

Μεγάλες ιδέες

Όπως στη Γη, έτσι και στον ουρανό

Πριν από τον Νεύτωνα υπήρχε αστρονομία, αλλά δεν υπήρχε αστροφυσική. Αν πιστέψουμε στον θρύλο, η αστροφυσική γεννήθηκε όταν ο Νεύτωνα είδε ένα μήλο να πέφτει στον κήπο του στο Γούλθορπ, και αντιλήφθηκε με ενορατικό ενθουσιασμό ότι η Σελήνη πέφτει ακριβώς όπως έπεσε εκείνο το μήλο. Δηλαδή, ένα ουράνιο σώμα όπως η Σελήνη δεν γλιστράει πάνω σε μια θειικά προδιαγεγραμμένη διαδρομή στον ουρανό όπως υπέθεταν οι προγενέστεροι του Νεύτωνα, αλλά υπόκειται στους ίδιους φυσικούς νόμους με το ταπεινό μήλο, που αύριο θα είναι ένα μισοφαγωμένο υπόλειμμα που δεν θα αξίζει τον κόπο να το σηκώσει κανείς από το χώμα.

Η ισχύς αυτής της ενορατικής σύλληψης έγκειται στο ότι μας επιτρέπει να εφαρμόζουμε τους φυσικούς νόμους που προσδιορίζονται στα εργαστήριά μας για να κατανοήσουμε αντικείμενα που βρίσκονται στην άλλη άκρη του σύμπαντος. Έτσι, η σύλληψη του Νεύτωνα μας δίνει τη δυνατότητα να διασχίσουμε νοερά τις αδιανόητα αχανείς αποστάσεις του σύμπαντος για να διακρίνουμε μια θηριώδη μαύρη τρύπα στο κέντρο ενός μακρινού γαλαξία από τον οποίο τα γήινα ραδιοτηλεσκόπια έχουν λάβει κάποια αμυδρά σήματα.

Ο Νεύτωνα έθεσε τα θεμέλια της αστροφυσικής και υπό μια άλλη βασική έννοια: έδειξε ότι είναι δυνατόν να αποκομίσουμε ακριβείς ποσοτικές προβλέψεις από κατάλληλα ορισμένους φυσικούς νόμους. Δηλαδή, όχι μόνο έδωσε μια συνεκτική φυσική εξήγηση για παρατηρήσεις που είχαν ήδη γίνει, αλλά *προέβλεψε* και τα αποτελέσματα παρατηρήσεων που μπορούσαν να γίνουν στο μέλλον. Για να το πετύχει αυτό χρειάστηκε να επινοήσει νέες μαθηματικές με-

θόδους –τον απειροστικό λογισμό– και να περιβάλλει τους φυσικούς νόμους με αυτή την καινούργια μαθηματική γλώσσα. Από την εποχή του Νεύτωνα και μετά, οι περισσότεροι φυσικοί νόμοι έχουν πάρει τη μορφή διαφορικών εξισώσεων. Μια διαφορική εξίσωση καθορίζει μια συνάρτηση εκφράζοντας τον ρυθμό με τον οποίο αυτή μεταβάλλεται. Η διαφορική συνάρτηση αντιπροσωπεύει τα στοιχεία μιας δεδομένης φυσικής κατάστασης τα οποία έχουν καθολικό χαρακτήρα, ενώ οι αρχικές συνθήκες που απαιτούνται για να προσδιοριστεί η συνάρτηση αντιπροσωπεύουν τα στοιχεία που αφορούν ειδικά κάποιο συγκεκριμένο συμβάν. Για παράδειγμα, η τροχιά μιας οβίδας που βάλλεται από ένα πυροβόλο είναι η λύση της εξίσωσης του Νεύτωνα $m \, dv/dt = F$, η οποία συνήθως γράφεται στη συνοπτική μορφή $f = ma$ και συνδέει τον ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας (v) (δηλαδή την επιτάχυνση) με την ασκούμενη δύναμη (F). Η εξίσωση του Νεύτωνα ισχύει για όλες τις οβίδες και για όλα τα μήλα που πέφτουν, όπως και για τη Σελήνη. Είναι παγκόσμια. Οι τροχιές της Σελήνης, της οβίδας και του μήλου διαφέρουν εξαιτίας των αρχικών συνθηκών τους: η Σελήνη ξεκινάει σε μεγάλη απόσταση από το κέντρο της Γης και κινείται με εξαιρετικά μεγάλη ταχύτητα· η οβίδα ξεκινάει από την επιφάνεια της Γης και κινείται με μικρότερη ταχύτητα· και το μήλο ξεκινάει επίσης από την επιφάνεια της Γης, αλλά είναι αρχικά ακίνητο. Όταν αυτές οι διαφορετικές αρχικές συνθήκες εφαρμοστούν στην ίδια παγκόσμια εξίσωση προκύπτουν τρεις εντελώς διαφορετικές τροχιές. Με αυτό τον τρόπο, τα μαθηματικά που επινόησε ο Νεύτωνας έγιναν το μέσο για να αναγνωρίσουμε τι κοινό έχουν διαφορετικά συμβάντα, και σε τι διαφέρουν.

