

Χωροχρόνος, η προσφιλής κλίση της σύγχρονης κοσμολογίας

Παράδοξη η τάση του ανθρώπινου πνεύματος να καταπιάνεται με τα μεγάλα ερωτήματα – ενώ ακόμη δεν έχει απαντήσει (κι ούτε καν θέσει) τα απλά. Όταν ακόμη νόμιζε τον καρδιακό μυ όργανο της νόησης, αυτή η νόηση στοχαζόταν τρόπους αρχής του Κόσμου.

Ανθρωπορφισμός και απλούστευση, οι δύο κύριες αιτίες του σφάλλιν, έπαιρναν τεράστιες διαστάσεις στην αρχαία Κοσμολογία: θεοί-πατέρες που εξόντωναν τα αρσενικά παιδιά τους, θεές-μητέρες που γεννούσαν κόσμους. Απλουστεύσεις που χρησιμοποιούσαν γήινα υλικά – νερό, φωτιά – για να φανταστούν το αόρατο. Υπάρχουν άραγε σήμερα ανάλογες τάσεις που οδηγούν τη σύγχρονη Κοσμολογία σε φαντασιώσεις; Πόσο αξιόπιστα είναι τα μοντέλα που προτείνει;

Οι δύο παραπάνω παγίδες της νόησης ανιχνεύονται εύκολα σε αναρίθμητα παραδείγματα της καθημερινής σκέψης, αλλά και στις επιστημονικές δραστηριότητες – κι αυτό, βέβαια, δεν είναι παράδοξο: σκεφτόμαστε σαν άνθρωποι (και όχι π.χ. σαν πίθηκοι), βλέπουμε τον κόσμο με έναν ορισμένο τρόπο, όχι αναγκαστικά τον ορθότερο. Και, επίσης, απλοποιούμε τα φαινόμενα διότι η πολυπλοκότητά τους μας υπερβαίνει: παραλείποντας στοιχεία δεν χανόμαστε στις λεπτομέρειες, γενικεύοντας κατανοούμε. (Ο Λαβουαζιέ δεν θα έβλεπε τη διατήρηση της μάζας, αν ο ζυγός του ήταν τόσο ευαίσθητος που θα έδειχνε τη διαφορά μάζας από την ενέργεια καύσης.)

Ωστόσο, εκτός από τις δύο αυτές τετριμμένες κύριες αιτίες του ανθρώπινου σφάλλιν, υπάρχει ένα καθαρά επιστημολογικό πρόβλημα που αφορά τις φυσικές επιστήμες γενικά – και την Κοσμολογία ειδικότερα. Αφορά τη χρήση των Μαθηματικών στις θετικές επιστήμες: ενώ είναι πασιδηλό ότι η εισαγωγή των μαθηματικών μεθόδων γιγάντωσε τις φυσικές επιστήμες – και άλλαξε τη ζωή μας με τη συνεπαχλούθη τεχνολογία – συγχρόνως ο «φιλοσοφικός» νους (όχι αναγκαστικά των φιλοσόφων) έθεσε ερωτήματα για «την απροσδόκητη αποτελε-

* Ο Νίκος Ταμπάκης είναι διπλωματούχος μηχανικός ΕΜΠ και Δρ Φιλοσοφίας.

σματικότητα των Μαθηματικών στις φυσικές επιστήμες... το θαύμα της καταλληλότητάς τους...». Το πρόβλημα στην αρχή ακούγεται κάπως περιεργα αλλά, αν κανείς επιμείνει, διακλαδίζεται σε καίρια γνωσιοθεωρητικά ερωτήματα και είναι πολύ μεγάλο για να μας απασχολήσει εδώ¹. Θα ασχοληθούμε λίγο μόνο με μια πτυχή του.

Πρόκειται για τη χρήση του Χώρου και του Χρόνου ή του «Χωροχρόνου» ως φυσικές οντότητες και τη μαθηματικοποίησή τους. Θα γίνουμε σαφέστεροι σχολιάζοντας κάποιες φυσικές θεωρίες, από αυτές που διαμορφώνουν τη σύγχρονη Κοσμολογία.

1. Θεωρία Γενικής Σχετικότητας (Γ.Σ.): αφετηρίες και εξελίξεις

Αρχίζουμε με τη θεωρία Γ.Σ., αφού αυτή είναι ουσιαστικά μια θεωρία βαρύτητας – και είναι η βαρύτητα που διαμορφώνει κάθε θεωρία για τον Κόσμο επειδή είναι η μοναδική γνωστή δύναμη που τίποτε δεν μπορεί να την αποφύγει. Έτσι, η θεωρία Γ.Σ. μαζί με την Κβαντική Θεωρία που διαχειρίζεται τις υπόλοιπες δυνάμεις είναι τα δύο ακρόβαθρα που ανάμεσά τους επιχειρείται να δομηθεί μια Κβαντική Θεωρία Βαρύτητας, η ποθητή «μεγάλη ενοποίηση» που θα ερμηνεύσει τον Κόσμο οριστικά και συνολικά. Αν και μερικοί νομίζουμε πως αυτή η φιλοδοξία συγγενεύει με «ύβριν»², οι ιδέες της Γ.Σ. είναι ορόσημα στη σι-σύφεια πορεία του ανθρώπινου πνεύματος.

Με την εκ των υστέρων σοφία, δύο είναι οι βασικές ιδέες στις οποίες πρέπει να εστιαστεί ο φιλοσοφικός νους. Η πρώτη, η αρχή της Γενικής Συμμεταβλητότητας (general covariance), είναι κυρίως μεθοδολογική, ενώ η δεύτερη αφορά έναν γενικό τρόπο σύλληψης του Κόσμου: μια θεσμοποιημένη από την αυθεντία ταύτιση της φυσικής υπόστασης των πραγμάτων με τη γεωμετρία τους, την αναγωγή της Φυσικής σε μια θεωρία παραμορφώσεων του χωροχρόνου.

Η Αρχή της Γενικής Συμμεταβλητότητας (Α.Γ.Σ.) απαιτεί την ισοδυναμία όλων των παρατηρητών ανεξάρτητα από τον τρόπο κίνησής τους, όπου εδώ «ισοδυναμία» σημαίνει ότι όλοι οι φυσικοί νόμοι έχουν την ίδια (μαθηματική) μορφή σε όλα τα συστήματα αναφοράς.

