

25^η Απριλίου: Παγκόσμια Ημέρα DNA, η συμβολή της Rosalind Franklin και το Πρόγραμμα Ανθρώπινου Γονιδιώματος (HGP: Human Genome Project)

Ο μήνας Απρίλιος χαρακτηρίζεται από δύο πολύ σημαντικές ημερομηνίες για τη σύγχρονη Βιολογία! Την 25η Απριλίου, εορτάζεται η Παγκόσμια Ημέρα DNA! Μια ημερομηνία ορόσημο για τη σύγχρονη Βιολογία, καθώς η 25η Απριλίου 1953 ήταν η ημερομηνία δημοσίευσης στο *Nature* (<https://www.nature.com/articles/171737a0>) των αποτελεσμάτων των διάσημων πειραμάτων των Watson, Crick, Wilkins και Franklin, σχετικά με τη δομή του DNA, το αποκαλούμενο και «μόριο της ζωής»!

no. 2356 April 25, 1953 NATURE 737

equipment, and to Dr. G. E. R. Deacon and the captain and officers of R.R.S. *Discovery II* for their part in making the observations.

¹Young, P. L., Gerrard, H., and James, W., *Phil. Mag.*, **46**, 149 (1953).

²Loquet-Bignard, M. S., *Ann. Nat. Exp. Phys. Soc. (Genève)*, **5**, 322 (1949).

³The Art. W. S. Woods Hole Eutectic in *High Pressure Metast.*, **11** (1952).

⁴Hirata, Y. W., *Art. Met. Assoc. Publ. (Shikoku)*, **2**(11) (1955).

MOLECULAR STRUCTURE OF NUCLEIC ACIDS

A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid

WE wish to suggest a structure for the salt of deoxyribose nucleic acid (D.N.A.). This structure has novel features which are of considerable biological interest.

A structure for nucleic acid has already been proposed by Pauling and Corey¹. They kindly made their manuscript available to us in advance of publication. Their model consists of three intertwined chains, with the phosphates near the fibre axis, and the bases on the outside. In our opinion, this structure is unsatisfactory for two reasons: (1) We believe that the material which gives the X-ray diagram is the salt, not the free acid. Without the acidic hydrogen atoms it is not clear what forces would hold the structure together, especially as the negatively charged phosphates near the axis will repel each other. (2) Some of the van der Waals distances appear to be too small.

Another three-chain structure has also been suggested by Fraser (in the press). In his model the phosphates are on the outside and the bases on the inside, linked together by hydrogen bonds. This structure as described is rather ill-defined, and for this reason we shall not comment on it.

We wish to put forward a radically different structure for the salt of deoxyribose nucleic acid. This structure has two helical chains each coiled round the same axis (see diagram). We have made the usual chemical assumptions, namely, that each chain consists of phosphate diester groups joining β-D-deoxy-ribofuranose residues with 3',5' linkages. The two chains (but not their bases) are related by a dyad perpendicular to the fibre axis. Both chains follow right-handed helices, but owing to the dyad the sequences of the atoms in the two chains run in opposite directions. Each chain loosely resembles Pauling's model No. 1: that is, the bases are on the inside of the helix and the phosphates on the outside. The configuration of the sugar and the atoms near it is close to Pauling's 'standard configuration', the sugar being roughly perpendicular to the attached base. There is a residue on each chain every 3.4 Å, in the z-direction. We have assumed an angle of 36° between adjacent residues in the same chain, so that the structure repeats after 10 residues on each chain, that is, after 34 Å. The distance of a phosphate atom from the fibre axis is 10 Å. As the phosphates are on the outside, cations have easy access to them.

The structure is an open one, and its water content is rather high. At lower water contents we would expect the bases to tilt so that the structure could become more compact.

The novel feature of the structure is the manner in which the two chains are held together by the purine and pyrimidine bases. The planes of the bases are perpendicular to the fibre axis. They are joined together in pairs, a single base from one chain being hydrogen-bonded to a single base from the other chain, so that the two lie side by side with identical z-co-ordinates. One of the pair must be a purine and the other a pyrimidine for bonding to occur. The hydrogen bonds are made as follows: purine position 1 to pyrimidine position 1; purine position 6 to pyrimidine position 6.

If it is assumed that the bases only occur in the structure in the most plausible tautomeric forms (that is, with the keto rather than the enol configurations) it is found that only specific pairs of bases can bond together. These pairs are: adenine (purine) with thymine (pyrimidine), and guanine (purine) with cytosine (pyrimidine).

In other words, if an adenine forms one member of a pair, on either chain, then on these assumptions the other member must be thymine; similarly for guanine and cytosine. The sequence of bases on a single chain does not appear to be restricted in any way. However, if only specific pairs of bases can be formed, it follows that if the sequence of bases on one chain is given, then the sequence on the other chain is automatically determined.

It has been found experimentally^{2,3} that the ratio of the amounts of adenine to thymine, and the ratio of guanine to cytosine, are always very close to unity for deoxyribose nucleic acid.


It is probably impossible to build this structure with a ribose sugar in place of the deoxyribose, as the extra oxygen atom would make too close a van der Waals contact.

The previously published X-ray data^{4,5} on deoxyribose nucleic acid are insufficient for a rigorous test of our structure. So far as we can tell, it is roughly compatible with the experimental data, but it must be regarded as unproved until it has been checked against more exact results. Some of these are given in the following communications. We were not aware of the details of the results presented there when we devised our structure, which rests mainly though not entirely on published experimental data and stereochemical arguments.

It has not escaped our notice that the specific pairing we have postulated immediately suggests a possible copying mechanism for the genetic material.

Full details of the structure, including the conditions assumed in building it, together with a set of co-ordinates for the atoms, will be published elsewhere.

We are much indebted to Dr. Jerry Donohue for constant advice and criticism, especially on inter-atomic distances. We have also been stimulated by a knowledge of the general nature of the unpublished experimental results and ideas of Dr. M. H. F. Wilkins, Dr. R. E. Franklin and their co-workers at

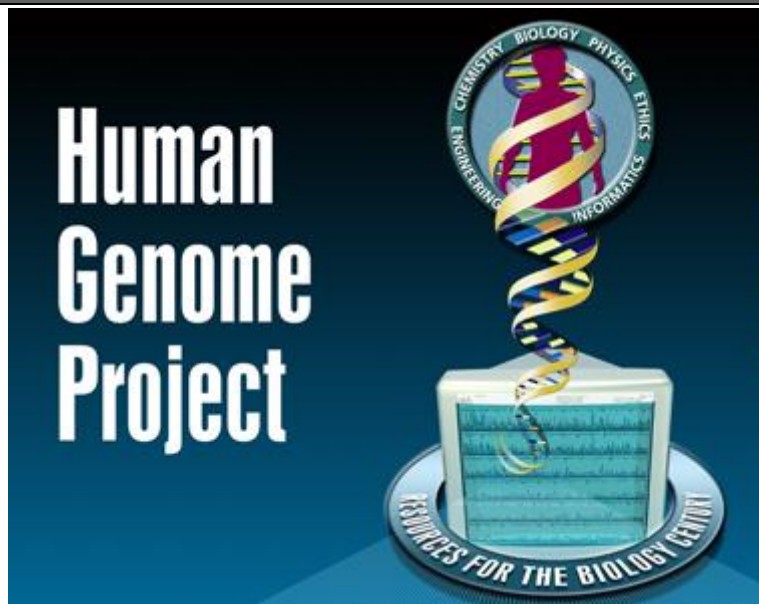


This figure is partly diagrammatic. The two fibres probably have two phosphate-sugar chains, and the interaction with the water molecules is not shown. The vertical line marks the fibre axis.

© 1953 Nature Publishing Group

Η πρώτη σελίδα του επιστημονικού άρθρου των Watson και Crick, που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό *Nature*.

