

# LA FÍSICA DE LA VIDA

*Determinació experimental de  
l'estructura de l'ADN*





## ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ.....	4
2. ANTECEDENTS .....	6
3. HIPÒTESI DE TREBALL I OBJECTIUS DE RECERCA.....	7
4. MATERIALS I MÈTODES .....	8
4.1 PART PRÀCTICA 1: EXERÈNCIES RELACIONADES AMB FENÒMENS DE LA LLUM .....	8
EXP1. OBSERVACIÓ DEL PATRÓ DE DIFRACCIÓ D' UNA RANURA .....	8
EXP2. OBSERVACIÓ DEL PATRÓ DE DIFRACCIÓ D' UNA XARXA DE DIFRACCIÓ.....	8
EXP3. DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA LONGITUD D' ONA D' UN LÀSER .....	9
4.2 PART PRÀCTICA 2: MODELITZACIÓ DE L' EXPERIMENT DE ROSALIND FRANKLIND .....	11
4.3 RESULTATS OBTINGUTS, ANÀLISI I DISCUSSIÓ.....	15
4.4 DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA FOTOGRAFIA 51 .....	17
4.5 FRANJA INEXISTENT NÚMERO 4 .....	21
5. CONCLUSIONS .....	23
6. AGRAÏMENTS.....	25
7. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES.....	26



*A la ciència hem d'interessar-nos per les coses, no per les  
persones.*

- **Marie Curie**

*La ciència i la vida quotidiana no poden i no han d'estar  
separades.*

**Rosalind Franklin**



## 1. INTRODUCCIÓ

### ABSTRACT

Rosalind Franklin, the real scientist who was able to prove that physics were the first to exist, allows enables us to say today that thanks to physics we know a double helix structure called DNA. But what did she do in her laboratory? She took a protein in solution and illuminated it with a beam of X-rays (nanometer magnitude, which coincides with the order of magnitude of distance between atoms to the protein). The protein acts as a three-dimensional diffraction grating that produces a set of maximum interferences. From their relative positions and intensities of the constructive maximum interferences we can determine all the measurements of the three-dimensional structure of the protein. This is the key. An attempt will be made to model replicate the experiment performed by Rosalind Franklin by using a pen spring instead of DNA and laser light instead of X-rays. The phenomenon of diffraction occurs when the wavelength of the incident radiation is similar in size to the holes through which it strikes. Therefore, laser light will be used. Why the helical structure of a DNA fiber can be modeled with a pen spring will be justified, as well as an estimation of the diameter of the helicoid, the helix pitch (P), and the distance "d"; between two consecutive parallel lines of the spring.

Prior to this, one will become familiar with the phenomena of light by means of experiments. Finally, an experimental determination of the photograph 51 taken by Rosalind Franklin in 1952 will be made

Des de petita, la ciència m'apassiona. Potser perquè he pogut estiuejar i gaudir d'un entorn Pirinenc privilegiat, on la natura és la protagonista i aporta infinitat d'experiències. Les meves primeres passes les vaig fer pujant cims mentre recollia margues, rovellons, entrava en coves sense explorar plenes d'estalactites originades per la reacció inversa de la carbonatació, acampava en un cel ple d'estels o senzillament recollia un cérvol ferit. El meu avi em va ensenyar com caminar per la muntanya, com saber per on havia passat un porc senglar o un os del Pirineu, així com, orientar-me segons l'escorça dels arbres. La meva àvia em va ensenyar com cultivar i com cuidar els animals de granja, quines propietats naturals ens donen les herbes per alleujar, prevenir o tractar problemes de salut, fer sabors, oli... Experiències inoblidables que de mica en mica em van anar introduint en aquesta branca tant ampla com meravellosa, que em captiva i em du al que avui soc, amb els meus valors i el meu interès per continuar explorant. Ressegueixo les meves petjades i no deixo de descobrir més i més meravelles en l'entorn natural.

Les meves ganes de satisfer la curiositat van introduir-me en diferents projectes de caràcter científic. Enguany m'he introduït en la física de forma més reglada, tot i que el meu interès per ella ja el tinc fa temps. Les classes de física les gaudeixo del primer al darrer minut, mai vull que s'acabin. M'impresiona com les coses que realitzem quotidianament tenen un sentit de ser que la física és capaç d'explicar-nos, de resoldre'ns preguntes i, el que és més important, demostrar-nos-en les raons. El món sense la física no existeix i com va dir Marie Curie: "Un científic al seu laboratori no és només un tècnic: és també un nen col·locat davant fenòmens naturals que l'impressionen com un conte de fades". Amb tot això vull dir que la recerca és plena d'oportunitats per enriquir els coneixements al mateix temps que per fruir de les troballes.

De la mateixa manera que de petita m'engrescava conèixer la raó per la qual l'aigua dels llacs s'estén quan es congela per la seva forma hexagonal, quan el meu professor apagant les llums de l'aula i enfocat amb un làser una molla qualsevol va projectar una X tan perfecta i simple,





sabia que era jo qui havia de resoldre aquell patró. Vaig espellucar diversos articles de Rosalind Franklin, una nova figura que, de sobte, admirava. Vaig comprendre així, la fonamental ajuda que tindrien les difraccions en el meu nou projecte.

Perquè l'explicació sigui més plaent, imaginem que estem a una platja, submergits a l'aigua del mar fins a l'alçada de la cintura. Si ens arriba una successió d'onades, el nostre cos es veurà submergit a l'aigua periòdicament per sobre i per sota de la cintura. Imaginem ara que on arriben dos fronts d'onades que pugen i baixen alhora al punt on ens trobem. No és difícil deduir, que el que passarà és que l'alçada a què ens arribarà l'aigua serà el doble, tant per sobre com per sota de la cintura. És a dir, les onades se sumen duplicant-ne l'amplitud en vertical. Direm aleshores que al punt on estem les onades estan interferint constructivament. En cas contrari, si al punt on som, tot i rebre dues onades, no percebem que l'alçada del mar variï. Les onades s'anul·len. Aleshores direm que la interferència entre les dues onades és destructiva. Doncs això és el que anomenem difracció, la creació de nous fronts d'ona. De fet, gràcies a això, Rosalind Franklin, la autèntica científica, va poder demostrar que la física fou la primera a existir, fou la nostra mare. Ella ens permet dir avui, que gràcies a la física coneixem una estructura de doble hèlix anomenada ADN (àcid desoxiribonucleic).



*Il·lustració 1: Rosalind Franklin*

Però, que va voler dir-nos Rosalind Franklin? Com i què va fer en el seu laboratori? Ella va prendre una proteïna en dissolució o cristal·litzada i la il·luminà amb un feix de raigs X o de radiació sincrotró amb una longitud d'ona expressada en nanòmetres (que és l'ordre de magnitud de la separació entre àtoms a la proteïna). La proteïna actua com una xarxa de difracció tridimensional que produeix en una pantalla fluorescent un conjunt de màxims d'interferència. A partir de les posicions relatives i les intensitats d'aquests màxims és possible arribar a obtenir la distància i els angles entre els diversos àtoms i tota l'estructura tridimensional de la proteïna. Aquesta era la clau.

Malauradament, ella no va poder gaudir de l'honor ni del premi Nobel pel fet d'haver fet aquesta gran troballa de la qual se'n va apropiar Watson i Crick. Per això, avui i sempre, hem de recolzar a les dones científiques, acompanyar-les en el seu camí i ajudar-les a fer front a tots els obstacles que s'anteposin per davant. Tal com ella va fer en el seu moment. Aquest treball m'ha permès ser la petita Rosalind Franklin. M'ha generat un vincle de sentiment i plenitud el fet de promoure aquest meravellós experiment i donar visió, en la mesura que puc, a la científica que ens va resoldre el secret de la vida. Ara, més que mai, entenc que hem de seguir els nostres somnis sense rendir-nos, lluitant per aquelles que no ho varen poder fer.

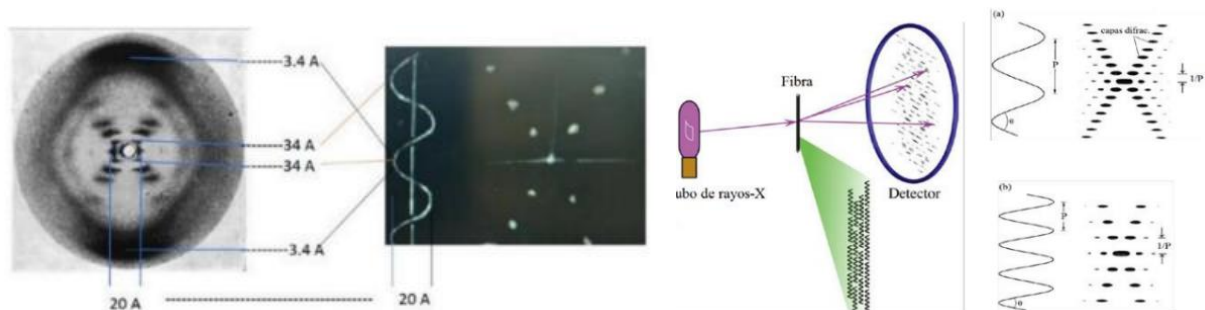
El principal objectiu que m'he proposat en aquest projecte és agermanar disciplines científiques com la Física i la Biologia analitzant la importància que va tenir la pròpia Física al descobriment de l'estructura de l'ADN. D'antuvi, la recerca pretén realitzar una adaptació de l'estudi dels fenòmens d'interferència i difracció mitjançant càlculs força senzills. Se centra en l'estudi físic i



matemàtic d'aquests fenòmens en diferents situacions. El resultat de la comprensió d'aquests conceptes ens deixarà esbrinar l'estructura de l'ADN que serà modelitzada en una molla de bolígraf. Es demostraran les fórmules que utilitzà Rosalind Franklin, es determinaran els patrons d'interferència en diferents condicions amb objectes que s'han obtingut com a mostres d'estudi i, s'acompanyaran d'experiments per tal d'interioritzar-los. Alhora, es realitzarà una comparació amb les xifres assolides per Rosalind Franklin el 6 de maig de 1952 vers la fotografia 51 i les que s'aconseguiran mitjançant el programa "Tracker". Per complementar el treball es troba en l'ANNEX 1 una recerca bibliogràfica sobre la vida de Rosalind Franklin en l'àmbit personal i acadèmic.