Είναι φανερό ότι η Α.Γ.Σ. δεν είναι «φυσικός νόμος» αλλά μια απαίτηση για τους φυσικούς νόμους, ένας «μετανόμος»³ που δεσμεύει όχι μόνον τους γνωστούς αλλά και κάθε μελλοντικό. Είναι έτσι προφανές πως ούτε να επαληθευτεί άμεσα μπορεί ούτε να διαψευστεί πειραματικά, αλλά θα παραμένει ως υπόθεση, αν οδηγήσει σε άλλες υποθέσεις εμπειρικά ελέγξιμες. Θα μπορούσε λοιπόν κάποιος να ισχυριστεί ίσως ότι η Α.Γ.Σ. είναι μια αμφίβολη μεταφυσική υπόθεση; Νομίζω πως όχι, διότι –και ανεξάρτητα από τις όποιες επιφυλάξεις μπορεί κανείς

να έχει για την έννοια του «φυσικού νόμου»– η Α.Γ.Σ. είναι απαραίτητο συστατικό τής οποιασδήποτε φυσικής θεωρίας, αφού εδραιώνει στη Φυσική τη γνωσιοθεωρητική βάση της ανθρώπινης σκέψης, τον εντοπισμό αναλλοίωτων στοιχείων ανάμεσα στις παραστάσεις που σχηματίζουμε για τον Κόσμο (και από την άποψη αυτή η ονομασία «Θεωρία Σχετικότητας» είναι μάλλον άστοχη⁴).

Είναι πάντως η δεύτερη, νοησιαρχική βάση της Γενικής Σχετικότητας που εδώ μας προβληματίζει, αφού αξιώνει κάποια ταύτιση Φυσικής και Γεωμετρίας – Ύλης και Χωροχρόνου (όπου η «γεωμετρία» ήδη με τη θεωρία Ειδικής Σχετικότητας αναφέρεται και σε «διάσταση Χρόνου»).

Δεν θα εντρυφήσουμε εδώ στις βολικές παρομοιώσεις των εκλαϊκεύσεων, όπως η εικόνα μιας δυσδιάστατης ελαστικής επιφάνειας που η καμπύλωσή της προξενεί την κίνηση των πραγμάτων επάνω της – μια αισθητηριακή, λειψή αναπαράσταση της μαθηματικής σύλληψης για την εξήγηση του φυσικού φαινομένου της βαρύτητας ως «καμπύλωση του χωροχρόνου». Αυτό που μας προβληματίζει είναι το επιστημολογικό και, κυρίως, το οντολογικό βάρος αυτής της αξίωσης για αναγωγή της Φυσικής στη Γεωμετρία.

Κατ' αρχήν, βέβαια, η ιδέα αυτή δεν πρέπει να μας εκπλήττει, αφού κάθε περιγραφή μπορεί, αν επιμελούμε, να αναχθεί τελικά σε χωροχρονικούς όρους, έστω κι αν έτσι καταντά μακροσκελής και εξεζητημένη (τελικά, μετακινήσεις δεικτών σε ορισμένες στιγμές). Όμως αυτή η επιστημολογική, γνωσιοθεωρητική πραγματικότητα σημαίνει άραγε και την οντολογική αναγωγή των φυσικών οντοτήτων σε χωροχρονικές έννοιες;

Η θεωρία λοιπόν της Γενικής Σχετικότητας περνά σε αυτήν ακριβώς την αναγωγή. Αυτό είναι φανερό όχι μόνο στις χαλαρές, εκλαϊκευτικές παρομοιώσεις, όπως η παραπάνω γίνεται ανάγλυφο και στις εξισώσεις της: στη μία πλευρά της ταυστικής εξίσωσης πεδίου υπάρχουν τα γεωμετρικά στοιχεία της καμπύλωσης του χωροχρόνου, ενώ στην άλλη ο ταυστής ενέργειας–ορμής.

Αμφιβολίες γι' αυτή την αναγωγή της οντολογίας του φυσικού κόσμου στην οντολογία του «χωροχρόνου» θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια, εγείροντας απορίες και για την κατ' αρχήν απόδοση οντολογικής υπόστασης στο Χώρο και στο Χρόνο – και κατ' επέκταση στο «χωροχρόνο». Όμως πιο πριν χρήσιμο είναι να θυμηθούμε ότι όχι μόνον η απόδοση οντολογικής υπόστασης στο Χώρο και στο Χρόνο είναι πολύ παλιά ιδέα, αλλά και αυτή η αναγωγή της Φυσικής στη Γεωμετρία δεν είναι καθόλου νέα.

Στον Πλάτωνα⁵ π.χ. ο Χώρος αναλαμβάνει ουσιαστικά το ρόλο της τροφού και του εκμαγείου των πραγμάτων, παρέχοντας αντίστοιχα την ουσία τους και τη μορφή τους. Στον πλατωνικό ποιητικό λόγο αυτός ο χώρος γεννά τα πράγματα του φυσικού Κόσμου (σε αντιδιαστολή πάντα με τις καθαρές μορφές του κόσμου των Ιδεών), όπως από τον αδιαμόρφωτο χρυσό τεχνουργούνται κοσμήμα-

τα κι ό,τι άλλο. Επιπλέον, αυτός ο δημιουργικός πλατωνικός χώρος, η «χώρα», δεν είναι ο τρισδιάστατος χώρος της κοινής εμπειρίας («τόπος»), αλλά μάλλον μια ιδιόρρυθμη γεωμετρική κατασκευή (βασισμένη στο πέμπτο πλατωνικό στερεό, το δωδεκάεδρο – ενώ τα άλλα τέσσερα δημιουργούν τα φυσικά πράγματα).

Γνωσιοθεωρητικά λοιπόν, η πλατωνική σύλληψη δεν διαφέρει γενικά από αυτή των σύγχρονων φυσικών θεωριών που στηρίζονται σε διάφορες «χωροχρονικές» δομές απομακρυσμένες από κάθε εμπειρία. Η ειδικότερη διαφορά είναι ότι ο Πλάτων, στην οντολογική δομή που συνθέτει, δεν συνδέει το Χώρο με το Χρόνο αλλά φαντάζεται το Χρόνο ανεξάρτητα, ως «τον νόμον των αριθμών» που διαφεντεύει τη φαινομενική κίνηση της αιωνιότητας (των Ιδεών). Η πλατωνική λοιπόν σύλληψη του Χρόνου συγγενεύει αρκετά με τη νευτώνεια, σε αντιδιαστολή με την κατάκτηση των θεωριών σχετικότητας και τις πειραματικές εμπειρίες που εδραίωσαν την ενιαία διαχείριση του Χώρου και του Χρόνου ως «χωροχρόνου».

