

Open Schools Journal for Open Science

Vol 7, No 2 (2024)

Open Schools Journal for Open Science - Special Issue -IDEA Conference Proceedings



Τραβώντας ξανά τη φωτογραφία 51

Δάφνη Ρόμπου, Βάσια Σταϊκούρα

doi: [10.12681/osj.39498](https://doi.org/10.12681/osj.39498)

Copyright © 2024, Δάφνη Ρόμπου, Βάσια Σταϊκούρα



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

To cite this article:

Ρόμπου Δ., & Σταϊκούρα Β. (2024). Τραβώντας ξανά τη φωτογραφία 51. *Open Schools Journal for Open Science*, 7(2). <https://doi.org/10.12681/osj.39498>

Τραβώντας ξανά τη φωτογραφία 51

Ρόμπου Δάφνη

Σταϊκούρα Βάσια

Υπεύθυνοι Εκπαιδευτικοί
Μαρίνου Χαρούλα, ΠΕ04.04
Τσουμάκης Τάκης, ΠΕ04.01

Ελληνογερμανική Αγωγή
Β΄ Λυκείου

Περίληψη

Η ανακάλυψη της διπλής έλικας του DNA το 1953 από τους Francis Crick και James Watson αποτέλεσε κομβικό σταθμό στην ιστορία της Βιολογίας και της Ιατρικής. Η ανακάλυψη αυτή στηρίχτηκε στην εργαστηριακή έρευνα της Rosalind Franklin και του φοιτητή της Raymond Gosling, οι οποίοι, χρησιμοποιώντας την τεχνική της περίθλασης ακτίνων – X, τράβηξαν την περίφημη «φωτογραφία 51», η οποία αποτυπώνει ξεκάθαρα την ελικοειδή δομή του μορίου του DNA. Δυστυχώς τα πειράματά τους δεν μπορούν να αναπαραχθούν στο σχολικό εργαστήριο, λόγω της επικινδυνότητας των ακτίνων – X. Σκοπός της εργασίας είναι η εξομοίωση και αναπαράσταση της έρευνας των Crick, Watson, Franklin και Gosling, μέσω της χρήσης υλικών εργαστηρίου. Η έλικα του DNA εξομοιώνεται με ένα ελατήριο και οι ακτίνες – X με μια πηγή πράσινου LASER. Μεταβάλλοντας το βήμα της έλικας του ελατηρίου, πετυχαίνουμε εικόνες περίθλασης σε μια λευκή επιφάνεια πίσω από το ελατήριο. Μετρώντας την απόσταση των ιχνών και τη γωνία που σχηματίζουν, μπορούμε να εξαγάγουμε τιμές για τα αντίστοιχα μεγέθη του ακτινοβολούμενου αντικειμένου (ελατήριο ή μόριο DNA). Τα αποτελέσματά μας είναι συμβατά με τη βιβλιογραφία. Η χρήση αυτής της τεχνικής στο σχολικό εργαστήριο μπορεί να αποτελέσει έναν σημαντικό εναλλακτικό τρόπο διδασκαλίας με χρήση τεχνικών ανακαλυπτικής μάθησης.

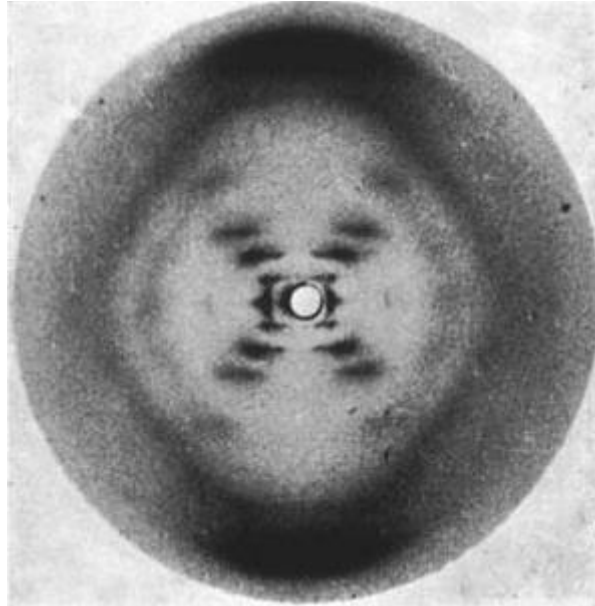
Λέξεις κλειδιά: διπλή έλικα, DNA, φωτογραφία 51, περίθλαση ακτίνων – X