## 2. ANTECEDENTS

Rosalind Franklin va ser i és una dona especial pel seu impacte en el món actual. Va néixer a Londres el 25 de juliol de 1920. Va ser filla d'una família terratinent, però va haver de lluitar contra l'oposició dels seus pares per estudiar químiques a "Newman College" a Cambridge, on a la fi ingressarà als 18 anys d'edat. Al llarg de la seva carrera professional realitzarà grans troballes entre les quals es troba l'estructura helicoidal de l'ADN. Un fet molt important en la seva vida és el curs que realitzarà a París com a tècnica de cristal·lografia, que permetrà als científics reconèixer la importància de les estructures de les proteïnes en estar estretament lligades a la seva funció. En la història de la cristal·lografia es troben científics com William Thomas o Maurice Wilkins que van realitzar cristal·lografies amb fibres d'ADN de diferents espècies, totes elles amb poca resolució i sense gairebé dimensions per ser útils. Franklin serà la primera a trobar el percentatge d'humitat idònic per realitzar la cristal·lografia A que permetrà determinar l'estructura helicoidal de l'ADN. Mitjançant diversos i complexos càlculs es va poder determinar cadascuna de les dimensions de l'estructura de l'ADN. Una gran rivalitat entre diferents científics de l'època, entre els quals es troben Watson i Crick, van privar a Rosalind de rebre el reconeixement de la troballa de la seva cristal·lografia, atorgant-se així el mèrit i plagiant-la. La informació realment clau per comprendre aquest patró va ser la següent: El patró de difracció de raigs-X per fibres d'ADN-B correspon al de molècules d'ADN alineades però desordenades entre si. En la il·lustració 2 l'angle de la X amb l'equador és igual a l'angle que forma l'hèlix amb l'eix de la mateixa. Del patró resulta  $P = 34 \text{ Å}$ ,  $p = 3.4 \text{ Å}$  i  $R = 20 \text{ Å}$ . L'absència de la reflexió en la quarta capa suggereix la presència d'una segona hèlix desplaçada en  $3/8P$  al llarg de l'eix que produeix efectes d'interferència destructiva en les capes amb  $n = 4, 12, 20$ , etc.



Il·lustracions 2,3 i 4: Esquerra: Fotografia 51 amb mides. Dreta: Representació experiment Rosalind Franklin



### 3. HIPÒTESI DE TREBALL I OBJECTIUS DE RECERCA

---

El principal objectiu és agermanar disciplines científiques com la Física i la Biologia analitzant la importància que va tenir la pròpia Física al descobriment de l'estructura de l'ADN. D'aquesta manera, la investigació principal és una adaptació de l'estudi dels fenòmens d'interferència i difracció mitjançant els mateixos càlculs que R. Franklin va realitzar al seu moment. El resultat de la comprensió d'aquests conceptes ens deixarà esbrinar l'estructura de l'ADN, així com realitzar altres experiments relacionats. Per dur a terme l'objectiu principal del treball que es tracta d'una modelització de l'experiment que va realitzar Rosalind Franklin mitjançant un feix de llum laser i una molla de bolígraf per determinar les distàncies " $d$ " (entre línia i línia de les xarxes superposades de difracció), el pas d'hèlix " $P$ ", l'angle " $\alpha$ " i el radi " $R$ ". Es realitzaran les següents experiències:

1. **Observar el patró de difracció d'una escletxa.**
2. **Observar el patró de difracció d'una xarxa de difracció.**
3. **Observar del patró de difracció mitjançant dues xarxes de difracció superposades.**
4. **Determinar experimentalment la longitud de onda de la llum d'un làser (vermell i verd).**
5. **Estimar experimentalment el diàmetre d'un cabell i filferro de la molla del bolígraf.**
6. **Determinar experimentalment la fotografia 51.**
7. **Visibilitzar la figura de Rosalind Franklin.**



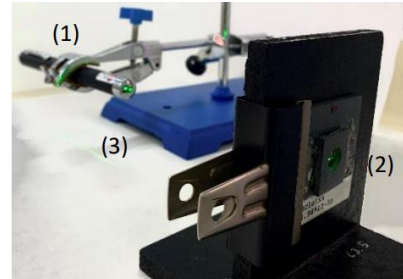
## 4. MATERIALS I MÈTODES

### 4.1 PART PRÀCTICA 1: EXERÈNCIES RELACIONADES AMB FENÒMENS DE LA LLUM

#### EXP1. OBSERVACIÓ DEL PATRÓ DE DIFRACCIÓ D' UNA RANURA

**DESCRIPCIÓ:** Es pretén mostrar el patró de difracció que es forma quan un feix de llum monocromàtica produïda per un làser travessa una obertura rectangular.

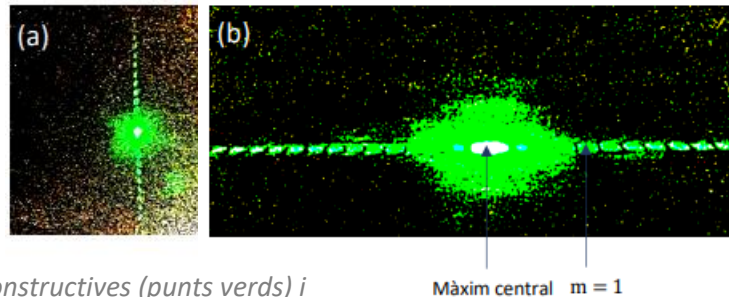
**MATERIAL:** Làser SIMON ( $\lambda: 532\text{nm} \pm 10$ ) (1), Ranura ( $12,98^{-5}\text{m}$ ) (2), Muntatge per a suport (3)



Il·lustració 5: Muntatge

#### RESULTATS

**Conclusions parcials:** S'està en condicions d'afirmar que, depenent de la posició de la escletxa, el patró projectat serà vertical o horitzontal. Són dependents un de l'altre.



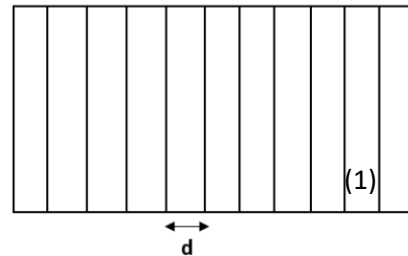
Il·lustració 6 i 7: Interferències Constructives (punts verds) i destructives (punts foscos)

#### EXP2. OBSERVACIÓ DEL PATRÓ DE DIFRACCIÓ D' UNA XARXA DE DIFRACCIÓ

**DESCRIPCIÓ:** Una xarxa de difracció està formada per un conjunt molt números i atapeït de línies paral·leles. On "d" és la separació entre les línies. Quan un feix de llum incideix sobre una xarxa de difracció pateix dos efectes:

(1) La llum en passar per entre les línies surt difractada. De manera que cada es converteix en una font puntual de llum.

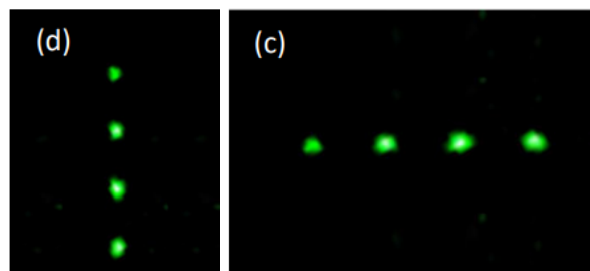
(2) La llum difractada per les diferents línies interfereix entre si, formant l'anomenat patró de interferència. Es farà incidir llum laser en una xarxa de difracció.



Il·lustració 8: Xarxa de difracció de 1000 línies per mm

**MATÈRIAL:** Làser SIMON ( $\lambda: 532\text{nm} \pm 10$ ), Xarxa de difracció (1000 línies mm) (1), Muntatge pel suport.

**RESULTATS:** **Conclusions parcials:** S'està en condicions d'afirmar que, depenent de la posició de la xarxa, el patró projectat serà vertical o horitzontal. Són dependents un de l'altre.



Il·lustració 9 i 10: Resultats

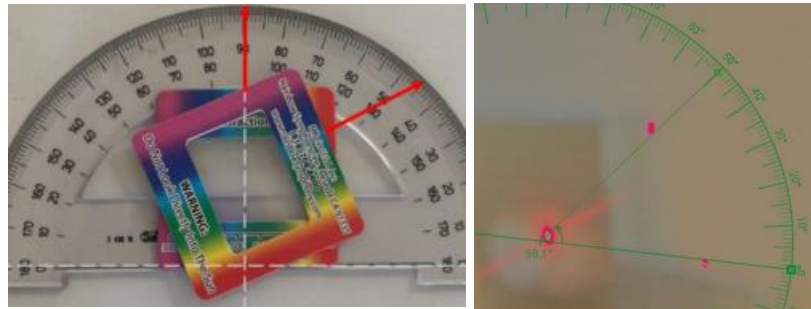




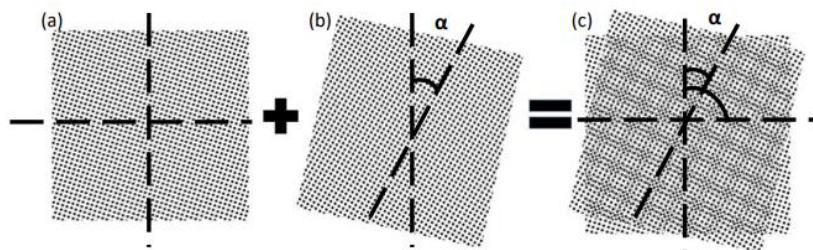
(\*) De la mateixa manera i amb el mateix material, si s'observa la superposició de dues xarxes de difracció, disposada una d'elles un angle  $\alpha$  (observar il·lustració 11), s'obté:

#### Conclusions parcials:

Es pot observar que l'angle que es forma quan se superposen dos patrons de difracció coincideix amb l'angle que formen entre si els seus patrons de difracció respectius.