Επιδιώκοντας εδώ όχι μια ιστορία των ιδεών αλλά τη λογική σύνδεσή τους –τους ομφάλιους λώρους που τις εντάσσουν σε ένα αδιάκοπα εξελισσόμενο εννοιολογικό δικτύωμα– θα πρέπει εντούτοις να αναφερθεί ότι ο Πλάτων ήταν προφανώς ενήμερος (αλλά όχι χωρίς εμπάθεια!) για την αντίπαλη κοσμοθεώρηση: στη σύλληψη του Δημόκριτου υπάρχουν μόνον τα άτομα, ενώ «χώρος» είναι το κενό μέσα στο οποίο στροβιλίζονται τα πολύτροπα και συμπαγή άτομα συνθέτοντας τα φυσικά πράγματα. Μόνο στον Επίκουρο και στον ύστερο ατομισμό το «κενό» αποκτά μια υβριδική οντολογία διεισδύοντας και στα άτομα.

Συνεχίζοντας λοιπόν την ιδεολογική ανατομία της Γενικής Σχετικότητας θα πρέπει να σταθούμε και στον Καρτέσιο, στην κοσμοθεώρηση του οποίου ταυτίζεται και πάλι η φυσική με τη γεωμετρία. Οι δύο χιλιετίες που τον χωρίζουν από τον Πλάτωνα δεν ήταν καθόλου αρκετές να απαλείψουν έναν Θεό, Δημιουργό, όμως στη σύλληψή του τονίζεται η πιο σύγχρονη ανάγκη του ανθρώπινου πνεύματος για μεγαλύτερη ευκρίνεια, λιτότητα και μαθηματικοποιημένη απόδειξη. Η ανάγκη αυτή καθορίζει την επιστημονική μέθοδο, που συμπληρώνεται με την αναβάθμιση της παρατήρησης και του πειράματος. Στην κοσμοθεώρηση του Καρτέσιου η μεταφυσική εξακολουθεί να προηγείται της φυσικής, όμως πριν και από τη μεταφυσική τίθεται η ανάγκη αυτής της επιστημονικής μεθόδου. Ο Καρτέσιος υποβάλλει τη μεταφυσική του ιδέα ότι η «έκταση» –η έννοια του Χώρου– είναι η μόνη ευκρινής έννοια στην οποία μπορεί να αποδοθεί με ασφάλεια μια οντολογική υπόσταση, έτσι που με αυτή να δομηθούν όλα τα φυσικά πράγματα. Σε αυτήν τη μονιστική αναγωγή, που παρέβλεπε την ύπαρξη των ατόμων, οφείλεται εν μέρει και η αποτυχία του καρτεσιανού προγράμματος:

Ο θρίαμβος της νευτώνειας Φυσικής στηρίχθηκε όχι μόνο στο χωροχρονικό υπόβαθρο αλλά και στην υποστασιοποιημένη έννοια της μάζας. Επιπλέον, η καρτεσιανή μαθηματική Φυσική δεν ήταν σε θέση να διαχειριστεί την έννοια της κί-

νησης διότι στερούνταν την έννοια της παραγώγου, αυτού του σπουδαίου εργαλείου της επιστήμης που δημιουργήθηκε από τις δύο θεμελιακές κατηγορίες της νόησης – Διαφορά και Λόγο.

Ο Χρόνος θεωρείται στον Καρτέσιο, όπως και στον Πλάτωνα, ανεξάρτητη οντότητα, όμως δύο σημεία της Φυσικής του αξίζει να σημειωθούν. Η συνέπεια στη μέθοδό του τον οδηγεί –αφού θεωρεί την έκταση ως ιδιότητα του όντος– στη σχετικότητα των κινήσεων: τα πράγματα δεν κινούνται μέσα σε κάποιο «χώρο», αλλά σε σχέση μεταξύ τους. Δεύτερον, η αντιμετάθεση δύο πραγμάτων ισοδυναμεί με «στροβιλισμό», επίμονη αρχαία ιδέα που απόηχός της είναι, εντούτοις, και η σημερινή εικόνα του στροβιλιζόμενου μικρόκοσμου.

Ας επανέλθουμε όμως στην εννοιοδοσία της θεωρίας της Γενικής Σχετικότητας (Γ.Σ.) που στηρίζεται στην ταύτιση μιας φυσικής οντολογίας –της ύπαρξης της βαρύτητας– με τη γεωμετρία ενός υποστασιοποιημένου «χωροχρόνου». Όμως, αναρωτιέται κανείς, τι είδους Γεωμετρία; Και ίσως αρχίζει κάποιος να αμφιβάλλει για την απόδοση οντολογικής υπόστασης στον «χωροχρόνο». Η επιλογή πάντως της Γ.Σ. ήταν η γεωμετρία Riemann (Ρήμαν), μία μετρική αλλά μη ευκλείδειος γεωμετρία. Η επιλογή της γεωμετρίας αυτής –και όχι κάποιας άλλης λιγότερο ή περισσότερο γενικής– ευόδωσε την ανάπτυξη της θεωρίας Γ.Σ., όμως ο φιλοσοφικός νους δεν παύει να αναρωτιέται για το ρόλο των μαθηματικών στην περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας, για την αλήθεια των μαθηματικών μοντέλων – και να φοβάται το «σύνδρομο Πυγμαλίωνα» που συχνά κρύβεται πίσω τους.

Η γοητεία που ασκεί η γεωμετρία Riemann είναι ολοφάνερη και στο έργο του Κλίφορντ⁶, αρκετά πριν από τον Αϊνστάιν. Εκεί και πάλι ταυτίζεται η φυσική οντολογία με την οντολογία του Χώρου (ο Χρόνος παραμένει ακόμη απόλυτος) και μάλιστα εισάγεται ως βασικό στοιχείο η καμπύλωσή του. Τέλος, παραλείποντας άλλες –μετά τον Αϊνστάιν– παραλλαγές της Γ.Σ., αναφέρω δύο για ιδιαίτερους λόγους. Η πρώτη, του Γουάιτχεντ⁷, ενδιαφέρει εννοιολογικά διότι συνιστά μια θεωρία «γενικής σχετικότητας», στο πλαίσιο όμως της ευκλείδειας γεωμετρίας. Η δεύτερη ήταν η πιο πρόσφατη «Γεωμετροδυναμική» (Geometrodynamics)⁸ στην οποία το πρόγραμμα οντολογικής ταύτισης Φυσικής - Γεωμετρίας προωθείται στις ακραίες συνέπειές του – με προϊόντα εξωτικά αντικείμενα, όπως οι «σκουληρότρυπες» (wormholes) που επιτρέπουν παράδοξα (ή παράλογα) «ταξίδια στο Χρόνο».

