

Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος και το βέλος του χρόνου

Άρθρο, Ιούνιος 2008

Το 1856 ο γερμανός φυσικός Hermann von Helmholtz έκανε ίσως την πιο μελαγχολική πρόβλεψη στην ιστορία της επιστήμης. Το σύμπαν, ισχυρίστηκε ο Helmholtz, πεθαίνει. Η βάση αυτής της ζοφερής δήλωσης ήταν ο λεγόμενος δεύτερος Νόμος της θερμοδυναμικής. Ο εν λόγω νόμος διατυπώθηκε για πρώτη φορά στις αρχές του 19ου αιώνα ως μια πρόταση σχετικά με την απόδοση των θερμικών μηχανών. Σύντομα, όμως, αναγνωρίστηκε η σημασία του για ολόκληρο το σύμπαν και οι όντως κοσμικές συνέπειές του.

Στην απλούστερη εκδοχή του, ο δεύτερος Νόμος ορίζει ότι η θερμότητα ρέει πάντα αυθόρμητα από τα θερμά στα ψυχρά σώματα και ποτέ από τα ψυχρά στα θερμά χωρίς να δαπανήσουμε ενέργεια. Φυσικά, αυτή είναι μια γνωστή και προφανής ιδιότητα των φυσικών συστημάτων.

Η ροή της θερμότητας, όμως, έχει μόνο μία κατεύθυνση, και επομένως η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζει ασυμμετρία στο χρόνο. Μια ταινία που θα έδειχνε θερμότητα να ρέει αυθόρμητα από ένα ψυχρό σ' ένα θερμό σώμα θα φαινόταν το ίδιο παράξενο με ένα ποτάμι που ρέει προς την κορυφή ενός λόφου ή με σταγόνες βροχής που ανεβαίνουν προς τα σύννεφα. Μπορούμε, επομένως, να αναγνωρίσουμε μια θεμελιώδη κατεύθυνση στη ροή της θερμότητας, η οποία συχνά αναπαριστάται με ένα βέλος που δείχνει από το παρελθόν στο μέλλον. Αυτό το «βέλος του χρόνου» δείχνει τη μη αντιστρεπτή φύση των θερμοδυναμικών διεργασιών, και η ύπαρξη του έχει γοητεύσει τους φυσικούς τα τελευταία εκατόν πενήντα χρόνια.

Ακολουθώντας το έργο του Helmholtz, του Rudolf Clausius, και του λόρδου Kelvin οδήγησε στην αναγνώριση της σημασίας μιας ποσότητας που ονομάζεται εντροπία (το μέτρο της αταξίας) και χαρακτηρίζει τις μη αντιστρεπτές μεταβολές στη θερμοδυναμική. Στην απλή περίπτωση ενός θερμού σώματος που βρίσκεται σε επαφή με ένα ψυχρό σώμα, η εντροπία ορίζεται ως η θερμική ενέργεια διηρημένη με τη θερμοκρασία.

$$S = \int dQ/dT$$

(Η ισότητα ισχύει στις λεγόμενες αντιστρεπτές μεταβολές. Δηλαδή σε εκείνες που αν κάνουμε τους αντίθετους ακριβώς χειρισμούς από αυτούς που κάναμε κατά τη διάρκεια της μεταβολής, τόσο το σύστημά μας όσο και το περιβάλλον του οδηγούνται ξανά στις αρχικές τους καταστάσεις. Οι αντιστρεπτές μεταβολές είναι εξιδανικευμένες μεταβολές. Στις πραγματικές μεταβολές ισχύει η ανισότητα)

Ας θεωρήσουμε μια μικρή ποσότητα θερμότητας που ρέει από το θερμό στο ψυχρό σώμα. Το θερμό σώμα θα χάσει κάποια εντροπία, ενώ το ψυχρό θα κερδίσει. Η εντροπία, όμως, την οποία θα κερδίσει το ψυχρό σώμα είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα χάσει το θερμό, διότι, ενώ η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που ανταλλάσσεται είναι η ίδια, οι θερμοκρασίες τους διαφέρουν. Άρα, η συνολική εντροπία ολόκληρου του συστήματος —ψυχρό και θερμό σώμα μαζί— τελικά αυξάνεται. Μια διατύπωση, συνεπώς, του Δεύτερου Νόμου της θερμοδυναμικής είναι ότι η εντροπία ενός τέτοιου συστήματος δεν μειώνεται ποτέ, αφού μείωση της εντροπίας θα σήμαινε ότι κάποιο ποσό θερμότητας είχε μεταφερθεί αυθόρμητα από το ψυχρό στο θερμό σώμα.

