Afro-Asian Journal of Scientific Research (AAJSR)
المجلة الأفروآسيوية للبحث العلمي
E-ISSN: 2959-6505
Volume 4, Issue 3, 2026
Page No: 253-265
Website: https://aajsr.com/index.php/aajsr/index
SJIFactor 2024: 5.028 ISI 2025: 0.915 0.76 :2025 (AIF) معامل التأثير العربي

Study of diffraction and wave properties of the electron using a graphite crystal: A scientific study and digital simulation

Nawara Mohamed Saleh[1], Hanan Abdu Allah Kardom[2], Ahlam Taher Baiej[3*], Majdi Abdussalam Aljaer[4]
[1,2,3,4]Department of Physics, Faculty of Science, University of Gharyan, Gharyan, Libya

دراسة الحيود والخاصية الموجية للإلكترون باستخدام بلورة الجرافيت: دراسة علمية ومحاكاة رقمية

نوارة محمد صالح[1]، حنان عبد الله كردوم[2]، أحلام الطاهر بعيج[3*]، مجدي عبد السلام الجاير[4]
[1،2،3،4]قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة غريان، غريان، ليبيا

*Corresponding author: Ahlaam.taher@gu.edu.ly

Received: June 21, 2026	Accepted: September 02, 2026	Published: September 16, 2026

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abstract:
This study investigates the phenomenon of electron diffraction through a graphite crystal in order to verify the wave nature of electrons and examine the relationship between electron wavelength and crystal structure. The study combines theoretical analysis, practical experimentation, and numerical simulation. De Broglie's hypothesis and Bragg's law were used to interpret the formation of diffraction rings and to estimate the interplanar spacings of the crustal. The experiment was conducted using an electron diffraction tube containing a graphite crystal and fluorescent screen. Anode voltages ranging from 1kv to 5 kv were applied, and the radii of the two diffraction rings formed around the central bright spot were measured. The results showed that the radii of the diffraction rings decreased as the anode voltage increased, whereas the electron wavelength increased when the voltage decreased, in agreement with the de Broglie relation. The graphical analysis also revealed an approximately direct relationship between the radii of the diffraction rings and the electron wavelength, as well as a linear relationship between the ring radii and the reciprocal square root of the anode voltage. A numerical simulation model was also developed using python and Matlab and the Numpy, Mat lab, and Scipy libraries to represent the variation in the electron wavelength and the diffraction ring patterns at different voltages. The simulation showed the formation of circular and concentric rings. It also demonstrated that reducing the applied voltage increases both the electron wavelength and the ring radii, which agrees with the practical results and theoretical predictions. Based on the slopes of the graphical relationships, the interplanar spacings of the graphite crystal were estimated to be approximately 216.6 pm and 162.5 pm using one method, and 199 pm and 157.5 pm using another method. The study demonstrates that electron diffraction through graphite confirms the wave nature of electrons and that numerical simulation patterns and representing the relationship between voltage, wavelength, and ring radius. The results also highlight the importance of integrating practical experimentation simulation in the study of crystal structures and quantum mechanical phenomena.

Keywords: Electron diffraction, graphite crystal, de Broglie relation, Bragg's law, numerical simulation, interplanar spacing, quantum mechanics.

الملخص:
تهدف هذه الدراسة إلى تحليل ظاهرة حيود الإلكترون عند مروره عبر بلورة الجرافيت، وذلك من خلال دمج المنهج النظري بالمحاكاة الرقمية، سعيًا لفهم أعمق للبنية البلورية للجرافيت وتفسير التفاعلات الموجية الدقيقة التي تحدث عند تداخل الإلكترونات مع المستويات الذرية المنتظمة. وقد سعت الدراسة إلى اختبار مدى دقة النماذج الفيزيائية المستخدمة، ولا سيما قانون براغ، في توصيف أنماط الحيود، إلى جانب توظيف أدوات المحاكاة العددية لإعادة بناء الصورة البلورية كما تنعكس في نمط الحيود الإلكتروني. وأظهرت نتائج الدراسة توافقًا ملحوظًا بين البيانات النظرية المستخلصة من المعادلات الفيزيائية وأنماط الحيود الناتجة من المحاكاة الرقمية، حيث عكست النماذج المحوسبة بدقة خصائص التماثل والمسافات البينية في البنية الطبقية للجرافيت. وقد أكد هذا التوافق صحة المفاهيم الفيزيائية الأساسية المستخدمة، وأعطى مؤشرًا قويًا على أن الجمع بين التحليل العلمي التقليدي والمحاكاة الرقمية لا يعزز فقط دقة النتائج، بل يسهم كذلك في توسيع آفاق الفهم النظري بطريقة أكثر تفاعلية وموضوعية. وقد شكلت هذه الدراسة نموذجًا يؤكد أهمية التكامل بين الجهد التجريبي والنهج الرقمي في العلوم التطبيقية، حيث إن الاعتماد على أحدهما بمعزل عن الآخر قد يؤدي إلى نتائج محدودة الدلالة. إن هذا الدمج بين العملي والنظري لم يوفر فقط نتائج دقيقة، بل مثّل أيضًا نقلة نوعية في منهجية تحليل الظواهر الفيزيائية على المستوى الذري، وهو ما يُعَد توجّهًا ضروريًا في ظل التطورات الحديثة في تقنيات النمذجة والمحاكاة العلمية.

الكلمات المفتاحية: حيود الالكترون، بلورة الجرافيت، علاقة دي برولي، قانون براغ، المحاكاة الرقمية، المسافات البينية، الميكانيكا الكمومية.

المقدمة:

في عالم الفيزياء الحديثة، يُعتبر فهم ظاهرة حيود الإلكترون من الركائز الأساسية التي ساهمت في تطوير النظريات الكمومية وتفسير سلوك الجسيمات على المستوى الذري ودون الذري. حيود الإلكترون هو ظاهرة تظهر عندما تمر الإلكترونات عبر فتحات ضيقة أو حول حواجز، مما يؤدي إلى تداخل موجي يبرز الطبيعة المزدوجة للمادة كموجة وجسيم في آن واحد. وهذا ما تم تم اكتشافه من قبل (Thomas and Reid Davision and Germer) وهم يحاولون إثبات نظرية دي برولي والتي تنص على أن الدقائق المعجلة تصطحب بطول موجي، ولا بد أن نذكر أن الخاصية الموجية للإلكترونات هي إحدى أساسيات فيزياء الكم. وبما أن الالكترونات المتحركة تصطحب بطول موجي مرتبط بزخم الجسم يعبر عنه **بالصيغة:**

$$\lambda = h/p \qquad (1)$$

حيث أن:

- λ هي الطول الموجي للإلكترون.
- h ثابت بلانك.
- وp هو زخم الجسيم (الإلكترون).