Σήμερα, λίγους μήνες μετά την πρώτη προβληματική δοκιμή του νέου κολλοσιαίου επιταχυντή στο CERN, το τοπίο της Φυσικής είναι και πάλι θολό: η κλασική Κοσμολογία αμφισβητείται, διάφορες κβαντικές θεωρίες περιμένουν τη δίκη του πειράματος, και η θεωρία Γ.Σ. δεν προβάλλεται πια ως πλήρης θεωρία. Από τους παλαιότερους και προφανέστερους λόγους είναι ασφαλώς η αδυ-

ναμία της να εφαρμοστεί σε οριακά μηδενικές διαστάσεις χώρου και χρόνου και αντίστροφα, π.χ. σε οριακά άπειρη ενέργεια –σε ό,τι δηλαδή θεωρεί «σημεία ανωμαλίας» (και όχι σημεία αδυναμίας της)–, «ανωμαλίες» που όμως επίμονα έχουν μεταφραστεί σαν «Μεγάλη Έκρηξη» (Big Bang) ή ως ακατανόητες απαγορεύσεις ερωτημάτων, όπως «τι υπήρχε πριν από τη Μεγάλη Έκρηξη;», και ακόμη μυστήριες οντολογικά θέσεις, όπως «ο Χρόνος ξεκίνησε με τη Μεγάλη Έκρηξη»⁹. Ή, πάλι, το γεγονός ότι οι εξισώσεις πεδίου της Γ.Σ. επιτρέπουν έναν Κόσμο χωρίς ύλη –δηλαδή μόνο με «χωροχρόνο»¹⁰– κάπως σαν βασιλιά χωρίς ρούχα.

Απορίες που επιτέλους στις μέρες μας έχουν νομιμοποιηθεί και τις οποίες ψηλαφούν οι διάφορες θεωρίες Κβαντικής Βαρύτητας (βλ. επόμενη ενότητα). Αποψή μας είναι ότι πίσω από όλες αυτές τις δυσκολίες, παλαιότερες και νεότερες, βρίσκεται πάντα το πρόβλημα της ερμηνείας των μαθηματικών μοντέλων, δηλαδή η σχέση Μαθηματικών – Φυσικής, το φάντασμα του «εμπειρικού νόμου της επιστημολογίας»¹¹ που μας περιγελά.

2. Κοσμολογία και σύγχρονες θεωρίες Κβαντικής Βαρύτητας¹²

Είναι γνωστή η εγγενής ασυμβατότητα των δύο μεγάλων ρευμάτων της Φυσικής – Θεωρίας Σχετικότητας και Κβαντικής Θεωρίας. Όμως η τεράστια συμβολή και των δύο στην ανθρώπινη σκέψη κάνουν επιτακτική την ανάγκη συγκερασμού τους. Στις μέρες μας υπάρχει ένας οργασμός κατασκευής τέτοιων υβριδικών θεωριών που επιχειρούν αυτή τη συμφιλίωση και, επειδή τελικός στόχος τους είναι να συμπεριλάβουν και τη βαρύτητα, ονομάζονται Κβαντικές Θεωρίες Βαρύτητας (Κ.Θ.Β.).

Συναρμολογούνται από στοιχεία της Γενικής Σχετικότητας –μιας θεωρίας βαρύτητας– και της Κβαντικής Θεωρίας Πεδίου, που με σημαντική επιτυχία έχει ήδη συνενώσει τα άλλα τρία είδη αλληλεπίδρασης. Εδώ θα σκιαγραφήσουμε επιλεκτικά μόνον κάποιες από τις σύγχρονες Κ.Θ.Β.

Η παλαιότερη από αυτές είναι η Θεωρία Υπερχορδών (η κατάχρηση του «υπέρ» συχνό γνώρισμα της ρηχής λεξιπλασίας των ημερών μας). Μονοπωλώντας για πολύ καιρό το τοπίο –και αποτελώντας κυρίαρχο «παράδειγμα» όχι μόνο στο κινήγι της μεγάλης ενοποίησης αλλά και στις ανθρώπινες αδυναμίες της επιστημονικής έρευνας– έχει μάλλον εισέλθει σε φάση παρακμής, μολονότι ακόμη καταναλώνει πλήθος δημιουργικές ζωές που έχουν μπει στην υπηρεσία της. Η εύλογη εξέλιξή της οφειλόταν στον γοητευτικό αναγωγισμό της: η πληθώρα σωματιδίων και δυνάμεων εξηγούνται ως τρόποι δόνησης απειροστών «χορδών», χρησιμοποιώντας όμως τη μαθηματική πανάκεια των πολλών διαστάσεων (για το μικρόκοσμο). Η εμφανέστερη δυσκολία της είναι ότι το μαθηματικό της σχή-

μα επιτρέπει την ισοδύναμη εμφάνιση πλήθους ισοδύναμων παραλλαγών με αδυναμία πειραματικής επιλογής – έτσι που επιθετικά χαρακτηρίζεται ως «ούτε καν λάθος»!¹² Πρόβλημά της επίσης θεωρείται το ότι δεν ενσωματώνει το φορμαλισμό της Γενικής Σχετικότητας και την επικρατούσα ερμηνεία του, έτσι ώστε ο χωροχρόνος της να είναι απλώς πλαίσιο περιγραφής και όχι γενεσιουργός φυσικών φαινομένων – όπως θέλει να πιστεύει η κυρίαρχη εκδοχή.

