

# DISEÑO DE UNA ACTIVIDAD COLABORATIVA PARA MEJORAR EL APRENDIZAJE CONCEPTUAL EN MECÁNICA CUÁNTICA NO RELATIVISTA.



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

MATÍAS PATRICIO ORTEGA PEÑA

PROFESOR GUÍA: DR. HUGO RAÚL ALARCÓN OPAZO

TESINA PARA OPTAR AL GRADO DE  
LICENCIADO EN FÍSICA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA VALPARAÍSO - CHILE

DICIEMBRE - 2024



Dedico esta tesis a mi madre, quien siempre ha creído en mí incondicionalmente y ha estado a mi lado en cada paso del camino.

*“Haz de tu vida un sueño, y de tu sueño una realidad.” ’*

*Antoine de Saint-Exupéry.*

# AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a mi madre, quien ha sido el pilar fundamental en mi vida. Su atención constante, su preocupación desinteresada y su amor incondicional han sido la base que me ha sostenido y motivado a lo largo de este camino.

También deseo agradecer a mi familia y a mis amigos, en especial a Carlos Bermúdez, por su invaluable apoyo durante la elaboración de esta tesis. Sus ideas brillantes y aportes clave fueron fundamentales para dar forma a este trabajo de manera sólida y contundente.

Asimismo, extiendo mi gratitud al Dr. Hugo Alarcón, mi profesor guía, por su paciencia, amabilidad y disposición para enseñarme, guiándome siempre con generosidad y compromiso en este proceso académico.

# RESUMEN

La mecánica cuántica es una asignatura fundamental para los estudiantes de Licenciatura en Física, Astrofísica e Ingeniería Civil Física en la Universidad Técnica Federico Santa María. Su comprensión es clave para el desarrollo tecnológico actual, con aplicaciones en áreas como la computación y la criptografía cuántica. Sin embargo, los estudiantes enfrentan dificultades persistentes en conceptos esenciales, incluso tras recibir instrucción formal, lo que destaca la necesidad de herramientas pedagógicas innovadoras.

En esta tesina se analizó el impacto del tutorial interactivo Quantum Interactive Learning Tutorial (QuILT), centrado en el experimento de Stern-Gerlach, diseñado para mejorar la comprensión conceptual de los estudiantes. Este experimento aborda temas cruciales tales como los cambios de base en estados de spin y el comportamiento de los haces de átomos de plata al interactuar con campos magnéticos no homogéneos.

Inicialmente, se aplicó el cuestionario Quantum Mechanics Survey (QMS) para diagnosticar errores conceptuales comunes en estudiantes que ya habían cursado Física Cuántica I. Los resultados revelaron una comprensión insuficiente en conceptos fundamentales relacionados con el experimento de Stern-Gerlach.

El QuILT fue implementado en la generación siguiente de estudiantes con el objetivo de corregir estas dificultades. Esta estrategia promovió el aprendizaje activo y colaborativo, permitiendo que los estudiantes trabajaran en equipo para resolver problemas específicos y para validar sus predicciones mediante simulaciones interactivas. Los resultados obtenidos mostraron una mejora en el razonamiento y en la habilidad para resolver problemas cuánticos, en comparación con generaciones anteriores que no utilizaron el tutorial.

Estos hallazgos sugieren una eficacia del QuILT como herramienta didáctica en la enseñanza de la mecánica cuántica, abriendo la puerta a futuras investigaciones que exploren la aplicación de este enfoque en otros contenidos fundamentales. Además, se plantea la necesidad de realizar estudios longitudinales para evaluar la retención y evolución de los conocimientos adquiridos en cursos avanzados.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>ii</b>
<b>Resumen</b>	<b>iii</b>
<b>Índice general e Índice de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto académico de los estudiantes de Mecánica Cuántica . . . . .	1
1.2. Experimento de Stern-Gerlach . . . . .	4
1.3. Dificultades del aprendizaje en la Mecánica Cuántica . . . . .	8
1.4. Aprendizaje Activo en Física: Tutoriales . . . . .	10
<b>2. Metodología</b>	<b>14</b>
2.1. Evaluación Diagnóstica Inicial . . . . .	14
2.2. Aplicación del Tutorial . . . . .	15
2.3. Evaluación del Impacto . . . . .	17
<b>3. Resultados y Análisis</b>	<b>18</b>
3.1. Análisis del Cuestionario QMS: Errores Comunes y Hallazgos Iniciales .	18
3.1.1. Análisis Pregunta 4 . . . . .	19
3.1.2. Análisis Pregunta 5 . . . . .	21
3.2. Análisis de los Errores Principales en la Pre-prueba . . . . .	25
3.3. Análisis de la Evaluación Final . . . . .	27
3.3.1. Análisis Pregunta 1 . . . . .	29
3.3.2. Análisis Pregunta 2 . . . . .	30
3.3.3. Análisis Pregunta 3 . . . . .	31
3.3.4. Análisis Pregunta 4 . . . . .	32
3.3.5. Análisis Pregunta 5 . . . . .	33

3.4. Comparativa entre los estudiantes que participaron en el tutorial y aquellos que no lo hicieron . . . . .	34
3.4.1. Análisis Pregunta 1 . . . . .	37
3.4.2. Análisis Pregunta 2 . . . . .	37
3.4.3. Análisis Pregunta 3 . . . . .	37
3.4.4. Análisis Pregunta 4 . . . . .	37
3.4.5. Análisis Pregunta 5 . . . . .	38
<b>4. Conclusiones</b>	<b>39</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>41</b>
<b>Anexo A: Cuestionario QMS en Español</b>	<b>44</b>
<b>Anexo B: Pre-prueba en Español</b>	<b>49</b>
<b>Anexo C: Tutorial en Español</b>	<b>52</b>
<b>Anexo D: Evaluación Final</b>	<b>66</b>

# Índice de figuras

1.1. Diseño del Experimento de Stern-Gerlach para medir la componente del spin de un haz de partículas neutras a lo largo del eje $z$ . La sección transversal del imán a la derecha muestra el campo magnético no homogéneo utilizado en el experimento. . . . .	5
1.2. Bandas reales del experimento de Stern-Gerlach. . . . .	6
2.1. Esquema temporal de la aplicación del tutorial Stern-Gerlach. . . . .	15
2.2. Simulación SternGerlach.jar. . . . .	16
3.1. Gráfico Cuestionario QMS. . . . .	18
3.2. Gráfico De Barras Cuestionario QMS. . . . .	19
3.3. Respuesta de un estudiante a la Pregunta 4. . . . .	20
3.4. Respuesta de otro estudiante a la Pregunta 4. . . . .	21
3.5. Respuesta de un estudiante a la Pregunta 5.a). . . . .	22
3.6. Respuesta de otro estudiante a la Pregunta 5.a). . . . .	22
3.7. Respuesta de un estudiante a la Pregunta 5.b). . . . .	23
3.8. Respuesta de otro estudiante a la Pregunta 5.b). . . . .	24
3.9. Gráfico Pre-Prueba. . . . .	25
3.10. Gráfico De Barras Pre-prueba. . . . .	26
3.11. Gráfico Evaluación Final. . . . .	28
3.12. Gráfico De Barras Evaluación Final. . . . .	29
3.13. Gráfico Evaluación Final Grupo P. . . . .	34
3.14. Gráfico De Barras Grupo P. . . . .	35
3.15. Gráfico Evaluación Final Grupo NP. . . . .	35
3.16. Gráfico De Barras Grupo NP. . . . .	36
3.17. Gráfico De Barras Respuestas Correctas Grupo P vs Grupo NP. . . . .	36

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto académico de los estudiantes de Mecánica Cuántica

En la Universidad Técnica Federico Santa María, la Mecánica Cuántica es una asignatura central en las carreras de Licenciatura en Física, Licenciatura en Astrofísica e Ingeniería Civil Física. Dentro de estas carreras, los estudiantes reciben instrucción formal de esta disciplina en las asignaturas Física Cuántica I y Física Cuántica II. La comprensión de la Mecánica Cuántica es relevante para el desarrollo académico de los estudiantes de estas carreras tanto desde el punto de vista teórico y experimental, como también de las aplicaciones tecnológicas.

Para los investigadores científicos, dominar los conceptos de la Mecánica Cuántica es esencial para avanzar en el entendimiento de fenómenos naturales complejos y desarrollar nuevas teorías. En el ámbito de la ingeniería, disciplinas como la computación cuántica, la criptografía cuántica y el diseño de materiales avanzados dependen de los principios cuánticos, lo que resalta el impacto de este campo en desarrollos tecnológicos y científicos.

En este contexto, diversos estudios destacan la importancia de la Mecánica Cuántica. Por ejemplo, Chinthapatla [1] argumenta que la integración de principios cuánticos en la arquitectura de software está transformando la manera en que se diseñan e implementan sistemas informáticos. Asimismo, Sonko et al. [2] abordan cómo la Mecánica Cuántica está revolucionando la ciberseguridad mediante el desarrollo de la criptografía cuántica, una tecnología que promete redefinir los estándares de seguridad de datos y cifrados a nivel global.

Por tanto, adquirir una comprensión sólida de la Mecánica Cuántica resulta relevante para los profesionales interesados en contribuir al desarrollo en estas áreas. Debido a lo abstracto de la disciplina, enseñar Mecánica Cuántica plantea desafíos significativos. Conceptos como el spin, las mediciones cuánticas, los cambios de base, entre otros, suelen ser especialmente difíciles de comprender para los estudiantes.

Existen diversas formas de enseñar la Mecánica Cuántica, cada una con enfoques pedagógicos diferentes que buscan facilitar la comprensión de sus complejos principios. Algunos textos, como *Introduction to Quantum Mechanics* de David J. Griffiths [3] o *Quantum Mechanics: Concepts and Applications* de Nouredine Zettili [4], adoptan un enfoque histórico. Estos comienzan con el desarrollo de la teoría desde sus orígenes y, posteriormente, introducen las herramientas matemáticas necesarias para abordar los postulados fundamentales de la Mecánica Cuántica. Otros libros, como *Modern Quantum Mechanics* de J.J. Sakurai y Jim Napolitano [5] o *Quantum Mechanics* de David H. McIntyre [6], prefieren comenzar directamente con los experimentos clave, destacando el experimento de Stern-Gerlach como uno de los más importantes.

Este experimento tiene un papel importante en la enseñanza de la Mecánica Cuántica, ya que proporciona a los estudiantes una comprensión más directa y tangible del concepto de spin, una propiedad fundamental de las partículas elementales, y que es imprescindible en la modelación de numerosos fenómenos cuánticos. Además, el experimento ilustra de manera clara la diferencia entre las mediciones cuánticas y las clásicas, mostrando que algunas propiedades de las partículas no están definidas hasta que se llevan a cabo mediciones. Este hallazgo inicial abre la puerta a la reflexión sobre conceptos más avanzados, como el entrelazamiento cuántico y la naturaleza probabilística de los sistemas cuánticos.

Dado que los estudiantes de carreras científicas y técnicas requieren una comprensión sólida de la Mecánica Cuántica, tanto para la investigación científica como para su aplicación práctica en la industria, es fundamental contar con herramientas didácticas que optimicen su proceso de aprendizaje. Entre estas herramientas, los tutoriales interactivos han sido reconocidos como una de las más efectivas para mejorar la comprensión de los contenidos en Física [7].

En este contexto, Maries, Sayer y Singh [8] destacan la efectividad de los tutoriales interactivos para mejorar el aprendizaje de los estudiantes en Física Cuántica. Este trabajo demuestra cómo los tutoriales pueden ser una herramienta poderosa para enseñar conceptos complejos de manera más accesible. Además, el estudio de Passante, Emigh y Shaffer [9] subraya que, además de mejorar el rendimiento de los estudiantes en los exámenes, los tutoriales favorecen una comprensión más profunda y duradera de los principios cuánticos.

Una de las principales ventajas de los tutoriales interactivos es su capacidad para abordar y corregir los errores conceptuales persistentes que los estudiantes presentan en la comprensión de la Mecánica Cuántica. Estos errores, relacionados con temas como la medición cuántica y la evolución temporal de los sistemas, son comunes y profundamente arraigados. Singh [10] identifica que estos problemas conceptuales no solo son recurrentes, sino que los enfoques tradicionales de enseñanza no logran aclararlos completamente. Singh argumenta que, para superar estos obstáculos, es necesario un enfoque educativo que resalte la importancia de los conceptos fundamentales y promueva una comprensión más profunda de la Mecánica Cuántica.

Por otro lado, el trabajo de Singh, Belloni y Christian [11] resalta un aspecto adicional: incluso entre los estudiantes capaces de resolver problemas matemáticos complejos, persisten errores conceptuales fundamentales relacionados con los estados estacionarios, la dinámica cuántica y los valores esperados. Estos errores son universales, independientemente del texto o del estilo de enseñanza del instructor. Los autores sugieren que, mediante el uso de tecnología educativa, como las simulaciones interactivas, se puede mejorar la comprensión de estos conceptos abstractos y mitigar los errores persistentes.

En este contexto, el presente estudio se enfoca en identificar y abordar las principales dificultades conceptuales que enfrentan los estudiantes al aprender Mecánica Cuántica, con el objetivo de corregir los errores que sobreviven incluso después de la instrucción formal. La solución a estos desafíos puede contribuir significativamente a la formación de futuros profesionales capaces de afrontar los retos tanto académicos como tecnológicos derivados del campo de la Física Cuántica.

Para llevar a cabo esta investigación, se aplicó inicialmente el *Quantum Mechanics Survey* (QMS) [12], diseñado por Chandralekha Singh y Guangtian Zhu, a los estudiantes de Física Cuántica II al inicio del primer semestre de 2024. El objetivo principal de esta

aplicación fue identificar los errores conceptuales que los estudiantes mantenían después de haber cursado Física Cuántica I en el segundo semestre de 2023. Tras el análisis de los resultados, se observó que uno de los errores más comunes estaba relacionado con el experimento de Stern-Gerlach, lo que reveló una comprensión insuficiente de algunos de sus conceptos clave.

Con el fin de mejorar la comprensión de este experimento y otros conceptos fundamentales de la Mecánica Cuántica, se implementó un tutorial interactivo, el *Quantum Interactive Learning Tutorial* (QuILT) [13], centrado en el experimento de Stern-Gerlach. Este tutorial fue aplicado a la nueva generación de estudiantes de Física Cuántica I durante el segundo semestre de 2024, con el objetivo de corregir los errores conceptuales detectados en la generación anterior. El tutorial fue traducido al español para aplicarlo en este trabajo.

El enfoque del tutorial QuILT se basa en el aprendizaje activo, permitiendo a los estudiantes participar de manera dinámica en la resolución de problemas relacionados con el experimento. Esta estrategia consta de una serie de pasos: identificación de dificultades conceptuales previas, discusión colaborativa de problemas cuidadosamente diseñados, y aplicación de conceptos a nuevas situaciones a través de ejercicios guiados. A través de la interacción colaborativa y la resolución de ejercicios en grupos, se busca que los estudiantes logren una comprensión más profunda de los conceptos cuánticos involucrados, contribuyendo a mitigar las dificultades conceptuales que suelen persistir, incluso después de haber recibido instrucción formal. La implementación del tutorial sugiere una mejora significativa, alcanzando los objetivos previstos en cuanto a la comprensión y aplicación de los conceptos cuánticos involucrados.

## 1.2. Experimento de Stern-Gerlach

El experimento de Stern-Gerlach tiene un papel importante en la enseñanza de la Mecánica Cuántica, ya que permite introducir la existencia del spin, su cuantización, el principio de superposición, las mediciones cuánticas y la naturaleza probabilística de los sistemas cuánticos. Estos conceptos presentan desafíos para los estudiantes, quienes pueden conservar ideas erróneas o no retener ciertos aspectos después de completar el curso. Para entender la raíz de estos errores conceptuales y aplicar herramientas pedagógicas como los tutoriales, es esencial realizar un análisis detallado del experimento de Stern-Gerlach y su relación con los conceptos fundamentales que busca ilustrar.

En 1922, Otto Stern y Walther Gerlach llevaron a cabo el famoso experimento de Stern-Gerlach. En este experimento, un haz de átomos neutros es dirigido a través de un campo magnético no homogéneo. Desde el punto de vista clásico, se esperaba que los átomos de plata, al estar en el estado base con momento angular orbital  $l = 0$ , presentarían momentos magnéticos orientados aleatoriamente en todas las direcciones, lo que llevaría a una distribución continua del haz en la pantalla. Stern y Gerlach observaron que el haz se dividía en dos componentes al pasar por el campo magnético, lo que sugería que los átomos poseían una propiedad intrínseca relacionada con el momento magnético. Si el momento angular orbital es  $l = 1$  en vez de  $l = 0$ , se observarían tres bandas en vez de dos, por lo que es importante destacarlo.

La división del haz ocurrió en función de la dirección del gradiente del campo magnético, lo que contradecía las predicciones clásicas y se interpretó como una evidencia de la cuantización del momento angular de los átomos en esa dirección. Esta observación sentó las bases para la hipótesis de un momento magnético intrínseco del electrón, conocido más tarde como el spin. En la Figura 1.1, tomada de [6], se muestra el diseño del experimento.

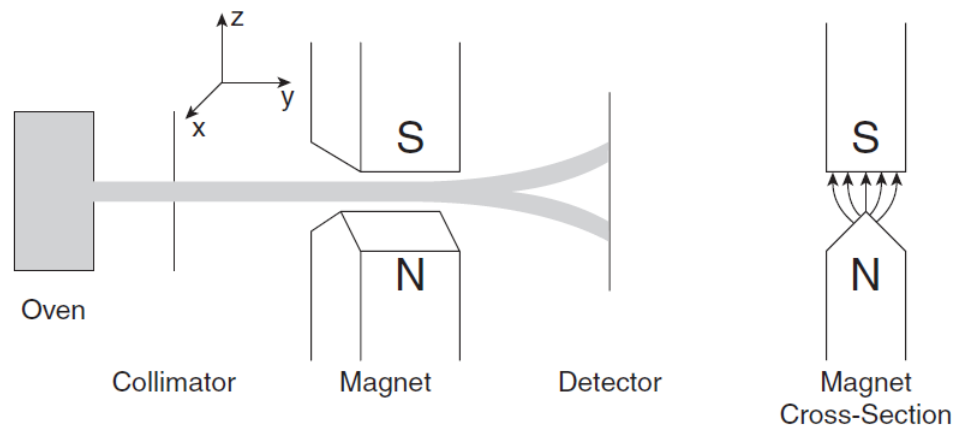


Figura 1.1: Diseño del Experimento de Stern-Gerlach para medir la componente del spin de un haz de partículas neutras a lo largo del eje  $z$ . La sección transversal del imán a la derecha muestra el campo magnético no homogéneo utilizado en el experimento.