Αναγκαία αλληλοϋποστήριξη

Ο James Clerk Maxwell, μοναχογιός ενός εύπορου δικηγόρου του Εδιμβούργου, έδειξε από μικρός μεγάλο ταλέντο στα μαθηματικά και τη φυσική, και έκανε σημαντικές ανακαλύψεις στη θεωρία των αερίων και τη θερμότητα, καθώς και στη δυναμική των δακτυλίων του Κρόνου. Το μεγαλύτερο όμως επίτευγμά του ήταν η επέκταση των νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού αποκλειστικά μέσω θεωρητικής

σκέψης. Φαντάστηκε μια συγκεκριμένη πειραματική διάταξη στην οποία ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει κάποιο κύκλωμα που περιλαμβάνει έναν πυκνωτή – μια συσκευή αποτελούμενη από δύο μεταλλικές πλάκες που χωρίζονται από ένα λεπτό στρώμα μονωτή, το οποίο θα μπορούσε θεωρητικά να είναι ένα «στρώμα κενού». Το ρεύμα ρέει εισερχόμενο στη μια πλάκα, την οποία φορτίζει θετικά, και εξερχόμενο από την άλλη, την οποία φορτίζει αρνητικά. Ο Maxwell εφάρμοσε σε αυτό το κύκλωμα τους κανόνες υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα κύκλωμα, τους οποίους είχε διατυπώσει ο André-Marie Ampere. Το 1865 έδειξε ότι οι κανόνες αυτοί δίνουν εντελώς διαφορετικές απαντήσεις ανάλογα με το πώς εφαρμόζονται, εκτός κι αν υπάρχει ένα ρεύμα που ρέει ανάμεσα στις πλάκες του πυκνωτή, δια μέσου του μονωτή. Με βάση το αποτέλεσμα αυτό, ο Maxwell υπέθεσε ότι ένα χρονομεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο παράγει ένα «ρεύμα μετατόπισης». Από μαθηματικής πλευράς, το υποθετικό ρεύμα μετατόπισης εκφραζόταν από έναν επιπλέον όρο στη διαφορική εξίσωση η οποία συνέδεε ένα συμβατικό ρεύμα με το μαγνητικό πεδίο που το ρεύμα αυτό προκαλούσε.

Η εκπληκτική συνέπεια του επιπλέον όρου της εξίσωσης ήταν ότι επέτρεπε στο ηλεκτρικό και στο μαγνητικό πεδίο να αλληλοσυντηρούνται χωρίς τη συμμετοχή φορτίων – μέχρι τότε ένα ηλεκτρικό πεδίο ήταν κάτι που περιέβαλλε ένα φορτισμένο σώμα και ένα μαγνητικό πεδίο ήταν κάτι που περιέβαλλε ένα ρευματοφόρο καλώδιο. Με τον επιπλέον όρο, όμως, ένα χρονομεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο παρήγε ένα χρονομεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, και ο Michael Faraday είχε ήδη αποδείξει ότι ένα τέτοιο μαγνητικό πεδίο παρήγε ένα χρονομεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Συνεπώς, το μαγνητικό πεδίο αναπαρήγε το αρχικό ηλεκτρικό πεδίο, χωρίς την παρουσία κανενός φορτίου! Θα μπορούσε άραγε αυτό το εκπληκτικό συμπέρασμα να είναι σωστό, ή ο επιπλέον όρος της εξίσωσης ήταν ένα ανόητο λάθος;

Ο Maxwell μπορούσε να υπολογίσει την ταχύτητα με την οποία θα διαδίδονταν στον κενό χώρο οι συζευγμένες ταλαντώσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, και η ταχύτητα αυτή συνέπιπτε μέσα στα όρια του πειραματικού σφάλματος με τη μετρημένη

ταχύτητα του φωτός. Ο Maxwell συμπέρανε ότι ο επιπλέον όρος του ήταν σωστός και ότι το φως ήταν επακριβώς αλληλοσυντηρούμενες ταλαντώσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Δεδομένου ότι ήταν γνωστό πως το μήκος κύματος του φωτός είναι εξαιρετικά μικρό (περίπου 0,0005 mm), η συχνότητα των ταλαντώσεων θα πρέπει να είναι εξαιρετικά υψηλή. Ταλαντώσεις με χαμηλότερες συχνότητες θα αντιστοιχούσαν σε κύματα με μεγαλύτερα μήκη κύματος. Το 1886 ο Heinrich Hertz παρήγαγε και ανίχνευσε τέτοια «ραδιοφωνικά» κύματα.

Έτσι, ο Maxwell επανεμίγησε ένα παλαιό φαινόμενο, το φως, και προέβλεψε την ύπαρξη ενός εντελώς νέου φαινομένου εφαρμόζοντας τους συμβατικούς νόμους της φυσικής σε ένα νοητικό πείραμα και δείχνοντας ότι οι νόμοι έπρεπε να τροποποιηθούν προκειμένου να εξασφαλίζεται η συνέπεια της θεωρίας. Το βήμα αυτό ήταν πραγματικά ριζοσπαστικό.

