

Ein Stern-Gerlach-Experiment für langsames Licht

Der Nachweis des quantisierten magnetischen Moments von Elektronen durch Stern und Gerlach gilt als eines der grundlegendsten Experimente der Quantentheorie. Aber auch Photonen können ein solches magnetisches Moment besitzen, wenn sie mit einem atomaren Ensemble wechselwirken.

Wenn Licht auf transparente, lineare Medien trifft, ändert es seine Eigenschaften wie Wellenlänge, Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit. Dieser wohlbekannte Effekt der linearen Optik wird üblicherweise durch einen makroskopischen Brechungsindex beschrieben. Eine alternative, mikroskopische Erklärung beruht auf einem Quasiteilchenbild. Aufgrund der Wechselwirkung des Lichts mit dem Medium wird ein Teil der ursprünglich elektromagnetischen Anregung in eine solche des Mediums umgewandelt und dabei aus einem Photon eine gekoppelte Licht-Materie-Anregung – ein Quasiteilchen – erzeugt. Je mehr Energie transferiert wird, um so mehr ändern sich die Ausbreitungseigenschaften des Lichtes. Auch wenn das Quasiteilchenbild in Bezug auf die klassische Lichtausbreitung äquivalent zu einer Beschreibung mit einem Brechungsindex ist, erlaubt es doch ein wesentlich besseres Verständnis der Quantenaspekte dieses Prozesses. Auf der Basis eines geeigneten Quasiteilchenbildes lässt sich beispielsweise die vor kurzem an einzelnen Photonen demonstrierte Möglichkeit verstehen, den Quantenzustand von Licht auf ein atomares Gas zu übertragen, ihn dort zu speichern und nach einiger Zeit wieder zurück in Photonen zu verwandeln [1, 2].

Kürzlich ist nun an der Universität Tübingen ein weiterer Nachweis des Quasiteilchencharakters von Licht in linearen Medien gelungen [3]. In einer Art Stern-Gerlach-Versuch setzten Leon Karpa und Martin Weitz einen Laserstrahl in einem atomaren Gas einem inhomogenen Magnetfeld aus. Da im Gegensatz zu Elektronen der Spin von Photonen nicht mit einem magnetischen Moment verbunden ist, hat ein Magnetfeld keinen Einfluss auf die Propagation von Photonen im Vakuum. Nicht so dagegen in

einem Atomgas, in dem die Photonen an Übergänge koppeln, welche Zustände mit verschiedenen magnetischen Momenten enthalten. Die bei dieser Wechselwirkung erzeugten Quasiteilchen besitzen dann ein definiertes magnetisches Moment und zeigen einen Stern-Gerlach-Effekt. Zum Nachweis der Lichtablenkung im inhomogenen

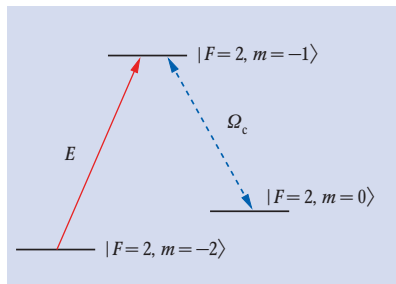


Abb. 1: Niveauschema der verwendeten Rubidium-Atome. Die kohärente Kopplung des angeregten Zustandes $|F=2, m=-1\rangle$ an den metastabilen Zustand $|F=2, m=0\rangle$ führt zu induzierter Transparenz und reduzierter Gruppengeschwindigkeit für das Probefeld E .

Magnetfeld benutzte das Tübinger Team den Effekt der elektromagnetisch induzierten Transparenz (EIT) [4], der es erlaubt, Licht auf Geschwindigkeiten abzubremsen, die der alltäglichen Erfahrung zugänglich sind. Dabei wird ein resonantes, atomares Medium, in diesem Fall Rb-Atome, durch das Einstrahlen eines starken Lasers für das Probefeld E transparent. Dazu muss der Laser das obere Energieniveau $|F=2, m_F = -1\rangle$ mit einem dritten stabilen, aber unbesetzten Zustand $|F=2, m_F = 0\rangle$ koppeln (Abb. 1).