Para comprender mejor el experimento, es necesario recurrir primero a la visión clásica. Los átomos en el haz poseen un momento magnético  $\mu$  que interactúa con el campo magnético. La energía potencial de esta interacción está dada por:

$$E = -\mu \cdot B \quad (1.1)$$

Y la fuerza experimentada por los átomos en presencia del gradiente del campo magnético es:

$$F = \nabla(\mu \cdot B) \quad (1.2)$$

Si consideramos el gradiente del campo magnético en la dirección  $z$ , la componente  $z$  de la fuerza se expresa como:

$$F_z = \frac{\partial}{\partial z}(\mu \cdot B) \cong \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (1.3)$$

Esta fuerza, perpendicular a la dirección inicial de movimiento de los átomos, desvía el haz. Desde la perspectiva clásica, se pensaría en una amplia distribución, ya que los momentos magnéticos, asociados al movimiento orbital de las cargas en el átomo, podrían orientarse en cualquier dirección, generando una mancha continua en el detector.

No obstante, el experimento de Stern-Gerlach no mostró una distribución continua, sino dos bandas discretas. Esta observación no puede entenderse desde una visión estrictamente clásica, por lo que se planteó la existencia de un momento angular intrínseco, el spin, asociado a un momento magnético intrínseco del electrón. Antes del experimento, se esperaba que la cuantización orbital explicase el resultado, pero al observar dos bandas bien definidas, se comprendió que algo más fundamental estaba ocurriendo.

En la Figura 1.2 se puede apreciar las dos bandas resultantes en el plano detector.

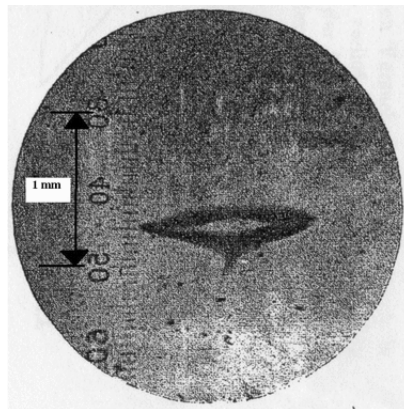


Figura 1.2: Bandas reales del experimento de Stern-Gerlach.

Estas Bandas, en la práctica, no son infinitamente delgadas: presentan cierta dispersión lateral debido a factores experimentales. Aun así, la característica esencial es la aparición de dos regiones separadas, en lugar de un patrón continuo o múltiple. Estas bandas demuestran de manera clara la cuantización binaria de la proyección del spin del electrón sobre la dirección del campo magnético.

Clásicamente, se puede asociar un momento magnético a un bucle de corriente. Si una carga  $q$  se desplaza con velocidad  $v$  en una trayectoria circular de radio  $r$ , se obtiene un momento magnético:

$$\mu = \frac{q}{2m} L \quad (1.4)$$

donde  $L = mrv$  es el momento angular orbital de la partícula. Sin embargo, el spin es un tipo de momento angular que no puede explicarse como el resultado del movimiento orbital clásico de una carga. Es un grado de libertad intrínseco del electrón, sin análogo clásico, y su existencia se confirmó a partir del análisis del experimento de Stern-Gerlach.

El momento magnético asociado al spin del electrón se describe por:

$$\mu = g \frac{q}{2m} S \quad (1.5)$$

Siendo  $g$  el factor giromagnético. Para un electrón, el momento magnético se describe como:

$$\mu = -g \frac{e}{2m_e} S \quad (1.6)$$

donde  $e$  es la carga del electrón y  $m_e$  es su masa. Finalmente, la fuerza que actúa sobre un átomo en presencia del gradiente de campo magnético  $B_z$  en la dirección  $z$  es:

$$F_z = -g \frac{e}{2m_e} S_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (1.7)$$

En el experimento de Stern-Gerlach, la deflexión observada en el haz de átomos es proporcional a la componente  $S_z$  del spin a lo largo del eje  $z$ , debido a la orientación del gradiente del campo magnético. Los resultados experimentales demostraron que solo existen

dos posibles valores para la componente  $z$  del spin del electrón, lo cual es consistente con los valores:

$$S_z = \pm \frac{\hbar}{2} \quad (1.8)$$

donde  $\hbar$  es la constante de Planck dividida por  $2\pi$ . Este hallazgo demuestra que el spin del electrón se cuantiza en dos direcciones opuestas, lo que da lugar a las denominaciones “spin up” y “spin down” para las componentes positivas y negativas de  $S_z$ , respectivamente. Este tipo de sistemas es conocido como sistemas de spin- $\frac{1}{2}$ .

Los sistemas de spin- $\frac{1}{2}$  desempeñan un papel importante en la Mecánica Cuántica, ya que muchas partículas subatómicas, como los fermiones, poseen este tipo de spin. Además, el estudio de estos sistemas es esencial para entender fenómenos como el magnetismo, la superconductividad y otros aspectos cruciales en Física moderna [14].

### 1.3. Dificultades del aprendizaje en la Mecánica Cuántica

La Mecánica Cuántica se caracteriza por su naturaleza abstracta, que puede presentar desafíos para los estudiantes al intentar comprender conceptos fundamentales tales como la superposición, la medición de estados cuánticos y la interpretación de la función de onda. Estas dificultades pueden atribuirse tanto a la complejidad de los conceptos como a los métodos utilizados para estructurarlos y enseñarlos en los cursos avanzados. A lo largo de los años, varios estudios han analizado estas barreras y han propuesto metodologías educativas orientadas a mejorar el aprendizaje. A continuación, se revisarán algunos de los trabajos más relevantes que abordan tanto las dificultades conceptuales como las pedagógicas en este ámbito.

Un primer análisis importante es el de Singh [10], quien en su artículo se enfoca en los problemas que los estudiantes enfrentan particularmente con las mediciones cuánticas y la evolución temporal de los sistemas. Según su investigación, estas dificultades son comunes y profundamente arraigadas, lo que sugiere que los estudiantes no solo carecen de las herramientas necesarias para abordar estos temas, sino que los enfoques tradicionales de enseñanza no logran esclarecer completamente aspectos clave, como el Hamiltoniano y los estados estacionarios. Singh argumenta que para superar estos obstáculos es necesario un enfoque educativo que resalte la importancia de estos conceptos fundamentales,

promoviendo una comprensión más profunda y accesible de la Mecánica Cuántica.

Este desafío pedagógico también está presente en otras áreas de la Física, donde se observan patrones similares en las dificultades de enseñanza y aprendizaje. Marshman y Singh [15] identifican que las barreras a menudo se derivan de problemas en el razonamiento, la resolución de problemas y la transferencia de conocimiento entre contextos diferentes. A través de su marco teórico, los autores muestran que los estudiantes a menudo enfrentan dificultades tanto en el pensamiento abstracto como en la aplicación práctica de los principios cuánticos. El marco de trabajo propuesto permite a los instructores identificar patrones comunes de dificultades y diseñar estrategias pedagógicas más eficaces, que pueden aplicarse para ayudar a los estudiantes a superar las dificultades que surgen al intentar conectar lo teórico con lo práctico.

En este contexto, no solo los errores conceptuales parecen ser la raíz del problema, sino también cómo los estudiantes interpretan y abordan los problemas dentro del marco epistemológico de la Mecánica Cuántica. Modir, Thompson y Sayre [16] argumentan que las dificultades que enfrentan los estudiantes no siempre son el resultado de malentendidos conceptuales, sino que, en muchos casos, provienen de un enfoque epistemológico inapropiado. Según los autores, los estudiantes tienden a utilizar modos de pensamiento que no son adecuados para los problemas cuánticos, lo que complica la resolución de los mismos. Al analizar cómo los estudiantes resuelven problemas y aplican su razonamiento, el estudio subraya la importancia de enseñar a los estudiantes a adoptar enfoques más adecuados para los problemas cuánticos, abriendo así nuevas posibilidades para el diseño de métodos de enseñanza más eficaces. Este análisis de la epistemología sugiere que, además de los errores conceptuales, podría ser útil modificar la manera en que los estudiantes abordan la resolución de problemas cuánticos.

Por último, el trabajo de Singh, Belloni y Christian [11] resalta un aspecto adicional que ha sido recurrente en las investigaciones previas: incluso entre los estudiantes que logran resolver problemas matemáticos complejos, persisten errores conceptuales fundamentales, como los relacionados con los estados estacionarios, la dinámica cuántica y los valores esperados. Estos errores son universales y no dependen ni del texto utilizado ni del estilo de enseñanza del instructor. Los autores señalan que, a pesar de las dificultades, la tecnología educativa puede ser una herramienta poderosa para mejorar la comprensión de los estudiantes, facilitando la visualización de conceptos abstractos a través de simulaciones y representaciones gráficas. Este enfoque interactivo, como sugieren los autores,

podría contribuir a mejorar la comprensión de los principios cuánticos y reducir los errores persistentes.

En conclusión, los estudios revisados sugieren que podría ser necesario revisar los enfoques pedagógicos en la enseñanza de la Mecánica Cuántica. Las dificultades de los estudiantes, tanto conceptuales como epistemológicas, requieren métodos educativos más dinámicos y adecuados a la complejidad de la disciplina. La incorporación de herramientas tecnológicas y un enfoque metodológico más centrado en la resolución de problemas específicos podría facilitar la comprensión de los aspectos fundamentales de la Mecánica Cuántica, contribuyendo a superar las barreras tradicionales en el aprendizaje.

## **1.4. Aprendizaje Activo en Física: Tutoriales**

El aprendizaje activo ha sido identificado como un enfoque prometedor para mejorar el aprendizaje en Mecánica Cuántica, debido a que permite a los estudiantes participar de manera dinámica en la resolución de problemas. Este tipo de enseñanza fomenta la interacción entre los estudiantes, promoviendo el intercambio de ideas y el debate sobre conceptos fundamentales de la Física. Este proceso puede facilitar la identificación de concepciones erróneas y apoyar una comprensión más detallada de los principios cuánticos.

Hake [17] proporciona evidencia de que el uso de métodos de aprendizaje activo mejora significativamente la comprensión conceptual de los estudiantes en comparación con aquellos que siguen métodos tradicionales centrados en clases magistrales. El estudio muestra que los estudiantes involucrados en enfoques activos no solo mejoran su comprensión de los conceptos, sino que también desarrollan mejores habilidades para resolver problemas. Este tipo de interacción activa permite que los estudiantes establezcan conexiones más profundas con los contenidos de la Física, lo que mejora su capacidad para aplicar lo aprendido en diferentes contextos.

Este hallazgo encuentra apoyo en la investigación realizada por Freeman et al. [18], donde se evalúa el impacto del aprendizaje activo en los cursos de STEM (Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas). Los resultados indican que los estudiantes que participan en experiencias de aprendizaje activo, como la resolución de problemas en grupo y el trabajo colaborativo, muestran mejoras significativas en su rendimiento académico. Este estudio sugiere que el aprendizaje activo puede ser más efectivo que las clases magistrales tradicionales en términos de rendimiento y en la capacidad de los estudiantes para trans-

ferir y aplicar conceptos en nuevos escenarios. Los autores abogan porque el aprendizaje activo se convierta en el estándar en las instituciones educativas.

En cuanto a la enseñanza de la Física, Wieman y Perkins [19] critican los métodos tradicionales que se basan únicamente en la transmisión de información mediante clases magistrales. Argumentan que, a pesar de ser ampliamente utilizados, estos enfoques han demostrado ser ineficaces para desarrollar una comprensión conceptual profunda en los estudiantes. En su lugar, los autores proponen el uso de principios cognitivos y herramientas tecnológicas que favorezcan la participación activa de los estudiantes, lo cual ha mostrado ser mucho más efectivo para promover un aprendizaje significativo. Esta transformación de los métodos tradicionales podría ser relevante para una educación que responda a las necesidades del siglo XXI.

La integración de enfoques activos en la enseñanza de la Física, especialmente en temas complejos como la Mecánica Cuántica, ha sido un foco recurrente de investigación. En este contexto, los tutoriales interactivos pueden desempeñar un papel relevante en guiar el aprendizaje de los estudiantes, permitiéndoles abordar y corregir errores conceptuales comunes en su comprensión. A través de actividades diseñadas específicamente para enfrentar estos problemas, los estudiantes pueden reflexionar sobre sus propias ideas y corregir malentendidos, lo que podría contribuir a la consolidación del conocimiento.

Estos tutoriales centrados en el enfoque de aprendizaje activo, buscan proporcionar una experiencia de enseñanza que no solo se limita a la transmisión de contenido, sino que fomenta una interacción constante entre estudiantes, mediante preguntas y resolución conjunta de problemas. Esta participación activa resulta fundamental para lograr una comprensión duradera y significativa de los conceptos. Emigh et al. [20], analizan dos enfoques educativos clave para la enseñanza de la Mecánica Cuántica: *Paradigms in Physics*, desarrollado en la Universidad Estatal de Oregón, y *Tutorials in Physics: Quantum Mechanics*, creado en la Universidad de Washington. Ambos enfoques buscan ir más allá de la secuencia tradicional de enseñanza en los cursos avanzados, promoviendo métodos más interactivos que aborden directamente los errores conceptuales de los estudiantes. Su investigación concluye que estos enfoques son efectivos para mejorar la comprensión de los estudiantes en temas avanzados de Mecánica Cuántica, al destacar y corregir errores clave en su razonamiento.

En una línea similar, Maries, Sayer y Singh [8] exploran cómo los tutoriales interac-

tivos diseñados para enseñar la interferencia cuántica y el experimento de doble rendija mejoran la comprensión de los estudiantes. Los resultados del estudio revelan que estos tutoriales no solo fomentan una mejor comprensión de los fenómenos cuánticos, sino que también promueven el razonamiento cuántico, facilitando la conexión de conceptos a través de diferentes contextos. Este enfoque refuerza la importancia de desarrollar herramientas que ayuden a los estudiantes a mejorar su aprendizaje conceptual en Mecánica Cuántica, haciendo hincapié en la utilidad de los tutoriales interactivos.

Otro estudio relevante es el de Passante, Emigh y Shaffer [9], quienes evaluaron el impacto de los tutoriales interactivos en la comprensión conceptual de los estudiantes de Mecánica Cuántica en niveles superiores. Este estudio destaca que los tutoriales no solo mejoran el rendimiento en los exámenes, sino que también permiten a los estudiantes abordar con mayor claridad los temas más complejos de la disciplina. Además, los estudiantes valoraron positivamente el uso de estos recursos, reconociendo que les ayudaron a comprender mejor los conceptos fundamentales. Este hallazgo refuerza la idea de que los tutoriales interactivos son una herramienta valiosa para la enseñanza de la Física, especialmente en áreas de dificultad como la Mecánica Cuántica.

En este trabajo, se ha escogido el tutorial interactivo sobre el experimento de Stern-Gerlach como una herramienta clave para mejorar el aprendizaje en la asignatura Física Cuántica I y Física Cuántica II. Desarrollado dentro del programa *Quantum Interactive Learning Tutorials* (QuILT) [13] por Chandralekha Singh y su equipo de investigación en la Universidad de Pittsburgh, este tutorial ha sido diseñado específicamente para abordar las dificultades conceptuales que los estudiantes enfrentan en Mecánica Cuántica. Su enfoque activo permite a los estudiantes interactuar y reflexionar sobre los errores conceptuales comunes en la comprensión del experimento, lo que mejora significativamente su comprensión de conceptos como los estados cuánticos, la evolución temporal y las mediciones cuánticas.

La implementación del QuILT, especialmente el tutorial enfocado en el experimento de Stern-Gerlach, ha demostrado ser una herramienta valiosa para la enseñanza de conceptos fundamentales en Mecánica Cuántica, como el spin y los estados cuánticos. Según Zhu y Singh [21] este experimento no solo ilustra de manera efectiva estos principios básicos, sino que también sirve como un recurso pedagógico que facilita el aprendizaje interactivo. Los resultados de su estudio muestran que los tutoriales basados en este experimento pueden mejorar significativamente la comprensión de los estudiantes, reflejándose en un

mejor desempeño en evaluaciones posteriores.

Estas evidencias motivaron la implementación del tutorial en la asignatura Física Cuántica I, adaptándolo como una estrategia clave para abordar las dificultades conceptuales identificadas en generaciones anteriores.

# Capítulo 2

## Metodología

### 2.1. Evaluación Diagnóstica Inicial

En el primer semestre de 2024, se evaluó a los estudiantes inscritos en la asignatura Física Cuántica II mediante el cuestionario *Quantum Mechanics Survey* (QMS), desarrollado por Chandralekha Singh y Guangtian Zhu [12]. El cuestionario fue seleccionado por su utilidad en la identificación de errores conceptuales comunes en estudiantes de Física Cuántica, especialmente en los temas abordados en Física Cuántica I. El QMS cubre aspectos fundamentales del curso, como la ecuación de Schrödinger, la función de onda y otros conceptos esenciales para una comprensión sólida de los fenómenos cuánticos [22]. El cuestionario fue traducido al español para facilitar su aplicación y luego fue respondido por 14 estudiantes al inicio del primer semestre de 2024, quienes disponían de 50 minutos para completarlo de manera individual.

Los resultados obtenidos mostraron que uno de los principales problemas conceptuales de los estudiantes se relacionaba con el entendimiento del experimento de Stern-Gerlach. En el segundo semestre de 2023, el curso de Física Cuántica I incluía tres clases en las que se abordaban los temas de  $\text{spin}-\frac{1}{2}$  y el experimento de Stern-Gerlach. Sin embargo, la dificultad persistente en estos temas llevó a la decisión de mejorar la enseñanza del experimento de Stern-Gerlach para las futuras generaciones.