Για πάντα

Πιστεύουμε ότι οι νόμοι της φυσικής ίσχυαν πάντοτε: έχουμε ισχυρές ενδείξεις ότι ίσχυαν κάπου ένα λεπτό μετά την έναρξη του σύμπαντος, 13,8 Gyr (γιασέτη) πριν. Εξακολούθησαν να ισχύουν καθώς το σύμπαν εξελίχθηκε από μια εκρηγνύομενη πύρινη σφαίρα μέσα από μια ψυχρή, σκοτεινή περίοδο για να γεννήσει τα πρώτα άστρα και τους πρώτους γαλαξίες, που σήμερα μελετούνται με γιγαντιαία τηλεσκόπια. Και εξακολουθούν να ισχύουν μέχρι σήμερα.

Παρότι οι νόμοι της φυσικής έχουν παραμείνει σταθεροί τα τελευταία 13,8 Gyr, το σύμπαν έχει αλλάξει τόσο που είναι αγνώριστο. Στο ζήτημα αυτό αναδεικνύεται και πάλι η νευτώνεια διάκριση ανάμεσα στους νόμους της φυσικής, όπως ενσαρκώνονται με τη μορφή διαφορικών εξισώσεων, οι οποίοι ισχύουν πάντα και παντού, και στα φαινόμενα που περιγράφουν, τα οποία μπορούν να μεταβάλλονται εντελώς διότι οι αρχικές συνθήκες για τις οποίες πρέπει να λυθούν οι εξισώσεις αλλάζουν ριζικά.

Αφού οι νόμοι της φυσικής ισχύουν σε κάθε σημείο του σύμπαντος, μπορούμε να ταξιδέψουμε νοερά σε μακρινούς γαλαξίες. Επειδή

οι νόμοι της φυσικής ισχύουν σε κάθε χρονική στιγμή, μπορούμε να ταξιδέψουμε νοερά πίσω στη στιγμή έναρξης των πάντων. Η παγκόσμια και αιώνια φύση των νόμων της φυσικής μας επιτρέπει να γίνουμε, στη φαντασία μας, ταξιδιώτες του χωροχρόνου.

Η αστροφυσική είναι η εφαρμογή των νόμων της φυσικής σε οτιδήποτε βρίσκεται έξω από τον πλανήτη μας. Ως εκ τούτου, είναι παιδί άλλων επιστημών, παρότι τις υπερβαίνει συντριπτικά ως προς τον ορίζοντα του γνωστικού της αντικειμένου.

Εν αρχή ην ο Λόγος

Το σύμπαν είναι παροδικό, ενώ οι νόμοι της φυσικής είναι αιώνιοι. Υπήρχαν πριν από την έναρξη του σύμπαντος, και συγκρότησαν το σύμπαν. Η εκτέλεση οποιουδήποτε συγκεκριμένου πειράματος μπορεί να μην είναι ίδια από τη μια μέρα στην άλλη, γιατί στον πραγματικό κόσμο τα πράγματα αλλάζουν. Σήμερα κάνει περισσότερο κρύο από χτες, και το γεγονός αυτό θα αλλάξει την πορεία του πειράματος σε κάποιο βαθμό. Το μαγνητικό πεδίο της Γης αλλάζει συνεχώς κατεύθυνση, και αυτό θα επηρεάσει το πείραμα σε κάποιο βαθμό. Η ηλικία του Ήλιου αυξάνεται, όπως και η λαμπρότητά του, η Σελήνη απομακρύνεται από τον πλανήτη Γη, και τα γεγονότα αυτά θα επηρεάσουν το πείραμα σε κάποιο βαθμό. Στον πραγματικό κόσμο τίποτα δεν μένει ίδιο, αλλά στον κόσμο του νου ενός φυσικού υπάρχουν νόμοι που ισχύουν αιώνια, που δεν αλλάζουν ποτέ. Αυτή η παγιότητα δεν είναι συμπτωματική, ούτε οφθαλμαπάτη: είναι ηθελημένη. Ένας φυσικός δεν αισθάνεται ότι κατανοεί σωστά ένα φαινόμενο παρά μόνο αν το αναγάγει σε έναν νόμο που να έχει αιώνια ισχύ.

Αν πακετάρουμε όλο μας τον εργαστηριακό εξοπλισμό και τον στείλουμε σε μια άλλη χώρα, σε άλλο γεωγραφικό πλάτος, το πείραμα θα εξελιχθεί διαφορετικά σε κάποιο βαθμό, διότι στη νέα τοποθεσία το μαγνητικό πεδίο της Γης θα είναι διαφορετικό, το βαρυτικό πεδίο της Γης θα είναι διαφορετικό, θα κάνει περισσότερη ζέστη ή περισσότερο κρύο, και η ροή των κοσμικών ακτίνων μέσα από το εργαστήριο θα είναι διαφορετική. Οι νόμοι της φυσικής, όμως, θα είναι ακριβώς οι ίδιοι. Και πάλι, το αναλλοίωτο των νόμων της φυ-

σικής εδώ, εκεί και παντού είναι ηθελημένο: δεν θα ησυχάσουμε αν δεν αναγάγουμε οποιαδήποτε διαφορά ανάμεσα στο πώς εξελίσσεται το πείραμα στη νέα και την παλιά τοποθεσία σε κάποια διαφορά στις συνθήκες η οποία μεταβάλλει τη λύση που απαιτούμε στους αμετάτρεπτους και παγκόσμιους νόμους της φυσικής.