Πληρέστερη ανάλυση του Δεύτερου Νόμου επιτρέπει τη γενίκευση του σε όλα τα κλειστά συστήματα: η εντροπία δεν ελαττώνεται ποτέ. Αν το σύστημα περιλαμβάνει ένα ψυγείο, το οποίο μπορεί να μεταφέρει θερμότητα από μια ψυχρή περιοχή (θάλαμος) σε μια θερμή (περιβάλλον), τότε στον υπολογισμό της συνολικής εντροπίας του συστήματος θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και την ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία του ψυγείου. Αυτή η κατανάλωση ενέργειας αυξάνει την εντροπία, και αποδεικνύεται ότι πάντοτε η αύξηση που προκαλείται από τη λειτουργία του ψυγείου είναι μεγαλύτερη από τη μείωση που προκύπτει από τη μεταφορά θερμότητας από την ψυχρή στη θερμή περιοχή.

Στα φυσικά συστήματα, επίσης, όπως εκείνα που περιλαμβάνουν βιολογικούς οργανισμούς ή σχηματισμό κρυστάλλων, η εντροπία ενός μέρους τους συχνά μειώνεται. Πάντοτε, όμως, αυτή η

μείωση συνοδεύεται από αντισταθμιστική αύξηση της εντροπίας ενός άλλου μέρους του συστήματος. Συνολικά, επομένως, η εντροπία ουδέποτε ελαττώνεται.

Αν θεωρήσουμε ολόκληρο το σύμπαν ως ένα κλειστό σύστημα, με βάση το γεγονός ότι δεν υπάρχει τίποτε «έξω» από αυτό, τότε ο δεύτερος Νόμος της θερμοδυναμικής προβλέπει κάτι πολύ σημαντικό: η συνολική εντροπία του σύμπαντος ουδέποτε μειώνεται. Αντίθετα, αυξάνεται αδυσώπητα. Ένα καλό παράδειγμα μιας άλλης διαδικασίας προς τη μία κατεύθυνση βρίσκουμε στον Ήλιο, ο οποίος εκπέμπει συνεχώς θερμότητα στα ψυχρά βάθη του Διαστήματος. Αυτή η θερμότητα διαχέεται στο σύμπαν χωρίς ποτέ να επιστρέφει. Πρόκειται για μια ολοφάνερα μη αντιστρεπτή διαδικασία.

Προκύπτει, όμως, ένα εύλογο ερώτημα: μπορεί η εντροπία του σύμπαντος να αυξάνεται για πάντα; Ας θεωρήσουμε ένα θερμό και ένα ψυχρό σώμα που έρχονται σε επαφή στο εσωτερικό ενός θερμικά μονωμένου δοχείου. Θερμική ενέργεια ρέει από το θερμό στο ψυχρό σώμα, και η εντροπία αυξάνεται. Έτσι, όμως, το ψυχρό σώμα θερμαίνεται ενώ το θερμό ψύχεται, ώστε τελικά αποκτούν και τα δύο την ίδια θερμοκρασία. Όταν επιτυγχάνεται αυτή η κατάσταση, παύει κάθε μεταφορά θερμότητας. Το σύστημα μέσα στο δοχείο έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία — βρίσκεται σε μια σταθερή κατάσταση μέγιστης εντροπίας, η οποία είναι γνωστή ως κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Περαιτέρω αλλαγή δεν αναμένεται, εφόσον το σύστημα παραμένει απομονωμένο. Εάν όμως τα σώματα διαταραχθούν με κάποιον τρόπο, λόγω χάρη με την εισαγωγή θερμότητας στο δοχείο, τότε εμφανίζεται εκ νέου θερμική δραστηριότητα και η εντροπία αυξάνεται σε υψηλότερη μέγιστη τιμή.

Ποιες πληροφορίες μας δίνουν αυτές οι βασικές ιδέες της θερμοδυναμικής για τις αστρονομικές και κοσμολογικές μεταβολές; Στην περίπτωση του ήλιου και των περισσότερων άστρων, η εκροή θερμότητας μπορεί να συνεχιστεί για πολλά δισεκατομμύρια χρόνια, αλλά σίγουρα δεν είναι ανεξάντλητη. Σ' ένα κανονικό άστρο η θερμότητα παράγεται από πυρηνικές διεργασίες που συντελούνται στο εσωτερικό του. Κάποτε ο ήλιος μας θα εξαντλήσει τα καύσιμα του και θα αρχίσει να ψύχεται ώσπου να αποκτήσει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου.

Αν και ο Hermann von Helmholtz δεν γνώριζε τίποτε για τις πυρηνικές αντιδράσεις (η πηγή της τεράστιας ηλιακής ενέργειας αποτελούσε μυστήριο εκείνη την εποχή) κατόρθωσε τη γενική αρχή ότι όλες οι φυσικές δραστηριότητες στο σύμπαν τείνουν προς μια τελική κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, ή μέγιστης εντροπίας, ύστερα από την οποία τίποτε το αξιόλογο δεν πρόκειται να συμβεί σε όλους τους επόμενους αιώνες. Αυτή η μονόδρομη διολίσθηση του σύμπαντος προς την ισορροπία ονομάστηκε από τους πρώτους επιστήμονες της θερμοδυναμικής «θερμικός θάνατος» του σύμπαντος. Φυσικά, δεν υπήρχε αμφιβολία ότι απομονωμένα συστήματα είναι δυνατόν να αναζωογονηθούν από εξωτερικές διαταραχές. Για το σύμπαν, όμως, εξ ορισμού δεν υπάρχει τίποτε «εξωτερικό», και επομένως τίποτε δεν μπορεί να εμποδίσει έναν καθολικό θερμικό θάνατο.

