

نمذجة ومحاكاة مفعول زينو الكمومي باستخدام الحاسب الكمومي الحقيقي

أ. د. نزيه حيدر *

د.م. حسن البستاني **

علي سهيل خضور ***

تاريخ الإيداع 11 / 5 / 2023 – تاريخ النشر 22 / 6 / 2023

□ ملخص □

توسع اهتمام العلماء بظاهرة مفعول زينو الكمومي بعد اكتشاف تأثيرها في ميكانيك الكم عام 1977 وإثبات وجودها تجريبياً في عامي 1989 و1995، وازدادت أهميتها في مجالات القياس الكمومي والحوسبة والاتصالات الكمومية.

قمنا في البحث ببناء نموذج يعتمد على البوابات الكمومية لدراسة مفعول زينو الكمومي انطلاقاً من مقياس التداخل ماخ-زيندر. واستخدمنا ضمن مقياس التداخل جسماً ماصاً للفوتونات (Absorber) بالتالي يمكننا الكشف عن الجسم الماص من دون تفاعل الفوتون معه بنسبة احتمالية تقدر بـ 25%، وعُرفت هذه التقنية بالقياس من دون التفاعل interaction free measurement. وبالاعتماد على مفعول زينو الكمومي يمكن زيادة النسبة الاحتمالية إلى 100% من دون أي تفاعل للفوتون مع الجسم الماص.

تم تنفيذ دارة كمومية مكافئة لمقياس التداخل ماخ-زيندر مع الجسم على حاسب كمومي عالي التشابك مؤلف من 7 كيوبت ويعتمد على تقنية الناقلية الفائقة، وقد أظهرت نتائج الحاسب الكمومي تطابقاً مع النتائج النظرية المتوقعة. **كلمات مفتاحية:** مفعول زينو الكمومي - مقياس التداخل ماخ-زيندر - مبدأ التراكب - التشابك الكمومي - القياس الكمومي - البوابات الكمومية - الدارات الكمومية - الحاسب الكمومي.

*: أستاذ في قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تشرين، اللاذقية، سوريا

** : مدرس في كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس

*** : طالب ماجستير في قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تشرين، اللاذقية، سوريا

Modeling and simulating the quantum Zeno effect using a real quantum computer

Dr. Nazih Haidar*

Dr-Eng. Hasan Albustani**

Ali Suhil Khadour***

(Received 11/5/2023. Accepted 22/6/2023)

□ABSTRACT □

Scientists' interest in the quantum Zeno effect expanded after discovering its effect on quantum mechanics in 1977 and proving its existence experimentally in 1989 and 1995, and its importance increased in the fields of quantum measurement, quantum computing and quantum communication.

In this paper, we built a model based on quantum gates to study the quantum Zeno effect based on the Mach-Zehnder interferometer. Within the interferometer, we used a photon-absorbing object, so we could detect the absorbing object without the photon interacting with it with a probability of 25%, and this technique was known as interaction free measurement. Depending on the quantum Zeno effect, the probability ratio can be increased to 100% without any interaction of the photon with the absorbing body.

A quantum circuit equivalent to the Mach-Zehnder interferometer with the body has been implemented on a highly entangled 7-qubit quantum computer based on superconducting technology. and the results of the quantum computer showed a complete agreement with the expected theoretical results.

Keywords: Quantum Zeno effect - Mach-Zehnder interferometer - principle of superposition - quantum entanglement - quantum measurement - quantum gates - quantum circuits - quantum computer.

*: Professor, Physics Department, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Assistant Professor, Faculty of Communication and Information Engineering Technology – Tartous University, Tartous, Syria.

*** Master Student at Physics Department, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

1- المقدمة

يشير مصطلح مفعول زينو الكمومي إلى الأنظمة الكمومية التي يتوقف (يتجمد) تطورها الزمني وتثبت عند الحالة الابتدائية للنظام نتيجة عملية القياس المتكرر. وقد ظهرت هذه الظاهرة في عام 1977 [1]. حيث أثبت الباحثان أن الجسيمات غير المستقرة (في وضعية مثارة)، تتذبذب بسرعة في حالة عدم وجود قياس يتم إجراءه عليها، ولكن عند إجراء عملية القياس على الجسيمات غير المستقرة فإن الأنظمة الكمومية تتحول إلى حالة محددة، وهذا ما كان معروفاً بانهياب الدالة الموجية.

بقيت هذه الظاهرة ضمن سياق الفيزياء النظرية حتى عام 1990، عندما قام فريق بحثي في المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا في جامعة Colorado برئاسة Wayne M. [2]، بإثبات ظاهرة زينو الكمومية تجريبياً اعتماداً على الانتقال المحثوث بين سويتي طاقة كمومية. ثم ظهرت نسخة أخرى من التجارب لإثبات ظاهرة زينو الكمومية [3-4]، اعتماداً على اتجاه استقطاب الفوتون، وسنستفيد من هذه المقالة لشرح الأساس النظري لمفعول زينو الكمومي، وسنستخدمه في نمذجة هذه الظاهرة باستخدام البوابات الكمومية.

تتالت الأبحاث في مجال الفيزياء النظرية والتجريبية وتم البرهان الرياضي على صحة هذه النظرية بعد الإثبات التجريبي لهذه الظاهرة [5-9] حيث ركزت هذه الأبحاث على دراسة هذه الظاهرة ومجال تطبيقاتها في نظرية القياس الكمومية، والحوسبة الكمومية، ونظرية المعلومات الكمومية، والاتصالات الكمومية، وفي التطبيقات الطبية مثل معالجة السرطان.

يعتبر القياس من دون تفاعل Interaction-free Measurements [10-12] واحداً من أهم تطبيقات مفعول زينو الكمومي، ويُعرف هذا النوع من القياس الكمومي بالمقدرة على امتلاك نسبة احتمالية لا تساوي الصفر، لتحديد وجود هدف object أو عدم وجوده من دون التفاعل معه، وقد عدّ هذا النوع من القياس من الظواهر الغريبة في ميكانيك الكم. ويمكن تحسين النسبة الاحتمالية لكشف الهدف من دون التفاعل معه إلى 100% باستخدام مفعول زينو الكمومي [13-14]. واستثمرت هاتان التقنيتان القياس من دون تفاعل وظاهرة زينو الكمومية في مجال نقل المعلومات كمومياً، وسميت التقنية الجديدة بنقل المعلومات باستخدام الاتصال العكسي (المضاد) Direct counterfactual quantum communication [15]، وفي هذا النوع من الاتصال يتم إرسال المعلومات من دون إرسال أي جسيمات فيزيائية [16]. وقد نجح فريق بحثي من الصين من إثبات هذا النوع من الاتصال تجريبياً، فقد أرسلت صورة من مكان لآخر من دون إرسال أي جسيمات فيزيائية (إرسال دالة الموجة فقط) [17-18].

تُعدّ شركة IBM واحدة من الشركات الرائدة في مجال الحوسبة الكمومية، والتي تقدم خدماتها للمؤسسات والباحثين في جميع أنحاء العالم عبر الحوسبة السحابية، يتم استخدام الحواسيب الكمومية لحل المشاكل الصعبة التي لا يمكن حلها بسهولة على الحواسيب الكلاسيكية، ومع ذلك يتطلب استخدام الحواسيب الكمومية وقتاً طويلاً لإتمام الحسابات الكمومية المعقدة، وتعتمد مدة الانتظار في استخدام الحواسيب الكمومية على عدة عوامل، بما في ذلك حجم العمل الذي يتم حسابه وعدد الموارد المتاحة في تلك اللحظة، حيث يمكن أن يستغرق حساب تجربة كمومية صغيرة عدة دقائق أو ساعات في حين يمكن أن تصل مدة الانتظار إلى عدة أيام وأسابيع.

منهجية خطوات العمل ومقارنتها بالمقاليتين [19-20]:

(1) آلية عمل مقياس تداخل ماخ-زيندر.