Αυτή η εμμονή στο να εξηγούμε τα φαινόμενα βάσει νόμων οι οποίοι ισχύουν παντού και πάντα όχι μόνο μας επιτρέπει να ταξιδεύουμε χωρικά και χρονικά μέσα στο σύμπαν και μέχρι το απώτατο παρελθόν, αλλά μας εφοδιάζει επίσης με τρία ισχυρά όπλα που μας συντροφεύουν στα ταξίδια μας. Τα όπλα αυτά ονομάζονται ενέργεια, ορμή και στροφορμή.

Το 1915 η Emmy Noether απέδειξε ένα κρίσιμο αποτέλεσμα. Αν οι νόμοι που διέπουν τη δυναμική ενός συστήματος παραμένουν ίδιοι όταν το σύστημα μετακινηθεί ή περιστραφεί, τότε καθώς κινείται ή στριφογυρίζει υπάρχει μια ποσότητα που μπορεί να υπολογιστεί από την τωρινή του θέση και ταχύτητα η οποία θα παραμείνει σταθερή. Λέμε ότι το σύστημα έχει μια «διατηρούμενη ποσότητα». Η διατηρούμενη ποσότητα που προκύπτει επειδή οι νόμοι είναι οι ίδιοι παντού είναι η ορμή, και η διατηρούμενη ποσότητα που προκύπτει επειδή το σύστημα αδιαφορεί για το αν είναι προσανατολισμένο κατά την κατεύθυνση ανατολής-δύσης, βορρά-νότου ή οποιαδήποτε άλλη είναι η στροφορμή. Μια επέκταση του θεωρήματος της Noether είναι ότι αν η δυναμική είναι ίδια σε κάθε χρονική στιγμή, τότε υπάρχει άλλη μία διατηρούμενη ποσότητα, η ενέργεια. Έτσι, από την παγκόσμια και αιώνια φύση των νόμων της φυσικής προκύπτουν τρεις σημαντικές διατηρούμενες ποσότητες, η ορμή, η στροφορμή και η ενέργεια. Η σταθερότητα των ποσοτήτων αυτών αποτελεί σημαντική βοήθεια στην προσπάθειά μας να κατανοήσουμε ένα σύστημα που μπορεί να βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση ή στο απώτερο παρελθόν.

Το 1930 ο Wolfgang Pauli προέβλεψε την ύπαρξη κάποιων σωματιδίων, των *νετρίνων* όπως τα ονόμασε, τα οποία απάγουν ορμή και ενέργεια σε πυρηνικές αντιδράσεις. Η εικασία αυτή ήταν η αντίδραση του Pauli σε πειραματικά δεδομένα τα οποία έδειχναν καθαρά μη διατήρηση της ενέργειας και της ορμής. Ο Pauli υπέθεσε την ύπαρξη μη παρατηρημένων μέχρι τότε σωματιδίων τα οποία δια-

σφαλίζουν ότι η ενέργεια και η ορμή *πράγματι* διατηρούνται. Για μια γενιά τα νετρίνα παρέμειναν μια καθαρή εικασία, αλλά το 1956 εντέλει ανιχνεύτηκαν. Είναι δύσκολο να ανιχνευτούν γιατί έχουν εξαιρετικά μικρή ενεργό διατομή $\sim 10^{-46} \text{ m}^2$ (τετραγωνικά μέτρα) όσον αφορά την αλληλεπίδρασή τους με οτιδήποτε. Στη γλώσσα της κλασικής φυσικής, αυτό σημαίνει ότι ένα νεutrίνο θα συγκρουστεί με ένα άλλο σωματίδιο μόνο αν περάσει σε απόσταση $\sim \sqrt{10^{-46}} \text{ m} = 10^{-23} \text{ m}$ από το κέντρο του άλλου σωματιδίου, απόσταση η οποία είναι 100 εκατομμύρια φορές μικρότερη από το μέγεθος του πρωτονίου. Στην πραγματικότητα, στο πλαίσιο της κβαντομηχανικής ένας τόσο επακριβής εντοπισμός σωματιδίου δεν έχει νόημα, και επομένως η πραγματική συνέπεια της πολύ μικρής ενεργού διατομής των νετρίνων είναι ότι υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα να αλληλεπιδράσουν καν. Εντούτοις, τα νετρίνα παίζουν σημαντικό ρόλο στη διάρθρωση του σύμπαντος.

