

บทความวิชาการ (Article)

การกักขังอะตอมเดี่ยวครั้งแรกในประเทศไทย

กฤษณะ สระแก้ว¹, จินดารัตน์ พรหมเผ่า¹, ชาญกิจ คั่นฉ่อง² และ วรานนท์ อนุกุล¹¹ห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่²ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บทคัดย่อ

ในปี ค.ศ. 2019 กลุ่มนักฟิสิกส์ไทยจากห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ถ่ายภาพอะตอมเดี่ยวเป็นครั้งแรกของประเทศไทย ภายหลังจาก 8 ปีของการพัฒนาอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ทั้งหมดที่จำเป็น กลุ่มก๊าซอะตอมรูบิเดียม-85 ในสุญญากาศสูงได้รับการทำความเย็นด้วยเลเซอร์ไปที่อุณหภูมิ 50 ไมโครเคลวิน ก่อนถ่ายเทไปสู่แถวหนึ่งมิติของกักขังเชิงแสงในขอบเขตการบรรจุแบบการแจกแจงปัวซองชั้นรอง การกระจายเชิงสถิติของจำนวนโฟตอนตรวจนับที่สร้างขึ้นจากภาพถ่าย 1,000 ภาพโดยอาศัยกล้อง EMCCD แสดงผลลัพธ์สุ่มเพียงสองแบบ คือ 0 หรือ 1 อะตอมในแต่ละกับดักแสง บทความนี้ได้อธิบายอย่างย่อถึงระเบียบวิธีหลักบางประการ และประโยชน์ของอะตอมเดี่ยวเชิงบิตควอนตัมในเทคโนโลยีการคำนวณ การตรวจจับเซนเซอร์และระบบเครือข่าย

คำสำคัญ: อะตอมเดี่ยว, รูบิเดียม-85, กักขังเชิงแสง, การคำนวณควอนตัม, การตรวจจับเซนเซอร์ควอนตัม, เครือข่ายควอนตัม

Abstract

In year 2019, a group of Thai physicists at Quantum Atom Optics Laboratory, Chiang Mai University, has taken pictures of single atoms for the first time in Thailand. After 8 years of self-developing all necessary scientific apparatus, gaseous atoms of rubidium-85 in ultra-high vacuum had been laser-cooled to 50 μ K before transferred into a 1D array of optical tweezers in the sub-Poissonian loading regime. A statistical distribution of photon counts created from a thousand images taken with an EMCCD camera demonstrated only two random outcomes, i.e. 0 or 1 atom in each trap. This article briefly described some key methodology and the usefulness of single atoms as quantum bits in computing, sensing and networking technologies.

Keywords: single atoms, rubidium-85, optical tweezers, quantum computing, quantum sensing, quantum network

อะตอม คือหน่วยย่อยขนาดเล็กของสสาร มีขนาดประมาณ 0.1 นาโนเมตร ซึ่งเล็กกว่าความหนาของเส้นผมมนุษย์ประมาณล้านเท่า พฤติกรรมของอะตอมไม่ใช่ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่สังเกตพบเห็นได้โดยตรงในชีวิตประจำวันของเรา แต่กลับมีความแปลกประหลาดอันน่าเหลือเชื่อที่อธิบายได้ด้วยกลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งมีแนวคิดสำคัญ เช่น การซ้อนทับโคฮีเรนต์ (coherent superposition) และความพัวพันควอนตัม (quantum entanglement) ซึ่งพออธิบายโดยสังเขปดังนี้