Ως δεύτερη ημερομηνία ορόσημο ορίζεται η 14η Απριλίου του 2003, όπου το έτος 2023 ολοκληρώθηκαν 20 χρόνια από την ολοκλήρωση του Προγράμματος Ανθρώπινου Γονιδιώματος (Human Genome Project), το οποίο ξεκίνησε την 1η Οκτωβρίου 1990. Το Πρόγραμμα Ανθρώπινου Γονιδιώματος ήταν ένα διεθνές επιστημονικό ερευνητικό πρόγραμμα με στόχο τον προσδιορισμό των ζευγών βάσεων που συνθέτουν το ανθρώπινο DNA (αλληλουχία όλου του γονιδιώματος) και τον εντοπισμό (χαρτογράφηση) των γονιδίων του ανθρώπινου γονιδιώματος.



Το Πρόγραμμα Ανθρώπινου Γονιδιώματος

<https://cs.stanford.edu/people/eroberts/cs201/projects/2010-11/Genomics/intro.html>

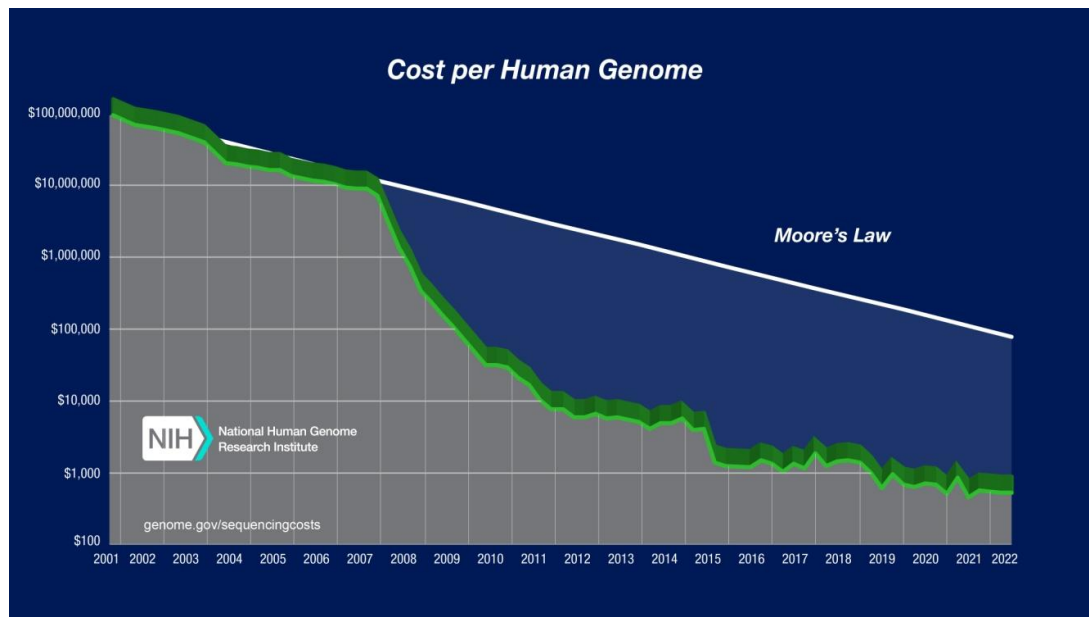
Όπως αναφέρει σε επιστημονικό του άρθρο ένας από τους πρωτεργάτες του Προγράμματος Ανθρώπινου Γονιδιώματος, ο Francis S. Collins, ιατρός-γενετιστής που διακρίθηκε για τις σημαντικές ανακαλύψεις του στα σχετιζόμενα με ασθένειες γονίδια και την οραματική του ηγεσία του στο εν λόγω πρόγραμμα, ο οποίος έχει διατελέσει πρώην διευθυντής του Εθνικού Ινστιτούτου Ερευνών για το Ανθρώπινο Γονιδίωμα (NHGRI) των ΗΠΑ, το κύριο έργο του Προγράμματος ήταν η ανάπτυξη τριών ερευνητικών εργαλείων που θα επέτρεπαν στους επιστήμονες να εντοπίσουν γονίδια που εμπλέκονται τόσο σε σπάνιες όσο και σε κοινές ασθένειες. Μια άλλη προτεραιότητα του HGP ήταν η εξέταση των ηθικών, νομικών και κοινωνικών επιπτώσεων των νέων γενετικών τεχνολογιών και η εκπαίδευση του κοινού σχετικά με αυτά τα ζητήματα, κάτι που σήμερα βλέπουμε να εφαρμόζεται ευρέως.



Πρώιμες μέρες του HGP σε εργαστήριο αλληλούχισης του DNA το 1994.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5101944/figure/f2-pmid26432225/>

Έκτοτε, η ταχύτατη εξέλιξη της τεχνολογίας έφερε την επανάσταση στα πλαίσια της γονιδιωματικής ανάλυσης, όπου με την εισαγωγή της Νέας Γενιάς Αλληλούχισης (NGS: Next Generation Sequencing), ο προσδιορισμός της πλήρους αλληλουχίας του DNA (WGS: Whole Genome Sequencing) ενός ατόμου απαιτεί ελάχιστο ανθρώπινο δυναμικό και ολοκληρώνεται σε μικρό διάστημα, συνοδευόμενο από μικρό κόστος της τάξεως, κατά πολύ πλέον, κάτω των 1000 δολαρίων!



Κόστος Αλληλούχισης του Αθρώπινου Γονιδιώματος

<https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/Sequencing-Human-Genome-cost>

Ποια ήταν η συμβολή της Rosalind Franklin στην ανακάλυψη της δομής του DNA;

Η περίοδος που διανύουμε εντάσσεται στην αποκαλούμενη περίοδο των ομικών τεχνολογιών (omics era), δηλαδή υψηλού επιπέδου τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την ολιστική ανάλυση των μορίων που συνθέτουν τα κύτταρα των ζωντανών οργανισμών. Εξέχουσα θέση έχει η γονιδιωματική (gen-omics), η οποία στηρίζεται στην ανακάλυψη της δομής του DNA (δεοξυριβονουκλεϊκό οξύ).

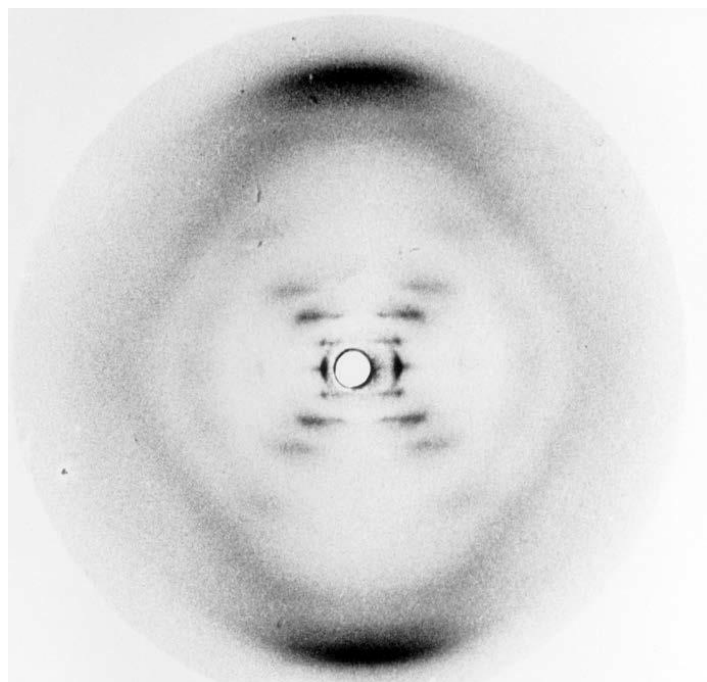
Ο James Watson και ο Francis Crick, είναι δύο από τους πιο διάσημους επιστήμονες του 20^{ου} αιώνα, καθώς το άρθρο τους για την ανακάλυψη της δομής του DNA δημοσιεύτηκε στο περιοδικό *Nature*, ως μέρος μιας τριάδας άρθρων. Πιστεύεται ότι χρησιμοποίησαν όμως κλεμμένα δεδομένα από την επιστήμονα Rosalind Franklin.