Η ανακάλυψη ότι ο θάνατος του σύμπαντος αποτελεί αμείλικτη συνέπεια των νόμων της θερμοδυναμικής είχε βαθιά καταθλιπτική επίδραση σε πολλές γενιές επιστημόνων και φιλοσόφων, όπως τον Bertrand Russell κλπ.

Το βέλος του χρόνου

Στις φυσικές επιστήμες, το βέλος του χρόνου είναι ένας όρος που πλάστηκε το 1927 από το βρετανό αστρονόμο Arthur Eddington, που τον χρησιμοποίησε για να διακρίνει μια κατεύθυνση του χρόνου σε έναν τετραδιάστατο σχετικιστικό χάρτη του σύμπαντος. Σύμφωνα δε με τον Eddington, το βέλος του χρόνου μπορεί να οριστεί μελετώντας την οργάνωση των ατόμων, των μορίων, και των οργανισμών.

Οι φυσικές διαδικασίες σε μικροσκοπικό επίπεδο θεωρούνται είτε εντελώς είτε συνήθως συμμετρικές ως προς τον χρόνο, που σημαίνει ότι οι θεωρητικές δηλώσεις που τα περιγράφουν παραμένουν αληθινές ακόμα κι αν η κατεύθυνση του χρόνου αντιστρέφεται.

Θα μπορούσε ασφαλώς να αναρωτηθεί κανείς, γιατί είναι τόσο σημαντική η ιδέα του βέλους του χρόνου; Δεν έχουμε όλοι συνείδηση της μη αναστρέψιμης ροής του χρόνου, όπου το παρελθόν είναι δεδομένο και το μέλλον ανοιχτό; Η

Η απάντηση είναι η εξής: Παρά το γεγονός ότι όλοι γνωρίζουμε από την εμπειρία μας πως στις φυσικές διαδικασίες ο χρόνος ακολουθεί μία μόνο κατεύθυνση, από το παρελθόν προς το μέλλον, εν τούτοις κατά τους τελευταίους τρεις αιώνες, κυρίως στη Νευτώνεια Μηχανική, δεν αποκλείστηκε η ιδέα της *αναστρεψιμότητας* του χρόνου. Με την κυριαρχία της Νευτώνειας Μηχανικής το σύνολο του φυσικού κόσμου αντιμετωπίστηκε σαν μια τεράστια μηχανή, όπου κυριαρχεί ο ντετερμινισμός και όπου ο κόσμος είναι συμμετρικός ως προς τον χρόνο.

Σε ένα τέτοιο μοντέλο η περιγραφή του κόσμου καταλήγει σε μια ταυτολογία, εφόσον τόσο το μέλλον όσο και το παρελθόν εμπεριέχονται στο παρόν!

Με άλλα λόγια, *αφού ξέρουμε τι συνέβη κατά το παρελθόν το ίδιο θα ισχύει και στο μέλλον. Άρα το βιβλίο της ιστορίας του Σύμπαντος είναι ήδη γραμμένο και δεν υπάρχει περιθώριο για το καινοφανές, το απρόβλεπτο και το γίνεσθαι μέσα στη φύση.*

Όταν όμως περιγράφουμε τα πράγματα στο μακροσκοπικό επίπεδο συχνά φαίνεται ότι αυτό δεν ισχύει: εκεί υπάρχει μια προφανής κατεύθυνση ή ροή του χρόνου. Ένα βέλος του χρόνου είναι οτιδήποτε που παρουσιάζει μια τέτοια χρονική μη συμμετρία.

Ιστορία του όρου

Στο βιβλίο του *The Nature of the Physical World* ο Eddington, που δημοσιεύτηκε το 1928, γράφει τα εξής:

“ Σχεδιάστε ένα βέλος αυθαίρετα. Εάν καθώς ακολουθούμε τη φορά του βέλους βρίσκουμε ολοένα και περισσότερα τυχαία στοιχεία στην κατάσταση του σύμπαντος, τότε το βέλος δείχνει προς το μέλλον, εάν τα τυχαία στοιχεία μειώνονται το βέλος δείχνει προς το παρελθόν. Αυτή είναι η μόνη διάκριση που είναι γνωστή στη φυσική. ... Θα χρησιμοποιήσω τη φράση "Το βέλος του χρόνου" για να εκφράσω αυτήν τη μονόδρομη ιδιότητα του χρόνου που δεν έχει κανένα ανάλογο στο διάστημα. ”

