

MANJIT KUMAR

# QUANTUM

Αϊνστάιν, Μπορ και η μεγάλη διαμάχη  
για τη φύση της πραγματικότητας

Μετάφραση  
ΜΑΡΙΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΤΟΥ

Θέση υπογραφής δικαιούχου/ων δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας  
εφόσον η υπογραφή προβλέπεται από τη σύμβαση.

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις της ελληνικής νομοθεσίας (Ν. 2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως άνευ γραπτής αδείας του εκδότη η κατά οποιονδήποτε τρόπο ή μέσο (ηλεκτρονικό, μηχανικό ή άλλο) αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Εκδόσεις Πατάκη – Θετικές επιστήμες

Manjit Kumar, *Quantum. Αίνσταιν, Μπορ και η μεγάλη διαμάχη για τη φύση  
της πραγματικότητας*

Τίτλος πρωτοτύπου: *Quantum. Einstein, Bohr and the great debate  
about the nature of reality*

Μετάφραση: Μαρία Παναγιωτάτου

Υπεύθυνος έκδοσης: Κώστας Γιαννόπουλος

Διορθώσεις: Κώστας Σίμος

Σελιδοποίηση: Παναγιώτης Βογιατζάκης

Φιλμ, ηλεκτρονικό μοντάζ: Μαρία Ποινιού Ρένεση

Copyright© Manjit Kumar, 2008

Copyright© για την ελληνική γλώσσα Σ. Πατάκης ΑΕΕΔΕ

(Εκδόσεις Πατάκη), 2002

Πρώτη έκδοση στην ελληνική γλώσσα από τις Εκδόσεις Πατάκη,

Αθήνα, Δεκέμβριος 2018

KET 3823 ΚΕΠ 967/18

ISBN 978-960-16-3822-5



ΕΚΔΟΣΕΙΣ  
ΠΑΤΑΚΗ

ΠΑΝΑΓΗ ΤΣΑΛΛΑΡΗ (ΠΡΩΗΝ ΠΕΙΡΑΙΩΣ) 38, 104 37 ΑΘΗΝΑ.  
ΤΗΛ.: 210.36.50.000, 210.52.05.600, 801.100.2665, ΦΑΞ: 210.36.50.069  
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ: ΕΜΜ. ΜΠΕΝΑΚΗ 16, 106 78 ΑΘΗΝΑ, ΤΗΛ.: 210.38.31.078  
ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΗΜΑ: ΝΕΑ ΜΟΝΑΣΤΗΡΙΟΥ 122, 563 34 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ,  
ΤΗΛ.: 2310.70.63.54, 2310.70.67.15, ΦΑΞ: 2310.70.63.55  
Web site: <http://www.patakis.gr> . e-mail: [info@patakis.gr](mailto:info@patakis.gr), [sales@patakis.gr](mailto:sales@patakis.gr)

Στους  
Lahmber Ram και Gurmit Kaur  
Pandora, Ravinder και Jasvinder



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος εικόνων .....	11
Πρόλογος.....	15

### ΜΕΡΟΣ Ι: ΤΟ ΚΒΑΝΤΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑ – Ο απρόθυμος επαναστάτης .....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΥΟ – Ο σκλάβος των ευρεσιτεχνιών .....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΑ – Ο χρυσός Δανός .....	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΣΣΕΡΑ – Το κβαντικό άτομο .....	149
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΝΤΕ – Όταν ο Αϊνστάιν γνώρισε τον Μπορ .....	182
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΞΙ – Ο πρίγκιπας της δυϊκότητας .....	219

### ΜΕΡΟΣ ΙΙ: Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΑΓΟΡΙΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΠΤΑ – Οι διδάκτορες του σπιν.....	237
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΚΤΩ – Ο κβαντικός μάγος.....	266
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΝΕΑ – «Ένα όψιμο ερωτικό ξέσπασμα» .....	300
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑ – Αβεβαιότητα στην Κοπεγχάγη .....	335

ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ: ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΤΙΤΑΝΩΝ  
ΓΙΑ ΤΗ ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΤΕΚΑ – Σολβέ 1927 .....	373
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΩΔΕΚΑ – Ο Αϊνστάιν ξεχνά τη σχετικότητα ....	411
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΡΙΑ – Η κβαντική πραγματικότητα .....	438

ΜΕΡΟΣ ΙV: ΠΑΙΖΕΙ Ο ΘΕΟΣ ΖΑΡΙΑ;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΕΣΣΕΡΑ – Για ποιον χτυπά το θεώρημα Μπελ .....	481
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΠΕΝΤΕ – Ο κβαντικός δαίμονας .....	510
Χρονολόγιο.....	523
Γλωσσάρι .....	539
Σημειώσεις .....	557
Βιβλιογραφία.....	603
Ευχαριστίες.....	623
Ευρετήριο.....	625

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

### ΕΙΚΟΝΕΣ ΕΝΤΟΣ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

Σχήμα 1	Τα χαρακτηριστικά ενός κύματος .....	30
Σχήμα 2	Η κατανομή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μέλανος σώματος από την οποία προκύπτει ο νόμος της μετατόπισης του Βιν .....	41
Σχήμα 3	Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο .....	91
Σχήμα 4	Το πείραμα των δύο σχισμών του Γιανγκ .....	98
Σχήμα 5	Ο περιοδικός πίνακας .....	140
Σχήμα 6	Κάποιες από τις στάσιμες καταστάσεις και τις αντίστοιχες ενεργειακές στάθμες του ατόμου του υδρογόνου .....	159
Σχήμα 7	Ενεργειακές στάθμες, φασματικές γραμμές και κβαντικά άλματα .....	163
Σχήμα 8	Οι ηλεκτρονιακές τροχιές για $n = 3$ και $k = 1, 2, 3$ στο μοντέλο Μπορ-Ζόμμερφελτ για το άτομο του υδρογόνου .....	177
Σχήμα 9	Στάσιμα κύματα σε χορδή με στερεωμένα και τα δύο άκρα της .....	226
Σχήμα 10	Στάσιμα ηλεκτρονιακά κύματα στο κβαντικό άτομο .....	227

Σχήμα 11	Κυματοπακέτο διαμορφωμένο από την υπέρθεση μιας ομάδας κυμάτων.....	321
Σχήμα 12	Καθορισμός της θέσης ενός κύματος αλλά όχι του μήκους κύματος· μέτρηση του μήκους κύματος αλλά όχι της θέσης .....	356
Σχήμα 13	Το νοητικό πείραμα μονής σχισμής του Αϊνστάιν.....	388
Σχήμα 14	Η απόδοση από τον Μπορ του νοητικού πειράματος μονής σχισμής του Αϊνστάιν.....	389
Σχήμα 15	Το νοητικό πείραμα των δύο σχισμών του Αϊνστάιν.....	393
Σχήμα 16	Το κινητό πρώτο πέτασμα, όπως το σχεδίασε ο Μπορ.....	396
Σχήμα 17	Το πείραμα των δύο σχισμών με δύο σχισμές ανοιχτές και με μία σχισμή κλειστή .....	398
Σχήμα 18	Η απόδοση από τον Μπορ του κουτιού φωτός του Αϊνστάιν .....	416