Para abordar esta problemática y optimizar la enseñanza de Física Cuántica I, se optó por implementar el tutorial *Quantum Interactive Learning Tutorials* (QuILT) desarrollado por Chandralekha Singh y el equipo de investigación de la Universidad de Pittsburgh [13]. Este tutorial profundiza en los conceptos asociados al experimento de Stern-Gerlach, pro-

porcionando un enfoque interactivo que busca mejorar la comprensión de los estudiantes mediante la resolución de problemas y la visualización de simulaciones. Los estudiantes de la nueva generación de Física Cuántica I (segundo semestre de 2024) participaron en las tres clases magistrales sobre el experimento de Stern-Gerlach. Pero en esta nueva versión, los contenidos habían sido optimizados a dos clases teóricas y una clase completa dedicada a resolver el tutorial. La hipótesis era que el trabajo en el tutorial mejoraría el aprendizaje y la comprensión de los conceptos fundamentales.

## 2.2. Aplicación del Tutorial

La implementación del tutorial siguió una serie de pasos que se detallan en el esquema temporal mostrado en la Figura 2.1.

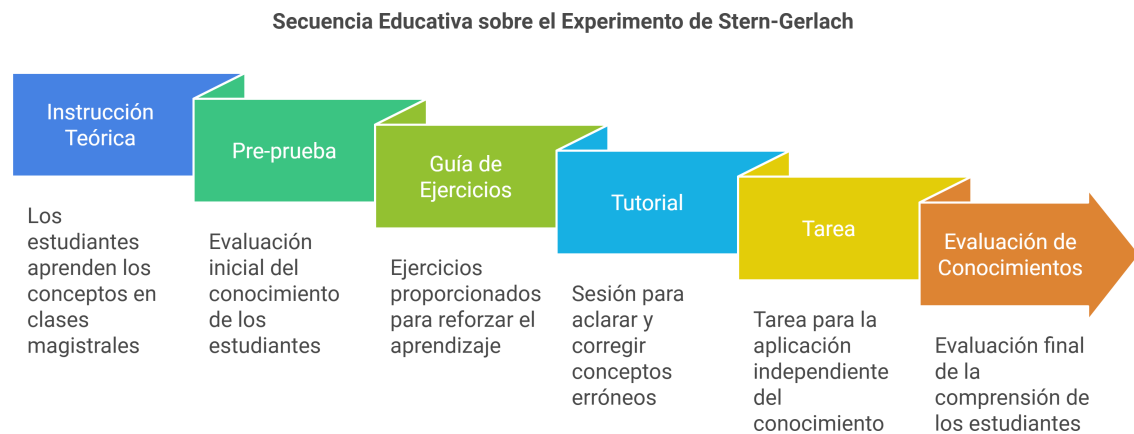


Figura 2.1: Esquema temporal de la aplicación del tutorial Stern-Gerlach.

**1. Instrucción teórica:** Los estudiantes iniciaron el aprendizaje del contenido relacionado con el sistema de dos niveles y el experimento de Stern-Gerlach durante tres clases magistrales, con un material de estudio más optimizado que el utilizado en la generación pasada.

**2. Pre-prueba:** Una semana después, los estudiantes realizaron una pre-prueba de manera individual durante el horario de clases, contando con 30 minutos para resolverlo. En esta ocasión participaron 10 estudiantes, lo que permitió identificar los errores conceptuales previos sobre el experimento de Stern-Gerlach. Los resultados obtenidos en esta pre-prueba fueron utilizados para adaptar y enfocar el diseño del tutorial, con el objetivo de abordar de manera específica las dificultades encontradas.

**3. Guía de ejercicios “Warmup”:** Tras la pre-prueba, los estudiantes trabajaron de manera individual en una guía de ejercicios denominada Warmup, que cubría temas relacionados con los sistemas de dos niveles, el  $\text{spin-}\frac{1}{2}$  y el experimento de Stern-Gerlach. Esta actividad se realizó de manera autónoma en los hogares de los estudiantes durante un periodo de 5 días, y su objetivo fue contextualizar a los estudiantes para enfrentar el tutorial de manera más efectiva.

**4. Aplicación del Tutorial QuILT:** El siguiente paso fue la aplicación del tutorial QuILT. Los estudiantes organizados en grupos de tres realizaron una serie de preguntas y problemas relacionados con el experimento de Stern-Gerlach, apoyados por la simulación SternGerlach.jar desarrollada por Wolfgang Christian y Mario Belloni. En la Figura 2.2 se muestra una captura de pantalla de la simulación SternGerlach.jar.

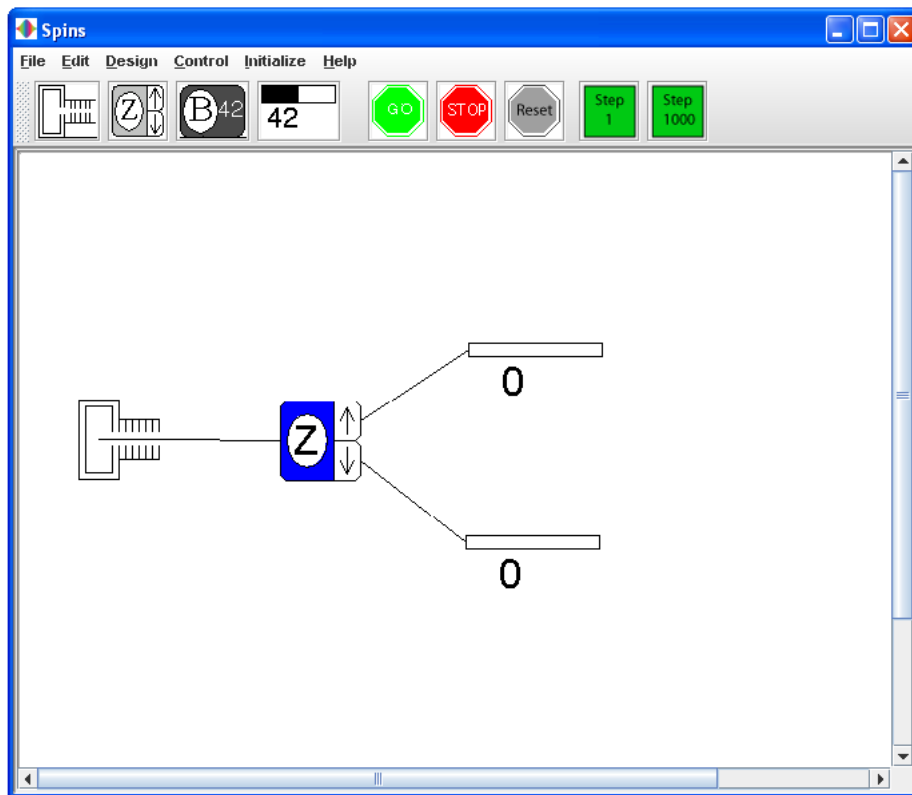


Figura 2.2: Simulación SternGerlach.jar.

Durante el tutorial los estudiantes debían predecir el comportamiento de las partículas al pasar por el aparato de Stern-Gerlach, responder preguntas conceptuales y luego verificar sus predicciones utilizando la simulación. Los estudiantes realizaron 10 simulaciones

trabajando en grupos de tres, lo que les permitió comprobar sus respuestas y afianzar su comprensión del experimento. La simulación permitió a los estudiantes abordar sus dudas y recibir retroalimentación visual.

Un total de 12 estudiantes realizaron esta actividad, mostrando una participación activa que permitió la identificación y resolución de dudas relacionadas con los conceptos del experimento de Stern-Gerlach.

### **2.3. Evaluación del Impacto**

Para evaluar el impacto del tutorial en el aprendizaje de los estudiantes, se establecieron dos instancias de evaluación: una tarea que los estudiantes debían completar en casa y una serie de 5 ejercicios de selección múltiple incluidas en la evaluación final de la asignatura. Estas evaluaciones fueron diseñadas para medir si el conocimiento sobre el experimento de Stern-Gerlach mejoró después de la realización del tutorial.

Los resultados obtenidos en estas evaluaciones fueron comparados con los de los estudiantes de Física Cuántica II del primer semestre de 2024, quienes no participaron en el tutorial. En total, 21 estudiantes realizaron las dos evaluaciones, lo que permitió hacer un análisis comparativo entre los estudiantes que trabajaron con el tutorial y aquellos que no lo hicieron. Este análisis permitió explorar el impacto del tutorial en la comprensión de los conceptos clave relacionados con el experimento de Stern-Gerlach.

# Capítulo 3

## Resultados y Análisis

### 3.1. Análisis del Cuestionario QMS: Errores Comunes y Hallazgos Iniciales

Como se detalló en la metodología, el primer paso consistió en aplicar el cuestionario QMS desarrollado por Chandralekha Singh, con el objetivo de identificar los errores conceptuales persistentes y los conocimientos olvidados entre los estudiantes que aprobaron Física Cuántica I. Los resultados obtenidos en este cuestionario se presentan en la Figura 3.1.

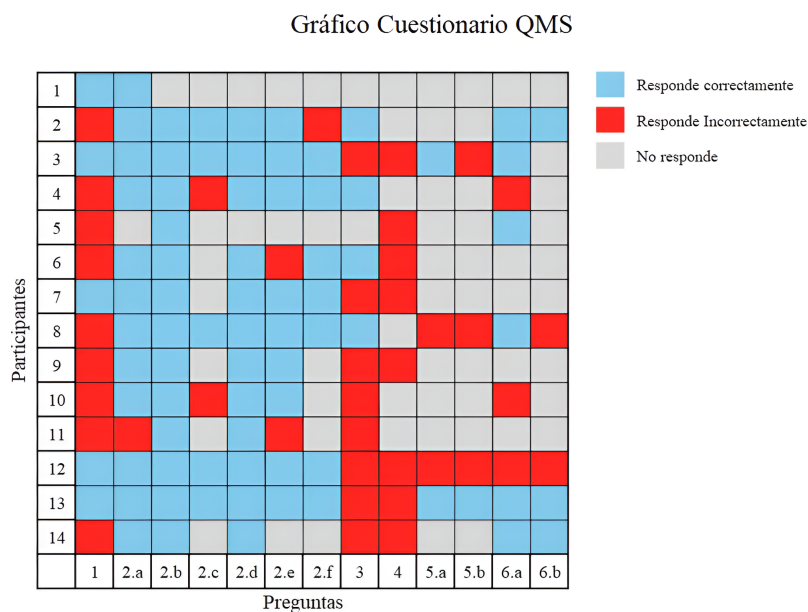


Figura 3.1: Gráfico Cuestionario QMS.

Los porcentajes de respuestas correctas, incorrectas y no respondidas para cada pregunta se muestran en la Figura 3.2.

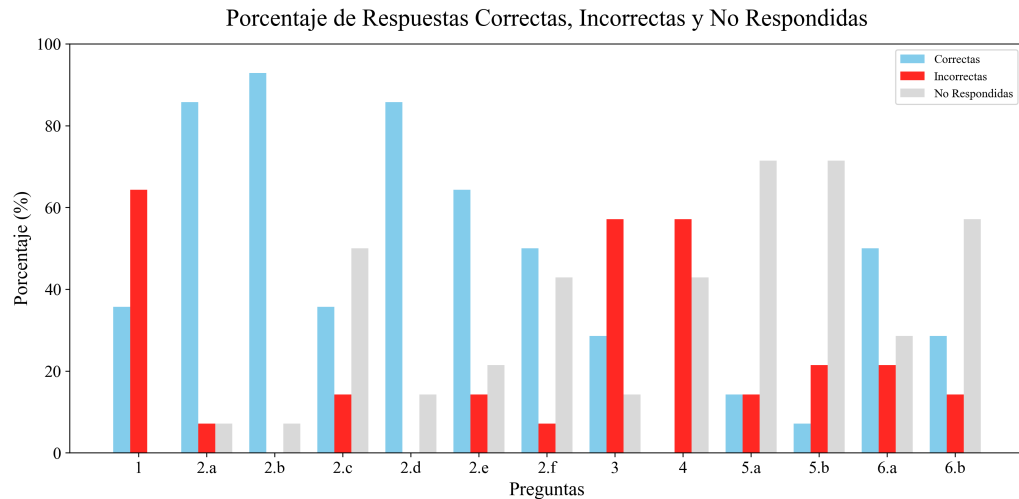


Figura 3.2: Gráfico De Barras Cuestionario QMS.

Se observa que algunas preguntas, particularmente las Preguntas 4 y 5, mostraron un desempeño notablemente bajo, con un porcentaje mínimo de respuestas correctas. Por lo tanto, se llevará a cabo un análisis detallado de estas dos preguntas.

### 3.1.1. Análisis Pregunta 4

La Pregunta 4 del cuestionario requería que los estudiantes respondieran, fundamentando su respuesta, la afirmación: “Por definición, el Hamiltoniano actuando sobre cualquier estado permitido del sistema  $\psi$  devolverá el mismo estado, es decir,  $\hat{H}\psi = \hat{E}\psi$ .”

Se esperaba que los estudiantes estuvieran en desacuerdo con esta afirmación, señalando que esta afirmación sólo es correcta si  $\psi$  es un estado estacionario. Si el estudiante solo respondió “En desacuerdo” no fue suficiente para ser considerada correcta.

Como se observa en la Figura 3.2 un 0% de los estudiantes logró responder correctamente esta pregunta. Este resultado pone de manifiesto la necesidad de analizar con detenimiento las respuestas proporcionadas por los estudiantes.

Al examinar las respuestas, se constató que el 100% de los estudiantes que respondieron esta pregunta no lograron identificar que la afirmación solo es válida si  $\psi$  corresponde

a un estado estacionario.

La Figura 3.3 muestra una de las respuestas entregada por los estudiantes:

4. Considere la siguiente afirmación: “Por definición, el Hamiltoniano actuando sobre cualquier estado permitido del sistema  $\psi$  devolverá el mismo estado, es decir,  $\hat{H}\psi = \hat{E}\psi$ ” donde E es la energía del sistema. Explique por qué está en acuerdo o en desacuerdo con esta afirmación.

$\hat{H}|\psi\rangle = E|\psi\rangle$  Cuando el Hamiltoniano actúa sobre la función de onda, entrega cada estado con su respectiva energía. Si se hace la acción sobre un estado permitido del sistema, entregará la energía del mismo.

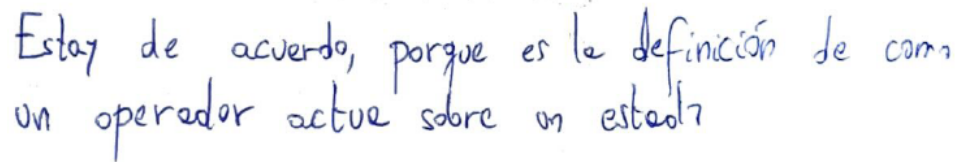
Figura 3.3: Respuesta de un estudiante a la Pregunta 4.

En esta respuesta del estudiante se puede observar que tiene una descripción parcialmente correcta, pero no menciona una distinción clave sobre los estados estacionarios. La expresión “Cuando el Hamiltoniano actúa sobre la función de onda, entrega cada estado con su respectiva energía” es un punto correcto, debido a que el estudiante reconoce que la energía que se obtiene corresponde a la energía de los estados propios. La expresión “Si se hace la acción sobre un estado permitido del sistema, entregará la energía del mismo” es una afirmación parcialmente correcta, debido a que si el estado es un estado propio del Hamiltoniano, la energía devuelta será la energía asociada a ese estado. Sin embargo, el concepto de “estado permitido” debería ser más preciso, ya que un estado permitido en Mecánica Cuántica generalmente se refiere a un estado que cumple con las condiciones físicas del sistema. Por lo que para que la afirmación sea más precisa, la respuesta podría haber incluido que el Hamiltoniano devuelve la energía asociada a cada estado propio.

Tras el análisis se puede observar que la respuesta del estudiante es parcialmente correcta, pero debido a que no logra identificar de manera explícita que la relación  $\hat{H}\psi = \hat{E}\psi$  es válida solo para estados estacionarios, no puede ser considerada correcta.

La Figura 3.4 muestra otra de las respuestas entregada por los estudiantes:

4. Considere la siguiente afirmación: “Por definición, el Hamiltoniano actuando sobre cualquier estado permitido del sistema  $\psi$  devolverá el mismo estado, es decir,  $\hat{H}\psi = \hat{E}\psi$ ” donde E es la energía del sistema. Explique por qué está en acuerdo o en desacuerdo con esta afirmación.



Estoy de acuerdo, porque es la definición de como un operador actúa sobre un estado

Figura 3.4: Respuesta de otro estudiante a la Pregunta 4.

En esta respuesta del estudiante se puede observar que su afirmación está correcta, debido a que el estudiante tiene una comprensión general correcta de la acción de un operador sobre un estado, pero no menciona la distinción importante de que esto es cierto solo para estados propios o estacionarios.

En resumen, al analizar las respuestas a la Pregunta 4, se puede concluir que los estudiantes tienen una comprensión general de la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo y de cómo un operador actúa sobre un estado. No obstante, ninguno de los estudiantes identifica explícitamente que esta afirmación solo es válida para los estados estacionarios, lo que refleja un error conceptual clave.

### 3.1.2. Análisis Pregunta 5

La Pregunta 5 del cuestionario requería que los estudiantes analizaran dos incisos relacionados al experimento de Stern-Gerlach. La notación  $|\uparrow_z\rangle$  y  $|\downarrow_z\rangle$  representa los estados propios ortonormales de  $\hat{S}_z$  (la componente z del momento angular del spin) del átomo de plata.

En el inciso a) un haz de átomos de plata que se propaga a lo largo de la dirección  $y$  (entrando a la página) en estado de spin  $(|\uparrow_z\rangle + |\downarrow_z\rangle)/\sqrt{2}$  se envía a través de un SGA con un gradiente de campo magnético vertical en la dirección  $-z$ . Los estudiantes debían dibujar el patrón de nube de átomos que esperan ver en una pantalla de fósforo distante en el plano  $x - z$  y explicar su razonamiento.

Se esperaba que los estudiantes notaran que el gradiente de campo magnético en la dirección  $-z$  ejercería una fuerza sobre los átomos de plata debido a su momento angular de spin y se observarían dos nubes en la pantalla de fósforo debido a la división del haz a lo largo de la dirección  $z$  correspondiente al componente de spin del átomo en los estados  $|\uparrow_z\rangle$  y  $|\downarrow_z\rangle$ .

Como se observa en la Figura 3.2, únicamente el 14.3% de los estudiantes (2 de 14) respondió correctamente a esta pregunta.