Στον ουρανό συμβαίνουν πιο πολλά απ' ό,τι στη Γη

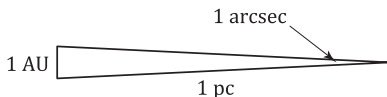
Η ιστορία μας ξεκίνησε με τον Νεύτωνα να φέρνει τη Σελήνη κάτω στη Γη, διαπιστώνοντας ότι υπόκειται στους συνήθεις νόμους της δυναμικής. Στη δεκαετία του 1930, ο εκκεντρικός Ελβετός αστρονόμος Fritz Zwicky αποκατέστησε σε κάποιο βαθμό το πρωτείο του ουρανού, υποστηρίζοντας ότι «αν μπορεί να συμβεί θα συμβεί». Δηλαδή, οτιδήποτε επιτρέπεται από τους νόμους της φυσικής θα συμβεί κάπου στο σύμπαν, και με τα σωστά όργανα και λίγη τύχη μπορούμε να το δούμε να συμβαίνει. Η «αρχή του Zwicky» υποδεικνύει ότι είναι επωφελές να σκεφτούμε εξαντλητικά τι είδους αλλόκοτα αντικείμενα και εξωτικά συμβάντα είναι θεωρητικά εφικτά. Αν γνωρίζουμε καλά φυσική, θα μπορούμε να υπολογίσουμε ποιες θα ήταν οι παρατηρήσιμες εκδηλώσεις τέτοιων αντικειμένων ή συμβάντων, ίσως μάλιστα και να εκτιμήσουμε τη συχνότητα εμφάνισής τους. Κατόπιν μπορούμε να παροτρύνουμε παρατηρητές να αναζητήσουν τέτοια συμβάντα.

Κλασικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής είναι ο εντοπισμός λευκών νάνων αστέρων. Το 1930 ο Subrahmanyan Chandrasekhar,

στη διάρκεια του ταξιδιού του από τη Βομβάη προς το Σάουθαμπτον προκειμένου να εργαστεί στο Πανεπιστήμιο Κάιμπριτζ, αναρωτήθηκε τι είδους συνέπειες θα μπορούσε να έχει η τότε πρόσφατη και αμφιλεγόμενη κβαντομηχανική για τα άστρα. Έδειξε ότι όταν ένα άστρο όπως ο Ήλιος εξαντλήσει τα καύσιμά του, θα ψυχθεί και θα συρρικνωθεί σε έναν πολύ μικρό όγκο –όταν έρθει αυτή η ώρα ο Ήλιος θα συρρικνωθεί στο μέγεθος της Γης– και ότι η πίεση που συγκρατεί αυτό το απίστευτα πυκνό αντικείμενο ώστε να μην καταρρεύσει κάτω από τη σφοδρή δύναμη της βαρύτητας είναι μια καθαρή εκδήλωση της κβαντομηχανικής: παρόλο που το άστρο είναι ψυχρό, τα ηλεκτρόνια του θα τρέχουν με ταχύτητα κοντά σε εκείνη του φωτός, διότι αν δεν κινούνταν τόσο γρήγορα τα βραδύτερα από αυτά θα παραβίαζαν την αρχή αβεβαιότητας του Heisenberg, σύμφωνα με την οποία ένα ηλεκτρόνιο που η θέση του είναι γνωστή με αρκετή βεβαιότητα θα πρέπει να έχει μεγάλη αβεβαιότητα ορμής. Επιπλέον, η απαγορευτική αρχή του Pauli απαγορεύει να καταλαμβάνουν την ίδια κβαντική κατάσταση δύο ηλεκτρόνια, και επομένως τα περισσότερα ηλεκτρόνια είναι υποχρεωμένα να καταλαμβάνουν καταστάσεις υψηλής ενέργειας διότι όλες οι καταστάσεις που δεν αντιβαίνουν προς την αρχή του Heisenberg είναι κατειλημμένες.

Προς μεγάλη απογοήτευση του Chandrasekhar, η υπέροχη αυτή θεωρία του που τον είχε ενθουσιάσει τόσο πολύ απορρίφθηκε ως ανοησία από την ηγετική μορφή της Βρετανικής αστροφυσικής, τον Sir Arthur Eddington. Ο Eddington δεν αποδεχόταν την αρχή του Zwicky, και δεν πίστευε ότι η κβαντομηχανική, μια εμφανώς εκκεντρική θεωρία που είχε αναπτυχθεί για να εξηγήσει (κατά κάποιον τρόπο) τη συμπεριφορά των ατόμων, ίσχυε και για ολόκληρα άστρα. Ωστόσο, ο Chandrasekhar είχε δίκιο, και αρκετά κοντά στον Ήλιο υπάρχουν πολυάριθμα τέτοια ψυχρά, υπέρπυκνα άστρα, τα οποία στηρίζονται μέσω ενός καθαρά κβαντομηχανικού φαινομένου.

Στα Κεφάλαια 3 και 8 θα δούμε και άλλα παραδείγματα επιτυχημένων προβλέψεων εκπληκτικών φαινομένων που έγιναν με τη δημιουργική εφαρμογή της φυσικής. Η αρχή του Zwicky λειτουργεί επειδή το σύμπαν είναι τόσο τεράστιο και πολυπόικιλο που η φύση έχει πραγματοποιήσει μέσα σε αυτό ένα ασύλληπτο πλήθος πειρα-



1. Ένα parsec είναι η απόσταση από την οποία η απόσταση Γης-Ήλιου (1 AU) φαίνεται υπό γωνία 1 arcsec (δηλ. ενός δευτέρου λεπτού της μοίρας, $1/3600^\circ$).

μάτων. Ο πλανήτης μας είναι ένα πολύ ενδιαφέρον μέρος, αλλά ο ορίζοντάς του είναι περιορισμένος, και αν θέλουμε να κατανοήσουμε τον υλικό κόσμο θα πρέπει μερικές φορές να κοιτάζουμε πάνω και πέρα από αυτόν.