## ΕΝΘΕΤΟ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ

- i. Το πέμπτο συνέδριο Σολβέ, 1927
- ii. Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν το 1912
- iii. Νιλς Μπορ
- iv. Μαξ Πλανκ
- v. «Η Ολυμπιακή Ακαδημία»
- vi. Πολ Ντιράκ
- vii. Λουί ντε Μπρέιγ
- viii. Έρνεστ Ράδεροφοντ
- ix. Βόλφγκανγκ Πάουλι
- x. Έρβιν Σρέντινγκερ
- xi. Βέρνερ Χάιζενμπεργκ
- xii. Μαξ Μπορν, Νιλς Μπορ και άλλοι



Πρόλογος

## Η ΣΥΝΑΝΤΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΓΑΛΩΝ ΠΝΕΥΜΑΤΩΝ

Ο Πάουλ Έρενφεςτ ήταν δακρυσμένος και αποφασισμένος. Σε λίγο, θα παρευρισκόταν σε μια συγκέντρωση, όπου πολλοί από τους πρωτεργάτες της κβαντικής επανάστασης θα αφιέρωναν μία εβδομάδα στην επεξεργασία των ιδεών που τους απασχολούσαν. Εκεί, θα έπρεπε να πει στον παλιό του φίλο Άλμπερτ Αϊνστάιν ότι είχε επιλέξει να συνταχτεί με τον Νιλς Μπορ. Ο Έρενφεςτ, ο 34χρονος Αυστριακός, καθηγητής θεωρητικής φυσικής στο Πανεπιστήμιο του Λάιντεν στην Ολλανδία, είχε πειστεί ότι το ατομικό βασίλειο ήταν τόσο παράξενο και ασύλληπτο όσο υποστήριζε ο Μπορ.<sup>1</sup>

Όταν κάθισαν γύρω από το τραπέζι, ο Έρενφεςτ έγραψε βιαστικά ένα σημείωμα στον Αϊνστάιν: «Μη γελάσεις! Υπάρχει ειδικό τμήμα στο καθαρήριο για καθηγητές της κβαντικής θεωρίας, όπου υποχρεώνονται να ακούνε δέκα ώρες κάθε μέρα διαλέξεις κλασικής φυσικής».<sup>2</sup> «Γελάω μόνο με την αφέλειά τους», απάντησε ο Αϊνστάιν.<sup>3</sup> «Ποιος θα γελάσει άραγε τελευταίος ύστερα από μερικά χρόνια;» Για τον ίδιο τον Αϊνστάιν, το ζήτημα δεν ήταν καθόλου για γέλια, καθώς

αυτό που διακυβευόταν ήταν η ίδια η φύση της πραγματικότητας και η ψυχή της φυσικής.

Η φωτογραφία με όσους συγκεντρώθηκαν στο πέμπτο συνέδριο Σολβέ με θέμα «Ηλεκτρόνια και φωτόνια», που πραγματοποιήθηκε στις Βρυξέλλες από τις 24 έως τις 29 Οκτωβρίου του 1927, συνοψίζει την πιο δραματική περίοδο στην ιστορία της φυσικής. Το συνέδριο εκείνο αποτέλεσε μια από τις πιο αλησμόνητες συναντήσεις μεγάλων πνευμάτων που έγιναν ποτέ, καθώς οι δεκαεπτά από τους είκοσι εννέα προσκεκλημένους είτε έμελλε να τιμηθούν είτε είχαν ήδη τιμηθεί με ένα βραβείο Νόμπελ.<sup>4</sup> Σηματοδότησε το τέλος μιας χρυσής εποχής για τη φυσική, μιας περιόδου επιστημονικής δημιουργικότητας χωρίς προηγούμενο από την επιστημονική επανάσταση του 17ου αιώνα –πρωτοπόροι της οποίας υπήρξαν ο Γαλιλαίος και ο Νεύτωνας– και μετά.

Ο Πάουλ Έρενφεςτ στέκεται τρίτος από αριστερά στην πίσω σειρά, ελαφρώς σκυμμένος. Στην πρώτη σειρά κάθονται εννέα παρευρισκόμενοι. Οκτώ άντρες και μία γυναίκα· έξι από αυτούς τιμήθηκαν με βραβείο Νόμπελ στη φυσική ή στη χημεία. Η γυναίκα της παρέας έχει δύο· ένα στη φυσική το 1903, και ένα ακόμα στη χημεία το 1911. Το όνομά της: Μαρί Κιουρί. Στην τιμητική θέση, στο κέντρο, κάθεται ένας ακόμα διακεκριμένος νομπελίστας, ο πιο φημισμένος επιστήμονας από την εποχή του Νεύτωνα: ο Άλμπερτ Αϊνστάιν. Με το βλέμμα ευθεία μπροστά και το δεξί του χέρι σφιχτά πάνω στην καρέκλα, δε μοιάζει να νιώθει και πολύ άνετα. Να φταίνε άραγε το σκληρό κολάρο και η γραβάτα του, ή όλα αυτά που άκουσε στη διάρκεια της προηγούμενης εβδομάδας; Στο τέλος της δεύτερης σειράς, από τα δεξιά, βρίσκεται ο Νιλς Μπορ, χαλαρός, και με ένα ελαφρώς αινιγματικό χαμόγελο. Για τον ίδιο, το συνέδριο πήγε καλά. Παρ' όλα αυτά, στη Δανία ο Μπορ θα επέστρεφε απογοητευμένος, μην έχοντας κατορθώσει να πείσει τον Αϊνστάιν για την ορθότητα της δικής του ερμηνείας, της «ερμηνείας της Κοπεγχάγης», σχετικά με το τι αποκάλυπτε η κβαντική μηχανική γύρω από τη φύση της πραγματικότητας.

Αντί να του κάνει το χατίρι όμως, ο Αϊνστάιν αφιέρωσε ολόκληρη την εβδομάδα που προηγήθηκε στην προσπάθεια να δείξει ότι η κβαντική μηχανική ήταν ασυνεπής και ότι η κατά Μπορ ερμηνεία της Κοπεγχάγης είχε ατέλειες. Ύστερα από λίγα χρόνια, ο Αϊνστάιν θα έλεγε για την κβαντική θεωρία: «Μου θυμίζει λίγο το σχήμα των ψευδαισθήσεων που κατασκευάζει ένας απίστευτα ευφυής παρανοϊκός, βασιζόμενος σε σκόρπιες και ασυνάρτητες σκέψεις».<sup>5</sup>

Ο Μαξ Πλανκ, που κάθεται δεξιά της Μαρί Κιουρί κρατώντας το καπέλο του και ένα τσιγάρο, ήταν αυτός που ανακάλυψε το κβάντο. Το 1900, αναγκάστηκε να αποδεχτεί ότι η ενέργεια του φωτός και όλα τα άλλα είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εκπέμπονται ή απορροφώνται από την ύλη μόνο κατά τμήματα, συσκευασμένα σε διάφορα μεγέθη. «Κβάντο» ήταν το όνομα που έδωσε ο Πλανκ στο μεμονωμένο αυτό πακέτο ενέργειας.\* Το κβάντο ενέργειας συνιστούσε ριζική ρήξη με την προ πολλού καθιερωμένη ιδέα ότι η ενέργεια εκπέμπεται ή απορροφάται με συνεχή τρόπο, σαν το νερό που τρέχει από τη βρύση. Μπορεί στον καθημερινό κόσμο των μακροσκοπικών αντικειμένων, όπου η φυσική του Νεύτωνα κυριαρχεί απόλυτα, το νερό να στάζει ακανόνιστα από τη βρύση, η ενέργεια όμως δεν ανταλλάσσεται με τη μορφή «σταγονιδίων» διαφόρων μεγεθών. Εντούτοις, το ατομικό και το υποατομικό επίπεδο της πραγματικότητας ανήκαν στην κβαντική επικράτεια.