La Figura 3.5 muestra una de las respuestas entregadas por los estudiantes:

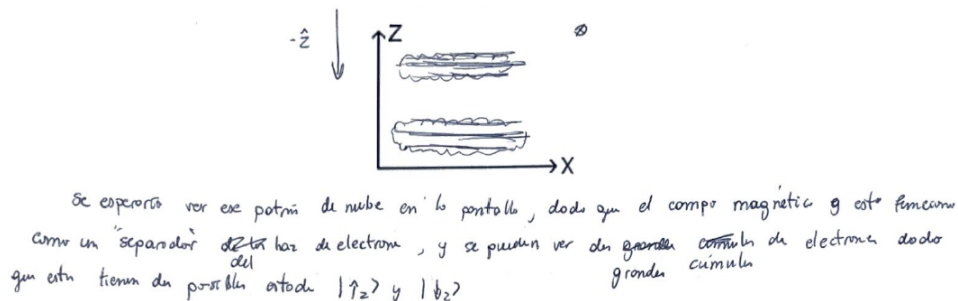


Figura 3.5: Respuesta de un estudiante a la Pregunta 5.a).

En esta respuesta del estudiante se puede observar que tiene una descripción correcta sobre el comportamiento del haz al pasar por el gradiente de campo magnético, pero el estudiante no logra identificar correctamente la ubicación de ambas nubes en el plano  $x-z$ .

La Figura 3.6 muestra otra de las respuestas entregadas por los estudiantes:

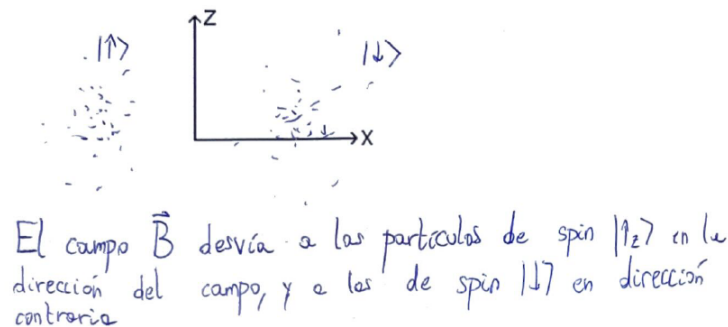


Figura 3.6: Respuesta de otro estudiante a la Pregunta 5.a).

En esta respuesta del estudiante se puede observar que el estudiante no logra identificar correctamente el comportamiento del haz al pasar por el gradiente de campo magnético. Esta respuesta sugiere una baja comprensión del experimento de Stern-Gerlach por el estudiante.

Dado que la mayoría de los estudiantes (10 de 14) no respondió, no es posible realizar un análisis más profundo sobre los posibles errores conceptuales relacionados con este inciso. Esto indica que la pregunta podría haber abordado un tema que los estudiantes aún no dominaban o que reflejaba una dificultad específica en la comprensión del contenido.

En el inciso b) un haz de átomos de plata que se propaga a lo largo de la dirección  $y$  (entrando a la página) en estado de spin  $|\uparrow_z\rangle$  se envía a través de un SGA con un gradiente de campo magnético horizontal en la dirección  $-x$ . Los estudiantes debían dibujar el patrón de nube de átomos que esperan ver en una pantalla de fósforo distante en el plano  $x - z$  y explicar su razonamiento.

Se esperaba que los estudiantes notaran que el estado propio de  $\hat{S}_z$  puede ser escrito como una superposición lineal de los estados propios de  $\hat{S}_x$ , es decir,  $|\uparrow_z\rangle = (|\uparrow_x\rangle + |\downarrow_x\rangle)/\sqrt{2}$ . Por lo que el gradiente de campo magnético en la dirección  $-x$  dividirá el haz de átomos de plata a lo largo del eje  $x$  correspondiente a los componentes de spin del átomo  $|\uparrow_x\rangle$  y  $|\downarrow_x\rangle$ .

Como se observa en la Figura 3.2, únicamente el 7.1 % de los estudiantes (1 de 14) respondió correctamente a esta pregunta.

La Figura 3.7 muestra una de las respuestas entregadas por los estudiantes:

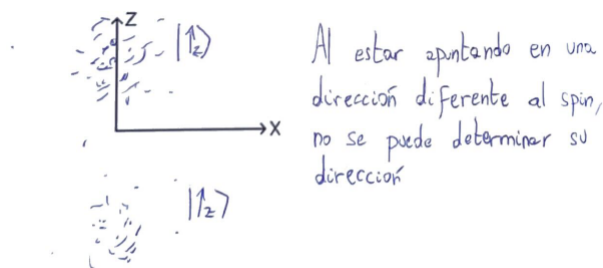


Figura 3.7: Respuesta de un estudiante a la Pregunta 5.b).

En esta respuesta del estudiante se puede observar que tiene una descripción incorrecta, ya que el estudiante no logra identificar que para poder determinar la dirección del haz con estado de spin  $|\uparrow_z\rangle$  al pasar por un gradiente de campo magnético en la dirección  $-x$  es necesario realizar un cambio de base del estado inicial a la dirección correspondiente al gradiente de campo magnético.

La Figura 3.8 muestra otra de las respuestas entregadas por los estudiantes:

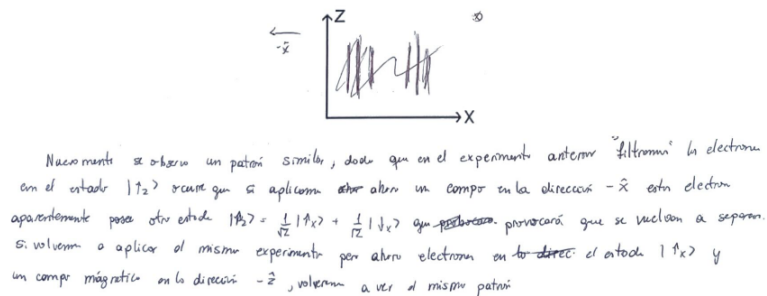


Figura 3.8: Respuesta de otro estudiante a la Pregunta 5.b).

En esta respuesta del estudiante se puede observar que el estudiante tiene una idea parcialmente correcta sobre el comportamiento del haz al pasar por el gradiente de campo magnético, pero no logra dibujar de manera precisa ambas nubes que se esperarían ver en el plano  $x - z$ .

Al igual que el inciso a), como la mayoría de los estudiantes (10 de 14) no respondió, no es posible realizar un análisis más profundo sobre los posibles errores conceptuales relacionadas con este inciso.

Ambos incisos de la Pregunta 5 indican que los estudiantes no poseen un dominio sólido de los principios relacionados con el experimento de Stern-Gerlach. Este hallazgo es relevante, dado que el experimento de Stern-Gerlach es considerado un concepto clave en la comprensión de la Mecánica Cuántica, como se destacó en la introducción.

Este resultado ayudó a identificar las áreas de contenido que podrían beneficiarse de una intervención en la siguiente generación de estudiantes. A partir de este análisis se concluyó que es imprescindible fortalecer el aprendizaje del experimento de Stern-Gerlach en los estudiantes de Física Cuántica I, dado su papel clave en la comprensión de principios fundamentales de la Mecánica Cuántica. En consecuencia, se decidió implementar

el tutorial interactivo QuILT en la siguiente generación de estudiantes, con el objetivo de mejorar su comprensión de este experimento y proporcionarles una base más sólida en comparación con la generación anterior.

### 3.2. Análisis de los Errores Principales en la Pre-prueba

El primer paso para la aplicación del tutorial, tal como se detalla en la metodología, fue la realización de una pre-prueba que permitió identificar las dudas y los errores conceptuales relacionados con el experimento de Stern-Gerlach. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.9.

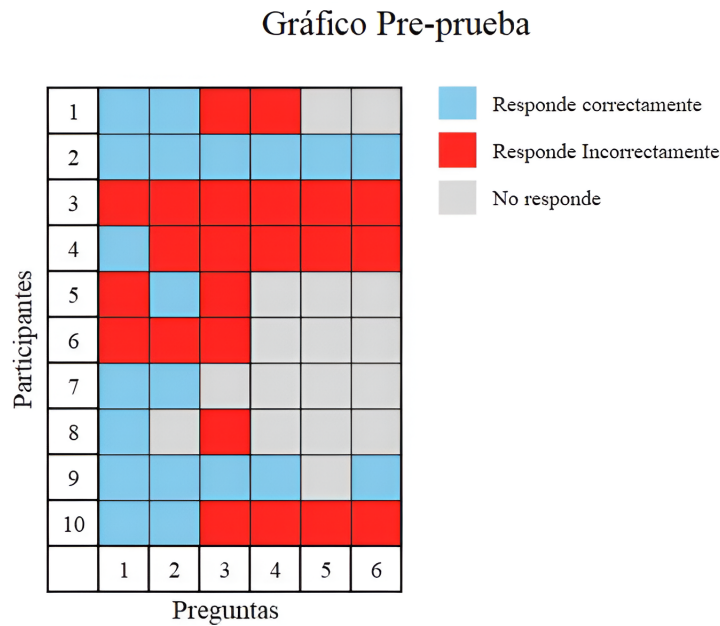


Figura 3.9: Gráfico Pre-Prueba.

Los porcentajes de respuestas correctas, incorrectas y no respondidas para cada pregunta se muestran en la Figura 3.10

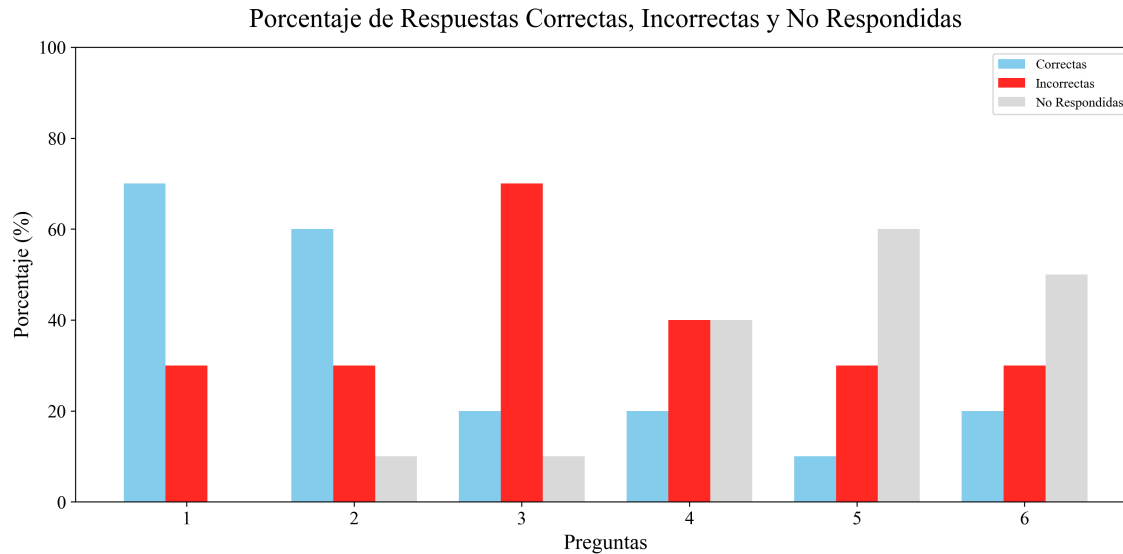


Figura 3.10: Gráfico De Barras Pre-prueba.

Las Preguntas 1 y 2 de esta pre-prueba fueron directamente tomadas de la Pregunta 5 del cuestionario QMS, lo que permitió realizar una comparación inmediata entre las respuestas de los estudiantes de la nueva generación y las respuestas previas, facilitando la retroalimentación sobre cómo los estudiantes están abordando este nuevo contenido.

En la Pregunta 1 de la pre-prueba, un 70 % de los estudiantes (7 de 10) respondió correctamente, lo que indica una comprensión básica sólida del concepto. Mientras que en la Pregunta 2, un 60 % (6 de 10) de los estudiantes proporcionó una respuesta correcta. Este resultado refleja un avance prometedor en la comprensión de los conceptos clave, lo que sugiere que los estudiantes están asimilando adecuadamente los fundamentos del experimento de Stern-Gerlach.

En cuanto a las Preguntas 3, 4, 5 y 6, el porcentaje de respuestas correctas fue considerablemente bajo. Sin embargo, este resultado no debe considerarse alarmante, ya que el objetivo principal de esta pre-prueba fue precisamente inducir el surgimiento de dudas y reflexiones iniciales sobre el experimento de Stern-Gerlach. En este sentido, las respuestas incorrectas sirven como un indicador de las áreas que requieren mayor atención y profundización durante la aplicación del tutorial.

Como se mencionó en la metodología, una vez completada la pre-prueba, los estudiantes trabajaron de manera individual en una guía de ejercicios, lo que permitió una primera exposición directa a los temas que serían abordados en el tutorial. Esta etapa resultó crucial para identificar las áreas específicas de dificultad, proporcionándoles a los estudiantes una oportunidad para visualizar de manera más clara los conceptos clave del experimento de Stern-Gerlach.

La aplicación del tutorial, que contó con la participación de 12 estudiantes organizados en grupos de 3, se desarrolló de manera exitosa. Durante el trabajo en grupo, los estudiantes discutieron activamente los problemas planteados en cada pregunta del tutorial, lo que facilitó una comprensión más profunda de los temas tratados. Este formato colaborativo permitió que los estudiantes compartieran ideas y resolvieran dudas, lo que pudo haber contribuido a su comprensión del experimento de Stern-Gerlach.

### **3.3. Análisis de la Evaluación Final**

La primera evaluación, tal como se describió en la metodología, consistió en una tarea individual que los estudiantes debían completar en sus hogares. Esta evaluación presenta ciertas limitaciones a la hora de medir el aprendizaje adquirido a través del tutorial, ya que los estudiantes dispusieron de una semana para realizarla y pudieron recurrir a diversas fuentes externas, como libros de texto y herramientas tecnológicas (computadoras, tabletas, etc.). Por lo tanto, el rendimiento en esta tarea no puede considerarse un indicador completamente fiable del dominio de los conceptos abordados en el tutorial, dado que la posibilidad de consultar material adicional podría haber facilitado la resolución de los problemas sin una comprensión profunda del contenido.

A pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos fueron positivos: el 100% de los estudiantes (20 de 20) respondieron correctamente las preguntas relacionadas con el experimento de Stern-Gerlach. Esto sugiere que, al menos en un contexto en el que pueden acceder a recursos adicionales, los estudiantes son capaces de aplicar los conceptos aprendidos durante el tutorial. Sin embargo, dado que la tarea no refleja adecuadamente las capacidades de los estudiantes para aplicar estos conceptos de manera independiente en un entorno de evaluación más controlado, la verdadera efectividad del tutorial debe medirse a través de la serie de 5 preguntas de selección múltiple incluidas en la evaluación

final de la asignatura.

Estas preguntas de selección múltiple, a diferencia de la tarea, se administraron en un entorno más controlado y sin acceso a fuentes externas, lo que proporcionará un indicador más preciso de la comprensión real de los estudiantes sobre el experimento de Stern-Gerlach y los conceptos relacionados. Esta evaluación sería fundamental para determinar en qué medida el tutorial fue efectivo para corregir errores conceptuales y consolidar el conocimiento de los estudiantes, proporcionando una evaluación más objetiva de su aprendizaje en comparación con la tarea realizada en casa.

Los resultados obtenidos en la evaluación final se presentan en la Figura 3.11.

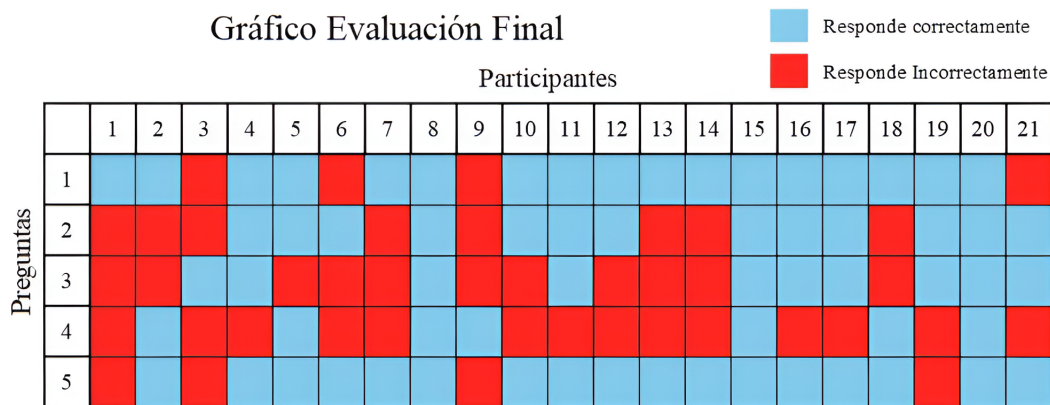


Figura 3.11: Gráfico Evaluación Final.

Los porcentajes de respuestas correctas e incorrectas para cada pregunta se muestran en la Figura 3.12

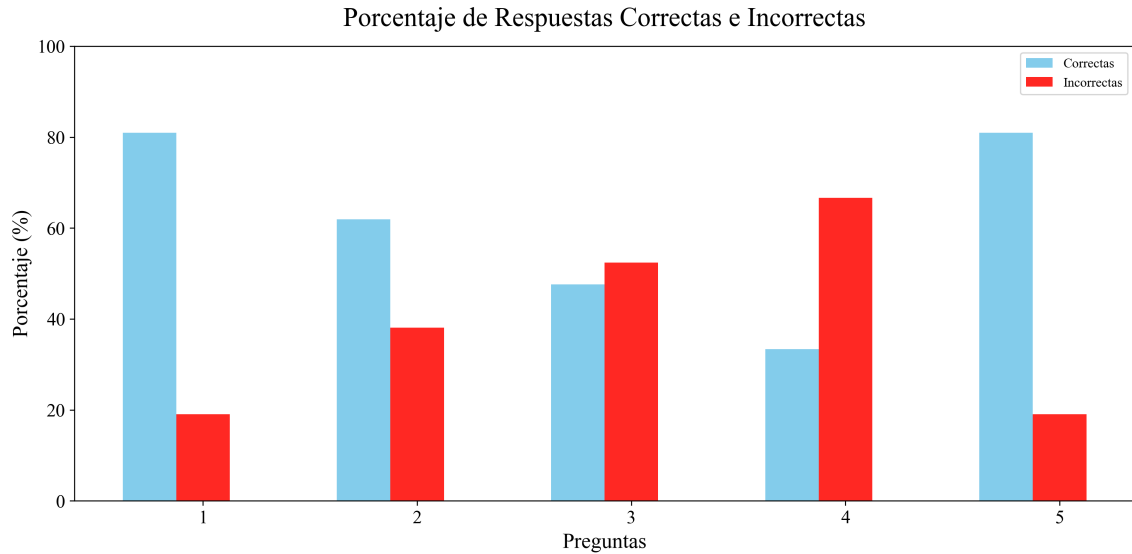


Figura 3.12: Gráfico De Barras Evaluación Final.

