
ปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์สนามใกล้: จากทัศนศาสตร์แบบดั้งเดิมถึงทัศนศาสตร์ควอนตัม
Optical Near-Field Effects: Classical to Quantum Optics

สรายุทธ เดชะปัญญา*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Sarayut Deachapunya*

Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University

บทคัดย่อ

ปรากฏการณ์ทาร์บอท เลา และทาร์บอท-เลา เป็นปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์สนามใกล้ ซึ่งสามารถใช้ในการวิจัยทัศนศาสตร์ได้ทั้งกับแสง อัลตราซาวด์ รังสีเอ็กซ์ รวมถึงอะตอม และโมเลกุลในระบบที่ไม่ต้องใช้เลนส์ โดยปรากฏการณ์นี้ใช้ได้ทั้งกรณีทัศนศาสตร์แผนเดิม และทัศนศาสตร์ควอนตัม บทความฉบับนี้จะรวบรวมงานวิจัยของทัศนศาสตร์สนามใกล้นี้ โดยเริ่มจากทฤษฎีของทาร์บอท เลา และทาร์บอท-เลา ตลอดจนลวดลายพรมของแสง หรือลวดลายพรมควอนตัม การนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องมือ ตัวอย่างเช่น เครื่องมือวัดระยะทาง การถ่ายภาพรังสีเอ็กซ์ การวัดความยาวโฟกัสของเลนส์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้พิสูจน์ทฤษฎีควอนตัม โดยเฉพาะทัศนศาสตร์ควอนตัม ในเรื่องของทฤษฎีทวิภาพของคลื่น และอนุภาคได้

คำสำคัญ : ปรากฏการณ์ทาร์บอท ปรากฏการณ์เลา ปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์สนามใกล้ ทัศนศาสตร์ควอนตัม

Abstract

Talbot, Lau and Talbot-Lau effects are an optical near-field effect. They are frequently used in lensless imaging applications with light, ultrasound, x-rays, atoms and molecules. They can be employed in both of classical and quantum optics. This article reviews the concept of Talbot, Lau, and Talbot-Lau effects as well as carpets of light or quantum carpets. The effects have been demonstrated to various applications such as a displacement sensor, x-ray imaging, measuring the focal length of a lens, and some more on measurements and instrumentations. Also in the fundamental investigations, these near-field effects have been used to explore the quantum physics, particularly quantum optics phenomena, e.g. the wave-particle duality. The use of near-field effects to prove this wave-particle duality is reviewed here.

Keywords : Talbot effect, Lau effect, Optical near-field effects, quantum optics

*E-mail: sarayut@buu.ac.th

ทฤษฎีทวิภาพของแสง (The wave-particle duality of light) เป็นทฤษฎีที่สำคัญในวิชาฟิสิกส์แผนใหม่ (modern physics) ตามประวัติศาสตร์มีการโต้แย้งว่าแสงเป็นอนุภาค หรือคลื่น โดยฮอยเกนส์ (Christian Huygens) อธิบายว่าแสงคือคลื่น แต่นิวตัน (Sir Isaac Newton) ตั้งข้อสมมติฐานว่าแสงจะประกอบด้วยกลุ่มอนุภาค ซึ่งหลังจากนั้นต่อมาอีกราวกว่าสองศตวรรษ ได้มีการพิสูจน์ว่าแสงมีคุณสมบัติทั้งความเป็นคลื่น และอนุภาค โดยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ซึ่งค้นพบโดยไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้พิสูจน์ว่าแสงประพฤติตัวเป็นอนุภาค ในขณะที่การเลี้ยวเบน (diffraction) และการแทรกสอด (interference) ของแสงยืนยันว่าแสงประพฤติตัวเป็นคลื่น

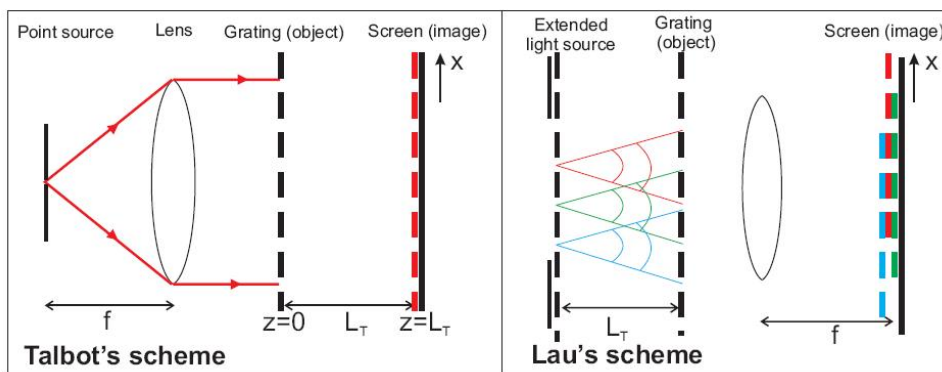
การเลี้ยวเบนของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านสิ่งกีดขวาง ตัวอย่างเช่น สlitเดี่ยว (single slit) หรือ สlitคู่ (double slit) หลังจากแสงเลี้ยวเบนผ่านสิ่งกีดขวางแล้วคลื่นแสงจะแทรกสอดกันทำให้ปรากฏริ้วรอยแทรกสอดขึ้น สำหรับการเลี้ยวเบนของแสงนั้นสามารถแบ่งได้เป็นหลักๆ สองประเภท คือ การเลี้ยวเบนแบบสนามใกล้ (near-field) และสนามไกล (far-field)