Με τον καιρό, ανακαλύφθηκε ότι η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου στο εσωτερικό του ατόμου είναι «κβαντωμένη»: μόνο συγκεκριμένα ποσά ενέργειας επιτρέπονταν δηλαδή, και όχι άλλα. Το ίδιο αλήθευε και για άλλες φυσικές ιδιότητες, καθώς το μικροσκοπικό βασίλειο αποκαλύφθηκε ότι διέθετε «κοκκώδη» και ασυνεχή υφή, και δεν αποτελούσε κάποια συρρικνωμένη εκδοχή του μεγάλης κλίμακας κόσμου της καθημερι-

---

\* Ο όρος «κβάντο» προέρχεται από τη λατινική λέξη «quantum» που σημαίνει «ποσό» (Σ.τ.Μ.)

νότητάς μας, όπου οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων κυμαίνονται με έναν ομαλό και συνεχή τρόπο, και όπου η διαδρομή από το Α στο Γ περνά υποχρεωτικά από το Β. Η κβαντική φυσική, αντίθετα, αποκάλυψε ότι ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να βρισκείται σε ένα μέρος και έπειτα, ως διά μαγείας, κατόπιν εκπομπής ή απορρόφησης ενός κβάντου ενέργειας, να εμφανιστεί κάπου αλλού, χωρίς να έχει περάσει από πουθενά ενδιάμεσα. Το φαινόμενο αυτό ήταν αδιανόητο για την κλασική, μη κβαντική φυσική. Ήταν τόσο αλλόκοτο όσο το να εξαφανιστεί ένα αντικείμενο στο Λονδίνο και αιφνιδίως την επόμενη στιγμή να εμφανιστεί στο Παρίσι, τη Νέα Υόρκη ή τη Μόσχα.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1920, ήταν ήδη από καιρό φανερό ότι η *ad hoc* και αποσπασματική πρόοδος της κβαντικής φυσικής την είχε αφήσει χωρίς στέρεη θεμελίωση ή λογική δομή. Από αυτή την κατάσταση σύγχυσης και κρίσης αναδύθηκε μια νέα τολμηρή θεωρία, γνωστή ως κβαντική μηχανική. Η εικόνα του ατόμου ως μικροσκοπικού ηλιακού συστήματος, όπου τα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από έναν πυρήνα, εικόνα η οποία διδάσκεται ακόμα και σήμερα στα σχολεία, εγκαταλείφθηκε και αντικαταστάθηκε από ένα άτομο η εικόνα του οποίου είναι αδύνατο να συλληφθεί νοητικά. Επιπλέον, το 1927, ο Βέρνερ Χάιζενμπεργκ έκανε μια ανακάλυψη τόσο αντίθετη με την κοινή λογική ώστε μέχρι και αυτός αρχικά, το παιδί θαύμα της κβαντικής μηχανικής από τη Γερμανία, αγωνίστηκε να συλλάβει τη σημασία της. Η αρχή της αβεβαιότητας ορίζει ότι, αν θέλουμε να μάθουμε την ακριβή ταχύτητα ενός σωματιδίου, τότε δε θα μπορέσουμε να μάθουμε την ακριβή του θέση, και το αντίστροφο.

Κανείς δεν ήξερε πώς να ερμηνεύσει τις εξισώσεις της κβαντικής μηχανικής, τι συνεπαγόταν δηλαδή η θεωρία αυτή για τη φύση της πραγματικότητας στο κβαντικό επίπεδο. Ερωτήματα σχετικά με την αιτία και το αποτέλεσμα, ή με το αν υπάρχει το φεγγάρι όταν δεν το κοιτά κανείς, απασχο-

λούσαν τους φιλοσόφους από την εποχή του Πλάτωνα και του Αριστοτέλη· μετά την εμφάνιση όμως της κβαντικής μηχανικής, τα ερωτήματα αυτά αποτέλεσαν πλέον αντικείμενο συζητήσεων για τους μεγαλύτερους φυσικούς του 20ού αιώνα.

Με την κβαντική φυσική πλέον διαμορφωμένη στις βασικές της γραμμές, το πέμπτο συνέδριο Σολβέ άνοιξε ένα νέο κεφάλαιο στην ιστορία του κβάντου, καθώς η διαμάχη που άναψε εκεί μεταξύ Αϊνστάιν και Μπορ ήγειρε θέματα που συνεχίζουν μέχρι και σήμερα να απασχολούν πολλούς διαπρεπείς φυσικούς και φιλοσόφους: ποια είναι η φύση της πραγματικότητας και ποια περιγραφή της μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει νόημα; «Δεν έχει υπάρξει εμβριθέστερη πνευματική έριδα», ισχυρίστηκε ο επιστήμονας και συγγραφέας Τσ. Π. Σνόου. «Είναι κρίμα που η διαμάχη αυτή δεν μπορεί να γίνει κοινό κτήμα εξαιτίας της φύσης της».<sup>6</sup>

Ο Αϊνστάιν, ο ένας από τους δύο κύριους πρωταγωνιστές, αποτελεί ίνδαλμα του 20ού αιώνα. Κάποτε του ζητήθηκε να οργανώσει για τρεις εβδομάδες το δικό του σόου στο Palladium του Λονδίνου. Οι γυναίκες λιποθυμούσαν μπροστά του. Νεαρές κοπέλες τον πολιορκούσαν στη Γενεύη. Στις ημέρες μας, συναντάμε αυτό το είδος λατρείας απέναντι σε τραγουδιστές της ποπ και κινηματογραφικούς αστέρες. Όταν το 1919, αμέσως μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, επιβεβαιώθηκε η καμπύλωση της τροχιάς του φωτός που προέβλεπε η θεωρία του της γενικής σχετικότητας, ο Αϊνστάιν έγινε ο πρώτος σούπερ σταρ της επιστήμης. Όταν, τον Ιανουάριο του 1931, ο Αϊνστάιν παρευρέθηκε, στο πλαίσιο μιας σειράς διαλέξεών του στην Αμερική, στην πρεμιέρα της ταινίας τού Τσάρλι Τσάπλιν *Τα φώτα της πόλης* στο Λος Άντζελες, λίγα είχαν αλλάξει. Με το που φάνηκαν ο Τσάπλιν και ο Αϊνστάιν, το συγκεντρωμένο πλήθος κατελήφθη από φρενιτιδα. «Εμένα με επευφημούν επειδή με καταλαβαίνουν όλοι», είπε ο Τσάπλιν στον Αϊνστάιν, «και εσένα σε επευφημούν επειδή δε σε καταλαβαίνει κανείς».<sup>7</sup>