استخدم ديبرولي هذه العلاقة للجسيمات المادية ووفقا لفرضيته ومن المعادلة (1) نجد أن:

$$mv = h/\lambda \quad \text{ومنها} \quad p = h/\lambda$$

ويُعد الجرافيت من المواد ذات البنية البلورية الفريدة، حيث يتميز بترتيب ذري على شكل طبقات سداسية مستوية (hexagonal layers)، ترتبط فيما بينها بقوى فان دير فال الضعيفة. هذا التكوين يعطيه خصائص كهربائية وميكانيكية مميزة تجعله نموذجًا مثاليًا لتطبيق تجارب حيود الإلكترونات ودراستها نظريًا ومحاكاتها رقميًا باستخدام النماذج الرياضية والتقنيات الحاسوبية الحديثة.

في هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تحليل علمي معمق لحيود الإلكترونات عبر بلورة الجرافيت، وذلك بالجمع بين الجانب التجريبي والنمذجة الرقمية لمحاكاة الظاهرة وتحليل نتائجها بدقة، من خلال الاعتماد على المبادئ الفيزيائية لقوانين الحيود، خاصة قانون براغ(Bragg's Law) ، مع دمج برمجيات المحاكاة في التمثيل العددي لأنماط الحيود المتوقعة.

وباستخدام منهجية تحليلية وتجريبية، سيقدم البحث إطارًا واضحًا لدراسة حيود الإلكترون، بدءًا من المبادئ الأساسية وصولًا إلى التطبيقات العملية، مع التركيز على الربط بين النظرية والتجربة. هذه الدراسة ستسهم في إثراء المعرفة العلمية وتوفير قاعدة متينة لتطوير تقنيات جديدة تعتمد على التحكم في سلوك الإلكترونات على المستوى الكمومي.

لقد تم استخدام بلورة النيكل لحيود الالكترونات وقد وجد أن سرعتها أو سرعة انطلاقها صغيرة جدا مقارنة بسرعة الضوء. في حالة تعجيل الإلكترون بفرق جهد كبير أكثر من12kv فهنا يجب استخدام العلاقات والقوانين النسبية لحساب الطول الموجي والعلاقة الكلاسيكية لحساب الطاقة الحركية وذلك لأن سرعة الإلكترون قد تصل الى حوالي 22% من سرعة الضوء وهي سرعة صغيرة جدا.

وقد تم إثبات فرضية دي برولي من قبل العديد من العلماء من بينهم العالم جونسون في الولايات المتحدة الأمريكية حيث قام بدراسة حيود الهيدروجين لبلورة فلوريد الليثيوم وقد جاءت جميع النتائج مطابقة لفرضيته.

أما الطول الموجي المصاحب للإلكترون فيمكن حسابه باستخدام قانون براغ (Bragg low). حيث فرض براغ تشتت الأشعة الساقطة على البلورة حيث تنعكس عن المستويات البلورية، بحيث يعكس كل مستوى من هذه المستويات المتوازية

جزءا يسيرا من الطاقة الاشعاعية وعندما تتداخل هذه الأشعة المنعكسة عن جميع هذه المستويات المتوازية تداخلا بناء تظهر نقطة بارزة أو قمة واضحة في نموذج الحيود، على اعتبار أن المسافات الأساسية بين ذرات هذه البلورة هي بحدود الطول الموجي للإلكترون.

$$n\lambda = 2dsin\theta \qquad (2)$$

حيث أن:

- n رتبة الطيف.
- λطول موجة دي برولي.
- dالمسافة البينية بين مستويات براغ.
- θ الزاوية المحصورة بين الأشعة الساقطة و مستوى البلورة.

أهداف الدراسة:

1. التحقق الفيزيائي: هل تتبع البيانات الاتجاه الذي تفرضه علاقة دي برولي وقانون براغ؟
2. التحقق العددي: هل تعيد المحاكاة إنتاج القيم نفسها عند الجهود نفسها؟
3. التحقق البنيوي: هل تؤدي المسافات البينية المستخرجة الى وصف معقول لبنية الجرافيت؟

النظرية:

تنص فرضية ديبرولي على أن الجسيم و الموجة وجهان لعملة واحدة و هذا يعني أن الجسيمات المادية ترافقها حركة موجية. حيث طول الموجة المرافقة ذات التردد υ لأي جسيم له طاقة E يمكن حسابها باستخدام نظرية بلانك **حيث:**

$$E = h\upsilon$$

و باستخدام معادلة زخم الفوتون و التي تساوي:

$$p = E/c$$
$$p = h\upsilon/c$$

ومن العلاقة بين الطول الموجي و السرعة لأي موجة:

$$c = \lambda\upsilon$$
$$1/\lambda = \frac{\upsilon}{c}$$
$$p = \mathrm{h}/\lambda$$
$$\lambda = \frac{h}{p}$$
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

وهذه المعادلة تمثل طول موجة ديبرولي لجسم متحرك. فاذا اكتسب جسيما سرعة قدرها v نتيجة تعرضه لفرق جهد V_A فالبتالي تصبح الطاقة الحركية للالكترون E_K كالتالي:

$$E = eV_A = 1/2\ mv^2 = p^2/2m \qquad (4)$$
$$p = \sqrt{2meV} \qquad (5)$$

ومنها يصبح الطول الموجي المرافق للالكترون كما يلي:

$$\lambda = h/\sqrt{2meV} \qquad (6)$$

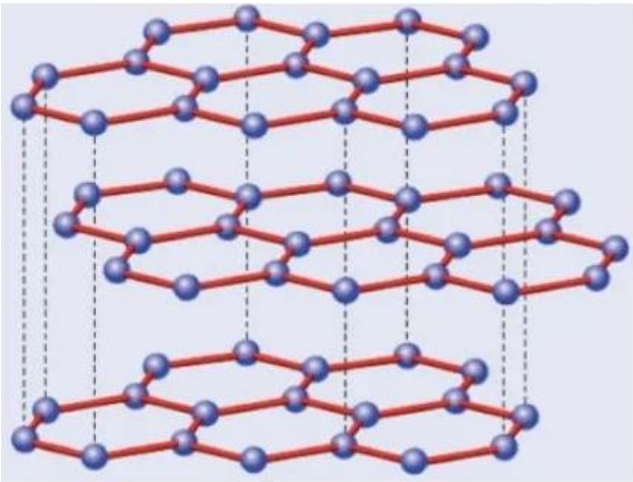
حيث أن:

- hثابت بلانك و يساوي($6.625x10^{-34}$J.s).
- e شحنة الالكترون و تساوي($1.6x10^{-19}$c) .
- m كتلة الالكترون و تساوي ($9.1x10^{-19}$kg)

وبالتعويض عن قيمهم في المعادلة (6) نحصل على:

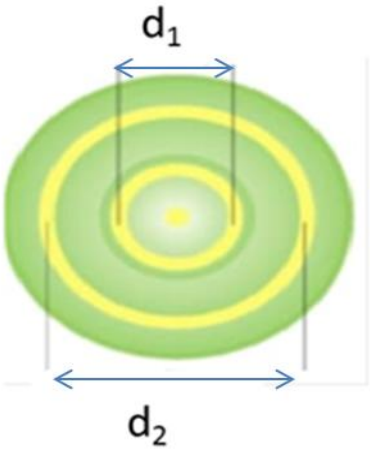
$$\lambda = 12.24/\sqrt{V} \qquad (7)$$

عندما يتم تعريض بلورة الكرافيت لحزمة الكترونية فان كل ذرة من ذراتها تصبح مصدرا للاشعاع الالكتروني و أن اتجاهات هذه الذرات مع الحزمة الالكترونية يحقق قانون براغ كما هو موضح بالشكل (1).



شكل رقم (1): التركيب البلوري للجرافيت

حيث أن مجموع هذه الحزم سوف يشكل دوائر خضراء مضيئة حول بقعة مضيئة في وسط الشاشة المتفلورة كما هو موضح بالشكل (2). حيث لا تمثل هذه البقعة حيود الالكترون و انما هي عبارة عن حزمة الكترونية حيث تسهل عملية قراءة أنصاف أقطار دوائر الحيود المحيطة بها.



شكل رقم (2): دوائر الحيود المتكونة حول بقعة مضيئة

ولحساب زاوية براغ يمكن استخدام العلاقة بين زاوية الانحراف (α) و زاوية براغ (θ) و قياس انصاف أقطار دوائر الحيود المتداخلة (r) التي تظهر على الشاشة المتفلورة **حيث أن :**

$$\alpha = 2\theta$$

$$sin2\theta = \frac{r}{R}$$

حيث:

- R نصف قطر الانبوبة الزجاجية (65mm).
- r نصف قطر دائرة الحيود.

وعند الزوايا الصغيرة $cos\alpha \leq 1$; $\sin 2\alpha = 2sin\alpha\, cos\alpha$ و كذلك لزوايا براغ الصغيرة يمكن أن تقرب:

$$sin\alpha = sin2\theta = 2sin\theta$$

ومنها يمكن حساب نصف القطر لدوائر الحيود من خلال المعادلة:

$$r = \frac{2R}{d} n\,\lambda \qquad (8)$$

حيث أن:

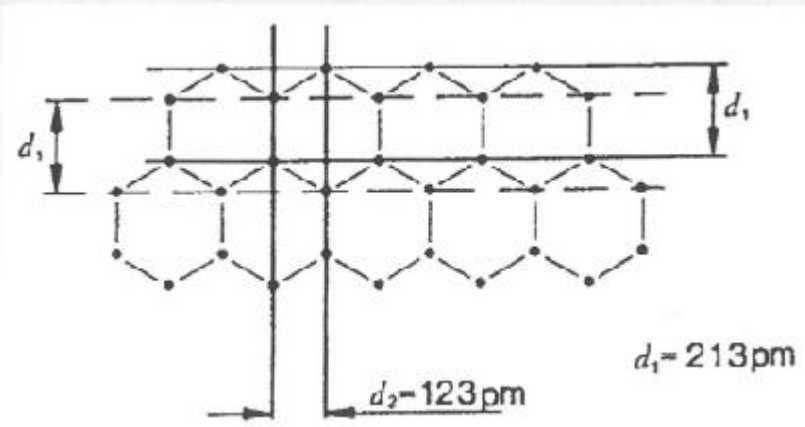
- n=1

بالتالي يمكن التعويض عن قيمة λ (المعادلة 7) و منها يمكن الحصول على قيمة d:

$$d = \frac{2R}{r}\lambda \qquad (9)$$

$$d = \frac{2R}{r} 12.24/\sqrt{V} \qquad (10)$$

ويمكن ملاحظة أن شدة الدوائر للحيود في المراتب التي أكبر من الواحد n>1 تكون أق من شدة الضوء عندما تكون n=1، حيث تبعد عن بعضها البعض بمسافة d_1، d_2 كما موضح بالشكل (2). وتنتج حلقتا التداخل الداخليتان من خلال الانعكاس من مستويات الشبيكة البلورية الموضحة في الشكل (3).

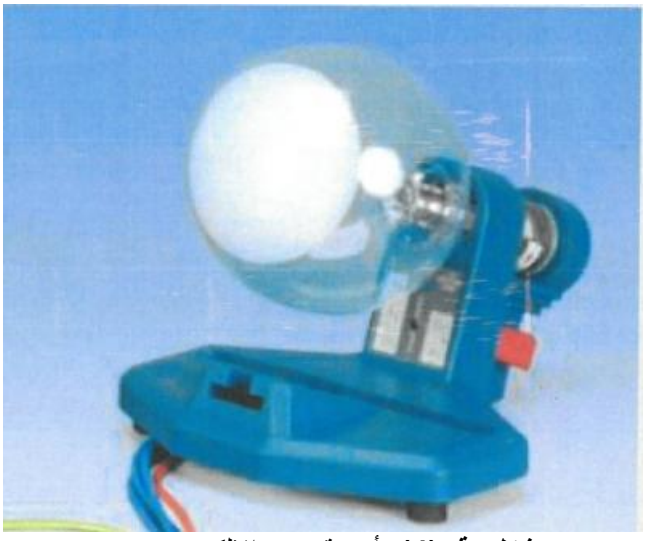


شكل رقم (3): مستويات بلورة الجرافيت

الجانب العملي:

الأجهزة المستخدمة:

1. **انبوبة حيود الالكترون:** هي عبارة عن نبوبة زجاجية مفرغة من الهواء قطرها حوالي (130mm)تحتوي على قاذف الكترونات يعطي حزمة ضيقة من الالكترونات يتكون القاذف من فتيلة و اربعة شبكات. و يوجد في نهاية القاذف الالكتروني و على مسافة معينة منها طبقة رقيقة جدا من الجرافيت بحيث تسقط على شاشة مغطاة بمادة متفلورة في نهاية الأنبوبة.

