



Jérôme Bosch: Ο πειρασμός του Αγίου Αντωνίου - η πόλη, Λεπτομέρεια 1505

Η θεωρία της ύλης στα τέλη του εικοστού αιώνα

Ο δέκατος ένατος αιώνας μας κληροδότησε δύο σημαντικές φυσικές θεωρίες που αποτελούν ακόμη και σήμερα ακρογωνιαία στηρίγματα της θεωρίας της ύλης και δεξαμενή ιδεών για τις συνεχείς εξελίξεις της επιστήμης. Αναφερόμαστε στη Μηχανική του Newton και στην Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell. Με θαυμαστή μαθηματική λεπτότητα και υψηλού βαθμού προβλεψιμότητα οι θεωρίες αυτές συνόψιζαν, στα τέλη του δεκάτου ένατου αιώνα, τη δομή και λειτουργία της φυσικής πραγματικότητας σε πλήρη αρμονία με το παρατηρησιακό πρόγραμμα της εποχής. Εάν προσθέσουμε στο θεωρητικό αυτό σχήμα και τη Θερμοδυναμική, τονίζοντας ιδιαίτερα το θεμελιακό χαρακτήρα του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, καταλήγουμε σε ένα πλήρες παραδειγματικό πρότυπο για τα φαινόμενα σε μεγάλες και μικρές κλίμακες, το οποίο κληρονόμησε ως επιστημονικό κεκτημένο ο εικοστός αιώνας. Το πρότυπο αυτό, της λεγόμενης Κλασικής Φυσικής, βασίσθηκε σε ορισμένες γενικές αρχές που μπορεί να συνοψισθούν ως εξής:

(α) Η κίνηση της ύλης ανάγεται στην κίνηση υλικών σωματιδίων σε καλά καθορισμένες γεωμετρικές τροχιές που ακολουθούν τους νόμους της Μηχανικής του Newton.

(β) Η κίνηση της ύλης συντελείται στον απόλυτο, τρισδιάστατο, ευκλείδειο, κενό χώρο με τη μεσολάβηση μιας αναλλοίωτης και καθολικής κλίμακας χρόνου.

(γ) Η ακαριαία αλληλεπίδραση από απόσταση είναι συμβατή με τους νόμους της Μηχανικής.

(δ) Η φυσική πραγματικότητα συγκροτείται από δύο διακριτές οντότητες: την ύλη που ακολουθεί τους τροχιακούς νόμους κίνησης (Newton) και την ακτινοβολία που ακολουθεί τους κυματικούς νόμους κίνησης (Maxwell).

(ε) Οι αλληλεπιδράσεις που διεγείρουν τις κινήσεις στα συστήματα ύλης είναι βαρύτητα και ο ηλεκτρομαγνητισμός.

(στ) Οι νόμοι κίνησης της ύλης ακολουθούν την αρχή της παγκοσμιότητας, παραμένουν οι ίδιοι σε μικρές και μεγάλες κλίμακες αποστάσεων και ταχυτήτων.

(ζ) Η διάκριση σε απλά και πολύπλοκα συστήματα ύλης έχει ουσιώδη και όχι μεθοδολογικό χαρακτήρα. Ελέγχεται από το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο και βα-

σίζεται στη θεμελιακή διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στη χρονική αντιστρεψιμότητα της μηχανικής κίνησης ενός απλού συστήματος και στη μη αναστρεψιμότητα της θερμοδυναμικής εξέλιξης ενός πολύπλοκου συστήματος.

