Η ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΣΤΙΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ: ΙΣΤΟΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΘΟΔΩΡΟΣ ΑΡΑΜΠΑΤΖΗΣ, ΣΤΑΘΗΣ ΑΡΑΠΟΣΤΑΘΗΣ,
ΗΡΑΚΛΗΣ ΚΑΤΣΑΛΟΥΛΗΣ, ΤΕΛΗΣ ΤΥΜΠΑΣ*

Τα κείμενα που απαρτίζουν το παρόν ειδικό τεύχος του περιοδικού *Νεύσις* είναι προϊόν του ερευνητικού έργου *Η Επικινδυνότητα της Πρόβλεψης στις Φυσικές Επιστήμες: Ιστορικές και Επιστημολογικές Όψεις* (ΡΥΤΗΙΑ). Στόχος του συγκεκριμένου έργου ήταν να συμβάλει στην ευρύτερη συζήτηση που υπάρχει στην ιστορία και φιλοσοφία της επιστήμης και τεχνολογίας και τους συγγενείς κλάδους σχετικά με την πρόβλεψη στην επιστήμη. Η έρευνα στο πλαίσιο του ΡΥΤΗΙΑ επικεντρώθηκε στα εξής ερωτήματα σχετικά με την πρόβλεψη στις φυσικές επιστήμες: Ποιος είναι ο ρόλος της πρόβλεψης στην επιστημονική πρακτική; Πώς έχει μεταβληθεί ιστορικά και πώς διαφοροποιείται σε διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους; Πώς γεφυρώνεται το χάσμα ανάμεσα στη θεωρία και την πρόβλεψη συγκεκριμένων φαινομένων; Τι λογίζεται ως έγκυρη και επιτυχημένη πρόβλεψη σε διαφορετικές περιοχές των φυσικών επιστημών;

Η δυνατότητα πρόβλεψης θεωρείται ως ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της επιστήμης, κάτι που λείπει από άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως, για παράδειγμα, η τέχνη. Η λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με τη δημόσια πολιτική βασίζεται όλο και περισσότερο στη δυνατότητα των ανθρώπων να προβλέπουν και, συνεπώς, βασίζεται όλο και πιο πολύ στην επιστήμη. Δεν αποτελεί έκπληξη, λοιπόν, ότι ορισμένα από τα θέματα που σχετίζονται με την πρόβλεψη στην επιστήμη αποτελούν αντικείμενο συζήτησης για αρκετές δεκαετίες.

---

* Οι Θ. Αραμπατζης, Σ. Αραποσταθης & Τ. Τυμπας είναι Καθηγητές στο Τμήμα Ιστορίας και Φιλοσοφίας της Επιστήμης του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Ο Η. Κατσαλουλης είναι Μεταδιδακτορικός Ερευνητής στο Τμήμα Ιστορίας και Φιλοσοφίας της Επιστήμης του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.
Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τα υπόλοιπα μέλη της ερευνητικής ομάδας του ΡΥΤΗΙΑ, τον Στέλιο Καμπουρίδη, τον Γρηγόρη Πανουτσόπουλο, και τη Βασιλική Χριστοπούλου, για την εξαιρετική συνεργασία και την καθοριστική συμβολή τους στην επιτυχή ολοκλήρωση του ερευνητικού προγράμματος. Η ερευνητική αυτή εργασία υποστηρίχθηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) στο πλαίσιο της Δράσης «1η Προκήρυξη Ερευνητικών Έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των Μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την προμήθεια ερευνητικού εξοπλισμού μεγάλης αξίας» (Αριθμός Έργου: 875).