1. Εισαγωγή

Η ανακάλυψη της δομής του DNA από τον Άγγλο φυσικό Francis Crick και τον Αμερικανό βιολόγο James Watson το 1953 έφερε επανάσταση στην επιστήμη της Βιολογίας (Watson & Crick, 1953). Η δομή της διπλής έλικας, που εκτείνεται στις τρεις διαστάσεις του χώρου και ικανοποιεί τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, βοηθά στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο κωδικοποιείται και κληρονομείται η γενετική πληροφορία. Το μοντέλο που πρότειναν οι Crick και Watson στηρίχτηκε, μεταξύ άλλων, στην εργασία της Rosalind Franklin και του φοιτητή της Raymond Gosling, οι οποίοι, χρησιμοποιώντας την τεχνική της περίθλασης ακτίνων – X, τράβηξαν την περίφημη «φωτογραφία 51», η οποία αποτυπώνει ξεκάθαρα την ελικοειδή δομή του μορίου του DNA (Εικόνα 1). Με τον όρο «περίθλαση» οι φυσικοί περιγράφουν την κάμψη του φωτός πάνω σ' ένα εμπόδιο, όπως είναι το άκρο μιας σχισμής (Halliday et al., 1997). Το αποτέλεσμα της περίθλασης είναι αρχικώς η δημιουργία ασαφών ορίων στις σκιές των φωτιζόμενων αντικειμένων. Καθώς μικραίνουν οι διαστάσεις των φωτιζόμενων αντικειμένων, η ασάφεια μεγαλώνει και εμφανίζονται χαρακτηριστικά μοτίβα με φωτεινές και σκοτεινές περιοχές («κροσσοί συμβολής»). Για τη μελέτη πολύ μικρών δομών, όπως οι

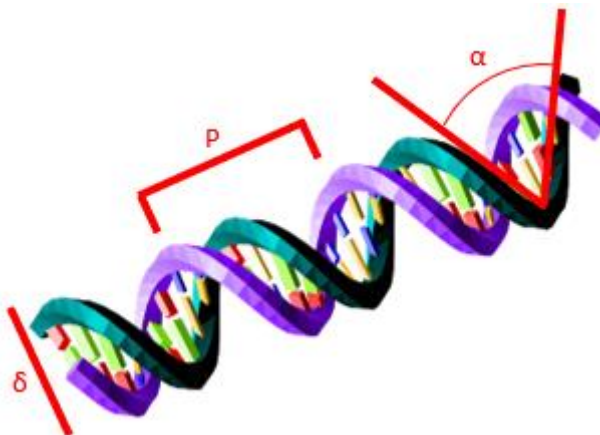
κρυσταλλικές δομές των μορίων, το ορατό φως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, καθώς η ασάφεια θολώνει πλήρως την εικόνα. Στη θέση του χρησιμοποιούνται οι αόρατες ακτίνες – X, οι οποίες έχουν πολύ μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα. Η «σκιά» αποτυπώνεται σε ειδικό φωτογραφικό φιλμ. Η τεχνική αυτή ονομάζεται «κρυσταλλογραφία ακτίνων – X» (Crouse, 2007). Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής σε κρυστάλλους του μορίου DNA έδωσε τη φωτογραφία 51 (Εικόνα 1).

Εικόνα 1: Η εικόνα περίθλασης του μορίου DNA (Franklin & Gosling, 1953)



Αν και η εκτενής ανάλυση της εικόνας είναι πέρα από τον σκοπό της παρούσας εργασίας, κάποια βασικά χαρακτηριστικά αναλύονται παρακάτω. Καταρχάς το ευδιάκριτο (X) από διαδοχικές φωτεινές και σκοτεινές γραμμές της Εικόνας 1 είναι χαρακτηριστικό μιας ελικοειδούς διάταξης. Η πάνω γωνία (V) ισούται με τη γωνία α που σχηματίζουν οι βάσεις της έλικας, καθώς εκτείνεται σε μια κύρια διάσταση στον χώρο (Εικόνα 2).