Σημείωση περί μονάδων

Οι συνήθεις επιστημονικές μονάδες, το χιλιόγραμμο, το μέτρο, το δευτερόλεπτο κ.λπ. ταιριάζουν με την καθημερινή ανθρώπινη εμπειρία, αλλά για να εκφραστούν με αυτές τις μονάδες τα μεγέθη της αστροφυσικής απαιτούνται πολύ μεγάλοι αριθμοί. Μια πιο βολική μονάδα μάζας για εμάς είναι η μάζα του Ήλιου, $M_\odot = 2,00 \times 10^{30}$ kg, όπου 10^{30} είναι η συντομογραφική μορφή ενός αριθμού που αποτελείται από ένα 1 ακολουθούμενο από τριάντα μηδενικά.

Όταν μελετάει κανείς πλανητικά συστήματα, μια βολική μονάδα μήκους είναι η *αστρονομική μονάδα* (astronomical unit, AU), η μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο: $1 \text{ AU} = 1,50 \times 10^{11}$ m ή, με άλλα λόγια, 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα. Στη γαλαξιακή ή την κοσμολογική κλίμακα ακόμη και η AU είναι μικροσκοπική και άβολη· μια πιο κατάλληλη μονάδα απόστασης είναι το *parsec* (pc), η απόσταση στην οποία ένα άστρο που είναι ακίνητο ως προς τον Ήλιο, όταν παρατηρείται από τη Γη, φαίνεται να κινείται στον ουρανό κατά ένα δευτερόλεπτο της μοίρας σε ένα τρίμηνο (Εικόνα 1). Από τους κανόνες της τριγωνομετρίας έχουμε ότι $1 \text{ pc} = 2,06 \times 10^5 \text{ AU} = 3,09 \times 10^{16}$ m. Τα πλησιέστερα άστρα βρίσκονται σε απόσταση περίπου ένα parsec, το κέντρο του Γαλαξία μας απέχει $8,3 \times 10^3 \text{ pc} = 8,3 \text{ kpc}$ (kiloparsec), και κατά μέσο όρο σε έναν όγκο $\sim 10 \text{ Mpc}^3$ (κυβικά megaparsec) υπάρχει μόνο ένας γαλαξίας της ίδιας λαμπρότητας με τον δικό μας.

Η συνηθισμένη μας μονάδα για τον χρόνο είναι το έτος ($1 \text{ yr} = 3,16 \times 10^7 \text{ s}$), αν και πολύ συχνά έχουμε να κάνουμε με μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες: η εξέλιξη των άστρων διαρκεί εκατομμύρια ή δισεκατομμύρια έτη. Έτσι, χρησιμοποιούμε συχνά τα μεγαέτη (Myr) ή τα γιγαέτη (Gyr), όπου $1 \text{ Gyr} = 1000 \text{ Myr} = 10^9 \text{ yr}$.

Μια βολική μονάδα ταχύτητας είναι το χιλιόμετρο ανά δευτερόλεπτο (km s^{-1}): η Γη περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο με ταχύτητα $\sim 30 \text{ km s}^{-1}$, και ο Ήλιος περιφέρεται γύρω από το κέντρο του Γαλαξία με $\sim 240 \text{ km s}^{-1}$. Όταν ένα αντικείμενο κινείται με 1 km s^{-1} διανύει $\sim 1 \text{ pc}$ σε 1 Myr ή 1 kpc σε 1 Gyr . Για παράδειγμα, σε ένα γιγαέτος ο Ήλιος διανύει $\sim 240 \text{ kpc}$, ενώ το μήκος της τροχιάς του στον Γαλαξία είναι $2\pi \times 8,3 \text{ kpc} = 52 \text{ kpc}$, οπότε σε ένα γιγαέτος συμπληρώνει σχεδόν πέντε περιφορές.

Η καθιερωμένη μονάδα ισχύος είναι το Watt (W) (περίπου ο ρυθμός με τον οποίο εργάζεται κανείς όταν ανυψώνει ένα χιλιόγραμμο κατά $0,1$ μέτρα ανά δευτερόλεπτο). Μια βολική μονάδα ισχύος στην αστροφυσική είναι η λαμπρότητα του Ήλιου, $L_{\odot} = 3,85 \times 10^{26} \text{ W}$. Η μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται συνήθως για την κατανάλωση των ηλεκτρικών συσκευών είναι η κιλοβατώρα, που ισούται με $3,0 \times 10^{-28} L_{\odot} \text{ yr}$. Μια έκρηξη σουπερνόβα (Κεφάλαιο 3, «Εκρηγνύομενα άστρα») εκλύει στο περιβάλλον μεσοαστρικό αέριο ενέργεια της τάξης των $\sim 8,2 \times 10^9 L_{\odot} \text{ yr}$.