Οι γενικές αυτές αρχές της Κλασικής Φυσικής συμπυκνώνουν την πλούσια συγχομιδή αιώνων επιστημονικής έρευνας και είναι το αποκορύφωμα της νέας επιστήμης που εμφανίστηκε τον δέκατο έβδομο αιώνα, την εποχή του Γαλιλαίου. Παρόλο που το κλασικό αυτό οικοδόμημα κλονίστηκε τον εικοστό αιώνα, πιστεύουμε ότι οι σημαντικές επιστημονικές ανακατατάξεις της εποχής μας (Κβαντική Μηχανική, θεωρία της Σχετικότητας, θεωρία Στοιχειωδών Σωματιδίων, Κοσμολογία) αποτελούν συνέχεια της μεγάλης επιστημονικής επανάστασης του Γαλιλαίου. Βασίζονται σε ένα συνεχή διάλογο της θεωρίας με το πείραμα, επιβεβαιώνουν τον ασυμπτωτικό χαρακτήρα της επιστημονικής γνώσης και αναιρούν το δόγμα του τέλους της επιστήμης. Προτιμούμε, για τον λόγο αυτό, μια συντηρητική διατύπωση της μετάβασης από το σύστημα αρχών της Κλασικής Φυσικής που καταγράψαμε προηγουμένως, στο νέο πλαίσιο της Κβαντικής και Σχετικιστικής Φυσικής, το οποίο κυριάρχησε το πρώτο ήμισυ του εικοστού αιώνα. Ειδικά επιθυμούμε να τονίσουμε ότι η σύγχρονη Φυσική δεν κατάργησε την κλασική επιστήμη της ύλης, αλλά έθεσε αυστηρά όρια στην καθολικότητα των φαινομένων καθορίζοντας με απόλυτο τρόπο τη διάκριση ανάμεσα σε μικροσκοπικά και μακροσκοπικά συστήματα (Κβαντική Μηχανική), αφ' ενός, και σε κινήσεις με υψηλές και χαμηλές ταχύτητες (Σχετικιστική Μηχανική), αφ' ετέρου. Στην οριοθέτηση αυτή των φαινομένων την ποσοτική ρύθμιση έχουν αναλάβει δύο σημαντικές παγκόσμιες σταθερές: (α) η σταθερά δράσης του Planck (h) για τα κβαντικά φαινόμενα και (β) η ταχύτητα του φωτός (c) για τα σχετικιστικά φαινόμενα. Η προέλευση και ο κανονιστικός ρόλος των θεμελιακών σταθερών της Φύσης σε σχέση με τη δομή και λειτουργία του Σύμπαντος σε διάφορες κλίμακες οργάνωσης της ύλης, αποτελεί σήμερα κορυφαίο επιστημονικό ερώτημα το οποίο συμπυκνώνει τους προσανατολισμούς της φυσικής επιστήμης στα τέλη του εικοστού αιώνα.

Είναι ενδιαφέρον να τονίσουμε ότι ο χαρακτήρας των παγκοσμίων σταθερών στην Κλασική Φυσική παραμένει φαινομενολογικός, ενώ στη σύγχρονη Φυσική αναζητείται το θεμελιακό τους περιεχόμενο. Η σταθερά της παγκόσμιας έλξης (G), για παράδειγμα, που συνδέεται με τη θεωρία βαρύτητας του Newton, όταν συνδυασθεί με τις σταθερές (h, c) της σύγχρονης Φυσικής, οδηγεί σε μια θεμελιακή κλίμακα αποστάσεων (μήκος Planck), η οποία οριοθετεί τη διαιρετότητα του χωρόχρονου και παραπέμπει στην προγεωμετρική εποχή της Μεγάλης Έκρηξης. Σύμφωνα με ορισμένες τάσεις της σύγχρονης επιστήμης, εξάλλου, ο κατάλογος των θεμελιακών σταθερών οφείλει να συμπληρωθεί με τη σταθερά εντροπίας του Boltzmann (k), η οποία ρυθμίζει ποσοτικά τη διάκριση ανάμεσα σε απλά και πολύπλοκα συστήματα, όπως η σταθερά δράσης του Planck ρυθμίζει ποσοτικά τη διάκριση ανάμεσα σε μικροσκοπικά και μακροσκοπικά συστήματα ύλης.

Με τις εισαγωγικές αυτές παρατηρήσεις αρχίζει να ιχνογραφείται το πορτραίτο της Φυσικής των πρώτων δεκαετιών του εικοστού αιώνα σε ένα νέο πλαίσιο γε-

νικών αρχών, οι οποίες τροποποιούν το καταστατικό πρόγραμμα της Κλασικής Φυσικής ως εξής:

(α) Η διάκριση της φυσικής πραγματικότητας σε συστήματα ύλης και ακτινοβολίας δεν είναι ουσιώδης. Τα σωματίδια ύλης ακολουθούν και αυτά όπως και η ακτινοβολία τους κυματικούς νόμους κίνησης (δυϊσμός σωματίδιο-κύμα), ενώ η διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εμφανίζεται ενίοτε με τα χαρακτηριστικά σωματιδιακής κίνησης (φωτόνια).

(β) Το πορτραίτο της κλασικής κίνησης σε καλά καθορισμένες τροχιές στο χώρο των φάσεων (θέση-ορμή) δεν είναι συμβατό με κινήσεις οι οποίες περιορίζονται σε μικρές περιοχές του χώρου αυτού, που έχουν εμβαδόν της τάξης μεγέθους της σταθεράς του Planck ($\delta q, \delta p, \approx h$) για κάθε βαθμό ελευθερίας θέσης-ορμής q, p , (αρχή της απροσδιοριστίας).