- (2) إضافة جسم ماص للفوتونات لمقياس التداخل كهدف يمكن كشفه من دون التفاعل معه interaction free measurements بنسبة 25%.
- (3) دراسة مفعول زينو رياضياً.
- (4) تطبيق مفعول زينو الكمومي إلى مقياس تداخل (ماخ-زيندر) لتحسين النسبة الاحتمالية لكشف الجسم من دون التفاعل معها لتصل تقريباً إلى 100%.
- (5) تصميم نموذج باستخدام البوابات الكمومية [20] لمقياس التداخل ماخ-زيندر، ثم تطبيق مفعول زينو الكمومي على مقياس التداخل، وكتابة الصياغة الرياضية لمخارج البوابات الكمومية، للخروج النهائي للدارة الكمومية.
- (6) محاكاة الدارة الكمومية المصممة باستخدام محاكيات الدارات الكمومية المتوفرة، ومقارنتها مع نتائج الحسابات الرياضية.
- (7) تطبيق الدارة الكمومية على حاسب كمومي حقيقي (Qiskit) real quantum computer [21-25] عالي التشابك مكون من 7 كيوبت يعتمد تقنية الناقلية الفائقة مصمم من قبل شركة IBM. ومقارنة النتائج مع الحسابات الرياضية ومع نتائج المحاكاة.
- (8) مناقشة النتائج ومقارنتها مع الأعمال السابقة.
- لا بد من الإشارة إلى الإضافة التي قدمها البحث مقارنة مع المقالين [19-20]، ويمكن تلخيصها بالنقاط الآتية:

- (1) تم الانطلاق من مقياس التداخل ماخ-زيندر للحصول على النموذج المقترح، بينما بدأ الباحث [19] مباشرة من البوابات الكمومية. كذلك فإنّ البحث [20]، لم يعالج مفعول زينو الكمومي، واكتفى بمعالجة القياس من دون تفاعل، ويجدر بالذكر أيضاً أن الباحث في المقالة [26] اكتفى بتطبيق القياس من دون تفاعل على الحاسب الكمومي.
- (2) اعتمد الباحثان على بوابة كمومية مصممة خصيصاً للحاسب الكمومي IBM، بينما تم في هذا البحث استخدام بوابات كمومية معيارية قابلة للتطبيق على أي حاسب كمومي.
- (3) في هذه الورقة استخدمنا المعالج الكمومي الحقيقي ibm_nairobi، مكون من 7 كيوبت، نوع المعالج Falcon r5.11H، إصدار 1.2.6، وتم استخدام المحاكي الكمومي ibmq_qasm_simulator مكون من 32 كيوبت إصدار 0.12.0، بينما استخدم الباحثان محاكي كمومي بخمس كيوبتات.

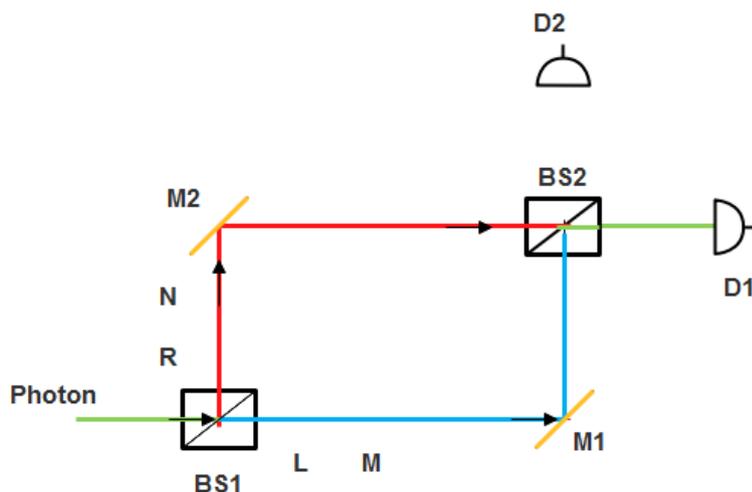
2- أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من خلال دراسة مفعول زينو الكمومي الذي يسمح بقياس تردد الفوتون في كل مرحلة على حدة، أي إعادة الفوتون إلى حالته الأولية مما يسمح لنا بتطبيق سلسلة من العمليات الكمومية دون انهيار التشابك الكمومي بين الفوتونات المنقسمة في مقسم الحزمة، ومن أهم تطبيقاته العملية هي تصوير الخلايا البيولوجية من دون التعرض لخطر إصابتها بفوتونات فيزيائية أي استخدام الخصائص الموجية للفوتون، كما يسمح لنا بإجراء حوسبة عكوسة أي أننا نستطيع من خلال قيمة الخرج أن نحمن قيمة الدخل وتوفير الطاقة اللازمة لأجراء الحوسبة.

3- طرائق البحث وموارده:

3-1- مقياس ماخ-زيندر Mach-Zehnder Interferometer

يُعدّ مقياس التداخل ماخ-زيندر امتداداً لتجربة شقي يونغ التي توضح الطبيعة الثنائية للفوتون (جسيم-موجة)، فعند مرور الفوتون في مقسم حزمة له معامل نفوذ (L) $1/2$ ، ومعامل انعكاس (R) $1/2$ ، يتراكب الفوتون في مسارين (علوي وسفلي)، ثم ينعكس الجزء النافذ بواسطة المرآة M_1 ، والجزء المنعكس بواسطة المرآة M_2 ، ثم يتراكب الجزء المنعكس والجزء النافذ في مقسم حزمة آخر ويتم الكشف عن الفوتون في أحد الكاشفين D_1 أو D_2 [27]، كما هو موضح بالشكل (1) حيث تم رسم الشكل بواسطة برنامج Edraw Max.



الشكل (1): يوضح مقياس التداخل ماخ زيندر عند مرور الفوتون بشكل أفقي على مقسم الحزمة يتراكب في حالتين ثم يعاد تجميعه في مقسم الحزمة الثاني ويتم الكشف عنه باستخدام الكاشف D_1 .

يمكن وصف الحالة الكمومية $|\psi\rangle$ في فضاء هيلبرت ثنائي الأبعاد الناتج عن تراكب الحالتين الكموميتين $|\psi_0\rangle$ و $|\psi_1\rangle$ بالصيغة الآتية:

$$|\psi\rangle = \alpha|\psi_0\rangle + \beta|\psi_1\rangle \quad (1)$$

تدل معاملات الاحتمال α و β أمام كل حالة على احتمال قياس الحالة، ولحساب الاحتمال نقوم بتربيع القيمة المطلقة للمعاملات على النحو الآتي:

$$p(|\psi_0\rangle) = |\alpha|^2$$

$$p(|\psi_1\rangle) = |\beta|^2$$

يمكن الحصول على احتمالية التراكب من خلال العلاقة الآتية:

$$p = \left| \sum_{i=0}^{2^n-1} \rho_i |\psi\rangle \right|^2 \quad (2)$$

ومن ناحية أخرى إذا كانت الحالة $|\psi\rangle$ نظامية ومتعامدة تبادلياً، بالتالي يجب أن يكون المجموع الكلي للاحتتمالات الفردية مساوياً للواحد:

$$p = \left| \sum_{i=0}^{2^n-1} \rho_i |\psi_i\rangle \right|^2 = \sum_i |\rho_i|^2 = p_0 + p_1 = |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (3)$$

حيث ρ_i معامل الاحتمال، n تعبر عن الحالة الكمومية بـ $n - qubit$ ، و $|\rho_i|^2$ قيمة الاحتمال. لوصف الفوتون في ميكانيك الكم بدالة موجية، سوف نستخدم ثابتين يمكن وضعهما في متجه يوصف بمصفوفة ذات عمود واحد وسطرين $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$ لأن الفوتون بعد مروره بمقسم الحزمة يمكن أن يوجد في أي من الحزمتين أي أنه في حالة تراكب، واحتمال أن يسلك الفوتون المسار العلوي $|\alpha|^2$ ، واحتمال أن يسلك الفوتون المسار السفلي $|\beta|^2$ ، وبالتالي تكون قيمة الاحتمال الكلي $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

قبل دخول الفوتون إلى مقسم الحزمة، يعبر المتجه $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ عن ورود الفوتون بشكل أفقي، ويعبر المتجه $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ عن ورود الفوتون بشكل عمودي، فعند ورود الفوتون بشكل عمودي على مقسم الحزمة (Beam Splitter)BS، فإنه يحوله من الحالة $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ إلى الحالة $\begin{pmatrix} L \\ R \end{pmatrix}$ ، وبالمثل نجد أنه عند ورود الفوتون بشكل أفقي على مقسم الحزمة سيحوله من الحالة $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ إلى الحالة $\begin{pmatrix} M \\ N \end{pmatrix}$ ، وبالتالي نحتاج إلى أربعة أرقام لوصف مقسم الحزمة BS، فنحصل على مصفوفة مقسم الحزمة كما يلي [28]:

$$BS = \alpha \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \alpha \begin{pmatrix} L \\ R \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} M \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L & M \\ R & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad (4)$$

وضعت إشارة السالب في مصفوفة مقسم الحزمة، لأنه لا يمكن الحصول على قيمة صحيحة أي الاحتمال (100%)، مع الأخذ بعين الاعتبار أن هناك عيوب بمقسم الحزمة.