Έπειτα ο Eddington σημειώνει τρία πράγματα για αυτό το βέλος:

- Αναγνωρίζεται έντονα από τη συνείδηση
- Αυτό ισοδυναμεί εξίσου με τη λογική ικανότητά μας, που μας λέει ότι μια αντιστροφή του βέλους θα έκανε τον εξωτερικό κόσμο μη αισθητό
- Δεν κάνει καμία εμφάνιση στη φυσική επιστήμη εκτός από τη μελέτη της οργάνωσης διάφορων ατόμων

Εδώ, σύμφωνα με Eddington, το βέλος δείχνει την κατεύθυνση της προοδευτικής αύξησης του τυχαίου στοιχείου. Μετά ο Eddington καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το βέλος του χρόνου είναι μια ιδιότητα μόνο της εντροπίας.

Τα διάφορα βέλη του χρόνου

1. Το θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου

Το θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου προβλέπεται από το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, που λέει ότι σε ένα απομονωμένο σύστημα η εντροπία αυξάνεται μόνο με το χρόνο, αυτή δεν θα μειωθεί με το χρόνο. Η εντροπία μπορεί να θεωρηθεί ως μέτρο της αταξίας ή της αναταραχής, κατά συνέπεια ο δεύτερος νόμος υπονοεί ότι ο χρόνος είναι ασυμμετρικός όσον αφορά την ποσότητα της τάξης σε ένα απομονωμένο σύστημα: δηλαδή καθώς ο χρόνος αυξάνεται, ένα σύστημα θα αποκτάει περισσότερη αταξία. Αυτή η ασυμμετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί εμπειρικά για να διακρίνουμε μεταξύ του μέλλοντος και του παρελθόντος.

Δεδομένου ότι ο δεύτερος νόμος έχει στατιστική φύση, δεν έχει ακριβή καθολικότητα. Αυτό

σημαίνει ότι κάθε σύστημα μπορεί να πάει σε μια κατάσταση χαμηλότερης εντροπίας. Εντούτοις, ο δεύτερος νόμος φαίνεται να περιγράφει ακριβώς τη γενική τάση στα πραγματικά συστήματα προς την υψηλότερη εντροπία.

Αυτό το βέλος του χρόνου φαίνεται να σχετίζεται με όλα τα άλλα βέλη του χρόνου και κρύβεται πίσω από αυτά, με εξαίρεση το ασθενές βέλος του χρόνου.

2. Το κοσμολογικό βέλος του χρόνου

Το κοσμολογικό βέλος του χρόνου δείχνει προς την κατεύθυνση της διαστολής του σύμπαντος. Μπορεί να συνδεθεί με το θερμοδυναμικό βέλος, αν σκεφτούμε ότι το σύμπαν οδηγείται προς ένα θερμικό θάνατο (Μεγάλη Ψύξη), καθώς το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας γίνεται ολοένα και πιο αμελητέο. Όμως καθώς θα προχωράει η εξέλιξη του σύμπαντος (δείτε το κυκλικό ή αέναο σύμπαν) αυτό το βέλος θα αντιστρέφεται, καθώς η βαρύτητα θα έλκει όλο το σύμπαν προς τα πίσω, σε μια Μεγάλη Σύνθλιψη.

Εάν το κοσμολογικό βέλος του χρόνου συσχετίζεται με τα άλλα βέλη του χρόνου, τότε το μέλλον είναι εξ ορισμού η κατεύθυνση προς την οποία ο Κόσμος γίνεται μεγαλύτερος. Κατά συνέπεια, ο Κόσμος διαστέλλεται - αντί να συστέλλεται - εξ ορισμού.

Το θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου και ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής είναι πιθανά μια συνέπεια των αρχικών συνθηκών στον πρώιμο Κόσμο. Επομένως προκύπτουν τελικά από την κοσμολογική οργάνωση.

3. Το βέλος του χρόνου της ακτινοβολίας

Τα ραδιοκύματα έως τα ηχητικά κύματα και έως αυτά που δημιουργούνται σε μια λίμνη από την ρίψη μιας πέτρας, πάντα ταξιδεύουν προς τα έξω (μακριά από την πηγή), έστω κι αν οι εξισώσεις των κυμάτων επιτρέπουν λύσεις με κύματα που να συγκλίνουν.

Αυτό όμως το βέλος έχει αντιστραφεί σε κάποια προσεκτικά πειράματα, που έχουν δημιουργήσει συγκλίνοντα κύματα. Και βέβαια οι συνθήκες για την παραγωγή ενός συγκλίνοντος κύματος απαιτούν περισσότερη τάξη από τις συνθήκες για ένα κύμα που ακτινοβολεί.

Βάζοντας το διαφορετικά, η πιθανότητα για αρχικές συνθήκες που να παράγουν ένα συγκλίνον κύμα είναι πολύ μικρότερη από την πιθανότητα για αρχικές συνθήκες που παράγουν ένα κύμα που εξαπλώνεται (ακτινοβολεί) στον χώρο.