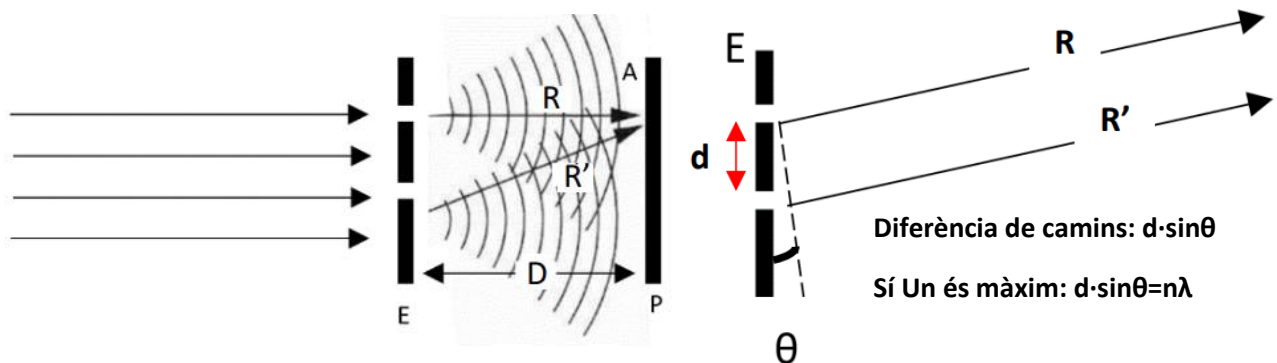
Il·lustracions 11 i 12: Transportador Angles (esquerra), angle del patró (dreta)



Il·lustració 13: Superposició de xarxes de difracció

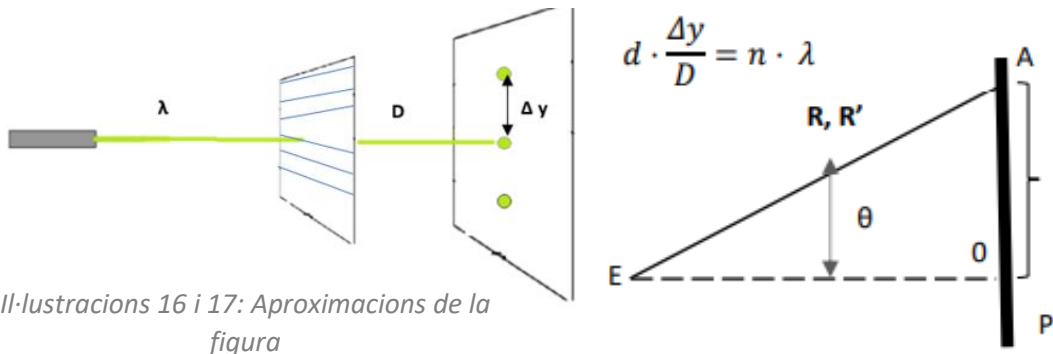
### EXP3. DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA LONGITUD D'ONA D'UN LÀSER

<sup>(1)</sup> **DESCRIPCIÓ:** Es tracta d'obtenir la longitud d'ona de la llum monocromàtica d'un làser verd i vermell pel mètode de les interferències. El caràcter coherent de la llum làser permet fer-lo incidir sobre una xarxa de difracció i obtenir interferències. Es modifica prèviament la següent figura (13) a la (14) suposant que la distància **D** de la xarxa a la pantalla és molt més petita que la **d** i que **R** i **R'** (que són els raigs que incideixen a la xarxa de difracció i recorren el mateix recorregut i per tant  $\theta$  es considera negligible). Així es diu que:



Il·lustracions 14 i 15: Aproximacions de la figura

Modificant més la seva figura, s'aproxima  $D \cong R$  i  $R'$  per la seva curta distància queda:



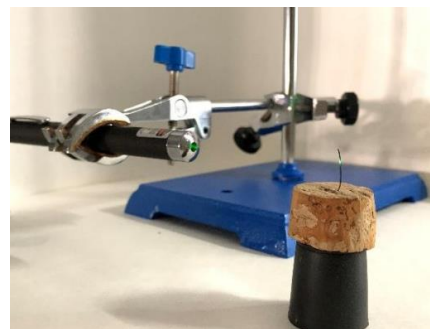
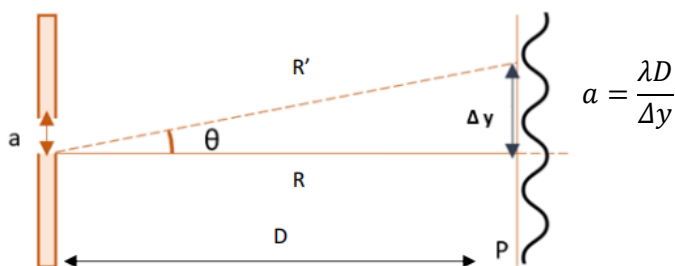
Il·lustracions 16 i 17: Aproximacions de la figura

**MATERIAL:** Làser SIMON ( $\lambda: 532\text{nm} \pm 10$ ), Xarxa de difracció (1000 línies mm) (1), Muntatge per a suport, Regla, Tracker (app).

**RESULTATS: Conclusions parcials:** Aplicant la fórmula, en aquest cas on "d" ha estat coneguda des d'un principi, "D" és mesurada amb una cinta mètrica i  $\Delta y$  s'ha obtingut mesurant directament sobre la pantalla la longitud entre dos màxims consecutius abastada per un nombre determinat de màxims. La longitud d'ona de la llum làser havent repetit el procés 9 vegades del verd és de  $(543 \pm 30)\text{nm}$ . En el cas de la vermella és de  $(630 \pm 27)\text{nm}$ .

#### EXP4. DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DEL DIÀMETRE D' UN CABELL I ALAMABRE DEL MOLLA

**DESCRIPCIÓ:** Es farà incidir la llum làser sobre un filferro i sobre un cabell usant la següent fórmula on es considera que la pantalla està suficientment allunyada de la mostra i per tant  $\sin\theta = \tan\theta$ .



Il·lustració 18 i 19: Procediment

**MATERIAL:** Làser SIMON ( $\lambda: 532\text{nm} \pm 10$ ), Filferro i Cabell, Muntatge de suport, <sup>(5)</sup>Tracker (app)

**RESULTATS: Conclusions parcials:**

S'ha pogut comprovar que la mesura obtinguda a partir de la difracció, aplicant la fórmula anterior, coincideix amb la mesura del diàmetre dels cabells **1,  $0 \cdot 10^{-4}$  m**. En el cas del filferro, també coincideix, el valor és de **0,36 Cm**.



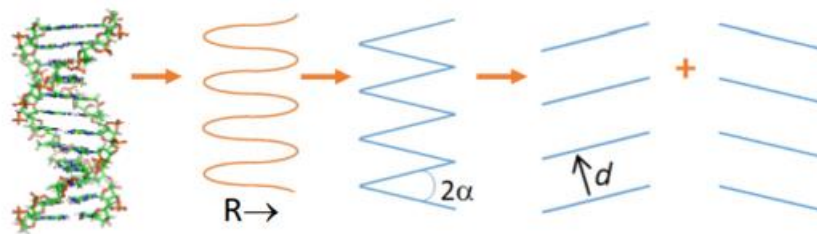
Il·lustració 20 i 21: Comprovació dels resultats obtinguts.



## 4.2 PART PRÀCTICA 2: MODELITZACIÓ DE L' EXPERIMENT DE ROSALIND FRANKLIND

<sup>(2)</sup> **DESCRIPCIÓ:** Per reproduir l'experiment de Franklin amb materials més accessibles s'ha de tenir en compte l'origen del patró de difracció i les dimensions moleculars esmentades anteriorment en els antecedents. Si es canvia els raigs X usats per Franklin per un punter làser de llum monocromàtica verda (543 nm) que s'ha obtingut anteriorment, s'ha de tenir en compte que s'ha multiplicat la longitud d'ona 5. 430 vegades. Per tant, es necessita una molla amb un pas de cerca més gran. Alguns materials senzills, com el filament d'una bombeta o la molla d'un bolígraf són ideals, doncs permeten reproduir l'experiment. En aquest cas s' utilitza la molla d' un bolígraf i se subjecta amb una pinça per poder enfocar-la bé amb el punter làser. A l'habitació o el laboratori totalment a les fosques es fa incidir la llum làser perquè il·lumini diverses mostres de la molla. En l'experiència, la distància entre la mostra i el punter làser és d' uns 80 cm usant lents convergents per ampliar el feix de llum, i es projecta el patró de difracció sobre una pantalla o paret, que en aquest cas estava situada aproximadament a 10 metres. S'obté un patró de difracció similar al de la il·lustració 27.

### MODELITZACIÓ:



Il·lustració 22: Modelització

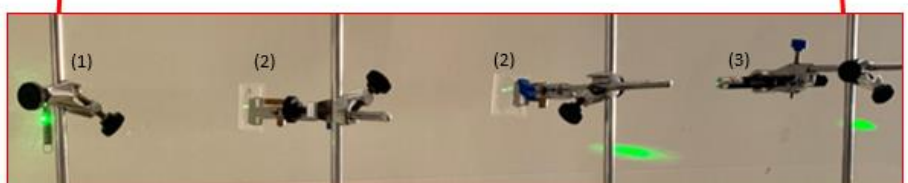
Una cadena d'ADN és aproximada a una figura sinusoidal que es pot modelitzar a una figura de ziga-ziga d'angle  $2\alpha$  que és la de la superposició de dues xarxes de difracció de distància "d" entre dues línies d'una xarxa de difracció.