Τα κεντρικά ερωτήματα που έχουν μελετηθεί στη φιλοσοφική βιβλιογραφία είναι τα εξής: κατέχει η πρόβλεψη κάποια ιδιαίτερη θέση στην επιστημονική διαδικασία; Αν ναι, σε τι ακριβώς συνίσταται αυτή; Σε αυτά τα ερωτήματα έχουν δοθεί απαντήσεις κατά καιρούς, χωρίς όμως να υπάρχει συναίνεση ως προς αυτές. Η θετική απάντηση στην πρώτη από τις παραπάνω ερωτήσεις χαρακτηρίζει το φιλοσοφικό ρεύμα που ονομάζεται προβλεπτισμός (predictivism). Στον πυρήνα αυτής της θεώρησης βρίσκεται η παραδοχή ότι η πρόβλεψη του μέλλοντος είναι μια ανώτερη διανοητικά δραστηριότητα από την εξήγηση του παρελθόντος. Σε αυτή τη γραμμή σκέψης ο Hans Reichenbach (1938) υποστήριζε ότι η πρόβλεψη είναι ο ανώτερος σκοπός της επιστήμης, ενώ ο Karl Popper (2002) είχε την άποψη ότι η επιστήμη προχωρά μπροστά όχι με την εξήγηση των υπαρχόντων δεδομένων αλλά με την πρόταση τολμηρών θεωριών που οδηγούν στην πρόβλεψη άγνωστων φαινομένων. Ακολουθώντας τον Popper ο Imre Lakatos υποστήριξε ότι η επιτυχία ενός Ερευνητικού Προγράμματος μπορεί να μετρηθεί από τις επιτυχείς προβλέψεις του για νέα φαινόμενα, οι οποίες αποτελούν το κλειδί για την επιστημονική πρόοδο. Αντιρρήσεις κατά του προβλεπτισμού έχουν διατυπωθεί τόσο σε φιλοσοφικό όσο και σε ιστορικό επίπεδο. Η κύρια φιλοσοφική αντίρρηση είναι ότι δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ της εκ των υστέρων εξήγησης φαινομένων που είναι ήδη γνωστά, από τη μία πλευρά, και της πρόβλεψης νέων φαινομένων, από την άλλη. Το μόνο πράγμα που έχει πραγματική σημασία είναι η εμπειρική επιβεβαίωση μιας θεωρίας. Εάν αυτή η επιβεβαίωση βασίζεται σε ήδη γνωστά ή νέα φαινόμενα είναι επιστημονικά αδιάφορο (βλ. την ανασκόπηση των Douglas & Magnus 2013). Επιπλέον, η ιστορία της επιστήμης παρέχει πολλά παραδείγματα που δείχνουν ότι οι νέες προβλέψεις δεν παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εδραίωση επιστημονικών θεωριών. Ο Stephen Brush (1989, 2015), για παράδειγμα, έχει δείξει με πειστικό τρόπο ότι, αντίθετα με την ευρέως διαδεδομένη άποψη, η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας δεν έγινε αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα λόγω των νέων της προβλέψεων. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με μια δημοφιλή άποψη που υποστηρίζει τον προβλεπτισμό, η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας έγινε αποδεκτή μόνο αφού είχε επαληθευτεί μία από τις πιο σημαντικές προβλέψεις της, η κάμψη του φωτός όταν περνά κοντά από ένα σώμα με πολύ μεγάλη μάζα. Ενάντια σε αυτή την άποψη, ο Brush υποστηρίζει ότι αυτή η επιτυχημένη πρόβλεψη, αν και σημαντική, δεν αποδείχθηκε πιο καθοριστική για την αποδοχή της θεωρίας του Einstein από την εξήγηση της μετατόπισης του περιηλίου του Ερμή, ενός φαινομένου γνωστού ήδη έναν αιώνα πριν.

Όσον αφορά την πρόβλεψη ως μέσο για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων, υπάρχει και εδώ μια ανοικτή συζήτηση σχετικά με το αν η πρόβλεψη έχει ιδιαίτερο επιστημολογικό βάρος. Μπορούμε να εμπιστευόμαστε μια πρόβλεψη χωρίς αυτή να συνοδεύεται από εξήγηση; Με