Ενώ η ποσότητα $L_{\odot} \text{ yr}$ είναι μια βολική μονάδα ενέργειας για αστρονομικά αντικείμενα, δεν ταιριάζει καθόλου στα άτομα. Όταν μελετάμε άτομα και υποατομικά αντικείμενα η βολική μονάδα ενέργειας είναι το ηλεκτρονιοβόλτ (eV). 1 eV είναι η ενέργεια που απαιτείται για να μετακινήσει κανείς ένα ηλεκτρόνιο κατά μήκος μιας διαφοράς δυναμικού 1 volt , και ισούται με $\sim 10^{-53} L_{\odot} \text{ yr}$. Καθένα από τα φωτόνια που μπορούν να ανιχνεύσουν τα μάτια μας φέρει ενέργεια $\sim 2 \text{ eV}$, άρα σε ένα έτος ο Ήλιος εκπέμπει $\sim 10^{53}$ φωτόνια.

2

Το αέριο μεταξύ των άστρων

Ο χώρος μεταξύ των άστρων, παρότι αποτελεί ένα ασύγκριτα καλύτερο κενό απ' οποιοδήποτε τεχνητό κενό έχει δημιουργηθεί στη Γη, δεν είναι απολύτως άδειος: το αέριο κοντά στον Ήλιο περιέχει κατά μέσο όρο 1 άτομο ανά κυβικό εκατοστό (cm^3), ενώ ο ατμοσφαιρικός αέρας έχει $\sim 10^{19}$ άτομα ανά κυβικό εκατοστό· επομένως, ο χώρος κοντά στον Ήλιο θα μπορούσε να περιγραφεί ως υπερυψηλό κενό 10^{-19} bar.

Μεσοαστρική απορρόφηση και ερύθρωση

Αυτό το απίστευτα αραιό αέριο, που αποτελείται κατά κύριο λόγο από υδρογόνο και ήλιο, γίνεται αντιληπτό με διάφορους τρόπους. Ένας από τους απλούστερους και σημαντικότερους είναι μέσω της απορρόφησης του αστρικού φωτός. Στην πραγματικότητα, το αστρικό φως δεν απορροφάται από το ίδιο το αέριο, αλλά από μικροσκοπικά σωματίδια καπνού που είναι εντεθειμένα στο αέριο. Οι αστρονόμοι ονομάζουν τα σωματίδια αυτά *κόκκους σκόνης*, αλλά ο όρος «καπνός» είναι πολύ πιο κατάλληλος, αφού, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 3 («Η ζωή μετά την κύρια ακολουθία»), τα σωματίδια αυτά σχηματίζονται σε αέρια που εκτινάσσονται από ορισμένα άστρα ακριβώς όπως σχηματίζεται η αιθάλη σε ένα αναμμένο κερί ή όπως σχηματίζεται ο καπνός στον αέρα που περνάει μέσα από μια πυρά.

Όπως είναι φυσικό, η αποδοτικότητα με την οποία απορροφά η σκόνη το αστρικό φως εξαρτάται από την πυκνότητα της σκόνης, και επομένως από την πυκνότητα του αερίου μέσα στο οποίο είναι εντεθειμένη – όπως έχει διαπιστωθεί, η μάζα σκόνης ανά μονάδα μάζας αερίου είναι κατά προσέγγιση σταθερή εντός του Γαλα-



2. Ένα σκοτεινό σφαίρωμα.

ξία μας. Σε μερικές κατευθύνσεις, το πλήθος των άστρων που διακρίνονται ανά μονάδα εμβαδού του ουρανού πέφτει δραστικά, διότι σε αυτές τις κατευθύνσεις υπάρχει ένα κοντινό πυκνό νέφος αερίου, που αποκρύπτει τα άστρα που βρίσκονται πίσω του (Εικόνα 2).

Αν κοιτάξετε τον Ήλιο μέσα από τον καπνό μιας πυράς, φαίνεται πιο κόκκινος απ' ό,τι συνήθως επειδή τα μικρά σωματίδια απορροφούν το γαλάζιο φως πιο έντονα απ' ό,τι το κόκκινο. Επομένως, το κόκκινο φως από τον Ήλιο είναι πιθανότερο να περάσει μέσα από τον καπνό απ' ό,τι το γαλάζιο φως του Ήλιου. Η φυσική αιτιολόγηση αυτής της επιλεκτικής απορρόφησης είναι ότι μια κεραία δεν απορροφά αποδοτικά την ακτινοβολία που έχει μήκος κύματος

πολύ μεγαλύτερο από την ίδια: στις τηλεοράσεις της δεκαετίας του 1960 οι κεραιές έγιναν μικρότερες όταν ξεκίνησε η μετάδοση σε *υπερψηλή συχνότητα* (σε $\sim 0,3$ GHz (gigaHertz)), και τα κινητά τηλέφωνα συρρικνώθηκαν και έπαψαν να έχουν ορατές κεραιές όταν κατασκευάστηκαν φτηνές ηλεκτρονικές διατάξεις που μπορούσαν να επεξεργάζονται ακτινοβολία με μήκη κύματος ~ 15 cm. Όπως έχει διαπιστωθεί, στη συντριπτική τους πλειονότητα οι μεσοαστρικοί κόκκοι είναι μικρότεροι από ένα μικρόμετρο (10^{-3} mm), και συνεπώς κύματα με μήκη κύματος μεγαλύτερα από λίγα μικρόμετρα δεν απορροφούνται έντονα από τη σκόνη. Μάλιστα, μπορούμε να διακρίνουμε το εσωτερικό πυκνών μεσοαστρικών νεφών παρατηρώντας σε μήκη κύματος λίγων μικρόμετρων, μεγαλύτερα κατά έναν παράγοντα περίπου 4 από το μήκος κύματος του ορατού φωτός ($\sim 0,5$ μικρόμετρο).