ในกลศาสตร์ควอนตัม อนุภาคควอนตัม เช่น อะตอม สามารถอยู่ในสถานะฐานหลัก (basis state) ได้มากกว่าหนึ่งสถานะในเวลาเดียวกัน สถานะซ้อนทับ (superposition state) ของอะตอมนี้สามารถเขียนตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ในรูปของผลรวมเชิงเส้น (linear combination) ของสถานะฐานหลักชุดหนึ่ง ซึ่งก็คือ ฟังก์ชันคลื่น (wave function) หรือ ฟังก์ชันสถานะ (state function) นั่นเอง เมื่อทำการวัดเชิงควอนตัม (quantum measurement) สภาพซ้อนทับของสถานะจะสลายไป (collapse) โดยอะตอมจะอยู่ได้ในสถานะฐานหลักใดสถานะหนึ่งเท่านั้น และจะมีสภาพเป็นอะตอมในกลศาสตร์แบบฉบับ (classical atom) ในทันที ทฤษฎีควอนตัมจะบอกได้เพียงความน่าจะเป็นที่จะพบอะตอมในแต่ละสถานะเมื่อทำการวัดแต่ละครั้งไว้ในค่าฟังก์ชันคลื่น เมื่อทำการวัดแบบเดียวกันกับระบบที่เหมือนกันทุกประการจำนวนมาก ก็จะได้ผลลัพธ์เป็นกราฟสถิติแสดงค่าความถี่ (histogram) ของการปรากฏสถานะที่วัดได้ตามความน่าจะเป็นที่กำกับสถานะนั้น ๆ การกระจายตัวของผลการวัดรอบ ๆ ค่าสูงสุดเฉพาะที่ ดังกล่าว สอดคล้องหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg's uncertainty principle)

ยังมีสถานการณ์พิเศษที่กลุ่มอะตอมมีอันตรกิริยาต่อกันในแบบที่ทำให้สถานะทางควอนตัมของแต่ละอะตอมเหล่านั้นไม่เป็นอิสระจากกันและกัน ไม่ใช่ความสัมพันธ์เชิงสถานะ (state correlation) แบบทั่วไปด้วย กล่าวคือ สถานะใหม่ของกลุ่มอะตอมดังกล่าวไม่สามารถสร้างขึ้นได้จากผลรวมเชิงเส้นของสถานะอะตอมหน่วยย่อย ทำให้ความเป็นตัวตนของแต่ละอะตอมสูญสลาย เกิดเป็นระบบใหม่ที่อยู่ในสถานะพัวพันควอนตัม ปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้การวัดสถานะ (Hermitian operation) หรือการรบกวนสถานะ (non-Hermitian operation) ทางควอนตัมของอะตอมตัวหนึ่ง จะส่งผลกับอะตอมตัวอื่น ๆ ที่พัวพันกันอย่างทันที ถึงแม้ว่าอะตอมแต่ละตัวจะอยู่ห่างกันมากก็ตาม ซึ่งไม่เป็นไปตามหลักเหตุและผล (principle of causality) ของกลศาสตร์แบบฉบับ (classical mechanics) ในกลศาสตร์แบบฉบับนั้น ปฏิสัมพันธ์ของ เหตุ (เช่น แรง อันตรกิริยา หรือ การวัด) ไปยัง ผลลัพธ์ (ความเปลี่ยนแปลงสถานะ) จะส่งผ่านในรูปการกระเพื่อมของสนาม (field) ที่ใช้เวลาเดินทางไปในอวกาศไม่ไวกินกว่าอัตราเร็วแสง อย่างไรก็ตาม แม้สมบัติทางควอนตัมของอะตอมเดี่ยวและกลุ่มของอะตอมยังไม่สามารถเป็นที่เข้าใจได้ทั้งหมดด้วยไวยากรณ์ของกลศาสตร์แบบฉบับ ขณะนี้นักวิจัยทั่วโลกกำลังประยุกต์ใช้งานฟิสิกส์ควอนตัมของอะตอมในเชิงเทคโนโลยีอย่างเข้มข้น

ประโยชน์ของเทคโนโลยีควอนตัม

ปัจจุบันนักฟิสิกส์ได้ศึกษาและประยุกต์ใช้สมบัติเชิงควอนตัมของอะตอมเดี่ยวเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1. การคำนวณควอนตัมและการจำลองควอนตัม (quantum computing and quantum simulation) คือ การสร้างอุปกรณ์คำนวณ การจำลองระบบ และการออกแบบอัลกอริทึม เพื่อแก้ปัญหาบางประเภทที่ยากลำบากเกินกว่าคอมพิวเตอร์คลาสสิกจะจัดการได้ แม้แต่ในอนาคต โดยอาศัยหน่วยย่อยในระบบทวิภาค (binary) ของการประมวลผลทางควอนตัม ที่เรียกว่า คิวบิต (qubit) หรือ ควอนตัม

