

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการโดยทั่วไป

คิมจับเชิงแสงใช้หลักการหลักพื้นฐานในวิชาฟิสิกส์เรียกว่าความดันรังสี (radiation pressure) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่สมัยศตวรรษที่ 17 เมื่อ Johannes Kepler อธิบายปรากฏการณ์ที่หางของดาวหางชี้ไปในทิศทางตรงข้ามกับดวงอาทิตย์เสมอว่าแรงดันรังสีจากแสงอาทิตย์เป็นตัวผลักดันอนุภาคในกลุ่มหมอกเหล่านั้นโดยที่ในปี 1905 อัลเบิร์ตไอสไตน์ ได้อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกว่าแสงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆประกอบด้วยอนุภาคเรียกว่าโฟตอนซึ่งมีโมเมนตัม

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.1)$$

โดยที่ p คือ โมเมนตัมของแสง

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์

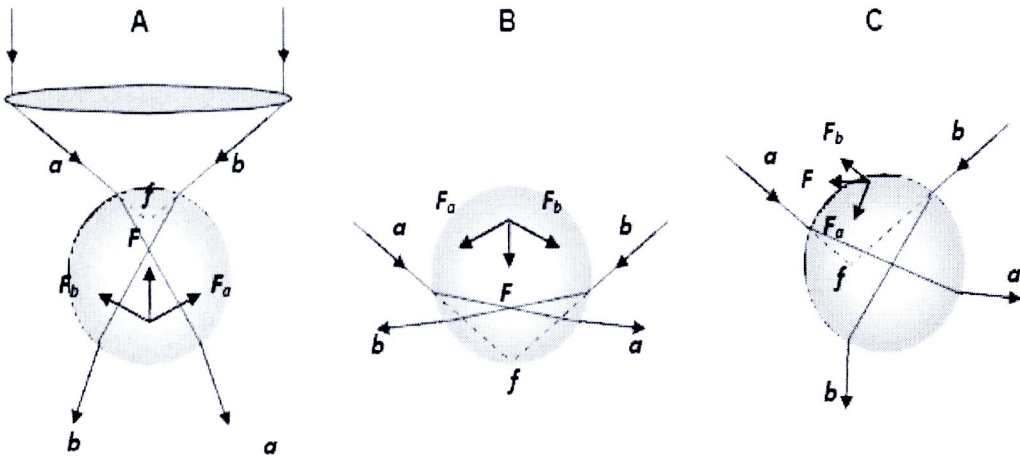
λ คือ ความยาวคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบวัตถุใดๆจะมีการถ่ายเทโมเมนตัมของโฟตอนให้แก่วัตถุจึงมีแรงกระทำต่อวัตถุสำหรับแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนโลกมีความเข้มข้นน้อยมีความดันรังสีประมาณ 0.5 nN/cm^2 เราจึงไม่รู้สึกว่าถูกแสงผลักเมื่อยืนตากแดดสำหรับคิมจับเชิงแสงใช้การโฟกัสแสงเลเซอร์ที่มีกำลังสูงลงบนจุดเล็กๆแรงจากความดันรังสีจึงมีค่ามากพอที่จะทำให้อนุภาคเล็กๆเคลื่อนที่ได้ในการอธิบายหลักการทำงานของคิมจับเชิงแสงเราจะจำแนกอนุภาคออกเป็นสองชนิดตามขนาดได้แก่ อนุภาคมาย (Mie particle) เป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสงมากๆ ($d \gg \lambda$) และอนุภาคเรย์ลีห์ (Rayleigh particle) คือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงมากๆ ($d \ll \lambda$)

2.2 อนุภาคเมียร์

อนุภาคเมียร์เป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสงมากๆเราจะอธิบายการดักจับอนุภาคมายด้วยคิมจับเชิงแสงจากการหักเหและสะท้อนของแสงบริเวณพื้นผิวของอนุภาคจากรูปที่ 2.1 เสนอว่าวัตถุของกล้องจุลทรรศน์จะทำการรวมแสงเลเซอร์เข้าหาจุดโฟกัส (f) ให้พิจารณาเฉพาะรูปที่ 2.1(A) ซึ่งตำแหน่งของอนุภาคอยู่เลยจุดโฟกัสปกติของเลนส์ไปทางด้านล่างจะเห็นว่าลำแสง a มีการหักเหสองครั้งที่พื้นผิวทั้งสองด้านของอนุภาค (ในกรณีนี้อนุภาคที่มีดรรชนีหักเหของวัตถุมากกว่าของตัวกลางซึ่งเป็นกรณีที่มีก่เกิดขึ้นทั่วไป) เมื่อลำแสง a พุ่งออกจากอนุภาคจะมีทิศเบนไปในทิศทางซ้ายของทิศทางเดิมแสดงว่าแสงมีโมเมนตัมเพิ่มขึ้นในทิศทางซ้ายจากหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมจะได้ว่าต้องมีแรงปฏิกิริยา F_a กระทำต่ออนุภาคในทิศบนขวาในทำนองเดียวกันการหักเหของลำแสง b ทำให้เกิดแรง F_b ในทิศบนซ้ายแรงลัพธ์ F ซึ่งเกิดจากผลรวมของแรงลำแสงเลเซอร์ทั้งหมดจะมีทิศขึ้นและเข้าหาจุดโฟกัสถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.1 (B และ C) จะเห็นว่าไม่ว่าอนุภาคจะอยู่ในตำแหน่งใด

แรงลัพธ์ F ที่กระทำต่ออนุภาคจะมีทิศพุ่งเข้าหาจุดโฟกัสของเลนส์ซึ่งทำให้เกิดการดักอนุภาคเข้าสู่จุดโฟกัสในความเป็นจริงแล้วการสะท้อนของแสงที่ผิวอนุภาคทำให้เกิดแรงในทิศลึกลับออกจากจุดโฟกัสเพียงแต่แรงนี้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงที่เกิดจากการหักเหของแสงเนื่องจากการสะท้อนน้อย



ภาพที่ 2.1 แรงที่เกิดจากการหักเหของแสงผ่านอนุภาคเมียร์

2.3 อนุภาคเรย์ลีย์

อนุภาคเรย์ลีย์มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นแสงดังนั้นแรงเนื่องจากการหักเหและการสะท้อนมีค่าน้อยมากและค่าแรงทั้งสองแทบไม่ต่างกันเลยเราจึงต้องอธิบายการทำงานของคีมจับเชิงแสงต่ออนุภาคเรย์ลีย์โดยใช้หลักการของไดโพลในหลักการนี้มีแรงที่เกี่ยวข้องคือ แรงเกรเดียนท์ (gradient force) และแรงกระเจิง (scattering force)

2.3.1 แรงเกรเดียนท์

เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างประจุบวกและลบภายในอนุภาคกลายเป็นไดโพลจากนั้นไดโพลจะถูกดึงดูดเข้าสู่หาจุดที่มีความเข้มของแสงสูงซึ่งก็คือจุดโฟกสนั่นเอง แรงเกรเดียนท์มีค่า

$$F_{grad} = \frac{\alpha}{2} \nabla \langle E^2 \rangle \tag{2.2}$$

เมื่อ

$$\alpha = n^2_m r^3 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right) \tag{2.3}$$

โดยที่ $\nabla \langle E^2 \rangle$ คือ ผลเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ากำลังสอง n และ n_m คือ ดรรชนีหักเหของอนุภาค และตัวกลางตามลำดับ และ $m = n/n_m$ คือ ดรรชนีหักเหเปรียบเทียบและ r คือ รัศมีของอนุภาค

2.3.2 แรงกระเจิง

เกิดจากการที่อนุภาคดูดกลืนแสง (absorption) และมีการกระเจิงของแสงออกมาจากอนุภาคในทุกทิศทาง (scattering) ทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่อนุภาคแรงกระเจิงมีทิศทางเดียวกับการแผ่รังสีของแสงแต่มีค่าน้อยกว่าแรงเกรเดียนท์มากวัตถุจึงมีแนวโน้มที่จะถูกผลักเข้าหาจุดโฟกัสแรงกระเจิงมีค่า

$$F_{scatt} = n_m \frac{\langle S \rangle \sigma}{c} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$$\sigma = \frac{8}{3} \pi (kr^4) r^2 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right)^2 \quad (2.5)$$