(γ) Στις διεργασίες κίνησης των συστημάτων ύλης ο χρόνος δεν αποτελεί ουδέτερη, αναλλοίωτη και καθολική παράμετρο, αλλά εμπλέκεται με τις συναλλοίωτες χωρικές μεταβλητές σε ένα τετραδιάστατο χωροχρονικό συνεχές. Η κίνηση συντελείται σε έναν απόλυτο, τετραδιάστατο, ψευδοευκλείδειο χωρόχρονο (χώρος Minkowski) με τη μεσολάβηση τοπικών αλληλεπιδράσεων. Η δράση από απόσταση δεν είναι συμβατή με τη δομή της νέας αυτής γεωμετρίας.

(δ) Οι θεμελιακές δυνάμεις στο Σύμπαν περιλαμβάνουν εκτός από τη βαρύτητα και τον ηλεκτρομαγνητισμό, που εκδηλώνονται στο μακρόκοσμο, και τις πυρηνικές δυνάμεις (ισχυρές και ασθενικές), οι οποίες εκδηλώνονται μόνο σε μικροσκοπικά συστήματα ύλης.

(ε) Η καθολικότητα των φυσικών νόμων, όπως τέθηκε στην Κλασική Φυσική, υπόκειται σε σοβαρούς περιορισμούς που ρυθμίζονται από τις δύο παγκόσμιες σταθερές h, c : (α) Οι νόμοι της Κλασικής Μηχανικής (Newton) δεν ισχύουν για συστήματα ύλης με δράση S της τάξης μεγέθους της σταθεράς του Planck ($S \approx h$) ή για συστήματα ύλης με χαρακτηριστικό μέτρο ταχύτητας U της τάξης μεγέθους της ταχύτητας του φωτός ($U \approx C$). Στην πρώτη περίπτωση η Κλασική Μηχανική δίδει τη θέση της στην Κβαντική Μηχανική, ενώ στη δεύτερη περίπτωση τίθεται σε ισχύ η ειδική θεωρία της Σχετικότητας.

(στ) Το πεδίο βαρύτητας, που οφείλεται στην παρουσία συστημάτων ύλης με καθορισμένη πυκνότητα ενέργειας-ορμής, εκδηλώνεται με την εμφάνιση καμπυλότητας στον τετραδιάστατο χωρόχρονο (χώρος Riemann) και ρυθμίζεται από τις εξισώσεις του Αϊνστάιν (γενική θεωρία της Σχετικότητας).

(ζ) Τα πολύπλοκα συστήματα ύλης συνεχίζουν να διέπονται και στη νέα Φυσική από το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, η προέλευση του οποίου παραμένει ανεξιχνίαστη. Η ενδεχομένη σχέση της σταθεράς του Boltzmann με τη σταθερά του Planck παραμένει ένα αναπάντητο, ενδιαφέρον ερώτημα της σύγχρονης Φυσικής.

Στο σύστημα αυτό των γενικών αρχών αναγνωρίζει κανείς εύκολα το θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε η νέα Φυσική το πρώτο ήμισυ του εικοστού αιώνα. Η εφαρμογή της Κβαντικής Μηχανικής έδωσε τη μεγάλη ώθηση για την κατανόηση της λειτουργίας του μικρόκοσμου και μελετήθηκε συστηματι-

κά η οργάνωση της ύλης σε κλίμακες που χαρακτηρίζουν την Ατομική και Μοριακή Φυσική, τη Φυσική της Συμπυκνωμένης Ύλης και την Πυρηνική Φυσική. Η ανάπτυξη της σύγχρονης ηλεκτρονικής τεχνολογίας, αλλά και οι εφιαλτικοί κίνδυνοι της πυρηνικής τεχνολογίας αποτελούν το πλέγμα των κοινωνικών επιπτώσεων της νέας Φυσικής, όπως ακριβώς οι διεργασίες της Βιομηχανικής Επανάστασης του δεκάτου ενάτου αιώνα αποτελούσαν το κοινωνικό αντίκρουσμα των κατακτήσεων της κλασικής επιστήμης. Τέλος, η Γενική Σχετικότητα χάραξε νέους ορίζοντες στην έρευνα των Αστροφυσικών φαινομένων, θεμελίωσε πρότυπα Κοσμολογίας για τη μελέτη του Σύμπαντος και αποτελεί σήμερα, στα τέλη του εικοστού αιώνα, την κινητήρια θεωρία σε κάθε προσπάθεια ερμηνείας της σχέσης ανάμεσα σε φαινόμενα μικροσκοπικής και κοσμικής κλίμακας.