บิต (quantum bit) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลการซ้อนทับของ 2 สถานะ ที่เรียกเป็น "0" และ "1" โดยเมื่อเพิ่มจำนวนคิวบิตในระบบ จำนวนสถานะของระบบรวมจะเพิ่มขึ้นอย่างเอ็กโพเนนเชียล ทำให้ระบบรวมที่ประกอบขึ้นจากเพียงแค่มิติอะตอมสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลเข้าไปได้จำนวนมหาศาลพร้อม ๆ กันทั้งหมด โดยอาศัยวงจรควอนตัม (quantum circuit) และกระบวนการเชิงกายภาพของประตูตรรกะควอนตัม (quantum gate) ที่บังคับควบคุมคิวบิตอีกที อัลกอริทึมควอนตัมซึ่งเขียนด้วยภาษาคอมพิวเตอร์คลาสสิกจะระดับสูงจะสามารถดำเนินการกับทุกสถานะที่ซ้อนทับไปแบบคู่ขนานในครั้งเดียว จึงทำให้คอมพิวเตอร์ควอนตัมมีขีดความสามารถเชิงขนาดข้อมูลและความเร็วในการแก้ปัญหาที่มากกว่าคอมพิวเตอร์คลาสสิกอย่างมาก ความฝันถึงเครื่องคำนวณอันทรงพลังดังกล่าวของนักฟิสิกส์ได้รับการวิพากษ์วิจารณ์จนเริ่มเป็นจริงขึ้นมาบ้างแล้ว โดยเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม พ.ศ. 2562 บริษัท กูเกิล (Google) ได้ประกาศความสำเร็จของความเหนือกว่าเชิงควอนตัม (quantum supremacy) เป็นครั้งแรกของโลก โดยทีมนักวิจัยได้ใช้งานคอมพิวเตอร์ควอนตัมแบบสภาพนำยวดยิ่ง (superconducting quantum computer) ซึ่งภายในประกอบด้วยวงจรรอยต่อโจเซฟสัน (Josephson junction circuit) อันเปรียบได้กับอะตอมจำลอง (artificial atom) จำนวน 53 คิวบิต พวกเขาได้นำไปใช้คำนวณแก้ปัญหาที่ได้รับการออกแบบมาอย่างพิเศษโดยคาดการณ์ว่าหากใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ ไอบีเอ็ม ซัมมิต (Summit) ที่เทียบเท่ากับคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะประมาณ 100,000 เครื่อง จะใช้เวลากว่า 10,000 ปี ในขณะที่ใช้คอมพิวเตอร์ควอนตัมดังกล่าวสามารถย่นเวลาเหลือเพียง 3 นาที 20 วินาทีเท่านั้น [1]

นอกจากเทคโนโลยีสภาพนำยวดยิ่งที่ถูกลงทุนวิจัยไปมากมายแล้ว ยังมีระบบเชิงกายภาพอื่นที่สามารถนำไปสู่คอมพิวเตอร์ควอนตัมสากล (universal) ที่ทนทานต่อสัญญาณรบกวน (fault tolerance) ได้ คู่แข่งที่มีศักยภาพและมีข้อดีข้อด้อยที่สมน้ำสมเนื้อกันก็คืออะตอมเย็น ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาในมหาวิทยาลัยเชิงใหม่อีกด้วย แต่ถึงแม้ว่าการบวนการจัดเรียงอะตอมเดี่ยวในแลตทิซแสงที่ถูกพัฒนาขึ้นมาได้ไม่นานมานี้จะสร้างจุดเด่นในเรื่องการขยายสเกลไปสู่ระบบคำนวณแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ อีกทั้งยังมีการสร้างประตูตรรกะเชิงควอนตัมแบบอะตอมริดเบิร์ก (Rydberg atom – อะตอมที่มีอย่างน้อยหนึ่งอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไประดับพลังงานสูง มีเลขควอนตัมหลักมากกว่า 20 โดยประมาณ) ซึ่งทำให้อันตรกิริยาระหว่างคิวบิตปรับความแรงได้จากระดับอ่อนเนื่องจากอันตรกิริยาแวนเดอร์วาลส์ไปจนถึงระดับแรงของการเหนี่ยวนำไดโพลที่ใกล้เคียงกับอันตรกิริยาระหว่างไอออน คุณสมบัติที่โดดเด่นไม่เหมือนใครดังกล่าวมาเป็นตัวอย่างนั้น ก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ฐานเทคโนโลยีการสร้างคอมพิวเตอร์ควอนตัมเชิงพาณิชย์หันมาทุ่มเททุนวิจัยให้กับระบบอะตอมเดี่ยว เพราะหลักไม่สำคัญที่ยังไม่มีวิวัฒนาการที่จะสำเร็จได้ในทุกระบบทางกายภาพรวมถึงอะตอมเย็นด้วยก็คือ กระบวนการแก้ไขข้อผิดพลาด (error correction) ขณะคำนวณที่ต้องใช้คิวบิตนับแสนในการตรวจปรับแก้หนึ่งคิวบิตคำนวณ แต่หากจำเป็นต้องยอมรับในข้อจำกัดเรื่องสัญญาณรบกวนที่เป็นอยู่และในทางกลับกันมุ่งหาวิธีใช้ประโยชน์ให้ได้แล้วนั้น เทคโนโลยีระบบอะตอมเดี่ยว ก็น่าจะสามารถเป็นสถาปัตยกรรมแกนนำในด้าน คอมพิวเตอร์ควอนตัมขั้นรอง (noisy intermediate-scale quantum computer) และการจำลองควอนตัม (quantum simulation) ได้อย่างไม่ยากเย็น

