

¿Alguien puede explicar el significado físico del espín?

E. N. García-Quiroz, S. N. Arellano-Ahumada, J. J. Martínez-Maldonado, D. Ramírez-Rosales

Departamento de Física, ESFM-IPN, CDMX, México

Teléfono (55) 5729-6000 Ext. 55050 Fax (55) 5729-55015 E-mail: torchynsnat@yahoo.com.mx

Resumen — Hablar de conceptos físicos para gente no iniciada en ciencias es una labor muy delicada, y discutir con expertos es peor aún. Hay cantidades físicas como tiempo, carga y espín que matemáticamente es relativamente fácil manejarlos, pero decir lo que realmente son es difícil. Estas cantidades las conocemos más por lo que hacen que por lo que son. Aquí nos tomamos el atrevimiento de intentar describir qué es el espín, esperando dar una pincelada de verdad de que el espín es una característica cuántica. Es una especie de momento angular. El valor de la magnitud de este momento angular es permanente. Al igual que la carga y la masa, el espín es una propiedad básica e invariable. Como método "didáctico", a veces podemos comparar el espín con la Tierra girando sobre su propio eje. Esta es una explicación adecuada, aunque no totalmente justificable matemáticamente.

Palabras Clave – Espín, momento angular, mecánica cuántica

Abstract — Talking about physical concepts for people not initiated in science is a very delicate task and arguing with experts is even worse. There are physical quantities like time, charge, and spin that are relatively easy to handle mathematically, but saying what they really are is difficult. We know these quantities more for what they do than for what they are. Here we take the audacity to try to describe what spin is, hoping to give a glimpse of the truth that spin is a quantum property. It is a kind of angular momentum. The magnitude value of this angular momentum is permanent. Like charge and mass, spin is a basic and unchanging property. As a "didactic" method, we can sometimes compare the spin with the Earth rotating on its own axis. This is an adequate explanation, although not entirely mathematically justifiable.

Keywords — Spin, angular momentum, quantum mechanics

I. INTRODUCCIÓN

Algunos estudiantes de licenciatura, maestría, doctorado y quizá hasta posdoctorados en física, como se imaginarán, han completado varios cursos de mecánica cuántica (y relacionados); no tienen problemas para trabajar con matrices de espín de Pauli, momento angular orbital L , momento angular de espín S y momento angular total J para física

nuclear o atómica [1]. Saben que si el espín es un número entero o semi-entero este determinará si la partícula obedece a las estadísticas de Fermi-Dirac o Bose-Einstein. Saben que es una característica fija e inherentemente verdadera de una partícula, al igual que la masa en relatividad especial. Pero nunca han entendido, o hemos entendido, lo que realmente significa el espín, en mecánica cuántica. ¿Qué es el espín, tal vez con una analogía? Este es el lamento que muchos de nosotros tenemos o alguna vez hemos tenido; en el entendido que no nos hemos dado por vencidos, o no aún.

Cuando a alguno de nosotros nos preguntan qué es el espín, nos ponemos un poco nerviosos y creo que nunca responderemos de manera más o menos clara a la pregunta; ya que explorar los recovecos del espín cuántico de forma "didáctica" es difícil, además, porque la intuición nos traicionará a la menor provocación y a veces sin la menor razón.

En verdad se tiene razón en estar del todo nervioso. El espín es una de esas cosas extrañas en la mecánica cuántica que suena como algo de nuestra experiencia ordinaria, y podríamos sentirnos tentados a pensar que nuestra intuición nos ayudará, pero no es así. De hecho, es mucho más probable que nuestra intuición nos dé un golpe en la nariz y nos robe a nuestra pareja. No confíes en tu intuición, al menos por un momento.

Los primeros modelos del átomo solían estar fuertemente influenciados por nuestra imagen del sistema solar: un núcleo masivo en el centro, rodeado de electrones que orbitan alrededor del núcleo como los planetas que giran alrededor del Sol [2].

Pero además de dar vueltas en sus órbitas, los planetas (electrones) tienen otro movimiento posible; esto es que, pueden girar alrededor de su propio eje, exactamente como lo hace la tierra viajando alrededor del Sol en un año, pero además girando alrededor de su propio eje en 24 horas. Con base en esta analogía, nuestro planeta tiene un momento angular orbital (alrededor del Sol/el núcleo) y además un momento angular de giro (alrededor de su propio eje), como se muestra en la Fig. 1.