ποιον τρόπο αποκτά μία πρόβλεψη επιστημολογική και πολιτική βαρύτητα όταν έχει πιθανοκρατικό χαρακτήρα και δεν παρέχει απόλυτη βεβαιότητα; Είναι δυνατόν διαδικασίες που σχετίζονται με τη λήψη πολιτικών αποφάσεων να βασίζονται σε πιθανοκρατικές προβλέψεις; Είναι ορθό να καθοδηγείται η επιστημονική έρευνα και να λαμβάνονται αποφάσεις σε επιστημονικό ή πολιτικό επίπεδο μόνο στη βάση επιτυχών προβλέψεων, χωρίς να είναι κατανοητό γιατί αυτές οι προβλέψεις είναι επιτυχείς (Carrier 2014); Τι ρόλο παίζουν οι επιστημονικές προβλέψεις στην οργάνωση θεσμών, στη διαχείριση δημόσιου χρήματος, στην οργάνωση και ρύθμιση των αγορών, καθώς και στη συγκρότηση πολιτικών διακυβέρνησης μεγάλων κοινωνικών ομάδων; Ένα επιπλέον ερώτημα είναι αν είναι δυνατόν να προβλεφθούν τα πάντα από την επιστήμη. Υπάρχουν φυσικά φαινόμενα που μπορούν να χαρακτηριστούν μη προβλέψιμα (Gonzalez 2015); Αν ναι, μέσω ποιων διαδικασιών χαρακτηρίζεται ένα φαινόμενο ως προβλέψιμο ή όχι; Πέρα από την πρόβλεψη των φυσικών φαινομένων, υπάρχει μια ακόμη πολύ σημαντική πλευρά της πρόβλεψης στη σύγχρονη επιστήμη. Στην εποχή της επιστήμης μεγάλης κλίμακας, όπου τα ερευνητικά προγράμματα που διεξάγονται απαιτούν σημαντικούς πόρους, μεγάλη ανθρώπινη προσπάθεια και αντίστοιχη χρονική δέσμευση, είναι ιδιαίτερα σημαντική η πρόβλεψη της επιτυχούς ή μη έκβασης ενός ερευνητικού προγράμματος (Carrier 2014).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, τόσο ιστοριογραφικά όσο και αναλυτικά, οι πολιτικές γύρω από τις ερευνητικές υποδομές συνδέθηκαν με την αξιοπιστία των προβλέψεων και των επιστημονικών κοινοτήτων που τις παρήγαγαν. Κρίσιμη παράμετρος για την αξιοπιστία των προβλέψεων είναι οι υποδομές στις οποίες στηρίζονται, όπως και η πρόσβαση σε αυτές. Οι βάσεις μεγάλων δεδομένων, ο τρόπος και η αξιοπιστία της συγκρότησής τους, καθώς και η δυνατότητα πρόσβασης σε αυτές έχουν αποτελέσει σημαντικά ζητήματα για τους ιστορικούς και κοινωνιολόγους που έχουν μελετήσει το θέμα της πρόβλεψης, σε επιστήμες όπως οι επιστήμες της ατμόσφαιρας, οι περιβαλλοντικές σπουδές, και η βιοτεχνολογία (Krige 2022, Strasser & Edwards, 2017, Edwards 2006, 2017).

Υπάρχουν όμως και άλλα σημαντικά ερωτήματα, τα οποία δεν έχουν γίνει αντικείμενο συστηματικής έρευνας, όπως τα εξής: Τι ακριβώς σημαίνει πρόβλεψη; Πώς εξάγεται μια πρόβλεψη; Πότε θεωρείται μια πρόβλεψη επιτυχής; Βασική αφετηρία των άρθρων αυτού του τεύχους είναι ότι η απάντηση στα ερωτήματα που μόλις θέσαμε δεν είναι αυτονόητη για δύο λόγους. Πρώτον, διότι ο χαρακτήρας και η επιστημική βαρύτητα της πρόβλεψης μεταβάλλονται ιστορικά. Και, δεύτερον, διότι ανάμεσα στη θεωρία που χρησιμοποιείται για μια πρόβλεψη και την πρόβλεψη καθ' εαυτή υπάρχει σημαντικό χάσμα· χάσμα που γίνεται εντονότερο όταν μεσολαβεί η χρήση υπολογιστικών μοντέλων.

Τα κείμενα του παρόντος τεύχους αποπειρώνται να δώσουν απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα εστιάζοντας σε τέσσερις ερευνητικές περιοχές: τη φυσική του 19ου αιώνα, τη φυσική υψηλών ενεργειών, την κβαντική χημεία, και τη σεισμολογία.