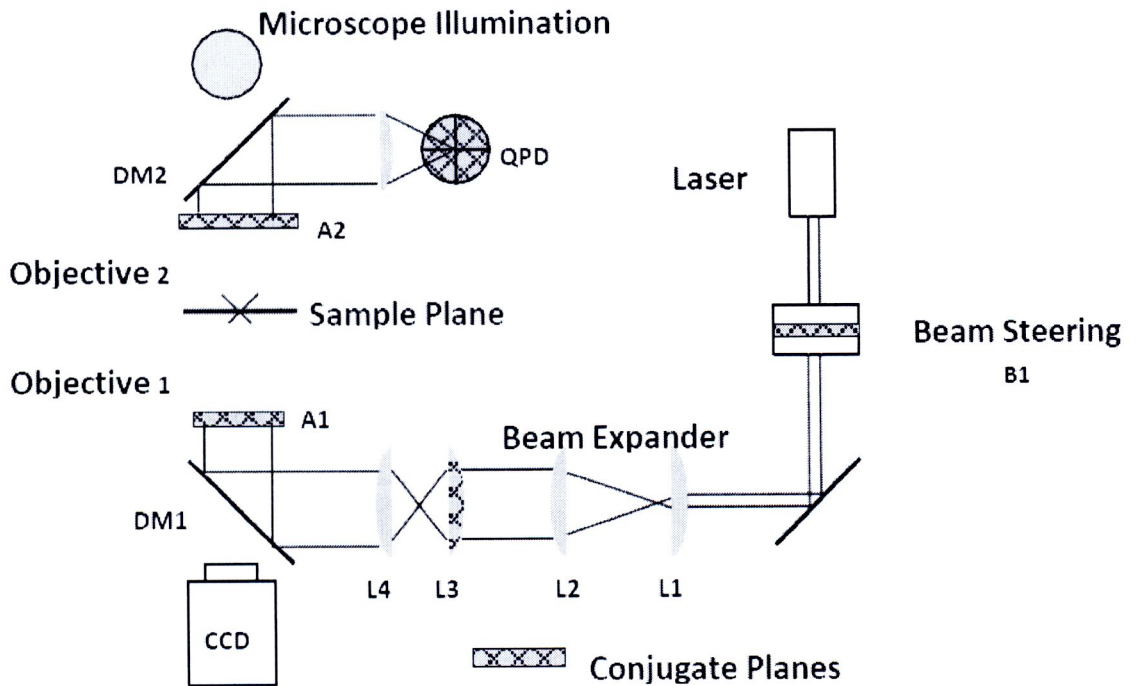
โดยที่ $\langle S \rangle$ คือ ผลเฉลี่ยของพอยต์ิงเวกเตอร์ c คือ ความเร็วแสงและ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ คือ เลขคลื่นของเลเซอร์ในทางปฏิบัติอนุภาคที่ถูกดักจับจะมีขนาด 100 nm ถึง 10 μm ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างอนุภาคเรย์ลีห์และเมียร์ดังนั้นจะต้องนำหลักการทั้งสองอย่างมารวมกันและใช้การคำนวณทางพีชคณิต (numerical calculation)

2.4 คีมจับเชิงแสงแบบออปติคส์ในอากาศ (Free space optical tweezers)

หลักการสำคัญของคีมจับเชิงแสงแบบออปติคส์ในอากาศนี้คือการโฟกัสลำแสงเลเซอร์ลงบนระนาบตัวอย่างโดยเลนส์วัตถุของกล้องจุลทรรศน์รูปที่ 2.2 แสดงผังอุปกรณ์ทดลองของคีมจับเชิงแสงแบบออปติคส์ในอากาศที่ใช้กันทั่วไปสำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆของคีมจับเชิงแสงในแต่ละการทดลองอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอนุภาคที่จะจับและการประยุกต์ใช้งานแต่อุปกรณ์สำคัญๆมีดังนี้

2.4.1 เลเซอร์สำหรับจับอนุภาค

เลเซอร์ที่ใช้ควรมีโหมด TEM 00 มีกำลังตั้งแต่ 10 มิลลิวัตต์จนถึงหลายวัตต์ความหนึบของคีมจับจะขึ้นอยู่กับกำลังของเลเซอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแล้วจะได้ความหนึบ 0.15 pN/nm ต่อกำลังเลเซอร์ 1 W ที่ระนาบตัวอย่างความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยการดูดกลืนแสงของเลนส์ตัวอย่างและตัวกลาง



ภาพ
ที่ 2.2

อุปกรณ์ทดลองคีมจับเชิงแสงแบบออปติคส์ในอากาศ

2.4.2 เลนส์วัตถุกล้องจุลทรรศน์

เลนส์วัตถุที่ใช้จะต้องมีค่า Numerical Aperture สูงๆ (ประมาณ 1.0-1.4) กล่าวคือมีปากช่องรับแสงกว้างนั่นเองอาจเป็นเลนส์วัตถุแบบจุ่มน้ำมันหรือจุ่มน้ำเพื่อให้รับปริมาณแสงได้มากทำให้มีแรงเกรเดียนท์มากนอกจากนั้นยังลดผลจากการเบี่ยงเบน (diffraction) ทำให้จุดโฟกัสมีขนาดเล็กลงอีกด้วย

2.4.3 อุปกรณ์บังคับตำแหน่งคีมจับเชิงแสง

ในการศึกษาอนุภาคด้วยคีมจับเชิงแสงเมื่อใช้คีมจับเชิงแสงจับอนุภาคแล้วเราจำเป็นต้องเคลื่อนย้ายอนุภาคไปมาในทิศทางต่างๆซึ่งทำได้หลายวิธีได้แก่

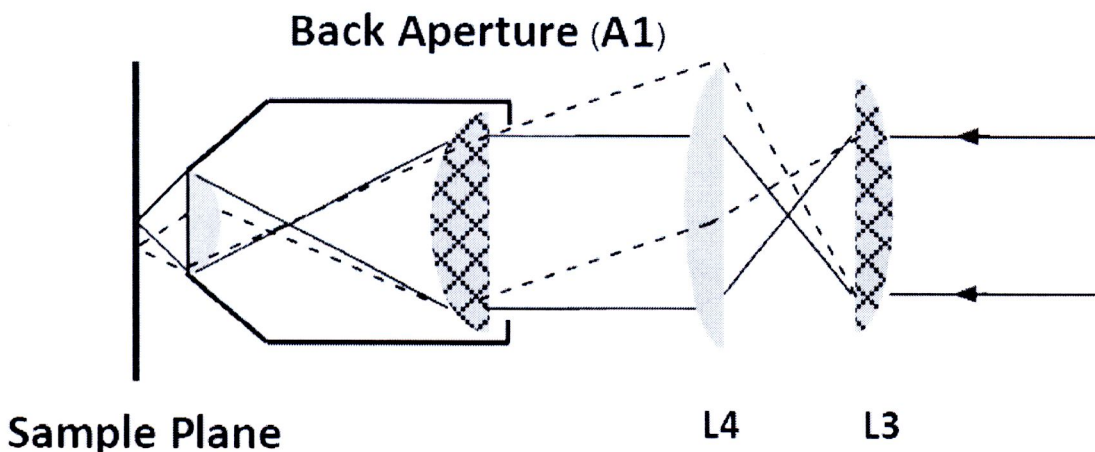
2.4.3.1 การเลื่อนระนาบตัวอย่าง (Sample Stage Movement)

เป็นการเคลื่อนตัวอย่างทั้งระนาบไปโดยการวางระนาบตัวอย่างบนเครื่องเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้าขณะที่คีมจับเชิงแสงจับอนุภาค

อันหนึ่งอยู่กับที่วิธีนี้สามารถบังคับทิศทางได้สามมิติแต่มีข้อเสียคือมีคิมจับได้เพียงอันเดียว นอกจากนั้นยังมีข้อจำกัดอื่น ๆ คือความกว้าง (Bandwidth) และความละเอียด (Resolution) ของเครื่องกลเพียงโซอิเล็กทริก

2.4.3.2 การบังคับทิศทางของลำแสง (Beam Beflection)

ในหลักการแสงเชิงเรขาคณิต (Geometrical Optics) ตำแหน่งโฟกัสของแสงบนระนาบตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับทิศทางของลำแสงที่เข้าสู่ช่องด้านหลังของเลนส์วัตถุ (A1) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นถ้าเราติดตั้งอุปกรณ์โดยให้ระนาบทั้งหมดที่แรงจากภาพในรูปที่ 2.2 เป็นระนาบภาพซึ่งกันและกัน (Image Planes หรือ Conjugate Planes) ได้แก่ระนาบ B1, L3, A1, A2 และ QPD เราก็จะสามารถบังคับคิมจับเชิงแสงได้โดยเพียงขยับเลนส์ L3 หรือไม่กี่บังคับทิศทางของลำแสงที่ระนาบ B1 โดยใช้กระจกหรือเครื่องบังคับทิศทางลำแสงแบบอะคูสโตออปติกส์ (Acousto-Optic Modulator) หรือ AOM การใช้ AOM มีข้อดีคือสามารถสร้างคิมจับเชิงแสงได้หลายอันโดยใช้เลนส์วัตถุอันเดียวมีแบนวิดท์ประมาณ 100 kHz แต่มีข้อเสีย คือ มีการสูญเสียกำลังแสงมากและแสงที่สแกนไปตามมุมต่างๆมีกำลังไม่เท่ากัน



ภาพที่ 2.3 การบังคับตำแหน่งของคิมจับเชิงแสงโดยการเปลี่ยนทิศทางของแสงที่เข้าสู่ช่องด้านหลังของเลนส์วัตถุโดยการขยับเลนส์ L3

2.4.3.3 การใช้วิธีการโฮโลกราฟฟิก

เป็นการสร้างภาพโฮโลแกรมที่ระนาบตัวอย่างนั่นเองคิมจับเชิงแสงแบบนี้เรียกว่าคิมจับเชิงแสงแบบโฮโลกราฟฟิก (Holographic Optical Tweezers หรือ HOT) วิธีการนี้จะทำการแปลงแสงที่ระนาบ B1 เช่นเดียวกันแต่จะใช้เครื่องแปลงแสงตามพื้นที่หน้าตัดสองมิติ (Spatial Light Modulator) หรือ SLM ทำการแปลงแอมพลิจูดและเฟสของลำแสงตามพื้นที่หน้าตัดภาพที่แปลงโดยเครื่อง SLM จะถูกฉายลงที่ช่องด้านหลังของเลนส์วัตถุ (ระนาบ A1) และจากหลักการฟูเรียออปติกส์ภาพที่ระนาบโฟกัส (ในที่นี้ได้แก่ระนาบตัวอย่าง) จะเท่ากับผลการแปลงฟูเรียหรือ