Los electrones son partículas que tienen carga eléctrica. Cada vez que una carga eléctrica se mueve, se crea un campo magnético. No hay nada que puedas hacer al respecto: si mueves una carga, inducirás un campo magnético.

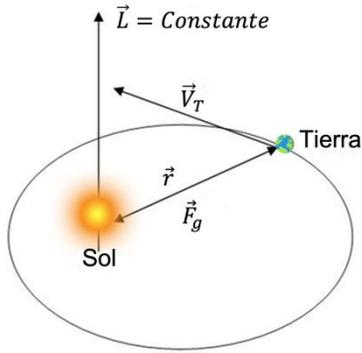


Fig. 1 Momento angular L de la Tierra, al girar alrededor del Sol.

Un electrón que se mueve en una órbita alrededor del núcleo es básicamente una pequeña espira con corriente eléctrica, y establece un campo magnético (Fig. 2) [3]. El espín del electrón establece otro campo magnético. Por lo tanto, los átomos se comportan como pequeños imanes. Los imanes pueden interactuar con otros imanes, lo que significa que los campos magnéticos externos pueden influir en los átomos.

II. EL DESCUBRIMIENTO DEL ESPÍN

En 1921 dos físicos llamados Otto Stern y Walther Gerlach hicieron un interesantísimo experimento (Fig. 3). Tomaron un haz de átomos de plata eléctricamente neutros y lo dejaron pasar a través de un campo magnético no uniforme. Este campo magnético desvió los átomos de plata como si desviara pequeños imanes dipolares si los arrojases a través del campo. Después de atravesar el campo, los átomos desviados golpean una fotoplaque y forman pequeños puntos visibles. Si alguien osadamente pregunta, ¿por qué utilizaron átomos de plata?, la osada respuesta es que los átomos de plata se comportan como átomos de hidrógeno con un solo electrón, pero son mucho más fáciles de manejar en el laboratorio y más fáciles de detectar con una placa fotográfica [4].

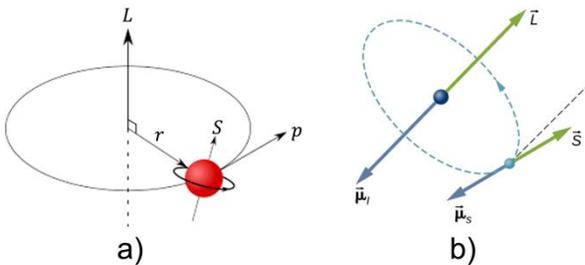


Fig. 2 a) Momentos angulares L y S de los electrones, en b) se muestran los momentos dipolares μ_l y μ_s , asociados a L y S respectivamente

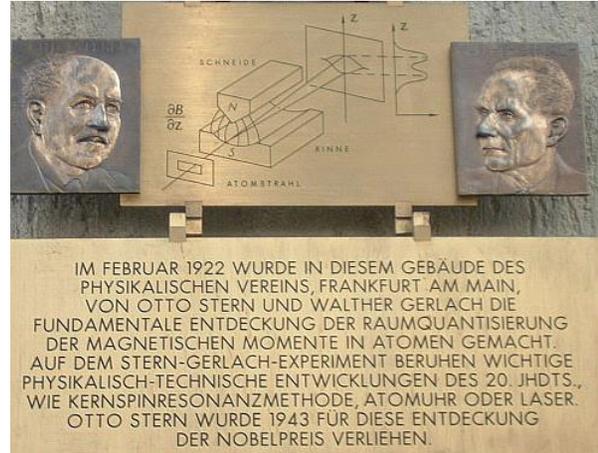


Fig. 3 Una placa en la universidad de Frankfurt, que conmemora el experimento de Stern y Gerlach

El resultado de este experimento fue totalmente inesperado y muy sorprendente. Por favor ten en cuenta que esos átomos acababan de salir de un horno donde se evaporó la plata, no tenían una orientación especial en el espacio y, por lo tanto, los espines de los electrones externos en estos átomos deberían apuntar en todas las direcciones posibles en el espacio.