Όμως ποια είναι πραγματικά η θέση της επιστήμονος βιοφυσικού, χημικού-κρυσταλλογράφου Rosalind Franklin, του King's College του Λονδίνου, σε αυτή την ανακάλυψη;



Η Rosalind Franklin κατάλαβε ανεξάρτητα πώς η δομή του DNA θα μπορούσε να καθορίσει τις πρωτεΐνες.
(<https://www.nature.com/articles/d41586-023-01313-5>)

Λέγεται ότι σημαντική στιγμή για την πρόβλεψη της δομής της διπλής έλικας του DNA ήταν όταν στον Watson του έδειξαν μια εικόνα ακτίνων X του DNA που είχε η Franklin, χωρίς την άδεια της ή εν γνώσει της. Η περίφημη αυτή φωτογραφία, γνωστή ως Φωτογραφία 51, αντιμετωπίζεται ως η φιλοσοφική λίθος της μοριακής βιολογίας, το κλειδί για το «μυστικό της ζωής» (για να μην αναφέρουμε το βραβείο Νόμπελ). Στα πλαίσια αυτής της αναφοράς, η Franklin, η οποία απεβίωσε το 1958 σε ηλικία μόλις 37 ετών, παρουσιάζεται ως μια λαμπρή επιστήμων, η οποία τελικώς δεν μπόρεσε να αποκρυπτογραφήσει τι της έλεγαν τα δεδομένα της για το DNA. Υποτίθεται ότι για μήνες δεν μπόρεσε να συνειδητοποιήσει τη σημασία της φωτογραφίας, μόνο για να την καταλάβει ο Watson με μια ματιά.



Περίθλαση ακτίνων X, των Franklin και Gosling που απεικονίζει κρυσταλλογραφικά τη δομή B του DNA, γνωστή ως Φωτογραφία 51.

(<https://www.nature.com/articles/d41586-023-01313-5>)

Αυτή η εκδοχή των γεγονότων έχει εισαχθεί στη λαϊκή κουλτούρα. Είναι το θέμα θεατρικού έργου με τίτλο: Φωτογραφία 51, ένα έργο της Anna Ziegler στο οποίο πρωταγωνίστησε η Nicole Kidman σε θεατρική σκηνή του Λονδίνου το 2015.

- <https://www.youtube.com/watch?v=bPCjY2-zLCI>

Η φωτογραφία 51 κοσμεί ένα βρετανικό νόμισμα των 50 πεννών, που σηματοδοτούσε την εκατονταετηρίδα από την γέννηση της Franklin, το 2020.



Το νόμισμα BU Rosalind Franklin 50 Pence, από τη σειρά νομισμάτων «Innovation in Science» του Royal Mint. (<https://britanniacoincompany.com/buy-coins/bu-coins/2020-rosalind-franklin-50p-bu/>)

Η όλη υπόθεση παρείχε τροφή για περιφρονητικά αστεία στο Twitter (X) όπως: «Τι ανακάλυψε ο Watson και ο Crick το 1953; Τα δεδομένα της Franklin!», καθώς ακόμα και θαυμάσιες «μάχες» ραπ από νεαρούς μαθητές στο Όκλαντ της Καλιφόρνια.

Δεν είναι αυτό όμως το οποίο συνέβη!

Ο συγγραφέας της βιογραφίας του Watson, Nathaniel Comfort, και ο συγγραφέας της βιογραφίας του Crick, Matthew Cobb, αναφέρουν στο άρθρο τους στο *Nature* (<https://www.nature.com/articles/d41586-023-01313-5>), ότι κατά την επίσκεψη τους το 2022 στο αρχείο της Franklin στο Churchill College στο Cambridge (UK), εμβάθυναν στις σημειώσεις της ανακατασκευάζοντας την ανάπτυξη των ιδεών της. Στα πλαίσια αυτής τους της μελέτης ανακάλυψαν ένα μη μελετημένο μέχρι τώρα προσχέδιο ειδησεογραφικού άρθρου από το 1953, γραμμένο σε συνεννόηση με την Franklin, το οποίο προοριζόταν για το περιοδικό *Time*, ένα αμερικάνικο περιοδικό διεθνούς απήχησης, καθώς επίσης και μια επιστολή που αγνοήθηκε, από έναν από τους συναδέλφους της Franklin στον Crick. Συνολικά, αυτά τα έγγραφα προτείνουν ένα διαφορετικό πλαίσιο αναφοράς στην ανακάλυψη της διπλής έλικας του DNA. Η Franklin δεν απέτυχε στην κατανόηση της δομής του DNA. Συνέβαλε εξίσου στην επίλυση του. Είναι σημαντικό να καταγραφεί σωστά η ιστορία της Franklin, καθώς έχει γίνει πρότυπο για τις γυναίκες που ακολουθούν τον δρόμο της επιστήμης. Ήταν απέναντι όχι μόνο στον σεξισμό της καθημερινότητας, αλλά επίσης και σε πιο λεπτές μορφές ενσωματωμένες στην επιστήμη, μερικές εκ των οποίων υπάρχουν ακόμη και σήμερα.

H Rosalind Franklin και το DNA

Στις αρχές της δεκαετίας του 1950, η δομή και η λειτουργία του DNA παρέμενε ασαφής. Είχε βρεθεί σε κάθε τύπο κυττάρου που ερευνήθηκε και ήταν γνωστό ότι αποτελείται από μια φωσφορική ραχοκοκαλιά στην οποία είναι προσαρτημένες τέσσερα είδη βάσεων – η αδενίνη (A), η θυμίνη (T), η κυτοσίνη (C) και η γουανίνη (G).

Το 1944, ο μικροβιολόγος Oswald Avery και οι συνάδελφοι του είχαν δείξει ότι το DNA (και όχι η πρωτεΐνη) θα μπορούσε να μετασχηματίσει στελέχη του *Streptococcus pneumoniae* από μη παθογόνα σε παθογόνα στελέχη. Αλλά δεν ήταν ξεκάθαρο ότι το DNA ήταν το γενετικό υλικό σε όλους τους οργανισμούς.

Στο King's College του Λονδίνου, βιοφυσικοί χρηματοδοτούμενοι από το Συμβούλιο Ιατρικής Έρευνας (MRC: Medical Research Council), με επικεφαλής τον John Randall και τον Maurice Wilkins ως αναπληρωτή του (ο οποίος αργότερα μοιράστηκε το βραβείο Νόμπελ με τους Watson και Crick το 1962), χρησιμοποιούσαν την περίθλαση ακτίνων X για να μελετήσουν τη δομή του μορίου. Το 1951, εντάχθηκε η Franklin, η οποία χρησιμοποιούσε αυτή την τεχνική για την έρευνα της δομής του άνθρακα και του κάρβουνου στο Laboratoire Central des Services Chimiques de l'Etat στο Παρίσι.

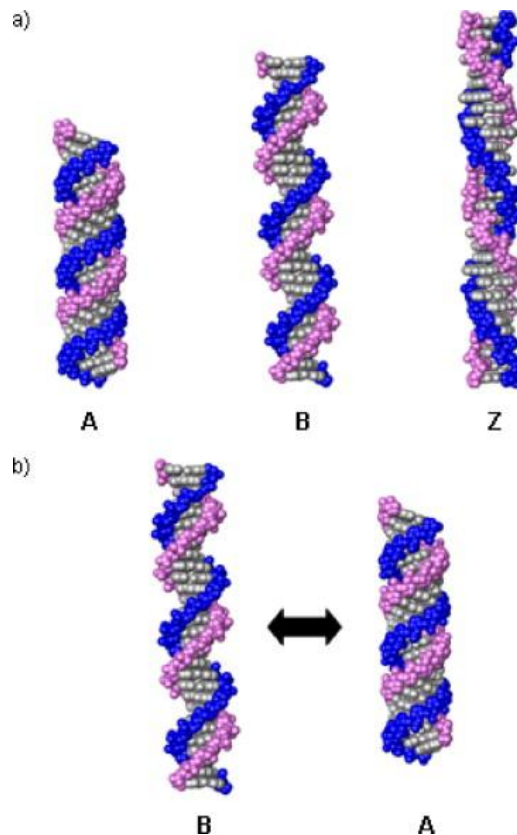


H Rosalind Franklin στο Παρίσι.