Ενώ το όνομα Αϊνστάιν είναι συνώνυμο της επιστημονικής ιδιοφυΐας, ο Νιλς Μπορ, αντιθέτως, ήταν και παραμένει λιγότερο γνωστός. Ωστόσο, για τους σύγχρονους του, ήταν πέρα ως πέρα ένας γίγαντας της επιστήμης. Το 1923, ο Μαξ Μπορν, που διαδραμάτισε κεντρικό ρόλο στην ανάπτυξη της κβαντικής μηχανικής, έγραψε ότι η επιρροή του Μπορ «στη θεωρητική και πειραματική έρευνα της εποχής μας είναι μεγαλύτερη από οποιουδήποτε άλλου φυσικού».<sup>8</sup> Και σαράντα χρόνια αργότερα, το 1963, ο Βέρνερ Χάιζενμπεργκ επιβεβαίωσε ότι «η επιρροή του Μπορ στη φυσική και τους φυσικούς του αιώνα μας ήταν ισχυρότερη από κάθε άλλου, ακόμα και από αυτήν του Άλμπερτ Αϊνστάιν».<sup>9</sup>

Όταν ο Αϊνστάιν και ο Μπορ συναντήθηκαν για πρώτη φορά στο Βερολίνο το 1920, βρήκαν ο ένας στο πρόσωπο του άλλου έναν πνευματικό αντίπαλο με τον οποίο θα μπορούσαν να αναμετρηθούν χωρίς πικρίες ή μνησικαχίες, αλλά ωθώντας και κεντρίζοντας ο ένας τον άλλο ώστε να εκλεπτύνουν και να επεξεργαστούν περαιτέρω τις σκέψεις τους γύρω από το κβάντο. Μέσα από το δίδυμο αυτό και μερικούς ακόμα που συγκεντρώθηκαν το 1927 στο Σολβέ, θα προσεγγίσουμε τα πρωτοποριακά χρόνια της κβαντικής φυσικής. «Ήταν μια εποχή ηρωική», θυμάται ο Αμερικανός φυσικός Ρόμπερτ Οππενχάιμερ, φοιτητής ακόμα τη δεκαετία του 1920.<sup>10</sup> «Ήταν μια περίοδος υπομονετικής δουλειάς στο εργαστήριο, κρίσιμων πειραμάτων και τολμηρών ενεργειών, με πλήθος λανθασμένων εκκινήσεων και αβάσιμων υποθέσεων· μια εποχή παθιασμένης αλληλογραφίας και βιαστικών συνεδρίων, με διαμάχες, κριτικές και λαμπρούς μαθηματικούς αυτοσχεδιασμούς. Για όσους συμμετείχαν, ήταν μια εποχή δημιουργίας». Για τον Οππενχάιμερ όμως, τον πατέρα της ατομικής βόμβας: «Οι νέες ιδέες τους δημιουργούσαν εξίσου αισθήματα τρόμου όσο και έκστασης».

Χωρίς το κβάντο, ο κόσμος στον οποίο ζούμε θα ήταν πολύ διαφορετικός. Εντούτοις, στο μεγαλύτερο μέρος του 20ού αιώνα, οι φυσικοί αποδέχτηκαν ότι η κβαντική μηχανική



αρνείται την ύπαρξη μιας πραγματικότητας πέραν των όσων είναι δυνατόν να μετρηθούν στα πειράματά τους. Η κατάσταση των πραγμάτων ήταν τέτοια, ώστε ο βραβευμένος με Νόμπελ Αμερικανός φυσικός Μάρρεϋ Γκελ-Μαν όρισε την κβαντική μηχανική ως «εκείνη τη μυστηριώδη και αλλοπρόσαλλη επιστημονική θεωρία που κανένας από εμάς δεν καταλαβαίνει πραγματικά, αλλά που ξέρουμε πώς να τη χρησιμοποιούμε».<sup>11</sup> Και αυτό ακριβώς κάναμε: τη χρησιμοποιήσαμε. Η κβαντική μηχανική κινεί και διαμορφώνει τον σύγχρονο κόσμο καθιστώντας τα πάντα γύρω μας δυνατά, από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές μέχρι τα πλυντήρια, και από τα κινητά τηλέφωνα μέχρι τα πυρηνικά όπλα.

Η ιστορία του κβάντου αρχίζει στα τέλη του 19ου αιώνα, όταν πολλοί φυσικοί –παρά τις πρόσφατες ανακαλύψεις του ηλεκτρονίου, των ακτίνων X και της ραδιενέργειας, καθώς και τη συνεχιζόμενη φιλονικία γύρω από το αν υπάρχουν τα άτομα ή όχι– αισιοδοξούσαν πως τίποτα μείζον δεν είχε απομείνει να αποκαλυφθεί. «Οι πιο σημαντικοί θεμελιώδεις νόμοι και γεγονότα της φυσικής επιστήμης έχουν όλα ανακαλυφθεί, και είναι σήμερα τόσο σταθερά εδραιωμένα, ώστε η πιθανότητα να αντικατασταθούν κάποτε λόγω νέων ανακαλύψεων φαντάζει εξαιρετικά μακρινή», δήλωσε το 1899 ο Αμερικανός φυσικός Άλμπερτ Μάικελσον. «Οι μελλοντικές μας ανακαλύψεις», υποστήριξε, «θα πρέπει να αναζητηθούν στο έκτο δεκαδικό ψηφίο».<sup>12</sup> Πολλοί συμμαρτίζονταν την άποψη του Μάικελσον για μια φυσική των δεκαδικών ψηφίων, πιστεύοντας ότι τα όποια άλυτα προβλήματα ελάχιστες προκλήσεις έθεταν για την καθιερωμένη φυσική, και αργά ή γρήγορα θα ενσωματώνονταν στις θεωρίες και τις αρχές που είχαν αντέξει στον χρόνο.

Κι όμως, από το 1871 κιόλας, ο Τζέιμς Κλερκ Μάξγουελ, ο μεγαλύτερος θεωρητικός φυσικός του 19ου αιώνα, μας είχε επιστήσει την προσοχή απέναντι σε αυτού του είδους την αυταρέσκεια: «Το στοιχείο αυτό των σύγχρονων πειραμάτων –ότι συνίστανται, δηλαδή, κυρίως σε μετρήσεις– είναι τόσο

χαρακτηριστικό, ώστε η άποψη που φαίνεται να κυκλοφορεί ευρέως είναι πως, σε μερικά χρόνια, όλες οι σπουδαίες φυσικές σταθερές θα έχουν υπολογιστεί κατά προσέγγιση, και η μόνη ασχολία που θα έχει απομείνει στους ανθρώπους της επιστήμης θα είναι να διεξάγουν συνεχώς νέες μετρήσεις, κυνηγώντας περισσότερα δεκαδικά ψηφία». <sup>13</sup> Ο Μάξγουελ επισήμανε ότι η πραγματική ανταμοιβή που έρχεται με την «επίμοχθη ακρίβεια στη μέτρηση» δεν είναι η επίτευξη όντως μεγαλύτερης ακρίβειας αλλά η «ανακάλυψη νέων πεδίων έρευνας» και «η ανάπτυξη νέων επιστημονικών ιδεών». <sup>14</sup> Η ανακάλυψη του κβάντου υπήρξε το αποτέλεσμα μιας τέτοιας «επίμοχτης ακρίβειας στη μέτρηση».