En las siguientes secciones, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de cada pregunta, con el objetivo de identificar patrones en las respuestas proporcionadas por los estudiantes. Se discutirá tanto el rendimiento general de los estudiantes como los errores conceptuales más frecuentes, comparando las respuestas correctas e incorrectas en cada caso.

### 3.3.1. Análisis Pregunta 1

La primera pregunta plantea lo siguiente: Un haz de átomos de plata en el estado de spin  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$  se dirige en la dirección  $+y$  pasando por un aparato de Stern-Gerlach con un gradiente de campo magnético en la dirección  $-z$ . ¿Qué patrón se espera en una pantalla en el plano  $x - z$ ?

Para esta pregunta, se ofrecen 5 alternativas, siendo la correcta la opción c): Dos bandas en el plano  $x - z$ , ya que el estado colapsa en  $|\uparrow\rangle_z$  o  $|\downarrow\rangle_z$  tras la medición. Este colapso ocurre debido a la interacción de los átomos con el campo magnético en la dirección  $-z$ , lo que hace que el spin se proyecte en esa dirección, generando dos posibles resultados correspondientes a los dos valores posibles de  $\hat{S}_z$ .

Como se puede observar en la Figura 3.12, el 81.0% de los estudiantes (17 de 21) respondieron correctamente. Este resultado sugiere que la mayoría de los estudiantes dominaron adecuadamente los conceptos básicos del experimento de Stern-Gerlach. Sin embargo, para realizar un análisis más detallado, se procederá a examinar las respuestas de aquellos estudiantes que respondieron incorrectamente, con el fin de identificar posibles errores conceptuales y áreas de mejora.

Dentro de los 5 estudiantes que respondieron incorrectamente esta pregunta, 4 de ellos optó por la alternativa a): Dos bandas en la dirección  $z$ , debido a la superposición de estados de spin.

La confusión principal radica en que la alternativa a) menciona “dos bandas en la dirección  $z$ ” en lugar que el patrón debe observarse en el plano  $x - z$ . Aunque el gradiente de campo magnético está en la dirección  $z$ , esto no implica que el patrón de detección se proyecte en la dirección  $z$ .

### 3.3.2. Análisis Pregunta 2

La segunda pregunta plantea lo siguiente: Un haz de átomos en el estado de spin  $|\uparrow\rangle_z$  se mueve en dirección  $+y$  pasando por un aparato de Stern-Gerlach con un gradiente de campo magnético en la dirección  $x$ . ¿Qué resultado observamos en una pantalla en el plano  $x - z$ ?

Para esta pregunta, se ofrecen 5 alternativas, siendo la correcta la opción c): Dos bandas en el plano  $x - z$ , debido a la cuantización del spin en esa dirección. La razón detrás de esta respuesta radica en cómo la cuantización del spin influye la medición cuando el haz de átomos pasa por el aparato de Stern-Gerlach con un gradiente de campo magnético en la dirección  $x$ . Como el estado inicial es  $|\uparrow\rangle_z$ , este estado escrito en una superposición lineal en dirección  $x$  queda de la siguiente manera:  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$ , por lo que esto da lugar a dos posibles resultados para cada átomo, que se manifiestan como dos bandas en la pantalla de detección en el plano  $x - z$ .

Como se observa en la Figura 3.12, el 61.9% de los estudiantes (13 de 21) respondieron correctamente a la pregunta. Este resultado indica que, al trabajar con cambios de base en los estados de spin, más de la mitad de los estudiantes lograron dominar adecuadamente este contenido, lo que refleja un progreso significativo en la comprensión de los principios

fundamentales del experimento de Stern-Gerlach.

Al analizar las respuestas incorrectas, se observa que no existe una tendencia clara hacia una alternativa en particular. Tres estudiantes eligieron la alternativa b), tres seleccionaron la alternativa e) y dos optaron por la alternativa a). Este patrón sugiere que los estudiantes que no respondieron correctamente probablemente no comprendieron a fondo el proceso de cambio de base en los estados de spin, lo que refleja una falta de consolidación en este concepto.

Dado que las preguntas 1 y 2 están directamente relacionadas con el cuestionario QMS aplicado a los estudiantes de la generación anterior, los resultados obtenidos permiten concluir con confianza que el porcentaje de estudiantes que dominan los contenidos básicos del experimento de Stern-Gerlach ha aumentado considerablemente en esta nueva generación. Este progreso sugiere que la implementación del tutorial y las intervenciones pedagógicas tuvieron un impacto positivo en la comprensión de los conceptos clave relacionados con el experimento.

### 3.3.3. Análisis Pregunta 3

Una vez analizados los resultados de las Preguntas 1 y 2, es pertinente abordar temas más complejos relacionados con el experimento de Stern-Gerlach para evaluar la efectividad del tutorial aplicado y determinar qué tan bien los estudiantes han comprendido conceptos avanzados.

La tercera pregunta plantea lo siguiente: Se envían átomos en el estado de spin  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$  en dirección  $+y$  por un aparato de Stern-Gerlach con gradiente de campo magnético en la dirección  $x$ . ¿Cuál es la probabilidad de que un átomo sea detectado en el estado  $|\uparrow\rangle_x$ ?

Para esta pregunta, se ofrecen 5 alternativas, siendo la correcta la opción c): 100 %, porque la medición en  $x$  define el estado de spin. Esta pregunta tiene como objetivo profundizar en la comprensión del cambio de base entre los estados de spin, desafiando a los estudiantes a reconocer que la combinación lineal de los estados de spin en  $z$  es equivalente a un estado definido en  $x$ , y que, por lo tanto, un átomo en este estado siempre será detectado en la misma dirección.

Como se observa en la Figura 3.12, el 47.6 % de los estudiantes (10 de 21) respondieron correctamente a esta pregunta. Este resultado es similar al de la pregunta anterior, y sugiere que aproximadamente la mitad de los estudiantes logró comprender de manera adecuada el concepto de cambio de base en los estados de spin. Aunque no es un dominio absoluto, este porcentaje indica que una parte significativa de los estudiantes ha alcanzado un nivel razonable de entendimiento sobre cómo los estados de spin se transforman bajo diferentes bases. Sin embargo, es evidente que aún persisten dudas y malentendidos que podrían haberse abordado más profundamente durante el proceso de aprendizaje.

### 3.3.4. Análisis Pregunta 4

Esta pregunta requiere un mayor manejo de los conceptos relacionados a los cambios de bases de los estados de spin. La cuarta pregunta plantea lo siguiente: Si un haz de átomos de plata en el estado  $|\uparrow\rangle_z$ , moviéndose en dirección  $+y$ , pasa primero por un aparato de Stern-Gerlach con el gradiente de campo magnético en la dirección  $z$  y luego por otro con gradiente de campo magnético en la dirección  $x$ , ¿Qué patrón se espera en una pantalla final en el plano  $x - z$ ?

Para esta pregunta, se ofrecen 5 alternativas, siendo la correcta la opción b): Dos bandas en el plano  $x - z$ , ya que el estado colapsa en ambas direcciones. Para responder correctamente esta pregunta, el estudiante debía notar que el haz de átomos al pasar por el primer Stern-Gerlach con gradiente de campo magnético en dirección  $z$ , el estado  $|\uparrow\rangle_z$  permanece sin alteración, ya que el átomo está inicialmente en un estado propio de la dirección  $z$ . Sin embargo, al pasar por el segundo aparato, con el gradiente de campo magnético en la dirección  $x$ , el estado de spin colapsa en uno de los estados propios de  $x$ , es decir, en  $|\uparrow\rangle_x$  o  $|\downarrow\rangle_x$ . Este colapso da lugar a la formación de dos bandas en el plano  $x - z$ , correspondientes a las dos posibles proyecciones del estado de spin en la dirección  $x$ .

Este tipo de pregunta evalúa la capacidad de los estudiantes para combinar la comprensión de los efectos de la medición en las direcciones  $z$  y  $x$ , y la interacción de ambos efectos en un sistema cuántico. La correcta identificación de este patrón demuestra un manejo más sofisticado de los conceptos fundamentales de la Mecánica Cuántica, particularmente los relacionados con la medición y el cambio de base en los estados de spin.

Como se observa en la Figura 3.12, el 33.3 % de los estudiantes (7 de 21) respondió correctamente a esta pregunta. Los estudiantes que identificaron correctamente que el primer

aparato de Stern-Gerlach no altera el estado de spin, lograron comprender que el estado  $|\uparrow\rangle_z$  permanece intacto antes de pasar por el segundo dispositivo. Esta comprensión les permitió dar la respuesta correcta.

Por otro lado, los estudiantes que no respondieron correctamente demostraron tener dificultades para aplicar de manera efectiva los conceptos relacionados con el cambio de base en los estados de spin. Esto sugiere que aún no han consolidado un dominio avanzado de estos conceptos, especialmente en situaciones en las que intervienen secuencias de mediciones en direcciones no conmutativas. La dificultad en la resolución de esta pregunta resalta la necesidad de reforzar la comprensión de los efectos de las mediciones sucesivas en estados cuánticos.

### 3.3.5. Análisis Pregunta 5

La quinta pregunta tiene como objetivo profundizar en la distinción entre un haz de átomos en una superposición lineal de estados y un haz de átomos en una mezcla no polarizada.

La pregunta se plantea de la siguiente manera: Tienes dos haces de átomos de plata: el haz A consiste en átomos en el estado  $\chi = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$ , mientras que el haz B es una mezcla no polarizada en la que la mitad de los átomos están en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  y la otra mitad en el estado  $|\downarrow\rangle_z$ . Ambos haces pasan a través de un aparato de Stern-Gerlach con un gradiente de campo magnético en la dirección  $z$ . ¿Qué patrón se espera en una pantalla en el plano  $x - z$ ?

Para esta pregunta, se ofrecen 5 alternativas, siendo la correcta la opción b): Ambos haces formarán dos bandas en el plano  $x - z$ , ya que ambos estados,  $\chi$  y la mezcla no polarizada, colapsan en  $|\uparrow\rangle_z$  o  $|\downarrow\rangle_z$  al pasar por el aparato de Stern-Gerlach. Esta pregunta tiene como objetivo que los estudiantes comprendan que independientemente de si el haz está en superposición o en mezcla no polarizada, al pasar por un dispositivo de Stern-Gerlach con gradiente de campo en la dirección  $z$ , ambos producirán un patrón similar, con los estados colapsando en una de las dos posibles direcciones.

Como se observa en la Figura 3.12, el 81.0% de los estudiantes (17 de 21) respondió correctamente a esta pregunta. Este alto porcentaje sugiere que la mayoría del curso ha alcanzado un sólido entendimiento de este tema, lo que indica un dominio adecuado de

la diferencia conceptual entre superposición y mezcla no polarizada en el contexto de las mediciones en Mecánica Cuántica.

### 3.4. Comparativa entre los estudiantes que participaron en el tutorial y aquellos que no lo hicieron

En el curso de Física Cuántica I del segundo semestre de 2024, 12 estudiantes completaron el tutorial, mientras que 9 no lo hicieron. Esta diferencia en la participación brinda una oportunidad única para realizar un análisis comparativo entre ambos grupos, permitiendo examinar cómo la inclusión del tutorial pudo haber influido en el rendimiento de los estudiantes. La comparación de los resultados obtenidos en la evaluación final ofrece una visión más clara de las diferencias en la comprensión de los conceptos clave, especialmente aquellos relacionados con el experimento de Stern-Gerlach. Para este análisis, se consideran dos grupos: el Grupo P, que incluye a los estudiantes que participaron en el tutorial, y el Grupo NP, que agrupa a los estudiantes que no participaron en él.

Los resultados obtenidos en la evaluación final por el Grupo P (12 estudiantes) se presentan en la Figura 3.13.

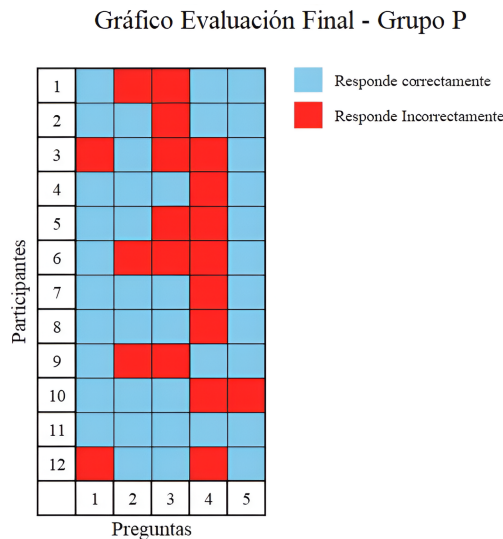


Figura 3.13: Gráfico Evaluación Final Grupo P.

Además, los porcentajes de respuestas correctas e incorrectas del Grupo P se muestran en la Figura 3.14.

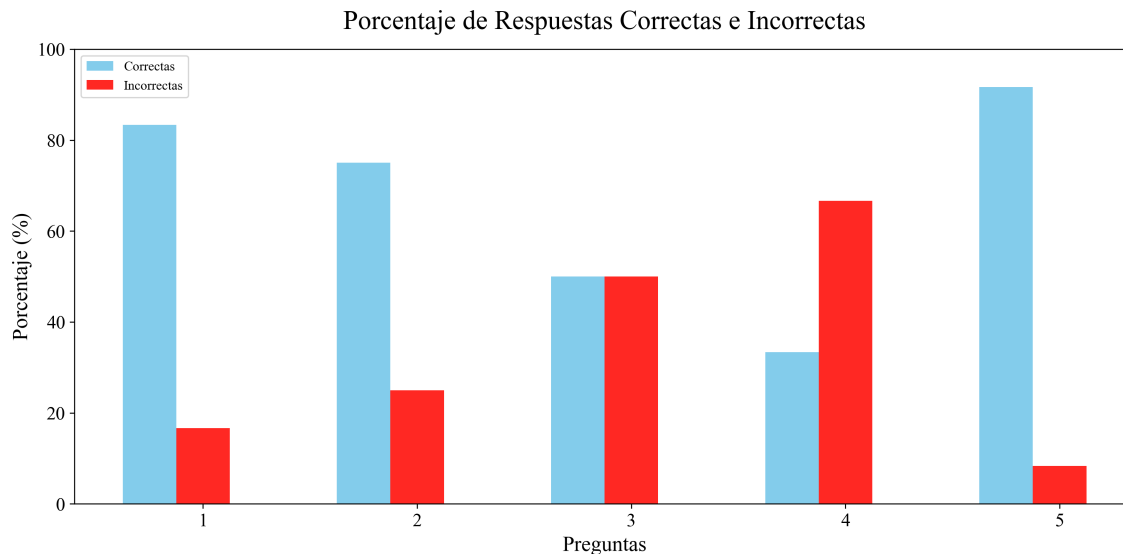


Figura 3.14: Gráfico De Barras Grupo P.

Por otro lado, los resultados obtenidos de la evaluación final por el Grupo NP (9 estudiantes) se muestran en la Figura 3.15.

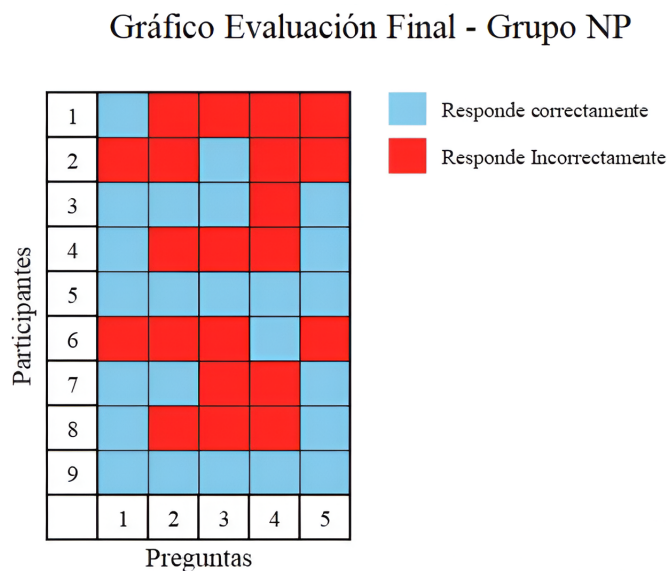


Figura 3.15: Gráfico Evaluación Final Grupo NP.

Mientras que los porcentajes de respuestas correctas e incorrectas del Grupo NP se muestran en la Figura 3.16.

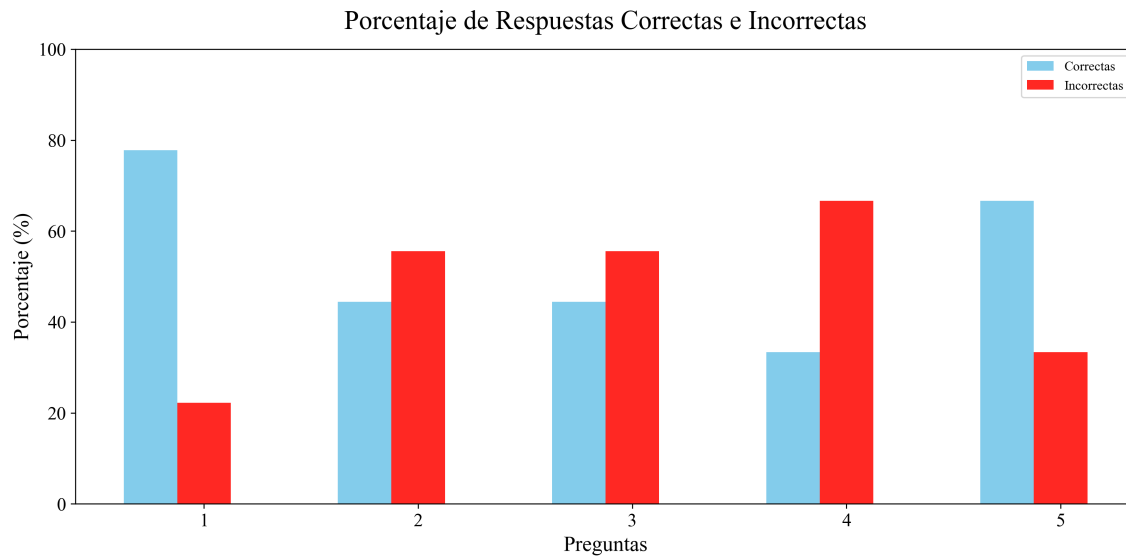


Figura 3.16: Gráfico De Barras Grupo NP.