Από το ηλεκτρόνιο στο quark και τη Μεγάλη Έκρηξη

Η ανακάλυψη της Κβαντικής Μηχανικής στις αρχές του αιώνα άνοιξε τα σύνορα ενός μικροσκοπικού Σύμπαντος, το οποίο εκτείνεται από την κλίμακα αποστάσεων που καθορίζει η κίνηση του ηλεκτρονίου στο άτομο του Υδρογόνου (ακτίνα Bohr), $R_B \approx 10^{-10} \text{m}$ μέχρι το μήκος Planck, $R_P \approx 10^{-35} \text{m}$ που αποτελεί το όριο διαιρετότητας του χωρόχρονου και δίδεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, από το συνδυασμό των παγκοσμίων σταθερών G , h , c : $R_P = (G/h^2 c^3)^{1/2}$. Η φυσική πραγματικότητα στο μικροσκοπικό αυτό Σύμπαν περιγράφεται από συνδυασμένους νόμους της Κβαντικής Μηχανικής και της Ειδικής Σχετικότητας: όταν όμως πλησιάζουμε το μήκος Planck απαιτείται ο συνδυασμός της Κβαντικής Μηχανικής με τη Γενική Σχετικότητα (Κβαντική Βαρύτητα). Το δεύτερο ήμισυ του εικοστού αιώνα χαρακτηρίζεται από τον προσανατολισμό της επιστήμης στην έρευνα αυτού του μικροσκοπικού Σύμπαντος σε όλο και περισσότερο βάθος. Η διαμόρφωση του νέου μεθοδολογικού πλαισίου για μια ενιαία Σχετικιστική Κβαντική Θεωρία, απαραίτητη για τη διεξόδηση σε κλίμακες οργάνωσης της ύλης πολύ μικρότερες από το μέγεθος απλών ατομικών πυρήνων (10^{-15}m), συναντά ακόμη πολλές τεχνικές και εννοιολογικές δυσκολίες. Εξάλλου, η διατύπωση μιας συνεπούς Κβαντικής Θεωρίας Βαρύτητας απαραίτητης για τη μελέτη των φαινομένων στην κλίμακα Planck (10^{-35}m) δεν έχει ακόμη επιτευχθεί.

Παρόλες τις δυσκολίες, οι έρευνες στην κατεύθυνση αυτή (Σωματιδιακή Φυσική) έχουν καθιερώσει τα τελευταία είκοσι χρόνια ένα αξιοπρόσεκτο θεωρητικό πρότυπο που περιγράφει με υψηλό βαθμό πειραματικής επιβεβαίωσης, την οργάνωση της ύλης σε κλίμακα της τάξης μεγέθους 10^{-18}m . Σε αυτόν το μικρόκοσμο τα βασικά συστατικά της ύλης είναι (α) τα σωματίδια που συμμετέχουν στις ισχυρές αλληλεπιδράσεις (quarks), και (β) τα σωματίδια, όπως το ηλεκτρόνιο και το νεutrino, που δεν συμμετέχουν σε αυτές (leptons). Υπάρχουν ακόμη τα σωματίδια που μεταφέρουν τις αλληλεπιδράσεις (ενδιάμεσα μποζόνια): στην κατηγορία αυτή ανήκει και το φωτόνιο ως φορέας της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης. Μια

σημαντική ιδιότητα της ύλης στο μικροσκοπικό αυτό επίπεδο είναι ότι ο ηλεκτρομαγνητισμός και η ασθενική πυρηνική δύναμη εμφανίζονται ενοποιημένες σε μια ενιαία αλληλεπίδραση (ηλεκτρασθενική). Ως συνέπεια, το φωτόνιο αποκτά και άλλους εταίρους, σχετιζόμενους με την ασθενική δύναμη, τα ενδιάμεσα μποζόνια (W^\pm, Z_0), τα οποία όμως ξεχωρίζουν από αυτό γιατί έχουν πολύ μεγάλη μάζα ($mc^2 = 100\text{GeV}$) και ορισμένα από αυτά έχουν και ηλεκτρικό φορτίο (W^\pm). Στο θεωρητικό αυτό σχήμα η απομένουσα ισχυρή «πυρηνική» δύναμη εκδηλώνεται απότομη με την ανταλλαγή μεταξύ των quarks ενός χαρακτηριστικού ενδιάμεσου μποζονίου (gluon), και περιγράφεται από μια θεωρία πεδίου (Κβαντική Χρωμοδυναμική) που έχει πολλές ομοιότητες αλλά και σημαντικές διαφορές όταν συγκρίνεται με τη θεωρία του Maxwell.

Μια πολύ ενδιαφέρουσα εικασία, που πηγάζει από το καθιερωμένο αυτό πρότυπο, είναι ότι σε πολύ μικρότερες κλίμακες (10^{-31}m) αναμένεται ότι στο σχήμα ενοποίησης θα προσχωρήσει και η ισχυρή «πυρηνική» δύναμη, ενώ στο έσχατο όριο του μήκους Planck (10^{-35}m) η ενοποίηση όλων των δυνάμεων της Φύσης αναμένεται να ολοκληρωθεί με τη συμμετοχή και της βαρυτικής αλληλεπίδρασης. Η υπόθεση της ενοποίησης όλων των δυνάμεων δεν υποστηρίζεται ακόμη από μία συνεπή θεωρία, αποτελεί όμως σημαντικό κίνητρο θεωρητικής έρευνας με πολύ ενδιαφέροντες κοσμολογικές προεκτάσεις.