Mit der Unterdrückung der Absorption geht eine starke normale Dispersion des Brechungsindex und somit eine substantielle Reduktion der Gruppengeschwindigkeit einher. Dabei wird jedes Photon, das aus dem Vakuum auf die Mediengrenze trifft, in ein sog. Dunkelzustandspolariton Ψ umgewandelt. Diese Quasiteilchen bestehen aus einer Superposition elektromagnetischer und kollektiver atomarer Anregungen, wobei der Mischungswinkel θ durch die Stärke des Kontrolllasers Ω_c festgelegt ist. Die Gruppengeschwindigkeit des Polaritons ist dabei durch den elektromagnetischen Anteil gegeben $v_{gr} = c \cos^2\theta$, während das magnetische Moment μ_p einzig durch den atomaren Anteil bestimmt wird. Seine Größe hängt von den magnetischen Momenten der an dem

atomaren Spin-Übergang beteiligten Zustände ab. Für das hier gewählte und in Abb. 1 gezeigte Kopplungsschema ergibt sich $\mu_p = \mu_{Bohr} \sin^2\theta$.

Karpa und Weitz benutzen in ihrem Experiment eine Gaszelle der Länge L , die sich in einem inhomogenen Magnetfeld der Stärke 116 mG mit einem Gradienten $dB_z/dx \approx 910 \mu\text{G}/\text{mm}$ befindet. Aufgrund

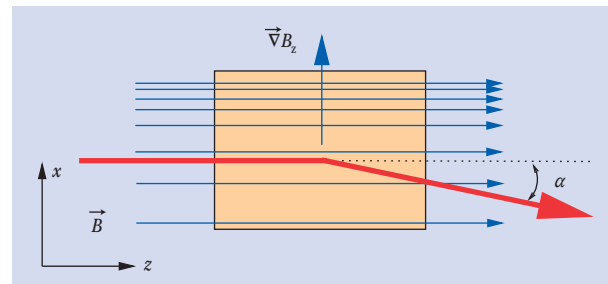


Abb. 2: Bei dem neuen Stern-Gerlach-Experiment propagiert ein Lichtstrahl durch eine Zelle mit Rubidiumgas und wird dabei unter dem Einfluss eines inhomogenen Magnetfeldes abgelenkt.

des Magnetfeldgradienten erfahren die Polaritonen eine seitliche Kraft $\vec{F} = \nabla(\vec{\mu}_p \cdot \vec{B})$ (Abb. 2). Der resultierende Ablenkwinkel ergibt sich dabei näherungsweise als Quotient von übertragenem Impuls zu Lichtimpuls, $\alpha \approx (\Delta p/p)$, mit dem Licht- bzw. Polaritonimpuls $p = \hbar k$:

$$\alpha = (L \mu_p / v_{gr} \hbar k) (dB_z/dx).$$

Da der Winkel α umgekehrt proportional zur Gruppengeschwindigkeit v_{gr} ist, setzt eine signifikante Ablenkung hinreichend „langsames“ Licht voraus. Für die im Experiment benutzten Gruppengeschwindigkeiten in der Größenordnung von 100 m/s ergeben sich Ablenkungen bis etwa 10^{-4} rad. Zur Bestimmung des magnetischen Moments der Dunkelzustandspolaritonen μ_p variierten die Autoren die Gruppengeschwindigkeit durch Variation der Intensität des Kopplungslasers Ω_c .

Mit ihrem Stern-Gerlach-Experiment für langsames Licht ist Karpa und Weitz ein eleganter Nachweis des Quasiteilchencharakters von Photonen in linearen Medien gelungen.

JÜRGEN KÄSTEL UND
MICHAEL FLEISCHHAUER

- [1] T. Chaneliere et al., Nature **438**, 833 (2005)
- [2] M. Eisaman et al., Nature **438**, 837 (2005)
- [3] L. Karpa und M. Weitz, Nature Physics **2**, 332 (2006)
- [4] M. Fleischhauer, J. Marangos und A. Imamoglu, Rev. Mod. Phys. **77**, 633 (2005)

Dipl.-Phys. Jürgen Kästel und Prof. Dr. Michael Fleischhauer, AG Theoretische Quantenoptik, Fachbereich Physik, Technische Universität Kaiserslautern, 67663 Kaiserslautern