Η άποψη ότι η ποθούμενη ενοποιημένη θεωρία πρέπει να ενσωματώνει μια οντολογία του χωροχρόνου είναι συνήθως στη βάση άλλων θεωριών Κβαντικής Βαρύτητας, που μερικές δεν είναι καν ολοκληρωμένες θεωρίες αλλά μάλλον προγράμματα έρευνας, συνήθως βραχύβια. Το καθένα τους φαίνεται να σημειώνει σε κάποια περιοχή επιτυχία, έτσι ώστε, αν και συγκρουόμενα, συνθέτουν ένα μωσαϊκό με ενδιαφέρουσες ιδέες. Συνήθως ζουν λιγότερο από τους δημιουργούς τους, ενώ οι τοκετοί πληθαίνουν, έτσι που και μόνον ο εντοπισμός κοινών ιδεών ή κάποιων πράγματι νέων θα αναδείκνυε δυσκολίες και προοπτικές, έστω και χωρίς το ιστορικό τους. Αυτό που μας ενδιαφέρει κυρίως είναι τι υποκρύπτει – πώς ερμηνεύεται – ο (μαθηματικός) φορμαλισμός τους: έχει ο «χωροχρόνος» οντολογική υπόσταση ή είναι μια ανθρώπινη επινόηση; Το ερώτημα δεν εμφανίζεται συνήθως έτσι αποκάλυπτα, επειδή η πρώτη άποψη έχει μάλλον επικρατήσει σε κάποια μορφή. Παραμερίζεται δηλαδή η αντίπαλη θέση που θεωρεί τη γεωμετρία επινόηση, μια σύμβαση που προστίθεται στην περιγραφή του φυσικού Κόσμου, και παρομοίως η επίσης σχεσιακή ερμηνεία που απορρίπτει κάθε οντολογική σύλληψη του χωροχρόνου ο οποίος τώρα εκφράζει μόνο σχέσεις πραγμάτων – γραμμή σκέψης του αρχαίου σκεπτικισμού αλλά και του Λάιμπνιτς.

Όμως το παραπάνω θεμελιακό, διχοτομικό ερώτημα οδηγεί και στην επόμενη διχοτομία: αν ο Χρόνος έχει οντολογική υπόσταση, είναι άραγε μια παγωμένη διάσταση, μια παρμενίδεια οντότητα όπως απαιτεί η Γενική Σχετικότητα (στην κλασική της μορφή) ή μια ηρακλείτεια ροή όπως τον θέλει η Κλασική Φυσική και μέρος της Κβαντικής;

Με λυδία λίθο τη στάση τους στα ερωτήματα αυτά, θα σχολιάσουμε τώρα δύο από τις νεότερες Θεωρίες Κβαντικής Βαρύτητας.

Πιο φιλόδοξη διάδοχος της Θεωρίας των Υπερχορδών προβάλλεται σήμερα μάλλον η λεγόμενη Loop Quantum Gravity –ας την παραφράσουμε σε Βαρυτική Θεωρία Βρόχων– που εμφανίζεται σε διάφορες παραλλαγές. Η επιστημότερη από αυτές έχει κατηγορηματική στάση: «Ακριβώς όπως η συμπεριφορά της ύλης δείχνει ότι αποτελείται από άτομα, παρομοίως η συμπεριφορά του Χώρου και του Χρόνου υποδεικνύει ότι έχουν μια μικροσκοπική δομή – είτε ένα μωσαϊκό από χωροχρονικά «άτομα» είτε κάποια άλλη νηματοειδή σύσταση»¹³.

Με όχι μεγάλη μετριοφροσύνη ακολουθεί ο ισχυρισμός ότι, ενώ από την υπόθεση του Δημόκριτου μέχρι την επαλήθευσή της χρειάστηκαν περίπου 25 αιώ-

νες, τώρα οσονούπω φτάνουμε στη δικαίωση της υπόθεσης για τα «χωροχρονικά άτομα»! Στο σημείο αυτό ίσως θα προτιμούσε κανείς να ακουγόταν από τους αιώνες και μια άλλη ρήση του Δημόκριτου: «Ἐτεή δε ουδέν ἰδμεν· εν βυθῷ γαρ η ἀλήθεια» (στην πραγματικότητα δεν γνωρίζουμε τίποτε, γιατί η αλήθεια βρίσκεται στο βυθό). Νομίζω πάντως ότι και η διάγνωση του σύγχρονου αναγνώστη –που διέτρεξε κάπως τη μαθηματική εκδοχή της θεωρίας– θα ήταν πως άλλη μια φορά το «σύνδρομο Πυγμαλίωνα», και μικροπρεπέστερες ίσως ανθρώπινες αιτίες, συνδράμουν ώστε ένα μαθηματικό είδωλο να υποδύεται την Πραγματικότητα.

Στη μαθηματική εκφορά της η θεωρία πράγματι επιτυγχάνει π.χ. να συνθέτει το χωροχρονικό συνεχές της Γενικής Σχετικότητας από τα βροχοειδή «χωροχρονικά άτομα», και κυρίως να υπολογίζει ότι σε αυτό το υποκβαντικό επίπεδο η βαρυτική δύναμη γίνεται απωστική. Το τελευταίο συμπέρασμα –που εμφανίζεται και σε άλλες τελείως διαφορετικές θεωρίες– υποθάλλει ένα κοσμολογικό ζητούμενο που υποβόσκει στις μέρες μας: η καθιερωμένη κοσμολογία της Μεγάλης Έκρηξης» αμφισβητείται πολλαπλά ενώ απαγορευμένα ερωτήματα –«τι υπήρχε πιο πριν;!»– ξαναγίνονται ακαδημαϊκά:

Η βαρύτητα, που στον έσχατο μικρόκοσμο των «βρόχων» γίνεται απωστική, εξυπηρετεί αληθοφανέστερα σενάρια: αντί της μίας και μοναδικής «μεγάλης έκρηξης» προκύπτει τώρα ένα σύμπαν που «αναπηδά» ύστερα από μια προηγούμενη «μεγάλη σύνθλιψη»– εξηγώντας έτσι και τη φάση της «πληθωριστικής» (inflationary) διαστολής της καθιερωμένης κοσμολογίας. Και αν κανείς αρκούταν μόνο σε εικόνες, δεν θα υπήρχε καλύτερη από εκείνη την ηρακλείτεια, για ένα σύμπαν που «ήταν, είναι και θα είναι φωτιά με αιώνια ζωή που ανάβει και σβήνει με μέτρο»¹⁴.

Όμως η αναμφισβήτητη ενοποιητική δύναμη της μαθηματικής θεωρίας είναι άραγε αρκετή ώστε να υιοθετήσουμε μια οντολογία για «χωροχρονικά άτομα»; Νομίζω πως όχι, αν τουλάχιστον κανείς υποστηρίζει ότι η ενοποιητική ικανότητα κάθε μαθηματικής θεωρίας δεν είναι και τόσο απροσδόκητη¹⁵.