ความถี่เชิงพื้นที่ (Spatial Frequency) ของภาพที่ระนาบ A1 การแปลงที่เครื่อง SLM จึงเป็นการแปลงที่อาณาจักรความถี่ (Spatial Frequency Domain) นั่นเอง ข้อดีที่เด่นชัดของวิธีนี้คือรูปร่างของคิมจับไม่ได้เป็นได้เพียงจุดเราสามารถสร้างคิมจับเป็นรูปต่างๆได้เช่นรูปร่างวงแหวนรูปวอลเท็กส์รูปโดนัทรูปฟังก์ชันเบสเซล เป็นต้นซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่างเครื่อง SLM ที่ใช้อาจเป็นแบบสะท้อนหรือส่งผ่านก็ได้

2.4.4 อุปกรณ์บันทึกภาพและตำแหน่งของอนุภาค

2.4.4.1 บันทึกภาพระนาบตัวอย่างโดยตรงคือการโดยใช้กล้องวิดีโอ CCD ดังในรูปที่ 2.2 วิธีนี้ต้องมีการส่องสว่าง (Illumination) จากอีกด้านหนึ่งของกล้อง CCD เพื่อให้แสงเพียงพอ สังกะตกระจก DM1 และ DM2 จะเป็นกระจกแบบไดโครอิก (Dichroic mirror) คือจะสะท้อนแสงเลเซอร์ที่ใช้ดักอนุภาคและส่งผ่านแสงที่ใช้ในการบันทึกภาพอย่างไรก็ตามความละเอียดของภาพขึ้นอยู่กับจำนวนพิกเซลในกล้อง CCD แล้วจึงถูกจำกัดด้วยความยาวคลื่นแสงอีกด้วยความละเอียดสูงสุดประมาณ 0.2 μm

2.4.4.2 การบันทึกตำแหน่งที่ระนาบโฟกัสด้านหลัง

เป็นการวัดการแทรกสอดที่ระนาบโฟกัสด้านหลังระหว่างแสงที่กระเจิงจากอนุภาคไปด้านหน้ากับแสงเลเซอร์ที่วิ่งผ่านคิมจับไปด้านหน้าโดยไม่กระทบกับอนุภาคโดยมากจะนิยมใช้เครื่องตรวจจับแสงแบบควอดแดรนต์ (Quadrant Photo Detector) หรือเครื่อง QPD แล้วนำผลต่างระหว่างปริมาณแสงแต่ละด้านของเครื่อง QPD มาคำนวณตำแหน่งของอนุภาคให้ความละเอียดของตำแหน่งสูงสุดถึง 1 nm อย่างไรก็ตามสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กแสงที่กระเจิงออกมาจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแสงที่ผ่านไปโดยไม่กระทบอนุภาคแสงด้านหลัง (background light) นี้ทำให้มีค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อคลื่นรบกวนต่ำ (signal to noise ratio)

2.5 การใช้คิมจับเชิงแสงในการวัดแรง

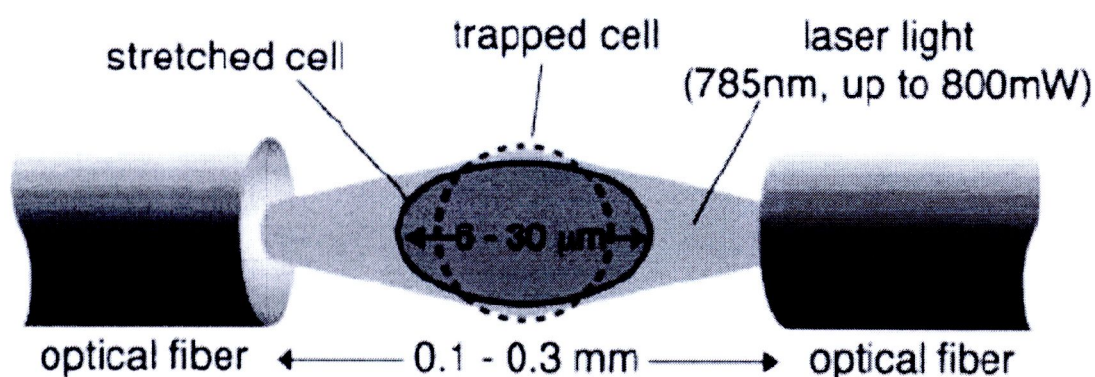
คิมจับเชิงแสงใช้เป็นเครื่องมือในการวัดแรงในระดับตั้งแต่ 0.1 พิโคนิวตันถึงหลายร้อยพิโคนิวตันโดยสามารถวัดแรงได้สูงสุดหลายร้อยพิโคนิวตันและให้ความละเอียดของสเกลต่ำกว่า 1 พิโคนิวตันซึ่งมีประโยชน์ในการศึกษาแรงจากชีวโมเลกุลเซลล์และอนุภาคสารแขวนลอย

เมื่ออนุภาคอยู่ที่ตรงบริเวณคิมจับเชิงแสงจะถูกแรงจากแสงดึงเข้าหาจุดโฟกัสคิมจับเชิงแสงจึงเปรียบเสมือนสปริงสามมิติที่มีจุดโฟกัสเป็นจุดสมดุลความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะห่างจากจุดโฟกัสเป็นแบบเชิงเส้นเพียงระยะสั้นๆเท่านั้น (ประมาณไม่เกิน 100 nm จากจุดโฟกัส) โดยทั่วไปแล้วคิมจับเชิงแสงจะมีค่าความหนืดตั้งแต่ 0.01-1 pN/nm การวัดแรงทำได้โดยผูกอนุภาคที่จวัดแรงไว้กับเม็ดแก้วแล้วดักเม็ดแก้วด้วยคิมจับเชิงแสงเมื่อมีแรงดึงที่อนุภาคเม็ดแก้วจะเคลื่อนไปอยู่จุดที่แรงดึงสมดุลกับแรงของคิมจับเราก็สามารถหาแรงได้จากระยะที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ไปในบางการทดลองมีกลไกย้อนกลับ (feedback) เพื่อเคลื่อนคิมจับเชิงแสงตามอนุภาคไปเพื่อให้ได้ระยะที่แรงกับระยะทางมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นทำให้สามารถวัดแรงได้อย่างต่อเนื่อง

การหาค่าความหนืดคีมจับแต่ละอัน (Force Calibration) โดยวิธีวัดแรงและระยะทาง เช่นเดียวกับสปริงกลนั้นทำได้ยากเพราะมีปัจจัยอื่นๆมาประกอบด้วยเช่นแรงต้านจากของเหลวและการเคลื่อนที่แบบ บราวเนียนเราสามารถหาค่าความหนืดได้ง่ายกว่าโดยวิธีการ Power Spectrum คือวัดกำลังของการสั่นของอนุภาคในคีมจับแล้วแก้สมการในอาณาจักรความถี่แทน (Fourier Domain)

2.6 คีมจับเชิงแสงแบบใช้ใยแก้วนำแสง (Fiber Optical tweezers)

การใช้ใยแก้วนำแสงในการดักจับอนุภาคมีทั้งแบบที่ใช้เส้นใยแก้วเส้นเดียว 4 หรือสองเส้น 5-7 เส้นใยแก้วที่นำมาใช้อาจเป็นแบบโหมดเดียวหรือแบบปลายแหลมก็ได้ (tapered fiber) เมื่อแสงเลเซอร์ออกมาจากปลายเส้นใยแก้วแสงจะแผ่ออกเนื่องจากบริเวณนี้ไม่ถูกจำกัดโดยท่อนำแสงดังรูปที่ 2.4 บริเวณที่ปลายเส้นใยแก้วจะมีความเข้มแสงมากที่สุดดังนั้นแรง แกรเดียนท์จะดึงดูดอนุภาคเข้าหาปลายท่อนำแสงในกรณีดักอนุภาคด้วยใยแก้วเส้นเดียววัตถุจะวิ่งมาติดกับปลายท่อนำแสงซึ่งไม่ค่อยนิยมคีมจับเชิงแสงแบบใช้ใยแก้วส่วนใหญ่จะใช้ใยแก้วสองเส้นมาวางบนแกนเดียวกันหันปลายเข้าหากันห่างกันประมาณ 100-300 μm เส้นใยแก้วทั้งสองข้างไม่จำเป็นต้องใช้เลเซอร์ความถี่เดียวกันอนุภาคจะถูกดึงเข้าหาใยแก้วทั้งสองข้างเปรียบเสมือนมีสปริงสองอันมาดึงอนุภาคอยู่สองด้านอนุภาคถูกดักอยู่บริเวณที่แรงจากใยแก้วทั้งสองข้างมีค่าเท่ากันการเคลื่อนอนุภาคตามแนวแกน x สามารถทำได้โดยปรับความเข้มของแสงคีมจับเชิงแสงด้านใดด้านหนึ่งคีมจับเชิงแสงมักจะถูกเรียกว่าเครื่องตรึงเชิงแสง (optical stretcher) เนื่องจากอนุภาคที่จับจะถูกแรงทั้งสองข้างดึงให้ยืดออกและถูกใช้ในการศึกษาความยืดหยุ่นของอนุภาคหรือเซลล์