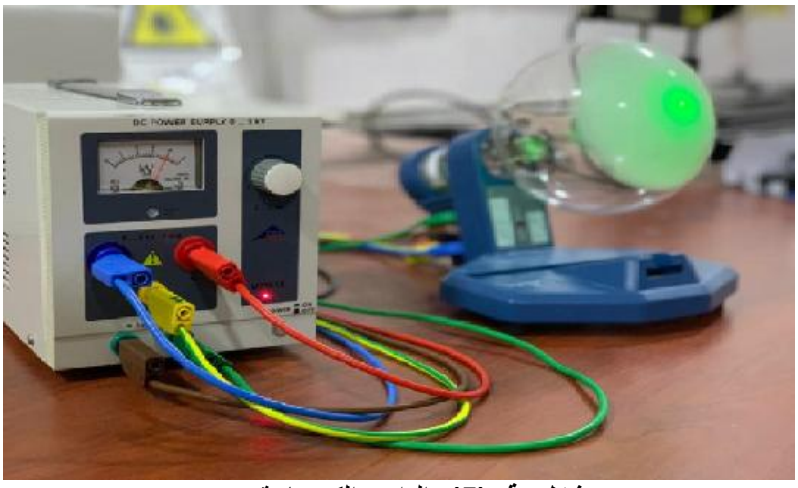


شكل رقم (4): أنبوبة حيود الالكترون

2. **مصدر جهد عالي 5kv.**
3. **اسلاك توصيل.**
4. **قدمة ذات ورنية.**

- يتم توصيل الأجهزة كما هو موضح في الشكل (5). يتم تسليط فرق الجهد بخطوات منتظمة على الأنود و بزيادة مقدارها 500 فولت في كل مرة حيث يجب الانتظار حوالي دقيقة في بداية التشغيل لكي تسخن الفتيلة و تتوهج.
- يظهر نموذج الحيود على الشاشة الفلورنسية على هيئة دائرتين متحدتي المركز حول البقعة المضيئة.

- يتم قياس انصاف اقطار دائرتي الحيود عند كل جهد بواسطة القدمة ذات الورنية و لكي تكون القراءة أكثر دقة يتم قياس نصف القطر الداخلي و الخارجي لكل دائرة من دوائر الحيود.
- يجب ملاحظة و مراعاة أن تكون غرفة المعمل مظلمة جدا لكي تكون صورة الحيود واضحة.



شكل رقم (5): الدائرة الكهربائية

النتائج و الحسابات:

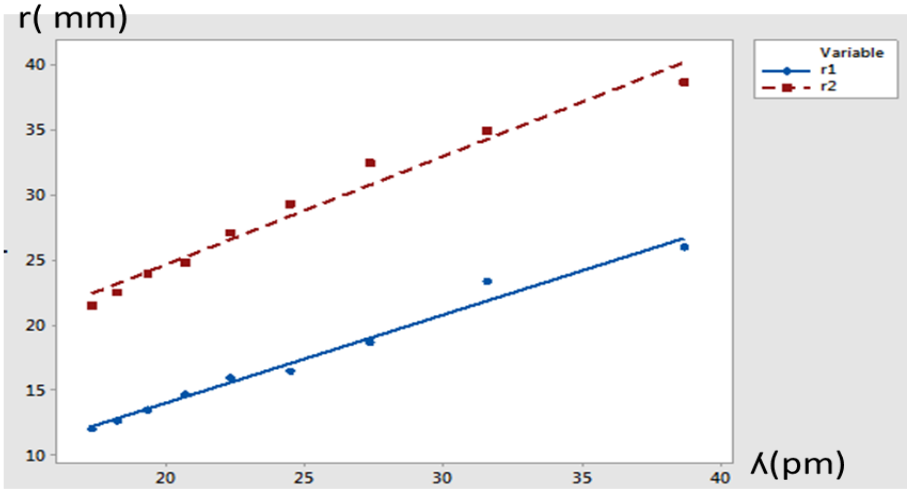
1. النتائج المعملية:

بعد توصيل الأجهزة تم اخذ القراءة المدرجة و الخاصة بقيم الفولتية مع انصاف اقطار دوائر الحيود $r_1(mm)$، $r_2(mm)$ و بتطبيق المعادلة رقم (7) يتم ايجاد λ (الطول الموجي) و وحدة القياس pm. تم ترتيب النتائج بالجدول كما هو موضح بالجدول التالي:

الجدول رقم (1): يمثل فولتية الأنود V_A (kv) مع $r_1(mm)$، $r_2(mm)$ و λ(pm)

V_A (kv)	r_1(mm)	r_2(mm)	λ(pm)
1	26	38.7	38.7
1.5	23.4	35	31.6
2	18.75	32.5	27.36
2.5	16.5	29.35	24.48
3	16	27.15	22.3
3.5	14.7	24.85	20.68
4	13.5	24	19.35
4.5	12.65	22.5	18.24
5	12.1	21.5	17.31

وبرسم العلاقة البيانية بين قيم $r_1(mm)$، $r_2(mm)$ و λ(pm) كما موضح بالشكل (6) وايجاد الميل للخطين المستقيمين $slope_2$= 0.8 mm/pm $Slope_1$= 0.6mm/pm