Στο άρθρο της Βασιλικής Χριστοπούλου αναδεικνύεται η ιστορικότητα της έννοιας της πρόβλεψης στις φυσικές επιστήμες, μέσα από τη μελέτη της περίπτωσης της Φυσικής του 19ου αιώνα. Σε αυτή την περίοδο έγινε μια επανανοηματοδότηση της έννοιας «πρόβλεψη», η οποία έως τότε ήταν κατά κάποιο τρόπο συνώνυμη της προφητείας, έχοντας έτσι μια αρνητική χροιά. Αυτή την περίοδο η πρόβλεψη αναδείχθηκε ως ένα βασικό χαρακτηριστικό της επιστήμης που τη διαφοροποιεί από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η θεολογία και η αστρολογία, για παράδειγμα. Η άνοδος του υποθετικό- παραγωγικού μοντέλου στην επιστήμη κατά τον 19ο αιώνα είχε σημαντικό αντίκτυπο στην ανύψωση του ρόλου της πρόβλεψης στην επιστήμη· καθώς μια υπόθεση προηγείται της παρατήρησης, η εγκυρότητα των προβλέψεων που αυτή παράγει είναι ο μοναδικός τρόπος για να ελέγξουμε την εγκυρότητα της υπόθεσης καθαυτής. Η πρόβλεψη όμως, δεν είχε τον ίδιο ρόλο σε όλες τις επιστημονικές περιοχές. Δεν είχαν αναπτύξει όλοι οι επιστημονικοί κλάδοι προβλεπτικούς νόμους στον ίδιο βαθμό, και αυτό συνδεόταν έως έναν βαθμό, με το επίπεδο μαθηματικοποίησης στο οποίο είχε φτάσει ο κάθε κλάδος. Η βιολογία και η γεωλογία, για παράδειγμα, δεν είχαν αναπτύξει προβλεπτικούς νόμους στο βαθμό που είχαν αναπτύξει η φυσική, χημεία, και φυσικά η αστρονομία, οι προβλέψεις της οποίας αποτελούσαν το πρότυπο για όλους τους φυσικούς επιστήμονες. Επίσης, την ίδια περίοδο ξεκίνησε η συζήτηση που δεσπόζει ακόμα στη φιλοσοφική βιβλιογραφία, σχετικά με την επιστημική αξία των προβλέψεων που παράγει μια θεωρία και κατά πόσο αυτή είναι μεγαλύτερη από την επιστημική αξία που έχει η εξήγηση ήδη γνωστών φαινομένων από μια θεωρία.

Όπως είδαμε η έννοια της πρόβλεψης στη Φυσική αποτέλεσε θεμέλιο λίθο της ήδη από τον 19ο αιώνα. Ωστόσο, όπως υποστηρίζεται στο άρθρο του Γρηγόρη Πανουτσόπουλου, σε τομείς της Φυσικής όπως η Φυσική Υψηλών Ενεργειών (ΦΥΕ) όπου διεξάγονται πειράματα μεγάλης κλίμακας, η πολυπλοκότητα αυτών των πειραμάτων αναδεικνύει την αναγκαιότητα επανεξέτασης της έννοιας της πρόβλεψης. Η συγκεκριμένη έννοια θα πρέπει πλέον να αναλυθεί όχι με όρους μιας μονοδιάστατης σχέσης, όπου η θεωρία προβλέπει και το πείραμα επιβεβαιώνει ή διαψεύδει, αλλά στο πλαίσιο μιας πολύπλοκης και συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης μεταξύ θεωρίας και πειράματος. Η ανάγκη για επανεξέταση της έννοιας της πρόβλεψης έχει γίνει ακόμα εντονότερη μετά την ανακάλυψη του μποζονίου Higgs, με την οποία το «κυνήγι» των σωματιδίων του Καθιερωμένου Προτύπου έφθασε στο τέλος του. Παρ' όλα αυτά,

τα πειράματα στο πεδίο της ΦΥΕ συνεχίζονται ακάθεκτα, ενώ σχεδιάζονται ακόμα και καινούριοι επιταχυντές. Σε αυτές τις εξελίξεις παρατηρούμε μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα αντιστροφή της σχέσης θεωρίας-πειράματος: το πείραμα φαίνεται να αποκτά την πρωτοκαθεδρία με τη θεωρία να ακολουθεί ασθμαίνοντας. Η πειραματική φυσική είναι αυτή που καλείται πλέον, μέσα από διερευνητικά πειράματα, να ανοίξει το δρόμο προς τη Νέα Φυσική, ενώ οι θεωρητικοί φυσικοί καλούνται στη συνέχεια να τα ερμηνεύσουν. Σε αυτό το πλαίσιο καθίσταται εξαιρετικά κρίσιμη η αναδιαμόρφωση κομβικών εννοιών όπως η έννοια της πρόβλεψης.