Στην πραγματικότητα, κανονικά ένα κύμα που ακτινοβολεί αυξάνει την εντροπία, ενώ ένα συγκλίνον κύμα την μειώνει, κάνοντας το τελευταίο αντιφατικό με το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής στις συνηθισμένες περιστάσεις.

4. Το αιτιώδες βέλος του χρόνου

Οι αιτίες θεωρούνται συνήθως πως προηγούνται των αποτελεσμάτων. Το μέλλον μπορεί να ελεγχθεί, αλλά όχι το παρελθόν.

Ένα πρόβλημα με τη χρησιμοποίηση της αιτιότητας ως βέλος του χρόνου είναι ότι, όπως επισήμανε ο David Hume, η αιτιώδης σχέση δεν μπορεί αυτή καθ' εαυτή να γίνει αντιληπτή, κάποιος αντιλαμβάνεται μόνο τις ακολουθίες των γεγονότων. Επιπλέον είναι εκπληκτικά δύσκολο να δοθεί μια σαφής εξήγηση τι σημαίνουν πραγματικά οι όροι "αιτία" και "αποτέλεσμα". Είναι φανερό ότι η ρίψη του πιάτου είναι η αιτία, η καταστροφή του πιάτου είναι το αποτέλεσμα.

Μιλώντας φυσικά, αυτό είναι μια άλλη εκδήλωση του θερμοδυναμικού βέλους του χρόνου, και είναι μια συνέπεια του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής. Ελέγχοντας το μέλλον, ή αναγκάζοντας κάτι να συμβεί, δημιουργεί συσχετισμούς μεταξύ του αιτίου και του αποτελέσματος, και αυτά μπορούν να δημιουργηθούν μόνο καθώς κινούμαστε μπροστά στον χρόνο, όχι προς τα πίσω.

5. Το βέλος του χρόνου της σωματιδιακής φυσικής (ασθενές βέλος του χρόνου)

Ορισμένες υποατομικές αλληλεπιδράσεις που περιλαμβάνουν τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις παραβιάζουν τη διατήρηση και της ομοτιμίας (parity) και του φορτίου, αλλά πολύ σπάνια. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η διάσπαση του καονίου.

Σύμφωνα με το θεώρημα CPT, η διατήρηση της ομοτιμίας και του φορτίου συνοδεύεται επίσης και με την διατήρηση ως προς τον χρόνο, και έτσι καθιερώνουν ένα βέλος του χρόνου στη σωματιδιακή φυσική. Ας τονίσουμε ότεοιες διαδικασίες πρέπει να είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία ύλης στον πρώιμο Κόσμο.

Το βέλος του χρόνου της σωματιδιακής φυσικής δεν συνδέεται με κανένα άλλο βέλος, και εάν αυτό θα έδειχνε την αντίθετη χρονική φορά, η μόνη διαφορά θα ήταν ότι ο Κόσμος μας θα φτιαχνόταν με αντίλη παρά με την κανονική ύλη. Ακριβέστερα, στην θέση της ύλης θα ήταν η αντι-ύλη και το αντίστροφο.

Ότι ο συνδυασμός της ομοτιμίας και του φορτίου πολύ σπάνια δεν ισχύει, σημαίνει ότι αυτό το βέλος "σπανίως" μόνο δείχνει σε μια κατεύθυνση, θέτοντας το έξω από τα άλλα βέλη, η κατεύθυνση των οποίων είναι πιο προφανής. Γι αυτό και λέγεται ασθενές βέλος του χρόνου, (επειδή δεν ισχύει πάντα).

Σημείωση: Στο χώρο των σωματιδίων, υπάρχουν τρεις κύριες συμμετρίες. Ο κατοπτρισμός ως προς τον χρόνο T (Time Reversal), ο κατοπτρισμός ως προς το χώρο (Space Inversion), που λέγεται ομοτιμία P (Parity) και τέλος ο κατοπτρισμός ως προς το φορτίο C (Charge Conjugation). Και οι τρεις συμμετρίες λέγονται με μία λέξη CPT.

6. Το κβαντικό βέλος του χρόνου

Σύμφωνα με την ερμηνεία της Κοπεγχάγης της κβαντομηχανικής, η κβαντική εξέλιξη ελέγχεται από την εξίσωση του Schrödinger, που είναι συμμετρική ως προς τον χρόνο, και από την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης, η οποία είναι χρονικά μη αντιστρεπτή. Δεδομένου ότι ο μηχανισμός της κατάρρευσης της κυματοσυνάρτησης είναι φιλοσοφικά σκοτεινός, δεν είναι απολύτως σαφές πώς συνδέεται αυτό το βέλος με άλλα. Ενώ στο μικροσκοπικό επίπεδο, η κατάρρευση φαίνεται να μην δείχνει καμία προτίμηση προς την αύξηση ή την μείωση της εντροπίας, μερικοί θεωρούν ότι υπάρχει μια προκατάληψη που παρουσιάζεται στις μακροσκοπικές κλίμακες σαν το θερμοδυναμικό βέλος. Σύμφωνα με τη σύγχρονη φυσική άποψη της κατάρρευσης της κυματοσυνάρτησης, η θεωρία της κβαντικής αποσυνοχής, το κβαντικό βέλος του χρόνου είναι μια συνέπεια του θερμοδυναμικού βέλους του χρόνου.