Dependiendo de su orientación, la fuerza magnética que los pequeños imanes dipolares “sienten” es diferente y, por lo tanto, la desviación es diferente. Algunos de ellos estarían orientados de una manera en que la desviación fuese muy fuerte, otros tendrían una orientación que resultase en, prácticamente, ninguna desviación. Por lo que Stern y Gerlach esperaban un patrón como el representado como “expectativa clásica”, esto es, una mancha en una placa fotográfica producida por muchos puntos diminutos causados por átomos de plata que golpean la placa por todas partes. En cambio, lo que obtuvieron fue un patrón como el que se muestra en la Fig. 4: ¡los átomos solo golpearon un contorno y en el medio no había nada!

Solo había una explicación posible para ese comportamiento: los momentos magnéticos, y por lo tanto los espines, solo pueden tener dos orientaciones determinadas en el espacio. Para ser precisos, esta imagen solo es cierta si el momento orbital del electrón es cero ($l=0$, estado fundamental).

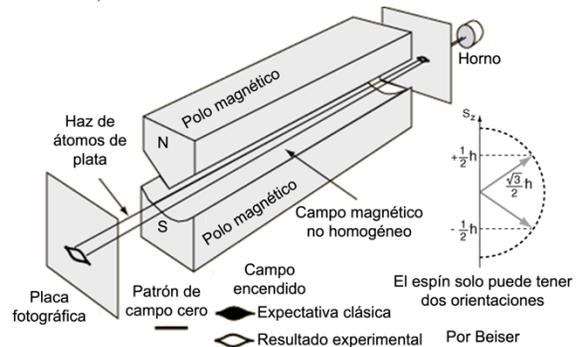


Fig. 4 Experimento de Stern y Gerlach

Ahora sabemos que todas las partículas tienen un espín fundamental. Al igual que la carga eléctrica o la masa, el espín ayuda a definir qué tipo de partícula es cada cual. El resultado es que algunas partículas, como electrones, positrones y quarks (también protones y neutrones, aunque no son fundamentales, sino que están hechos de quarks) tienen un espín de $1/2$, y son conocidos como "fermiones". Otros, como los fotones, los gluones y las partículas W y Z, tienen un espín igual a 1, y se conocen como "bosones". Resulta que los fermiones y los bosones se comportan de manera muy diferente entre sí.

Incluso si estás asintiendo en este punto, una voccecita en la parte posterior de tu cabeza probablemente esté diciendo algo como "¿ $1/2$ de qué?". Como regla general, nos ha resultado útil escuchar las voces que nos dicen que hagamos cosas, esto es, que intentemos explicar de manera "didáctica" qué es el espín.

III. LA IMAGEN MECÁNICO-CUÁNTICA DEL ESPÍN

A. Es como un pequeño trompo, pero realmente no lo es

Nos centraremos en los electrones, porque si entendemos el espín de los electrones, estaremos en excelente condición de entender lo demás. Imaginemos que el electrón es como un trompo o si lo prefieres como un giroscopio en miniatura, al menos para empezar. Este gira y gira, sin disminuir la velocidad. No importa lo que le hagas, no puedes acelerar o desacelerar un electrón que gira; lo único que sería posible sería cambiar su orientación y eso también está un poco en entredicho.

No importa lo que hagas, un electrón siempre tiene un espín de $1/2$. Pero ¿ $1/2$ de qué? Pues de un número conocido como "la constante de Planck reducida" ($\hbar = h/2\pi$). Este es un número increíblemente pequeño. Esto es aproximadamente $1.055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ o $0.000,000,000,000,000,000,000,000,000,105,457 \text{ J}\cdot\text{s}$, lo cual indica que no parece aplicable a una escala adaptada a humanos. Para expertos en momento angular, el segundero de un reloj de piso tiene un momento angular unas 10^{29} veces mayor que el electrón.

Ese es el *hecho extraño número uno*. Después de todo, normalmente puedes reducir la velocidad de los cuerpos que giran. Superman podría detener la rotación de la tierra, por ejemplo.

Visto de otro modo, es exactamente como un pequeño trompo girando (Fig. 5) [5]. El momento angular es una de esas cantidades que se conservan y por las que los físicos se desmayan. Al cambiar la dirección del espín de un electrón, el momento angular se transfiere a otra parte, como a otra órbita o a otro electrón.

Debido a que un electrón tiene carga y debido a que está "girando", crea un pequeño campo magnético. Podemos detectar el campo magnético del electrón o desviar electrones individuales usando otros imanes para determinar en qué dirección está "girando" el electrón.