الشكل رقم (6) : العلاقة البيانية بين أنصاف أقطار حلقات التداخل والطول الموجي

وبتطبيق العلاقة (9) نجد قيم المسافات d_1 ، d_2 حيث:

$$d_1 = \frac{2R}{slope_1} = \frac{130}{0.6} = 216.6\ pm$$

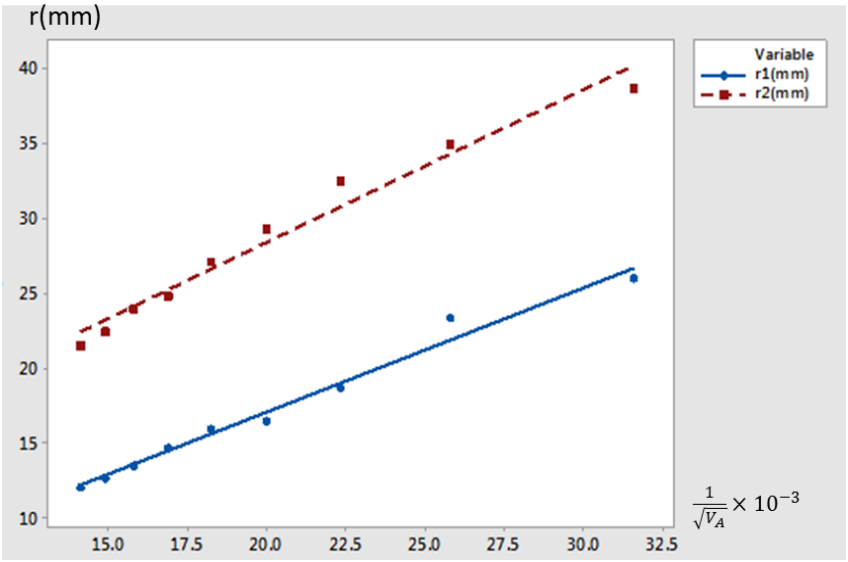
$$d_2 = \frac{2R}{slope_2} = \frac{130}{0.8} = 162.5\ pm$$

كذلك رتبت فولتية الانود V_A مع أنصاف أقطار حلقات الحيود r_1 ، r_2 كما موضح في الجدول (2).

جدول رقم (2) : يمثل فولتية الأنود V_A (kv) مع r_1(mm)، r_2(mm) و $(1/\sqrt{V_A}) \times 10^{-3}$

V_A (kv)	r_1(mm)	r_2(mm)	$(1/\sqrt{V_A}) \times 10^{-3}$
1	26	38.7	31.62
1.5	23.4	35	25.8
2	18.75	32.5	22.36
2.5	16.5	29.35	20
3	16	27.15	18.25
3.5	14.7	24.85	16.90
4	13.5	24	15.81
4.5	12.65	22.5	14.90
5	12.1	21.5	14.14

وبرسم العلاقة البيانية بين أنصاف أقطار دوائر الحيود وبين مقلوب جدر فولتية الانود كما موضح في الشكل (7)، وايجاد الميل للخطين المستقيمين. $slope_2 = 1.01 mm/V^{-1}$ $Slope_1 = 0.8 mm/V^{-1}$



الشكل رقم (7): أنصاف أقطار دوائر الحيود المتداخلة كدالة لمقلوب جدر الفولتية.

وبتطبيق العلاقة (10) لايجاد المسافات البينية نجد أن:

$$d_1 = \frac{2R\ (12.24\ A°)}{slope_1} = \frac{130(12.24\ A°)}{0.8} = 199\ pm$$

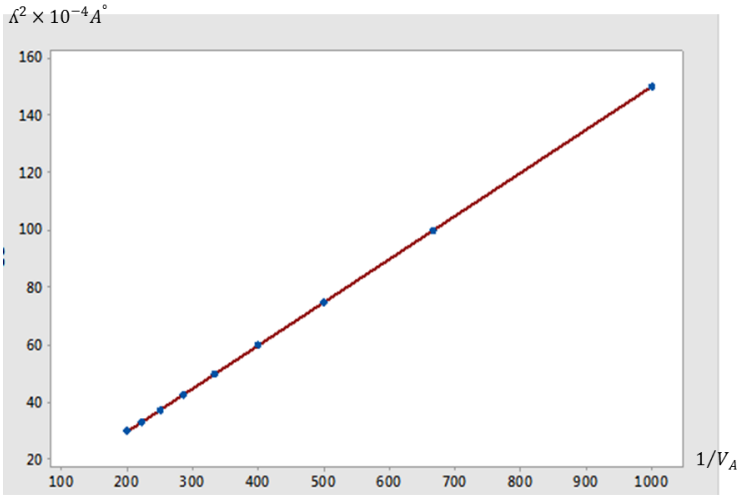
$$d_2 = \frac{2R(12.24\ A°)}{slope_2} = \frac{130(12.24\ A°)}{1.01} = 157.5\ pm$$

هذه النتائج المتحصل عليها قريبة جدا من القيم الحقيقية والموضحة بالشكل (3) ، حيث (d_1= 213 pm ،d_2 = 123 pm). كذلك يتم ترتيب قيم مربع الطول الموجي مع مقلوب فولتية الانود كما موضح في الجدول (3).

الجدول رقم (3): قيم مربع الطول الموجي λ^2مع مقلوب فولتية الانود $^1/_{V_A}$

$\lambda^2 \times 10^{-4} A^\circ$	$1/V_A \times 10^{-6} V^{-1}$
149.8	1000
99.85	666.6
74.85	500
59.9	400
49.7	333
42.76	285.7
37.4	250
33.3	222
29.96	200

وبرسم هذه القيم بيانيا تتحقق العلاقة الخطية مابينهما كما موضح بالشكل (8).



الشكل رقم (8): العلاقة الخطية بين مربع الطول الموجي ومقلوب فولتية الانود

2. التطبيق البرمجي و التحليل العددي باستخدامPython وMatlap:

الوصف البرمجي للمحاكاة:

تم تطوير نموذج محاكاة رقمي باستخدام لغتي البرمجة Python وMatlap و ذلك لدعم التجربة المعملية لحيود الإلكترونات على بلورة الجرافيت حيث انها ستسهم في فهم فيزياء الكم و حيود الجسيمات. بالنسبة للغة python تم استخدام مكتبتا NumPy و Matplotlibلإجراء الحسابات الرياضية ورسم الأنماط، بالإضافة إلى مكتبة ipywidgets لإنشاء واجهة تفاعلية تسمح بتغيير فرق الجهد المسلط على الإلكترونات (بين 1 و5 كيلوفولت) . اما في الكود الذي بلغة MATLABلم يتم استدعاء مكتبات خارجية، لأن MATLAB يحتوي على معظم الدوال الرياضية والرسمية بشكل مدمج داخليًا.

