις Άλπεις, θα μπορούσαμε να βράσουμε και να πιούμε ένα καυτό τσάι για να ζεσταθούμε; Ή Φανταστείτε ότι ξαφνικά εξαφανίζονταν η ατμόσφαιρά της Γης. Τι θα συνέβαινε τότε στον πλανήτη μας;

Η διδακτική διαχείριση των παραπάνω ερωτημάτων θα απαιτούσε να ζητήσει ο εκπαιδευτικός από τους μαθητές να σχεδιάσουν και να αναπτύξουν το σχετικό ΝΠ προκειμένου να προκύψει ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα (π.χ. να σχεδιάσετε ένα ΝΠ που να καταδεικνύει τι θα έπρεπε να συμβεί ώστε να μην έχουμε εποχές σε οποιοδήποτε γεωγραφικό πλάτος του πλανήτη μας) ή να τους ζητήσει να προβλέψουν το αποτέλεσμα του ΝΠ με στόχο να φανερωθούν οι άδηλες (αντιδιαισθητικές) ιδέες τους, ώστε να μπορέσει κατόπιν να τις αντιμετωπίσει (π.χ. Τι θα συνέβαινε εάν κάποιο εμπόδιο σταματούσε ξαφνικά τη Σελήνη και ύστερα απομακρύνονταν και την άφηνε ελεύθερη;). Κατόπιν δε, θα μπορούσε να ζητήσει από κάθε ομάδα να παρουσιάσει το ΝΠ στις άλλες ομάδες ή στο ευρύτερο κοινό. Αυτό θα απαιτούσε, ένας μαθητής που έχει ικανότητες στο σκισάρισμα να σχεδιάσει το σκηνικό εκτέλεσης του ΝΠ και ένας άλλος με ικανότητα στη γλώσσα να γράψει την όλη πορεία σε μορφή αφήγησης, ή να συνεργαστούν και να κάνουν ένα κόμιξ. Μετά κάποιος άλλος να το ανεβάσει σε σχετική ιστοσελίδα ή να κατασκευάσει ένα βιντεάκι για το YouTube, κ.ο.κ. Έτσι, όλοι οι μαθητές θα μπορούν να συμμετέχουν στη διαδικασία της επικοινωνίας της γνώσης που απέκτησαν.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, οι μαθητές καλούνται να συνδυάσουν γνώσεις από όσα ήδη έχουν διδαχθεί ή πληροφορίες που έχουν βρει σε διάφορες πηγές, προκειμένου να διαχειριστούν το ΝΠ ώστε να απαντήσουν στο ερώτημα που τίθεται.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Βελντζας Α. (2013). *Νοητικά πειράματα: Ο ρόλος τους στην ανάπτυξη και στην διδασκαλία της Φυσικής*. Εκδοτικός Όμιλος Συγγραφέων Καθηγητών. Αθήνα
- Χαλκιά Κ. (2013). *Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες: Θεωρητικά ζητήματα, προβληματισμοί, προτάσεις*. (Κεφ. 6: Διδακτικά εργαλεία, & 6.4. Τα νοητικά πειράματα, σελ. 183-193). Εκδόσεις Πατάκη, Αθήνα
- Asikainen M. A. & Hirvonen P. E. (2014). Thought Experiments in Science and in Science Education. In: Matthews, M. (eds). *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*. (Chapter 38, pp. 1235-1256). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7654-8_38.
- Bancong Hartono & Song Jinwoong (2020). Exploring How Students Construct Collaborative Thought Experiments During Physics Problem-Solving Activities, *Science & Education*, 29:617–645, <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00129-3>
- Brown J (2002) Thought experiments. In: *Stanford encyclopedia of philosophy*. The Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Brown J. (1991). *The Laboratory of Mind. Thought Experiments in Natural Sciences*. Routledge, London.

- Brown J. (2006). The Promise and Perils of Thought Experiments, *Interchange*, Vol. 37/1-2, 63-65.
- Brown JR (2004) Peeking into Plato's Heaven, *Philos Sci* 71:1126–1138.