Para complementar este análisis, la Figura 3.17 muestra la comparación de porcentajes de respuestas correctas entre el Grupo P y el Grupo NP. Dentro de cada barra se detalla la cantidad de estudiantes que respondieron correctamente.

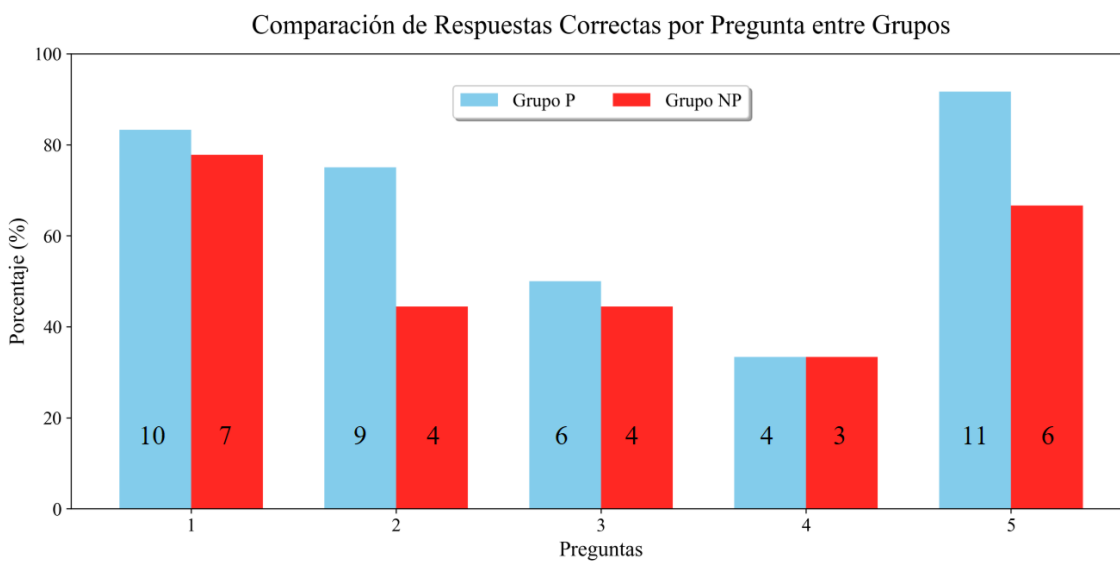


Figura 3.17: Gráfico De Barras Respuestas Correctas Grupo P vs Grupo NP.

De manera general, los estudiantes que participaron en el tutorial mostraron un rendimiento superior, destacándose especialmente en las preguntas 2 y 5. Aunque en las preguntas 1, 3 y 4 la diferencia entre ambos grupos fue menor, el grupo P mantuvo resultados significativamente mejores que aquellos que no participaron. A continuación, se analizará cada pregunta en detalle.

### 3.4.1. Análisis Pregunta 1

En esta pregunta, 10 estudiantes que participaron en el tutorial y 7 que no lo hicieron respondieron correctamente. Esto sugiere que, en general, los estudiantes asimilaron los fundamentos del experimento de Stern-Gerlach, independientemente de su participación en el tutorial. Las clases magistrales sobre el tema, junto con la realización de la tarea, facilitaron la comprensión de sus principios básicos, incluidas las razones por las cuales el haz se divide en dos nubes de átomos.

### 3.4.2. Análisis Pregunta 2

En esta pregunta, 9 estudiantes que participaron en el tutorial y 4 que no lo hicieron respondieron correctamente. Estos resultados sugieren que la participación en el tutorial fomentó una comprensión más profunda de los cambios de base en el experimento de Stern-Gerlach. En particular, quienes participaron mostraron entender que, al contar con un haz de átomos inicialmente orientado en la dirección  $z$ , y hacerlo pasar por un aparato de Stern-Gerlach con gradiente de campo magnético en la dirección  $x$ , se requiere efectuar el cambio de base apropiado para analizar con precisión la deflexión del haz.

### 3.4.3. Análisis Pregunta 3

En esta pregunta, solo 6 estudiantes que participaron en el tutorial y 4 que no lo hicieron respondieron correctamente. Estos resultados sugieren que la mayoría de los estudiantes no asimiló con suficiente solidez que el estado inicial, expresado como  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$ , corresponde exactamente al estado  $|\uparrow\rangle_x$ .

### 3.4.4. Análisis Pregunta 4

En esta pregunta, únicamente 4 estudiantes que participaron en el tutorial y 3 que no lo hicieron respondieron correctamente. Estos resultados evidencian que la mayoría de los

estudiantes no alcanzó una comprensión sólida de la secuencia de aparatos Stern-Gerlach ni de la aplicación adecuada de los cambios de base correspondientes.

### **3.4.5. Análisis Pregunta 5**

En esta pregunta, 11 estudiantes que participaron en el tutorial y 6 que no lo hicieron respondieron correctamente. Estos resultados indican que los participantes del tutorial asimilaron de manera más sólida las similitudes entre una combinación lineal y una mezcla no polarizada, mientras que aquellos que no participaron enfrentaron mayores dificultades en este aspecto.

En general, este análisis sugiere que los estudiantes que participaron en el tutorial adquirieron una comprensión más sólida y profunda de los conceptos relacionados con los cambios de bases de los estados de spin y superposición lineal, mientras que los estudiantes que no participaron continuaron enfrentando dificultades para reconocer y aplicar estos conceptos. La implementación del tutorial parece haber contribuido a una mejor comprensión conceptual en los estudiantes participantes, como se evidencia en su desempeño en las evaluaciones. También puede deducirse que el trabajo en la actividad de tarea no fue suficiente para nivelar a aquellos estudiantes que no asistieron al tutorial.

# Capítulo 4

## Conclusiones

El objetivo principal de esta tesina fue promover el aprendizaje activo en Mecánica Cuántica y en la comprensión conceptual de los estudiantes mediante la implementación de un tutorial sobre el experimento de Stern-Gerlach, comparando sus resultados con los de una generación anterior que no tuvo acceso a esta herramienta educativa.

El análisis realizado permitió identificar que los estudiantes que participaron en el tutorial mostraron una mejora significativa en su aprendizaje y razonamiento al abordar problemas relacionados con el experimento de Stern-Gerlach, la cual podría estar asociada a su participación en el tutorial. Esto incluyó una comprensión más sólida en situaciones que involucran cambios de base en los estados de spin y sucesiones de aparatos de Stern-Gerlach. En contraste, los estudiantes de la generación pasada mostraron deficiencias significativas en el razonamiento y manejo conceptual de problemas relacionados con sistemas de dos niveles y de spin- $\frac{1}{2}$ .

Estos resultados identifican áreas críticas donde los estudiantes enfrentan dificultades persistentes, lo que podría ayudar a orientar estrategias para fortalecer su aprendizaje en Mecánica Cuántica. Además, el tutorial desarrollado en esta tesina parece haber contribuido a mejorar la capacidad de los estudiantes para razonar en el contexto del experimento de Stern-Gerlach y sugiere la relevancia de estrategias educativas activas para abordar áreas críticas de dificultad conceptual. Estos resultados sugieren que implementar herramientas educativas innovadoras, incluso a pequeña escala, podría tener un impacto positivo en el aprendizaje de los estudiantes [23].

Como propuestas para trabajos futuros, sería interesante analizar el impacto de tuto-

riales similares en otros experimentos fundamentales de la Mecánica Cuántica o incluso a diferentes temáticas dentro de la Mecánica Cuántica, para así evaluar la consistencia de los patrones de razonamiento observados. Además, un estudio longitudinal que siga la trayectoria de los mismos estudiantes en cursos avanzados podría proporcionar una visión más completa sobre la evolución de los conocimientos adquiridos a través del tutorial y su impacto a largo plazo.

En conclusión, este trabajo podría contribuir a la mejora de la enseñanza de la Mecánica Cuántica a nivel introductorio. Los hallazgos obtenidos podrían servir como base para desarrollar estrategias pedagógicas que promuevan una mejor comprensión de los conceptos cuánticos en los estudiantes, evidenciando la importancia de tener instancias en donde los estudiantes puedan debatir y resolver problemas de manera activa con sus pares.

# Bibliografía

- [1] Venkata Chinthapatla. From qubits to code: Quantum mechanics influence on modern software architecture. *Journal of Quantum Computing and Information*, 15(4):456–478, 2023.
- [2] Sedat Sonko, Kenneth Ifeanyi Ibekwe, Valentine Ikenna Ilojiana, Emmanuel Augustine Etukudoh, and Adefunke Fabuyide. Quantum cryptography and u.s. digital security: A comprehensive review: Investigating the potential of quantum technologies in creating unbreakable encryption and their future in national security. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(2):390–414, February 2024.
- [3] David J. Griffiths and Darrell F. Schroeter. *Introduction to Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, 3rd edition, 2020.
- [4] Nouredine Zettili. *Quantum Mechanics: Concepts and Applications*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2nd edition, 2009.
- [5] J. J. Sakurai and Jim Napolitano. *Modern Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, 2nd revised edition, 2017.
- [6] David H. McIntyre. *Quantum Mechanics: A Paradigms Approach*. Pearson Education, Boston, MA, 2012.
- [7] J. Benegas and J. Sirur Flores. Effectiveness of tutorials for introductory physics in argentinean high schools. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, 10:010110, Mar 2014.
- [8] Alexandru Maries, Ryan Sayer, and Chandralekha Singh. Effectiveness of interactive tutorials in promoting “which-path” information reasoning in advanced quantum mechanics. *Physical Review Physics Education Research*, 13(2):020115, September 2017.

- [9] Gina Passante, Paul J. Emigh, and Peter S. Shaffer. Testing tutorials in upper-division: An example from quantum mechanics. In *2014 PERC Proceedings*, pages 199–202. American Association of Physics Teachers, 2014.
- [10] Chandralekha Singh. Student understanding of quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 69(8):885–895, 2001.
- [11] Chandralekha Singh, Mario Belloni, and Wolfgang Christian. Improving student understanding of quantum mechanics. *Proceedings of the Physics Education Research Conference*, 2005.
- [12] Chandralekha Singh. Quantum mechanics survey (qms). Educational Assessment Tool, 2001. Developed for evaluating student understanding of quantum mechanics concepts. For details, see related publications in the American Journal of Physics and Proceedings of Physics Education Research Conference.
- [13] Chandralekha Singh. Quantum interactive learning tutorials (quilts). Research-Based Educational Resource, 2005. Developed to improve student understanding of quantum mechanics by bridging abstract formalism with conceptual understanding. Available at: <http://www.opensourcephysics.org/publications/occam/quilt.html>.
- [14] J.H. Van Vleck. Quantum mechanics: The key to understanding magnetism. *The Reviews of Modern Physics*, 7(1):226–273, 1935.
- [15] Emily Marshman and Chandralekha Singh. Framework for understanding the patterns of student difficulties in quantum mechanics. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(2):020119, September 2015.
- [16] Bahar Modir, John D. Thompson, and Eleanor C. Sayre. Framing difficulties in quantum mechanics. *Physical Review Physics Education Research*, 15(2):020146, 2019.
- [17] Richard R. Hake. Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66(1):64–74, 1998.
- [18] Scott Freeman, Sarah L. Eddy, Miles McDonough, Michelle K. Smith, Nnadozie Okoroafor, Hannah Jordt, and Mary Pat Wenderoth. Active learning increases student

- performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23):8410–8415, June 2014.
- [19] Carl Wieman and Katherine Perkins. Transforming physics education. *Physics Today*, 58(11):36–41, November 2005.
- [20] Paul J. Emigh, Elizabeth Gire, Corinne A. Manogue, Gina Passante, and Peter S. Shaffer. Research-based quantum instruction: Paradigms and tutorials. *Physical Review Physics Education Research*, 16(2):020156, December 2020.
- [21] Guangtian Zhu and Chandralekha Singh. Improving students’ understanding of quantum mechanics via the stern-gerlach experiment. *arXiv: Physics Education Research*, 1602.06367v1, February 2016.
- [22] Chandralekha Singh. Student understanding of quantum mechanics at the beginning of graduate instruction. *arXiv: Physics Education Research*, 1602.06660v1, February 2016.
- [23] D. S. Abbott, J. M. Saul, G. W. Parker, and R. J. Beichner. Can one lab make a difference? *American Journal of Physics*, 68(7):60–69, 2000.

# Anexo A: Cuestionario QMS en Español

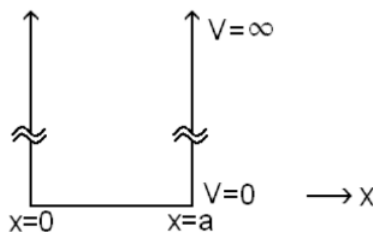
Nombre: \_\_\_\_\_ Rol: \_\_\_\_\_

**Instrucciones:** Tiene 50 minutos para trabajar en la prueba de diagnóstico. Recuerde escribir su nombre en la hoja de respuestas. Leer cuidadosamente cada pregunta antes de responder. Buena suerte.

1. Escriba la ecuación más fundamental de la mecánica cuántica.

En todos los siguientes problemas, asuma que las situaciones son ideales.

2. La función de onda de un electrón en un pozo cuadrado infinito unidimensional de ancho  $a$ , en el tiempo  $t = 0$  está dado por  $\psi(x, 0) = \sqrt{\frac{2}{7}}\phi_1(x) + \sqrt{\frac{5}{7}}\phi_2(x)$ , donde  $\phi_1(x)$  y  $\phi_2(x)$  son el estado fundamental y el primer estado estacionario excitado del sistema respectivamente. ( $\phi_n = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right)$ ,  $E_n = \frac{n^2\pi^2\hbar^2}{2ma^2}$  donde  $n = 1, 2, 3, \dots$ )

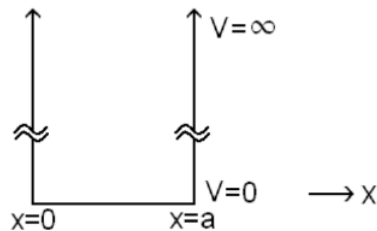




- f) Inmediatamente después de la medición de energía, se realiza una medición de la posición del electrón. Describa cualitativamente los posibles valores de posición que puedes medir y la probabilidad de medirlos.

3. ¿Cuál de las siguientes funciones de onda en el tiempo  $t = 0$  está permitida para un electrón en un pozo cuadrado infinito unidimensional de ancho  $a$ :

$A \left( \sin \left( \frac{\pi x}{a} \right) \right)^3$ ,  $A \left[ \sqrt{\frac{2}{5}} \sin \left( \frac{\pi x}{a} \right) + \sqrt{\frac{3}{5}} \sin \left( \frac{2\pi x}{a} \right) \right]$ , y  $A e^{-\left( \frac{x-a/2}{a} \right)^2}$ ? En cada uno de los tres casos,  $A$  es una constante de normalización adecuada. Debe proporcionar un razonamiento claro para cada caso.



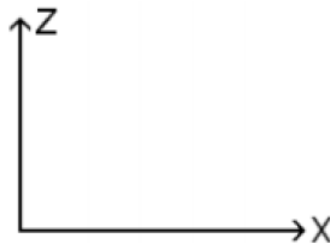
4. Considere la siguiente afirmación: “Por definición, el Hamiltoniano actuando sobre cualquier estado permitido del sistema  $\psi$  devolverá el mismo estado, es decir,  $\hat{H}\psi = E\psi$  donde  $E$  es la energía del sistema.” Explique por qué está en acuerdo o en desacuerdo con esta afirmación.

5. Notación:  $|\uparrow_z\rangle$  y  $|\downarrow_z\rangle$  representan los estados propios ortonormales de  $\hat{S}_z$  (la componente  $z$  del momento angular del spin) del electrón. SGA es una abreviación para el aparato de Stern-Gerlach. Ignore la fuerza de Lorentz sobre el electrón.

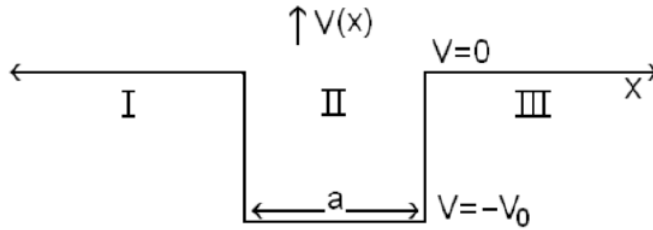
a) Un haz de electrones que se propaga a lo largo de la dirección  $y$  (entrando a la página) en estado de spin  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_z\rangle + |\downarrow_z\rangle)$  se envía a través de un SGA con un gradiente de campo magnético vertical en la dirección  $-z$ . Dibuje el patrón de nube de electrones que espera ver en una pantalla de fósforo distante en el plano  $x-z$ . Explique su razonamiento.



b) Un haz de electrones que se propaga a lo largo de la dirección  $y$  (entrando a la página) en estado de spin  $|\uparrow_z\rangle$  se envía a través de un SGA con un gradiente de campo magnético horizontal en la dirección  $-x$ . Dibuje el patrón de nube de electrones que espera ver en una pantalla de fósforo distante en el plano  $x-z$ . Explique su razonamiento.



6. El diagrama de energía potencial para un pozo cuadrado finito de ancho  $a$  y profundidad  $-V_0$  es mostrado a continuación:



a) Abajo, dibuje un bosquejo cualitativo de la función de onda del estado fundamental y comente sobre la forma de la función de onda en las tres regiones mostradas anteriormente.

b) Dibuje un bosquejo cualitativo de la función de onda de algún estado de scattering y comente sobre la forma de la función de onda en las tres regiones mostradas anteriormente.

# Anexo B: Pre-prueba en Español

Nombre: \_\_\_\_\_ Rol: \_\_\_\_\_

**Notación:**  $|\uparrow\rangle_z$  y  $|\downarrow\rangle_z$  representan los autoestados ortonormales de  $\hat{S}_z$  (el componente  $z$  del momento angular de spin). SGA es la abreviatura del aparato de Stern-Gerlach.

