

Propagación del fotón en un campo magnético

Autoría principal

Hugo Pérez Rojas¹, Elizabeth Rodríguez Querts¹

Otros autores

Aurora Pérez Martínez¹, Lídice Cruz Rodríguez².

Colaboradores

Dr. Jose Abdalla Helayël Neto³,
Dr. Ricardo Gaitán⁴, Dra. Suemi Rodríguez Romo⁴.

Entidad ejecutora principal

¹ Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF).

Entidades participantes

²Facultad de Física, Universidad de La Habana (FF-UH).

³Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.

⁴Centro de Investigaciones Teóricas, FES-Cuautitlán-UNAM.

Autor para correspondencia

Dr. Hugo Pérez Rojas
ICIMAF - Calle E No. 309 esq. A 15, Vedado, La Habana
e-mail: hugo@icimaf.cu

Aporte científico de cada autor al resultado

- ✓ Dr **Hugo Pérez Rojas** (34%): Es autor de todos los trabajos. Aportó las principales ideas que dieron lugar a los mismos. Contribuyó a la interpretación física de los resultados (48%) y a la realización de los cálculos analíticos (27%) y numéricos (10%).
- ✓ Dra. **Elizabeth Rodríguez Querts** (34%). Es autora de todos los trabajos. Contribuyó a la interpretación física de los resultados (27%) y a la realización de los cálculos analíticos (37%) y numéricos (60%).
- ✓ Dra. **Aurora Pérez Martínez** (18%). Es autora de 2 trabajos. Contribuyó a la interpretación física de los resultados (15%) y a la realización de los cálculos analíticos (20%) y numéricos (15%).
- ✓ MSc. **Lídice Cruz Rodríguez** (10%). Es autora de 1 trabajo y de 1 tesis de maestría. Contribuyó a la interpretación física de los resultados (5%) y a la realización de los cálculos analíticos (10%) y numéricos (15%).

Resumen

Este trabajo se basa en el estudio de las propiedades del operador de polarización de la electrodinámica cuántica (QED) en un campo magnético externo, calculado en la aproximación de un lazo para un medio y para el vacío.

Se demuestra que el momento magnético anómalo del fotón, introducido como una magnitud escalar en "Propiedades paramagnéticas del fotón y del vacío cuántico" (Premio ACC 2009), tiene un carácter tensorial y es proporcional al tensor del campo electromagnético externo. A partir de una expresión aproximada para los valores

propios del operador polarización, se obtienen soluciones analíticas para el momento magnético de fotón, válidas para pequeños momentos y/o campos magnéticos intensos. Se analizan además algunas consecuencias físicas de la existencia de un momento magnético anómalo para el fotón observable. Una de ellas es que un gas de fotones tendría una magnetización no nula y ésta podría ser del orden del campo magnético externo para densidades suficientemente altas, lo cual conduciría a la auto magnetización del sistema. Además, se examina la posibilidad de decaimiento del vacío de la electrodinámica cuántica en la región de absorción (más allá del primer umbral para la creación de pares electrón-positrón), para campos magnéticos muy intensos. Se reinterpreta el paramagnetismo del fotón como un corrimiento al rojo magnético, en analogía con el conocido efecto gravitacional.

Se estudia la rotación del vector de polarización de la luz en un medio relativista en dos casos: los efectos Faraday y Cotton-Mouton. El primero se produce cuando el medio no es invariante ante la conjugación de carga y el segundo se debe al rompimiento de la simetría espacial en el medio. Se calcula también el ángulo de rotación de Faraday para un sistema de fermiones relativistas sin masa (2 + 1) dimensional (tipo grafeno), mediante una compactificación a lo largo de la dimensión paralela al campo magnético. Se derivan las expresiones para las componentes del tensor de conductividad dinámico y estático para el caso de propagación del fotón en la dirección paralela al campo magnético externo y se demuestra la relación entre el efecto Faraday y efecto Hall cuántico (QHE) en (3+1) y (2+1) dimensiones.

Los resultados científicos que se presentan han sido publicados en 5 revistas especializadas de alto impacto (7 artículos) y presentados en 10 eventos internacionales de reconocido prestigio. Una parte de éstos conforman 1 tesis de Maestría.