<https://www.sciencealert.com/franklins-contribution-to-dna-helix-discovery-was-more-profound-than-we-thought>

Όπως είναι πολύ καλά γνωστό, η Franklin και ο Wilkins συγκρούστηκαν, τόσο σε προσωπικό επίπεδο όσο και στην επιστημονική προσέγγιση. Αν και η Franklin απολάμβανε ένα καλό επιχείρημα και ήταν αποφασισμένη να σημειώσει πρόοδο, ο Wilkins αποστρεφόταν την αντιπαράθεση και ήταν αργός στο να δράσει. Για να μειώσει τις εντάσεις, ο Randall μοίρασε τις εργασίες για το DNA. Σε αυτό που αργότερα αποκάλεσε ως μια κακή συμφωνία για τον εαυτό του, συμφώνησε να δώσει στην Franklin το μικρό απόθεμα πολύ καθαρού DNA που είχε αποκτήσει από τον Ελβετό χημικό Rudolf Signer. Στον Wilkins απέμεινε ένα φτωχότερης ποιότητας υλικό από τον Αυστριακό βιοχημικό Erwin Chargaff, του Πανεπιστημίου του Columbia στη Νέα Υόρκη.

Με το DNA του Signer, η Franklin μπόρεσε να εκμεταλλευτεί μια ανακάλυψη που είχε κάνει ο Wilkins νωρίτερα, ότι το DNA σε διάλυμα μπορούσε να πάρει δύο μορφές, αυτό που αποκαλούσε κρυσταλλική ή μορφή A και την παρακρυσταλλική ή μορφή B. Η Franklin διαπίστωσε ότι μπορούσε να μετατρέψει τη μορφή A στη μορφή B, απλά αυξάνοντας τη σχετική υγρασία στον θάλαμο των δειγμάτων, ενώ κατεβάζοντας τη ξανά αποκατέστησε την κρυσταλλική μορφή A.



(a) Έλικες μορφής A, B και Z. (b) Η μετάβαση της μορφής B σε μορφή A είναι μια κοινή μετάβαση που εξαρτάται από τη σχετική υγρασία ενός διαλύματος και την αλληλουχία DNA.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S104403050700181X>)

Η Franklin εστίασε στη μορφή A, ενώ ο Wilkins στη μορφή B. Για έναν φυσικοχημικό, η κρυσταλλική μορφή φαινόταν η προφανής επιλογή. Όταν βομβαρδίστηκε με ακτίνες X μπροστά σε μια φωτογραφική πλάκα, απέδωσε λεπτομερή μοτίβα περίθλασης. Περισσότερες λεπτομέρειες σήμαινε περισσότερα δεδομένα, το οποίο σήμαινε μεγαλύτερη ακρίβεια, αν και πιο δύσκολη ανάλυση. Εν αντιθέσει, η B μορφή, απέδιδε μοτίβα που ήταν πιο θολά και λιγότερο λεπτομερή, αλλά πιο απλά στην ανάλυση. Αρχικά, η Franklin κατάλαβε τόσο την A όσο και τη B ως ελικοειδείς. Σε σημειώσεις για ένα σεμινάριο που έδωσε τον Νοέμβριο του 1951, τις περιέγραψε συλλογικά: «μεγάλη έλικα με πολλές αλυσίδες, φωσφορικές ομάδες εξωτερικά, διαελικοειδείς δεσμούς φωσφορικών-φωσφορικών, που διαταράσσονται από το νερό».

Αδυνατώντας να επιλύσει τη δομή της μορφής A, η Franklin είχε αποφασίσει στα μέσα του 1952 ότι δεν ήταν στην πραγματικότητα ελικοειδής – μάλιστα, «πείραξε» τον Wilkins με μια ψευδή αγγελία κηδείας για την κρυσταλλική έλικα του DNA. Δεν ήταν μόνη στην «απόρριψη» από τα δεδομένα της μορφής A: μετά τη δημοσίευση του επιστημονικού άρθρου (paper) για τη διπλή έλικα, ο Crick έγραψε για την ακριβή αλλά πολύπλοκη, πλούσια σε δεδομένα εικόνα της μορφής A της Franklin το εξής: «Χαίρομαι που δεν την είδα νωρίτερα, καθώς θα με ανησυχούσε πολύ».

Όσο για τη μορφή B, η Franklin και όλοι στο King's αναγνώρισαν ότι ήταν κάποιο είδος έλικας. Αλλά για τη Franklin ήταν μια απόσπαση προσοχής. Σε υψηλή υγρασία, τα μόρια του νερού συνωστιζόνταν στα άτομα του DNA, παράγοντας μια δομή που την περιέγραφε ως «πρησμένη», «διογκωμένη», διαταραγμένη. «Τέλος πάντων», έγραψε στις σημειώσεις της για εκείνο το σεμινάριο του 1951, υπό αυξημένη υγρασία, «το υλικό τελικά διαλύεται, δηλαδή οι αλυσίδες χωρίζονται η μια από την άλλη από το νερό». Είδε τη μορφή B ως ένα τεχνούργημα της επίδρασης του νερού, ένα σύμπτωμα της απώλειας της κρυσταλλικής τάξης – άρα «παρακρυσταλλική». Αυτό εξηγεί γιατί, στα τέλη του 1952 και στις αρχές του 1953, απέρριψε το επιχείρημα ότι το DNA ήταν εγγενώς ελικοειδές.

Από την οπτική ενός χημικού, η απόφαση της Franklin να επικεντρωθεί στην κρυσταλλική μορφή A ήταν απολύτως λογική, όπως ήταν και τα συμπεράσματα που άντλησε από την ανάλυση της. Αλλά, η εστίαση της στην πιο στεγνή μορφή A αγνόησε την πολλή υγρή πραγματικότητα του εσωτερικού ενός κυττάρου – που θα σήμαινε ότι το DNA πήρε την πιο υγρή μορφή B. Η επιλογή της αυτή, μαζί με την επιμονή της ώστε τα δεδομένα της περίθλασης να αναλυθούν πλήρως πριν επιχειρηθεί οποιαδήποτε μοντελοποίηση, θα εμπόδιζε τις προσπάθειες της Franklin για περισσότερο από ένα χρόνο.

Η σημασία της Φωτογραφίας 51

Ακόμα και οι «συνήγοροι» της Franklin συχνά άθελα τους διαιωνίζουν μια καρικατούρα της επιστήμης της – κάτι που μπορεί να αναχθεί στο best seller του Watson: *The Double Helix*, του 1968 που παραμορφώνει την πραγματικότητα. Η εκδοχή του Watson του επόμενου, κρίσιμου σταδίου της ιστορίας επαναλαμβάνεται συχνά για να τονιστεί πως η Franklin στερήθηκε τη δέουσα καταξίωση. Άθελα της, αυτό την υπονομεύει.