2. การตรวจจับเซนเซอร์ควอนตัมและมาตรวิทยาควอนตัม (quantum sensing and quantum metrology) คือ การประยุกต์ใช้คุณสมบัติความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงาน และ/หรือ การซ้อนทับโคฮีเรนต์ และ/หรือ สถานะพัวพัน ของอนุภาคควอนตัมซึ่งมีความละเอียดและความไวสูงต่อสภาวะแวดล้อม เพื่อวัดปริมาณทางกายภาพทั้งที่เป็นเชิงคลาสสิกและเชิงควอนตัม เช่น การวัดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กโดยใช้อะตอมร้อนในกรอบไร้การผ่อนคลายแลกเปลี่ยนสปิน (spin exchange relaxation free) [2-4] การวัดสนามไฟฟ้าความละเอียดสูงโดยใช้อะตอมริดเบิร์ก [5-8] และการวัดอัตราเร่งเนื่องจากสนามโน้มถ่วงแบบอะตอมเย็น (cold atom gravimeter) [9-11]

เป็นต้น ซึ่งในเชิงเทคนิค ระบบที่ใช้เป็นเซนเซอร์ควอนตัมได้นั้น คือ ระบบที่ระดับพลังงานสามารถแยกแยะออกจากกันได้ โดยมากเป็นระบบสองสถานะที่สามารถเตรียมสถานะเริ่มต้นและตรวจเช็คสถานะได้เมื่อเกิดอันตรกิริยากับสนามกายภาพที่ใส่เข้าไปในระหว่างการควบคุมและการจัดการแบบโคฮีเรนต์ นอกจากนี้ยังต้องเกิดการแยก หรือ การเลื่อนของระดับพลังงานผ่านการคู่ควบ (coupling) กับสนามที่ต้องการวัดอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การจะใช้ศักยภาพอันทรงพลังของกลศาสตร์ควอนตัมได้ ระบบการวัดจำเป็นต้องมีการใช้สมบัติสถานะพัวพัน ซึ่งระบบเล็กที่สุดนั้นจะต้องประกอบไปด้วยอย่างน้อยสองหน่วยควอนตัม และหน่วยควอนตัมที่สอดคล้องกับสมบัติที่กล่าวมาแล้วทุกข้อ ก็คือ คิวบิต นั่นเอง ตัวอย่างสำคัญในการนำคิวบิตที่สร้างจาก อะตอมเดี่ยว มาใช้งานเชิงเซนเซอร์ควอนตัมและมาตรวิทยาควอนตัม ก็คือ นาฬิกาอะตอม [12-14] (atomic clock) ที่เรารู้จักกันดีนั่นเอง เพราะเป็นหัวใจของระบบนำทางความแม่นยำสูงในปัจจุบัน