### MATERIAL:

- Molla de bolígraf. (1)
- Pantalla (superfície plana).
- Lents convergents de 20 cm de distància focal. (2)
- Llum làser verda SIMON ( $\lambda: 532\text{NM} \pm 10$ ). (3)



Il·lustració 23: Muntatge de la molla amb les lents convergents i el làser de llum verda



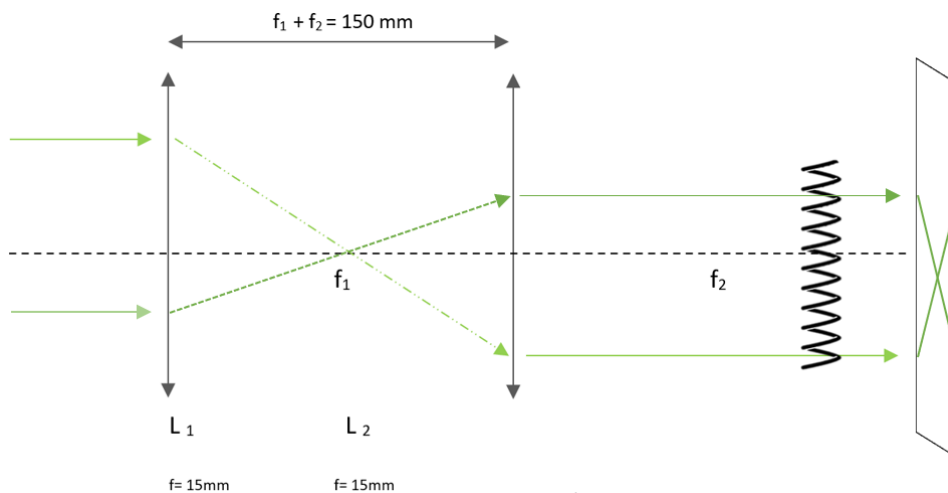
**PROCEDIMENT:**

Per dur a terme l'experiment, s'ha de fer incidir llum làser sobre una molla. Per tal d'eixamplar el feix s'utilitzarà un sistema òptic format per dues lents convergents de distància focal  $f_1 = f_2 = 20\text{cm}$  i separades  $40\text{cm}$  entre elles.



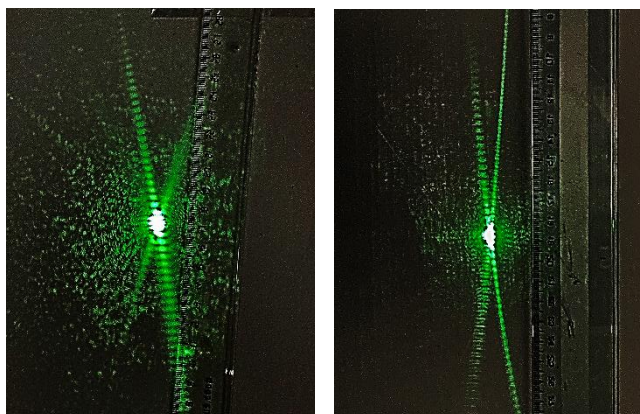
*Il·lustració 24: Mesura de la distància entre lent i lent. Hi ha una separació de  $40\text{ cm}$ .*

L'efecte de les lents convergents s'entén com l'ampliació del feix de llum i per tant de la incidència en les voltes de la molla i així, el patró de difracció.

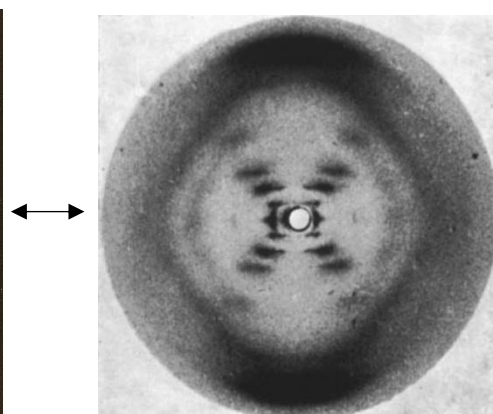


*Il·lustració 25: Esquema lents convergents.*

El patró de difracció obtingut és comparable al que formarien dos sèries d'escletxes inclinades entre si. S'observa un angle de  $2\alpha$ . Aquest patró té la mateixa estructura que l'observat per Rosalind Franklin.



*Il·lustració 26 i 27: Patrons de difracció obtinguts*



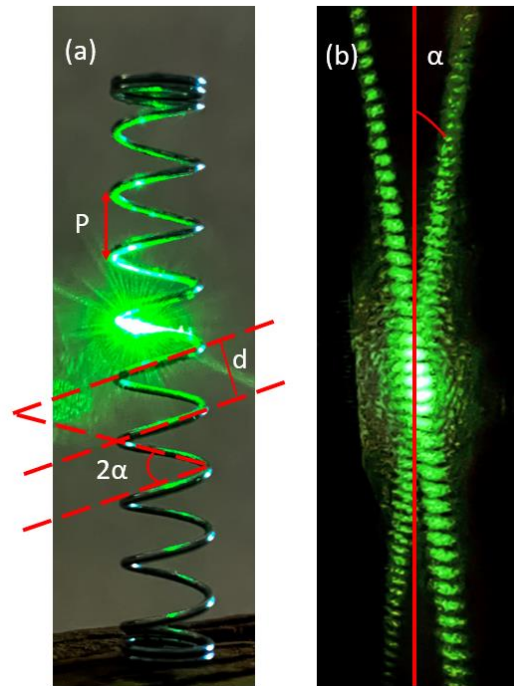
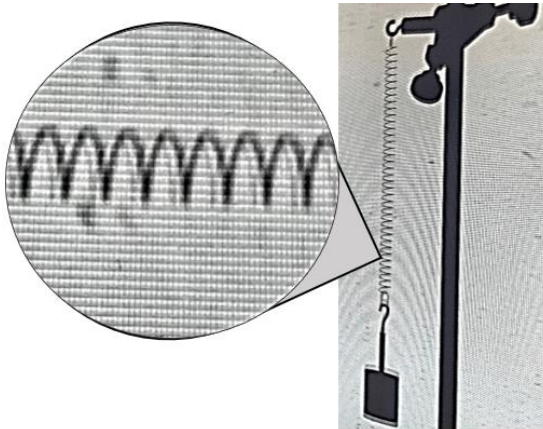
*Il·lustració 28: Patró de Rosalind Franklin*





(a) En aquest cas, una molla de bolígraf s'ha utilitzat com a objecte de difracció helicoidal, on diversos passos d'hèlix estan sent il·luminats per llum làser coherent ( $\lambda = 551 \text{ nm}$ ) estesa per una lent secundària de distància focal  $f = 20 \text{ cm}$ . (b) En aquest altre cas, s'aprecia el patró de difracció resultant observat en una pantalla a  $6 \text{ m}$  de distància, que mostra la forma d'X característica. En aquest cas, s'ha col·locat un polaritzador per ajustar a una extinció gairebé total i evitar la sobresaturació de la imatge.

D'altra banda, si es projecta una molla de bolígraf amb un projector, es pot observar la reducció en una simple cadena de ziga-zaga infinita, tal com s'observa a continuació:

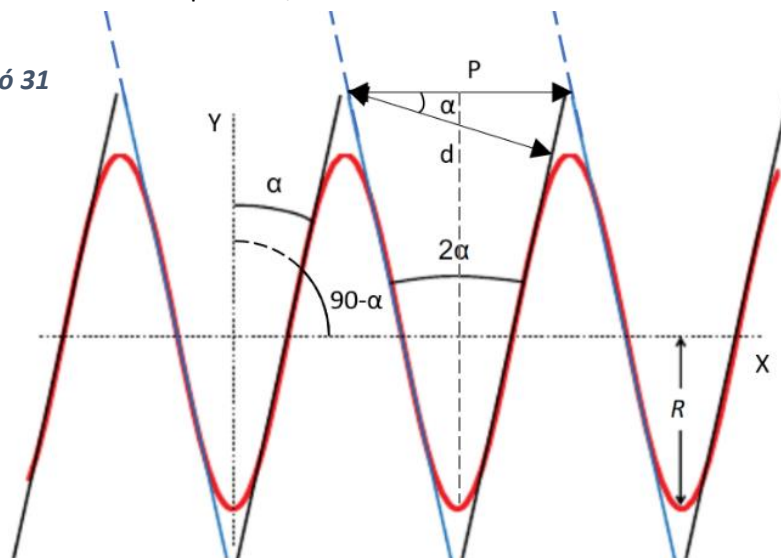


*Il·lustració 29: (a) Il·luminació de diverses voltes d'hèlix de la molla del bolígraf. Els paràmetres marcats fan referència a la il·lustració 31 sobre la línia vermella. (b) difracció creada per la molla. Es pot observar l'angle  $\alpha$*

*Il·lustració 30: Molla essent projectada mitjançant un projector*

Acaba de ésser modelitzada l'estructura d'una de les cadenes helicoidals de l'ADN a una molla. Si s'il·lumina la molla amb un projector de tal manera que la llum hi incideixi perpendicularment i es projecta l'ombra sobre una pantalla, s'observa el dibuix d'una ona sinusoidal.