- Brown, R. J., & Fehige, Y. (2011). Thought experiments. In *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/thought-experiment>.
- Buzzoni M. (2009) Empirical Thought Experiments: A Transcendental-Operational View. *Epistemologia* 33 (1):5-26.
- Buzzoni M. (2018). Kantian accounts of thought experiments. *Thought Experiments: State of the Art*. The Routledge Companion to Thought Experiments (Edited by Michael t. Stuart, Yiftach Fehige and James Robert Brown) p. 327-341.
- Camp C, Clement J (1994) *Preconceptions in mechanics*. Kendal/Hunt, Dubuque.
- Clement J (1983) A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students. In: Gentner D, Stevens AL (eds) *Mental models*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, pp 325–340.
- Dimitriadi K. & Halkia K. (2012). Secondary Students' Understanding of Basic Ideas of Special Relativity. *International Journal of Science Education*, Vol. 34, Issue 16, pages 2565-2582, <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.705048>.
- Einstein A, Infeld L (1938) *The evolution of physics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Galili I. (2009). Thought Experiments: Determining Their Meaning. *Science & Education*, 18:1–23, DOI 10.1007/s11191-007-9124-4.
- Gamow G. (1990). *Mr Tompkins in paperback*. New York: Cambridge University Press (1ή έκδοση το 1940 με τίτλο Mr Tompkins in Wonderland).
- Gendler T. S. (2004). Thought experiments rethought – and re-perceived. *Philos Sci*, 71:1152–1163.
- Gendler, T.S. (1998). Galileo and the Indispensability of Scientific Thought Experiments, *British Journal for the Philosophy of Science*, 49, 397–424.
- Gilbert J. and Reiner M. (2000b). Epistemological Resources for Thought Experimentation in Science Education. *International Journal in Science Education*, 22(5), 489-506.
- Gilbert, J. & Reiner, M. (2000a). Thought Experiments in Science Education: Potential and Current Realization, *International Journal of Science Education*, 22(3): 265–283.
- Gilbert, J. K., & Reiner, M. (2004). The symbiotic roles of empirical experimentation and thought experimentation in the learning of physics. *International Journal of Science Education*, 26, 1819–1834.
- Helm H., Gilbert J. and Watts D.M. (1985). Thought Experiments and Physics Education - Part II. *Physics Education*, 20, 211-217.
- Johannes Witt-Hansen (2003). *H.C. Ørsted: Immanuel Kant and the Thought Experiment* (From the book *Kierkegaard and His Contemporaries*) Published by De Gruyter <https://doi.org/10.1515/9783110200881.1.62>.
- Klassen S. (2006). The science thought experiments: How Might it be Used Profitably in the Classroom? *Interchange*, 37(1-2), 77-96.
- Kösem Sule Dönertas και Özdemir Ömer Faruk (2014). The Nature and Role of Thought Experiments in Solving Conceptual Physics Problems. *Science & Education*, 23:865–895, DOI 10.1007/s11191-013-9635-0
- Koyre, A. (1968). *Metaphysics and Measurement*, Chapman & Hall, London.

- Kuhn T. (1963): Interview of Werner Heisenberg by Thomas S. Kuhn on 1963 February 19, Niels Bohr Library & Archives, *American Institute of Physics*, College Park, MD USA, www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-6. (Το σχετικό κείμενο μπορεί να αναγνωστεί στη μετάφραση του Αποστόλη Παπάζογλου, όπως δημοσιεύτηκε στο ylikonet.gr /Ιούνιος 2024).
- Kuhn, T. (1977). A function for thought experiments, in T. Kuhn (ed.), *The Essential Tension Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, Chicago University Press, pp. 240–265.
- Landau L.D. & Rumer G.B. (1960). *What is the Theory of Relativity*. Basic Books Inc., New York
- Mach, E. (1896/1976). On thought experiment, in E. Mach, *Knowledge and Error* (translation 1926 by Cormack T. and Foulkes P.) (Dordrecht: Reidel, 1976), pp. 134–147.
- Matthews M. (1994). Thought experiments. In M. Matthews *Science Teaching. The Role of History and Philosophy of Science*. Routledge, New York-London, 99-105.