ภาพที่ 2.4 คีมจับเชิงแสงแบบใช้ใยแก้วนำแสง

2.7 คีมจับเชิงแสงแบบติดตั้งในเซลล์ของไหล

ในการนำคีมจับเชิงแสงไปประยุกต์ใช้งานเช่นการทำเครื่องตรวจจับมีความจำเป็นต้องย่อขนาดคีมจับเชิงแสงให้มีขนาดเล็กโดยการนำคีมจับเชิงแสงมาย่อขนาดแล้วฝังอยู่ในชิพซึ่งมีของไหลไหลผ่านให้เป็น Integrated Optics สำหรับช่องที่ของไหลผ่านอาจจะมีขนาดตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงระดับนาโนเมตรคีมจับเชิงแสงแบบนี้มีทั้งที่ใช้เลนส์วัตถุและแบบที่ใช้ใยแก้วนำแสงคีมจับเชิงแสงแบบติดตั้งในเซลล์ของไหลนี้กำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและคาดว่าจะแพร่หลายในอนาคตอันใกล้เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ทำอุปกรณ์ต่างๆได้มากมาย

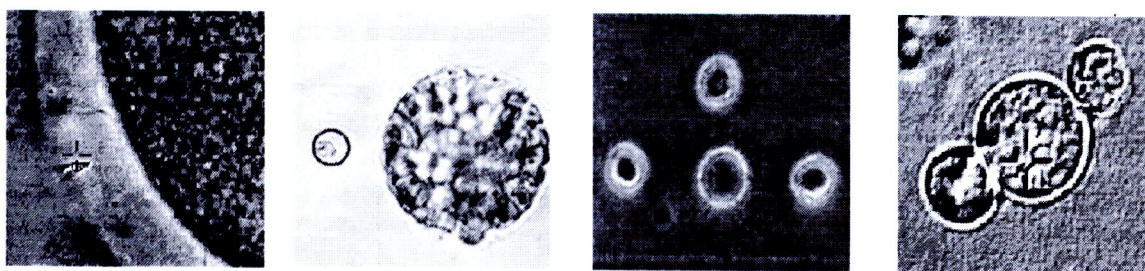
2.8 การประยุกต์ใช้งานคีมจับเชิงแสง

คีมจับเชิงแสงถูกนำไปประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสาขาต่างๆมากมายทั้งในสาขาชีววิทยาเคมี การแพทย์และอื่นๆตัวอย่างการนำคีมจับเชิงแสงไปประยุกต์ใช้มีดังนี้

2.8.1 การศึกษาด้านชีววิทยาในระดับเซลล์

ความสามารถของคีมจับเชิงแสงในการจับเซลล์และเคลื่อนย้ายเซลล์และออกแรงกระทำต่อเซลล์เช่นบีบอัดทำให้มีการนำคีมจับเชิงแสงไปใช้ในทางชีววิทยาอย่างมากนอกจากนั้นเรายังสามารถดักจับและออกแรงกระทำต่อส่วนประกอบอื่นๆภายในเซลล์เช่นนิวเคลียสคลอโรพลาสต์อีกด้วยห้องปฏิบัติการทางชีววิทยาส่วนใหญ่จะมีคีมจับเชิงแสงแบบสำเร็จรูปหรือไม่ก็เป็นแบบประกอบขึ้นเองคีมจับเชิงแสงที่ใช้ในทางชีววิทยาจะใช้เลเซอร์ในย่านอินฟราเรด 750-1200 nm เพราะเซลล์และเนื้อเยื่อมีการดูดกลืนต่ำทำให้ไม่เกิดความเสียหายโดยมากจะนิยมใช้เลเซอร์Nd:YAG ที่ความยาวคลื่น 1064 nm และบางครั้งจะใช้ร่วมกับกรรไกรเชิงแสง (optical scissors) หรือมีดตัดเชิงแสง(optical scalpel) เราสามารถทำ สิ่งต่างๆได้มากมายต่อเซลล์ เช่นจับเซลล์มาเซลล์หนึ่งแล้วศึกษาการแบ่งตัวหรือการเจริญเติบโตของเซลล์เซลล์นั้นขอยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้เพียงบางส่วน ดังนี้

การคัดแยกเซลล์และเชื้อแบคทีเรียเราสามารถใช้น้ำคีมจับเชิงแสงพาเชื้อแบคทีเรียที่ละตัวไปยังปลายท่อไมโครแคปิลารีโดยตรงโดยใช้คนบังคับคีมจับเชิงแสงโดยตรง



A

B

C

D

ภาพที่ 2.5 การประยุกต์ใช้คีมจับเชิงแสงในเซลล์สิ่งมีชีวิต (A) การนำสเปิร์มเข้าสู่ไข่ (B) การนำโครโมโซมออกจากเซลล์พืช (C) การศึกษาปฏิกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างเซลล์ประสาท (D) การนำเซลล์ข้ามะเร็งไปสัมผัสกับเซลล์มะเร็ง (A,B,C,D เรียงจากซ้ายไปขวา)

การช่วยปฏิสนธิมนุษย์มีการทดลองใช้เข็มจับเชิงแสงเป็นตัวนำสเปิร์มไปสัมผัสกับไข่เพื่อช่วยในการปฏิสนธิอีกการทดลองหนึ่งใช้กรรไกรเชิงแสงตัดผนังรังไข่เสียก่อนจากนั้นจึงใช้เข็มจับเชิงแสงนำตัวสเปิร์มเข้าสู่ไข่ผ่านทางผนังที่ตัดตั้งในรูปที่ 2.5 (A)

การศึกษาส่วนประกอบต่างๆของเซลล์เช่นการใช้กรรไกรเชิงแสงตัดผนังเซลล์พืชแล้วใช้เข็มจับเชิงแสงนำโครโมโซมออกจากเซลล์ดังในรูปที่ 2.5 (B)

การศึกษาเซลล์ประสาท (nerve cells) มีการนำเซลล์ประสาทมาวางเรียงกันเป็นรูปต่างๆดังในรูปแล้วศึกษาสัญญาณทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและสร้างวงจรไฟฟ้าจากเซลล์ประสาทอีกด้วยดังในรูปที่ 2.5 (C)

การศึกษาเกี่ยวกับมะเร็งมีการนำเซลล์มะเร็งไปติดกับเซลล์ที่ฆ่ามะเร็ง (killer cell) เพื่อทำลายเซลล์มะเร็งดังในรูป 2.5(D)

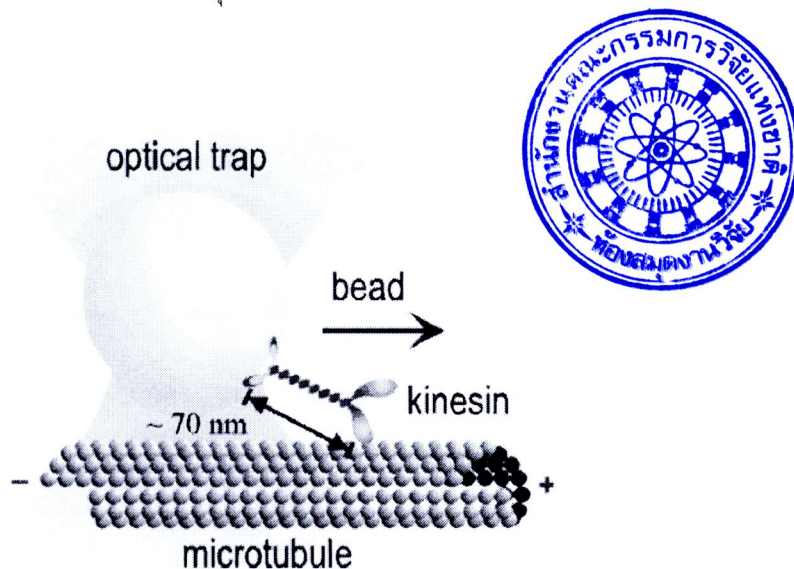
การผสมานเซลล์นักวิทยาศาสตร์สามารถผสมานเซลล์ 2 เซลล์เข้าด้วยกันโดยไม่ใช้วิธีการทางเคมีหรือไฟฟ้ามาช่วยโดยเพียงใช้มีดตัดเชิงแสงตัดผนังเซลล์ทั้งสองเซลล์แล้วใช้เข็มจับเชิงแสงนำเซลล์ทั้งสองมาสัมผัสกัน

2.8.2 การศึกษาด้านชีววิทยาระดับโมเลกุล

นอกจากจะใช้เข็มจับเชิงแสงในการจับเซลล์และส่วนต่างๆของเซลล์แล้วยังสามารถนำเข็มจับมาศึกษาชีวโมเลกุลซึ่งส่วนใหญ่จะศึกษาโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecule) เช่น DNA โครโมโซมและมอเตอร์โมเลกุลต่างๆเนื่องจากเราไม่สามารถใช้เข็มจับเชิงแสงจับโดยตรงเพราะมีขนาดเล็กเกินไปจึงต้องเชื่อมโมเลกุลกับเม็ดแก้วโดยการฉาบสารบางอย่างเช่นสาร Biotin และ streptavidin เป็นต้นแรงที่สารนี้เกาะกับเม็ดแก้วมีค่าประมาณ 300-400 pN ซึ่งมีความมากกว่าแรงเนื่องจากโมเลกุลที่จะทำการวัด (น้อยกว่า 100pN)