6. Το ψυχολογικό ή το αντιληπτό βέλος του χρόνου

Ο ψυχολογικός χρόνος είναι, εν μέρει, η καταχώρηση των ολοένα και περισσότερων στοιχείων της μνήμης από τις συνεχείς αλλαγές στην αντίληψη. Με άλλα λόγια, τα πράγματα που θυμόμαστε αποτελούν το παρελθόν, ενώ το μέλλον αποτελείται από εκείνα τα γεγονότα που δεν μπορούν να αναφερθούν. Η αρχαία μέθοδος να συγκρίνουμε μοναδικά γεγονότα (πχ η γέννηση ενός παιδιού) με γενικευμένα επαναλαμβανόμενα γεγονότα, όπως είναι η φαινόμενη μετακίνηση του ήλιου, του φεγγαριού, και των άστρων, προσέφερε ένα κατάλληλο πλέγμα εργασίας για να γίνεται αυτή η σύγκριση. Η συνεπής αύξηση στον όγκο της μνήμης δημιουργεί ένα διανοητικό βέλος του χρόνου.

Το ψυχολογικό βέλος κινείται πάντα από το γνωστό (παρελθόν) προς το άγνωστο (το μέλλον). Οι επιθυμίες, τα όνειρα, και οι ελπίδες, φαίνονται για τον παρατηρητή να βρίσκονται στο μέλλον.

Η άλλη πλευρά της ψυχολογικής μετάβασης του χρόνου είναι στη σφαίρα της επιθυμίας και της δράσης. Προγραμματίζουμε και εκτελούμε συχνά ενέργειες που θα έχουν επιπτώσεις στο μέλλον. Δύσκολα κάποιος προσπαθεί να αλλάξει τα παρελθόντα γεγονότα.

Το ψυχολογικό βέλος του χρόνου είναι πιθανά αναγώγιμο στο θερμοδυναμικό βέλος: έχει βαθιές συνδέσεις με το δαίμονα του Maxwell και τη φυσική των πληροφοριών. Στην πραγματικότητα, είναι εύκολο να καταλάβουμε τη σύνδεσή του με το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής εάν δούμε τη μνήμη ως ένα συσχετισμό μεταξύ των κυττάρων του εγκεφάλου και του εξωτερικού κόσμου. Επειδή ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής είναι ισοδύναμος με την αύξηση με το πέρασμα του χρόνου τέτοιων συσχετισμών, αυτό δηλώνει ότι θα δημιουργηθεί μνήμη καθώς

κινούμαστε προς το μέλλον (κι όχι προς το παρελθόν).

Το βέλος του χρόνου στο έργο του Ilya Prigogine



Ο Ilya Prigogine στο περίφημο έργο του *"Θερμοδυναμικά συστήματα μακράν της ισορροπίας"* εξέτασε το σημαντικό ρόλο που παίζει στη φύση το βέλος του χρόνου, την διάκριση μεταξύ του παρελθόντος και του μέλλοντος μέσα στον φυσικό κόσμο.

Αξιζει να σημειωθεί ότι ο Ηράκλειτος υπήρξε ο πρώτος φιλόσοφος που υποστήριξε την ιδέα του *γίνεσθαι* της φύσης, κάτι το οποίο, κατά τον Prigogine, κλείνει μέσα του τον σπόρο της ιδέας του *βέλους του χρόνου*.

Η θερμοδυναμική, που μελετά τον μακροσκοπικό κόσμο της εμπειρίας, είναι η επιστήμη που εξηγεί πώς δουλεύει η ατμομηχανή, πώς αναπτύσσονται οι έμβιοι οργανισμοί

κ.ο.κ. Σε όλα αυτά τα φαινόμενα η *ροή του χρόνου* γίνεται εμφανής στην τάση του συστήματος να περνάει από την *τάξη προς την αταξία*. Εκείνο που έχει ιδιαίτερη σημασία εδώ είναι ότι πρόκειται για μια διαδικασία η οποία δεν μπορεί ποτέ να γυρίσει προς τα πίσω. Έτσι, οι φυσικές διαδικασίες, όπου υπάρχει μια συνεχής απώλεια ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, είναι *μη αναστρέψιμες*.