ينتشر في مقياس التداخل ماخ-زيندر الفوتون المتراكب (النافذ والمنعكس) من مقسم الحزمة في فضاء هيلبرت $\hat{H} = \{|0\rangle, |1\rangle\}$ ، ومتجهات الحالة $|0\rangle$ و $|1\rangle$ التي تؤخذ كحزم موجية تنتشر في اتجاهين في مقياس التداخل، وبالتالي نمثل المرايا بالمصفوفة $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ ، وبما أن المرايا تُحدث تغييراً في الطور تصبح مصفوفة المرايا من الشكل $\begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ ، وعند إدخال الحالة النقية $|0\rangle = \rho_{in}$ إلى مقياس التداخل نحصل على حالة الخرج الآتية [29]:

$$\rho_{out} = \hat{U}_{BS} \hat{U}_M \hat{U}_{BS} \rho_{in} \hat{U}_{BS}^\dagger \hat{U}_M^\dagger \hat{U}_{BS}^\dagger = |0\rangle \quad (5)$$

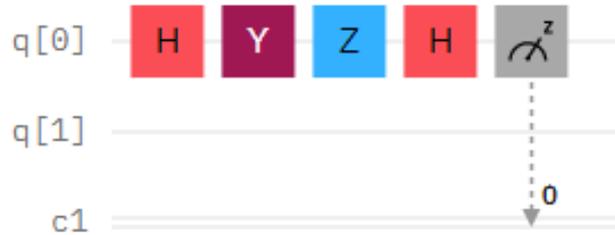
\hat{U}_{BS} ويمثل مؤثر مقسم الحزمة، \hat{U}_M ويمثل مؤثر المرايا، \hat{U}_{BS}^\dagger المرافق الهرميتي لمؤثر مقسم الحزمة، \hat{U}_M^\dagger يمثل المرافق الهرميتي لمؤثر المرايا.

لتطبيق هذه الصياغة النظرية على الحاسوب الكمومي الخاص بشركة IBM، نحن بحاجة إلى بوابة كمومية لها نفس قيم مصفوفة مقسم الحزمة، وسيتم بذلك بواسطة بوابة هادامارد $H - gate$ ، ولكن لا يوجد بوابة كمومية لها قيم مصفوفة المرايا نفسها، وسيتم الاستعاضة عنها بواسطة البوابتين Y, Z كما يلي [30]:

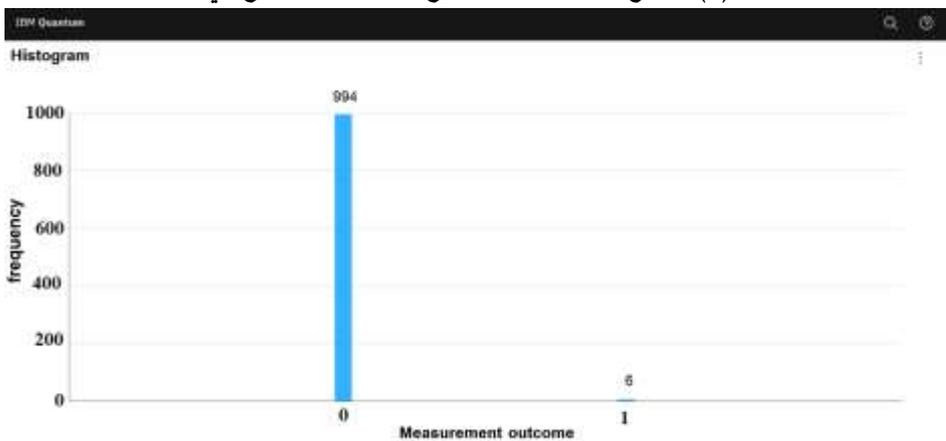
$$\hat{U}_M = YZ = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

تم تطبيق هذه الصياغة النظرية الخاصة بمقياس التداخل ماخ-زيندر، حيث نطبق على الكيوبت q_0 الذي يمثل الفوتون بوابة هادامارد $H - gate$ التي تمثل مقسم الحزمة، وتسبب تراكباً للفوتون، ثم نطبق

البوابتين YZ اللتين تمثلان المرايا، ثم نطبق بوابة هادامارد $H - gate$ التي تمثل مقسم الحزمة الثاني كما هو موضح بالشكل (2)، وعند تطبيق الدارة الكمومية على الحاسوب الكمي نحصل على نتيجة القياس كما هو موضح بالشكل (3).



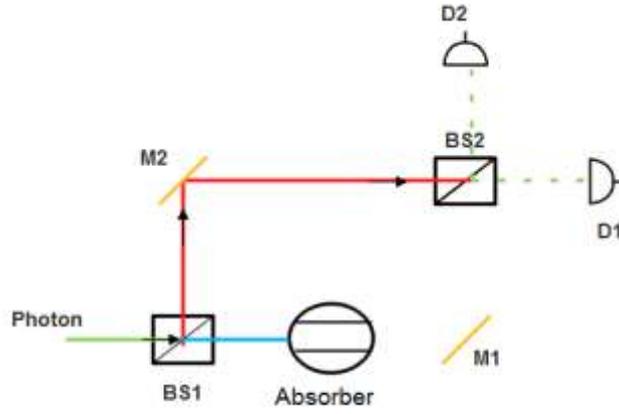
الشكل (2): يوضح الدارة الكمومية كنموذج لمقياس التداخل ماخ-زيندر.



الشكل (3): يوضح نتائج القياس على الكيوبت الأول q_0 باستخدام الحاسوب الكمي `ibm_nairobi`، والذي يعطي قيمة احتمالية 99.4% للحالة $|0\rangle$.

2-3- الجسم الماص للفوتونات

في تجربة ماخ- زيندر المعدلة، يتم وضع في الجزء السفلي من مقياس التداخل جسم ماص للفوتونات (الجسم الماص `absorber` هو عبارة حساس يقيس موقع الفوتون) [31]، فإذا كان الحساس يعمل، فإنه عند مرور الفوتون في مقسم الحزمة الأول سوف يتراكم في مسارين، فإذا انهار التراكب في القسم السفلي فهذا يعني أن الفوتون تم امتصاصه، وهذا نسبته 50%، أما إذا انهار التراكب في القسم العلوي فإن الفوتون يتراكم في مقسم الحزمة الثاني ويتم كشفه بواسطة الكاشفين D_1 و D_2 بنسبه 25% لكل منهما [8]، كما هو موضح بالشكل (4) حيث تم رسم الشكل بواسطة برنامج `Edraw Max`.



الشكل(4): يوضح تجربة ماخ-زيندر مع الجسم الماص للفوتونات، حيث يتراكم الفوتون في مسارين يتم الكشف عنه في كل من الكاشفين D_1 و D_2 بنسبه 25% لكل منهما

لوصف هذه التجربة باستخدام الدارات الكمومية، قمنا بتطبيق البوابات $ph(\frac{\pi}{2})$ ، $R_Y(\frac{\pi}{2})$ ، $R_X(\pi)$ للحصول على البوابة هادامارد كما يلي:

$$H = R_X(\pi)R_Y\left(\frac{\pi}{2}\right)ph\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos\frac{\pi}{2} & -i\sin\frac{\pi}{2} \\ i\sin\frac{\pi}{2} & \cos\frac{\pi}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\frac{\pi}{4} & -\sin\frac{\pi}{4} \\ \sin\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} \end{pmatrix} e^{i\frac{\pi}{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

وقمنا بتطبيق بوابتي H، وبوابة controlled_Z للحصول على البوابة CNOT كما يلي:

$$CNOT = (I \otimes H) controlled_z(I \otimes H) \quad (8)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

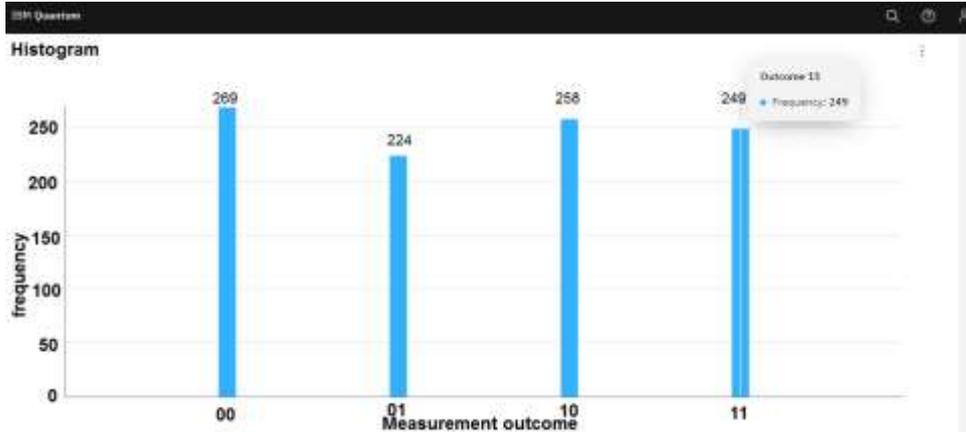
$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

حيث تتعامل البوابة CNOT مع نظام ثنائي الكيوبت، ووظيفتها عكس حالة الخرج إذا كان كيوبيت الدخل $|1\rangle$.