1. Un haz de átomos de plata neutros que se propaga a lo largo de la dirección  $y$  (hacia dentro de la página) en el estado de spin  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$  es enviado a través de un SGA con un gradiente de campo magnético vertical en la dirección  $-z$ . Dibuja el patrón que esperas observar en una pantalla de fósforo distante en el plano  $x$ - $z$  cuando los átomos impacten en la pantalla. Explica tu razonamiento.

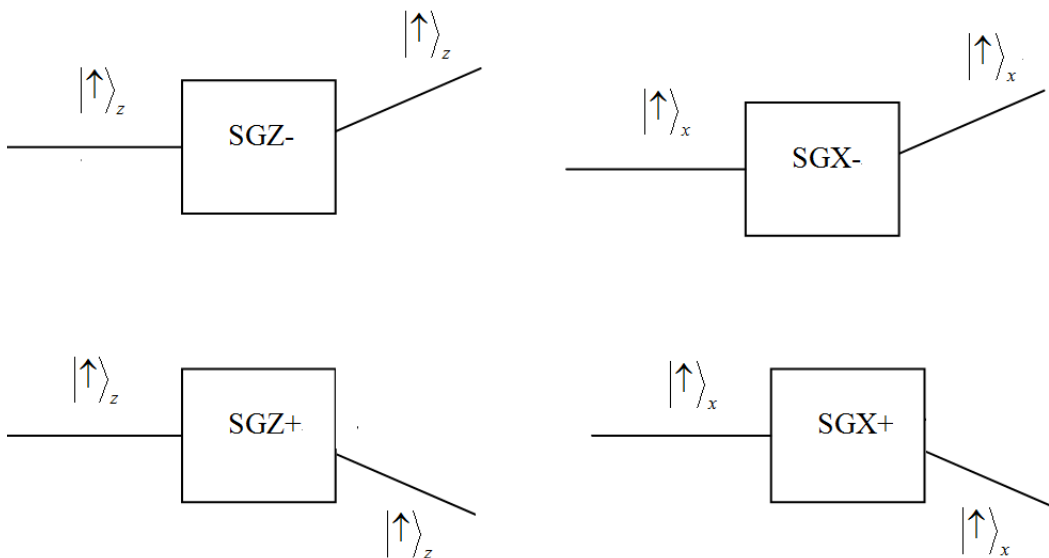


2. Un haz de átomos de plata neutros que se propaga a lo largo de la dirección  $y$  (hacia dentro de la página) en el estado de spin  $|\uparrow\rangle_z$  es enviado a través de un SGA con un gradiente de campo magnético horizontal en la dirección  $-x$ . Dibuja el patrón que esperas observar en una pantalla fosforescente distante en el plano  $x$ - $z$  cuando los átomos impacten en la pantalla. Explica tu razonamiento.

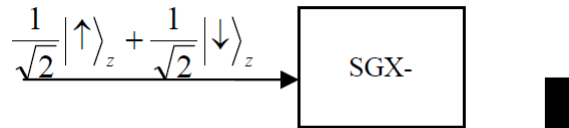


Las siguientes representaciones pictóricas se utilizan para un aparato de Stern-Gerlach (SGA). Si un átomo en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  (o  $|\downarrow\rangle_z$ ) pasa a través del SGZ-, será desviado en la dirección  $+z$  (o  $-z$ ). Si un átomo en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  (o  $|\downarrow\rangle_z$ ) pasa a través del SGZ+, será desviado en la dirección  $-z$  (o  $+z$ ). De manera similar, si un átomo con el estado  $|\uparrow\rangle_x$  pasa a través de SGX- (o SGX+), será desviado en la dirección  $+x$  (o  $-x$ ).

Las figuras a continuación muestran ejemplos de desviaciones a través de SGX y SGZ en el plano de la hoja. Sin embargo, la desviación a través de un SGX será en un plano perpendicular a la desviación a través de un SGZ. Esta naturaleza tridimensional real debe tenerse en cuenta en el tutorial.



3. Chris envía átomos de plata en un estado inicial de spin  $|\chi(0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$  uno a la vez a través de un SGX-. Chris coloca un detector “abajo” en la ubicación apropiada como se muestra a continuación. ¿Cuál es la probabilidad de que el detector se active cuando un átomo sale del SGX-?



4. Los átomos de plata en un estado inicial de spin  $|\chi(0)\rangle = |\uparrow\rangle_z$  pasan uno a la vez a través de dos aparatos SGA con los gradientes de campo magnético como se muestra a continuación. Se colocan dos detectores adecuados, uno después del primer SGA y el segundo al final, para detectar los átomos después de que pasen por ambos SGA. Los átomos que no se registran en el detector de “arriba” al final se recogen para otro experimento. Encuentra la fracción de átomos que son detectados en el detector de “arriba” al final y el estado de spin normalizado de los átomos que se recogen para otro experimento.



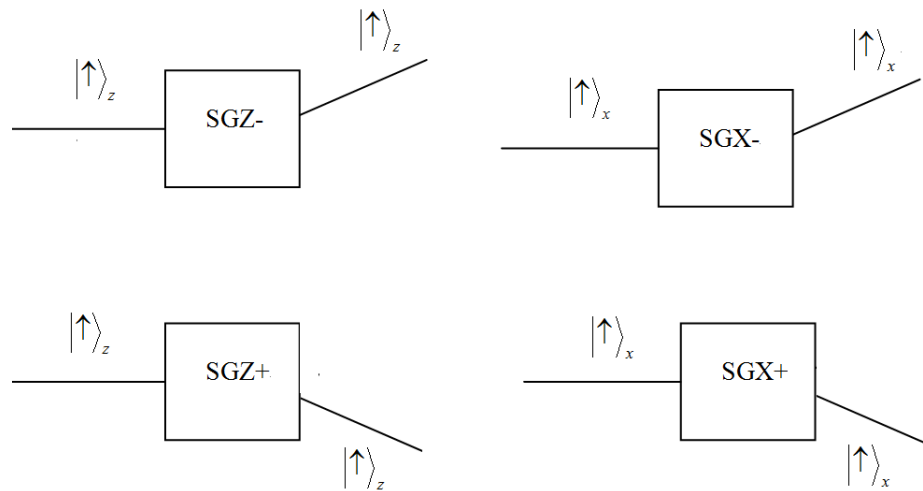
5. Supón que el haz A consiste en átomos de plata en el estado  $\chi = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$ , y el haz B consiste en una mezcla no polarizada en la que la mitad de los átomos de plata están en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  y la otra mitad en el estado  $|\downarrow\rangle_z$ . Diseña un experimento con aparatos SGA y detectores para diferenciar estos dos haces. Dibuja el esquema de tu experimento a continuación y explica cómo funciona.
6. Supón que tienes un haz de átomos en el estado de spin  $|\chi(0)\rangle = |\downarrow\rangle_x$ , pero necesitas preparar el estado de spin  $|\uparrow\rangle_x$  para tu experimento. ¿Podrías usar aparatos SGA y detectores para preparar el estado de spin  $|\uparrow\rangle_x$ ? Si es así, dibuja el esquema de tu configuración y explica cómo funciona. Si no, explica por qué.

## Anexo C: Tutorial en Español

**Nombre:** \_\_\_\_\_ **Rol:** \_\_\_\_\_

La figura a continuación ilustra las representaciones pictóricas utilizadas para un aparato de Stern-Gerlach (SGA). Si un átomo en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  (o  $|\downarrow\rangle_z$ ) pasa a través de un aparato de Stern-Gerlach con un gradiente de campo en la dirección negativa del eje z (SGZ $-$ ), será desviado en la dirección  $+z$  (o  $-z$ ). Por el contrario, si un átomo en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  pasa a través de un aparato de Stern-Gerlach con un gradiente de campo en la dirección positiva del eje z (SGZ $+$ ), será desviado en la dirección  $-z$  (o  $+z$ ). De manera similar, si un átomo en el estado  $|\uparrow\rangle_x$  pasa a través de SGX $-$  (o SGX $+$ ), será desviado en la dirección  $+x$  (o  $-x$ ).

Las figuras a continuación muestran ejemplos de deflexiones a través de los aparatos SGX y SGZ en el plano del papel. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la deflexión a través de un SGX estará en un plano perpendicular a la deflexión a través de un SGZ. Esta naturaleza tridimensional real debe tenerse en cuenta al responder las preguntas.



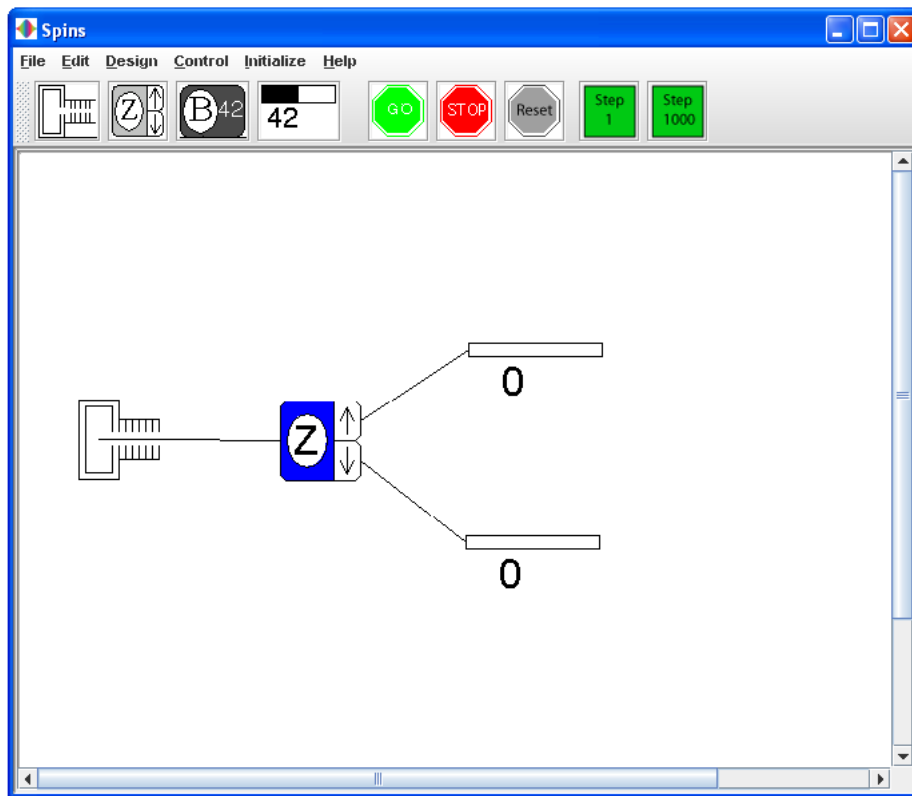
En este tutorial, aprenderemos los fundamentos de la mecánica cuántica a través del experimento de Stern-Gerlach y utilizaremos simulaciones para verificar los resultados del experimento de Stern-Gerlach después de hacer predicciones. Primero, hagamos algo de práctica.

### **Predicción:**

Un haz de átomos en el estado inicial  $|\uparrow\rangle_z$  pasa a través del SGZ- (gradiente de campo magnético en la dirección  $-z$ ). Se colocan dos detectores después del SGZ- para contar los átomos que salen del canal superior e inferior. ¿Cuál es la probabilidad de que cada detector registre un clic cuando un átomo pasa?

### Simulación:

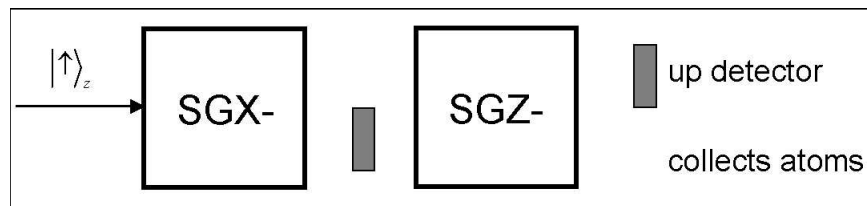
Haz doble clic en la flecha verde “z-up pass SGZ-” en la columna izquierda para verificar tu respuesta. En la parte superior de la ventana de simulación, haz clic en el botón verde “GO” para iniciar la simulación y haz clic en el botón rojo “STOP” para pausar la simulación. El botón “RESET” borra todos los conteos de los detectores a cero. Los botones “STEP1”/“STEP1000” envían 1 o 1000 partículas, respectivamente, a través del SGA (aparato de Stern-Gerlach).



Ahora comencemos con el tutorial. Ten en cuenta que, para todos los SGAs utilizados en la simulación, el gradiente de campo magnético está siempre en la dirección negativa. Las direcciones del gradiente de SGX, SGY y SGZ mostradas en la simulación están a lo largo de los ejes  $-x$ ,  $-y$  y  $-z$ . Por lo tanto, desviarán el estado de *spin-up* hacia el canal superior y el estado de *spin-down* hacia el canal inferior.

**Primero predice las respuestas al siguiente problema. Después de eso, el tutorial proporcionará una guía sistemática para resolver este problema.**

Envías átomos de plata en un estado de spin inicial  $|\uparrow\rangle_z$  uno a la vez a través de dos SGAs con gradientes de campo magnético como se muestra a continuación. Se colocan detectores adecuados como se indica. Un detector está entre los dos SGAs (en el canal inferior) y el otro después de ambos SGAs (en el canal superior). ¿Cuál es la probabilidad de que un solo átomo haga que el detector “arriba” registre un clic después de pasar por este sistema de dos SGAs? ¿Cuál es el estado de spin de los átomos recogidos en el canal inferior después del SGZ—?



**Paso 1: Escribe el estado inicial en una base más adecuada para analizar los efectos de pasar a través de SGX-. [Pista: La evolución temporal de un sistema es conveniente de analizar eligiendo los autovectores de energía como los vectores base. Si el hamiltoniano  $\hat{H}$  conmuta con el  $\hat{S}_x$ , los autovectores de energía son  $|\uparrow\rangle$  y  $|\downarrow\rangle$ ].**

1. ¿Cuál de las siguientes opciones da la relación correcta entre los autovectores normalizados de  $\hat{S}_z$  y  $\hat{S}_x$ ?

A.  $|\uparrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_x + i|\downarrow\rangle_x)$ ,  $|\downarrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_x - i|\downarrow\rangle_x)$

B.  $|\uparrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_x + |\downarrow\rangle_x)$ ,  $|\downarrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_x - |\downarrow\rangle_x)$

C.  $|\uparrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (a|\uparrow\rangle_x + b|\downarrow\rangle_x)$ ,  $|\downarrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (a|\uparrow\rangle_x - b|\downarrow\rangle_x)$ , donde  $a$  y  $b$  pueden ser cualquier número complejo que satisfaga  $|a|^2 + |b|^2 = 1$

D.  $|\uparrow\rangle_z = |\uparrow\rangle_x$ ,  $|\downarrow\rangle_z = |\downarrow\rangle_x$

2. John envía átomos de plata en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  a través de un SGX—. Coloca un detector “abajo” para bloquear algunos átomos de plata y recolecta los átomos que salen por el “canal superior”. ¿Cuál de los siguientes estados de spin normalizados ha preparado John en el “canal superior”? Piensa en cómo puedes usar los SGAs para verificar el estado. Dibuja una figura a continuación y explica. *Pista:* Si todos los átomos que pasan a través de un SGX son recogidos por el detector superior (o inferior), el estado de spin de los átomos es puramente  $|\uparrow\rangle_x$  (o  $|\downarrow\rangle_x$ ).

- A.  $|\uparrow\rangle_z$
- B.  $|\uparrow\rangle_x$
- C.  $\frac{1}{2} |\uparrow\rangle_z$
- D.  $\frac{1}{\sqrt{2}} |\uparrow\rangle_z$

→ **Simulación:** Ahora usa las dos simulaciones “z-up pass SGX-1” y “z-up pass SGX-2” para verificar tus respuestas. En la primera simulación, los átomos preparados en el “canal superior” pasaron por un SGZ-. En la segunda simulación, los átomos preparados en el canal superior pasaron por un SGX-. ¿Es tu predicción en la *pregunta 2* consistente con las observaciones en estas simulaciones? Si no, reconcilia la diferencia.

**Paso 2:** Encuentra la fracción de átomos que pasarían a través del segundo SGA (que no fueron absorbidos por el primer detector).

3. En la *pregunta 2*, ¿cuál es la probabilidad de que el detector “abajo” registre un clic cuando John envía un átomo de plata? ¿Depende esta probabilidad de cuánto tiempo ha permanecido el átomo en el campo magnético no uniforme, siempre que los detectores estén colocados en las ubicaciones apropiadas después del SGA? Explica.

- A. 1
- B. 0
- C. 0.5
- D. Está entre 0 y 0.5, pero la probabilidad exacta no puede inferirse con la información dada.

→ **Simulación:** Después de que hayas predicho la respuesta a la pregunta anterior, haz clic en la simulación “z-up pass SGX-” para verificar tus respuestas. En esta simulación, usamos detectores en ambos canales para estimar la probabilidad. Pero si deseas preparar los átomos en el estado  $|\uparrow\rangle_x$  o  $|\downarrow\rangle_x$ , entonces deberías usar solo un detector para bloquear el componente no deseado.

4. En la *pregunta 2*, si John mide  $\hat{S}_x$  para los átomos que preparó en el “canal superior”, ¿cuál es la probabilidad de medir  $+\frac{\hbar}{2}$ ?
- A. 1
  - B. 0
  - C. 0.5
  - D. Está entre 0 y 0.5, pero la probabilidad exacta no puede inferirse con la información dada.