Αυτή ακριβώς την ιδέα εκφράζει ο περίφημος *δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής*: Σύμφωνα με τον νόμο αυτόν, *οποιαδήποτε φυσική διαδικασία συμβαίνει σε ένα απομονωμένο σύστημα θα πρέπει να συνοδεύεται από την αύξηση της εντροπίας*. Η εξέλιξη ακριβώς αυτή, που δεν πάει ποτέ προς τα πίσω αλλά μόνο προς τα μπρος, αποτελεί μια σαφή ένδειξη του *βέλους του χρόνου*.

Όταν τώρα η μοριακή *εντροπία* φθάσει στον μέγιστο βαθμό, όταν λ.χ. η κατανομή των μορίων στο φλιτζάνι του καφέ όπου βάλαμε και γάλα γίνει *ομοιόμορφη*, τότε λέμε ότι το μείγμα βρίσκεται στην *κατάσταση της ισορροπίας*. Εδώ χάνεται η δυνατότητα για περισσότερη ανάμειξη. Κάτι ανάλογο ισχύει και για ολόκληρο το Σύμπαν, το οποίο αποτελεί ένα απομονωμένο σύστημα. Έτσι, όταν η εντροπία του Σύμπαντος φθάσει στη μέγιστη τιμή, στην κατάσταση δηλαδή της *θερμοδυναμικής ισορροπίας*, θα επέλθει ο λεγόμενος *θερμικός θάνατος*. Όλα αυτά αφορούν βεβαίως συστήματα που βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας.

Ο Prigogine λέει, ότι στην αρχή αποδέχτηκε τη λύση του Boltzmann και είχε την πεποίθηση πως οι θεμελιώδεις νόμοι της φυσικής είναι αντιστρεπτοί ως προς το χρόνο. «Πίστευα, όπως όλοι, ότι υπάρχει μη αντιστρεπτότητα αλλά πρέπει να προέρχεται από προσεγγίσεις που είμαστε αναγκασμένοι να κάνουμε στους βασικούς κανόνες που είναι χρονικά αντιστρεπτοί. Πίστευα δηλαδή πως η εμφάνιση της μη αντιστρεπτότητας οφείλεται σε άγνοιά μας και στις δικές μας προσεγγίσεις».

Ωστόσο, τονίζει πως «οι μελέτες συστημάτων μακριά από την ισορροπία με οδήγησαν στην πεποίθηση ότι αυτή δεν μπορεί να είναι η σωστή άποψη. Η μη αντιστρεπτότητα παίζει εποικοδομητικό ρόλο. Δημιουργεί μορφή. Δημιουργεί ανθρώπινα όντα. Πώς θα μπορούσε η απλή άγνοιά μας για τις αρχικές συνθήκες να είναι η αιτία γι ' αυτό; Η άγνοιά μας δεν μπορεί να είναι η αιτία που υπάρχουμε».

Άρχισε λοιπόν να πιστεύει ότι δεν είναι τα πράγματα πάντα έτσι, δεν είναι δηλαδή απαραίτητο πάντα στην πορεία ανάπτυξης των συστημάτων να συντελείται μια πορεία από την *τάξη προς την αταξία*: *μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις, κατά τον Prigogine, το βέλος του χρόνου να είναι μια πηγή τάξης*. Με άλλα λόγια, *μέσα από την αταξία μπορεί να πηγάζει η τάξη με τη μορφή της αυτοοργάνωσης*.

Το ερώτημα λοιπόν που έθεσε ο Prigogine είναι το εξής: *Το βέλος του χρόνου προκύπτει ως αποτέλεσμα απλώς μιας φαινομενολογικής προσέγγισης των φυσικών διαδικασιών ή μήπως αποτελεί ένα θεμελιώδες στοιχείο, το οποίο οφείλουμε να ενσωματώσουμε στις περιγραφές αυτών των διαδικασιών;*

Πώς όμως είναι δυνατόν να συμβεί κάτι τέτοιο; πώς μπορούν οι μη αναστρέψιμες διαδικασίες να προκαλέσουν την *αυτοοργάνωση*;

Η απάντηση του Prigogine φανερώνει - όπως ο ίδιος επισημαίνει - τον δεσμό που υπάρχει ανάμεσα στο *βέλος του χρόνου* και στη δυνατή *ανάπτυξη των δομών*. Αυτό, όπως διευκρινίζει, είναι κάτι που μπορεί να συμβεί με έναν τρόπο εντυπωσιακό στα συστήματα μακράν της ισορροπίας, όπου «το σύστημα αρχίζει να εξερευνά νέες δομές, νέα είδη χωροχρονικής οργάνωσης», που με ένα όνομα ονομάζονται *δομές έκλυσης*. Τέτοιες είναι αυτές που πραγματοποιούνται στις χημικές αντιδράσεις, οι οποίες όσο βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας είναι *γραμμικές*.