Comunicación Corta

Introducción

La ecuación de Schwinger-Dyson que describe el movimiento del fotón en el vacío cuántico, contiene como elemento adicional a la teoría clásica la interacción del fotón con el campo electrón-positrón en el vacío. Este es un tensor de segundo orden -el operador de polarización o energía propia del fotón- que describe la creación y aniquilación espontánea de infinitos posibles pares virtuales electrón-positrón en el vacío. La solución de la ecuación de Schwinger-Dyson en ausencia de campo magnético da como consecuencia la llamada ecuación del cono de luz, que describe al fotón como una partícula vectorial sin masa que se mueve a la velocidad de la luz en el vacío, de acuerdo a la ecuación $\omega^2 - k^2 = 0$. En presencia de un campo magnético constante y uniforme la situación cambia drásticamente. La energía propia del fotón está descrita ahora por la contribución de electrones y positrones virtuales que se mueven de acuerdo con su dinámica de interacción con el campo magnético. El movimiento de estos pares a lo largo del campo es similar al caso de campo $\mathbf{B}=0$. El movimiento perpendicular, sin embargo, está limitado. Es un movimiento oscilatorio, cuyos estados se caracterizan por números de Landau $n=0,1,2,\dots$ y espín paralelo y antiparalelo al campo \mathbf{B} , $\sigma=\pm 1$. El fotón coexiste con el ente resultante de la polarización del vacío, compuesto de los pares virtuales que se crean y aniquilan

espontáneamente y por ello sería más apropiado llamarle cuasi-fotón al fotón que se propaga en el vacío cuántico magnetizado.

La ecuación de dispersión resultante para el fotón fue estudiada por A.E. Shabad en 1975, en la región cercana al primer umbral de absorción, determinado por la frecuencia $\omega_c = 2mc^2$. Previamente Shabad había obtenido la expresión exacta para el tensor de polarización en la aproximación de un lazo, así como los modos de propagación. Sólo hay dos modos físicos en el vacío y tres en un medio, para cada dirección de propagación del fotón. Estos modos tienen diferentes polarizaciones e índices de refracción.

En nuestro trabajo [1], se obtienen las ecuaciones de dispersión para bajas frecuencias $\omega \ll \omega_c$ y campos pequeños $B \ll B_c$ y se calcula la expresión general para el momento magnético del fotón (MMF). La presente propuesta está esencialmente motivada por estos resultados y su objetivo es estudiar algunos aspectos de la propagación del fotón en un campo magnético externo, en el vacío cuántico y en medios relativistas de (3+1) y (2+1) dimensiones, en el marco de la QED.

Resultados

Carácter tensorial del MMF

En [2] se demuestra que el momento magnético anómalo del fotón se puede definir como un pseudotensor que depende linealmente de las componentes del tensor del campo electromagnético. Se introduce una aproximación cúbica en k^2 para las curvas de dispersión, válida en la mayor parte de la región de transparencia (pequeños valores del momento perpendicular k y/o campos magnéticos intensos) y éstas se comparan con las curvas exactas, obtenidas para los autovalores del operador de polarización calculados en la aproximación de un lazo. Se encuentra que en la región de transparencia el carácter paramagnético del fotón se mantiene para campos mayores que el campo crítico de Schinger $B > B_c = m^2/e$.

Corrimiento al rojo magnético

La existencia de un pequeño momento magnético anómalo del fotón también se puede interpretar como un corrimiento al rojo, en analogía con el conocido efecto gravitacional [2]-[3]. La interacción del fotón con los pares virtuales electrón-positrón magnetizados provoca una disminución del momento transversal del fotón. El corrimiento al rojo de la frecuencia del fotón implica un cambio en la medición del tiempo al variar el campo magnético.

Auto-magnetización del gas de fotones.

Para fotones con momento magnético anómalo, a densidades suficientemente altas, la contribución del gas de fotones a la magnetización podría ser del orden del campo magnético externo, conduciendo a la auto-magnetización del gas de fotones. En [4] se discute este modelo, en conexión con el caso de la radiación en equilibrio a altas temperaturas, coexistiendo con los pares electrón-positrón. También se hace una comparación con otros sistemas relativistas en un campo magnético externo.