المكتبات/الوحدات التي استخدمتها ضمنيًا هي:

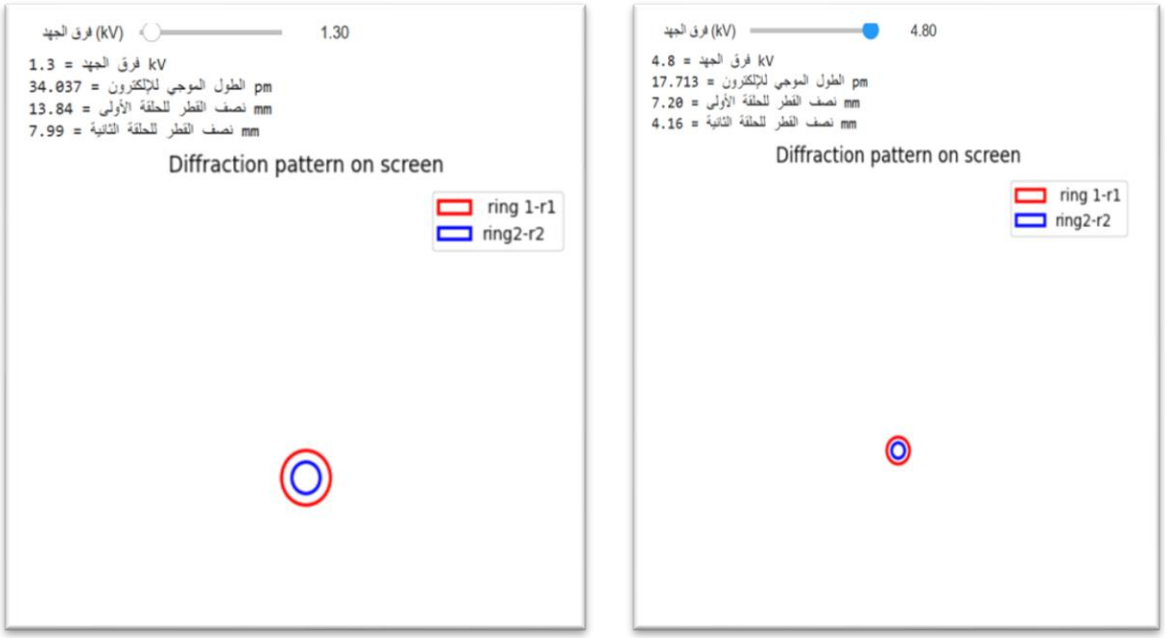
- **الدوال الرياضية الأساسية** :مثل linspace,sqrt، polyfit، polyval.
- **دوال الطباعة والتخزين** :مثل fprintf,diary.
- **دوال الرسم البياني** :مثل plot,xlabel، ylabel، legend، grid، exportgraphics.

كل هذه الأدوات جزء من بيئة MATLAB نفسها، ولا تحتاج إلى استدعاء مكتبات إضافية كما هو الحال في بايثون يعتمد كلا من النموذجين على تطبيق فرضية دي برولي، حيث يُحسب الطول الموجي للإلكترون اعتمادًا على فرق الجهد.وتم استخدام قانون براغ لربط الطول الموجي مع أنصاف أقطار للحلقات الناتجة عن الحيود، تم حساب نصفَي قطر الحلقتين الأولى والثانية بالاعتماد على قيمتين مختلفتين لـ تمثلان المستويين البلوريين المختلفين في بلورة الجرافيت. كما تم تضمين رسومات دائرية على الشاشة لتمثيل نمط الحيود المرئي بطريقة مرئية وتفاعلية.

أظهرت المحاكاة الرقمية لتجربة حيود الإلكترونات على بلورة الجرافيت أن للطول الموجي للإلكترون علاقة طردية مع أنصاف أقطار حلقات الحيود الناتجة على الشاشة الفلورية. حيث تم تغيير فرق الجهد المسلط على الإلكترونات ضمن مدى (1–5) كيلوفولت، **ولوحظ ما يلي:**

- مع انخفاض فرق الجهد، ازداد الطول الموجي للإلكترونات طبقًا لمعادلة دي برولي، مما أدى إلى زيادة أنصاف أقطار الحلقات الظاهرة على الشاشة
- الحلقات الناتجة كانت دائرية ومركزة حول نقطة السقوط، وشملت نمطين رئيسيين يمثلان حيود من الرتبة الأولى والثانية، مرتبطين بالمسافتين البينيتين لمستويي البلورة .حيث تم حساب نصف القطر لكل حلقة.

الشكل (9) يوضح نموذج المحاكاة الرقمي للتغير في فرق الجهد.



الشكل رقم (9): نموذج المحاكاة الرقمي للتغير في فرق الجهد وحساب الطول الموجي للالكترون.

- وأخيراً تم استخدام تحليل الانحدار الخطي باستخدام مكتبة SciPy لحسابالميل ومنه استخراج d_1,d_2.

نتائج التحليل:

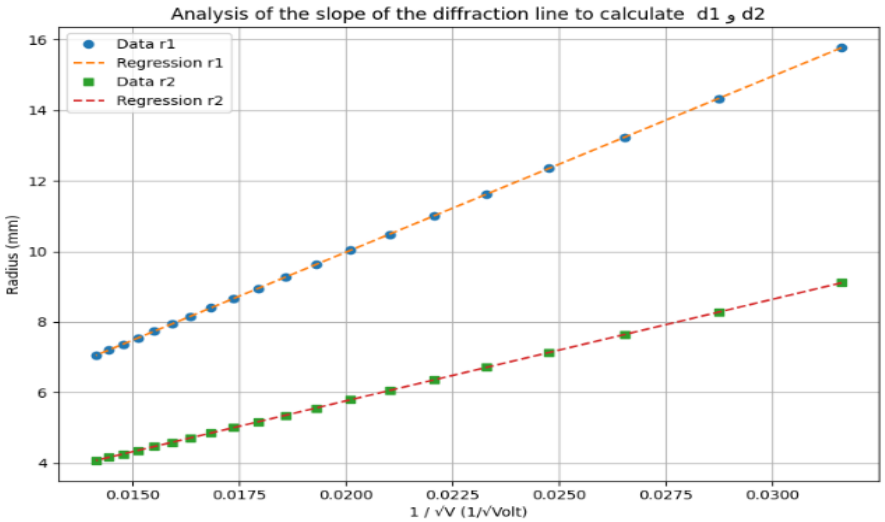
Slope-r_1: 2.8808e-01m

d_1 :0.2130 nanometer

slope-r_2: 4.9886e-01e

d_2 :0.1230 nanometer

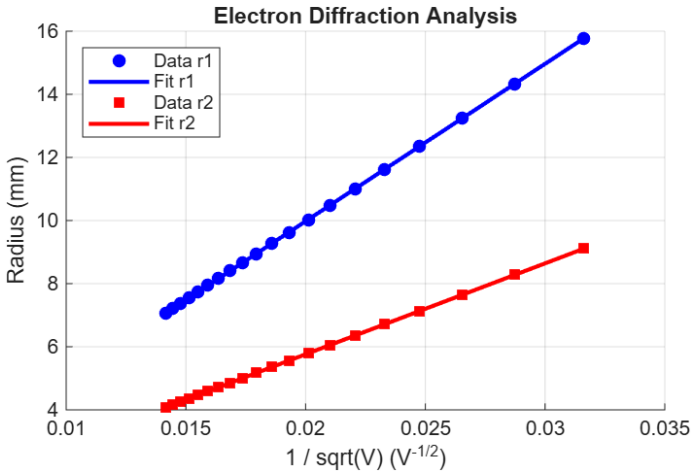
الشكل رقم (10): يوضح الرسم البياني للعلاقة الطردية الخطية بين أنصاف الأقطار باستخدام لغة Python.



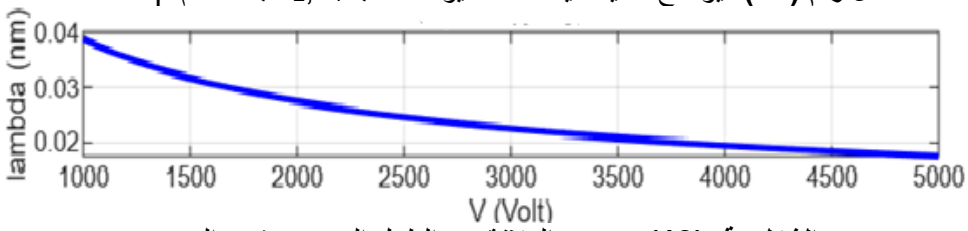
الشكل رقم (11): يوضح تحليل ميل خط الحيود لحساب d_1,d_2 باستخدام Python

وباستخدام لغة Matlab تم الحصول على النتائج التالية:

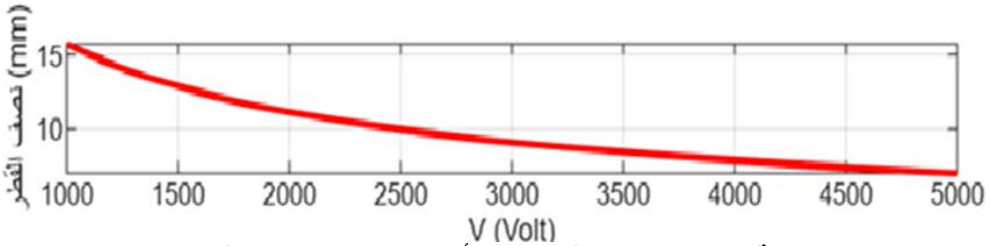
```
نتائج تحليل حيود الإلكترونات
==================================
Slope-r1: 4.9886e-01 m
d1 Calculated: 0.1230 nm
d1 True:       0.1230 nm
Error d1:      0.00 %
----------------------------------
Slope-r2: 2.8808e-01 m
d2 Calculated: 0.2130 nm
d2 True:       0.2130 nm
Error d2:      0.00 %
==================================
```



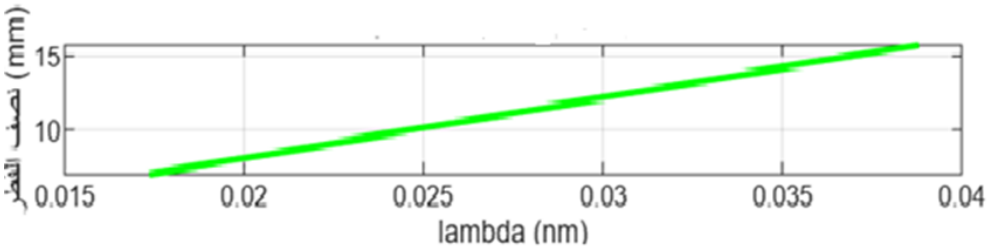
الشكل رقم (12): يوضح تحليل ميل خط الحيود لحساب d_2,d_1 باستخدام Mat lap



الشكل رقم (13): يوضح العلاقة بين الطول الموجي وفرق الجهد



الشكل رقم (14): يوضح العلاقة بين أنصاف الاقطار وفرق الجهد



الشكل رقم (15): يوضح العلاقة بين أنصاف الاقطار والطول الموجي

النتائج:

أظهرت المحاكاة تطابقًا جيدًا مع السلوك الفيزيائي المتوقع من حيود الجسيمات.حيث تشير هذه النتائج إلى أن المحاكاة تعكس بدقة الظاهرة الفيزيائية، وتؤكد صحة العلاقات النظرية المستخدمة في توصيف حيود الإلكترونات. كما أظهرت المحاكاة أن أنصاف أقطار حلقات الحيود الأولى والثانية تتبع علاقة خطية وتم حساب (d_{21})، dوكانت قريبة من القيم النظرية المعروفة لبلورة الجرافيت. وتم استنتاج كيف يمكن لتقنيات الحوسبة، وخاصة باستخدام لغة python و Matlab أن تمثل بشكل فعال أنظمة فيزيائية كحيود الإلكترونات.