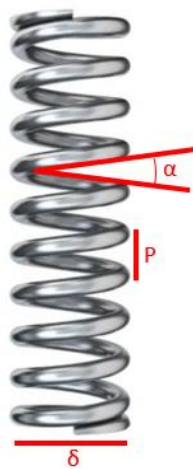
Εικόνα 2: Τα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη α , P και δ στο μόριο του DNA



Η απόσταση μεταξύ των σκοτεινών γραμμών είναι αντιστρόφως ανάλογη του βήματος P της έλικας (απόσταση στην κύρια διάσταση μέχρι την ολοκλήρωση μιας πλήρους περιστροφής). Αυτό σημαίνει πως αν κάποιος μπορούσε να «τεντώσει» ένα μόριο DNA, τα P και α θα αυξάνονταν, ενώ η απόσταση

των σκοτεινών γραμμών στη φωτογραφία θα μειωνόταν. Η απουσία της τέταρτης σκοτεινής γραμμής και στους δύο κλώνους του (X) αποδεικνύει ότι η έλικα είναι διπλή, με τον δεύτερο κλώνο μετατοπισμένο κατά $3P/8$ (Thompson et al., 2018). Το «πάχος» της διπλής έλικας είναι η διάμετρος δ του κυκλικού ίχνους της έλικας σε επίπεδο κάθετο στον κύριο άξονά της (Εικόνα 2). Τα πειράματα περίθλασης ακτίνων – X της Franklin και του Gosling θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικές διαθεματικές διδακτικές προσεγγίσεις για τα μαθήματα της Βιολογίας και της Φυσικής στο Λύκειο. Δυστυχώς, λόγω της επικινδυνότητας των ακτίνων – X, δεν μπορούν να αναπαραχθούν στο σχολικό εργαστήριο. Τίθεται, λοιπόν το ερώτημα, αν θα ήταν εφικτή η εξομοίωση και αναπαράσταση της έρευνας των Crick, Watson, Franklin και Gosling, μέσω της χρήσης υλικών σχολικού εργαστηρίου, όπως ορατού φωτός LASER στη θέση των ακτίνων – X και ενός ελατηρίου από σιλό στη θέση του μορίου DNA. Για ένα μοντέλο ελατηρίου, τα μεγέθη α , P , δ εμφανίζονται στην Εικόνα 3.

Εικόνα 3: Τα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη α , P και δ στο μοντέλο του ελατηρίου



Τα μεγέθη αυτά μπορούν να υπολογιστούν πειραματικά, αν μια δέσμη LASER γνωστού μήκους κύματος πέσει πάνω στο ελατήριο και μια εικόνα περίθλασης εμφανιστεί σε έναν τοίχο αρκετά μέτρα μακριά. Μετρώντας την απόσταση L μεταξύ ελατηρίου και τοίχου, την πάνω γωνία (V) μεταξύ των κλώνων της εικόνας περίθλασης, το μήκος x ενός κλώνου και τον αριθμό m των σκοτεινών κροσσών συμβολής του κλώνου, τα α , P και δ βρίσκονται ως εξής (Braun et al., 2011):

α = πάνω γωνία (V) μεταξύ των κλώνων της εικόνας περίθλασης

$$\varepsilon\varphi\theta = \frac{x}{L \cdot m} \quad (1)$$

$$P = \frac{m \cdot \lambda}{\sigma\nu\alpha \cdot \varepsilon\varphi\theta} \xrightarrow{(1)} P = \frac{m^2 \cdot \lambda \cdot L}{\sigma\nu\alpha \cdot x} \quad (2)$$

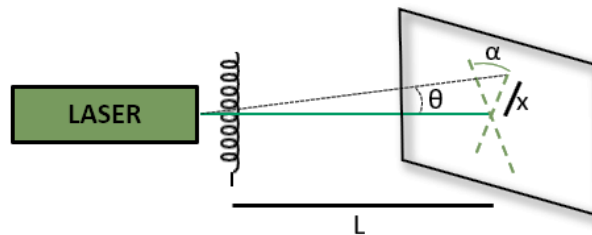
$$\delta = \frac{\varepsilon\varphi(90 - \alpha) \cdot P}{\pi} \quad (3)$$

Από τη σύγκριση των πειραματικών τιμών με τις τιμές που αντλούνται με απευθείας μέτρηση πάνω στο ελατήριο είναι δυνατός ο έλεγχος της αξιοπιστίας της μεθόδου της περίθλασης για τη μελέτη της δομής της ύλης γενικά και ειδικότερα της δομής του μορίου του DNA, όπως θα δείξουμε στη συνέχεια.