Στο τρίτο άρθρο, του Στέλιου Καμπουρίδη, υποστηρίζεται ότι οι υπολογιστικές μέθοδοι στην κβαντική χημεία εμπλέκουν τη χρήση μαθηματικών μοντέλων και προσεγγιστικών τεχνικών, με σκοπό την εξαγωγή προβλέψεων για τις ιδιότητες επιμέρους χημικών συστημάτων. Αυτές οι μέθοδοι άρχισαν να αναπτύσσονται μετά τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο, αλλά δεν έγιναν αποδεκτές έως τις αρχές της δεκαετίας του 1980. Το ζήτημα της πρόβλεψης, και πιο συγκεκριμένα αυτό της ακρίβειας της πρόβλεψης, ήταν κεντρικό κατά την ανάδυση της υπολογιστικής κβαντικής χημείας. Οι επιστήμονες στο πεδίο αυτό πολώθηκαν μεταξύ δύο διαφορετικών αντιλήψεων όσον αφορά το πώς έπρεπε να συγκροτηθούν οι υπολογιστικές μέθοδοι. Ορισμένοι θεωρούσαν ότι έπρεπε να βασίζονται αυστηρά στην θεωρία, χωρίς τη χρήση εκτεταμένων προσεγγίσεων και χωρίς την εισαγωγή πειραματικών δεδομένων. Άλλοι θεωρούσαν ότι το πρόβλημα δεν ήταν η θεωρητική θεμελίωση των μεθόδων αλλά η δυνατότητα εφαρμογής τους σε προβλήματα της πραγματικής χημείας. Οι αντιπαραθέσεις μεταξύ των επιστημόνων που υιοθέτησαν τις διαμετρικά αντίθετες αυτές αντιλήψεις ανέδειξαν ζητήματα που σχετίζονταν με τα επιστημολογικά θεμέλια αλλά και την προβλεπτική ισχύ των υπολογιστικών μεθόδων. Η περίπτωση της υπολογιστικής κβαντικής χημείας μπορεί να είναι ιδιαίτερα διαφωτιστική για την κατανόηση της «επικινδυνότητας της πρόβλεψης στις φυσικές επιστήμες». Καταρχάς, σε αντίθεση με την περίπτωση της ΦΥΕ, οι συγκεκριμένες υπολογιστικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν από μικρές ομάδες ερευνητών με σχετικά περιορισμένους πόρους. Παρόλα αυτά, οι εμπλεκόμενοι επιστήμονες ήταν κορυφαίοι στο πεδίο τους και δημιούργησαν λογισμικό με ιδιαίτερα ευρεία αποδοχή και εμπορική αξία. Το γεγονός ότι οι κβαντικοί χημικοί ήταν πρωτοπόροι χρήστες των ηλεκτρονικών υπολογιστών, ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1950, αναδεικνύει τη δυναμική σχέση ανάμεσα στην αναπτυσσόμενη υπολογιστική τεχνολογία, τη δημιουργία επιστημονικών μοντέλων και την προβλεπτική τους ισχύ.

Όσον αφορά την πρόβλεψη σεισμών, όπως παρουσιάζεται στο άρθρο του Ηρακλή Κατσαλούλη, υπάρχουν σημαντικές διαφωνίες ανάμεσα στους επιστήμονες που διατρέχουν όλα τα επίπεδα της επιστημονικής διαδικασίας και σχετίζονται με οντολογικά, επιστημολογικά, και μεθοδολογικά θέματα. Η κατάσταση περιπλέκεται ακόμη περισσότερο καθώς