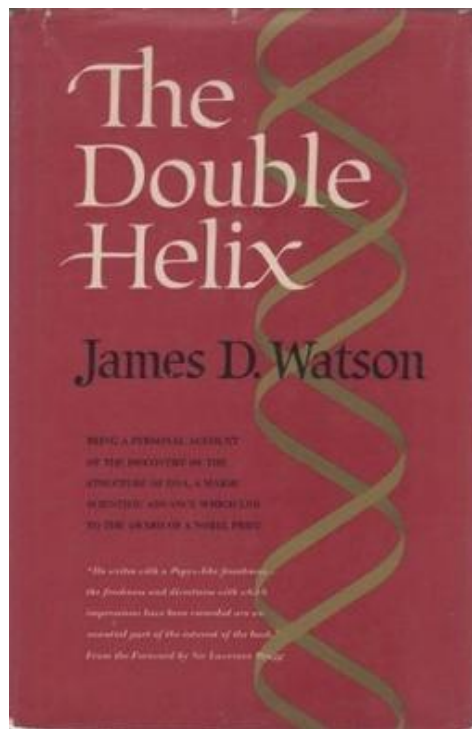
Σύμφωνα με τον Watson, στις αρχές του 1953, επισκέφτηκε το King's και ήρθε σε διένεξη με την Franklin. Ο Wilkins, έγραψε, τον έσωσε από την αντιπαράθεση και έπειτα του έδειξε την Φωτογραφία 51, μια ιδιαίτερα καθαρή μορφή της μορφής B, που λήφθηκε 8 μήνες νωρίτερα από την Franklin και τον διδακτορικό φοιτητή Raymond Gosling. Η Franklin είχε αφήσει την φωτογραφία στην άκρη για να επικεντρωθεί στη μορφή A. Ετοιμαζόταν να μεταφερθεί στο Birkbeck College, επίσης στο Λονδίνο, και είχε λάβει εντολή να αφήσει τη δουλειά της στο DNA πίσω. Ο Gosling ήταν πλέον υπό την επίβλεψη του Wilkins, και είχε δώσει στον Wilkins την φωτογραφία (λέει ότι το έκανε εν γνώσει της Franklin). Η εικόνα, ισχυρίστηκε ο Watson στο βιβλίο *The Double Helix*, έδειξε ότι μια έλικα DNA «πρέπει να υπάρχει» - μόνο μια ελικοειδής δομή θα μπορούσε να παράγει αυτά τα σήματα.

Λόγω της αφήγησης του Watson, οι άνθρωποι έκαναν φετίχ τη Φωτογραφία 51. Έχει γίνει το έμβλημα τόσο του επιτεύγματος της Franklin, όσο και της κακομεταχείρισης της.

Αλλά η αφήγηση του Watson περιέχει ένα παράλογο τεκμήριο. Υπονοεί ότι η Franklin, η επιδέξια χημικός, δε μπορούσε να κατανοήσει τα ίδια της τα δεδομένα, ενώ αυτός, ένας αρχάριος στην κρυσταλλογραφία, τα αντιλήφθηκε αμέσως. Εξάλλου, όλοι, ακόμα και ο Watson, ήξεραν ότι ήταν αδύνατο να συναχθεί κάποια ακριβής δομή από μια φωτογραφία – άλλες δομές θα μπορούσαν να είχαν δημιουργήσει το

ίδιο μοτίβο περίθλασης. Χωρίς προσεκτικές μετρήσεις – που ο Watson επέμενε ότι δεν έκανε – το μόνο που αποκάλυπτε η εικόνα ήταν ότι η μορφή Β ήταν πιθανά κάποιο είδος έλικας, για το οποίο δεν αμφέβαλλε κανείς. Επιπλέον, διάφορα αποδεικτικά στοιχεία – συμπεριλαμβανομένου του The Double Helix – δείχνουν ότι έπαιξε λίγο, έως καθόλου, ρόλο στην κατεύθυνση του Watson και του Crick προς τη σωστή δομή μεταξύ του Ιανουαρίου και του Μαρτίου 1953. Μάλιστα, ήταν άλλα δεδομένα από την Franklin και τον Wilkins που αποδείχθηκαν κρίσιμα, και ακόμη και τότε, αυτό που συνέβη ήταν λιγότερο κακόβουλο από ότι πιστεύεται ευρέως.

Ο Watson τραντάχθηκε όταν είδε τη φωτογραφία – λόγω του πότε την είδε. Λίγες μέρες πριν, η ομάδα του Cambridge είχε λάβει ένα χειρόγραφο από τον Αμερικανό χημικό Linus Pauling, στο οποίο ισχυριζόταν ότι είχε λύσει τη δομή του DNA. Αν και ο Pauling είχε κάνει στοιχειώδη λάθη, ο Lawrence Bragg, επικεφαλής του Cavendish Laboratory, ο οποίος είχε μια μακροχρόνια αντιπαλότητα με τον Pauling, είχε ενθαρρύνει τους Watson και Crick να συνεχίσουν τη μοντελοποίηση. Ο Watson είχε πάει στο King's για να δείξει την γκάφα του Pauling, και ο Wilkins του είχε δείξει τη φωτογραφία. Η διαμόρφωση αυτής της στιγμής στην κορύφωση του The Double Helix ήταν ένα λογοτεχνικό εργαλείο: μια κλασική στιγμή «Εύρηκα», εύκολη στους απλούς αναγνώστες να την καταλάβουν.



Το βιβλίο The Double Helix, του James Watson.

https://en.wikipedia.org/wiki/The_Double_Helix

Από το 1951, ο Wilkins είχε κρατήσει τον Watson και τον Crick ενημέρους για την εργασία του στη μορφή Β, ιδίως την πεποίθηση του ότι η δομή περιείχε μια ή περισσότερες έλικες, επαναλαμβανόμενες κάθε 34 angstroms, και ίσως είχε αναφέρει ότι μέσα σε κάθε επανάληψη υπήρχαν πιθανώς 10 στοιχεία. Λίγο αφότου ο Watson είδε τη Φωτογραφία 51, ο προϊστάμενος του Crick, Max Perutz, τους παρέδωσε μια άτυπη αναφορά της δραστηριότητας της μονάδας MRC του King's, η οποία του είχε δοθεί του ιδίου στα πλαίσια επίσημης επίσκεψης στη μονάδα το Δεκέμβριο του 1952. Αυτό περιελάμβανε μια σελίδα από τη Franklin, που περιέγραφε τη δουλειά της. Σε μια επιστολή του το 1969 προς το *Science*, αν και ο Perutz ανέφερε ότι μετάνιωσε που

μοιράστηκε την αναφορά χωρίς πρώτα να συμβουλευτεί την ομάδα του King's, η αναφορά δεν ήταν χαρακτηρισμένη ως εμπιστευτική (confidential). Πράγματι, ένα γράμμα από μια ερευνήτρια του King's, της Pauline Cowan, που γράφτηκε προς τον Crick τον Ιανουάριο του 1953, προσκαλεί τον Crick σε μια ομιλία από την Franklin και τον Gosling, η οποία, συνεχίζει η Cowan: «πες ότι είναι κυρίως για ένα μη-κρυσταλλογραφικό κοινό και ότι ο Perutz γνωρίζει ήδη περισσότερα από αυτά που είναι πιθανόν να μεταφέρουν, οπότε μην το σκεφτείτε ότι αξίζει τον κόπο να έρθετε». Έτσι, φαίνεται ότι η Franklin είχε υποθέσει ότι ο Perutz θα μοιραζόταν τις γνώσεις του ως μέρος της συνηθισμένης άτυπης επιστημονικής ανταλλαγής.