การเลี้ยวเบนแบบสนามไกล สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer theory) ตัวอย่างที่สำคัญคือ การทดลองสลิตคู่ของยัง (Young double-slit experiment) ซึ่งมีการใช้ในสาขาวิชาทัศนศาสตร์ ทั้งแบบแผนเดิม (Classical optics) และทัศนศาสตร์ควอนตัม (Quantum optics) ตัวอย่างของการเลี้ยวเบนแบบสนามไกลที่ซับซ้อนขึ้น เช่น อินเตอร์เฟียร์อเมเตอร์ของมัค-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder interferometer) เป็นต้น

ปรากฏการณ์ของทาร์บอท (Talbot effect) และเลา (Lau effect) ซึ่งค้นพบโดยทาร์บอท ในปี 1836 (Talbot, 1836) และเลา ในปี 1948 (Lau, 1948) ตามลำดับ เป็นปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแบบสนามไกล ทั้งสองปรากฏการณ์มีความคล้ายคลึงกัน นั่นคือมีการอธิบายด้วยการเลี้ยวเบนแบบเฟรจเนล (Fresnel diffraction) ปรากฏการณ์ของทาร์บอทจะเกิดขึ้นเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ เช่น เลเซอร์เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงและไปแทรกสอดกันที่ระยะทาร์บอท L_T ภาพริ้วรอยแทรกสอดที่เกิดขึ้น (ภาพที่ 1 ซ้าย) จะมีขนาดเท่ากับเกรตติงทุกประการ (self-imaging) ในกรณีทั่วไปยังสามารถสังเกตภาพริ้วรอยการแทรกสอดที่ระยะอัตราส่วนของระยะทาร์บอท (fractional Talbot effect) ได้เช่นกัน แต่ริ้วรอยแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กกว่าเกรตติงด้วย ภาพริ้วรอยการแทรกสอดเช่นเดียวกันนี้ยังสามารถสังเกตได้จากปรากฏการณ์ของเลาอีกด้วย

ปรากฏการณ์ของเลา (ภาพที่ 1 ขวา) สามารถใช้กับแหล่งกำเนิดแสงที่ไม่อาพันธ์ได้ ภาพริ้วรอยการแทรกสอดในกรณีนี้จะเกิดที่ระยะอนันต์ นอกจากนั้นยังสามารถรวมปรากฏการณ์ทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่าปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลา (Tabot-Lau effect) ซึ่งเป็นการรวมประโยชน์ของทั้งสองปรากฏการณ์เข้าด้วยกัน

การทดลองการเลี้ยวเบนแบบสนามไกลนี้ มีการรายงานบนฐานข้อมูลมากมาย ทั้งในส่วนของทฤษฎี และการทดลอง ฟิสิกส์มูลฐาน และการประยุกต์ใช้ จากรายงานทั้งหมดมีการทดลองที่น่าสนใจ และสำคัญอันหนึ่งคือ การสร้างลวดลายที่เรียกว่าลวดลายพรมควอนตัม (quantum carpets) หรือ ลวดลายพรม



ภาพที่ 1 ปรากฏการณ์ของทาร์บอท (ซ้าย) ปรากฏการณ์ของเลา (ขวา)

ของแสง (carpets of light) (Berry et al., 2001) ปรากฏการณ์ของทาร์บอท และทาร์บอท-เลา ยังถูกใช้ในการทดลองกับอะตอมในโดเมนของพิกัด (Berman, 1997; Chapman et al., 1995; Clauser et al., 1994; Nowak et al., 1997) โดเมนของเวลา (Ryu et al., 2006) และกับโมเลกุล (Brezger et al., 2002; Gerlich et al., 2007)

ในบทความฉบับนี้ จะอธิบายปรากฏการณ์เลี้ยวเบนแบบสนามใกล้ โดยมีเนื้อหาตามลำดับ โดยเริ่มต้นกล่าวถึงปรากฏการณ์ของทาร์บอท เลา และทาร์บอท-เลา รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ลวดลายพรมควอนตัม หรือลวดลายพรมของแสง การประยุกต์ใช้กับงานวิจัยต่างๆ ที่สำคัญ และจบบทความด้วยการใช้ปรากฏการณ์กับคลื่นสสาร คือ อะตอมและโมเลกุล