Βέβαια, όταν μια μαθηματική αναπαράσταση του φυσικού κόσμου είναι πράγματι επιτυχής –αν δηλαδή υφίσταται ένας μεγάλης έκτασης ισομορφισμός μεταξύ των σχέσεων των μαθηματικών οντοτήτων και των εμπειρικών σχέσεων των φυσικών πραγμάτων– είναι εύλογο για ένα στοιχείο της μαθηματικής περιγραφής, στο οποίο δοκιμαστικά μόνο είχε αντιστοιχηθεί κάποιο στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας, να κατοχυρώνεται αυτή η αντιστοιχία. Δεν είναι σχήμα λόγου π.χ. ότι ένας πλανήτης, ο Ποσειδώνας, κυριολεκτικά «φάνηκε στην άκρη του μολυβιού του Λε Βερριέ»¹⁶. Οι θρίαμβοι της μαθηματικής Φυσικής συνίστανται ακριβώς σε τέτοιες αντιστοιχίες.

Όμως στην περίπτωση των «χωροχρονικών ατόμων» η ανακήρυξή τους σε φυ-

σικές οντότητες επιχειρείται μέσω ενός μαθηματικού προτύπου για μια φυσική πραγματικότητα –έναν υποκβαντικό κόσμο– εσαεί αποκλεισμένη από άμεση παρατήρηση, κυριολεκτικά «εν βυθώ». Και μάλιστα, το πρότυπο αυτό προσδοκά τη δικαίωσή του κυρίως από συνέπειές του στο άλλο άκρο της κλίμακας (!) – στο κοσμολογικό επίπεδο. Τα «χωροχρονικά άτομα» αρχίζουν να μοιάζουν με τα εικονικά αντικείμενα που παρουσιάζει στη σκηνή ο μαθητευόμενος μάγος – εδώ, το δημιουργικό ανθρώπινο πνεύμα, ανυπόμονο και φιλόδοξο.

Η εισαγωγή των «χωροχρονικών ατόμων» στον φυσικό κόσμο γίνεται απευθείας από τη μαθηματική τους μορφή – «βρόχοι» ή ό,τι άλλο στην τοπολογική τους εκδοχή. Μαθηματικά κατασκευάσματα ανακηρύσσονται κοσμικές οντότητες με μια άκρατα πλατωνική ιδεολογία – χωρίς πάντα φιλοσοφική επίγνωση. Πάντως, ακόμη και ο φανατικά πλατωνικός, που πρόθυμα θα αντιστοιχούσε στα μαθηματικά «άτομα του χώρου» και κάποια φυσική κυψελωτή δομή, θα δυσκολευόταν να τα μπολιάσει και χρονικά – τουλάχιστον, πιο δύσκολα από ό,τι έχει γίνει στη Γενική Σχετικότητα με την οντολογία της «χωροχρονικής πολλαπλότητας» (manifold) στη μεγάλη κλίμακα. Όπως πάντως στην τελευταία δίνεται προκειμένου να καθησυχαστεί ο πρακτικός νους μια βολική παρομοίωση – η εικόνα μιας καμπυλωμένης επιφάνειας στο ρόλο της βαρύτητας– παρομοίως μια χαλαρή παρομοίωση προσφέρεται¹⁷ και στη θεωρία των «χωροχρονικών ατόμων»: ένας υποκβαντικός χώρος σαν σφουγγάρι απορροφά την ενέργεια σαν νερό, όταν όμως κατακλυστεί υπερβολικά την αποβάλλει – η βαρύτητα γίνεται απωστική για κατακλυσμιαίες ενέργειες, και η θεωρία μας «εξηγεί» και τη φάση πληθωριστικής διαστολής (inflation) του πρώιμου σύμπαντος.

Όσοι πάντως φυσικοί¹⁸ δυσπιστούν σε τέτοιες μαθηματικές αναπαραστάσεις, εκτιμώντας τις ως μια σύγχρονη μορφή φυσικής μυθολογίας, προτιμούν να δηλώνουν άγνοια, θεωρώντας το «χώρο» ένα νέο είδος «αιθέρα», όπου φευγαλέα ύλη κατεργάζεται απαρατήρητα τα φαινόμενα που αναδύονται στο κβαντικό επίπεδο και από εκεί στο μακρόκοσμο. Ας συνεχίσουμε όμως την επισκόπηση ιδεών.

Πιο οργανωμένη, ίσως, από τις πολύ πρόσφατες θεωρίες κβαντικής βαρύτητας εμφανίζεται η θεωρία των Αιτιακών Δυναμικών Τριγωνισμών (Causal Dynamic Triangulations). Πριν και από την «του ονόματος επίσκεψιν», ας δούμε μια βασική της υπόθεση που είναι συγχρόνως κεντρική στην κβαντική θεωρία γενικότερα. Στο απλούστερο υπόδειγμά της ακολουθεί την καθιερωμένη υπόθεση ότι η πραγματική τροχιά ενός σωματιδίου είναι η επαλληλία όλων των δυνατών τροχιών του. Ευχαρίστως, νομίζω, θα γενίκευε εδώ ο Αριστοτέλης: η πραγματική έκβαση ενός φυσικού φαινομένου αντιστοιχεί στη συνισταμένη όλων των δυνατών εξελίξεών του. Θα ακρούσε μόνο να προστεθεί και ένα άλλο καθάρτα κβαντικό γεγονός: κάθε εξέλιξη (π.χ., μια τροχιά) προσομοιούται με κάποια διακύμανση (fluctuation).