Παράλληλα με τη θεωρητική έρευνα, η εγκατάσταση μεγάλων επιταχυντικών διατάξεων επιτρέπει τη μελέτη συγκρούσεων σωματιδίων σε πολύ υψηλές ενέργειες, ανοίγοντας το δρόμο για τη διεύθυνση της επιστημονικής γνώσης σε εξαιρετικά μικροσκοπικές περιοχές. Η ανακάλυψη των σωματιδίων (W^\pm, Z_0) στο εργαστήριο CERN τη δεκαετία του 1980 και η μελέτη των ιδιοτήτων τους στον επιταχυντή LEP-CERN που βρίσκεται σε εξέλιξη, αποτελούν εξαιρετικής σημασίας επιβεβαίωση της θεωρίας ενοποίησης του ηλεκτρομαγνητισμού με την ασθενική «πυρηνική» δύναμη. Ένα εκτεταμένο παρατηρησιακό πρόγραμμα, εξάλλου, για την ερχόμενη δεκαετία θα έχει ως αποκορύφωμα τα πειράματα στο νέο ευρωπαϊκό επιταχυντή LHC-CERN στις αρχές της νέας χιλιετίας. Με το πρόγραμμα αυτό το οδοιπορικό στο μικροσκοπικό Σύμπαν θα φθάσει σε κλίμακες οργάνωσης της ύλης της τάξης μεγέθους 10^{-20}m , αφήνοντας ανεξιχνίαστη μια εξαιρετικά εκτεταμένη περιοχή (μετρούμενη σε τάξεις μεγέθους) μέχρι την οριακή κλίμακα Planck 10^{-35}m . Επειδή θεωρείται απίθανο να συνεχισθεί τον επόμενο αιώνα το πρόγραμμα εγκατάστασης νέων, μεγαλύτερων επιταχυντών, τόσο για λόγους επιστημονικούς όσο και οικονομικούς, μπορούμε να ισχυρισθούμε ότι ο επιταχυντής LHC-CERN θα είναι το τελευταίο «κεκλιμένο επίπεδο» στην ιστορική διαδρομή μιας συνεχιζόμενης επιστημονικής επανάστασης, που άρχισε με τα πρώτα πειράματα του Γαλιλαίου.

Επειδή όμως δεν υπάρχει τέλος της επιστήμης, γίνεται φανερό ότι η Φυσική στα τέλη του εικοστού αιώνα ετοιμάζει το νέο της πορτραίτο. Παρά τις ατέλειες και τα αναπάντητα ερωτήματα που συνεχίζουν να υπάρχουν, το νέο παραδειγματικό πρότυπο που αναδύεται, στηρίζεται σε μια ισχυρή σύνδεση της Σωματιδιακής Φυσικής με την Κοσμολογία. Η υπόθεση της Μεγάλης Έκρηξης για την γένεση και εξέλιξη

του Σύμπαντος αφ' ενός, και το καθιερωμένο πρότυπο της πρωτογενούς ύλης (quarks, leptons) αφ' ετέρου, παρέχουν συστατικά της φυσικής πραγματικότητας που όταν συντεθούν μπορεί να οδηγήσουν σε μια ολιστική θεώρηση της νομοτέλει-ας στο Σύμπαν, τουλάχιστον στα πρώτα στάδια της εξέλιξής του.

Το νέο αυτό θεωρητικό πλαίσιο που καθιερώνεται σταδιακά τα τελευταία χρό-νια στη Σωματιδιακή Φυσική έχει ορισμένα μη συμβατικά στοιχεία, τα οποία υπερ-βαίνουν τις καθιερωμένες αντιλήψεις των πρώτων δεκαετιών του αιώνα μας:

(α) Οι νόμοι της Φύσης που ισχύουν σε μικροσκοπικές κλίμακες (Κβαντική Φυ-σική) συναντώνται με τους νόμους της Φύσης σε κοσμική κλίμακα (Αστροφυσική, Κοσμολογία).

(β) Οι θεμελιακοί νόμοι της Φύσης δεν είναι προαιώνιες, αναλλοίωτες και από-λυτες προτάσεις, αλλά διέπονται από την ιστορικότητα της εξέλιξης του Σύμπαντος και ακολουθούν τις αλλαγές που συντελέσθηκαν στα πρώτα στάδια της κοσμικής ηλικίας.