ปรากฏการณ์ทาร์บอท

ในปี 1836 เฮนรี ทาร์บอท (William Henry Fox Talbot) (Talbot, 1836) ได้ตีพิมพ์ผลงานจากการสังเกตการแทรกสอดของแสงหลังจากมีการเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าริ้วรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้นหลังเกรตติงจะมีขนาดเท่ากับขนาดของคาบของเกรตติงทุกประการ ถ้าระยะระหว่างเกรตติงและตำแหน่งฉากรับภาพเท่ากับระยะที่แน่นอนค่าหนึ่งที่เราเรียกว่า ระยะทาร์บอท (Talbot length) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$L_T = \frac{d^2}{\lambda} \quad (1)$$

โดยที่ d คือค่าคงที่คาบของเกรตติง (grating period) และ λ คือค่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ทดลอง

ชุดทดลองของทาร์บอทแสดงดังภาพที่ 1 (ซ้าย) แสงที่ใช้ในการทดลองในปรากฏการณ์ทาร์บอทนั้นจะต้องเป็นแสงอาพันธ์¹ (coherent light) ทั้งตามยาว และตามขวาง หลังจากแสงเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง ภาพริ้วรอยการแทรกสอดที่มีขนาดของริ้วรอยเท่ากับเกรตติงทุกประการจะเกิดขึ้นทันทีที่ตำแหน่งหลังเกรตติง ($z = 0$) และเกิดอีกครั้งที่ระยะทาร์บอทดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ถ้าพิจารณาแสงด้วยคลื่นระนาบซึ่งมีเลขคลื่น (wave number) เท่ากับ $k = 2\pi / \lambda$ เดินทางผ่านเกรตติง ที่วางไว้ที่ตำแหน่ง $z = 0$ (ให้คลื่นระนาบเดินทางตามแนวแกน z และเกรตติงจะมีคาบวางตามแนวแกน x) และตกกระทบเกรตติงนี้ด้วยมุม θ ใดๆ ที่ทำกับแกน z ดังนั้นสามารถเขียนสมการฟังก์ชัน

คลื่นแบบไม่ขึ้นกับเวลาที่ระยะ z ใดๆ คือ (Case et al., 2009)

$$\psi(x, z) = \sum_n A_n \exp \left[i(k_\theta + nk_d)x + i \left(k - \frac{(k_\theta + nk_d)^2}{2k} \right) z \right] \quad (2)$$

โดยที่ A_n คือองค์ประกอบฟูรีเยร์ของฟังก์ชันของการส่งผ่านของ

$$\text{เกรตติง } T(x) = \sum_n A_n \exp(i2\pi nx / d)$$

$k_\theta = k \sin \theta$ คือองค์ประกอบของเลขคลื่นตามแนวแกน x

$k_d = 2\pi / d$ คือองค์ประกอบของเลขคลื่นจากค่าคงที่คาบของเกรตติง

ในกรณีเฉพาะปรากฏการณ์ของทาร์บอท จะได้ว่า $k_\theta = 0$ เพราะฉะนั้น ฟังก์ชันคลื่นคือ

$$\psi(x, z) = \sum_n A_n e^{ink_d x} e^{-in^2 \pi(z/L_T)} \quad (3)$$

โดยมุมเฟสที่คงที่ทั้งหมดสามารถตัดทิ้งได้ และ L_T คือระยะทาร์บอทดังที่กล่าวไปแล้วดังสมการที่ (1)

สมการที่ (3) ใช้อธิบายภาพริ้วรอยการแทรกสอดที่เป็นคาบเท่ากับคาบของเกรตติงในปรากฏการณ์ทาร์บอทนี้ที่ระยะ $z = 2nL_T$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) ใดๆ จากเกรตติง หรือที่ระยะ $z = (2n + 1)L_T$ จะได้ริ้วรอยการแทรกสอดที่มีขนาดเท่ากับเกรตติงเช่นกันแต่เฟสจะเลื่อนไปเท่ากับครึ่งคาบของเกรตติง

ในกรณีที่สังเกตภาพริ้วรอยการแทรกสอดที่ระยะเศษส่วนของทาร์บอท $z = (s + p/r)2L_T$ โดยที่ s, p และ r เป็นเลขจำนวนเต็มบวก และมีเงื่อนไขที่ $p < r$ ฟังก์ชันคลื่นคือ

$$\psi(x, z) = \sum_{m=0}^{r-1} a_m \sum_n A_n e^{-ink_d(x-md/r)} \quad (4)$$

เพราะฉะนั้นความเข้มแสงที่ระยะ x และ z ต่างๆ คือ $I(x, z) = \psi(x, z)\psi^*(x, z)$

ปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลา

ในกรณีของปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลา (ภาพที่ 3) ซึ่งก็คือการรวมปรากฏการณ์ของทาร์บอท และปรากฏการณ์ของเลา

¹ รายละเอียดของแสงอาพันธ์ (optical coherence) หาอ่านได้จากหนังสือ optics เบื้องต้นทั่วไป