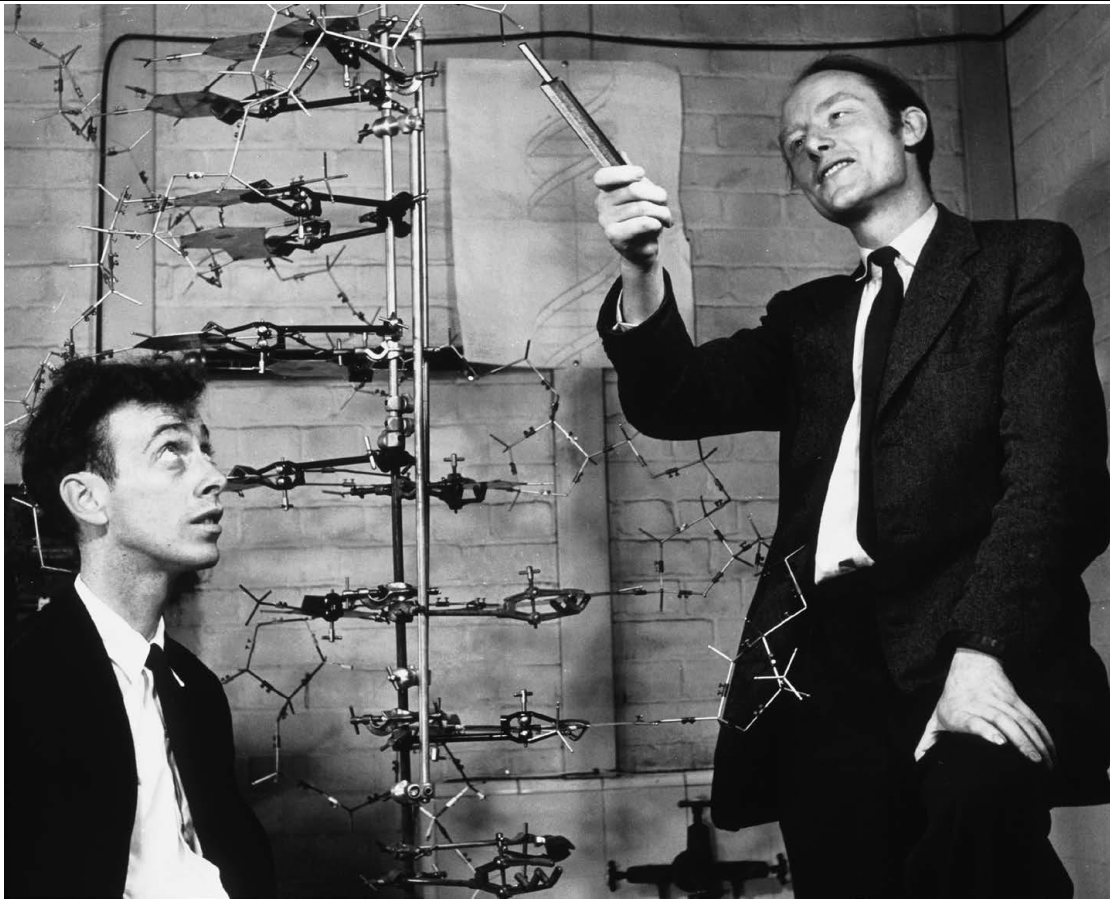
Στη συνεισφορά της στην έκθεση του MRC, η Franklin είχε επιβεβαιώσει το αποτέλεσμα των 34 Å για τη μορφή B. Ανέφερε επίσης ότι η μοναδιαία κυψελίδα (η επαναλαμβανόμενη μονάδα του κρυστάλλου) ήταν τεράστια: περιείχε μεγαλύτερο αριθμό ατόμων από οποιαδήποτε άλλη μοναδιαία κυψελίδα σε οποιαδήποτε άλλη γνωστή μοριακή δομή. Η Franklin, επίσης προσέθεσε μερικά βασικά κρυσταλλογραφικά δεδομένα από τη μορφή A, υποδεικνύοντας ότι είχε μια "C2" συμμετρία, η οποία με τη σειρά της υπονοούσε ότι το μόριο είχε άρτιο αριθμό σακχαρο-φωσφορικών κλώνων αντίθετων κατευθύνσεων.

Σημειώσεις του Crick για μια διάλεξη για την ιστορία της διπλής έλικας, που δόθηκε σε ιστορικούς της επιστήμης στο Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης τον Μάιο του 1961, μαζί με επίσημες και ανεπίσημες παρατηρήσεις που έγιναν σε όλη του τη ζωή, αποκαλύπτουν ότι, σε αντίθεση με τη Φωτογραφία 51, αυτή η αναφορά ήταν πραγματικά σημαντική για την επιβεβαίωση της δομής που ο Watson και ο Crick διατύπωσαν τελικά.

Τελικά όμως, ούτε η Φωτογραφία 51, ούτε η έκθεση του MRC «έδωσε» στον Watson και στον Crick την διπλή έλικα. Αυτό που το έκανε ήταν έξι εβδομάδες αυτού που περιέγραψαν έπειτα ως «δοκιμή και λάθος» - "trial and error", πραγματοποιώντας χημικούς υπολογισμούς και χρησιμοποιώντας μοντέλα από χαρτόνι.

Τα δεδομένα της Franklin και πολλές συζητήσεις του Watson και του Crick με τον Wilkins φαίνεται να παρείχαν βασικά κομμάτια πληροφορίας – οι φωσφορικές ομάδες ήταν στο εξωτερικό του μορίου, υπήρχε μια επανάληψη κάθε 34 Å, ίσως υπήρχαν δέκα βάσεις ανά επανάληψη και ένας ζυγός αριθμός κλώνων αντιθέτων κατευθύνσεων (η επίπτωση της συμμετρίας C2). Ωστόσο, σύμφωνα με δικές τους μαρτυρίες, οι Watson και Crick αγνόησαν κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία κάποια στιγμή κατά τη διάρκεια αυτών των έξι εβδομάδων. Μόλις είχαν καταλήξει σε ένα εννοιολογικό μοντέλο της δομής, η έκθεση του MRC παρείχε ένα πολύτιμο έλεγχο των υποθέσεων τους.

Δεν ήταν λοιπόν η περίπτωση στην οποία έκλεψαν τα δεδομένα της ομάδα του King's και έπειτα, "Voilà", αυτά τα δεδομένα τους έδωσαν τη δομή του DNA. Αντιθέτως, έλυσαν το πρόβλημα της δομής μέσω της δικής τους επαναληπτικής προσέγγισης και στη συνέχεια χρησιμοποίησαν τα δεδομένα του King's – χωρίς άδεια – για να την επιβεβαιώσουν.



Ο James Watson (αριστερά) και ο Francis Crick μοντελοποίησαν τη δομή της διπλής έλικας του DNA.

<https://www.nature.com/articles/d41586-023-01313-5>

Τι έκανε πραγματικά η Franklin

Η Franklin συνεισέφερε αρκετές βασικές γνώσεις για την ανακάλυψη της διπλής έλικας. Διαφοροποίησε ξεκάθαρα τις μορφές A και B, λύνοντας ένα πρόβλημα που είχε μπερδέψει προηγούμενους ερευνητές. (Πειράματα περίθλασης ακτίνων X είχαν χρησιμοποιήσει μείγμα των μορφών A και B του DNA, αποδίδοντας μοτίβα που ήταν αδύνατο να επιλυθούν πλήρως.) Οι μετρήσεις που πραγματοποίησε της έδειξαν ότι η μοναδιαία κυψελίδα του DNA ήταν τεράστια, προσδιόρισε επίσης τη συμμετρία C₂ που παρουσιάζεται από αυτή τη μοναδιαία κυψελίδα.

Η συμμετρία C₂ ήταν μια από τους 230 τύπους κρυσταλλογραφικών 3D «χωρικών ομάδων» που είχαν καθιερωθεί στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Η Franklin απέτυχε να εκτιμήσει τη σημασία της όχι επειδή ήταν αμβλύνουσα, αλλά επειδή δεν ήταν εξοικειωμένη με αυτή. Σύμφωνα με τον συνάδελφο της, Aaron Klug, η Franklin αργότερα είπε ότι «θα μπορούσε να έχει κλωστήσει τον εαυτό της» επειδή δεν συνειδητοποίησε τις δομικές επιπτώσεις. Ο Crick τις συνειδητοποίησε γιατί είχε μελετήσει έντονα τη συμμετρία C₂. Αλλά, ακόμη και αυτός δεν χρησιμοποίησε την αποφασιστικότητα της Franklin για τη συμμετρία κατά την κατασκευή του μοντέλου. Μάλλον, αυτή παρείχε μια ισχυρή επιβεβαίωση όταν το μοντέλο τους ολοκληρώθηκε.