การประยุกต์ใช้เข็มจับเชิงแสงในทางชีววิทยาที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งคือการศึกษามอเตอร์โมเลกุล (molecular motor) ชนิดต่างๆมอเตอร์โมเลกุลที่เป็นโปรตีนซึ่งจะทำหน้าที่เป็นเสมือนเครื่องจักรดึงพลังงานอิสระที่ได้จากกระบวนการไฮโดรลิซิสของ ATP มาเป็นพลังงานกลสิ่งที่ที่น่าสนใจอย่างหนึ่งเกี่ยวกับมอเตอร์โมเลกุลก็คือมันทำงานในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เสถียรมีการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนมีการกวัดแกว่งของพลังงานแวดล้อมประมาณ 1kbT ที่ 25 C ซึ่งไม่น้อยเมื่อเทียบกับพลังงานอิสระประมาณ 20 kbT ที่ได้จากการสลายตัวของ ATP หนึ่งโมเลกุล 18 มอเตอร์โมเลกุลดึงพลังงานอิสระและพลังงานแวดล้อมที่ไร้ทิศทางแล้วมาทำให้ตนเองเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการดังที่เรียกว่ากระตือรือร้นความร้อน (thermal ratchet) ที่นักชีววิทยากำลังพยายามศึกษาว่ากระบวนการนี้เกิดขึ้นได้อย่างไรมอเตอร์โมเลกุลนับว่าเป็นเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเครื่องจักรที่มนุษย์เคยประดิษฐ์มาการศึกษามอเตอร์โมเลกุลนอกจากจะมีประโยชน์ด้านการศึกษาทางชีววิทยาแล้วยังมีประโยชน์ต่อเทคโนโลยีระดับนาโนหลายๆอย่างที่จะเกิดขึ้นในอนาคตเช่นการฝังชิพที่มียารักษาโรคไว้ใต้ผิวหนังมนุษย์แล้วใช้มอเตอร์โมเลกุลเป็นตัวนำโมเลกุลของยาไปสู่เซลล์

เป้าหมายที่ละน้อยเป็นมอเตอร์โมเลกุลที่นำมาศึกษามีหลายชนิดเช่นไมโอซินโคเนซินและ RNAP เป็นต้น



ภาพที่ 2.6 การศึกษาการเคลื่อนที่ไปตามท่อไมโครทิวบูลของโคเนซิน

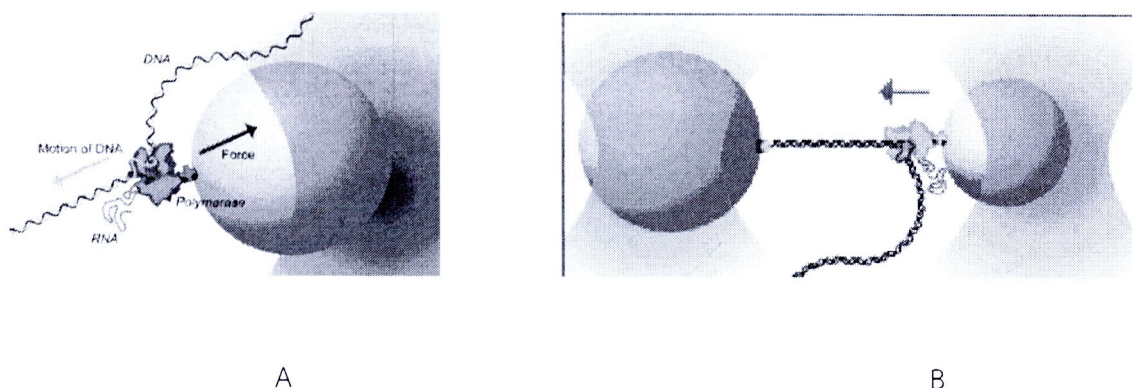
2.8.3 การศึกษาโคเนซิน

โคเนซิน (kinesin) เป็นมอเตอร์โมเลกุลชนิดหนึ่งที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายมีหน้าที่ลำเลียงโครโมโซม วิชีเซลล์ และสารอื่นๆ ไปตามท่อไมโครทิวบูลภายในเซลล์มีลักษณะเป็นโปรตีนสองสาย ขดกันปลายข้างหนึ่งจะจับสารที่จะลำเลียงปลายอีกด้านหนึ่งมีลักษณะเป็นเหมือนขาสองข้างเกาะกับผนังท่อไมโครทิวบูลดังในรูปที่ 6 โคเนซินเคลื่อนที่โดยใช้ขาสองข้างเกาะผนังไมโครทิวบูลสลับกันไป คล้ายการเดินการศึกษาโคเนซินทำได้โดยเชื่อมปลายข้างที่ใช้จับสารไว้กับเม็ดแก้วขนาดประมาณ 70 nm แล้วดักเม็ดแก้วด้วยคีมจับเชิงแสงเมื่อโคเนซินเคลื่อนที่ไปเราสามารถสังเกตจังหวะการเคลื่อนที่ และแรงได้จากเม็ดแก้วพบว่าโคเนซินสามารถแบกน้ำหนักได้สูงสุด 5-7 pN และเคลื่อนที่ประมาณ 8 nm ต่อหนึ่งก้าวโดยการสลาย ATP หนึ่งโมเลกุล Dr.Block จากมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ดยังทำการทดลองใช้เม็ดแก้วดึงโคเนซินทางด้านข้างและด้านหลังอีกด้วยปรากฏว่าทำให้โคเนซินเคลื่อนที่ช้าลงแต่ที่นำทิ้งก็คือเมื่อดึงไปด้านหน้ากลับไม่ทำให้มันเคลื่อนที่เร็วขึ้นเลย

2.8.4 การศึกษาอาร์เอ็นเอ พอลิเมอร์เรส

อาร์เอ็นเอ พอลิเมอร์เรส (RNA polymerase หรือ RNAP) เป็นมอเตอร์โมเลกุลชนิดหนึ่งมันจะเกาะไปตามสาย DNA แล้วทำการคัดลอกรหัสพันธุกรรมจาก DNA ลงสู่ RNA (RNA transcribing) Dr.Block ทำการทดลองวัดแรงและความเร็วในการเคลื่อนที่ของ RNAP ไปตาม DNA ในเซลล์ Escherichia Coli โดยเชื่อม RNAP ไว้กับเม็ดแก้วขนาด 0.5 μ m แล้วดักด้วยคีมจับเชิงแสงขณะที่ปลายของ DNA ก็เชื่อมกับเม็ดแก้วอีกเม็ดหนึ่งแล้วดักด้วยคีมจับเชิงแสงเช่นกันดังรูปที่ 2.7 ปรากฏว่าวัดแรงดึงได้ 15-30 pN

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	28 VII 2555
เลขทะเบียน.....	250389
เลขเรียกหนังสือ.....	



ภาพที่ 2.7 การศึกษาอาร์เอ็นเอ พอลิเมอเรสA การตรึง RNAP ไว้กับเม็ดแก้วโพลิสไตรีน B เมื่อ RNAP คัดลอกรหัสพันธุกรรมจะดึงเม็ดแก้วทั้งสองเข้าหากัน

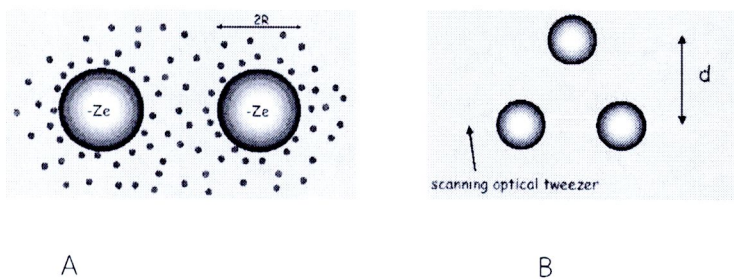
นอกจากที่กล่าวมาแล้วยังสามารถประยุกต์ใช้กับจับเชิงแสงในทางชีววิทยาอื่นๆดังตัวอย่างต่อไปนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์พืช, วิศวกรรมอาหาร, ศัลยกรรมระดับไมครอน, การวิเคราะห์ความผิดปกติของเส้นประสาท, การวิเคราะห์กระบวนการกระตุ้นประสาท, คัดแยกสารปนเปื้อนในเลือด, การวินิจฉัยโรค, การศึกษาภูมิคุ้มกัน, การรักษาทางพันธุกรรม, การช่วยฟักตัวของตัวอ่อน, การศึกษาการเจริญเติบโตของตัวอ่อน, การวินิจฉัยก่อนการผ่าตัดเปลี่ยนอวัยวะ, การคัดแยกโครโมโซม

2.8.5 การประยุกต์ใช้ในทางเคมี

ในทางเคมีมีการประยุกต์ใช้กับจับเชิงแสงในหลายๆด้านที่สำคัญคือการศึกษาเกี่ยวกับสารคอลลอยด์ และการสร้างโครงสร้างระดับไมโคร/นาโนดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.8.5.1 การศึกษาเกี่ยวกับคอลลอยด์