الخاتمة:

اظهرت النتائج العملية لتجربة حيود الالكترونات عبر بلورة الجرافيت تكون حلقتين دائريتين متحدتي المركز حول البقعة المضيئة على الشاشة الفلورية. ويؤكد ظهور هذه الحلقات حدوث تداخل لموجات الالكترونات بعد تفاعلها مع المستويات البلورية المنتظمة في الجرافيت، مما يدعم الطبيعة الموجية للإلكترون وفق فرضية دي برولي.

بينت القياسات أن أنصاف أقطار حلقات الحيود تتناقص تدريجيا مع زيادة جهد الانود. فعند زيادة الجهد من (1الى 5 كيلو فولت) انخفض نصف قطر الحلقة الاولى من (26 الى 12.1) مليمتر كما انخفض نصف الحلقة الثانية من (38.7) الى (21.5) مليمتر. ويرجع هذا السلوك إلى أن زيادة فرق الجهد تؤدي إلى زيادة سرعة الالكترونات وزخمها، ومن ثم انخفاض طولها الموجي الذي يسبب انخفاضا في زاوية الحيود وبالتالي تقل أنصاف أقطار الحلقات الظاهرة على الشاشة. أما عند خفض الجهد فيزداد طول موجة الالكترونات وتزداد معه أنصاف أقطار الحلقات وهو ما يتفق مع الأساس النظري.

أظهر الرسم البياني للعلاقة بين أنصاف أقطار الحلقات والطول الموجي للإلكترونات علاقة خطية وطردية وهو ما يتوافق مع قانون براغ، إذ أن نصف قطر حلقة الحيود تتناسب طرديا مع طول الموجة عند تباث المسافة البينية والهندسة التجريبية. ومن ثم استخدم ميول الخطوط البيانية لاستخراج المسافات البينية بين المستويات البلورية في الجرافيت.

كما تم تحليل العلاقة بين أنصاف أقطار الحلقات ومقلوب الجدر التربيعي لجهد الأنود. وأظهرت هذه العلاقة سلوكا خطيا، وهو ما يؤكد اعتماد نصف قطر الحلقة على طول موجة الالكترون، لأن طول الموجة يتناسب عكسيا مع الجدر التربيعي للجهد. حيث تم احتساب المسافات البينية ومقدارهما نحو (199 و157.5) بيكومتر. يمكن تفسير الفروق بين القيم العملية والقيم المرجعية بعدة عوامل تجريبية، من أهمها صعوبة تحديد المسافة الدقيقة للحلقات على الشاشة الفلورية، وعدم وضوح مركز البقعة المضيئة، ودقة القدمة ذات الورنية، إضافة الى تأثير اضاءة المختبر وظروف الرؤية.

دعمت المحاكاة الرقمية النتائج العملية من الناحية الفيزيائية، فقد اظهرت أن خفض فرق الجهد يؤدي الى طول موجة الالكترون وزيادة أنصاف أقطار الحلقات. كما اظهرت المحاكاة تكون حلقات دائرية متحدة المركز تمثل الرتب المختلفة للحيود المرتبطة بالمستويات البلورية في الجرافيت. ويتفق هذا السلوك مع النمط المشاهد في التجربة، ومع العلاقات الرياضية المستخدمة في حساب طول الموجة ونصف القطر للحلقة.

تبرز أهمية المحاكاة في أنها سمحت بتغير فرق الجهد بصورة تفاعلية وملاحظة تأثيره مباشرة في نمط الحيود. كما ساعدت على تمثيل العلاقة بين المتغيرات الفيزيائية بصورة مرنة. وقد استخدم في الدراسة التحليل العددي والانحدار الخطي لاستخراج ميول العلاقات وحساب المسافات البينية، وهذا جعلت المحاكاة أداة مساندة للتحليل التجريبي وليست بديلا عنه.

قائمة المراجع:

1. Ponce, A., Aguilar, J. A., Tate, J., & Yacamán, M. J. (2020). Advances in the electron diffraction characterization of atomic clusters and nanoparticles. Nanoscale Advances, 3(2), 311–325. https://doi.org/10.1039/D0NA00590H
2. Gruene, T., Holstein, J. J., Clever, G. H., et al. (2021). Establishing electron diffraction in chemical crystallography. Nature Reviews Chemistry, 5, 660–668. https://doi.org/10.1038/s41570-021-00302-4
3. Šlouf, M., Skoupy, R., Pavlova, E., & Krzyzanek, V. (2021). High resolution powder electron diffraction in scanning electron microscopy. Materials, 14(24), 7550. https://doi.org/10.3390/ma14247550
4. Madsen, J., & Susi, T. (2021). The abTEM code: Transmission electron microscopy from first principles. Open Research Europe, 1, 24. https://doi.org/10.12688/openreseurope.13015.2

5. Savitzky, B. H., Zeltmann, S. E., Hughes, L. A., Brown, H. G., Zhao, S., et al. (2021). py4DSTEM: A software package for four-dimensional scanning transmission electron microscopy data analysis. Microscopy and Microanalysis, 27(4), 712–743. https://doi.org/10.1017/S1431927621000664
6. Kalinin, S. V., Ophus, C., Voyles, P. M., Erni, R., Kepaptsoglou, D., et al. (2022). Machine learning in scanning transmission electron microscopy. Nature Reviews Methods Primers, 2, 11. https://doi.org/10.1038/s43586-022-00095-w
7. Ophus, C. (2023). Quantitative scanning transmission electron microscopy for materials science: Imaging, diffraction, spectroscopy, and tomography. Annual Review of Materials Research, 53, 105–141. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-080921-092646
8. Kirkland, E. J. (2010). Advanced Computing in Electron Microscopy. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6533-2
9. phywe series of publication, phywe system GMBH, 37070 GERMANY, http://www.ph.utexas.edu/phy
10. .Phywe university laboratory Experiments, Germany 1980
11. Science of fullerenes and Carbon Nanotubes (Academic press), 1996
12. سامي صالح، فيزياء الحيود، 1982.
13. حازم فلاح، مقدمة مختصرة حول فيزياء الجسيمات، اصدار شبكة الفيزياء التعليمية.
14. الجبوري، محمد أحمد وكمال نصر عبد النور، الفيزياء الحديثة، طبع بمطابع دار الكتب للطباعة والنشر- جامعة الموصل 1983.
15. أحمد صالح، مبادئ فيزياء الحالة الصلبة، دار صفاء النشر والتوزيع- عمان، 2014.