2. Κυρίως Μέρος

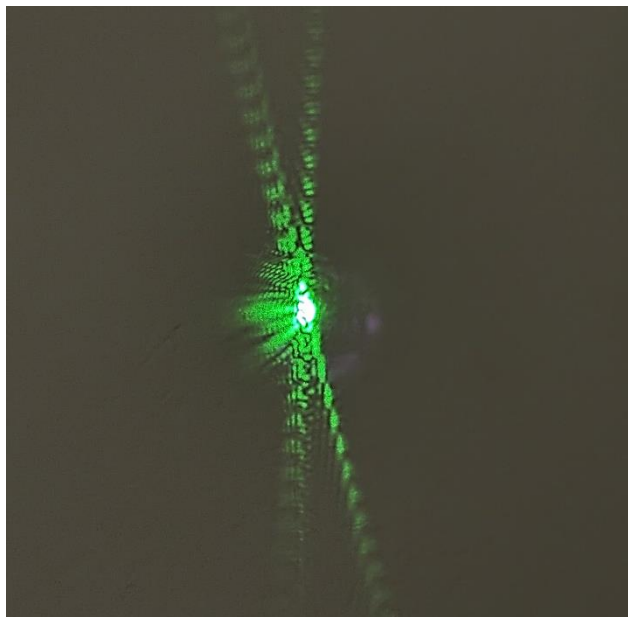
Για τη μέτρηση των α , P και δ χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη της Εικόνας 4. Πράσινο φως LASER μήκους κύματος 532 nm ($5,32 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) προσέπεσε πάνω σε ελατήριο από μηχανικό στίλο, το οποίο είχε στερεωθεί κατακόρυφα πάνω σε ορθοστάτη. Η εικόνα περίθλασης (Εικόνα 5) εμφανίστηκε σε έναν λευκό τοίχο αρκετά μέτρα μακριά από τον ορθοστάτη.

Εικόνα 4: Πειραματική διάταξη



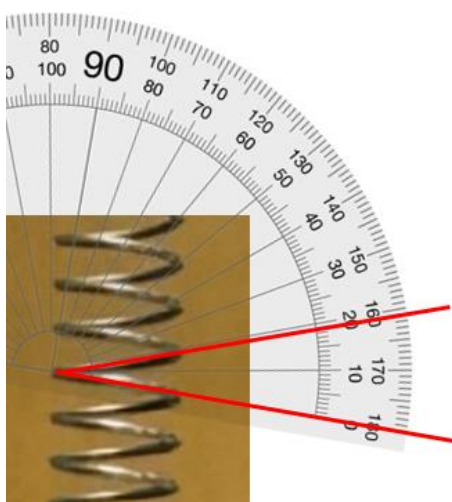
Με ένα αποστασιόμετρο LASER μετρήθηκε η απόσταση L μεταξύ του ελατηρίου και του τοίχου προβολής της εικόνας περίθλασης. Η γωνία α μετρήθηκε με ένα μοιρογνωμόνιο πίνακα.

Εικόνα 5: Η εικόνα περίθλασης της δέσμης LASER από το ελατήριο



Ως απόσταση x πάρθηκε η απόσταση από το κέντρο της εικόνας μέχρι τον τελευταίο καλά ορατό κροσσό συμβολής. Μετρήθηκε το πλήθος m των κροσσών συμβολής που αντιστοιχούσαν στην απόσταση x . Από τις εξισώσεις (1), (2) και (3) υπολογίστηκε το βήμα P της έλικας και το πάχος δ του ελατηρίου. Στη συνέχεια, τα μεγέθη α , P και δ μετρήθηκαν πάνω στο ελατήριο. Τα P , δ προσδιορίστηκαν με ένα διαστημόμετρο, ενώ το α μετρήθηκε μέσω μιας φωτογραφίας του ελατηρίου και τη χρήση μοιρογνωμονίου πάνω στη φωτογραφία (Εικόνα 6).

Εικόνα 6: Μέτρηση της γωνίας α στο ελατήριο



Στην εικόνα περίθλασης μετρήθηκε γωνία μεταξύ των σκελών $\alpha = 19^\circ$. Το μήκος του σκέλους μέχρι τον τελευταίο ευδιάκριτο κροσσό ήταν $x = 25$ cm, ενώ το πλήθος των αντίστοιχων κροσσών ήταν $m = 10$. Η απόσταση ελατηρίου – τοίχου προβολής βρέθηκε να είναι $L = 10,1$ m. Μέσω των (1), (2) και (3) το βήμα της έλικας υπολογίστηκε $P = 2,2$ mm και το πάχος του ελατηρίου $\delta = 4,2$ mm. Οι μετρήσεις στο ελατήριο έδωσαν $\alpha = 19^\circ$, $P = 2,1$ mm, $\delta = 4,0$ mm. Η ποσοστιαία απόκλιση των πειραματικών τιμών από τις μετρήσεις πάνω στο ελατήριο είναι $\Delta P\% = 4,8\%$ και $\Delta\delta\% = 5,0\%$ (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Πειραματικά αποτελέσματα