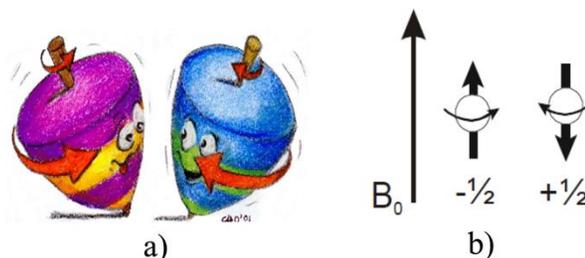


Fig. 5 a) Espines representados como trompos y b) espines con sus respectivos "giros"

Pero...

Normalmente, el momento angular toma la forma de la tendencia de un objeto a continuar girando a una velocidad determinada. La conservación de la cantidad de momento lineal a menudo se describe como "un objeto en movimiento permanece en movimiento y un objeto en reposo permanece en reposo", la conservación de la cantidad de momento angular a menudo se describe como "un objeto que gira permanece girando", y un objeto que no gira sigue sin girar".

Cualquier persona cuerda que piense en el momento angular está pensando en la rotación. Sin embargo, a escala atómica empiezas a encontrar algunos resultados extraños y contradictorios, y la intuición se vuelve tan útil como un teléfono celular sin batería. Aquí está la idea detrás de una de las imposibilidades:

Cada vez que usas una corriente y la haces circular en una espira, de manera equivalente, tomas un objeto cargado eléctricamente y lo haces girar, obtienes un campo magnético (Fig. 6). Este campo magnético toma la forma habitual del generado por un imán de barra, con un polo norte y un polo sur.

B. El campo magnético está raro

Toma una pequeña bola cargada y gírala. ¡Crearás un imán! No importa qué tan grande o pequeña hagas la bola (del material que sea), resulta que el campo magnético es un múltiplo exactamente predecible del momento angular. Solo hay un montón de constantes que involucran la carga y la masa de la pelota, pero no el tamaño de ella.

El problema es que, si imaginamos un electrón de la misma manera, este procedimiento no funciona en absoluto. El campo magnético es un factor 2 del momento angular, por cierto, un factor demasiado grande.

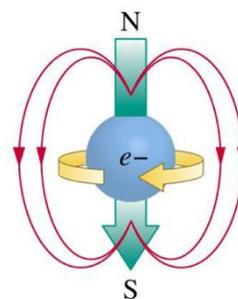


Fig. 6 Campo magnético generado por el "giro" del electrón

En realidad, es más como 2.0023193044 (Factor de Landé). Este número en realidad se ha medido con este increíble nivel de precisión y también se ha calculado teóricamente. Aparentemente estamos en lo cierto con toda esta "teoría del campo cuántico" porque, sin ningún afán de presunción, hacemos algunas predicciones muy precisas.

El *hecho extraño número dos* es que absolutamente no puedes pensar en el electrón como una pequeña esfera microscópica cargada. Los números simplemente salen mal [6].

C. El espín no está apuntando en ninguna dirección particular

Aunque los electrones tienen un espín fijo, se puede suponer que la componente del espín en una dirección particular puede tener cualquier valor que deseemos. Pensemos de esta manera: supongamos que tenemos una regla de 13 unidades, y descansé un extremo de la regla en un punto y el extremo superior en ángulo (Fig. 7). Podría medir la altura del extremo superior del suelo y, según el ángulo, obtendría entre 0 y 13 unidades.

Del mismo modo, la tierra gira, pero si alguna vez has visto un globo terráqueo, sabrás que está inclinado en un ángulo de unos 23.5 grados con respecto al plano orbital. En otras palabras, si mides el giro "arriba-abajo" de la Tierra, obtendrás algo menos que el total, ya que también tiene un poco de giro "de lado a lado".

Pero esto no funciona con electrones. Si se configura un pequeño campo magnético para desviarlos, se obtendrá que un electrón en particular está "girando" al 100% hacia arriba o hacia abajo también al 100%, pero nunca en el medio. Más extraño aún, no importa en qué dirección gires tu aparato de medición, siempre obtendrás el mismo resultado básico, en una dirección o en la otra, nunca en el medio.