คอลลอยด์ คือ อนุภาคที่กระจุกกระจายกันอยู่ในตัวกลางอนุภาคคอลลอยด์แต่ละอนุภาคไม่ได้มีโมเลกุลเดี่ยวแต่มีหลายๆโมเลกุลรวมตัวกันอยู่อนุภาคคอลลอยด์เป็นได้ทั้งของแข็งของเหลวและก๊าซ มีขนาดตั้งแต่ 100 nm จนถึง 10 μ m แรงดึงดูดของโลกมีผลต่ออนุภาคคอลลอยด์น้อยมากเนื่องจากมีขนาดเล็กในการศึกษาคอลลอยด์ทำได้โดยใช้กับจับเชิงแสงจับอนุภาคคอลลอยด์แต่ละอนุภาคได้ จากนั้นนำมาใกล้กันหรือสัมผัสกันแล้วสังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นเช่นวัดแรงดูดกันหรือผลักกันของอนุภาค คอลลอยด์การทดลองที่ง่ายที่สุดคือจับอนุภาคคอลลอยด์อันหนึ่ง 2 อนุภาคมาอยู่ใกล้กันแล้วดูผลที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.8(A) หรือจับอนุภาคคอลลอยด์ 2 ตัวแล้วนำอนุภาคอีกต้นหนึ่งมาใกล้ดังในรูปที่ 2.8(B) และ 2.8(C) เราสามารถวัดแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองได้ด้วย



A

B

ภาพที่ 2.8 การศึกษาแรงที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคคอลลอยด์โดย (A) ใช้คีมจับเชิงแสงจับอนุภาคหนึ่ง แล้วนำอีกอนุภาคมาอยู่ใกล้ (B) ใช้คีมจับเชิงแสงจับอนุภาค 2 ตัวแล้วนำอีกอนุภาคหนึ่งมาอยู่ใกล้

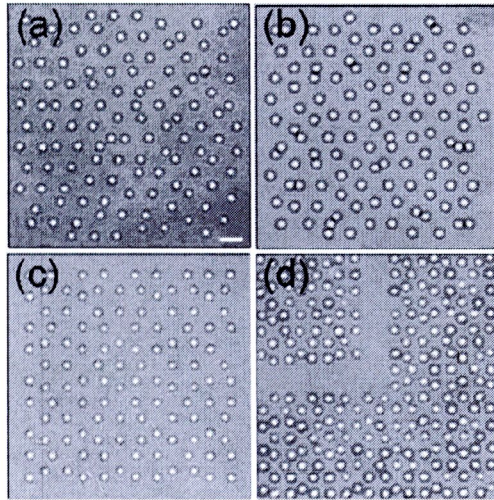
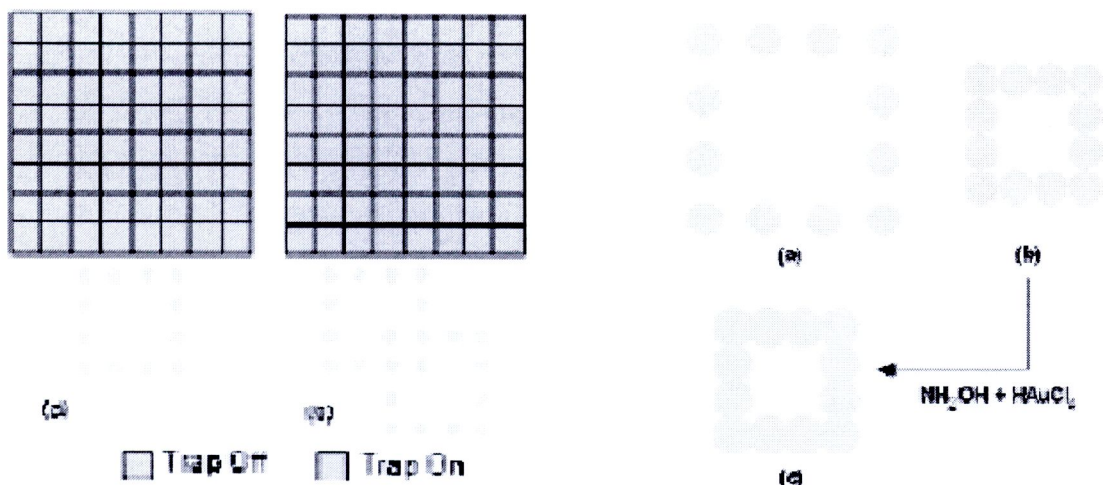


Fig. 1. Two-dimensional colloidal quasicrystals organized with holographic optical traps. (a) 5-fold, (b) 7-fold, (c) 8-fold, (d) An octagonal quasicrystal with an embedded structured defect. The scale bar in (a) indicates 5 μm .

ภาพที่ 2.9 การจัดเรียงอนุภาคคอลลอยด์เป็นรูปทรงสามมิติ 5 เหลี่ยมถึง 8 เหลี่ยมด้วย HOT ทีมของ Dr. Grier ทีมมหาวิทยาลัยนิวยอร์กใช้คีมจับเชิงแสงแบบโฮโลกราฟิกรเรียงอนุภาคคอลลอยด์เป็นรูป 5 เหลี่ยมจนถึง 8 เหลี่ยมสามมิติดังรูปที่ 9(A) นอกจากนี้จะสามารถเรียงอนุภาคคอลลอยด์ได้แล้วยังสามารถศึกษาแรงและการจัดเรียงตัวของอนุภาครอบๆ อนุภาคที่ถูกเรียงอีกด้วย

2.8.5.2 การสร้างโครงสร้างระดับไมโครและนาโน(micro/nanostructures)

ทีมของ Metin Sitti ทีมมหาวิทยาลัยคาร์เนกีเมลลอนประเทศสหรัฐอเมริกาใช้คีมจับเชิงแสงแบบโฮโลกราฟิกร่วมกับวิธีการทางเคมีเพื่อใช้ในการสร้างโครงสร้างระดับไมโครและนาโน (micro/nanostructures) โดยทดลองสร้างโครงสร้างจากอนุภาคทองคำสำหรับรูปแบบของ HOT จะเป็นคีมจับหลายอันเรียงกันเป็นผลึก 2-3 มิติขั้นตอนแรกจะนำอนุภาคผ่านเซลล์ของไหลเข้าสู่ HOT แล้วเปิดคีมจับเป็นรูปต่างๆเช่นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.10(A) อนุภาคจะมารวมตัวกันณคีมจับที่เปิดอยู่จากนั้นจะทำการล้างอนุภาคที่ตกค้างที่อื่นโดยใช้ของเหลวพาไปอนุภาคที่จับในการทดลองนี้มีไอออนของ Au^{3+} เป็นองค์ประกอบจากนั้นจะดึงคีมจับมาติดกันแล้วนำสาร NH_2OH และ HAuCl_2 ผ่านเข้าไปในเซลล์ของไหลสารนี้จะไปทำปฏิกิริยา รีดักชันกับไอออนของทองคำทำให้เปลี่ยนเป็น Au แล้วเกิดพันธะโลหะระหว่างอะตอมของ Au เกิดโครงสร้างรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.10(B)



ภาพที่ 2.10 ตัวอย่างการสร้างโครงสร้างระดับไมโคร/นาโน (A) การเปิดคีมจับใน HOT เป็นรูปต่างๆ (B) การทำให้อนุภาคทองคำสร้างพันธะโลหะด้วยวิธีการทางเคมี

การสร้างโครงสร้างระดับนาโนไมโครนี้มีแนวโน้มจะได้รับการพัฒนาต่อไปซึ่งมีประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีระดับนาโนในอนาคต

2.8.5.3 การทำสเปกโตรสโกปีกับโมเลกุล

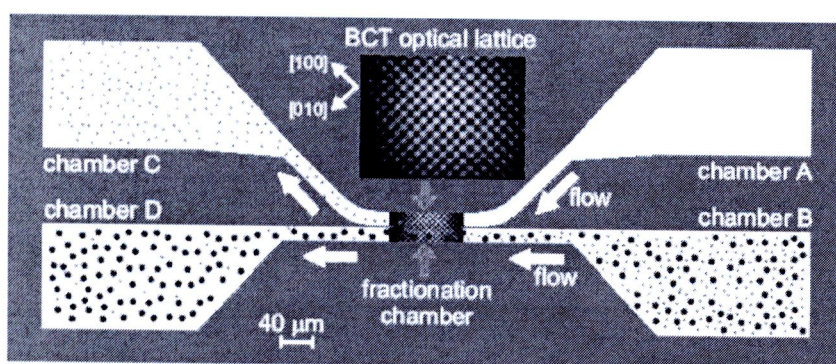
คีมจับเชิงแสงช่วยให้เราสามารถทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของสารโดยวิเคราะห์เพียงโมเลกุลเดียวได้โดยใช้คีมจับเชิงแสงจับโมเลกุลไว้การทำสเปกโตรโกปีร่วมกับคีมจับเชิงแสงสามารถทำได้ทั้งแบบรามัน (Raman Spectroscopy) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การสั่นการหมุนจากแสงมีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปเนื่องจากพลังงานของโฟตอนเปลี่ยนไปเป็นโฟนอนหรือรวมกับโฟนอนหรืออาจจะทำสเปกโตรโกปีแบบฟลูออเรสเซนซ์ธรรมดาก็ได้