لصيغة البوابات السابقة على الحاسوب الكمومي، نأخذ على السلك الكمومي الخاص بالكيوبت q_0 الذي يمثل الفوتون، البوابات $ph(\frac{\pi}{2})R_Y(\frac{\pi}{2})R_X(\pi)$ التي تمثل مقسم الحزمة الأول، ثم بوابات المرايا YZ، ثم نضع البوابات $(I \otimes H) controlled_z(I \otimes H)$ على الكيوبت الثاني q_1 ، ثم نكرر بوابات مقسم الحزمة الثاني على الكيوبت الأول، وأخيراً تم وضع بوابتي قياس على الكيوبتين الأول والثاني كما في الشكل(5)، وتظهر النتائج الاحتمالية عند تطبيقها على الحاسوب الكمومي كما في الشكل(6).



الشكل (5): يوضح الدارة الكمومية المستخدمة لتجربة ماخ زيندر مع الجسم الماص للفوتونات.



الشكل (6): يوضح النتائج التجريبية على الحاسوب الكوموي `ibm_nairobi` لتجربة ماخ زيندر مع الجسم الماص للفوتونات.

3-3 مفعول زينو الكوموي

مفعول زينو الكوموي هو ظاهرة ميكانيكية كمومية، تصف الحالة التي يكون فيها النظام الكوموي في حالته الأولية (جسيم - موجة)، وإذا تم رصده بشكل مستمر خلال فترات زمنية قصيرة، فإنه يبقى في حالته الأولية (حالة التراكب الكوموي)، وذلك لأن كل رصد يتسبب في انهيار الدالة الموجية، ويعود إلى حالة القيم الذاتية النقية لمؤثرات الرصد المستخدمة [32].

لفهم مفعول زينو الكوموي، نأخذ نظام كمومي في حالته الأولية $|\psi_0\rangle$ في اللحظة $t = 0$ ، في فضاء هيلبرت، وبالتالي يمكن وصف الحالة الكمومية باستخدام مؤثر هاملتون باستخدام قانوني السعة والاحتمال كما يلي [33]:

$$A(t) = \langle \psi_0 | \psi_t \rangle = \langle \psi_0 | e^{-i\hat{H}t} | \psi_0 \rangle \quad (9)$$

$$p(t) = |A(t)|^2 = |\langle \psi_0 | e^{-i\hat{H}t} | \psi_0 \rangle|^2 \quad (10)$$

فعند تراكب النظام الكوموي في حالتين يصبح مؤثر الهاملتون كما يلي:

$$H = \Omega \sigma_1$$

حيث Ω ثابت مستقل عن الزمن و σ_1 مصفوفة باولي الأولى.

يأخذ النظام الكوموي المتراكب من حالتين كوموميتين في فضاء هيلبرت باستخدام المعادلة العامة لهاملتون الشكل

الآتي [34]:

$$\hat{H} = \Omega(|+\rangle \langle -| + |-\rangle \langle +|) = \begin{pmatrix} 0 & \Omega \\ \Omega & 0 \end{pmatrix}$$

الهاملتون يحول الكيوبت من الحالة $|0\rangle$ إلى الحالة $|1\rangle$ ومن الحالة $|1\rangle$ إلى الحالة $|0\rangle$ كما يلي:

$$\hat{H}|0\rangle = \Omega|1\rangle \quad ; \quad \hat{H}|1\rangle = \Omega|0\rangle$$

ومع الأخذ بعين الاعتبار علاقة التطور الآتية:

$$e^{-i\hat{H}t} = \begin{pmatrix} \cos(\Omega t) & -i\sin(\Omega t) \\ -i\sin(\Omega t) & \cos(\Omega t) \end{pmatrix} \quad (11)$$

وباستبدال الحالة الأولية $|\psi_0\rangle = |+\rangle$ ، حيث $|+\rangle$ هي الحالة الذاتية الموجبة لمصفوفة باولي الثالثة Z، فإننا نحصل على قانوني السعة والاحتمال الآتين:

$$A(t) = \langle + | e^{-i\Omega t \sigma_1} | + \rangle = \cos(\Omega t) \quad (12)$$

$$p(t) = \cos^2(\Omega t) \quad (13)$$

توضح العلاقة (13) احتمال كشف الجسم الماص للفوتونات دون التفاعل معه، أي البقاء في الحالة |0) وبالتالي نحصل من علاقة قيمة الاحتمال الكلي الآتي:

$$p = \cos^2(\Omega t) = \frac{1}{2}(1 + \cos(2\Omega t)) \quad (14)$$

$$= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{(2\Omega t)^2}{2!} + \frac{(2\Omega t)^4}{4!} - \dots \right)$$

بإهمال المراتب العليا باعتبار أن قيمة t صغيرة جداً تؤول العلاقة (14) إلى الشكل:

$$p = \frac{1}{2} \left(2 - \frac{(2\Omega t)^2}{2} \right) = 1 - \Omega^2 t^2 \quad (15)$$

وإذا قسمنا الزمن t إلى عدة فترات زمنية n ، وقمنا بالقياس خلال هذه الفترات الزمنية نحصل على الاحتمال الآتي:

$$p = \left(1 - \Omega^2 \left(\frac{t}{n} \right)^2 \right)^n \quad (16)$$

وإذا أخذنا بعين الاعتبار أن قيمة $\frac{t}{n}$ صغيرة جداً مقارنة بالواحد، فيمكننا كتابة المعادلة (16) بالشكل الآتي:

$$p = 1 - \frac{\Omega^2 t^2}{n} \sim 1 - \left(\frac{t^2 \Omega^2}{2n^2} \right)^{2n} \sim e^{-\frac{t^2 \Omega^2}{n}} \quad (17)$$

توضح المعادلة (17) احتماليه الكشف عن وجود الجسم الماص للفوتونات دون التفاعل معه، الذي يزداد بازدياد عدد تكرارات القياس n ويمكن أن تصل قيمة الاحتمال الكلي إلى الواحد عندما $n \rightarrow \infty$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p = 1 \quad (18)$$

4- الدراسة التحليلية الرياضية لنمذجة مفعول زينو الكمومي

لتنفيذ الدراسة النظرية السابقة، نحن بحاجة إلى بوابة كمومية تحقق العلاقة (11)، ويمكن ذلك من خلال مؤثر الدوران R_x ، بدلالة المؤثرين R_z, R_y كما يلي [35]:

$$\begin{aligned} R_x(\theta) &= R_z\left(-\frac{\pi}{2}\right) R_y(\theta) R_z\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ &= \cos\frac{\theta}{2} I - i \sin\frac{\theta}{2} X \\ &= \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\pi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\frac{\theta}{2} & -\sin\frac{\theta}{2} \\ \sin\frac{\theta}{2} & \cos\frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\pi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\frac{\theta}{2} & -i \sin\frac{\theta}{2} \\ -i \sin\frac{\theta}{2} & \cos\frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

باختيار البارامترات $\theta = \frac{\pi}{2}$ ، حيث θ هي زاوية الدوران نحصل على المصفوفة الآتية:

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}\sqrt{2+\sqrt{2}} & -i\frac{1}{2}\sqrt{2-\sqrt{2}} \\ -i\frac{1}{2}\sqrt{2+\sqrt{2}} & \frac{1}{2}\sqrt{2+\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (20)$$

دراسة مفعول زينو الكمومي على الحاسوب الكمومي الذي توفره شركة IBM باستخدام كيوبتين، حيث نطبق بوابة $R_x(\theta)$ على الكيوبت الأول، مع بوابة $CNOT$ على الكيوبتين الأول والثاني المعرفة بالعلاقة (8)، وباختيار البارامتر $\theta = \frac{\pi}{2}$ ، حيث يمثل الكيوبت الأول الفوتون، والتراكب بين الكيوبت الأول والثاني هو الذي يحدد امكانيه الكشف عن الجسم الموضوع في مقياس التداخل دون التفاعل معه، ويمكن تحقيق ذلك من خلال الدراسة التحليلية الآتية.

انطلاقاً من المعادلة (19) بعد كتابتها بالشكل المثلثي على النحو الآتي:

$$R_x|0\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle - i\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle, R_x|1\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle - i\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle \quad (21)$$

باستخدام العلاقة (1) نكتب الآتي:

$$R_x|0\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad R_x|1\rangle = \beta|0\rangle + \alpha|1\rangle \quad (22)$$

حيث: $\beta = -i\sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \alpha = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$

باستخدام العلاقتين (21)، (22) يمكن الحصول نظرياً على نتيجة كشف الجسم الماص للفوتونات أي بقاء

الفوتون في الحالة $|0\rangle$:

$$|\psi_1\rangle = R_x|0\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (23)$$

بتطبيق بوابة $CONT$ على الحالة الأولية $|\psi_1\rangle$ نجد الآتي:

$$\begin{aligned} |\psi_2\rangle &= CONT(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \otimes |0\rangle = CONT(\alpha|00\rangle + \beta|10\rangle) = \alpha|00\rangle + \beta|11\rangle \\ &= \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)|00\rangle + \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)|11\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2}|00\rangle + \frac{\sqrt{2}}{2}|11\rangle \end{aligned} \quad (24)$$

من أجل الكيوبت الأول نطبق على الحالة $|\psi_1\rangle$ المؤثر $p_0 \otimes I$ ونحسب $\langle \psi_1 | p_0 \otimes I | \psi_1 \rangle$ ، وهذا يعني

أننا قمنا بتطبيق مؤثر الإسقاط على الحالة $|0\rangle$ فقط.