Τη δεκαετία του 1890, ορισμένοι από τους πρωτοπόρους φυσικούς της Γερμανίας βασανίζονταν από ένα ερώτημα που τους προβλημάτιζε για πολύ καιρό: ποια είναι η σχέση ανάμεσα στη θερμοκρασία, την κλίμακα των χρωμάτων και την ένταση του φωτός που εκπέμπεται από μια θερμή σιδερένια τσιμπίδα; Το πρόβλημα έμοιαζε τετριμμένο συγκρινόμενο με το μυστήριο των ακτίνων X και της ραδιενέργειας που έκαναν τους φυσικούς να σπεύδουν στα εργαστήριά τους ή να πιάνουν τα σημειωματάρια τους. Για ένα έθνος, όμως, που συγκροτήθηκε μόλις το 1871, η αναζήτηση της λύσης στο πρόβλημα της θερμής σιδερένιας τσιμπίδας ή, όπως έγινε γνωστό, «στο πρόβλημα του μέλανος σώματος», συνδέθηκε στενά με την ανάγκη να αποκτήσει η γερμανική βιομηχανία φωτισμού ανταγωνιστικό προβάδισμα έναντι των Βρετανών και Αμερικανών αντιπάλων της. Παρά τις προσπάθειές τους όμως, οι καλύτεροι φυσικοί της Γερμανίας δεν έβρισκαν τη λύση. Το 1896 πίστεψαν ότι τα κατάφεραν, για να ανακαλύψουν σύντομα, μέσα στα επόμενα χρόνια, και υπό το φως νέων πειραματικών δεδομένων, ότι είχαν κάνει λάθος. Ο Μαξ Πλανκ ήταν ο άνθρωπος που έλυσε το πρόβλημα του μέλανος σώματος, και με το ανάλογο τίμημα: το κβάντο.

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ  
ΤΟ ΚΒΑΝΤΟ

*«Εν ολίγοις, αυτό που έκανα θα μπορούσε να περιγραφεί απλώς ως μια πράξη απόγνωσης».*

—Μαξ Πλανκ

*«Ήταν σαν να είχε υποχωρήσει το έδαφος κάτω από τα πόδια μας, χωρίς να διαφαίνονται πουθενά σταθερά θεμέλια, πάνω στα οποία θα μπορούσε κανείς να χτίσει».*

—Άλμπερτ Αϊνστάιν

*«Όσοι δεν αιφνιδιάστηκαν όταν συνάντησαν για πρώτη φορά την κβαντική θεωρία, μάλλον δε θα την κατάλαβαν».*

—Νιλς Μπορ



## Ο ΑΠΡΟΘΥΜΟΣ ΕΠΑΝΑΣΤΑΤΗΣ

«Οι νέες αλήθειες της επιστήμης δε θριαμβεύουν επειδή πείθουν και διαφωτίζουν τους αντιπάλους τους, αλλά μάλλον διότι οι αντίπαλοί τους κάποια στιγμή πεθαίνουν, και μια νέα γενιά μεγαλώνει εξοικειωμένη με αυτές», έγραψε ο Μαξ Πλανκ προς το τέλος της μακρόχρονης ζωής του.<sup>1</sup> Η δήλωσή του αυτή, κινούμενη στα όρια του κλισέ, θα ήταν ιδανική ως η επιστημονική του νεκρολογία, αν δεν είχε εγκαταλείψει σε μια «πράξη απόγνωσης» ιδέες που για πολύ καιρό τού ήταν προσφιλείς.<sup>2</sup> Με το σκούρο κοστούμι του, το κολλαριστό άσπρο πουκάμισο και το μαύρο παπιγιόν, ο Πλανκ θα έμοιαζε με το αρχέτυπο του Πρώσου δημοσίου υπαλλήλου στα τέλη του 19ου αιώνα, αν δε διέθετε εκείνα «τα διαπεραστικά μάτια κάτω από τον τεράστιο θόλο της φαλακρής κεφαλής του».<sup>3</sup> Με το χαρακτηριστικό στιλ του γραφειοκράτη, ήταν εξαιρετικά προσεκτικός προτού πάρει θέση σε ζητήματα της επιστήμης ή σε οτιδήποτε άλλο. «Το ρητό μου είναι πάντοτε αυτό», είπε κάποτε σε έναν φοιτητή, «να εξετάζεις πρώτα κάθε βήμα προσεκτικά: μετά όμως, αν πιστεύεις ότι

μπορείς να αναλάβεις την ευθύνη για αυτό, μην αφήνεις τίποτα να σε σταματήσει». <sup>4</sup> Ο Πλανκ δεν ήταν ο άνθρωπος που άλλαζε εύκολα γνώμη.

Η συμπεριφορά και η εμφάνισή του δεν είχαν αλλάξει σχεδόν καθόλου όταν, τη δεκαετία του 1920, όπως θυμούνταν κάποιοι αργότερα, «φαινόταν αδιανόητο ότι ο άνθρωπος αυτός είχε εγκαινιάσει την επανάσταση». <sup>5</sup> Ο απρόθυμος επαναστάτης, άλλωστε, μόλις και μετά βίας μπορούσε να το πιστέψει και ο ίδιος. Όπως ομολογούσε, είχε «ειρηνική προδιάθεση» και απέφευγε «τις αμφίβολες ατραπούς». <sup>6</sup> Ομολογούσε ότι του έλειπε «η ικανότητα να αντιδρά γρήγορα σε πνευματικά ερεθίσματα». <sup>7</sup> Συχνά, χρειαζόταν χρόνια προκειμένου να συμβιβάσει τις νέες ιδέες με τον βαθιά ριζωμένο συντηρητισμό του. Ωστόσο, σε ηλικία 42 ετών, ο Πλανκ ήταν εκείνος που άθελά του εγκαινιάσε την κβαντική επανάσταση τον Δεκέμβριο του 1900, όταν ανακάλυψε την εξίσωση για την κατανομή της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα.