เข้าด้วยกัน คลื่นที่ใช้สามารถที่จะเป็นคลื่นที่ไม่อาพันธ์ได้ (spatial incoherent waves) ซึ่งมุมตกกระทบที่เกรตติง θ จะมีค่าที่มุมต่างๆ ได้ ดังนั้นชุดทดลองของปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลาจึงต้องใช้เกรตติงสองอัน โดยเกรตติงที่หนึ่งจะทำหน้าที่ทำให้คลื่นเป็นคลื่นอาพันธ์ ดังนั้นเมื่อคลื่นเดินทางถึงเกรตติงที่สองจึงมีการเลี้ยวเบนและแทรกสอดที่หลังเกรตติงที่สองนี้ ซึ่งร็วรอยการแทรกสอดก็จะมีรูปร่าง และขนาดเหมือนกับเกรตติงทุกประการ ดังเช่นปรากฏการณ์ของทาร์บอท โดยกำหนดให้ระยะระหว่างเกรตติงที่หนึ่ง และเกรตติงที่สอง คือ $z = L_1$ และระยะระหว่างเกรตติงที่สอง และฉากรับภาพ (กล้อง CCD) คือ $z = L_2$ เพราะฉะนั้นสมการคลื่นที่ด้านหลังของเกรตติงที่สอง สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2) โดยที่ให้ระยะ $z = L_1$ ดังนั้นถ้าเกรตติงทั้งสองมีขนาดของค่าคงที่เกรตติงเท่ากัน รูปแบบความเข้มแสงของร็วรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่ฉากรับภาพเนื่องจากคลื่นระนาบที่มุมตกกระทบ θ ใดๆ คือ

$$I_\theta = \psi_\theta \psi_\theta^* = \sum_{n,m,n',m'} A_n A_m A_{n'}^* A_{m'}^* \exp[ik_d(n+m-n'-m')x] \times \exp[-i2k_\theta k_d[(n-n')L_1 + (n-n'+m-m')L_2]/2k] \times \exp[-ik_d^2(n^2-n'^2)L_1/2k] \times \exp[-ik_d^2((n+m)^2 - (n'+m')^2)L_2/2k] \quad (5)$$

พิจารณาที่มุมตกกระทบทั้งหมดจะได้ $I_T = \sum_\theta I_\theta$ เนื่องจากสมการที่ (5) ขึ้นกับค่า k_θ ดังนั้นร็วรอยการแทรกสอดที่ฉากจะไม่เกิดขึ้นยกเว้นสัมประสิทธิ์ของ k_θ ในสมการที่ (5) มีค่าเป็นศูนย์จะได้

$$L_2 = \frac{L_1}{\frac{m'-m}{n-n'} - 1} \quad (6)$$

สมการที่ (6) เป็นเงื่อนไขการเกิดภาพร็วรอยการแทรกสอดที่โหมดต่างๆ เนื่องจากความสัมพันธ์ของเกรตติงทั้งสอง โดยปรากฏการณ์นี้เรียกว่า *ปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลา* ในกรณีของปรากฏการณ์ของเลา (ภาพที่ 1) จะเลือกที่เงื่อนไข $m' - m = n - n'$ จะได้ $L_2 = \infty$ นั่นเอง ในกรณีที่ใช้ปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลาที่เงื่อนไข $m' - m = 2(n - n')$ จะได้ $L_1 = L_2$ ซึ่งเป็นกรณี

ไม่ต้องใช้เลนส์ในการสังเกตร็วรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้น

ลวดลายพรหมควอนตัม หรือลวดลายพรหมของแสง

ลวดลายพรหมควอนตัม² หรือลวดลายพรหมของแสง คือลวดลายที่เกิดจากการรวมภาพร็วรอยการแทรกสอดในปรากฏการณ์ทาร์บอท หรือทาร์บอท-เลาที่ระยะ z ต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3 การจำลองลวดลายพรหมของแสงแบบสมบูรณสามารถแสดงให้เห็นได้ (Berry *et al.*, 2001) แต่การทดลองสร้างลวดลายพรหมของแสงแบบเต็มรูปแบบทำได้โดย (Case *et al.*, 2009) การใช้แสงเลเซอร์ตั้งชุดทดลองในภาพที่ 2 ภาพที่ 2 (c) แสดงผลของการจำลองลวดลายพรหมของแสงจากสมการที่ 3 จากภาพแสดงให้เห็นว่าผลจากแบบจำลองตามทฤษฎี และผลจากการทดลองสอดคล้องกันอย่างชัดเจน

การประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และการสร้างเครื่องมือต่างๆ ที่สำคัญ