	α (μοίρες)	x (m)	m	L (m)	λ (nm)	P (mm)	δ (mm)
πειραματικές τιμές	19	0,25	10	10,1	532	2,2	4,2
μετρήσεις ελατηρίου	19	-	-	-	-	2,1	4,0
ποσοστιαία απόκλιση	0%	-	-	-	-	4,8%	5,0%

3. Συμπεράσματα/Επίλογος

Οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίστηκαν στο ελατήριο παρουσιάζουν απόκλιση. Η απόκλιση αυτή (περίπου 5%) δείχνει ότι η μέτρηση των χαρακτηριστικών μεγεθών του ελατηρίου μέσω της περίθλασης μιας δέσμης LASER είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το σφάλμα στη μέτρηση μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες: Η γωνία α μετρήθηκε με απόκλιση $\pm 1^\circ$. Με $\alpha = 19,6^\circ$ η τιμή για το πάχος δ του ελατηρίου συμπίπτει με την αναμενόμενη. Το μήκος x μετρήθηκε με απόκλιση 1 cm. Με $x = 0,26$ m η τιμή για το βήμα της έλικας συμπίπτει με την αναμενόμενη, χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η τιμή για το δ . Ως εκ τούτου, με μετρήσεις υψηλότερης ακρίβειας το σφάλμα αναμένεται σημαντικά μικρότερο. Τα αποτελέσματα είναι συμβατά με τη βιβλιογραφία. Οι (Braun et al., 2011) υπολόγισαν τα α , P και δ με απόκλιση 5%, 4,3% και 17,5% αντίστοιχα. Οι (Thompson et al., 2018) αναφέρουν ότι τέτοιοι υπολογισμοί μπορούν να

γίνουν μόνο σε ένα «στοιχειώδες επίπεδο». Φαίνεται, όμως, ότι παρά τις τεχνικές δυσκολίες που υπεισέρχονται στις μετρήσεις, ο πειραματικός προσδιορισμός των a , P και δ είναι εφικτός και το συγκεκριμένο πείραμα μπορεί να λειτουργήσει ως ένα εξαιρετικό υπόδειγμα για την εργαστηριακή μελέτη του μορίου του DNA. Η δυνατότητα που δίνει αυτή η τεχνική στην προσέγγιση ενός ιστορικού πειράματος και στην παρακολούθηση των βημάτων που οδήγησαν στην ανακάλυψη της δομής του DNA μπορεί να αποτελέσει έναν σημαντικό εναλλακτικό τρόπο διδασκαλίας με χρήση τεχνικών ανακαλυπτικής μάθησης.

4. Βιβλιογραφία

1. Braun, G., Tierney, D., & Schmitzer, H. (2011). How Rosalind Franklin Discovered the Helical Structure of DNA: Experiments in Diffraction. *The Physics Teacher*, 49(3), 140–143. <https://doi.org/10.1119/1.3555496>.
2. Crouse, D. (2007). X-ray Diffraction and the Discovery of the Structure of DNA: A Tutorial and Historical Account of James Watson and Francis Crick's Use of X-ray Diffraction in Their Discovery of the Double Helix Structure of DNA. *Journal of Chemical Education - J CHEM EDUC*, 84. <https://doi.org/10.1021/ed084p803>.
3. Franklin, R., & Gosling, R. (1953). Molecular Configuration in Sodium Thymonucleate. *Nature*, 171, 740–741. <https://doi.org/10.1038/171740a0>.
4. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (1997). *Fundamentals of Physics* (5th ed.). Wiley.
5. Lucas, A. A., Lambin, Ph., Mairesse, R., & Mathot, M. (1999). Revealing the Backbone Structure of B-DNA from Laser Optical Simulations of Its X-ray Diffraction Diagram. *J. Chem. Educ.*, 76(3), 378. <https://doi.org/10.1021/ed076p378>.
6. Thompson, J., Braun, G., Tierney, D., Wessels, L., Schmitzer, H., Rossa, B., Wagner, H. P., & Dultz, W. (2018). Rosalind Franklin's X-ray Photo of DNA as an Undergraduate Optical Diffraction Experiment. *Am. J. Phys.*, 86(2), 95–104. <https://doi.org/10.1119/1.5020051>.
7. Watson, J., & Crick, F. (1953). Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature*, 171, 737–738. <https://doi.org/10.1038/171737a0>.