(γ) Η αναγωγή της ύλης σε απλά, μικροσκοπικά συστατικά (στοιχειώδη σωματί-δια) δεν επαρκεί για την πλήρη κατανόηση της σύνθεσης της Φυσικής πραγματικό-τητας, γιατί πρωτεύοντα ρόλο στη συνθετική διαδικασία παίζει η κατάσταση του Κενού, όχι ως απλής αναπαράστασης του «μη όντος», αλλά ως μιας θεμελιώδους δομής ενός πολύπλοκου, μακροσκοπικού και μη αναγώγιμου φυσικού συστήματος που συμμετέχει ενεργά στο κοσμικό γίγνεσθαι.

Έχοντας ως οδηγό το πλαίσιο αυτό της φυσικής θεωρίας, τα σύγχρονα πειρά-ματα της Σωματιδιακής Φυσικής προσανατολίζονται σταδιακά σε μια νέα, συναρ-παστική μεθοδολογία, που δεν αποσκοπεί απλώς στη μίμηση της επί μέρους φυσι-κής πραγματικότητας στο εργαστήριο, αλλά επιδιώκει την αναπαράσταση των πρώτων μεταβολών του Σύμπαντος μετά τη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang).

Διαμορφώνεται, έτσι, μία νέα Σχολή Έρευνας των θεμελιωδών διαδικασιών της Φύσης, με οδηγό την εικασία ότι στην παρούσα ενήλικη κατάσταση του Σύμπα-ντος οι βασικοί νόμοι της Φύσης δεν είναι πρωτογενείς· έχουν αλλοιωθεί από τους μηχανισμούς εξέλιξης του Σύμπαντος, και επομένως, η αναζήτηση των πρώτων αρ-χών της φυσικής θεωρίας ανάγεται στην αναζήτηση των πρώτων στιγμών του κο-σμικού συστήματος. Ειδικότερα, η διάκριση που ισχύει σήμερα ανάμεσα στα τέσ-σερα είδη των βασικών αλληλεπιδράσεων (δυνάμεων), τα οποία καθορίζουν τη φυσική πραγματικότητα, αναιρείται όταν ανατρέξουμε στα αρχικά στάδια της θε-ωρίας του Σύμπαντος. Η διάκριση αυτή οφείλεται σε μια σειρά ραγδαίων φυσικών διαδικασιών (μετασχηματισμών του Κενού) που συντελέσθηκαν στη νηπιακή κα-τάσταση του Σύμπαντος, με αποτέλεσμα να διαταραχθεί η βασική αρχή της ενοποι-ημένης λειτουργίας των δυνάμεων αυτών. Έτσι, σε αντίθεση με τη σημερινή φυσι-κή πραγματικότητα, στα πρώτα στάδια της οργάνωσης του Σύμπαντος, η βαρύτητα, ο ηλεκτρομαγνητισμός και οι «πυρηνικές» δυνάμεις (ισχυρές και ασθενικές) εκδη-λώνονται ως μια ενιαία φυσική διαδικασία σε σύζευξη με ένα απλό και εξαιρετικά συμμετρικό σύστημα ύλης. Για την περίοδο αυτή η επιστημονική γνώση είναι πολύ ατελής ακόμη, όχι μόνο για τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης των στοιχειωδών

σωματιδίων, αλλά και για την ίδια τη γεωμετρία του χωροχρόνου.

Μια άλλη όψη της φυσικής πραγματικότητας, που φέρει τα ίχνη της ιστορικότητας των φυσικών νόμων, σχετίζεται με τη σύσταση της πρωτογενούς ύλης στο απώτερο παρελθόν. Τα νουκλεόνια (πρωτόνια - νετρόνια), που αποτελούν σήμερα τα ακρογωνιαία συστατικά της ύλης και εξασφαλίζουν τη σταθερότητα των φυσικών συστημάτων στην παρούσα περίοδο εξέλιξης του Κόσμου, εμφανίσθηκαν στο Σύμπαν σε χρόνο 10^5 sec περίπου μετά τη Μεγάλη Έκρηξη. Παρόλο που η κλίμακα αυτή είναι εξαιρετικά μικρή ως συμβατικός χρόνος, η αρχική αυτή περίοδος είναι πολύ σημαντική ως Κοσμικός Χρόνος, γιατί στη διάρκειά της συντελέστηκαν ορισμένες ανεπανάληπτες φυσικές μεταβολές στο Σύμπαν, που καθόρισαν τη δομή και την εξέλιξη της Φύσης έως σήμερα. Την περίοδο αυτή τα βασικά συστατικά της ύλης δεν είναι τα νουκλεόνια, αλλά μια κατηγορία απλούστερων σωματιδίων (quarks) με διαφορετικές ιδιότητες. Τα σωματίδια αυτά δεν υπάρχουν σήμερα ελεύθερα στο Σύμπαν, αλλά είναι παγιδευμένα στην πυρηνική ύλη διαμέσου ενός πολύπλοκου και ανεξερεύνητου ακόμη μηχανισμού (confinement). Μαζί με τα λεπτόνια (leptons) τα quarks αποτελούν την πρωτογενή ύλη και, επομένως, την πρώτη ύλη συγκρότησης του Αρχέγονου Σύμπαντος.