**Il·lustració 31**







Analitzant la sinusoide, podem modelitzar-la a un conjunt de dues sèries de línies paral·leles (o altrament dit, dues escletxes) separades una distància “d” i que formen entre elles un angle  $2\alpha$  de manera que s’acompleixi que:

(Fórmula 1)

$$P = \frac{d}{\cos\alpha}$$

Essent P el pas d’hèlix. Si mirem la figura 31, i ens fixem en la funció en roig fort, es correspon amb la molla vista de costat. Posant l’origen de coordenades com a la figura, tal funció és del tipus sinus  $f(x) = A \sin(Bx)$  d’amplitud d’aquesta funció és el radi de la molla, per tant  $A=R$ . La distància que avancem per a cada volta que fem a la molla és P, que coincideix amb el període del sinus. Per tant:

$$B = \frac{2\pi}{P}$$

Ara cal calcular una fórmula per a l’angle  $\alpha$ , format per l’eix vertical i la recta tangent a  $f(x)$  en el punt  $x=0$ . Com que  $f(0)=0$ , sabem que la recta tangent a  $f(x)$  en el punt  $x=0$  és de la forma  $y=mx$ , on m és el pendent de la recta, que es pot obtenir amb la relació  $m = \tan(90^\circ - \alpha)$ . Per altra banda, també sabem que m es pot calcular com la derivada de  $f(x)$  en el punt  $x=0$ .

$$\frac{d}{dx} \left[ R \sin\left(\frac{2\pi x}{P}\right) \right] = \frac{R2\pi}{P} \cos\left(\frac{2\pi x}{P}\right)$$

El valor de la funció derivada al punt  $x=0$  serà:

$$\frac{R2\pi}{P} \cos 0 = \frac{R2\pi}{P}$$

Així doncs,

$$\frac{R2\pi}{P} = \tan(90^\circ - \alpha)$$

A partir d’aquesta expressió es pot calcular el radi de la molla:

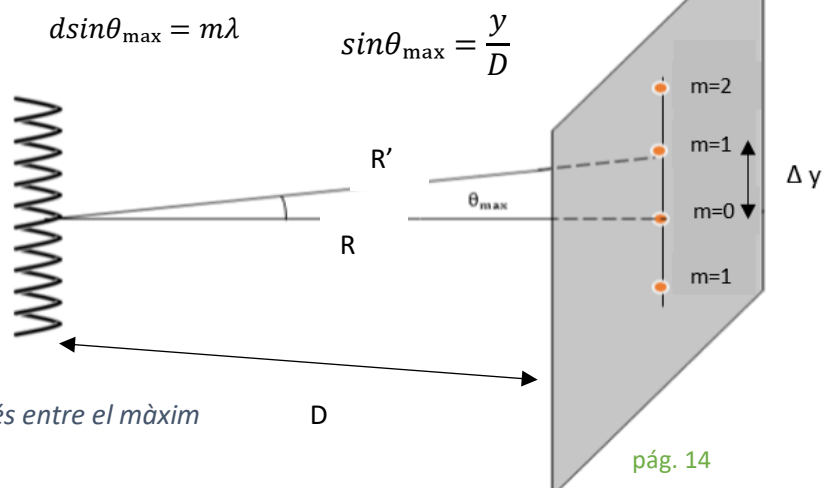
(Fórmula 2)

$$R = \frac{P \tan(90^\circ - \alpha)}{2\pi}$$

Cal però conèixer els valors de P i d’ $\alpha$ . La separació “d” entre les escletxes es calcula a partir dels màxims del patró de difracció.

Essent  $m = 1, 2, 3 \dots$

Si es coneix la distància D entre la molla i la pantalla es pot conèixer l’angle:  $\theta_{\max}$  i conèixer la separació “d” entre les escletxes.



Il·lustració 32: Angle  $\theta_{\max}$  comprés entre el màxim  $m = 0$  i  $m = 1$



Com  $D$  és molt més gran que  $\Delta y$ , podem suposar que  $R \approx R'$

$$\sin \theta_{\max} = \frac{y}{D}$$

Així queda:

$$d \frac{y}{D} = m\lambda$$

Aïllant: **(Fórmula 3)**

$$d = \frac{mD\lambda}{y}$$

$$\text{Si } m = 1 \quad d = \frac{1D\lambda}{y}$$

També podem calcular el diàmetre “ $a$ ” del filferro que amb el que forma la molla. Ara cal mesurar la distància entre dos mínims del patró de difracció segons l’equació:

$$a \sin \theta_{\min} = m\lambda \quad a \cdot \frac{y}{D} = m\lambda$$

Si  $m=1$  i es té en compte que “ $y$ ” es mesurada del punt màxim al mínim:

$$a = \frac{m\lambda D}{y}$$

*Desenvolupant l’equació:*

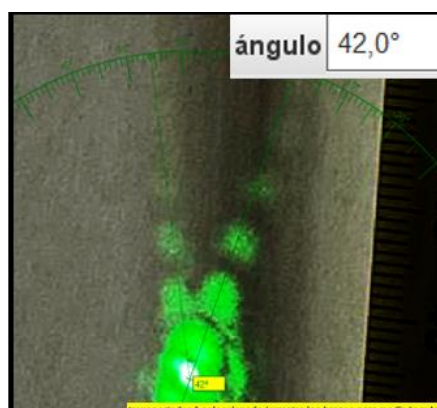
$$\theta_{\min} = \frac{y}{D} = m\lambda \quad \theta_{\min} = \frac{m\lambda D}{y}$$

$$\theta_{\min} = \frac{mD\lambda}{y}$$

Els resultats obtinguts aplicant les fórmules i conceptes esmentats i, amb l’anàlisi d’aquestes a partir del programari Tracker, són les següents:

#### 4.3 RESULTATS OBTINGUTS, ANÀLISI I DISCUSSIÓ

a) Mesura de l’angle format  $2\alpha$ :

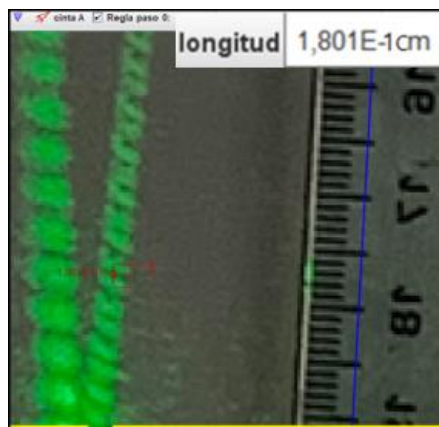


$$2\alpha = 42^\circ \rightarrow \alpha = 21^\circ$$

*Il·lustració 33: Resultats*



b) Distància entre dos màxims de difracció consecutius ( $\Delta y$ ):



*Il·lustració 34: Resultats*

En la realització d'aquesta mesura, cal tenir en compte que s'han penjat 5 peses de 20 grams a la molla. D'aquesta manera, l'obertura d'angle que presenta és molt més gran i s'aprecien millor els ordres de la difracció. Amb això es vol dir, que les mesures de la distància "d" i "P" varien segons l'estirament de la molla i que per tant, si es canvia el nombre de peses també ho faran les mesures.

D'aquesta manera, s'obté:

$$Si P = \frac{d}{\cos \alpha}, i y' = D \cdot \frac{\lambda}{y'}$$

$$d = 297,8 \text{ cm} \cdot \frac{551 \text{ nm}}{1,81^{-1} \text{ cm}} = 906562,43 \text{ nm} \approx \mathbf{0,91 \text{ cm}}$$

$$Amb la qual cosa, P = \frac{d}{\cos \alpha} = \frac{0,91 \text{ cm}}{\cos 21^\circ} = \mathbf{0,97 \text{ cm}}$$

A continuació, es mostra una taula amb diverses mesures per l'obtenció dels paràmetres d i P quan es pengen 5 peses de 20 grams:

	d	P	d-d <sub>0</sub>	P-P <sub>0</sub>
MESURA1	0,90cm	0,97cm	0,2	0
MESURA2	0,92cm	0,92cm	0,18	0,05
MESURA3	0,99cm	0,99cm	0,11	0,86
MESURA4	0,91cm	0,98cm	0,19	0,01
MESURA5	0,98cm	1cm	0,12	0,03
	$\bar{d} = 0,94$	$\bar{P} = 0,97$	0,16	0,22

$$d = (0,94 \pm 0,16) \text{ cm}$$

$$P = (0,97 \pm 0,22) \text{ cm}$$

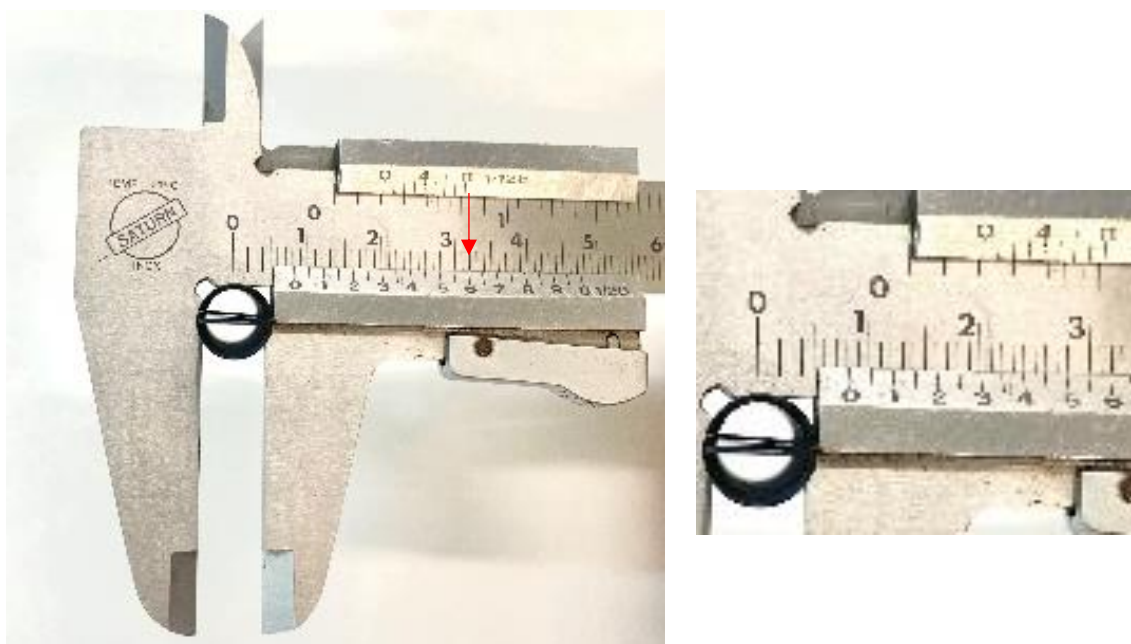


**RESULTATS: Conclusions parcials:** La estimació del pas d'hèlix "P" i de la distància "d" entre dues línies paral·leles consecutives de la molla quan aquestes tenen penjades 5 peses de 20 grams és de  $d = (0,94 \pm 0,16) \text{ cm}$  i  $P = (0,97 \pm 0,22) \text{ cm}$  respectivament.