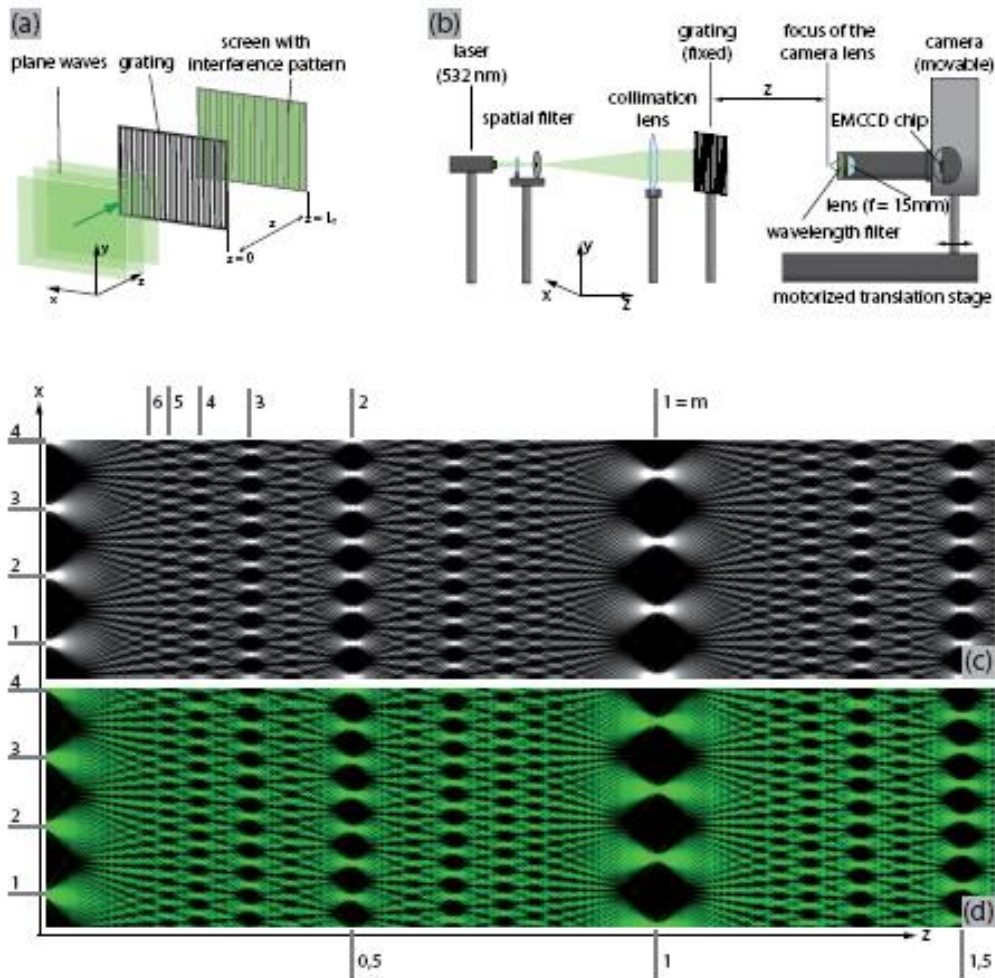
ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแบบสนามใกล้ได้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยหลากหลายสาขา ตัวอย่างเช่น ในทางการแพทย์มีการนำไปใช้กับการถ่ายภาพรวมกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอ็กซ์ (Pfeiffer *et al.*, 2006) ทำให้ได้ภาพมีความคมชัดขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเฟสที่แตกต่างกัน ภาพที่ 4 เป็นตัวอย่างของการเปรียบเทียบภาพถ่ายรังสีเอ็กซ์แบบวิธีแผนเดิม นั่นคือการถ่ายภาพการส่งผ่านของรังสีเอ็กซ์ (ภาพที่ 4 a) และรูปที่ถ่ายภาพด้วยรังสีเอ็กซ์และวิธีการใช้ปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลา (ภาพที่ 4 b))

นอกจากการประยุกต์ใช้ดังที่กล่าวไปข้างต้นนี้ จนถึงปัจจุบันยังมีการนำไปใช้อีกมากมาย ตัวอย่างเช่น การวัดระยะทางที่แม่นยำ (Spagnolo *et al.*, 2002) การวัดดัชนีหักเหของสสารที่มีความแม่นยำสูง (Bhattacharya, 1989) การทำสเปกโตรสโคปี (Nicola, *et al.*, 2004) การวัดการสั่นสะเทือนของวัตถุใดๆ (Quan *et al.*, 2006) การวัดความยาวโฟกัสของเลนส์ (Nakano, *et al.*, 1984) เป็นต้น