Σε αυτό το νέο σχήμα, σύζευξης της Σωματιδιακής Φυσικής με την Κοσμολογία, πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η συμβατική διεύθυνση της Κβαντικής Φυσικής σε μικροσκοπικές κλίμακες οργάνωσης της ύλης μέχρι το μήκος Planck, 10^{-35} m, έχει αντικατασταθεί από τη διεύθυνση της Μικροκοσμολογίας στο απώτερο παρελθόν του Σύμπαντος μέχρι τον αντίστοιχο χρόνο Planck 10^{-43} sec. Η σύγχρονη θεωρία της ύλης αναδεικνύεται, έτσι, ως ένα απλό σχήμα στοιχειωδών σωματιδίων (quarks, leptons), το οποίο όμως δεν είναι συμβατό με τη σημερινή κατάσταση του Σύμπαντος, αλλά αναφέρεται στο εξαιρετικά θερμό περιβάλλον του Αρχέγονου Σύμπαντος. Ο περιορισμός αυτός απαιτεί τη διατύπωση μιας κατάλληλης θερμοκίνησης πεδίου για τη μελέτη της πρωτογενούς ύλης στο αρχικό της περιβάλλον, και ιδιαίτερα για τη διερεύνηση των μετασχηματισμών του Κενού (αλλαγών φάσης), που συντελέστηκαν όταν το Σύμπαν πέρασε από κρίσιμες τιμές της θερμοκρασίας στη διάρκεια της θερμοκίνησης του ιστορίας. Είναι αξιοπρόσεκτο ότι το μέγεθος της θερμοκρασίας, που αποτελεί για τη σημερινή κατάσταση του Σύμπαντος μια δευτερογενή παράμετρο, αποκτά θεμελιακό χαρακτήρα στη φυσική της πρωτογενούς ύλης, ενισχύοντας έτσι, την εικασία ότι η σταθερά του Boltzmann ανήκει στις θεμελιώδεις παγκόσμιες σταθερές. Έχει μάλιστα υποστηριχθεί ότι ως αρχέγονος και γενεσιουργός νόμος της Φύσης πρέπει να θεωρηθεί ο δεύτερος νόμος της Θερμοδυναμικής (Prigogine). Η αρχική δημιουργία ύλης και ακτινοβολίας στο Σύμπαν αντανάκλα την αρχική παραγωγή εντροπίας από την αστάθεια του Κενού. Η συσσώρευση εντροπίας, ειδικότερα, ακολούθησε το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, ο οποίος σε υπολογιζόμενο χρόνο 10^{-37} sec οδήγησε το Σύμπαν από την κατάσταση μηδενικής εντροπίας (κενός γεωμετρικός χώρος) σε κατάσταση μεγίστης εντροπίας (10^9 φωτόνια για κάθε πρωτόνιο στο Σύμπαν) διαμέσου μιας ραγδαίας μη αντιστρεπτής μεταβολής. Έκτοτε το Σύμπαν διατήρησε σταθερή την εντροπία του,

ως ένα θεμελιακό μέγεθος που παραπέμπει στη δημιουργία του, ακολουθώντας μέχρι σήμερα μια γεωμετρική, αδιεξέλεγκτη και επομένως αντιστρεπτή μεταβολή (διαστολή του Σύμπαντος). Η άποψη αυτή είναι ενδιαφέρουσα όχι μόνο γιατί αναδεικνύει το θεμελιακό χαρακτήρα του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, αλλά και διότι αντικαθιστά την αρχική ανωμαλία της Μεγάλης Έκρηξης από μια αρχική, κοσμική αστάθεια του Κενού απαλλαγμένη από επιστημονικές και φιλοσοφικές αντιφάσεις.

Καταλήγοντας, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι στα τέλη του εικοστού αιώνα η θεωρία της ύλης επιχειρεί τη μεγάλη σύνθεση της φυσικής πραγματικότητας κάτω από το ενοποιητικό βλέμμα της Κοσμολογίας, η οποία ως περιβάλλουσα επιστήμη υπαγορεύει νέους, ολιστικούς κανόνες για την κατανόηση της οργάνωσης της ύλης σε όλες τις κλίμακες. Τα υπάρχοντα ανοικτά ερωτήματα ιχνογραφούν το πορτραίτο της φυσικής επιστήμης εκατό χρόνια μετά την ανακάλυψη της Κβαντικής και Σχετικιστικής Μηχανικής. Τα πιο σημαντικά από αυτά συνοψίζονται ως εξής:

(α) Η προέλευση της μάζας των σωματιδίων της πρωτογενούς ύλης.