Havent determinat P i  $\alpha$ , i aplicant la fórmula 2 es pot calcular el valor del radi.

$$R = \frac{0,97 \text{tg}(90 - 21)}{2\pi} = 0,40 \text{ cm}$$

Per comprovar el resultat obtingut s'ha mesurat el diàmetre de la molla amb un peu de rei. El resultat de la mesura ha estat el següent:



*Il·lustració 35 i 36: Resultats*

S'observa un resultat de mesura de  $\varnothing = 0,64 \text{ cm}$ , per tant, el seu radi "R" dona un total de 0,32 cm. Els resultats obtinguts són semblants a l'assolit a partir de la difracció amb la qual cosa ambdós mètodes es poden considerar vàlids.

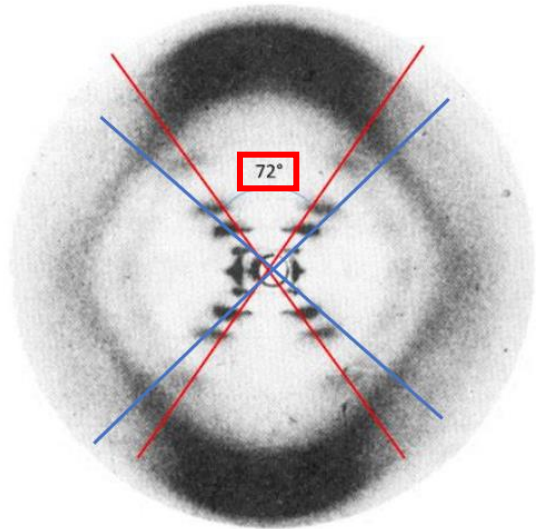
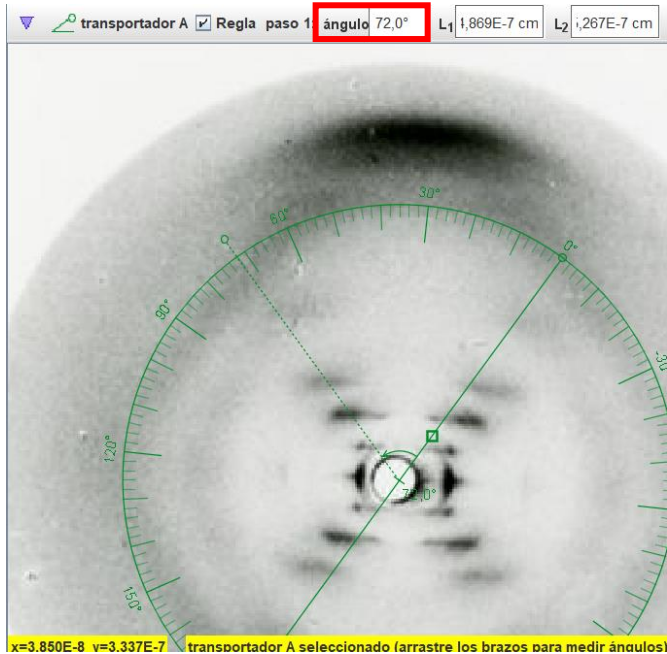
#### 4.4 DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA FOTOGRAFIA 51

S'ha volgut determinar experimental les mesures de la fotografia 51. Per fer-ho, s'han d'adaptar les dimensions que Rosalind Franklin va obtenir al seu moment. En aquest cas es farà a partir de la mesura del diàmetre (20Å) de l'estructura helicoidal de l'ADN. A més, assumir que la longitud d'ona amb què va treballar Rosalind era de l'ordre de 0,15nm i hi havia una distància de 9 cm entre la mostra d'ADN i el detector. Els màxims d'ordre zero i primer ordre estan bloquejats per un disc de plom per evitar la sobreexposició de la pel·lícula, de fet, es pot apreciar a la fotografia que el disc va quedar lleugerament descentrat respecte al màxim d'ordre 0. L'ordre més proper al centre que podem visualitzar a la fotografia 51 és el segon.<sup>(4)</sup>

#### • Determinació de l'angle de la molècula de l'ADN



Per determinar l'angle de l'hèlix mesurant l'obertura de la creu que forma el patró directament de la fotografia s'usarà l'aplicació de "Tracker". Aquest angle pot variar depenent de la posició que considerem el centre de la molècula tal com podem observar a la il·lustració 38.



*Il·lustració 37 i 38 Resultats. Mesura de l'angle de la fotografia 51. S'ha escollit el color vermell.*

Tal com s'ha realitzat en l'obtenció de l'angle de la difracció de la molla d'un bolígraf:

$$2\alpha = 72^\circ \rightarrow \alpha = 36^\circ$$

- **Determinació/càlcul del nombre P "pas d'hèlix"**

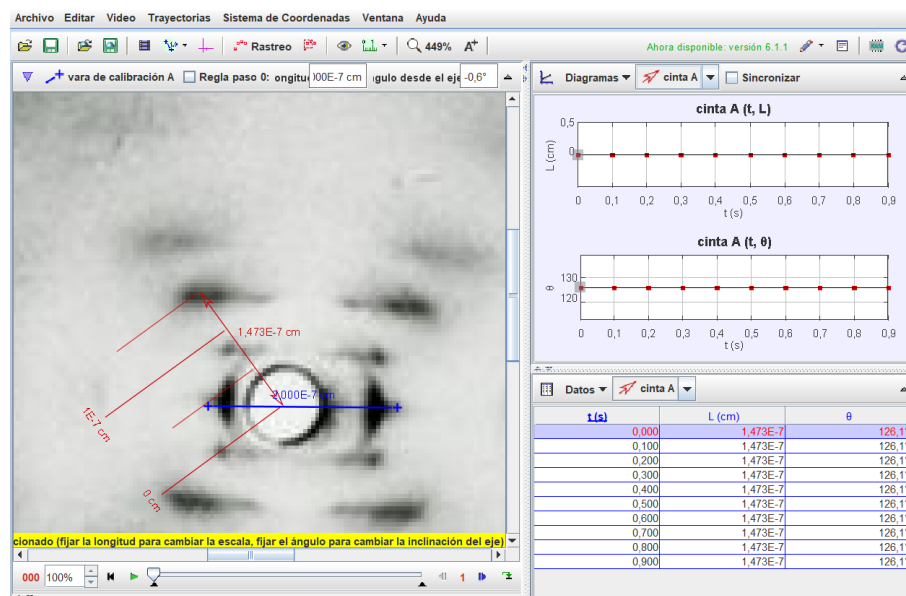
Per determinar el nombre P s'ha d'utilitzar la fórmula 1. Per determinar la distància y, es pot fer de les següents maneres:

1. Mesurant la distància des del centre de la foto al màxim escollit.
2. Mesurant la distància entre dos mateixos ordres un a dalt i un altre a baix i dividir entre dues (major precisió).
3. Mitjançant la determinació pendent en una representació gràfica amb barres d'error.

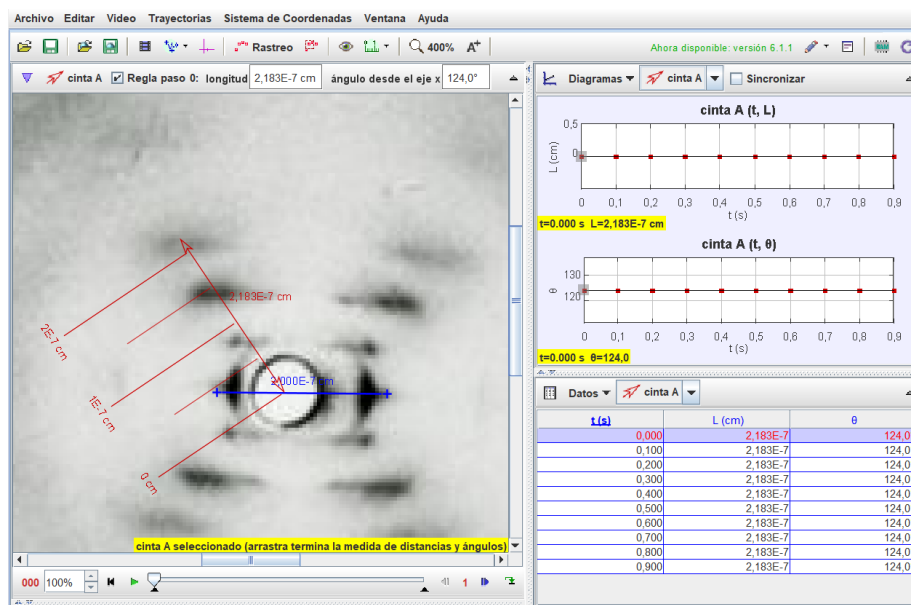




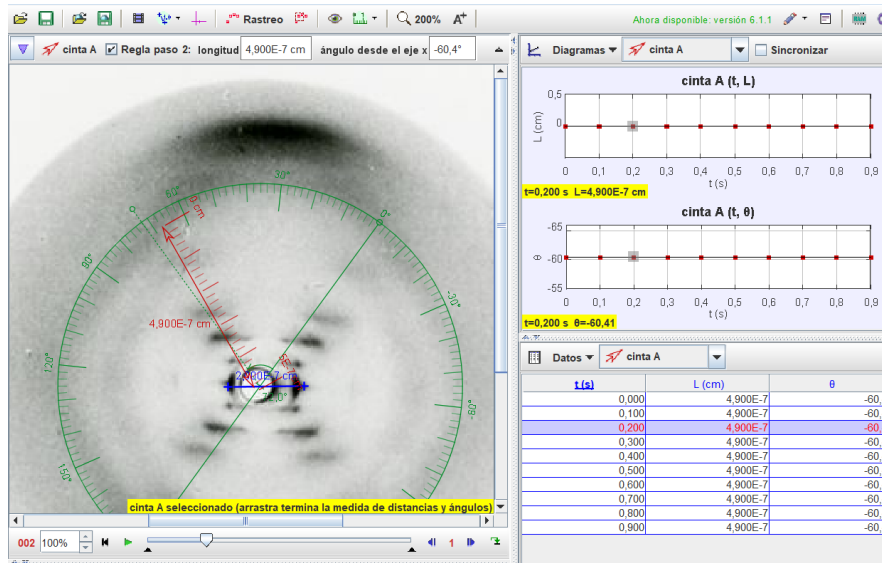
En aquest cas, s'ha realitzat pel mètode 3. Els ordres 0, 2, 3 i 5 són els mesurats.