2.9 เทคโนโลยีอื่นที่น่าสนใจเกี่ยวกับคีมจับเชิงแสง

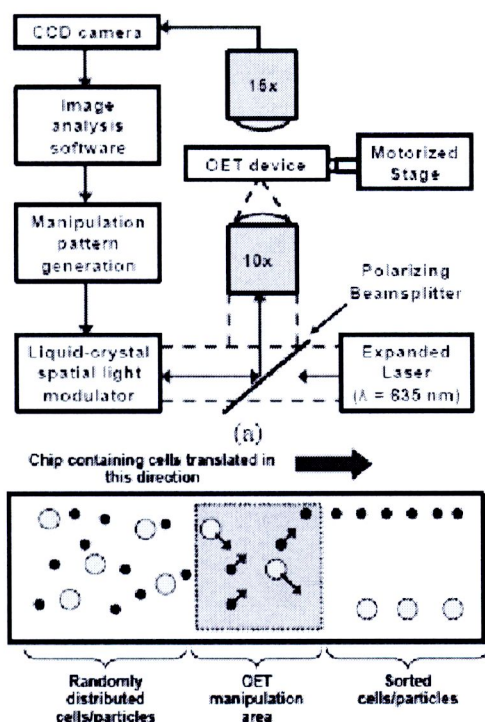
คีมจับเชิงแสงในการหาเครื่องคัดแยกอนุภาคอัตโนมัติระดับไมโคร-นาโนเมตร (Optical Sorting) การคัดแยกอนุภาคด้วยคีมจับเชิงแสงโดยการใช้คนในการตัดสินใจเลือกอนุภาคที่ละชิ้นให้ได้เฉพาะในห้องทดลองเมื่อมีจำนวนอนุภาคน้อยในการใช้งานจริงสามารถสร้างเครื่องคัดแยกอนุภาคอัตโนมัติโดยใช้คีมจับเชิงแสงคัดแยกอนุภาคขนาดเล็กเช่นเซลล์และอนุภาคนาโนเมตรจนถึงนาโนเมตรเครื่องคัดแยกอนุภาคอาจมีรูปแบบต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบและการใช้งานตัวอย่างของเครื่องคัดแยกอนุภาคโดยใช้คีมจับเชิงแสงมีดังนี้

พัฒนาโดยทีมนักวิจัยที่มหาวิทยาลัยเซนต์แอนดรูมีรูปร่างดังรูปที่ 2.10 ของเหลวจะไหลจากปล่อง A และ B เข้าสู่ปล่องคัดแยก (Fractionation Chamber) โดยที่ของเหลวในปล่อง B มีอนุภาคที่ต้องการคัดแยกขณะที่ในปล่อง A เป็นของเหลวเปล่าๆตามทฤษฎีของเรย์โนลด์ถ้าปล่องมีขนาดเล็กถึงระดับหนึ่งจะมีเลขเรย์โนลด์ต่ำของเหลวจะไหลแบบต่อเนื่องเรียบๆ (Laminar Flow) คือของอนุภาคที่

อยู่ในเหลวจากปล่อง B จะไหลไปสู่ปล่อง D ทั้งหมดและจากปล่อง A ไหลสู่ปล่อง C ทั้งหมดภายในปล่องคัดแยกมีกับดักเชิงแสงหลายอันเรียงกันใน 3 มิติสร้างจากกับดักเชิงแสงแบบโฮโลกราฟิกเรียกว่าผลึกเชิงแสง (Optical Lattice หรือ Optical Peritalysis) เราสามารถเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องคัดแยกอนุภาคโดยให้มองคีมจับเชิงแสงว่าเป็นหลุมความต่างศักย์อันหนึ่งโดยที่กำลังของแสงแปรผันสอดคล้องกับความลึกของหลุมอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มีพลังงานมากกว่าความลึกของหลุมจะไม่ถูกจับโดยกับดักเชิงแสงและไหลเข้าสู่ปล่อง D อนุภาคขนาดเล็กจะถูกจับโดยกับดักเชิงแสงซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนอย่างต่อเนื่องและไหลไปยังปล่อง C เครื่องคัดแยกอนุภาคเชิงแสงแบบนี้จึงไม่ต้องการวิเคราะห์อนุภาค (passive) ถ้าของเหลวมีอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกันเปอร์เซ็นต์การแยกจะน้อยเราอาจนำของเหลวในปล่อง D ไหลวนเข้ามาที่ปล่อง B อีกหลายๆครั้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกนอกจากนั้นถ้าต้องการแยกอนุภาคหลายๆขนาดเราอาจผ่านของเหลวเข้าสู่ปล่องคัดแยกหลายๆปล่องต่อเนื่องกันไปโดยคัดเลือกอนุภาคขนาดเล็กก่อนแล้วเพิ่มขนาดขึ้นตามลำดับ (cascading) นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้การคัดแยกเซลล์ได้โดยนำเม็ดแก้วขนาดต่างๆกันไปเคลือบสารที่เกาะกับเซลล์ต่างชนิดกันเซลล์แต่ละชนิดก็จะเคลื่อนไปตามเม็ดแก้วขนาดนั้นๆ



ภาพที่ 2.11 แผนผังเครื่องคัดแยกอนุภาคระดับไมโคร-นาโนเมตรของมหาวิทยาลัยเซนต์แอนดรูส์ เครื่องคัดแยกอนุภาคแบบมีการวิเคราะห์อนุภาค (Active Sorting) ตัวอย่างของเครื่องคัดแยกอนุภาคสร้างโดยทีมจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียที่ Berkeley มีรูปแบบดังในรูปที่ 2.12 เป็นการผ่านของเหลวที่มีอนุภาคที่จะคัดแยกผ่านเซลล์ของเหลวขนาดเล็กภาพของช่องของไหลนี้จะถูกฉายลงบนจอภาพ CCD จากนั้นมีการวิเคราะห์รูปร่างและขนาดของอนุภาคที่ผ่านมาโดยคอมพิวเตอร์โดยอาศัยข้อมูลจากแสงที่ตกลงบนพิกเซลต่างๆจากนั้นคอมพิวเตอร์จะสั่งเครื่อง HOT จับอนุภาคและติดตามอนุภาคไปยังช่องที่กำหนดดังในรูป 2.12 (b) ในการทดลองนี้สามารถคัดแยกเม็ดแก้วโพลิสไตรีนขนาดต่างๆและคัดแยกเซลล์เฮลาได้อีกด้วย (Hela Cell)



ภาพที่ 2.12 แผนผังเครื่องคัดแยกอนุภาคจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย

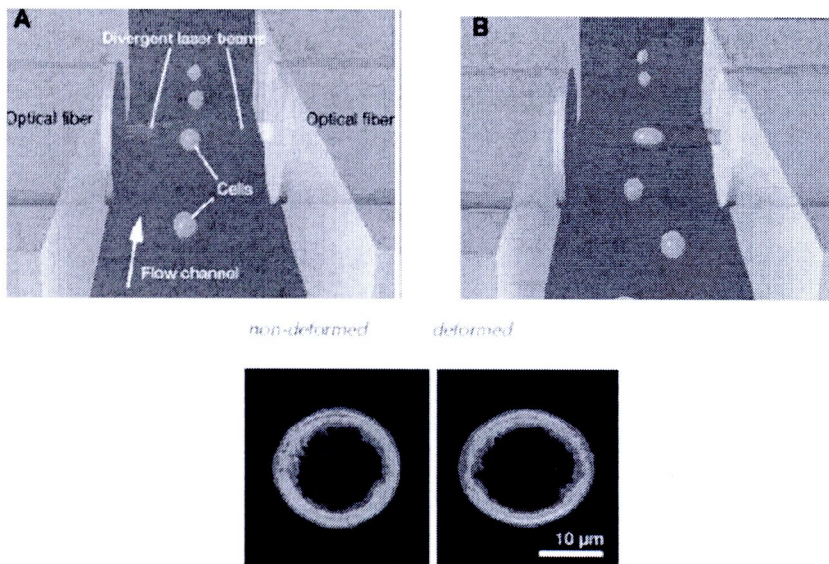
2.9.2 คีมจับเชิงแสงในการทำเครื่องตรวจจับ (Sensors)

คีมจับเชิงแสงสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องตรวจจับอนุภาคขนาดเล็กได้อีกด้วยโดยมักใช้คีมจับเชิงแสงจับอนุภาคที่ต้องการในของเซลล์ของไหลตัวอย่างเครื่องตรวจจับที่ใช้คีมจับเชิงแสงมีดังนี้

2.9.3 เครื่องตรวจหาเซลล์มะเร็ง (Leipzig)

ต้นแบบเครื่องตรวจหาเซลล์มะเร็งโดยใช้เครื่องตรวจจับเชิงแสงถูกพัฒนาขึ้นโดยทีมของศาสตราจารย์ Josef Kas ที่มหาวิทยาลัยไลป์ซิก (Leipzig) ในประเทศเยอรมันนีในปี 2005 โดยอาศัยหลักการที่ว่าเซลล์มะเร็งจะมีความยืดหยุ่นสูงเมื่อถูกตรึงด้วยเครื่องตรวจจับเชิงแสงคณะนักวิจัยยังอ้างว่าเครื่องนี้เป็นเครื่องตรวจหาเซลล์มะเร็งที่มีความละเอียดที่สุดในโลกในปัจจุบัน นอกจากนั้นยังตรวจง่ายมีราคาถูกกว่าแบบเดิมและไม่ต้องการการฉีดสีเหมือนเครื่องตรวจแบบดั้งเดิมปกติแล้วภายในเซลล์ต่างๆจะมีไซโตสเกเลตอน (cytoskeleton) เป็นชีวโพลิเมอร์ซึ่งมีความแข็งอยู่ในไซโตพลาซึม (cytoplasm) ทำหน้าที่กำหนดรูปร่างของเซลล์เปรียบเสมือนเป็นโครงกระดูกของเซลล์เมื่อเซลล์ถูกดักจะถูกแรงยึดจากเครื่องตรวจจับเชิงแสงในเซลล์มะเร็งหรือเซลล์เนื้อร้ายไซโตสเกเลตอนจะสูญเสียคุณสมบัติความแข็งแรงและทำให้เซลล์มีความยืดหยุ่นสูงกว่าเซลล์ปกติการทำงานของเครื่องตรวจหามะเร็งจะนำตัวอย่าง