حساب $p_0 \otimes I | \psi_1 \rangle$:

$$p_0 \otimes I | \psi_1 \rangle = (|0\rangle\langle 0| \otimes I) \left(\frac{\sqrt{2}}{2}|00\rangle + \frac{\sqrt{2}}{2}|11\rangle \right) = \frac{\sqrt{2}}{2}|00\rangle$$

حساب $\langle \psi_1 | p_0 \otimes I | \psi_1 \rangle$

$$\langle \psi_1 | p_0 \otimes I | \psi_1 \rangle = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\langle 00| + \frac{\sqrt{2}}{2}\langle 11| \right) \left(\frac{\sqrt{2}}{2}|00\rangle \right) = \frac{2}{4} = \frac{1}{2} = 0.50$$

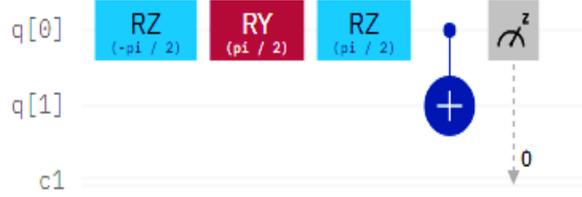
لتعميم هذه الدراسة من أجل كيوبتين يمكن حساب القيمة الاحتمالية نظرياً من خلال العلاقة الآتية:

$$p_{2_qubit} = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (25)$$

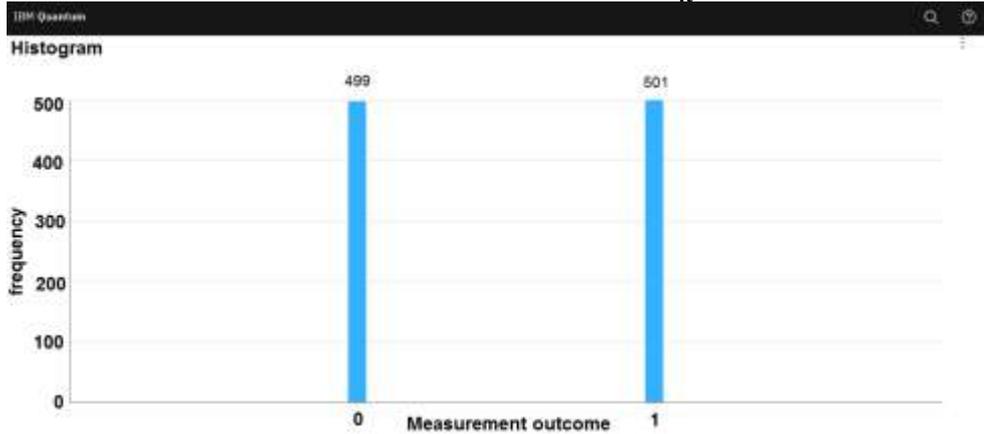
لتنفيذ الصياغة النظرية السابقة على الحاسوب الكمومي الذي توفره شركة IBM، سنقوم بمحاكاة حاسوبية من

خلال تصميم وتنفيذ دارة كمومية تحاكي مفعول زينو الكمومي، حيث يوضح السلك الكمومي الأول العمليات الفيزيائية

التي يخضع لها الكيوبت الأول الذي يمثل الفوتون، ونطبق بوابة $R_x(\theta)$ على الكيوبت الأول وبوابة $CNOT$ (المعرفة بالعلاقة 8) على الكيوبتين الأول والثاني، ثم نضع بوابة القياس على الكيوبت الأول وتعد بوابة القياس المؤشر الرئيسي لوجود أو عدم وجود الجسم الماص للفوتونات كما هو موضح بالشكل (7)، وتم حذف بوابات المرايا لأن هذه البوابات تستخدم لتوجيه الحالات الكمومية وتفاعلها مع بعضها البعض، وتم استخدام بوابات الدوران بدلاً من بوابة هادامارد للحصول على نتائج أكثر دقة وتظهر النتائج على الحاسب الكمومي، كما هو موضح بالشكل (8).



الشكل (7): يوضح الدارة الكمومية للبوابة $R_x(\frac{\pi}{2}) = R_z(-\frac{\pi}{2}) R_y(\frac{\pi}{2}) R_z(\frac{\pi}{2})$ من أجل البارامترات، $n = 2$ ، $\theta = \frac{\pi}{n}$ ، حيث يتم القياس على الكيوبت q_0 فقط.



الشكل (8) يوضح نتائج القياس على الكيوبت الأول q_0 باستخدام الحاسب الكمومي `ibm_nairobi`، والذي يعطي احتمال 0.499 للحالة $|0\rangle$ ، و 0.501 للحالة $|1\rangle$.

في الخطوة التالية باستخدام ثلاثة كيوبتات، نطبق على الكيوبت الأول q_0 بوابتين أي من النوع $R_x(\theta)$ أي، ونضيف بعد كل منها بوابة $CNOT$ ، ونختار البارامتر $\theta = \frac{\pi}{2n}$ حيث يدل الرقم 2 أنه سنستخدم بوابتين،

$n = 2$ فنحسب القيمة النظرية للاحتمال الكلي بتطبيق المؤثر $R_x(\theta)$ على العلاقة (24)، كما يلي:

$$\begin{aligned} |\psi_3\rangle &= R_x(\alpha|00\rangle + \beta|11\rangle) = \alpha(R_x|0\rangle) \otimes |0\rangle + \beta(R_x|1\rangle) \otimes |1\rangle \\ &= \alpha(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \otimes |0\rangle + \beta(\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) \otimes |1\rangle \\ &= \alpha^2|00\rangle + \alpha\beta|10\rangle + \alpha\beta|11\rangle + \beta^2|01\rangle \end{aligned}$$

بتطبيق بوابة $CNOT$ (المعرفة بالعلاقة 8) على $|\psi_3\rangle$ نجد الآتي:

$$\begin{aligned} |\psi_4\rangle &= CNOT(|\psi_3\rangle \otimes |0\rangle) \\ &= CNOT(\alpha^2|000\rangle + \alpha\beta|100\rangle + \alpha\beta|110\rangle + \beta^2|010\rangle) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \alpha^2 |000\rangle + \alpha\beta |101\rangle + \alpha\beta |111\rangle \\
 &\quad + \beta^2 |010\rangle \tag{26} \\
 &= \cos^2\left(\frac{\pi}{8}\right) |000\rangle + \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) |101\rangle + \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) |111\rangle + \sin^2\left(\frac{\pi}{8}\right) |010\rangle
 \end{aligned}$$

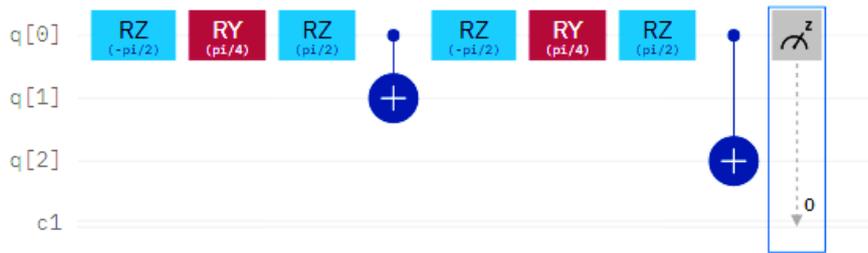
بتطبيق المؤثر $p_0 \otimes I$ على الحالة $|\psi_4\rangle$ وبتطبيق مؤثر الإسقاط $I|\psi_1\rangle \otimes p_0$ على الحالة $|0\rangle$ ،
 نحصل على القيمة الاحتمالية الآتية:

$$p = \left(\frac{2 + \sqrt{2}}{4}\right)^2 + \left(\frac{2 - \sqrt{2}}{4}\right)^2 = \frac{3}{4} = 0.75$$

لتعميم هذه النتيجة، تحسب القيمة الاحتمالية نظرياً من أجل 3_qubit، من العلاقة الآتية:

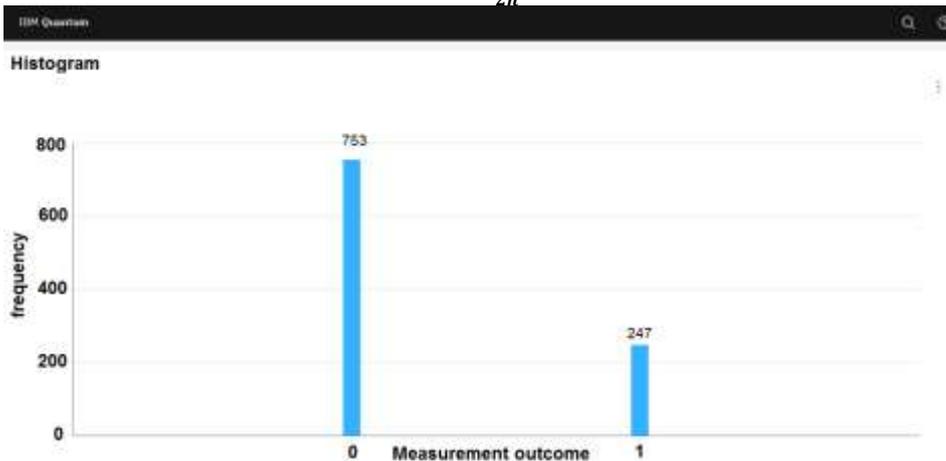
$$p_{3_qubit} = \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^4 + \left(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^4 \tag{27}$$

لتحقيق هذه القيمة النظرية على الحاسوب الكمومي، نطبق على السلك الكمومي الخاص بالكيوبت الأول (الفوتون)، البوابة $R_x\left(\frac{\pi}{4}\right)$ بدلالة البوابات $R_z\left(\frac{\pi}{2}\right) R_y\left(\frac{\pi}{4}\right) R_z\left(-\frac{\pi}{2}\right)$ ، ثم نطبق بوابة $CNOT$ بين الكيوبت الأول والثاني، ثم نكرر البوابات السابقة على الكيوبت الأول ونضع بوابة $CNOT$ ، بين الكيوبت الأول والثالث وفي النهاية نضع مؤثر القياس على q_0 كما هو موضح بالشكل (9)، وتظهر النتائج في الشكل (10).



الشكل (9): يوضح الدارة الكمومية لبوابتين من $R_x(\theta)$ ، يتخللها بوابتي $CNOT$ ومؤثر القياس على q_0 من أجل البارامترات $n = 2$ ،

$$\theta = \frac{\pi}{2n}$$



الشكل (10) يوضح نتائج القياس على الكيوبت الأول q_0 باستخدام الحاسوب الكمومي `ibm_nairobi`، والذي يعطي قيمة احتمالية 0.753 للحالة $|0\rangle$ ، و 0.247 للحالة $|1\rangle$.

من الواضح أنه عند زيادة تكرارات القياس n ، تزداد احتماليه الكشف عن وجود الجسم دون التفاعل معه، وعند استخدام دائرة كمومية مؤلفة من أربعة كيوبتات، مع الأخذ بعين الاعتبار $n = 4$ ، وباستخدام البارامتر $\theta = \frac{\pi}{4n}$ ، يمكن زيادة احتمال كشف الجسم دون التفاعل معه، ويظهر الحساب الآتي القيمة النظرية بتطبيق المؤثر $R_x(\theta)$ ، على المعادلة (26) حيث نجد الآتي:

$$\begin{aligned} |\psi_5\rangle &= R_x(\alpha^2|000\rangle + \alpha\beta|101\rangle + \alpha\beta|111\rangle + \beta^2|010\rangle) \\ &= \alpha^2(R_x|0\rangle \otimes |00\rangle) + \alpha\beta(R_x|1\rangle) \otimes |01\rangle + \alpha\beta(R_x|1\rangle) \otimes |11\rangle + \beta^2(R_x|0\rangle) \otimes |10\rangle \end{aligned}$$

بتطبيق بوابة $CNOT$ نحصل على:

$$\begin{aligned} |\psi_5\rangle &= \alpha^3|0000\rangle + \beta^2\alpha|1001\rangle + \alpha^2\beta|1011\rangle + \beta^2\alpha|0010\rangle + \alpha^2\beta|1111\rangle + \beta^2\alpha|0110\rangle \\ &\quad + \beta^2\alpha|0100\rangle + \beta^3|1101\rangle \end{aligned}$$

بتكرار الخطوات السابقة ويحذف الحدود المعدومة نحصل على الآتي:

$$\begin{aligned} |\psi_6\rangle &= \alpha^4|00000\rangle + \alpha\beta^3|00010\rangle + \beta^2\alpha^2|00110\rangle + \beta^2\alpha^2|00100\rangle \\ &\quad + \beta^2\alpha^2|01110\rangle + \beta^2\alpha^2|01100\rangle + \beta^2\alpha^2|01000\rangle + \beta^4|01010\rangle \end{aligned} \quad (28)$$

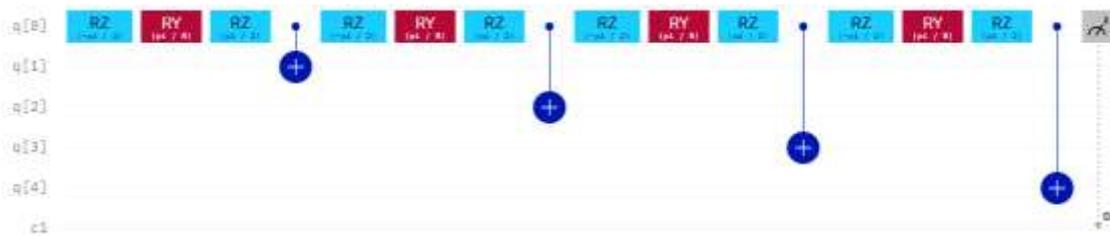
وبتطبيق المؤثر $I \otimes p_0$ ومؤثر الإسقاط على الحالة $|\psi_6\rangle$ نحصل على القيمة الاحتمالية الآتية:

$$p = (0.980)^8 + 5(0.980)^4(0.195)^4 + (0.980)^2(0.195)^6 + (0.195)^8 = 0.862$$

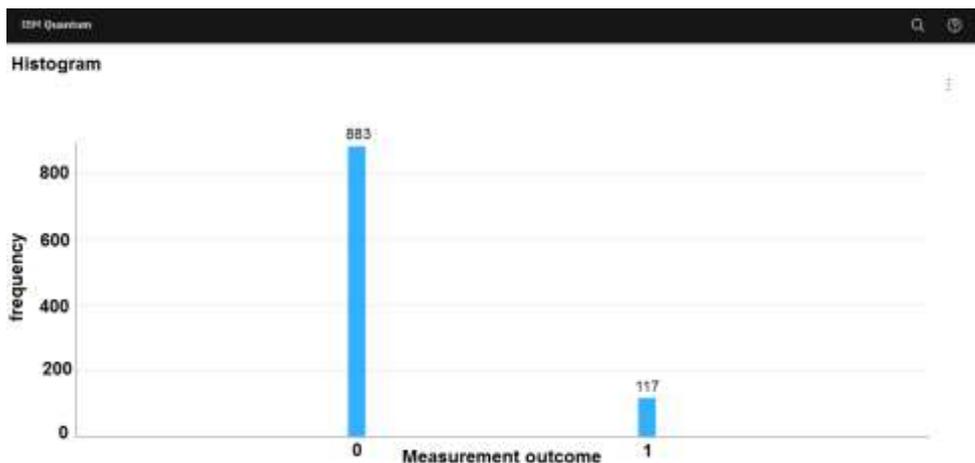
تعمم هذه النتيجة من أجل حساب القيمة النظرية من أجل 5_qubit ، من خلال العلاقة الآتية:

$$\begin{aligned} p_{5_qubit} &= \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^8 + 5\left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^4\left(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^4 + \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2\left(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^6 \\ &\quad + \left(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^8 \end{aligned} \quad (29)$$

لتحقيق هذه القيمة الاحتمالية على الحاسوب الكمي، نستخدم أربعة بوابات $R_x\left(\frac{\pi}{8}\right)$ بدلالة البوابة $R_z\left(-\frac{\pi}{2}\right)R_y\left(\frac{\pi}{8}\right)R_z\left(\frac{\pi}{2}\right)$ ، ونطبق بين البوابات السابقة أربعة بوابات $CNOT$ ، بالتتابع على أربعة كيوبتات، ونطبق بوابة القياس على الكيوبت الأول كما في الشكل (11)، وتظهر النتائج كما هو موضح في الشكل (12).



الشكل (11): يوضح الدارة الكمومية لأربعة بوابات من $R_x\left(\frac{\pi}{8}\right)$ ، يتخللها أربعة بوابات $CNOT$ من أجل البارامترات، $n = 2$ ، $\theta = \frac{\pi}{4n}$.