Δεδομένου ότι οι κόκκοι σκόνης απορροφούν αποδοτικά το γαλάζιο και το υπεριώδες φως, τα άστρα που παρατηρούνται μέσα από μεσοαστρικά νέφη φαίνονται πιο κόκκινα απ' ό,τι παρόμοια άστρα που έχουν λίγο αέριο μπροστά τους. Συγκρίνοντας τα χρώματα τέτοιων ζευγών άστρων μπορούμε να προσδιορίσουμε την *ερύθρωση* του ερυθρότερου άστρου και συνεπώς την ποσότητα της σκόνης, και επομένως και του αερίου, κατά μήκος της γραμμής θέασής μας προς το άστρο. Με αυτό τον τρόπο αποδείχθηκε για πρώτη φορά η ύπαρξη του μεσοαστρικού αερίου.

Σκόνη, ο ρυθμιστικός παράγοντας

Η σκόνη παίζει καίριο ρόλο στη ρύθμιση της θερμοκρασίας, της πυκνότητας και της χημικής σύστασης του αερίου. Τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια που κινούνται στον μεσοαστρικό χώρο μερικές φορές προσκρούουν σε έναν κόκκο σκόνης. Η δύναμη της πρόσκρουσης προκαλεί στον κόκκο της σκόνης ταλαντώσεις, που με τη σειρά τους προκαλούν εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τον κόκκο. Με αυτό τον τρόπο ένα μέρος της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων και των πρωτονίων μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία όπως θα δούμε είναι πιθανό να διαφύγουν ακόμα κι από

ένα πυκνό νέφος αερίου. Από τα παραπάνω έπεται ότι οι κόκκοι σκόνης είναι ένα δραστικό ψυκτικό μέσο του μεσοαστρικού αερίου.

Όπως είδαμε, οι κόκκοι σκόνης απορροφούν μεγάλη ποσότητα αστρικού φωτός, ιδιαίτερα γαλάζιου και υπεριώδους. Όπως είναι φυσικό, μέσω αυτής της απορρόφησης οι κόκκοι θερμαίνονται, ακριβώς όπως θερμαίνεται και κάποιος που κάνει ηλιοθεραπεία. Και επειδή η μάζα τους είναι πολύ μικρή, η απορρόφηση ενός και μόνο φωτονίου μπορεί να αυξήσει δραστικά τη θερμοκρασία ενός κόκκου. Με άλλα λόγια, ένα και μόνο φωτόνιο μπορεί να προκαλέσει πολύ έντονο «τρέμουλο» σε έναν κόκκο. Έτσι, όποια τυχόν ηλεκτρόνια ή πρωτόνια είχαν προσκολληθεί στον κόκκο έχοντας συγκρουστεί μαζί του πριν από την απορρόφηση του φωτονίου αποτινάσσονται βίαια από αυτόν, περίπου όπως αποτινάσσεται το νερό από έναν σκύλο όταν αυτός βγαίνει έξω από το νερό. Αν τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια που αποτινάσσονται από τον κόκκο απομακρύνονται από αυτόν ταχύτερα απ' ό,τι κινούνταν όταν προσέκρουσαν πάνω του, συνολικά σε όλη τη διαδικασία ο κόκκος θα έχει θερμάνει το μεσοαστρικό αέριο. Επομένως, οι κόκκοι μπορούν να ψύξουν ή να θερμάνουν το μεσοαστρικό αέριο ανάλογα με την ένταση του αστρικού φωτός που προσπίπτει στο αέριο.

Αν το αστρικό φως είναι ασθενές, τότε ανάμεσα σε διαδοχικές απορροφήσεις φωτονίων μπορούν να συσσωρευτούν σε έναν μόνο κόκκο αρκετά πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Όταν συμβεί αυτό, καθώς τα πρωτόνια «τριγυρνούν» πάνω στην επιφάνεια του κόκκου μπορεί να έρθουν αρκετά κοντά το ένα στο άλλο ώστε να σχηματιστεί ένα μόριο μοριακού υδρογόνου (H_2). Κατά τον σχηματισμό ενός μορίου H_2 εκλύεται ενέργεια, η οποία μεταβιβάζεται στον κόκκο. Όταν στη συνέχεια θερμάνει τον κόκκο ένα φωτόνιο, το μόριο H_2 μπορεί να αποδεσμευτεί και να αρχίσει να «επιπλέει» ελεύθερο. Επομένως, η σκόνη αποτελεί τον βασικό μηχανισμό με τον οποίο το ατομικό υδρογόνο γίνεται μοριακό.

Οι κόκκοι διαμεσολαβούν ανάμεσα και σε πολλούς άλλους γάμους. Το μεσοαστρικό αέριο περιέχει άτομα άνθρακα, αζώτου, οξυγόνου και θείου σε πολύ χαμηλότερη αφθονία απ' ό,τι τα άτομα υδρογόνου ή ηλίου, αλλά σε κάθε περίπτωση σε σημαντική αφθο-