เซลล์จากชิ้นเนื้อผ่านเข้าสู่เซลล์ของไหลซึ่งมีเครื่องตรวจจับแสงดังรูป 2.13(A) เมื่อถูกตรวจจับอยู่ระหว่างเครื่องตรวจจับเซลล์มะเร็งจะยึดออกมามากกว่าเซลล์ทั่วไปดังในรูปที่ 2.13(B) และ (C) เครื่องตรวจจับเซลล์มะเร็งต้องการตัวอย่างเพียง 50 เซลล์จากชิ้นเนื้ออกในการตรวจหา ขณะที่การตรวจเซลล์มะเร็งแบบเก่าต้องใช้เซลล์จำนวน 10,000-100,000 เซลล์จากชิ้นเนื้ออก



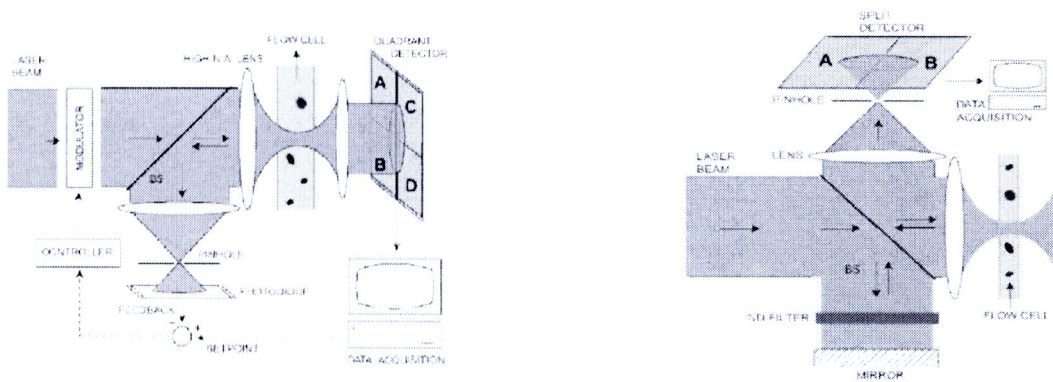
ภาพที่ 2.13 (A) ผังเครื่องตรวจจับเซลล์มะเร็งด้วยเครื่องตรวจจับเชิงแสง (B) การยึดออกของเซลล์มะเร็งเมื่อถูกตรวจจับ (C) ตัวอย่างภาพถ่ายของเซลล์ปกติและเซลล์ที่เปลี่ยนรูปร่างไป

เครื่องนี้ยังสามารถระบุเซลล์มะเร็งที่อยู่ในสถานะเมทาस्टิก (metastatic cancer cell) ได้อีกด้วย เซลล์มะเร็งชนิดนี้มีความยึดหยุ่นสูงมากจึงสามารถเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งร่างกาย เป็นสาเหตุทำให้เกิดเนื้อร้ายในที่อื่นๆตามมา (secondary tumor) ซึ่งก่อนหน้านี้การตรวจหาเนื้ออกนี้ทำได้ยากมากโดยการตรวจหาจากที่อื่นๆในร่างกายเท่านั้นประโยชน์ของการตรวจหาเนื้อร้ายชนิดเมทาस्टิกนี้คือ ทำให้ผู้ป่วยโรคมะเร็ง (เช่น มะเร็งเต้านม) แต่ไม่มีเซลล์เนื้อร้ายชนิดนี้ไม่ต้องได้รับการรักษาแบบเคมีบำบัดทั่วร่างกายซึ่งต้องได้รับความทุกข์ทรมานมาก นอกจากนั้นเทคนิคเดียวกันนี้ยังสามารถคัดแยกสเต็มเซลล์จากตัวอย่างเลือดมนุษย์เนื่องจากไซโตสเกลเลทอนในสเต็มเซลล์มีความอ่อนตัวสูงเพราะยังไม่มีการพัฒนารูปร่างไปเป็นแบบใดแบบหนึ่งมีการนำสเต็มเซลล์ที่ได้จากวิธีนี้ไปรักษาแผลเรื้อรังจากผู้ป่วยเทคนิคนี้จึงเป็นวิทยาการใหม่ในการศึกษาเกี่ยวกับสเต็มเซลล์อีกด้วย

2.9.4 เครื่องตรวจจับเชื้อไวรัสและอนุภาคระดับนาโนเมตร

ในปี 2006 Lukas Novotny จากมหาวิทยาลัยโรเชสเตอร์ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการทดลองใช้คีมจับเชิงแสงในการตรวจหาเชื้อไวรัสและอนุภาคระดับนาโนเมตร 32 โดยใช้สองวิธีดังรูปที่ 2.14 การทดลองทั้งสองวิธีเหมือนกันตรงที่เป็นการโฟกัสคีมจับเชิงแสงในเซลล์

ของเหลวซึ่งมีอนุภาคระดับนาโนเมตรไหลผ่านแต่ต่างกันตรงที่วิธีการบันทึกตำแหน่งของอนุภาคในการทดลองนี้เราไม่ใช้คีมจับเชิงแสงจับอนุภาคระดับนาโนเมตรเพียงแต่ใช้แรงจากคีมจับเชิงแสงในการเร่งและชะลออนุภาคที่ผ่านเข้ามาเมื่ออนุภาคไหลผ่านบริเวณคีมจับเชิงแสงอนุภาคจะถูกเร่งเกรเดียนท์กระทำโดยขณะที่อนุภาคไหลเข้าหาจุดโฟกัสอนุภาคจะถูกเร่งทำให้เคลื่อนที่เร็วขึ้นและหลังจากที่ไหลผ่านจุดโฟกัสอนุภาคจะถูกเร่งเกรเดียนท์ดึงกลับเข้าหาจุดโฟกัสทำให้ไหลช้าลงยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็กเท่าไรแรงจากคีมจับก็จะมีผลน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแรงของของไหล (Stroke force) ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วน้อยการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ทำให้ทราบขนาดของอนุภาคที่ไหลผ่าน



ภาพที่ 2.14 แผนผังแสดงเครื่องตรวจจับเชื้อไวรัสและอนุภาคระดับนาโนเมตรโดย (A) วัดการแทรกสอดของที่ระนาบโฟกัสด้านหลัง (B) วัดในรูปแบบเครื่องวัดการแทรกสอดแบบไมเคิลสัน การทดลองแรกใช้เครื่องตรวจจับแสงแบบควอเรนท์ในการระบุตำแหน่งของอนุภาคโดยวัด

การแทรกสอดระหว่างแสงเลเซอร์ที่ไปข้างหน้าปกติกับแสงที่กระเจิงจากอนุภาคไปด้านหลังตามรูป 2.14(A) ผลการทดลองปรากฏว่าสัญญาณที่ได้ไม่ค่อยดีเนื่องจากแสงเลเซอร์ที่ไปด้านหน้ามีปกติมีความเข้มมากส่วนแสงที่กระเจิงจากอนุภาคไปด้านหลังมีความเข้มน้อยไม่สมดุลกันเพราะอนุภาคมีขนาดเล็กการทดลองที่สองแก้ปัญหานี้โดยใช้รูปแบบการแทรกสอดแบบไมเคิลสันดังรูปที่ 2.14 (B) การวัดตำแหน่งกระทำโดยใช้เครื่องตรวจจับแสงแบบสองข้าง (Split Detector) วัดการแทรกสอดระหว่างแสงที่กระเจิงจากอนุภาคไปด้านหลังกับแสงเลเซอร์ที่แยกไปที่แขนอีกด้านหนึ่งวิธีนี้เราสามารถใส่ฟิลเตอร์ที่แขนที่แยกไปดังกล่าวเพื่อให้ความเข้มเท่ากัน (Background Free) การทดลองครั้งหลังนี้สามารถจับตรวจอนุภาคขนาดต่างๆได้โดยตรวจพบเม็ดแก้วโพลิสไตรีนขนาดเล็กถึง 15 nm และอนุภาคทองคำขนาด 7 nm ได้นอกจากนี้ยังทดลองตรวจไวรัสใช้หวัดใหญ่ชนิด Influenza AX-31 ได้อีกด้วย

2.10 แนวโน้มการพัฒนาเครื่องมือจับเชิงแสง

ในอนาคตคาดว่าจะมีการใช้เครื่องมือจับเชิงแสงในการศึกษาและในอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องรวมถึงการศึกษาทางชีววิทยาและเคมีเช่นมอเตอร์โมเลกุลและเซลล์สิ่งมีชีวิตต่างๆ การศึกษาสารคอลลอยด์และสารเคมีอื่นๆจะมีเพิ่มขึ้นซึ่งมีประโยชน์ต่อวงการแพทย์และเทคโนโลยีอื่นๆในทางอุตสาหกรรมเครื่องมือจับเชิงแสงจะมีแนวโน้มจะถูกย่อขนาดให้เล็กลงและมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยใช้เครื่องมือจับแบบไฮโลกราฟิคและแบบใยแก้วนำแสงโดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำเป็นชิปร่วมกับเซลล์ของไหลเพื่อทำเป็นเครื่องตรวจจับและเครื่องคัดแยกวัตถุต่างๆนอกจากนี้เครื่องมือจับเชิงแสงยังจะมีบทบาทเพิ่มขึ้นในการสร้างโครงสร้างระดับไมโคร หรือนาโนอีกด้วย