الشكل (12): يوضح نتائج القياس على الكيوبت الأول q_0 باستخدام الحاسب الكومبي *ibm_nairobi*، والذي يعطي قيمة احتمالية 0.883 للحالة $|0\rangle$ ، و 0.117 للحالة $|1\rangle$.

ومن أجل الحصول على أعلى قيمة احتمالية لكشف الجسم دون التفاعل معه على الحاسوب الكومبي، نطبق على كيوبتين البارامترات التالية $n = 2, 3, \dots, 14$ ، و $\theta = \frac{\pi}{n}$ ، وكذلك نطبق على ثلاثة كيوبتات البارامترات الآتية:

$$\theta = \frac{\pi}{2n}, \quad n = 2, 3, \dots, 14$$

أخيرا من أجل خمسة كيوبتات $n = 2, 3, \dots, 14$ ، فتظهر النتائج الاحتمالية كما هو موضح بالشكل (13).

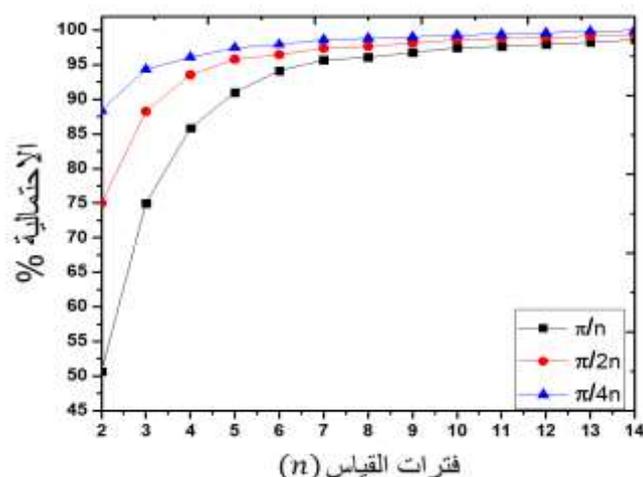
ولتعميم النتائج السابقة على n كيوبت نطبق على دائرة كمومية مؤلفة من 11 qubit، البارامترات الآتية:

$$\theta = \frac{\pi}{4n}, \quad n = 2, 3, \dots, 14$$

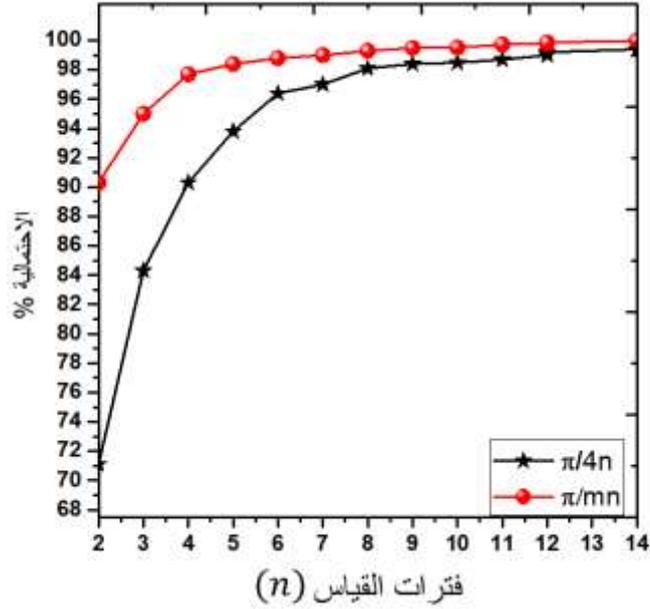
ثم نطبق البارامترات الآتية: $n = 2, 3, \dots, 14$ ، $\theta = \frac{\pi}{mn}$ ، حيث m عدد البوابات المستخدمة، كما هو

موضح بالشكل (14).

حيث تم استخدام المحاكى الكومبي *ibmq_qasm_simulator* للحصول على النتائج الموجودة في الشكل (14)



الشكل (13): يوضح تطبيق مفعول زينو الكومبي على الجسم الماص للفوتونات باستخدام المحاكى الكومبي *ibmq_qasm_simulator*.



الشكل (14): يوضح تطبيق مفعول زينو الكمومي على الاختبار باستخدام 11_qubit باستخدام المحاكى الكمومي .ibmq_qasm_simulator

قمنا بمقارنة نتائج استخدام عدة حواسيب كمومية مختلفة، ووجدنا أن هناك اختلاف في النتائج التي تم الحصول عليها، حيث تم استخدام نفس البيانات والخوارزميات على نفس الحواسيب، ولكن كان هناك اختلافات في مستوى الدقة وسرعة الحسابات بين الحواسيب كما هو موضح بالجدول (1)، وبناءً على هذه المقارنة تمكنا من اختيار الحاسوب الكمومي الأكثر دقة وكفاءة لحل المشكلة التي نعمل عليها.

اسم الحاسب الكمومي	عدد الكيوبتات	نوع المعالج واصدازه	مفعول زينو الكمومي على 2_qubit		مفعول زينو الكمومي على 3_qubit		مفعول زينو الكمومي على 4_qubit	
			0 >	1 >	0 >	1 >	0 >	1 >
lbn_nairobi	7	Falcon r5.11H 1.2.6	501	499	753	247	883	117
lbnq_jakarta	7	Falcon r5.11H 1.2.7	519	481	744	256	815	185
lbn_lagos	7	Falcon r5.11H 1.2.5	485	515	727	273	818	182
lbn_perth	7	Falcon r5.11H 1.1.43	499	501	602	398	785	215

الجدول (1) : يوضح مقارنة لمفعول زينو الكمومي باستخدام عدة حواسيب كمومية حقيقية تابعة لشركة IBM.

5- النتائج والمناقشة

عند تطبيق مفعول زينو الكمومي على 2_qubit ، نحصل على قيمة احتمالية بلغت 98.6% من أجل $\theta = \frac{\pi}{n}$

و $n = 14$ ، وعند استخدام 3_qubit ، تزداد القيمة الاحتمالية عندما $n = 14$ إلى 99.3%، ومن أجل 5_qubit نحصل على القيمة الاحتمالية 99.7%، من أجل $n = 14$ ، $\theta = \frac{\pi}{2n}$ فنستنتج أنه تزداد القيمة الاحتمالية لكشف الجسم دون التفاعل معه بازدياد تكرارات القياس n كما هو موضح بالشكل (13).

عند تطبيق مفعول زينو الكمومي على 11_qubit ، نحصل على قيمة احتمالية 71.1% من أجل $\theta = \frac{\pi}{4n}$ ، $n = 2$ وعند تطبيق البارامترات $\theta = \frac{\pi}{mn}$ ، $n = 2$ نحصل على القيمة 90.3% وتزداد القيمة الاحتمالية لنحصل على 99.991% من أجل $\theta = \frac{\pi}{10n}$ ، $n = 14$ كما هو موضح بالشكل (14).

نستنتج أنه من أجل n_qubit ، تزداد القيمة الاحتمالية لمفعول زينو الكمومي بازدياد تكرارات القياس التي تتناسب طردياً مع عدد البوابات وتحسب من العلاقة $m = n_qubit - 1$ ، أي لزيادة القيمة الاحتمالية يجب زيادة تكرارات القياس بشكل يتناسب طردياً مع عدد البوابات.

8- الاستنتاجات والتوصيات

1- في تجربة ماخ-زيندر مع الجسم الماص للفوتونات نحصل على أربع قيم احتمالية كما هو موضح بالشكل (6)، القيمة الأولى 0.269 للحالة $|00\rangle$ وهي تعني أنه لا يوجد جسم ماص للفوتونات أو أن الحساس معطل، والقيمتين الثانية والثالثة 0.224، 0.258 للحالتين $|01\rangle$ و $|11\rangle$ تعني أن الجسم امتص الفوتون وتفاعل معه، والقيمة 0.249 للحالة $|10\rangle$ تعني أن الجسم الماص أنه موجود وتم اكتشافه من دون التفاعل معه، والسبب في الحصول على أربع قيم احتمالية هو وضع بوابتي قياس على الكيوبتين المستخدمين.

2- تبين لنا من العلاقة (13) قيمة الاحتمال الكلي لمفعول زينو الكمومي عند وضع الجسم الماص للفوتونات، حيث تم استخدام الشكل المثلثي للعلاقة (19) وتعويضها في العلاقة (1)، لحساب قيمة الاحتمال عند زيادة تكرارات القياس، وذلك لأن العلاقة (17) بأشكالها الثلاثة لا تعطي القيمة النظرية الصحيحة لمفعول زينو الكمومي وهي صحيحة فقط عندما $n \rightarrow \infty$.