Il·lustració 39: Resultats. Mesura a l'ordre  $m=2$ .



Il·lustració 40: Resultats. Mesura a l'ordre  $m=3$ .

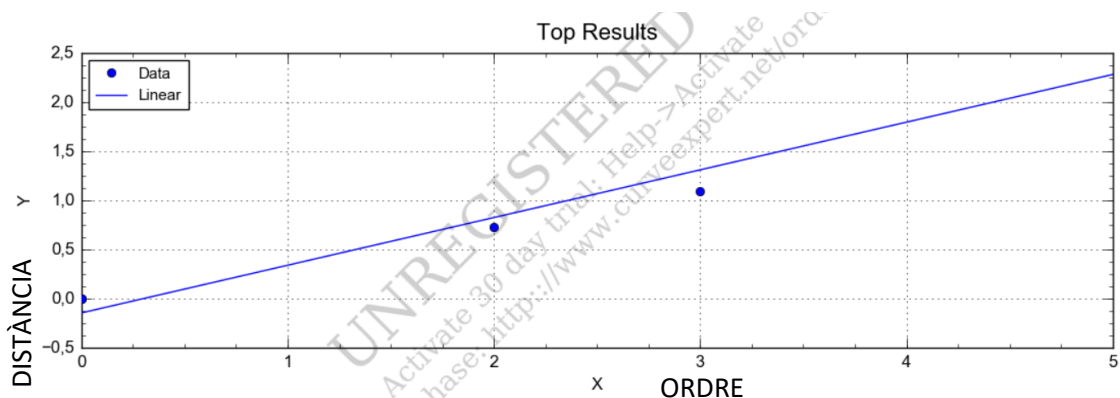


Il·lustració 41: Resultats. Mesura a l'ordre  $m=5$ .

Els resultats són els següents:

n	2y (cm)	y(cm)
0	0	0
2	1,47	0,74
3	2,18	1,09
5	4,9	2,45

Usant el programa "Curve Expert" s'obté:



```

Messages
Autoscaling graph Top Results...
Autoscaling graph Preview...
Final Result [Linear Regressions/Linear]:
Equation      : a + b*x
a = -1,44999999999999E-01
b = 4,85000000000000E-01
Standard Error : 2,316786567640621E-01
Correlation Coefficient : 9,828962790100888E-01
Autoscaling graph Data Plot...
    
```



$$\frac{R2\pi}{p} = \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha)$$

Aplicant les fórmules:

$$0,48 = L \cdot \frac{\lambda}{d}$$

$$d = 9\text{cm} \cdot \frac{0,15\text{nm}}{0,48\text{cm}} = \mathbf{2,8\text{nm}}$$

$$P = \frac{d}{\cos\alpha}$$

$$P = \frac{2,8}{\cos 36} = \mathbf{3,46\text{nm}}$$

#### • Determinació del radi de l'ADN

Aplicant la fórmula 2:

$$R = \frac{\tan(90 - 36) \cdot 3,4}{2\pi} = \mathbf{0,74\text{nm}}$$

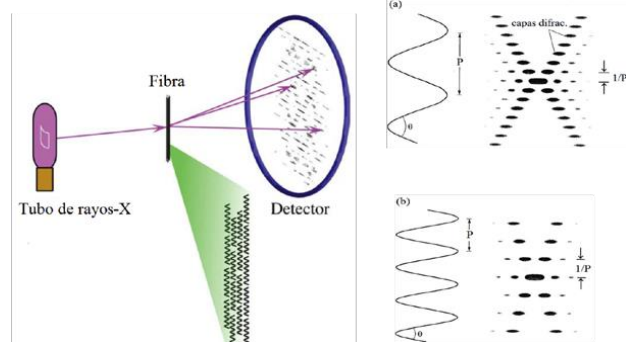
Els resultats que s'obtenen són els següents:

	R.Franklin	Dades obtingudes
Angle	36°	36°
Pas d'hèlix "P"	3,4 nm	3,4 nm
Radi	1nm	0,75 nm

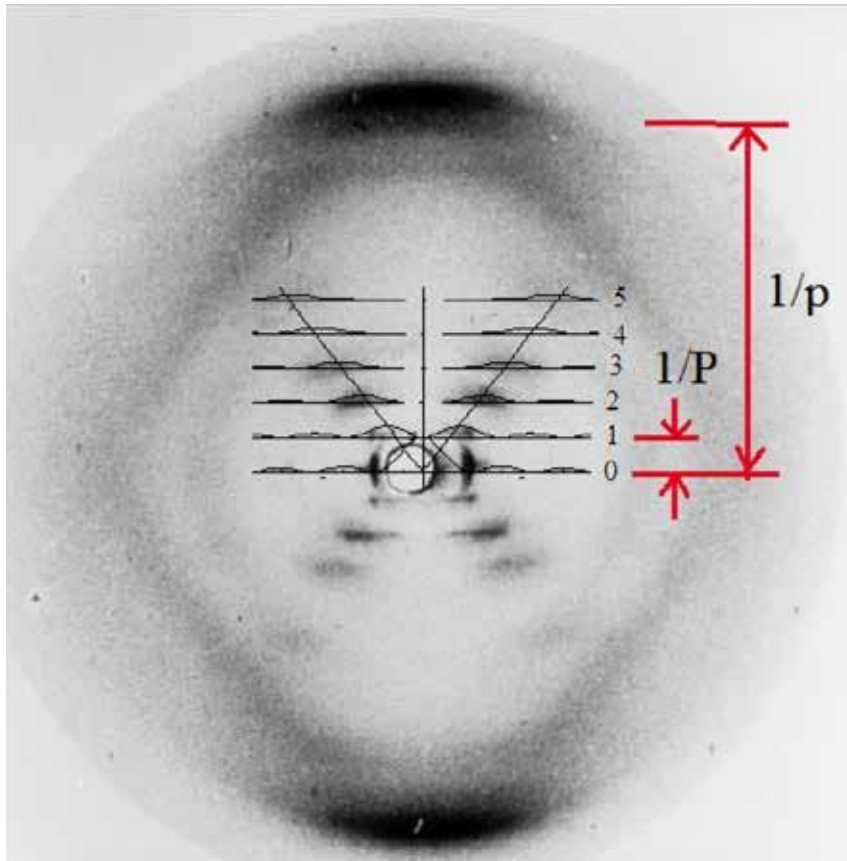
**RESULTATS: Conclusions parcials:** Les mesures que obtingué Rosalind Franklin i les que han estat mesurades a partir de la fotografia 51 són pràcticament les mateixes a excepció del radi.

#### 4.5 FRANJA INEXISTENT NÚMERO 4

El patró de difracció de rajos X per fibres d'ADN-B ( refereix a la cristal·lografia del tipus B de l'ADN) correspon al de les molècules d'ADN alineades, però desordenades entre si. La il·lustració 43 mostra el patró de difracció de la forma B de l'ADN i la seva interpretació teòrica. Alhora, es pot observar que l'angle de la X amb l'equador és igual a l'angle que forma l'hèlix amb l'eix de la mateixa.



*Il·lustració 42: Esquerra: arranjament experimental per a difracció de raigs-X en fibres de DNA-B. Dreta: relació recíproca entre el pas d'hèlix i els seus corresponents patrons de difracció*



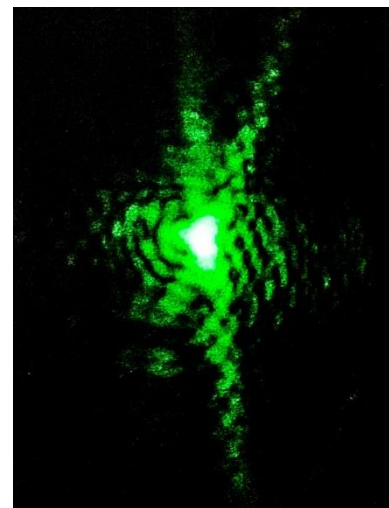
*Il·lustració 43: Interpretació de la Foto 51 de Franklin en termes de la intensitat de difracció calculada, corresponent a una hèlix aïllada de pas  $P$  i amb una densitat lineal d'electrons constant. La intensa difracció meridional que s'observa a alt angle és deu a la forta re-dilució per part de les bases nitrogenades, apilades amb una separació uniforme  $p$  entre elles*

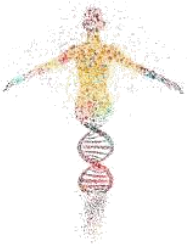
Del patró resulta  $P=34 \text{ \AA}$ ,  $p=3.4 \text{ \AA}$  i  $R=10 \text{ \AA}$ . L'absència de la reflexió a la quarta capa suggereix la presència d'una segona hèlix que idèntica un desplaçament de  $3/8P$  al llarg de l'eix que produeix efectes d'interferència destructiva (extincions sistemàtiques) a les capes amb  $n=4, 12, 20$ , etc. A més, les dues hèlixs estan desplaçades entre si a  $3/8$  del pas comú  $P$ .

Per a que desaparegui la franja número 4 s'hauran de col·locar dues molles de bolígraf desfasades una distància de  $3P/8$ . El resultat obtingut és el següent:

**Conclusions parcials:** No s'ha pogut determinar la distància  $3P/8$  i per tant, no ha desaparegut la franja número 4. El patró de difracció obtingut és de difícil comprensió.