→ **Simulación: Ahora puedes usar “z-up pass SGX-2” para verificar tus respuestas. Explica cómo tu observación es consistente con tu predicción. Si no es consistente, reconcilia la diferencia.**

**En las preguntas 1 a 4, has aprendido la relación entre los autovectores de  $\hat{S}_z$  y  $\hat{S}_x$ . Ahora aplica ideas similares a  $\hat{S}_z$  y  $\hat{S}_y$ . Responde las preguntas 5 a 8.**

5. ¿Cuál de las siguientes opciones da la relación correcta entre los autovectores normalizados de  $\hat{S}_z$  y  $\hat{S}_y$ ?
- A.  $|\uparrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_y + i|\downarrow\rangle_y)$ ,  $|\downarrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (i|\uparrow\rangle_y - |\downarrow\rangle_y)$
  - B.  $|\uparrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_y - i|\downarrow\rangle_y)$ ,  $|\downarrow\rangle_z = \frac{-i}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_y + i|\downarrow\rangle_y)$
  - C.  $|\uparrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (a|\uparrow\rangle_x + b|\downarrow\rangle_x)$ ,  $|\downarrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} (a|\uparrow\rangle_x - b|\downarrow\rangle_x)$ , donde  $a$  y  $b$  pueden ser cualquier número complejo que satisfaga  $|a|^2 + |b|^2 = 1$
  - D.  $|\uparrow\rangle_z = |\downarrow\rangle_y$ ,  $|\downarrow\rangle_z = |\uparrow\rangle_y$
  - E. Ninguna de las anteriores.
6. Verifica que  $\langle \uparrow | \downarrow \rangle_z = 0$  expresando  $|\uparrow\rangle_z$  y  $|\downarrow\rangle_z$  en la base de  $\hat{S}_y$ , como se muestra arriba.

7. John envía átomos de plata en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  a través de un SGY-. Él coloca un detector “abajo” para bloquear algunos átomos de plata y recolecta los átomos que salen por el “canal superior”. ¿Cuál es la probabilidad de que el detector “abajo” registre un clic para cada átomo enviado cuando John envía los átomos de plata?
- A. 1
  - B. 0
  - C. 0.5
  - D. Está entre 0 y 0.5, pero la probabilidad exacta no puede inferirse con la información dada.

→ **Simulación:** Ahora puedes hacer clic en la simulación “z-up pass SGY-” para verificar tus respuestas. Explica cómo tu observación es consistente con tu predicción. Si no es consistente, reconcilia la diferencia.

8. En el experimento anterior, ¿cuál de los siguientes estados de spin normalizados ha preparado John en el “canal superior”?
- A.  $|\uparrow\rangle_z$
  - B.  $|\uparrow\rangle_y$
  - C.  $\frac{1}{2} |\uparrow\rangle_y$
  - D. John no ha preparado nada. Todo ha sido bloqueado por el detector “abajo”.

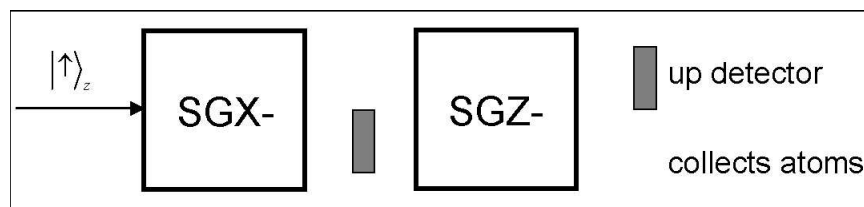
→ **Simulación:** Ahora intenta dos simulaciones “z-up pass SGY-1” y “z-up pass SGY-2” para verificar tus respuestas. En la primera simulación, los átomos preparados en el “canal superior” pasaron por un SGZ-. En la segunda simulación, los átomos preparados en el canal superior pasaron por un SGX-. Basado en las observaciones de las dos simulaciones, ¿es tu predicción en la *pregunta 8* consistente con la simulación?

**Paso 3: Como en el Paso 1, escribe el estado de spin de los átomos antes de SGZ en una base adecuada que ayude a analizar la evolución temporal en SGZ.**

9. El detector “abajo” entre SGX y SGZ colapsará el estado de los átomos de plata. Si el detector registra un clic, el átomo es absorbido por el detector. Si el detector no registra un clic, escribe el estado de spin después de pasar por SGX, justo antes de entrar en SGZ. Expresa este estado de spin en una base que sea la más adecuada para determinar la evolución temporal después de que los átomos hayan pasado por SGZ.

**Ahora resolvamos el problema dado al inicio de este tutorial.**

10. Envías átomos de plata en un estado de spin inicial  $|\uparrow\rangle_z$  uno a la vez a través de dos SGAs con gradientes de campo magnético como se muestra a continuación. Se colocan detectores adecuados como se indica. Un detector está entre los dos SGAs (en el canal inferior) y el otro después de ambos SGAs (en el canal superior). ¿Cuál es la probabilidad de que un solo átomo haga que el detector “arriba” registre un clic después de pasar por este sistema de dos SGAs?



- A. 1  
B. 0  
C. 0.5  
D. 0.25

→ **Simulación:** Ahora puedes hacer clic en la simulación “z-up pass SGX-1” para verificar tu respuesta. Ten en cuenta que, en lugar de recolectar átomos, hemos colocado detectores tanto en los canales superior como inferior al final para estimar la probabilidad. Explica si tu predicción es consistente con la observación.

**11.** Considera la siguiente conversación entre Andy y Caroline:

**Andy:** No entiendo la respuesta a la pregunta anterior (*pregunta 10*).

**Caroline:** Cuando un átomo en el estado  $|\uparrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_x + |\downarrow\rangle_x)$  pasa a través de SGX, cada autovector de  $\hat{S}_x$  se separa espacialmente. Si el detector entre SGX y SGZ no registra un clic, el estado de ese átomo de plata debe haber colapsado a  $|\uparrow\rangle_x$ . Dado que el átomo en este estado pasa a través de SGZ a continuación, debemos escribir  $|\uparrow\rangle_x = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$ . Puedes ver que  $|\uparrow\rangle_x$  es una superposición de los autovectores de  $\hat{S}_z$  con el mismo peso para  $|\uparrow\rangle_z$  y  $|\downarrow\rangle_z$ . Esto nos ayuda a encontrar la probabilidad de que el segundo detector registre un clic.

**Andy:** ¿Es un autovector de algún componente de spin, digamos  $|\uparrow\rangle_y$  para  $\hat{S}_y$ , una superposición de los autovectores de cualquiera de los otros dos componentes, digamos  $\hat{S}_z$  o  $\hat{S}_x$ , con el mismo peso?

**Caroline:** Sí. Puede haber un factor de fase como “i” (donde  $i = \sqrt{-1}$ ) cuando escribes  $|\uparrow\rangle_y$  en términos de la superposición de  $|\uparrow\rangle_z$  y  $|\downarrow\rangle_z$ , pero la probabilidad es la misma para ambos autovalores de  $\hat{S}_z$ .

¿Estás de acuerdo con Caroline? Explica.

**12.** En el experimento anterior (*pregunta 10*), recolectas los átomos de plata que no son bloqueados al final después de haber pasado por ambos SGAs. ¿Cuál de los siguientes es el estado de spin del átomo de plata que recolectas al final en el canal inferior?

**A.**  $|\uparrow\rangle_z$

**B.**  $|\downarrow\rangle_z$

**C.**  $|\downarrow\rangle_x$

**D.** No recolectas nada porque todos los átomos que pasan a través del segundo SGA son bloqueados por el detector.

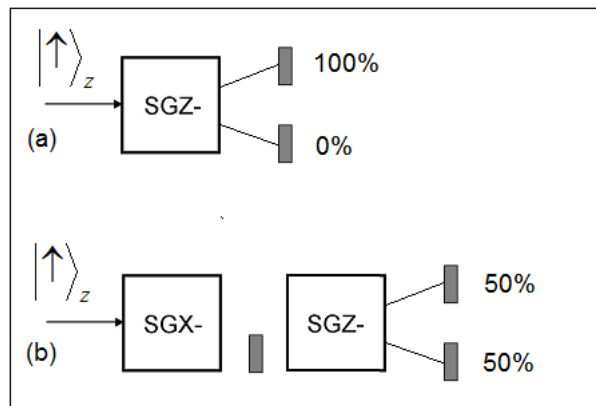
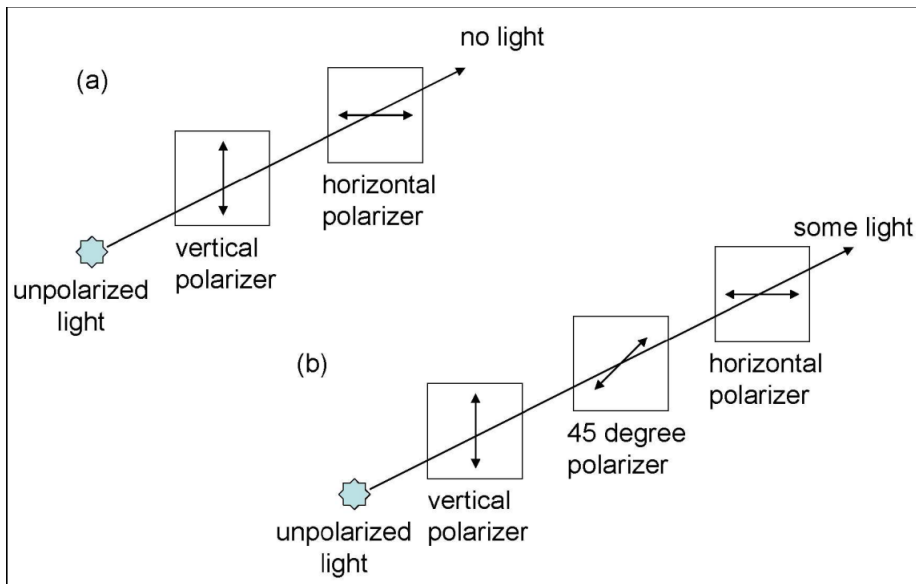
→ **Simulación:** Ahora puedes hacer clic en la simulación “z-up pass SGX- and SGZ-” para verificar tus respuestas. Explica cualquier discrepancia entre tu predicción y la observación. Ten en cuenta que el SGZ solo se inserta para verificar el estado final.

13. Considera la siguiente conversación entre Andy y Caroline:

**Andy:** Debe haber algo mal con la respuesta a la pregunta anterior (*pregunta 12*). ¿Cómo puede el  $|\uparrow\rangle_z$  que ingresamos dar  $|\downarrow\rangle_z$  al salir?

**Caroline:** No estoy de acuerdo. Si dejas que los átomos en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  pasen solo por SGZ, nunca obtendrás  $|\downarrow\rangle_z$  al salir. Sin embargo,  $|\downarrow\rangle_z$  se obtiene en el experimento anterior porque hemos insertado SGX en una etapa intermedia. Piensa en la analogía con la luz polarizada verticalmente que pasa directamente a través de un polarizador horizontal frente a pasar primero por un polarizador a  $45^\circ$ , seguido por un polarizador horizontal. No hay luz en la salida si la luz polarizada verticalmente pasa directamente a través de un polarizador horizontal. Por otro lado, si el polarizador a  $45^\circ$  está presente, la luz se polariza a  $45^\circ$  después del polarizador a  $45^\circ$ , que es una superposición lineal de polarización horizontal y vertical. Por lo tanto, algo de luz sale a través del polarizador horizontal colocado después del polarizador a  $45^\circ$ .

¿Estás de acuerdo con Caroline? Explica. Además, comenta qué tan buena es la analogía entre el estado de spin 1/2 de los átomos y el estado de polarización de los fotones.



Ahora considera el siguiente problema. Las preguntas 14 a 16 proporcionan los pasos para resolver este problema.

Considera dos situaciones como se indica a continuación.

**Situación 1:** El haz de átomos está en el estado puro  $\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$ .

**Situación 2:** El haz de átomos es una mezcla no polarizada, la mitad de la cual es  $|\uparrow\rangle_z$  y la otra mitad es  $|\downarrow\rangle_z$ .

Diseña un experimento para diferenciar estos dos haces de átomos. (Debes ser capaz de determinar después de tu experimento que uno de los haces está en un estado puro y el otro es una mezcla).

14. Lee la siguiente afirmación y responde las preguntas.

**Andy:** No hay diferencia entre átomos de plata en un estado “puro” dado por

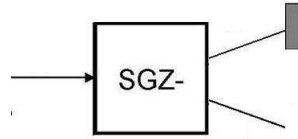
$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$$

y una mezcla no polarizada en la que la mitad de los átomos están en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  y la otra mitad están en el estado  $|\downarrow\rangle_z$ . Si hubiéramos enviado átomos en el estado de superposición

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$$

a través del SGZ, la mitad de ellos se habrían registrado en el detector “arriba” y la otra mitad se habrían recogido en el canal inferior. El resultado sería exactamente el mismo si hubiéramos enviado una mezcla 50/50 de  $|\uparrow\rangle_z$  y  $|\downarrow\rangle_z$  a través del SGZ. Por lo tanto, no hay forma de distinguir una mezcla de una superposición.

**Pregunta:** ¿Es correcta la afirmación anterior? Explica.



- 15.** Recuerda la analogía entre los estados de spin y los fotones polarizados en la *pregunta 13*. Supón que tienes un haz de fotones polarizados en estado puro con una polarización de 45 grados y otro haz de mezcla no polarizada, con la mitad de los fotones polarizados verticalmente y la otra mitad polarizados horizontalmente. ¿Te dirá un polarizador vertical o horizontal cuál de los haces está en un estado puro? ¿Qué polarizador podrías usar para diferenciar los dos haces de fotones?

- 16.** Basándote en la analogía para distinguir entre fotones polarizados en estado puro y un haz de mezcla de fotones, ¿qué tipo de SGA podrías usar para diferenciar los dos haces de átomos en la *pregunta 14*? Dibuja un esquema a continuación para explicar tu elección. No olvides colocar los detectores en las posiciones correctas. (Pista: Usa las simulaciones “z-up pass SGX” y “z-up+z-down pass SGX” para verificar tu respuesta. En la simulación “z-up+z-down pass SGX”, las partículas entrantes están en el estado puro  $\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$ .)

**Las preguntas 17 y 18 están relacionadas con la simulación “unknown state”. Ejecuta primero la simulación “unknown state”. Luego responde las siguientes preguntas.**



# Anexo D: Evaluación Final

Nombre: \_\_\_\_\_ Rol: \_\_\_\_\_

1. Un haz de átomos de plata en el estado de spin  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$  se dirige en la dirección  $+y$  pasando por un aparato de Stern-Gerlach con un gradiente de campo magnético en la dirección  $-z$ . ¿Qué patrón se espera en una pantalla en el plano  $x-z$ ?

- (a) Dos bandas en la dirección  $z$ , debido a la superposición de estados de spin.
- (b) Una sola banda en el plano  $x-z$ , ya que el estado está en superposición.
- (c) Dos bandas en el plano  $x-z$ , ya que el estado colapsa en  $|\uparrow\rangle_z$  o  $|\downarrow\rangle_z$  tras la medición.
- (d) Ningún patrón, ya que el estado es una combinación de  $|\uparrow\rangle_z$  y  $|\downarrow\rangle_z$ .
- (e) Dos bandas en el plano  $y-z$ , porque el haz se propaga en esa dirección.

2. Un haz de átomos en el estado de spin  $|\uparrow\rangle_z$  se mueve en dirección  $+y$  pasando por un aparato de Stern-Gerlach con un gradiente de campo magnético en la dirección  $x$ . ¿Qué resultado observamos en una pantalla en el plano  $x-z$ ?

- (a) Dos bandas en la dirección  $x$ , correspondientes a  $|\uparrow\rangle_z$  y  $|\downarrow\rangle_z$ .
- (b) Una sola banda en la dirección  $x$ , ya que el estado inicial es  $|\uparrow\rangle_z$ .
- (c) Dos bandas en el plano  $x-z$ , debido a la cuantización del spin en esa dirección.
- (d) Ninguna banda, porque el spin está definido en la dirección  $z$ .
- (e) Una sola banda en el plano  $y-z$ , ya que el campo magnético no afecta el estado.

3. Se envían átomos en el estado de spin  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$  en dirección  $+y$  por un aparato de Stern-Gerlach con gradiente de campo magnético en la dirección  $x$ . ¿Cuál es la probabilidad de que un átomo sea detectado en el estado  $|\uparrow\rangle_z$ ?

- (a) 0 %, porque el spin está en superposición en la dirección  $z$ .
- (b) 50 %, ya que el estado está igualmente repartido entre  $|\uparrow\rangle_z$  y  $|\downarrow\rangle_z$ .
- (c) 100 %, porque la medición en  $x$  no afecta el estado en  $z$ .
- (d) 25 %, dado que solo una fracción del estado es  $|\uparrow\rangle_z$ .
- (e) Depende de la orientación inicial del aparato.

4. Si un haz de átomos de plata en el estado  $|\uparrow\rangle_z$ , moviéndose en dirección  $+y$ , pasa primero por un aparato de Stern-Gerlach con el gradiente de campo magnético en la dirección  $z$  y luego por otro con gradiente de campo magnético en la dirección  $x$ , ¿qué patrón se espera en una pantalla final en el plano  $x-z$ ?

- (a) Una banda en  $z$ , debido a que el estado permanece  $|\uparrow\rangle_z$ .
- (b) Dos bandas en el plano  $x-z$ , ya que el estado colapsa en ambas direcciones.
- (c) Una banda en  $x$ , porque el estado ha colapsado en esa dirección.
- (d) Dos bandas en el plano  $x-z$ , porque el aparato de  $z$  no afecta al aparato de  $x$ .
- (e) Ningún patrón, ya que la medición en  $x$  destruye la información de  $z$ .

5. Tienes dos haces de átomos de plata: el haz A consiste en átomos en el estado  $X = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_z + |\downarrow\rangle_z)$ , mientras que el haz B es una mezcla no polarizada en la que la mitad de los átomos están en el estado  $|\uparrow\rangle_z$  y la otra mitad en el estado  $|\downarrow\rangle_z$ . Ambos haces pasan a través de un aparato de Stern-Gerlach con un gradiente de campo magnético en la dirección  $z$ . ¿Qué patrón se espera en una pantalla en el plano  $x-z$ ?

- (a) Haz A formará dos bandas en el plano  $x-z$  debido a la superposición de estados, mientras que el haz B formará una sola banda, ya que es una mezcla no polarizada.
- (b) Ambos haces formarán dos bandas en el plano  $x-z$ , ya que ambos estados,  $X$  y la mezcla no polarizada, colapsan en  $|\uparrow\rangle_z$  o  $|\downarrow\rangle_z$  al pasar por el aparato de Stern-Gerlach.

- (c) Haz A formará una sola banda en el plano  $x-z$ , ya que está en superposición, mientras que el haz B formará dos bandas debido a que es una mezcla de estados de spin.
- (d) Haz A no formará ningún patrón en el plano  $x-z$ , mientras que el haz B formará una banda continua, reflejando la naturaleza no polarizada.
- (e) Haz A formará dos bandas en el plano  $y-z$  y el haz B no mostrará ningún patrón alguno, dado que es una mezcla no polarizada.