Μια λοιπόν απόπειρα¹⁹, τολμηρή και συνάμα χονδροειδής, της σύγχρονης κοσμολογίας ήταν –καθώς θεωρεί ολόκληρο το Σύμπαν ένα κβαντικό φαινόμενο– να αναζητήσει την εξέλιξή του ως επαλληλία όλων των δυνατών διακυμάνσέων του, και ειδικότερα να εξηγήσει τον μεγάλης κλίμακας χωροχρόνο ως επαλληλία δυνατών χωροχρονικών μορφών – όπου και πάλι ανενδοίαστα ο χωροχρόνος θεωρείται οντολογική κατηγορία. Από εκεί κι έπειτα, με άνεση μιλούσαν για χωροχρονικές μικροοντότητες διαφόρων μορφών που συνδέονται μεταξύ τους – κατά προτίμηση «τριγώνων»²⁰ σε χώρο τεσσάρων διαστάσεων, θεωρώντας το χρόνο διάσταση του Χώρου. Αφαιρούσαν δηλαδή ουσιαστικά τη δυναμική του Χρόνου ως εξέλιξη και, επομένως, ούτε η αιτιότητα είχε θέση. Στόχος βέβαια ήταν πώς από τη σύνθεση των «τριγώνων» στον παγωμένο αυτόν τετραδιάστατο χώρο θα προέκυπτε τελικά και ο αισθητός μακρόκοσμος με μια χρονική και τρεις χωρικές διαστάσεις, ώστε αιτία – αποτέλεσμα να έχουν νόημα. Αν τώρα ο αναγνώστης δεν έχει διαβρωθεί αρκετά από παραπλανητικές εκλαικεύσεις και δυσπιστεί σε τέτοια σενάρια, δεν θα είναι μόνος²¹. (Η δυσπιστία του μάλιστα ίσως μεγαλώνει στις μέρες μας, παρατηρώντας άλλα μαθηματικά κατασκευάσματα –αυτά των οικονομολόγων– να παραποιοούν, τώρα επικίνδυνα, την πραγματικότητα.)

Η προσέγγιση πάντως αυτή απέτυχε τελικά και στην παραπάνω τεχνική της φιλοδοξία, όμως οι προσπάθειες των ιδιοφυιών εργατών της υπογράμμισαν σημαντικές ιδέες χρήσιμες σε επόμενες θεωρίες. Υιοθέτησαν π.χ. την κοσμοθεώρηση του αναδυτισμού²²: «επίπεδα» (ή «κύκλοι») πραγματικότητας όπου νέες ιδιότητες αναδύονται, ικανότητα της ύλης να αυτοοργανώνεται επιδιώκοντας ευστάθεια με χαρακτηριστικούς «σταθμούς» οργάνωσης-φάσεις, ολιστική συμπεριφορά κ.λπ.

Με αφετηρία λοιπόν την ίδια ιδέα της «υπέρθησης ιστοριών», αλλά με κάποια αποτελέσματα τώρα, προωθείται και η θεωρία Αιτιακών Δυναμικών Τριγωνισμών (Α.Δ.Τ.). Η επιτυχία της συνίσταται κυρίως στο ότι η προηγούμενη μέθοδος «συναρμολόγησης» έδωσε αυτή τη φορά το ποθούμενο: ο χωροχρόνος του μακρόκοσμου που αναδύεται έχει τις γνώριμες διαστάσεις, τρεις του Χώρου και μία του Χρόνου. Το αποτέλεσμα αυτό προέκυψε διότι η σύνδεση των στοιχειωδών «τριγώνων» γινόταν τώρα με κάποιους κανόνες, ουσιαστικά μια διαδικασία αιτίας – αποτελέσματος. Άλλο ένα ενδιαφέρον πόρισμα ήταν πως αυτή η «συναρμολόγηση» του χωροχρόνου αποκτούσε μια μορφή fractal (φράκταλ) – επανάληψη μορφής ανεξαρτήτως κλίμακας κ.λπ. Επίσης, απέκλειε τις ευφάνταστες αλλά δημοφιλείς «σκουληκότρυπες» (wormholes) που επέτρεπαν «ταξίδια στο παρελθόν», και τα παρόμοια.

Ο φιλοσοφικά πάντως ανήσυχος που εξετάζει αυτή τη θεωρία (Α.Δ.Τ.) νιώθει κάπως αμήχανα για το διαφημιζόμενο επίτευγμα της ανάδυσης του χωρο-

χρόνου των «3+1 διαστάσεων» – όπου πάντως ο σχετικιστικός χρόνος ακυρώνει τη διαίσθηση για το απόλυτο «ταυτόχρονο», σέβεται όμως την εμπειρία για το αμείλικτο «βέλος», παρελθόν – παρόν – μέλλον. Νομίζω λοιπόν πως το επίτευγμα ήταν αναμενόμενο: η εισαγωγή αιτιακών κανόνων στη συναρμολόγηση των χωροχρονικών μικρομορφών έχει ήδη εγγράψει και το βέλος του χρόνου μέσω της διαδοχής αιτίου - αποτελέσματος, όπως δηλαδή σε κάθε αιτιακή θεωρία του Χρόνου²³. Απομένει πάντως το επίτευγμα της θεωρίας Α.Δ.Τ., ότι υπολογιστικά προκύπτουν τρεις ακριβώς διαστάσεις για τον Χώρο.

Ωστόσο, απομένει επίσης στον φιλοσοφημένο αναγνώστη μια περίεργη γέυση όταν διαβάζει: «Αν θεωρήσουμε τον κενό χωροχρόνο ως κάποια άυλο ουσία, αποτελούμενη από ένα τεράστιο πλήθος στοιχείων χωρίς εσωτερική δομή, και αν θεωρήσουμε ότι αυτά τα μικροσκοπικά δομικά στοιχεία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με απλούς κανόνες υπαγορευμένους από τη βαρύτητα και την κβαντική θεωρία, τότε αυτά θα οργανωθούν μεταξύ τους σε ένα Όλον που θα προσομοιώνει αρκετά το παρατηρούμενο Σύμπαν. Μια αναλογία βρίσκουμε στον τρόπο που τα μόρια οργανώνονται σε κρυστάλλους ή άμορφα στερεά»²⁴. Και όλα αυτά επειδή «... μια θεωρία κβαντικής βαρύτητας στοχεύει να περιγράψει τη φύση του χωροχρόνου στις μικρότατες κλίμακες – τα κενά μεταξύ των πιο ελάχιστων σωματιδίων που γνωρίζουμε...».