Decaimiento del vacío de la QED

En [5] se demuestra que en la región más allá del primer umbral para la creación de pares electrón-positrón, para campos magnéticos suficientemente intensos, el vacío se vuelve inestable y decae en pares electrón-positrón. Este efecto podría ser relevante en las emisiones de rayos gamma en estrellas magnetizadas. Además, actualmente la Electrodinámica Cuántica en el vacío inestable está atrayendo el interés de numerosos investigadores y la posibilidad de observar en laboratorios terrestres el decaimiento del vacío para campos eléctricos críticos está cada vez más cerca de convertirse en realidad, gracias al desarrollo de la tecnología de láseres de pulso de alta potencia.

Rotación del vector de polarización del fotón

Se calcula en [6] la rotación del vector de polarización para la luz que se propaga en un campo magnético externo en un medio relativista; se analizan los efectos Faraday y Cotton-Mouton. La rotación de Faraday es circular y se produce cuando el medio no es invariante ante la conjugación de carga. La rotación de Cotton-Mouton ocurre debido a la ruptura de la simetría espacial en un medio transparente y describe una especie de elipse, cuyos ejes varían periódicamente en el tiempo. Los cálculos se hacen a partir de la expresión para el operador de polarización en el vacío y en un gas electrón-positrón.

Relación entre el efecto Faraday y la conductividad de Hall en (3+1)D y (2+1)D

Posteriormente se obtiene el ángulo de Faraday para sistemas de (3+1) y (2+1) dimensiones (D), a partir del mismo formalismo: el tensor de conductividad relativista en (3+1)D para un sistema de fermiones masivos. Se muestra la conexión entre la conductividad Hall y el efecto Faraday y se demuestra que el ángulo de Faraday está cuantizado [7]. En otro trabajo [8] se había estudiado la conductividad de Hall para un sistema de fermiones relativistas no masivos en (2+1)D, a partir de una compactificación en la dirección paralela al campo magnético de los escalares asociados al operador de polarización en (3+1)D. Estos resultados se generalizan en [7] al caso no estático ($\omega \neq 0$) y se calculan las componentes diagonales (conductividad de Ohm) y no diagonales (conductividad de Hall) del tensor de conductividad para la propagación del fotón en la dirección paralela al campo magnético. Este estudio tiene aplicaciones directas en la física de la materia condensada, para el estudio de sistemas cuasi-planos como tipo grafeno, pues las propiedades teóricas de este material corresponden esencialmente a las de un sistema de fermiones relativistas en (2+1)D. El efecto Faraday gigante ha sido detectado experimentalmente en el grafeno [9].

Referencias

- [1] H. Pérez Rojas, E. Rodríguez Querts. Phys. Rev. D 79 093002, 2009.
- [2] H. Pérez Rojas, E. Rodríguez Querts. Eur. Phys. J. C 74 2899, 2014.
- [3] H. Pérez Rojas, E. Rodríguez Querts, J.A. Helayël-Neto. Int. J. Mod. Phys. E 20 176-181, 2011.
- [4] H. Pérez Rojas, E. Rodríguez Querts. Int. J. Mod. Phys. E 20 168-175, 2011.
- [5] H. Pérez Rojas, E. Rodríguez Querts. Int. J. Mod. Phys. D 19 1711-1719, 2010.
- [6] H. Pérez Rojas, E. Rodríguez Querts. Int. J. Mod. Phys. D 19 1599-1608, 2010.

- [7] L. Cruz Rodríguez, A. Pérez Martínez, H. Pérez Rojas, E. Rodríguez Querts. Phys. Rev. A 88 052126, 2013.
- [8] A. Pérez Martínez, E. Rodríguez Querts, H. Pérez Rojas, R. Gaitan, S. Rodriguez-Romo. J. Phys. A 44 445002, 2011.
- [9] Iris Crassee, Julien Levallois, Andrew L. Walter, Markus Ostler, Aaron Bostwick, Eli Rotenberg, Thomas Seyller, Dirk van der Marel, Alexey B. Kuzmenko, Nat. Phys. 7, 48 (2011).