- Miller A. (1986). *Imagery in scientific thought*. The MIT Press, Cambridge.
- Moue, A.S., Masavetas, K.A., & Karayianni, H. (2006). Tracing the development of thought experiments in the philosophy of natural sciences. *Journal for General Philosophy of Science*, 37, 1.
- Nersessian N. J. (2018). *Cognitive science, mandal modeling and thought experiments*. The Routledge Companion to Thought Experiments (Edited by Michael t. Stuart, Yiftach Fehige and James Robert Brown) p. (309-326).
- Nersessian, N.J. (1993). *In the theoretician's laboratory: Thought experiments as mental modeling*. In D. Hull, M. Forbes, & K. Okruhlik (Eds.), PSA: Proceedings of the 1992 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association (Vol. 2) (pp. 291–301). East Lansing, MI: PSA.
- Norton J. D. (2004) On thought experiments: is there more to the argument? *Philos Sci* 71:1139–1151.
- Ozdemir O. F. (2009) Avoidance from Thought Experiments: Fear of misconception, *International Journal of Science Education*, 31:8, 1049-1068. <https://doi.org/10.1080/09500690801932538>
- Park D (1988). *The How and Why*. Princeton University Press, Princeton.
- Popper K (1934/1968) On the use and misuse of imaginary experiments, especially in quantum theory. In Popper K (ed) *The logic of scientific discovery*. Harper & Row, New York, pp 442–456.
- Reiner, M. (1998). Thought experiments and collaborative learning in physics. *International Journal of Science Education*, 20(9), 1043–1059.
- Reiner, M. (2006). The context of thought experiments in physics learning. *Interchange*, 37(1–2), 97–113.
- Reiner, M., & Burko, L. (2003). On the limitations of thought experiments in physics and implications for physics learning. *Science & Education*, 12, 365–385.
- Reiner, M., & Gilbert, J. (2000). Epistemological resources for thought experimentation in science learning. *International Journal of Science Education*, 22(5), 489–506.
- Reiner, M., & Gilbert, J. (2004) The symbiotic roles of empirical experimentation and thought experimentation in the learning of physics. *International Journal of Science Education*, 26, 1819–1834.

- Sorensen, R. (1992) *Thought experiments*. New York & Oxford, UK: Oxford University Press.
- Stephens, A. L., & Clement, J. (2012). *Role of thought experiments in science and science learning*. In K. Tobin, C. McRobbie, & B. Fraser (Eds.), *Second international handbook of science education*, 24 (pp. 157–175). Dordrecht: Springer.
- Stephens, L., & Clement, J. (2006). *Running Effective Classroom Thought Experiments: What Expert Protocols and Imagery Indicators Can Tell Us*. Paper presented at AERA 2006, San Francisco.
- Stuart, Michael t. Yiftach Fehige and James Robert Brown (2018). *Thought Experiments: State of the Art*. The Routledge Companion to Thought Experiments (Edited by Michael t. Stuart, Yiftach Fehige and James Robert Brown) p.1-28.
- Velentzas A. & Halkia K. (2011). The “Heisenberg’s Microscope” as an Example of Using Thought Experiments in Teaching Physics Theories to Students of the Upper Second School. *Research in Science Education*, Vol.41, issue4, p. 525-539, <https://doi.org/10.1007/s11165-010-9178-1>.
- Velentzas A. & Halkia K. (2013a). From Earth to Heaven: Using ‘Newton’s Cannon’ Thought Experiment for Teaching Satellite Physics. *Science & Education*, Vol. 22, Issue 10, 2621-2640, <https://doi.org/10.1007/s11191-013-9611-8>.
- Velentzas A. & Halkia K. (2013b). The Use of Thought Experiments in Teaching Physics to Upper Secondary-Level Students: Two Examples from the Theory of Relativity. *International Journal of Science Education*, Vol. 35, No. 18, 3026-3049, <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.682182>.
- Velentzas A., Halkia K. and 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*, Vol. 16, No. 3-5, p.353-370. <https://doi.org/10.1007/s11191-006-9030-1>