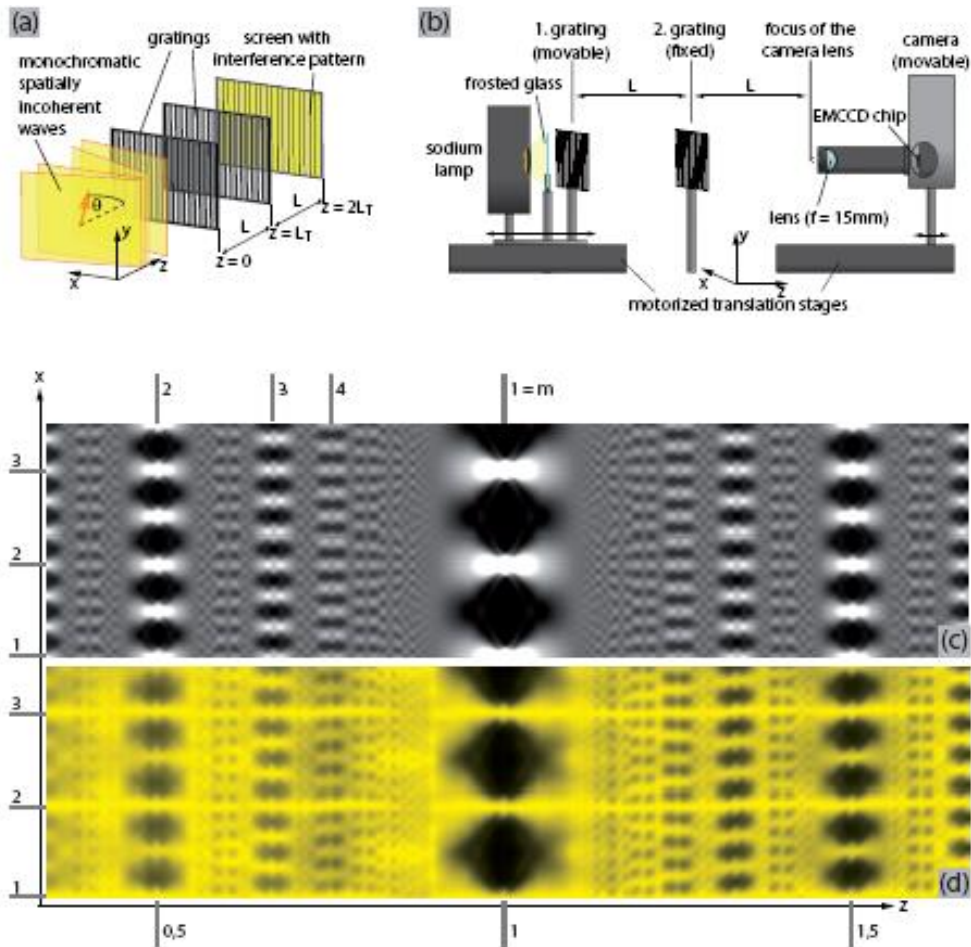
ปรากฏการณ์ทาร์บอท และทาร์บอท-เลากับคลื่นสสาร

แนวความคิดของคลื่นสสาร ได้ถูกอธิบายครั้งแรกโดยเดอบรอยล์ (Louis de Broglie) ในปี 1923 โดยมีแนวคิดว่า อนุภาค

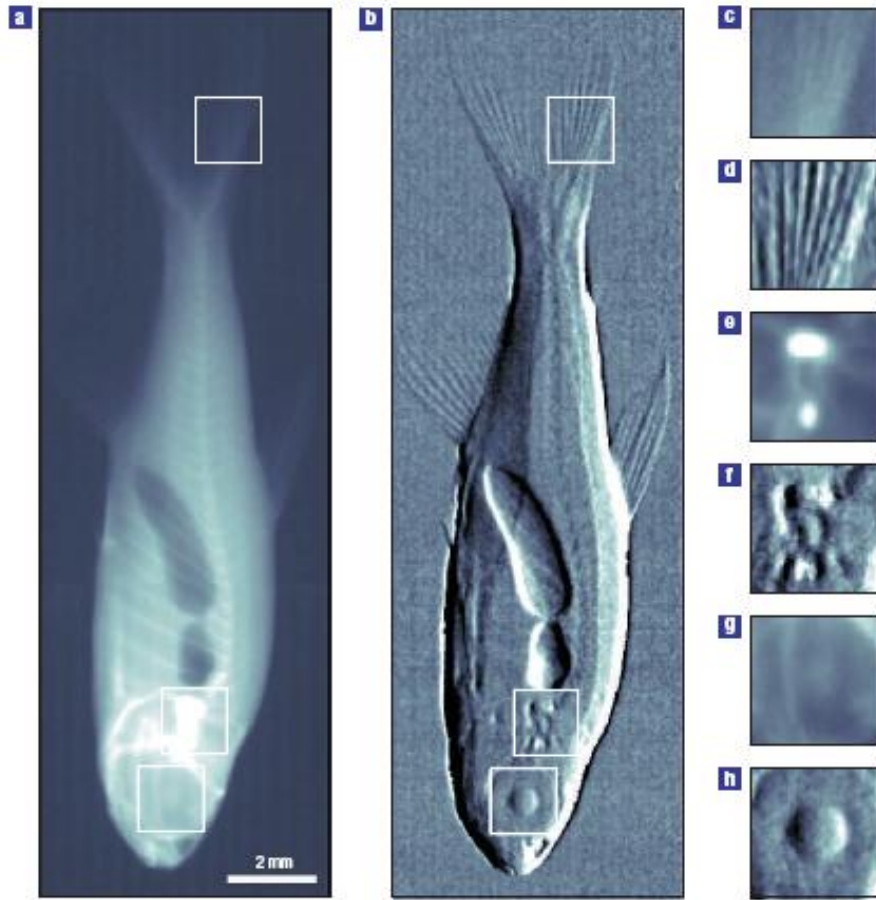
² ในกรณีของลวดลายพรหมควอนตัมเกิดจากการแทรกสอดของอนุภาคควอนตัม เช่น โฟตอนเดี่ยว หรือคลื่นสสาร เป็นต้น