Η Franklin κατάλαβε επίσης, ανεξάρτητα, μια εκ των θεμελιωδών γνώσεων της δομής: πως, καταρχήν, το DNA θα μπορούσε να καθορίσει τις πρωτεΐνες. Τον Φεβρουάριο του 1953, δούλευε σκληρά για να τελειώσει τις αναλύσεις του DNA πριν φύγει από το King's. Η μορφή A συνέχιζε να αντιστέκεται στις προσπάθειες την να

την ερμηνεύσει, οπότε στράφηκε στην πολύ απλούστερη, σαφώς ελικοειδή μορφή Β. Οι σημειώσεις της αποκαλύπτουν ότι στα τέλη του Φεβρουαρίου, είχε αποδεχθεί ότι η μορφή Α ήταν εξίσου πιθανώς ελικοειδής, με δυο αλυσίδες, και είχε συνειδητοποιήσει ότι η σειρά των βάσεων σε μια δεδομένη αλυσίδα δεν είχε κανένα αποτέλεσμα στη συνολική δομή. Αυτό σήμαινε ότι οποιαδήποτε αλληλουχία βάσεων ήταν δυνατή. Όπως σημείωσε: «μια άπειρη ποικιλία νουκλεοτιδικών αλληλουχιών θα ήταν δυνατή να εξηγήσει τη βιολογική ειδικότητα του DNA». Αυτήν την ιδέα, την οποία και ο Watson και ο Crick συνέλαβαν περίπου την ίδια χρονική περίοδο, την είχε προτείνει για πρώτη φορά το 1947 ο χημικός John Masson Gulland στο University College Nottingham (τόρα Πανεπιστήμιο του Nottingham).

Η Franklin δεν κατάλαβε τη συμπληρωματικότητα των ζευγών βάσεων, ότι η βάση Α μπορούσε να δημιουργήσει δεσμό μόνο με τη βάση Τ και η C μόνο με τη G, με κάθε ζεύγος βάσεων να σχηματίζει μια πανομοιότυπη δομή στο μόριο. Στην πραγματικότητα δεν δούλευε με τις σωστές μορφές των βάσεων, οπότε δεν θα μπορούσε να έχει κάνει ένα ικανοποιητικό μοντέλο (το ίδιο ισχύει για τον Watson και τον Crick μέχρι την τελευταία φάση της δουλειάς τους). Ούτε είχε συνειδητοποιήσει ότι τα δεδομένα της υποδείκνυαν ότι οι δύο αλυσίδες ήταν προσανατολισμένες με διαφορετικές κατευθύνσεις – ή ότι η μορφή Β, που βρέθηκε σε υψηλά ποσοστά υγρασίας, πρέπει να είναι η λειτουργική μορφή βιολογικά. (Η μορφή Α βρίσκεται μόνο υπό εργαστηριακές συνθήκες.) Η Franklin δεν είχε χρόνο να κάνει αυτά τα τελικά βήματα, επειδή ο Watson και ο Crick την πρόλαβαν.

Η Franklin δεν τα κατάφερε, εν μέρει επειδή εργαζόταν μόνης της, χωρίς κάποιον με τον οποίον θα μπορούσε να ανταλλάξει ιδέες. Ήταν επίσης αποκλεισμένη από τον κόσμο των άτυπων συναλλαγών, κάτι που δεν ίσχυε για τους Watson και Crick. Αν και ορισμένοι εκείνη την εποχή – ιδίως οι ερευνητές του King's και μια μικρή ομάδα αυτών που ο Watson αποκαλούσε «κατώτερων των βιοχημικών του Cambridge» (“minor Cambridge biochemists”) – δεν ήταν χαρούμενοι με τη χρήση των δεδομένων από την ομάδα του King's, οι κορυφικοί επιστήμονες στο Cavendish – Perutz, Bragg, John Kendrew – θεώρησαν ότι ήταν αρκετά φυσιολογικό. Και δεν υπάρχει αποδεικτικό στοιχείο που να υποδεικνύει ότι η Franklin πίστευε διαφορετικά.

Αναγνωρίζοντας την αλήθεια

Αφού ο Watson και ο Crick είχαν διαβάσει την έκθεση του MRC, δεν μπορούσαν να κάνουν ότι δεν την είχαν δει. Αλλά θα μπορούσαν – και θα έπρεπε – να έχουν ζητήσει άδεια χρήσης των δεδομένων και να είχε καταστεί σαφές ακριβώς αυτό που είχαν κάνει στις δημοσιεύσεις τους, πρώτα στην Franklin και τον Wilkins και έπειτα στον υπόλοιπο κόσμο.

Τον Απρίλιο του 1953, το *Nature* δημοσίευσε, το ένα μετά το άλλο, τρία άρθρα για τη δομή του DNA, από τους Watson και Crick, τον Wilkins και τους συνεργάτες του και από την Franklin και τον Gosling. Οι Watson και Crick δήλωσαν ότι είχαν «παρακινηθεί από τη γνώση της γενικής φύσης αδημοσίευτων πειραματικών αποτελεσμάτων και ιδεών» του Wilkins και της Franklin. Επέμειναν όμως, ότι «δεν γνώριζαν τις λεπτομέρειες», υποστηρίζοντας ότι η δομή «στηρίζεται κυρίως, όχι όμως εντελώς σε δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα και στερεοχημικά επιχειρήματα». Η αλήθεια αυτών των δηλώσεων εξαρτάται πολύ από τις ερμηνείες του «λεπτομέρειες» και του «κυρίως, όχι όμως εντελώς».

Σε μια πλήρη περιγραφή της δομής σε άρθρο που υποβλήθηκε τον Αύγουστο του 1953 και δημοσιεύτηκε το 1954, ο Crick και ο Watson προσπάθησαν να θέσουν την αληθή διάσταση των γεγονότων. Αναγνώρισαν ότι χωρίς τα δεδομένα της Franklin, «η διατύπωση της δομής μας θα ήταν πολύ απίθανη, αν όχι αδύνατη», και αναφέρονται στην έκθεση του MRC ως μια «προκαταρκτική έκθεση» στην οποία η Franklin και ο Wilkins «είχαν ανεξάρτητα προτείνει ότι η βασική δομή της παρακρυσταλλικής [B] μορφής είναι ελικοειδής και περιέχει δύο αλληλένδετες αλυσίδες». Σημείωσαν επίσης ότι οι ερευνητές του King's «προτείνουν ότι η σακχαρο-φωσφορική ραχοκοκαλιά σχηματίζει το εξωτερικό της έλικας και ότι κάθε αλυσίδα επαναλαμβάνεται η ίδια μετά από μια στροφή σε 34 Å».

Αυτή η σαφής αναγνώριση τόσο της φύσης όσο και της πηγής των πληροφοριών που είχαν χρησιμοποιήσει ο Watson και ο Crick έχει παραβλεφθεί σε προηγούμενες αναφορές της ανακάλυψης της δομής του DNA. Καθώς οι δυο αυτοί ερευνητές του Cambridge προσπαθούν τελικά να κάνουν το σωστό, ενισχύεται η υπόθεση ότι η Franklin ήταν ένα ισότιμο μέλος σε μια ομάδα τεσσάρων επιστημόνων που εργάζονται στη δομή του DNA. Αναγνωρίστηκε από τους συναδέλφους της ως τέτοια, αν και η αναγνώριση της ήταν καθυστερημένη και υποτιμημένη. Όλα αυτά βοηθούν στην επεξήγηση ενός από τα διαρκή αινίγματα της υπόθεσης – γιατί ούτε η Franklin, ούτε ο Wilkins αναρωτήθηκαν ποτέ πως η δομή είχε ανακαλυφθεί. Γνώριζαν την απάντηση, επειδή περίμεναν ότι ο Perutz θα μοιραζόταν τις γνώσεις του και επειδή είχαν διαβάσει το άρθρο των Watson και Crick του 1954.