Y aquí es donde entra en juego el *hecho extraño número tres*. Supongamos que mides un electrón cuando "gira" hacia arriba y luego tratas de medir el "giro" de izquierda a derecha. El sentido común te diría que ese número sería cero, ya que sabes que el electrón "gira" hacia arriba, no hacia la izquierda o hacia la derecha, pero antes se había advertido sobre el sentido común. Resulta que: a) la mitad de las veces medirás el electrón que está girando a la izquierda y la otra mitad lo medirás estando girando a la derecha, b) pero, si es izquierdo o derecho, es completamente aleatorio (Fig.8).

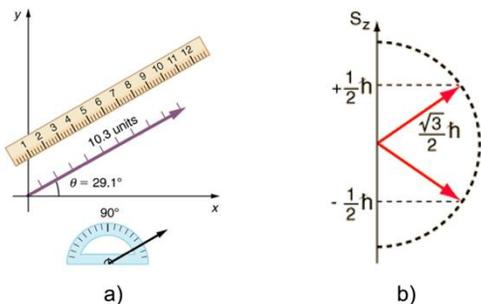


Fig. 7 a) Regla colocada con cierto ángulo. b) Espín "colocado" a distintos ángulos

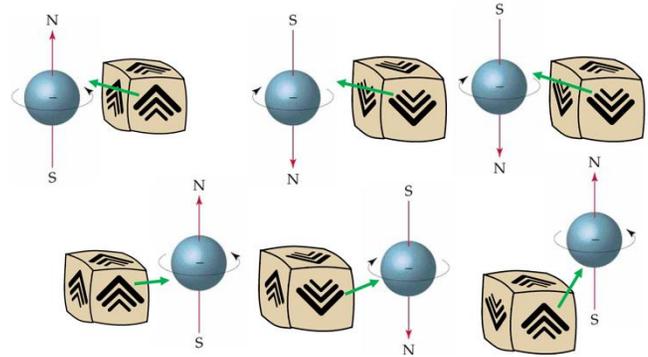


Fig. 8 El "giro" del electrón es aleatorio, como si se estuviera jugando a los dados

En realidad, nada en el universo podría haberte dicho cuál dirección elegiría el electrón. Este tipo de aleatoriedad realmente encabrió a Einstein (recuerda lo de que Dios no tira los dados).

D. Tienes que girar los electrones dos veces para que se vean "igual"

En el pasado, hemos hablado un poco sobre las funciones de onda de las partículas. El cuadrado de la función de onda te dice la probabilidad de encontrar una partícula en un lugar particular en un tiempo particular. Lo extraño de los electrones, y todas las partículas de espín 1/2, es que, si giras el universo entero alrededor de 360 grados, la función de onda tiene un signo menos delante (Fig.9) [7].

Ese es el *hecho extraño número cuatro*. Tienes que dar dos vueltas a un electrón antes de que se vea igual que cuando empezó.

No parece que debamos preocuparnos por esto. Después de todo, dado que solo nos preocupamos por el cuadrado de la función de onda, un signo menos no hace nada. El cuadrado de -2 es igual al cuadrado de 2.

Obtienes el mismo tipo de efecto si imaginas intercambiar dos electrones entre sí. Nada cambia, excepto que aparece un signo menos delante de toda la función de onda. Esto no parece gran cosa hasta que te das cuenta...

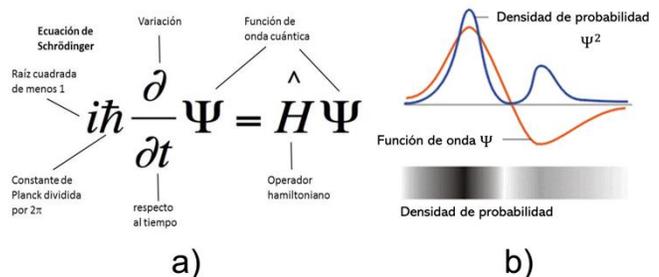


Fig. 9 a) Ecuación que cumple la función de onda de las partículas. b) Gráficas de la función de onda y la densidad de probabilidad

E. El signo menos es lo que te hace posible

Imagina dos electrones con sus espines en la misma dirección, uno exactamente encima del otro (y para los expertos que leen esto, ambos tienen el mismo momento también). Ahora imagina intercambiarlos. Para nosotros, nada parece haber cambiado absolutamente nada, pero para la mecánica cuántica, todo el universo está ahora en caos. La función de onda no debería cambiar en absoluto, ya que no se distingue un electrón de otro, pero de alguna manera se supone que debemos poner un signo menos al frente.