*Il·lustració 44: Resultats*





## 5. CONCLUSIONS

---

A partir de l'estudi realitzat sobre la modelització de l'estructura de l'ADN d'una molla de bolígraf, s'està amb condicions d'anomenar les següents conclusions:

1. S'ha aconseguit modelitzar l'experiment realitzat per Rosalind Franklin utilitzant una molla de bolígraf en lloc d'ADN i llum làser en lloc de Raigs X. L'anàlisi del seu patró de difracció és compatible amb una estructura helicoidal.
2. A partir de les mesures realitzades sobre el patró de difracció de la molla, s'han pogut determinar els seus paràmetres físics amb les condicions corresponents, En són:
  - Radi "R": 0,40cm
  - Pas d'hèlix "P":  $(0,97 \pm 0,22)$ cm
  - "d":  $(0,94 \pm 0,16)$ cm
  - Angle  $\alpha$ : 21°
3. S'ha pogut determinar experimentalment la fotografia 51 i les mesures obtingudes han estat les següents:
  - Angle  $\alpha$ : 36°
  - Pas d'hèlix P: 3,4nm
  - Radi "R": 0,75nm
4. S'ha intentat superposar dues molles de bolígraf per tal d'aproximar-se més a l'estructura real de l'ADN, però el patró de difracció obtingut és molt difícil d'interpretar, i no és compatible amb una estructura de doble hèlix. (Caldria que hagués desaparegut el màxim de difracció corresponent a l'ordre  $m=4$ ).
5. S'ha determinat experimentalment la longitud d'una llum làser vermella i verda amb l'obtenció de  $(630 \pm 27)$  nm i  $(543 \pm 30)$  nm respectivament.
6. Ens hem pogut familiaritzar amb la física experimental relativa a diferents fenòmens ondulatoris de la llum com les interferències i difraccions. En són:





- Els patrons de difracció generats a partir d'una escletxa o bé xarxa varien segons l'angle en que posicionem aquestes darreres.
  - El diàmetre d'un cabell és de:  $1,0 \cdot 10^{-4} \text{m}$
  - El diàmetre filferro 0,36 cm
7. S'ha intentat donar visibilitat la figura de Rosalind Franklin, que va tenir un paper destacat en el desenvolupament de la biologia molecular: el descobriment de l'estructura de l'ADN.

Finalitzat aquest treball, estic amb condicions de dir que la física és a tot arreu. M'ha fet moltíssima il·lusió col·laborar i compartir aquest gran i curiós món de la ciència realitzant aquest treball de recerca sobre una dona científica. Se'm va fer engrescador de seguida, i més amb la gran ajuda del meu professor.

Aquest projecte que ara ja fa un any que el vaig iniciar m'ha suposat però, força dificultats. Des d'un primer moment, em vaig haver de familiaritzar amb els fenòmens de la llum per poder comprendre correctament, què és el que passava en produir una difracció mitjançant una llum làser. Així com modelitzar la figura d'una molla de bolígraf per tal d'assimilar-la el més possible a una cadena helicoidal d'ADN.

Recordo molt bé com em mirava els quaderns del quid: "Experiències amb làser" del CRP del Segrià. Sent franca, em va ser dur endinsar-me en tantes equacions i matemàtiques, algunes encara irresoltes per la seva complexitat. Només el meu tutor i jo sabem quantes hores vàrem passar mirant aquells patrons projectats a qualsevol superfície plana. Quina mà de figures més simples i amb tant que dir. Fins i tot, vam produir la difracció de la molla amb llum làser de punt a punta del passadís per poder observar un patró més gran i nítid.

He de dir que guardo neguit en el desfase de les dues cadenes helicoidals de l'ADN, bé, en el meu cas de la molla de bolígraf. Malgrat haver-ho intentat de totes les maneres possibles, no s'ha pogut determinar clarament l'objectiu plantejat. Espero poder resoldre-ho en un altre moment de la meua trajectòria acadèmica.

Endemés, m'ha suposat moltes hores determinar els paràmetres obtinguts de les difraccions, els patrons són molt petits i la resolució de les imatges no era suficient per prendre imatges de qualitat tan requerida. He de dir però, que aquest treball s'ha pogut realitzar gràcies a les aplicacions "Tracker", "Curve Expert" i "ImatgeJ". M'han servit de gran ajuda per determinar tots els paràmetres tant de la fotografia 51 com de la difracció de la molla, ja que les mesures en tots dos casos són molt petites.

Finalment, vull dir que estic molt contenta i satisfeta amb el treball realitzat. Me n'enduc molt aprenentatge i, sobretot, motivació per fer ciència.



## 6. AGRAÏMENTS

---

Des que vaig iniciar aquesta recerca, la meva curiositat per la troballa de Rosalind Franklin, ha anat creixent. De fet, encara m'agradaria especular algunes raons matemàtiques que ara se'm fan complicades de resoldre. La veritat és, que tot aquest treball, il·lusió, explicacions i càlculs no haguessin estat possibles sense l'ajuda del meu professor,.

No podia tancar el treball sense donar-te les gràcies per tot el que m'has estat ajudant al llarg d'aquest any divulgant junts, compartint les tardes, tots dos plegats, al laboratori, mirant-nos una molla tant simple i amb tants dubtes per resoldre. L'any passat vas encetar en mi una atracció pel món de la ciència encara més gran després d'escollir el treball de recerca. Les teves expilacions han estat de tot menys del que et podies esperar, no em podia avorrir de cap manera, quan no treies un projector per ensenyar-me com una cosa tant petita pot donar-nos la raó de la vida, movies totes les taules de l'aula per aconseguir la distància perfecta per la difracció mitjançant la font de llum làser. Et podria explicar cadascuna d'aquestes lliçons perquè totes han estat especials per a mi, esperava impacientment l'hora de retrobar-nos per explicar-te quina era la meva nova hipòtesis d'alguna de les determinacions experimentals. I és que t'he de confessar que gràcies a tu la meva curiositat per la ciència és cada cop més gran, gràcies a la teva passió per la ciència que m'has transmès des del primer dia. Bé, és impressionant com estimes el que fas i t'hi dediques, se't nota.

És lícit que un mestre s'impliqui en els treballs de l'alumne, però la diferència és que tu, professor, has anat més enllà d'una recerca, t'has preocupat per la meva trajectòria i és per això que tot ha estat tan fàcil de la teva mà. Estem molt equivocats pensant que un bon professor és aquell que sap explicar bé i fa que els seus alumnes treguin bones notes. No, un bon professor és aquell que viu la seva assignatura de tal manera que tots els alumnes volen viure igual. Que adapta els coneixements perquè tothom pugui desenvolupar-se de la millor manera, però, sobretot, i el més important, és aquell que es preocupa per mirar als ulls a cadascun dels seus alumnes. Hi ha coses que mereixen la pena de veritat i crec que una d'elles és que et siguin agraït pel que has fet, i professor ho has fet bé, molt bé.

Gràcies per ser un professor que s'ha preocupat, adaptat i alhora exigít. El valor de les coses no està en el temps que duren, sinó en la intensitat amb que succeeixen. Per això, existeixen experiències inoblidables, persones incomparables. Gràcies per haver-me acompanyat en aquest treball.

També he d'agrair a l'Eduard, matemàtic, pels consells i informació que m'ha donat i que m'han ajudat a desenvolupar els càlculs de l'estructura de l'ADN. Endemés, al CRP del Segrià per proporcionar-me un quid d'experiències vers la llum amb el que he pogut realitzar moltes de les determinacions del treball, a més de fórmules, esquemes de muntatge i càlculs. Així mateix, vull expressar el meu agraïment a tot el professorat i personal no docent, així com la meva àvia, mare, germana i amics per ser-hi al meu costat, recolzar-me i ajudar-me.

Gràcies per ser-hi.



## 7. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

---

- **Referències de les il·lustracions utilitzades**

- (1) Autoretrat de Rosalind Franklin. Disponible a: <http://nk.i-edu.se/wp-content/uploads/2020/01/Erik-Rosalind-Franklin.pdf> Accedit el 2/06/2022
- (2) Esquema experiment Rosalind Franklin. Disponible a: “Jaque a la dama: Rosalind Franklin en King’s College” publicat per Miguel Vicente l’11 d’agost del 2008 Accedit el 4/06/2022
- (3) Esquema experiment Rosalind Franklin. Disponible a: “Jaque a la dama: Rosalind Franklin en King’s College” publicat per Miguel Vicente l’11 d’agost del 2008 Accedit el 4/06/2022
- (4) Esquema experiment Rosalind Franklin. Disponible a: “Jaque a la dama: Rosalind Franklin en King’s College” publicat per Miguel Vicente l’11 d’agost del 2008 Accedit el 4/06/2022
- (28) Fotografia 51. Disponible a: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-medica-clinica-las-condes-202-articulo-rosalind-franklin-el-descubrimiento-estructura-S0716864015001042> Accedit el 1/08/2022
- (38) Fotografia 51. Disponible a: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-medica-clinica-las-condes-202-articulo-rosalind-franklin-el-descubrimiento-estructura-S0716864015001042> Accedit el 1/08/2022
- (42) Esquema experiment Rosalind Franklin. Disponible a: “Jaque a la dama: Rosalind Franklin en King’s College” publicat per Miguel Vicente l’11 d’agost del 2008 Accedit el 4/06/2022
- (43) Esquema experiment Rosalind Franklin. Disponible a: “Jaque a la dama: Rosalind Franklin en King’s College” publicat per Miguel Vicente l’11 d’agost del 2008 Accedit el 4/06/2022

- **Referències de pàguines web utilitzades**

- (1) Unidad didáctica de la luz. Per Miguel Angel Martinez Domingo i Eva Maria Valero Benito.
- (2) Elvira. Rosalind Franklin y la estructura helicoidal del ADN. Alambique “ Didáctica de las ciencias Experimentales”. Núm 90. Octubre 2017
- (3) Elvira. Rosalind Franklin y la estructura helicoidal del ADN. Alambique “ Didáctica de las ciencias Experimentales”. Núm 90. Octubre 2017



- (4) Determinació ADN- Academia-e. Disponible a: <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/37639/Determinaci%C3%B3n%20de%20la%20estructura%20del%20ADN.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Accedit el 2/06/2022
- (5) Programa "Tracker". URL: <https://www.filehorse.com/es/descargar-tracker/>