Κάθε αρκετά θερμό αντικείμενο ακτινοβολεί ένα μείγμα θερμότητας και φωτός με ένταση και χρώμα που μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Αν αφήσουμε στη φωτιά μια σιδερένια τσιμπίδα, η άκρη της θα αρχίσει να λάμπει με ένα ανεπαίσθητο και μουντό κόκκινο· και καθώς θα αυξάνεται η θερμοκρασία της, το χρώμα θα γίνει διαδοχικά ανοιχτό κόκκινο, φωτεινό πορτοκαλοκίτρινο, και τελικά γαλαζωπό-λευκό. Μόλις τη βγάλουμε από τη φωτιά, θα κρυώσει, διατρέχοντας ξανά το φάσμα των χρωμάτων αυτών, αλλά προς τα πίσω τώρα, μέχρις ότου δε θα είναι πλέον αρκετά θερμή ώστε να εκπέμπει οποιοδήποτε ορατό φως. Ακόμα και τότε, όμως, εξακολουθεί να υπάρχει μια αόρατη εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας, η οποία, ύστερα από κάποιο χρονικό διάστημα, θα σταματήσει επίσης, καθώς η ψυχόμενη τσιμπίδα κρυώνει τελικά αρκετά ώστε να μπορεί κανείς να την αγγίξει.

Ο Ισαάκ Νεύτων ήταν ο άνθρωπος που, σε ηλικία 23 ετών,

το 1666, έδειξε ότι μια δέσμη λευκού φωτός συνυφαίνεται από ένα πλήθος έγχρωμων «ινών» και ότι το φως αυτό ξεδιπλώνεται σε επτά χωριστά νήματα –ερυθρό, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, κυανό, μπλε και ιώδες– όταν διέλθει μέσα από ένα πρίσμα.<sup>8</sup> Το ερώτημα κατά πόσον το ερυθρό και το ιώδες αντιπροσωπεύουν τα όρια του φωτεινού φάσματος ή απλώς της ανθρώπινης όρασης απαντήθηκε το 1800. Τότε ήταν που, με την έλευση των θερμομέτρων υδραργύρου επαρκούς ευαισθησίας και ακρίβειας, ο αστρονόμος Γουίλλιαμ Χέρσελ τοποθέτησε ένα τέτοιο θερμόμετρο μπροστά στο φάσμα του φωτός, ανακαλύπτοντας ότι, καθώς το μετακινούσε κατά μήκος των λωρίδων με τα διαφορετικά χρώματα από το ιώδες στο ερυθρό, η θερμοκρασία του αυξανόταν. Διαπίστωσε, μάλιστα, έκπληκτος ότι η θερμοκρασία του αυξανόταν κι άλλο όταν το άφησε τυχαία δύο εκατοστά πέρα από την περιοχή του ερυθρού φωτός. Ο Χέρσελ είχε μόλις ανιχνεύσει –μέσω της θερμότητας που προκαλούσε– αυτό που αργότερα ονομάστηκε υπέρυθη (infrared) ακτινοβολία, περιοχή του φωτός που δεν είναι αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι.<sup>9</sup> Το 1801, ο Γιόχαν Ρίττερ, αξιοποιώντας την ιδιότητα του νιτρικού αργύρου να σκουραίνει όταν εκτίθεται σε φως, ανακάλυψε νέες περιοχές αόρατου φωτός πέρα από το ιώδες, στο άλλο άκρο δηλαδή του φάσματος: την υπεριώδη (ultraviolet) ακτινοβολία.

Το γεγονός ότι όλα τα θερμά αντικείμενα εκπέμπουν φως του ίδιου χρώματος στην ίδια θερμοκρασία το γνώριζαν καλά οι αγγειοπλάστες πολύ πριν από το 1859, τη χρονιά δηλαδή που ο Γκούσταφ Κίρχοφ, ένας 34χρονος Γερμανός φυσικός στο Πανεπιστήμιο της Χαϊδελβέργης, άρχισε τις θεωρητικές του έρευνες πάνω στη φύση αυτής της συσχέτισης. Για να απλουστεύσει την ανάλυσή του, ο Κίρχοφ εισήγαγε σε αυτήν έναν τέλειο δέκτη και πομπό ακτινοβολίας, το λεγόμενο μέλαν σώμα. Η επιλογή της ονομασίας ήταν εύστοχη: όταν ένα σώμα απορροφά πλήρως ακτινοβολία δεν την ανακλά, και ως εκ τούτου φαίνεται μαύρο. Εντούτοις, και ως τέλειος πομπός

ακτινοβολίας, θα είχε και κάθε άλλο χρώμα εκτός από το μαύρο, αν η θερμοκρασία του ήταν αρκετά υψηλή ώστε να ακτινοβολεί στα μήκη κύματος του ορατού φάσματος.

Ο Κίρχοφ φαντάστηκε το υποθετικό του μέλαν σώμα ως ένα απλό κλειστό δοχείο, με μια μικροσκοπική οπή σε ένα από τα τοιχώματά του. Η εν λόγω οπή, διαμέσου της οποίας εισέρχεται στο δοχείο κάθε είδους ακτινοβολία –από το ορατό ή το αόρατο φάσμα του φωτός–, αποτελεί ουσιαστικά τον τέλειο δέκτη του παραδείγματός μας και δρα σαν μέλαν σώμα. Εισερχόμενη στο δοχείο, η ακτινοβολία ανακλάται διαδοχικά στα τοιχώματα της εσωτερικής κοιλότητας μέχρι να απορροφηθεί εντελώς. Ο Κίρχοφ θεώρησε ότι η εξωτερική όψη του μέλανος σώματος θα είναι μονωμένη, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία που εισέρχεται στην εσωτερική κοιλότητα να επανεκπέμπεται μόνο από τις εσωτερικές του επιφάνειες, όταν θερμανθεί.

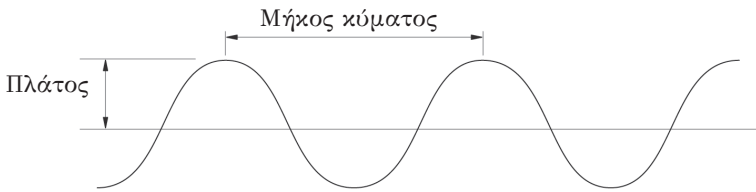
Σε πρώτη φάση, το εσωτερικό τοίχωμα εκπέμπει –όπως ακριβώς και μια θερμαινόμενη σιδερένια τσιμπίδα– ένα βαθύ ροζ κόκκινο, αν και το κύριο κομμάτι της ακτινοβολίας προέρχεται ακόμα από την υπέρυθη περιοχή. Έπειτα, καθώς η θερμοκρασία συνεχίζει να ανεβαίνει, το εσωτερικό τοίχωμα εκπέμπει ένα γαλαζωπό-λευκό χρώμα, ακτινοβολώντας σε μήκη κύματος από το ένα άκρο του φάσματος στο άλλο, από το άπυ υπέρυθρο στο υπεριώδες. Η οπή του δοχείου συμπεριφέρεται σαν ένας τέλειος πομπός ακτινοβολίας, καθώς οποιαδήποτε ακτινοβολία διαφεύγει μέσω αυτής είναι ενδεικτική όλων των μηκών κύματος που υπάρχουν στο εσωτερικό της κοιλότητας στη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Ο Κίρχοφ απέδειξε μαθηματικά αυτό που οι αγγειοπλάστες είχαν παρατηρήσει προ πολλού στα καμίνια τους. Σύμφωνα με τον νόμο του, η διακύμανση και η ένταση της ακτινοβολίας στο εσωτερικό μιας κοιλότητας είναι ανεξάρτητες από το υλικό από το οποίο θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένα πραγματικό μέλαν σώμα ή από το σχήμα και το μέγεθος του· εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία του. Ο Κίρχοφ