Τέλος χρόνου (Time out)

Τρεις εβδομάδες μετά τη δημοσίευση των τριών άρθρων στο *Nature*, ο Bragg έδωσε μια διάλεξη για την ανακάλυψη στο Guy's Hospital Medical School στο Λονδίνο, η οποία αναφέρθηκε στο πρωτοσέλιδο της καθημερινής βρετανικής εφημερίδας *News Chronicle*. Αυτό τράβηξε την προσοχή της Joan Bruce, μιας δημοσιογράφου από το Λονδίνο που εργαζόταν για το *Time*. Αν και το άρθρο της Bruce δεν έχει δημοσιευθεί ποτέ – ή περιγραφεί από ιστορικούς, έως τώρα – είναι αξιοσημείωτο για τη μυθιστορηματική του καταγραφή της ανακάλυψης της διπλής έλικας.

Η Bruce αποτύπωσε το έργο σαν να γίνεται από «δύο ομάδες»: μια, αποτελούμενη από τους Wilkins και Franklin, που συνέλεγε πειραματικά στοιχεία χρησιμοποιώντας ανάλυση ακτίνων X, και «την άλλη» που περιελάμβανε τους Watson και Crick, που εργαζόταν στην θεωρία. Σε έναν ορισμένο βαθμό, έγραψε η Bruce, οι ομάδες εργάστηκαν ανεξάρτητα, αν και «συνδέθηκαν, επιβεβαιώνοντας ο ένας τη δουλειά του άλλου από καιρό σε καιρό, ή παλεύοντας πάνω σε ένα κοινό πρόβλημα».

Για παράδειγμα, ο Watson και ο Crick είχαν «αρχίσει να εργάζονται στη θεωρία της διπλής έλικας ως αποτέλεσμα των ακτίνων X του Wilkins». Αντιθέτως, έγραψε, η Franklin «έλεγε το μοντέλο του Cavendish έναντι των δικών της ακτίνων X, μη επιβεβαιώνοντας πάντα τη δομική θεωρία του Cavendish». Και τα δυο παραδείγματα αποδίδουν στην Franklin μια θέση δύναμης, ανάλογη των Wilkins, Crick και Watson.

Δυστυχώς, η Bruce δεν ήταν τόσο δυνατή στην επιστήμη. Το άρθρο της έφτασε αρκετά μακριά ώστε να στείλει το *Time* έναν φωτογράφο του Cambridge, τον Anthony Barrington Brown, για να τραβήξει πορτρέτα των Watson και Crick και στο να πει ο Watson στους φίλους του να το αναμένουν. Αλλά δεν δημοσιεύτηκε ποτέ,

ίσως επειδή η Franklin είπε στην Bruce ότι χρειαζόταν πολλή δουλειά για να κατανοηθεί κατάλληλα η επιστήμη. Η καταγραφή της Bruce θάφτηκε και οι συναρπαστικές εικόνες του Barrington Brown εξαφανίστηκαν, μέχρι που τις έφερε στο προσκήνιο 15 χρόνια αργότερα ο Watson, τις καλύτερες από αυτές, για το βιβλίο του *The Double Helix*.

Είναι δελεαστικό να σκεφτόμαστε πως θα μπορούσαν οι άνθρωποι να θυμούνται την ιστορία της διπλής έλικας, αν το άρθρο της Bruce είχε δημοσιευθεί, έχοντας καταλλήλως επιστημονικά διορθωθεί. Από την αρχή, η Franklin θα είχε παρουσιασθεί ως ένα ισότιμο μέλος ενός κουαρτέτου που έλυσε το πρόβλημα της δομής του DNA, ως το ένα μέλος της ομάδας που διατύπωσε το επιστημονικό ερώτημα, που έκανε σημαντικά πρώτα βήματα κατευθυνόμενη προς τη λύση, που παρείχε κρίσιμα δεδομένα και επαλήθευσε το αποτέλεσμα. Πράγματι, μια από τις πρώτες δημόσιες εμφανίσεις της διπλής έλικας, στη *Royal Society Conversazione* τον Ιούνιο του 1953, υπογράφηκε από τους συγγραφείς και των τριών εργασιών στο περιοδικό *Nature*. Εκεί, η ανακάλυψη της δομής του DNA δεν θεωρήθηκε ένας κερδισμένος αγώνας από τους Watson και Crick, αλλά ένα αποτέλεσμα μιας κοινής προσπάθειας.

Σύμφωνα με τον δημοσιογράφο Horace Freeland Judson και τη βιογράφο της Franklin, Brenda Maddox, η Rosalind Franklin έχει υποτιμηθεί σε «αδικημένη ηρωίδα» της διπλής έλικας. Της αξίζει να τη θυμόμαστε όχι ως θύμα της διπλής έλικας, αλλά ως ισότιμο συντελεστή στην επίλυση της δομής του DNA.

En κατακλείδι

En κατακλείδι, η συμβολή της Franklin, των Wilkins, Watson, Crick και κάθε επιστήμονα που εργάζεται με αγάπη για την επιστήμη του, εξελίσσει την ανθρωπότητα εν γένει και την οδηγεί σε νέα μονοπάτια. Στην αποκαλούμενη περίοδο των ομικών τεχνολογιών (omics era) την οποία διανύουμε, καλούνται οι επιστήμονες σε επαγρύπνηση και ανιδιοτελή διαμοιρασμό των γνώσεων τους προς όφελος του κοινού καλού. Μια πληθώρα αναδυόμενων πληροφοριών μεγάλου όγκου, καλεί τους επιστήμονες να αναπτύξουν νέους τρόπους διαχείρισης και αξιοποίησης της προσληφθείσας πληροφορίας προς όφελος της ανθρωπότητας. Σημείο αναφοράς αυτής της περιόδου πρέπει να αποτελεί η διερεύνηση των βιοηθικών προεκτάσεων που εγείρονται δια μέσω της χρήσεως αυτών των τεχνολογιών αιχμής και των δεδομένων που αναδύονται, ώστε δια της ορθής εφαρμογής της επιστήμης να γίνει πραγματικότητα η ρήση του Thomas H. Huxley:

«Το γνωστό είναι πεπερασμένο, το άγνωστο ατελείωτο. Στεκόμαστε πάνω σε ένα νησί στη μέση ενός απεριόριστου, ανεξήγητου ωκεανού. Το καθήκον κάθε γενιάς είναι να αποκτά λίγο περισσότερη γη...»

Ιωάννης Δ. Στύλιος

Βιολόγος, M.Sc. «Εφαρμογές της Βιολογίας στην Ιατρική»

Πηγές / Βιβλιογραφία

- <https://www.genome.gov/dna-day>
- <https://bio-field.weebly.com/70yearsdna.html>
- <https://cs.stanford.edu/people/eroberts/cs201/projects/2010-11/Genomics/intro.html>
- <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31798046/>
- <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/Sequencing-Human-Genome-cost>
- <https://www.efsa.europa.eu/el/glossary/omics>
- <https://www.biography.com/scientists/rosalind-franklin>
- <https://www.nature.com/articles/d41586-023-01313-5>
- <https://britanniacoincompany.com/buy-coins/bu-coins/2020-rosalind-franklin-50p-bu/>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S104403050700181X>
- https://en.wikipedia.org/wiki/The_Double_Helix
- <https://pergamos.lib.uoa.gr/uoa/dl/frontend/el/browse/1332749>