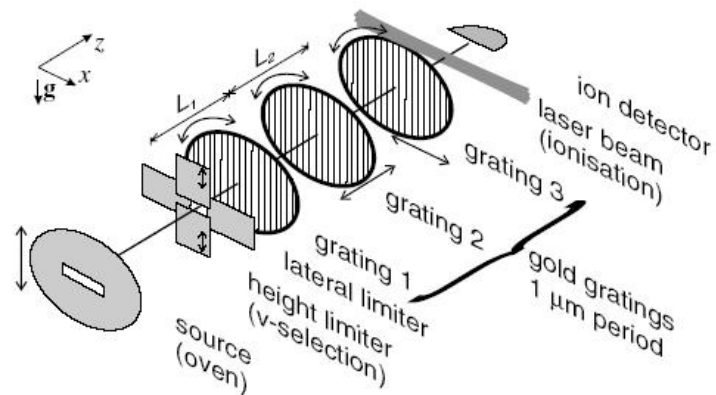
ภาพที่ 2 a) ปรากฏการณ์ทาร์บอท โดยใช้คลื่นระนาบเป็นแหล่งกำเนิดแสง b) ชุดทดลองปรากฏการณ์ทาร์บอท ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เกรตติง และกล้อง CCD ซึ่งสามารถเลื่อนตำแหน่งได้ c) แบบจำลองลวดลายพรหมของแสง ดังทฤษฎีตามสมการที่ 3 d) ผลการทดลองลวดลายพรหมของแสงที่ได้จากชุดทดลองในข้อ b) โดยแกน x แสดงคาบของริ้วรอยการแทรกสอด และแกน z แสดงระยะจากเกรตติงถึงกล้อง CCD (Case *et al.*, 2009)



ภาพที่ 3 a) ปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลา โดยสามารถใช้คลื่นไม่อาพันธ์เป็นแหล่งกำเนิดแสง b) ชุดทดลองปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลา ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงหลอดโซเดียมโดยเลือกความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร เกรตติง และกล้อง CCD ซึ่งสามารถเลื่อนตำแหน่งได้ c) แบบจำลองลวดลายพรมของแสง ดังทฤษฎีทาร์บอท-เลาจากความเข้มแสง I_T d) ผลการทดลองลวดลายพรมของแสงที่ได้จากชุดทดลองในข้อ b) โดยแกน x แสดงคาบของริ้วรอยการแทรกสอด และแกน z แสดงระยะระหว่างเกรตติงที่หนึ่ง และเกรตติงที่สอง ซึ่งมีค่าเท่ากับระยะจากเกรตติงที่สองถึงกล้อง CCD (Case *et al.*, 2009)



ภาพที่ 4 ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ที่ถ่ายจากรังสีเอกซ์พลังงาน 40 kV/25mA a) ภาพถ่ายจากการส่งผ่านของรังสีเอกซ์ b) ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์และวิธีการใช้ปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลา c),e),g) ภาพขยายของ a) และ d),f),h) ภาพขยายของ b) (Pfeiffer et al., 2006)



ภาพที่ 5 ชุดทดลองปรากฏการณ์ทาร์บอท-เลา กับโมเลกุล C_{70} (Brezger et al., 2002)

ใดๆ สามารถประพฤติตัวเป็นคลื่นได้ เรียกว่าทฤษฎีทวิภาพของอนุภาค และเรียกความยาวคลื่นของสสาร หรืออนุภาคว่า ความยาวคลื่นเดอบรออยล์ (de Broglie wavelength)

การพิสูจน์ และการทดลองทฤษฎีทวิภาพของอนุภาคนี้ได้มีการทำตามลำดับจากอิเล็กตรอน (Davisson & Germer, 1927) นิวตรอน (Summhammer *et al.*, 1983) และ อะตอม (Estermann & Stern, 1930; Chapman *et al.*, 1995; Clauser *et al.*, 1994) การทดลองกับอนุภาคที่มีมวลมากขึ้นได้ถูกทดลองอย่างต่อเนื่อง ซิลินเจอร์ (Anton Zeilinger) และ อานท์ (Markus Arndt) ได้ทำการทดลองการเลี้ยวเบนของคลื่นสสารโดยใช้โมเลกุลของ C_{70} กับชุดทดลองอินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ของทาร์บอท-เลา (Brezger *et al.*, 2002) หลังจากนั้น อานท์ และคณะได้ทำการทดลองอย่างต่อเนื่องโดยเพิ่มมวล และความซับซ้อนของโมเลกุลจนถึงโมเลกุลในกลุ่ม azobenzenes (Gerlich *et al.*, 2007) ซึ่งเป็นโมเลกุล หรืออนุภาคที่ซับซ้อนที่สุดที่ทำการทดลองพิสูจน์คลื่นสสารจนถึงปัจจุบัน