Ωστε λοιπόν πρώτα ομολογούμε ότι υπάρχει κενό και έπειτα επιχειρούμε να το πληρώσουμε; Ωστε, ενώ δεχόμαστε –είμαστε πεπεισμένοι γι' αυτόν– έναν υλικό κόσμο «σωματιδίων», το «κενό» ανάμεσά τους μας φοβίζει τόσο που το γεμίζουμε με αέρινα μαθηματικά όντα; Τουλάχιστον ο Πλάτων προσπάθησε να χωρίσει αμετάκλητα τον κόσμο των Ιδεών του από τον θαυμαστό υλικό κόσμο, ενώ εμείς επιχειρούμε να μπολιάσουμε τον δεύτερο με τον πρώτο – ένα ακατανόητο μαθηματικοϋλικό υβρίδιο. Αν τουλάχιστον διστάζουμε να ταξιδέψουμε σε αρχαία πελάγη –δεν υπάρχει κενό, διότι δεν υπάρχει το μη ον²⁵– γιατί ευθύς εξαρχής δεν θέτουμε στη θέση του άγνωστη ύλη; Μήπως η επίμονη, στους τρεις τελευταίους αιώνες, αντίληψη του Χώρου και του Χρόνου ή, ακόμη χειρότερα, του «Χωροχρόνου» ως υποστάσεων οδηγεί προς μία κατεύθυνση που δικαιώνει την απαισιοδοξία του Α. Ν. Γουάιτχεντ – «μήπως η Μαθηματική Φυσική είναι ένα τεράστιο παραμύθι;»²⁶

Ασφαλώς όχι! – τουλάχιστο στη μεγαλύτερη έκτασή της. Όμως σε εποχές πληθωρισμού της γνώσης, το μάθημα του αρχαίου κυνικού είναι χρήσιμο: αφού άκουσε προσεκτικά τους επαίοντες να εξηγούν ότι δεν υπάρχει κίνηση, σηκώθηκε και έκανε σιωπηλά μια βόλτα γύρω τους.

Σημειώσεις

1. Η πολύ γνωστή ρήση του νομπελίστα φυσικού Γ. Βίγκνερ. Βλ., Ν. Ταμπάκης, *Αναπαραστάσεις του Κόσμου: Πραγματικότητα και Σύγχρονη Φυσική*, 2η έκδ., Γκοβόστης 2003.
2. Ν. Ταμπάκης, «Επιστημονικές θεωρίες του Παντός: μία Σύγχρονη Ύβρις;», *Ουτοπία* 29 (1998), σσ. 61-67.
3. M. Bunge, *The Myth of Simplicity*, Prentice Hall, 1963, κεφ. 12.
4. Όπως παρατηρούσε ο Β. Φοκ. Βλ. Ε. Μπιτσάκης, *Η εξέλιξη των θεωριών της Φυσικής*, Δαίδαλος-Ι. Ζαχαρόπουλος 2008, κεφ. 6 (Σχετικότητα και Κοσμολογία).
5. Πλάτωνας, *Τίμαιος*, ιδίως 49a, 50a-c, 50e, 52b (όπου η έννοια «χώρα»), 52e. Για το χρόνο: 37d.
6. W. K. Clifford (1845-1889): πρώιμη μαθηματική ιδιοφυία, με πρωτότυπη φιλοσοφική σκέψη στο έργο της σύντομης ζωής του. (Αυτός διέδωσε στην Αγγλία το έργο της άλλης βραχύβιας ιδιοφυίας, του Reimann.)
7. Μια αντιπαραβολή των θεωριών Γουάιτχεντ και Αϊνστάιν, στο Ταμπάκης, ό.π., §6. 2. 2. 4.
8. J. Graves, *The Conceptual Foundations of Contemporary Relativity Theory*, MIT, 1978.
9. Μια καυστική –και πειστική– κριτική στο Κ. Αντωνόπουλος, «Ωρα Μηδέν», *Ουτοπία* 64 (2005), σσ. 69-86.
10. Graves 1978 ό.π., σ. 304.
11. Ονομασία που κατακρίωσε ο Γ. Βίγκνερ για την (όποια) συμφωνία των φυσικομαθηματικών θεωριών με την Πραγματικότητα.
12. Στον τίτλο του βιβλίου του P. Woit, *Not Even Wrong: The Failure of String Theory*, Basic Books, 2006. Τον επιτάφιο της Θεωρίας των Χορδών επιχειρεί και ο επίσης γνωστός φυσικός L. Smolin στο *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, The Fall of Science and What Comes Next*, Houghton Mifflin, Boston 2006.
13. M. Bojowald, «Follow the Bouncing Universe», *Sci. Amer.*, Οκτώβριος 2008, σ. 29. Η ιδέα των «χωροχρονικών ατόμων» δεν είναι καθόλου νέα. Βλ. το περιεκτικό άρθρο του Θ. Κουτσουμπού, «Αναζητώντας τα Χρονοάτομα», *Ουτοπία* 75, 2007.
14. Το περίφημο απόσπασμα «30» του Ηράκλειτου. Βλ. Μπιτσάκης 2008 ό.π. σ. 165.
15. Βλ. Ταμπάκης, ό.π. κεφ. 6 («Τι μένει για θαυμασμό;»)
16. Ο Λε Βερριέ εξήγησε (1846) μια ανωμαλία στην κίνηση του Ουρανού με την υπόθεση ενός άγνωστου πλανήτη (Ποσειδώνα) που εντοπίστηκε αμέσως στη θέση που υπέδειξε.
17. Bojowald 2008 ό.π. σ. 31, σημ. 13.
18. Αρχεί να δει κανείς τις παρατηρήσεις του R. Laughlin –ιδιαίτερα δηκτικές (με την άνεση του Νόμπελ Φυσικής 1998) στο *A Different Universe*, Basic Books, 2005, σσ. 85, 89, 93.
19. Μοντέλο του Σ. Χώκινγκ: («Euclidean Gravity»), ακραία επέκταση τού φορμαλισμού τού Φάυνμαν για την κβαντική μηχανική. (Ευπώλητο όσο και ευφάνταστο: S. Hawking, *A Brief History of Time*, Bantam Books, 1988).
20. Μια παρουσίαση της θεωρίας στο R. Loll et al., «The Self-organizing Quantum», *Sci. Amer.*, Ιούλιος 2008, σσ. 24-31.
21. Βλ. σημ. 18.
22. Βλ. Ν. Ταμπάκης, *Ηράκλειτος και Σύγχρονος Κόσμος*, Γκοβόστης 2009, κεφ. Β'.
23. Όπως στο έργο του Η. Reichenbach, *The Direction of Time*, 1991 (1956).
24. Από το άρθρο τής σημ. 20 (σ. 25: οι υπογραμμίσεις δικές μου.)
25. Από τον Παρμενίδη στον Πρωταγόρα και στο αριστοτελικό «η Φύσις ορρωδεί το κενόν».
26. Ν. Ταμπάκης, ό.π. σημ. 1, σ. 26.