Όταν όμως ένα χημικό σύστημα, το οποίο προηγουμένως βρισκόταν σε κατάσταση ισορροπίας, φθάσει πέρα από ένα σημείο *κρίσιμης* απόστασης από την ισορροπία, εμφανίζεται το εξής εκπληκτικό φαινόμενο: μια *διχαλωτή διακλάδωση* κάνει την εμφάνισή της και τότε η χημική αντίδραση πρέπει να «κάνει μια *επιλογή*» ως προς τον δρόμο που θα ακολουθήσει. Δεν είναι δηλαδή δυνατόν εκ των προτέρων να γνωρίζουμε ή να προβλέψουμε ποιο από τα δύο μονοπάτια θα επιλέξει κάθε φορά.

Στο σημείο ακριβώς αυτό το σύστημα αρχίζει να εμφανίζει *νέες δομές, νέα είδη χωροχρονικής οργάνωσης*. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα *διχαλωτής διακλάδωσης* είναι αυτό που προκύπτει όταν θερμάνουμε ένα λεπτό στρώμα υγρού ανάμεσα σε δύο γυαλιά. Η θερμότητα μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία οργάνωσης με τη μορφή *σχημάτων κερήθρας* (εξάγωνα κουτάκια). Όσο μεγαλύτερη μάλιστα είναι η παροχή θερμότητας τόσο πιο εξωφρενική είναι η ταχύτητα των μορίων του υγρού που θερμαίνεται. Η θερμοκρασία στην οποία εμφανίζονται τα εξαγωνικά σχήματα είναι το *σημείο διακλάδωσης*. Εδώ το θερμοδυναμικό σύστημα μπορεί να *επιλέξει* τον δρόμο που θα ακολουθήσει. Όταν μάλιστα τα κλαδιά είναι περισσότερα από δύο, τότε προκύπτει μια πολύ απρόβλεπτη συμπεριφορά, γνωστή ως *ντετερμινιστικό χάος*. Εδώ ανοίγεται ένα εκθαμβωτικό φάσμα συμπεριφορών λόγω των αναρίθμητων δυνατών καταστάσεων. Η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται από τον «παράξενο ελκυστή», ο οποίος είναι κάτι σαν στόχος για το *βέλος του χρόνου*.

Με βάση λοιπόν τα ανωτέρω, στα θερμοδυναμικά συστήματα η εικόνα που παρουσιάζεται είναι η εξής: Σε καταστάσεις μακράν της ισορροπίας η ύλη μπορεί να συμπεριφερθεί με θαυμαστούς τρόπους, όπου εμφανίζονται περιπτώσεις *αυτοοργάνωσης, αυθόρμητης ανάπτυξης συστημάτων και δομών*· όλα αυτά συνοδεύονται από την εμφάνιση *απείρων δυνατοτήτων και επιλογών*, που καθιστούν *μη προβλέψιμη* τη μελλοντική εξέλιξη του συστήματος. *Καταλύεται έτσι η έννοια του ντετερμινισμού* της νευτώνειας φυσικής, το *μέλλον* αποκτά ένα *χαρακτήρα δημιουργικής ελευθερίας*, η ύλη *εμφανίζει ένα δυναμικό χαρακτήρα και απαλλάσσεται από τους περιορισμούς της κλασικής αντίληψης της αδρανούς ύλης*.

Τέλος, εκείνο που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι ότι στη δυναμική αυτή εικόνα του φυσικού κόσμου ο *χρόνος αποβαίνει ένα εγγενές στοιχείο των διαδικασιών μέσα από τις οποίες ανοίγεται ένας άπειρος κόσμος δυνατοτήτων*. Σύμφωνα με τον Prigogine *ο χρόνος είναι πραγματικός και είναι συνυφασμένος με το γίνεσθαι του φυσικού κόσμου*. Για να κατανοήσουμε λοιπόν τη φύση του *χρόνου* θα πρέπει να καταλάβουμε ότι δεν υπάρχει *χρόνος χωρίς γίνεσθαι*, και ταυτόχρονα ότι *χρόνος και γίνεσθαι* θεμελιώνονται πάνω σε έναν κόσμο άπειρων δυνατοτήτων, έναν κόσμο ανοιχτό στο μέλλον.

Για το τέλος δίνουμε αυτό που ονομάζεται **αίτημα του Prigogine**. «Όλοι οι νόμοι της φυσικής πρέπει να είναι συμβατοί με την ύπαρξη του βέλους του χρόνου". Και αυτό σημαίνει πως πρέπει οι νόμοι να αναδιατυπωθούν ώστε πρώτον να περιέχουν το βέλος του χρόνου (να μην είναι δηλαδή συμμετρικοί ως προς τον χρόνο) και δεύτερον τα διάφορα επίπεδα περιγραφής να οδηγούν στην ίδια μελλοντική κατάσταση.

Πηγές: Wikipedia, physics4u.gr "Γνωριμία με το έργο του Ilya Prigogine", Paul Davis "Τα τελευταία τρία λεπτά", άρθρο στο ΒΗΜΑ της Δήμητρα Σφενδόνη-Μέντζου (καθηγήτρια της Φιλοσοφίας της Επιστήμης στο ΑΠΘ).