นอกจากการใช้ในงานวิจัยพื้นฐานดังที่กล่าวไปแล้วนั้น ยังมีการนำมาใช้วัดค่าความสามารถในการแยกขั้ว (Polarizability) ของโมเลกุล เช่น C_{60} C_{70} (Berninger *et al.*, 2007) TPP และ FeCITPP (Deachapunya *et al.*, 2007) เป็นต้น

สรุป

การเลี้ยวเบนของคลื่นใดๆ ผ่านสิ่งกีดขวาง สามารถแบ่งแยกได้เป็นสองชนิดคือ ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแบบสนามไกล และแบบสนามใกล้ โดยปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแบบสนามใกล้เป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามก็สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ทั้งการประยุกต์ใช้สร้างเครื่องมือต่างๆและการศึกษาฟิสิกส์มูลฐานที่สำคัญ เช่นกลศาสตร์ควอนตัม ทศนศาสตร์ควอนตัม และคลื่นสสาร เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

Berman, Hrsg., P. R. (1997). Atom Interferometry Acad. Press, New York.

Berninger, M., Stefanov, A., Deachapunya, S., & Arndt, M. (2007). Polarizability measurements of a molecule via a near-field matter-wave interferometer, *Physical Review A*, 76, 013607-1-013607-4.

Berry, M., Marzoli, I., & Schleich, W. (2001). Quantum carpets, carpets of light. *Physics World*, 14, 1078-1083.

Bhattacharya, J. C. (1989). Measurement of the refractive index using the Talbot effect and a moire technique. *Applied Optics*, 28, 2600-2604.

Brezger, B., Hackermueller, L., Uttenthaler, S., Petschinka, J., Arndt M., & Zeilinger, A. (2002). Matter-wave interferometer for large molecules. *Physical Review Letters*, 88, 100404-100407.

Case, W. B., Tomand, M., Deachapunya, S., & Arndt, M. (2009). Realization of Optical Carpets in the Talbot and Talbot-Lau Configurations. Accepted to Optics Express.

Chapman, M. S., Ekstrom, C. R., Hammond, T. D., Schmiedmayer, J., Tannian, B. E., Wehinger, S., & Pritchard, D. E. (1995). Near-field imaging of atom diffraction gratings: The atomic Talbot effect. *Physical Review A*, 51, R14-R17.

Clauser, J. F., & Li, S. (1994). Talbot-vonLau atom interferometry with cold slow potassium. *Physical Review A*, 49, R2213-R2216.

Davisson, D., and Germer, L. (1927). The scattering of electrons by a single crystal of nickel. *Nature*, 119, 558.

Deachapunya, D., Stefanov, A., Berninger, M., Ulbricht, H., Reiger, E., Doltsinis N. L., & Arndt, M. (2007). Thermal and electrical properties of porphyrin derivatives and their relevance for molecule interferometry. *Journal of Chemical Physics*, 126, 164304-1-164304-7.

Estermann, I., & Stern, O. (1930). Beugung von Molekularstrahlen. *Zeitschrift für Physik*, 61, 95-125.

Gerlich, S., Hackermueller, L., Hornberger, K., Stibor, A., Ulbricht, H., Goldfarb, F., Savas, T., Moeri, M., Mayor, M., & Arndt, M. (2007). A Kapitza-Dirac-Talbot-Lau interferometer for highly polarizable molecules. *Nature Physics*, 3, 711-715.

- Lau, E. (1948). Beugungserscheinungen an doppellrastern. *Annalen der Physik*, 6, 417-423.
- Nakano, Y., & Murata, K. (1984). Measurements of phase objects using the Talbot effect and moire techniques. *Applied Optics*, 23, 2296-2299.
- Nicola, S. D., Ferraro, P., Coppola, G., Finizio, A., Pierattini, G., & Grilli, S. (2004). Talbot self-image effect in digital holography and its application to spectrometry. *Optics Letters*, 29, 104-106.
- Nowak, S., Kurtsiefer, Ch., & Pfau, T. (1997). High-order Talbot fringes for atomic matter waves. *Optics Letters*, 22, 1430-1432.
- Pfeiffer, F., Weitkamp, T., Bunk, O., & David, C. (2006). Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources. *Nature Physics*, 2, 258-261.
- Quan, C., Thakur, M., & Tay, C. J. (2006). Lau phase interferometry with a vibrating object. *Optik*, 117, 9-14.
- Ryu, C., Andersen, M. F., Vaziri, A., d'Arcy, M. B., Grossman, J. M., Helmerson, K., & Phillips, W.D. (2006). High order quantum resonances observed in a periodically kicked bose-einstein condensate. *Physical Review Letters*, 96, 160403.1-160403.4.
- Spagnolo, G. S., Ambrosini, D., & Paoletti, D. (2002). Displacement measurement using the Talbot effect with a Ronchi grating. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 4, S376-S380.
- Summhammer, J., Badurek, G., Rauch, H., Kischko, U., & Zeilinger, A. (1983). Direct observation of fermion spin superposition by neutron interferometry. *Physical Review A*, 27, 2523.
- Talbot, H. F. (1836). Facts relating to optical science. *Philosophical Magazine series*, 9, 401-407.