είχε αναγάγει ευφυώς το πρόβλημα της θερμαινόμενης σιδερένιας τσιμπίδας στο εξής απλό ερώτημα: Ποια είναι η ακριβής σχέση ανάμεσα στο εύρος και την ένταση των χρωμάτων που εκπέμπονται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και στο ποσό της ενέργειας που ακτινοβολείται στην ίδια θερμοκρασία από ένα μέλαν σώμα; Το πρόβλημα που είχαν αναλάβει να λύσουν ο Κίρχοφ και οι συνάδελφοί του έγινε γνωστό ως το πρόβλημα του μέλανος σώματος: για δεδομένη θερμοκρασία, έπρεπε να μετρηθεί η φασματική κατανομή της ενέργειας από την ακτινοβολία του μέλανος σώματος –δηλαδή το ποσό ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε μήκος κύματος– από την υπέρυθρη έως στην υπεριώδη περιοχή, καθώς και να βρεθεί ένας τύπος που να αναπαράγει την κατανομή σε κάθε θερμοκρασία.

Ο Κίρχοφ, παρόλο που δε θα μπορούσε να προχωρήσει στη θεωρία του δίχως πειραματική καθοδήγηση από ένα πραγματικό μέλαν σώμα, είχε ωστόσο δείξει στους φυσικούς τη σωστή κατεύθυνση: είχε απαλείψει το υλικό κατασκευής του μέλανος σώματος ως γενεσιουργό παράγοντα της φασματικής κατανομής, κάτι που συνεπαγόταν ότι ο τύπος που αναζητούσαν θα έπρεπε να περιέχει μόνο δύο μεταβλητές: τη θερμοκρασία του μέλανος σώματος και το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Καθώς το φως θεωρούνταν κύμα, κάθε μεμονωμένο χρώμα ή απόχρωση διακρινόταν από οποιοδήποτε άλλο με βάση μια συγκεκριμένη χαρακτηριστική του ιδιότητα: το μήκος κύματός του, την απόσταση δηλαδή μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων του κύματος. Η συχνότητα του κύματος –ο αριθμός των κορυφών ή κοιλάδων που περνούν από ορισμένο σημείο ανά δευτερόλεπτο– είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μικρότερη είναι η συχνότητα, και το αντίστροφο. Υπάρχει και ένας ακόμα τρόπος –διαφορετικός μεν, ισοδύναμος δε– για τη μέτρηση της συχνότητας ενός κύματος: από το πόσες φορές «ανεβοκατεβαίνει», ή «κυματίζει», ανά δευτερόλεπτο.<sup>10</sup>



Σχήμα 1: Τα χαρακτηριστικά ενός κύματος

Οι τεχνικές δυσκολίες για την κατασκευή ενός πραγματικού μέλανος σώματος, καθώς και των απαιτούμενων οργάνων ακριβείας για την ανίχνευση και μέτρηση της ακτινοβολίας, απέκλεισαν οποιαδήποτε σημαντική αλλαγή για σχεδόν 40 χρόνια. Τη δεκαετία του 1880, όταν οι γερμανικές εταιρείες προσπάθησαν να αναπτύξουν πιο αποδοτικούς λαμπτήρες και φανούς από τους Αμερικανούς και Βρετανούς ανταγωνιστές τους, η μέτρηση του φάσματος του μέλανος σώματος και η λύση της θρυλικής εξίσωσης του Κίρχοφ απέκτησαν προτεραιότητα.

Η εφεύρεση του λαμπτήρα πυρακτώσεως ήταν η τελευταία μιας σειράς εφευρέσεων –συμπεριλαμβανομένων της λυχνίας βολταϊκού τόξου, της δυναμογεννήτριας, του ηλεκτρικού κινητήρα και της τηλεγραφίας– που τροφοδότησαν την ταχεία επέκταση της βιομηχανίας ηλεκτρικών ειδών. Με κάθε καινοτομία, η ανάγκη για ένα παγκοσμίως αποδεκτό σύνολο μονάδων μέτρησης και σταθμών για τον ηλεκτρισμό γινόταν διαρκώς και πιο επιτακτική.

Διακόσιοι πενήντα απεσταλμένοι από 22 χώρες συγκεντρώθηκαν στο Παρίσι το 1881, στο πρώτο Διεθνές Συνέδριο για τον Καθορισμό των Ηλεκτρικών Μονάδων Μέτρησης. Παρά τον ορισμό του βολτ, του αμπέρ και άλλων μονάδων στο πλαίσιο του συνεδρίου εκείνου, δεν κατέστη δυνατό να επιτευχθεί συμφωνία για τη μονάδα μέτρησης της φωτεινότητας, κάτι που είχε αρνητικά επακόλουθα για την ανάπτυξη

ξη του πιο αποδοτικού ενεργειακά μέσου για την παραγωγή τεχνητού φωτός. Ως τέλειος πομπός σε κάθε δεδομένη θερμοκρασία, το μέλαν σώμα εκπέμπει το μέγιστο ποσό θερμότητας, δηλαδή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Το φάσμα του μέλανος σώματος θα χρησίμευε ως μέτρο σύγκρισης για τη βαθμονόμηση και την παραγωγή ενός λαμπτήρα που θα εξέπεμπε τη μέγιστη δυνατή ποσότητα φωτός διατηρώντας παράλληλα σε ελάχιστα επίπεδα την εκλυόμενη από αυτό θερμότητα.

«Στους ανταγωνισμούς μεταξύ των εθνών, που επί του παρόντος διεξάγονται με τόση ένταση, η χώρα που θα εισέλθει πρώτη σε νέα μονοπάτια γνώσης, αναπτύσσοντάς τα πρώτη και καθιερώνοντάς τα ως κλάδους της βιομηχανίας, θα αποκτήσει αποφασιστικό προβάδισμα», έγραψε ο βιομήχανος και εφευρέτης της ηλεκτρικής δυναμογεννήτριας Βέρνερ φον Ζίμενς.<sup>11</sup> Το 1887, η γερμανική κυβέρνηση, αποφασισμένη να κατακτήσει την πρώτη θέση, ίδρυσε το Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR), το Αυτοκρατορικό Ινστιτούτο Φυσικής και Τεχνολογίας. Το PTR, εγκατεστημένο στα περίχωρα του Βερολίνου στο Σαρλόττενμπουργκ, και σε έκταση που δώρισε ο Ζίμενς, είχε συλληφθεί ως το ινστιτούτο που άρμοζε σε μια αυτοκρατορία αποφασισμένη να αναμετρηθεί με τη Βρετανία και την Αμερική. Η κατασκευή ολόκληρου του συγκροτήματος διήρκεσε περισσότερο από μία δεκαετία, καθώς το PTR έγινε το καλύτερα –και ακριβότερα– εξοπλισμένο ερευνητικό κέντρο στον κόσμο. Αποστολή του ήταν να προσφέρει στη Γερμανία την τελευταία λέξη της εφαρμοσμένης επιστήμης, με την καθιέρωση προτύπων και τον έλεγχο νέων προϊόντων. Στον κατάλογο των προτεραιοτήτων του συμπεριλαμβανόταν και η επινόηση μιας διεθνώς αναγνωρισμένης μονάδας μέτρησης για τη φωτεινή ένταση. Τη δεκαετία του 1890, κινητήρια δύναμη πίσω από το ερευνητικό πρόγραμμα του PTR για το μέλαν σώμα ήταν η ανάγκη να κατασκευαστεί ένας καλύτερος λαμπτήρας. Το πρόγραμμα αυτό έμελλε να οδηγήσει στην τυχαία ανακάλυψη του κβάντου, καθώς ο Πλανκ

αποδείχτηκε ο κατάλληλος άνθρωπος, στο κατάλληλο μέρος, και την κατάλληλη ώρα.