(β) Η διατύπωση μιας πλήρους θεωρίας ενοποίησης των αλληλεπιδράσεων στο θερμό Σύμπαν.

(γ) Η διατύπωση μιας συνεπούς Κβαντικής Θεωρίας Βαρύτητας.

(δ) Η εξιχνίαση του μηχανισμού αλλαγής φάσης από την ύλη quark στη συμβατική ύλη.

(ε) Η ερμηνεία επικράτησης της ύλης έναντι της αντιύλης στο διαστελλόμενο Σύμπαν.

(στ) Η ύπαρξη και προέλευση της σκοτεινής ύλης (dark matter) στο Σύμπαν.

(ζ) Οι εναρκτήριες διακυμάνσεις πυκνότητας ύλης στο Σύμπαν και ο μηχανισμός γένεσης των γαλαξιών.

(η) Η προέλευση, ρύθμιση και αλληλεξάρτηση των παγκοσμίων σταθερών.

(θ) Η ερμηνεία του δεύτερου νόμου της Θερμοδυναμικής και η εναρμόνισή του με τις πρώτες αρχές της Φυσικής.

(ι) Η επίλυση των προβλημάτων που σχετίζονται με την ανωμαλία της Μεγάλης Έκρηξης και την κβαντική εξομάλυνσή της.

Ορισμένα από τα ερωτήματα αυτά αναμένουν την λύση τους στα πλαίσια εντατικών ερευνητικών προγραμμάτων της τρέχουσας δεκαετίας· τα περισσότερα όμως διαμορφώνουν τον ορίζοντα της Φυσικής Επιστήμης του επομένου αιώνα.

Αναλογιζόμενοι σήμερα την πυκνότητα των επιστημονικών εξελίξεων της χιλιετίας που απέρχεται, διακρίνουμε ως μεγαλειώδη στιγμή στην ιστορία της επιστήμης τη μετάβαση από τη Φυσική του Αριστοτέλη στη Φυσική του Γαλιλαίου. Έκτοτε η θεωρία της ύλης υφάινεται με τα νήματα αυτής της μεγάλης επιστημονικής επανάστασης. Είναι αξιοπρόσεκτο ότι η θεμελιώδης και ανατρεπτική αρχή της αδράνειας της ύλης, η οποία τέθηκε στη Μηχανική του Γαλιλαίου και μελετήθηκε στο αρχέγονο εργαστήριο του «κεκλιμένου επιπέδου», ανέτρεψε τη Φυσική του Αριστοτέλη, αλλά παραμένει ακόμη ανολοκλήρωτη επιστημονική αξία μέχρις ότου κατανοήσουμε την προέλευση της μάζας των σωματιδίων (μηχανισμός Higgs) στα σύγ-

χρονα εργαστήρια των μεγάλων επιταχυντών.

Το πορτραίτο της Φυσικής στα τέλη του εικοστού αιώνα που προσπαθήσαμε να παρουσιάσουμε, παρόλη την ωριμότητα των ιδεών και την αξιοθαύμαστη τεχνολογία του παρατηρησιακού προγράμματος, συνεχίζει να ανήκει στην τεχνοτροπία της γαλιλαιϊκής επιστήμης. Οι απαντήσεις στα ανοικτά ερωτήματα που παραθέσαμε μπορεί να οδηγήσουν στην ολοκλήρωση της επιστήμης του Γαλιλαίου και να αποτελέσουν αφετηρία για τη νέα, μεγάλη εκκίνηση.

Βιβλιογραφία

1. V. Weisskopf, *La révolution des quanta*, Paris, Hachette, 1989.
2. G. Cohen - Tannoudji, *Les constantes universelles*, Paris, Hachette 1991.
3. C. Rubbia, «The High-Energy Frontier», *CERN-PPE / 92-71*, 1992.
4. M. Jacob, «La physique des particules», *Les Cahiers du MURS*, Paris 1989.
5. I. Prigogine and I. Stengers, *Order out of chaos*, Bantam Books 1984.
6. I. Prigogine and I. Stengers, *Entre le Temps et l' Eternité*, Fayard 1988.
7. Συλλογικό, *Κοσμολογία, Υποθέσεις και Θεωρίες*, Αθήνα, εκδόσεις Τροχαλία 1994 (Αφιέρωμα στον καθηγητή Αχιλλέα Παπαπέτρου).