υπάρχει ασυμφωνία ως προς το τι συνιστά πρόβλεψη σεισμών. Σημαίνει την πρόβλεψη ενός συγκεκριμένου σεισμού σε διάστημα λίγων ημερών ή εβδομάδων πριν αυτός συμβεί (βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη) ή την πρόβλεψη ενός σεισμού λίγα χρόνια πριν την έλευσή του (μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη); Οι επιστήμονες που εργάζονται πάνω στην πρόβλεψη σεισμών την ορίζουν με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τις ερευνητικές τους προτεραιότητες. Παράλληλα, υπάρχουν και επιστήμονες που υποστηρίζουν ότι οι σεισμοί είναι μη προβλέψιμο φαινόμενο. Η συζήτηση σχετικά με την πρόβλεψη στη σεισμολογία έγινε ακόμη πιο έντονη και περίπλοκη μετά το σεισμό της Φουκουσίμα στις 11 Μαρτίου 2011, καθώς η σεισμολογική κοινότητα δέχθηκε κριτική γιατί δεν είχε κατορθώσει να προβλέψει την πολύ μεγάλη αυτή καταστροφή. Ο όρος «πρόβλεψη» σε αυτή την περίπτωση δεν αναφέρεται στην πρόβλεψη ενός συγκεκριμένου σεισμού, αλλά στην πιθανοκρατική εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Σε αυτή βασίζεται η κατάρτιση του σεισμικού χάρτη επικινδυνότητας μιας χώρας, στον οποίο, με τη σειρά της, βασίζεται η κατάρτιση του Αντισεισμικού Κανονισμού. Επομένως, η σεισμολογία είναι μία ακόμη προνομιακή περίπτωση για τη μελέτη της πρόβλεψης για δύο λόγους: Πρώτον, διότι οι διαφωνίες ανάμεσα στους επιστήμονες δεν αφορούν μόνο πραγματολογικά στοιχεία αλλά τον ίδιο τον ορισμό της πρόβλεψης και την προβλεψιμότητα του φαινομένου. Και, δεύτερον, διότι η πρόβλεψη σεισμών σχετίζεται άμεσα με τη λήψη πολιτικών αποφάσεων με στόχο τη μετρίαση των συνεπειών του φαινομένου.

Συμπερασματικά, τα άρθρα του συγκεκριμένου αφιερώματος αναδεικνύουν και διερευνούν ένα εύρος καινοτόμων ιστορικών και επιστημολογικών ερωτημάτων. Ευελπιστούμε ότι θα συμβάλουν στη βαθύτερη κατανόηση του χαρακτήρα και του ρόλου της πρόβλεψης στις φυσικές επιστήμες και θα δώσουν το έναυσμα και για άλλες αντίστοιχες μελέτες από την Ελληνική ακαδημαϊκή κοινότητα.

Βιβλιογραφια

[1] S. Brush: «Prediction and Theory Evaluation: The Case of Light Bending». *Science* 246 (1989), 1124–1129.

[2] S. Brush: *Making 20th Century Science: How Theories Became Knowledge*. Oxford: Oxford University Press, 2015.

[3] M. Carrier: «Prediction in context: On the comparative epistemic merit of predictive success». *Studies in History and Philosophy of Science* 45 (2014), 97–102.

[4] H. Douglas & P. D. Magnus: «State of the Field: Why Novel Predictions Matter». *Studies in History and Philosophy of Science* 44 (2013), 580–589.

[5] P. N. Edwards: «Meteorology as Infrastructural Globalism». *Osiris* 21 (2006), 229–250.

[6] P. N. Edwards: «Knowledge infrastructures for the Anthropocene». *The Anthropocene Review* 4 (2006), 34–43.

[7] W. Gonzalez: *Philosophico-Methodological Analysis of Prediction and its Role in Economics*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2015.

[8] J. Krige: *Knowledge Flows in a Global Age: A Transnational Approach*. Chicago: The University of Chicago Press, 2022.

[9] I. Lakatos: *The Methodology of Scientific Research Programmes*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

[10] K. Popper: *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. London/New York: Routledge, 1962.

[11] H. Reichenbach: *Experience and Prediction: An Analysis of the Foundation and the Structure of Knowledge*. Chicago: The University of Chicago Press, 1938.

[12] B. J. Strasser & P. N. Edwards: «Big Data Is the Answer ... But What Is the Question?» *Osiris* 32 (2017), 328–345.