Ο Μαξ Καρλ Ερνστ Λούντβιχ Πλανκ γεννήθηκε στο Κίελο –τμήμα του δανικού τότε Χολστάιν– στις 23 Απριλίου του 1858, σε μια οικογένεια αφιερωμένη στην υπηρεσία της εκκλησίας και της πολιτείας. Με τον προπάππου και τον παππού από τη μεριά του πατέρα του να έχουν διατελέσει διακεκριμένοι θεολόγοι, και με έναν πατέρα, από την άλλη, καθηγητή του συνταγματικού δικαίου στο Πανεπιστήμιο του Μονάχου, οι λαμπρές ακαδημαϊκές επιδόσεις ήταν για τον νεαρό Μαξ σχεδόν ένα κληρονομικό δικαίωμα. Σεβόμενοι τους νόμους του Θεού και των ανθρώπων, τούτοι οι αφοσιωμένοι στο καθήκον έντιμοι άντρες ήταν επίσης και πιστοί φιλοπάτριδες. Ο Μαξ δε θα αποτελούσε εξαίρεση.

Ο Πλανκ παρακολούθησε μαθήματα στο πιο φημισμένο σχολείο μέσης εκπαίδευσης του Μονάχου, το Γυμνάσιο Μαξιμιλιανού, όπου διακρίθηκε χάρη στη σκληρή δουλειά και την αυτοπειθαρχία του και όπου συγκαταλεγόταν πάντοτε στους καλύτερους της τάξης του, χωρίς ποτέ όμως να είναι ο πρώτος των πρώτων. Αυτές ακριβώς ήταν οι αρετές που απαιτούσε ένα εκπαιδευτικό σύστημα με πρόγραμμα μαθημάτων βασισμένο στη συγκράτηση, μέσω της μηχανικής απομνημόνευσης, ενός τεράστιου όγκου τεκμηριωμένης γνώσης. Σε μια σχολική αναφορά σημειώνεται ότι «παρά την όλη παιδικότητά του» ο Πλανκ διέθετε ήδη, σε ηλικία δέκα ετών, «πολύ καθαρό, λογικό νου», υποσχόμενος «να γίνει κάτι αξιόλογο». <sup>12</sup> Από την ηλικία των δεκαέξι ετών, ο νεαρός Πλανκ προτιμούσε μάλλον τις αίθουσες της όπερας και των κονσέρτων παρά τις διάσημες ταβέρνες του Μονάχου. Όντας ταλαντούχος πιανίστας, φλέρταρε μια περίοδο με την ιδέα να ακολουθήσει καριέρα επαγγελματία μουσικού. Μην ξέροντας τι να κάνει, αναζήτησε κάποια συμβουλή, για να πάρει την εξής απερίφραστη απάντηση: «Αν σ' ενδιαφέρει να μάθεις, καλύτερα να σπουδάσεις κάτι άλλο!». <sup>13</sup>

Τον Οκτώβριο του 1874, σε ηλικία δεκαέξι ετών, ο Πλανκ γράφτηκε στο Πανεπιστήμιο του Μονάχου και, εξαιτίας μιας ραγδαία αναπτυσσόμενης επιθυμίας να κατανοήσει τον τρόπο λειτουργίας της φύσης, επέλεξε να σπουδάσει φυσική. Σε αντίθεση με το σχεδόν στρατιωτικό καθεστώς των γυμνασίων, τα γερμανικά πανεπιστήμια παρείχαν στους φοιτητές τους σχεδόν απόλυτη ελευθερία. Με ελάχιστη ακαδημαϊκή επίβλεψη και χωρίς συγκεκριμένες απαιτήσεις, το σύστημα των πανεπιστημίων επέτρεπε στους φοιτητές να μετακινούνται από το ένα πανεπιστήμιο στο άλλο, παρακολουθώντας μαθήματα ανάλογα με τις διαθέσεις τους. Αργά ή γρήγορα, όσοι προσέβλεπαν σε μια ακαδημαϊκή καριέρα, παρακολουθούσαν μαθήματα από διαπρεπείς καθηγητές στα πιο εξέχοντα πανεπιστήμια. Ύστερα από τρία χρόνια στο Μόναχο, όπου άκουσε και τη φράση ότι «δεν αξίζει πλέον να ασχοληθεί κανείς με τη φυσική», καθώς τίποτα σημαντικό δεν είχε απομείνει να ανακαλυφθεί, ο Πλανκ μετακόμισε στο Βερολίνο, στο κορυφαίο πανεπιστήμιο του γερμανόφωνου κόσμου.<sup>14</sup>

Με τη δημιουργία της ενιαίας Γερμανίας ως επακόλουθο της νίκης επί της Γαλλίας στον γαλλοπρωσικό πόλεμο του 1870-71, το Βερολίνο έγινε η πρωτεύουσα της νέας ευρωπαϊκής δύναμης. Ευρισκόμενη στη συμβολή των ποταμών Χάβελ και Σπρέε, η πόλη αναμορφώθηκε γοργά αξιοποιώντας τις γαλλικές πολεμικές επανορθώσεις, καθώς στόχος ήταν να καταστεί ισότιμη με το Λονδίνο και το Παρίσι. Ο πληθυσμός της, από 865.000 το 1871, αυξήθηκε σταδιακά στα 2 περίπου εκατομμύρια έως το 1900, και το Βερολίνο κατέστη η τρίτη μεγαλύτερη πόλη στην Ευρώπη.<sup>15</sup> Μεταξύ των νεοαφιχθέντων ήταν και Εβραίοι, θύματα διωγμών στην ανατολική Ευρώπη – και ιδιαίτερα των πογκρόμ στην τσαρική Ρωσία. Το κόστος ζωής και στέγασης έφτασε αναπόφευκτα στα ύψη, αφήνοντας πολλούς άστεγους και άπορους. Οι κατασκευαστές χαρτονένιων κουτιών διαφήμιζαν «καλά και φτηνά κουτιά για κατοικία», καθώς στα περίχωρα ξεφύτρωναν παραγκουπόλεις.<sup>16</sup>