En resumen: no cambies nada, pero también multiplica por -1 . El único número para el que funciona es 0 . En otras palabras, 0 función de onda, por lo que 0 probabilidad, o ninguna posibilidad.

La otra forma de decir esto es que los electrones (y todos los fermiones: quarks, positrones, neutrinos, etc.) no pueden estar en el mismo lugar con el mismo espín. Este es el famoso "Principio de Exclusión de Pauli". Predice que los electrones en los átomos no pueden estar todos en el mismo estado, sino que deben estar en diferentes orbitales. Si este no fuera el caso, todo podría estar en el nivel más bajo y todos los elementos se comportarían como el hidrógeno. ¡Aburrido! (y no propiciar su existencia).

Los bosones, el otro tipo de partícula, no funcionan de esta manera. Intercambia dos bosones y no cambias nada. Gira un bosón solo una vez y todo vuelve a la normalidad. Son el espín 1 , que es básicamente una forma elegante de decir que se comportan de la manera esperada. Así son los bosones que se han descubierto hasta ahora. El bosón de Higgs (si existe) tiene espín 0 [8, 9], y el gravitón (si existe) sería de espín 2 , pero podemos ignorarlos hoy. A un bosón le gusta (en la medida en que a una partícula subatómica le puede gustar algo) estar en el mismo lugar y girar como sus hermanos. Esta es la razón por la que podemos obtener condensados de Bose – Einstein, que son básicamente un montón de bosones en un solo estado.

El punto es que el espín no es solo extraño, aunque lo es. El punto es que el espín está mucho más en el centro del cómo funcionan las cosas de lo que posiblemente hayas sospechado [10].

IV. CONCLUSIONES

Simplemente no existe una descripción clásica de esta propiedad enigmática. En cambio, el espín es una propiedad fundamental de nuestro universo, que se manifiesta solo en la intersección de la mecánica cuántica y la relatividad especial, sin metáforas macroscópicas. Solo a través de la maquinaria matemática de Dirac podemos hacer predicciones sobre los comportamientos de espín que necesitamos para hacer física. Por lo tanto, tenemos un caso desafortunado en el que la única forma de responder a la pregunta "¿Qué es el espín?" es simplemente señalar las matemáticas de Dirac y encogerse de hombros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está patrocinado en parte por la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN, proyecto SIP-20221306.

REFERENCIAS

- [1] Nouredine Zettili, "Quantum Mechanics, Concepts and Applications, 2nd. Edition", Ed. Compañía Editorial Continental, Jacksonville, 1994 pp 345-402
- [2] J. Wiener, "Science Teachers' Conceptions of Atomic Models," European Journal of Mathematics and Science Education, vol. 1, no. 2, pp. 67–80, Dec. 2020.
- [3] D. Haliday, R. Resnick, K. S. Krane, "Física, volumen 2, cuarta edición (versión ampliada)", Ed. Compañía Editorial Continental, ciudad, 1994 pp 541-546
- [4] E. D. Commins, "Electron Spin and Its History," *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, vol. 62, no. 1, pp. 57, Oct. 2012.
- [5] C. T. Sebens "How Electrons Spin", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, in press.
- [6] J. Avendaño, L. Pérez Trejo, A. F. Méndez Sánchez, "El espín en la enseñanza ¿rota el electrón?", *Memorias XXVI Reunión Nacional de Física y Matemáticas* 26, pp 221-226 (2021)
- [7] N. Butto, "A New Theory for the Essence and Origin of Electron Spin," *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, vol. 7, no. 1, pp. 1459-1471, 2021.
- [8] M. McCullough, "The Higgs Adventure: Five Years In", *CERN Courier*, vol. 57, no. 6, pp 34-39, July 2017.
- [9] ATLAS Collaboration. "Evidence for the spin-0 nature of Higgs boson using ATLAS data", *Physics Letters, B* 726, pp 120-144, 2013.
- [10] J. C. A. Boeyens, "Understanding Electron Spin" *Journal of Chemical Education*, vol. 72, no. 5, pp. 412–415, May. 1995.