3- يتضح من سياق البحث أنه عند ازدياد عدد الكيوبتات n_qubit ، تزداد الحدود الاحتمالية لحساب القيمة النظرية كما في العلاقات (25)، (27)، (29)، ويمكن تعميم زيادة هذه الحدود بالشكل الآتي: $\frac{2^{n-1}}{2}$.

4- نستنتج أيضاً عند زيادة تكرارات القياس عند تطبيق مفعول زينو الكمومي على الجسم الماص للفوتونات عندما $n = 2, \dots, 14$ ، و $\theta = \frac{\pi}{n}$ هي زاوية الدوران و n تكرارات القياس) تزداد القيمة الاحتمالية كما هو موضح بالشكل (13)، وتتفق هذه النتيجة مع نتيجة Subhashish Barik عند تطبيق مفعول زينو الكمومي على نظام كمومي ذو مستويين rabi_driven كما في الشكل (1) في المرجع [3]، ويمكن تفسير ذلك من الناحية النظرية أنه إذا كانت تكرارات القياس سريعة بما فيه الكفاية، فيجب أن تتوقف الدالة الموجية عن التطور (تجميد الدالة الموجية في الحالة الأولية)، أي كلما زادت تكرارات القياس يبقى الفوتون في الحالة $|0\rangle$ ، وأيضاً أنه لا يمكن أبداً إجراء قياس دون التفاعل مع النظام الكمومي، فإذا كان القياس دقيقاً بدرجة كافية، فقد نحصل على المعلومات عن النظام الكمومي دون انهيار الدالة الموجية.

5_ قمنا بمقارنة نتائج عدة حواسيب كمومية (الجدول 1) ووجدنا أن هناك اختلاف في النتائج التي حصلنا عليها من أجل أربعة كيوبتات كما في الحواسيب lbm_perth و lbm_lagos و lbmq_jakarta بينما حقق الحاسب الكمومي lbn_nairobi أدق نتيجة، لذلك نوصي بشدة استخدام الحاسب lbn_nairobi في حل المشكلات الكمومية.

6- أعطى الحاسب الكمومي lbn_nairobi، عند تطبيقه على كيوبت واحد كما في مقياس التداخل ماخ-زيندر الشكل (3)، وكذلك عند تطبيقه على كيوبتين وثلاثة كيوبتات كما في الأشكال (6) و (8) و (10) نتائج قريبة من القيمة النظرية، ولكن عند تطبيقه على أربعة كيوبتات اختلفت النتيجة النظرية عن القيمة الناتجة بمقدار 2.1، وهي قيمة مقبولة لأن القيمة المتوسطة للخطأ على الحاسب الكمومي lbn_nairobi، هي 7.514. [36].

المراجع العلمية:

- [1] B Misra and E C G Sudarshan, "The Zeno's paradox in quantum theory", Journal of Mathematical, Physics, 1977.
- [2] Itano, W, Heinzen, D., Bollinger J., and Wineland, D. "Quantum Zeno effect". Physical Review A, 1 March 1990.
- [3] Paul Kwiat, Harald Weinfurter, Thomas Herzog, Anton Zeilinger, Mark Kasevich, "Experimental Realization of Interaction-free Measurements" Fundamental Problems in Quantum Theory April 1995, <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1995.tb38981>.
- [4] J. Audretsch, M. B. Mensky, A. D. Panov, "Zeno effect preventing Rabi transitions onto an unstable energy level", Phys. Lett. <https://doi.org/10.48550/arXiv.quant-ph/9906068>
- [5] Kazuki Koshino, Akira Shimizu, "Quantum Zeno effect by general measurements", Physics Reports, , June 2005, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.03.001>.
- [6] Paolo Facchi, Giuseppe Marmo, Saverio Pascazio, "Quantum Zeno dynamics and quantum Zeno Subspaces", Journal of Physics: Conference Series 196 (2009).
- [7] Asao Arai and Toru Fuda, "Some Mathematical Aspects of Quantum Zeno Effect", Lett Math Phys (2012).
- [8] Wayne Itano, "The Quantum Zeno Paradox, 42 Years On", January 2019, https://www.researchgate.net/publication/330837091The_Quantum_Zeno_Parado.
- [9] Raghuram C. Kamath, "Zeno Effect: Current Research and Future Applications", Electrical Engineering, University of Southern California, Los Angeles, 2010.
- [10] Paul Kwiat, Harald Weinfurter, Thomas Herzog, Anton Zeilinger, and Mark A. Kasevi, "Interaction-Free Measurement", PHYSICAL REVIEW. LETTERS. 12 JUNE 1995.
- [11] Alan J. DeWeerd, "Interaction-free measurement", American Association of Physics Teachers, Am. J. Phys. 70 ~31, March 2002, DOI: 10.1119/1.1445406.
- [12] M. Renninger, "Interaction-free Measurements", AIP Conference Proceedings, (2007); <https://doi.org/10.1063/1.2827343>

- [13] M. A. B. Whitaker, “*Interaction-free measurements and the quantum Zeno effect*”, Physics Letter A 244, 1998, 502-506.
- [14] Eva Kilian, “*The quantum Zeno effect and Interaction-free measurements*”, Bachelor thesis, University of Vienna, 2014.
- [15] Hatim Salih, Zheng-Hong Li, M. Al-Amri, and M. Suhail Zubairy, “*Protocol for Direct Counterfactual Quantum Communication*”, Phys. Rev. Lett. 110, 170502 – Published 23 April 2013
- [16] Q Guo, LY Cheng, L Chen, HF Wang, S Zhang, “*Counterfactual quantum-information transfer without transmitting any physical particles*”, Scientific, 2015.
- [17] Yuan Cao^{a,b}, Yu-Huai Lia^b, Zhu Caoc, Juan Yina^b, Yu-Ao Chena^b, Hua-Lei Yina^b, Teng-Yun Chena^b, , “*Direct counterfactual communication via quantum Zeno effect*”, 2017.
- [18] Zheng-Hong Li, Shang-Yue Feng, M. Al-Amri, and M. Suhail Zubairy, “*Direct counterfactual quantum-communication protocol beyond a single-photon source*”, September 2022., <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.03935>
- [19] Ankit Raj, Barnali Das, Bikash K. Behera and Prasanta K. Panigrahi, “*Demonstration of Bomb Detection Using the IBM Quantum Computer*”, 2019 <https://europepmc.org/article/ppr/ppr72162>.
- [20] Subhashish Barik, Dhiman Kumar Kalita, Bikash K. Behera, Prasanta K. Panigrahi, “*Demonstrating Quantum Zeno Effect on IBM Quantum Experience*”, 2020.
- [21] Hiu Yung Wong, “*Introduction to Quantum Computing*”, Springer, 2022.
- [22] Hassi Norlén, “*Quantum Computing in Practice with Qiskit® and IBM Quantum Experience*”, Packt Publishing 2020
- [23] James L. Weaver and Frank J. Harkins, “*Qiskit Pocket Guide: Quantum Development with Qiskit*”, O’Reilly, 2022.
- [24] <https://qiskit.org>: Qiskit is an open-source SDK for working with quantum computers at the level of pulses, circuits, and application module, April. 2022.
- [25] <https://quantum-computing.ibm.com>, accessed April. 2022.
- [26] J. Alberto Casas and Bryan Zaldiva, “*Interaction-free measurements and counterfactual computation in IBM quantum computer*”, Quant. Inf. Proc. 20 (2021).
- [27] RAJ, Ankit, et al. *Demonstration of bomb detection using the IBM quantum computer*. 2019
- [28] Hénault, F. (2015, September). *Quantum physics and the beam splitter mystery. In The Nature of Light: What are Photons*
- [29] Sjöqvist, Erik, et al. "Geometric phases for mixed states in interferometry." Physical Review Letters 85.14 (2000).
- [30] CHRYSO STHAMOS, Diego SS; BASSO, Marcos LW. *Quantum coherence versus interferometric visibility in a generalized Mach-Zehnder interferometer* 2022.
- [31] VEDRAL, Vlatko. *Introduction to quantum information science*. Oxford University Press on Demand, 2006.
- [32] Itano, Wayne M. "Perspectives on the quantum Zeno paradox." Journal of Physics: Conference Series. Vol. 196. No. 1. IOP Publishing, 2009.
- [33] Facchi, Paolo, and Saverino Pascazio. "Quantum Zeno dynamics: mathematical and physical aspects." Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical (2008).
- [34] Pascazio, Saverio. "All you ever wanted to know about the quantum Zeno effect in 70 minutes." Open Systems & Information Dynamics (2014).

[35] Maslov, Dmitri. "*Basic circuit compilation techniques for an ion-trap quantum machine.*" *New Journal of Physics* 19.2 (2017): 023035.

[36] Scott Johnstuna and Jean-Francois Van Huele, "*Understanding and compensating for noise on IBM quantum computers*", October 2021.