3. การสื่อสารควอนตัม (quantum communication) คือ การรับส่งข้อมูลควบคู่กับการเข้ารหัสทางควอนตัม โดยอาศัยการสร้างเลขสุ่มเชิงควอนตัม (quantum random number generation) และหลักการแจกจ่ายกุญแจเข้ารหัสเชิงควอนตัม (quantum key distribution: QKD) ในช่องทางสื่อสารควอนตัมคู่ขนานไปกับช่องทางคลาสสิกที่มีแบนด์วิดท์กว้างสำหรับข้อมูลปริมาณมาก เนื่องจากผลของทฤษฎีบทห้ามการคัดลอก (no-clone theorem) ในกลศาสตร์ควอนตัม ที่กล่าวว่า “เป็นไปไม่ได้ที่จะทำสำเนาหรือคัดลอกสถานะทางควอนตัมใดใด ให้เหมือนกันทุกประการ” ทำให้นักวิจัยสามารถออกแบบการสื่อสารที่การดักฟังไม่สัมฤทธิ์ผล หรือไร้ประโยชน์ กล่าวคือ เมื่อมีผู้ดักฟังสารระหว่างทางส่ง ความพยายามนั้นจะไปรบกวนและเปลี่ยนแปลงสถานะควอนตัมไปจากเดิม ทำให้ตรวจสอบได้ว่ามีผู้พยายามดักฟังอยู่ และการรับส่งข้อมูลในช่องทางคลาสสิกจะยุติทันที นอกจากนั้นยังรวมถึง การเคลื่อนย้ายข้อมูลเชิงควอนตัมระยะไกล (quantum teleportation) [15-16] ถ้ามองในภาพที่ใหญ่กว่า ก็อาจจะจินตนาการได้ว่า ระบบการสื่อสารควอนตัมที่มีผู้เล่นหลักเป็น โฟตอน หรือ คิวบิตเคลื่อนที่ จะทำหน้าที่รับส่งข้อมูลในรูปแบบคิวบิตระหว่างหน่วยประมวลผลควอนตัม (quantum processor) ซึ่งอาจมีตัวแสดงนำเป็นอะตอมเดี่ยว หรือ คิวบิตประจำที่ โดยข้อมูลเชิงคิวบิตที่รับเข้ามาเพื่อคำนวณก็จะได้จากเซนเซอร์ควอนตัมรูปแบบต่าง ๆ ที่อยู่ตรงปลายของแต่ละเครือข่ายควอนตัม เมื่อมีการคู่ควบระหว่างคิวบิตทุกชนิดที่ตีพอ (ตัวอย่างเช่น การคู่ควบผ่านช่องแคบ (cavity) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวสั่นพ้อง (resonator)) ทุกส่วนจะทำงานร่วมกันและเชื่อมต่อกันผ่านเครือข่ายควอนตัมเฉพาะที่ (local quantum network) ซึ่งทุกแห่งจะสื่อสารกันและประกอบเข้าเป็นอินเทอร์เน็ตควอนตัมในที่สุด

หนทางไปสู่อะตอมเดี่ยว

กระบวนการกำเนิดอะตอมเดี่ยวสำหรับการประยุกต์ใช้ต่อไปนี้มีด้วยกันสองแบบ กล่าวคือ การจับอะตอมเดี่ยวที่มีสภาพเป็นประจุ (ion) [17] และชนิดที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral) [18-19] ประการหลังคือประเด็นหลักในบทความนี้ การแบ่งแยกอะตอมเพียงตัวเดียวของธาตุรูบิเดียม-85 (rubidium-85) ให้ออกจากสภาพแวดล้อมนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เพราะไม่เพียงแต่รูบิเดียม-85 จะเกิดอันตรกิริยาเคมีกับธาตุหมู่เดียวกันได้ง่าย ระเบิดได้เมื่อรวมตัวกับออกซิเจน และยึดเกาะได้ดีกับพื้นผิวแทบทุกชนิด ยังมีผลจากพลังงานจลน์ โดยที่อุณหภูมิห้องปกตินั้นอัตราเร็วเฉลี่ยของอะตอมจะมีค่าประมาณ 345 เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น 3 เท่าของอัตราเร็วของรถไฟที่เร็วที่สุดในโลกเลยทีเดียว ด้วยเหตุที่อัตราเร็วมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเชิงจลน์ การลดอัตราเร็วของอะตอมลงนอกจากจะลดการรบกวนสถานะเชิงอุณหภูมิซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการควบคุมสถานะของคิวบิตแล้ว ยังทำให้อะตอมช้าพอที่จะกักขังไว้ได้ด้วยสนามศักย์ชนิดต่าง ๆ ที่สร้างได้ในห้องทดลอง กระบวนการที่นักวิจัยของมหาวิทยาลัยเซี่ยงไฮ้เลือกใช้ เรียกว่า *กับดักทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (Magneto-optical*

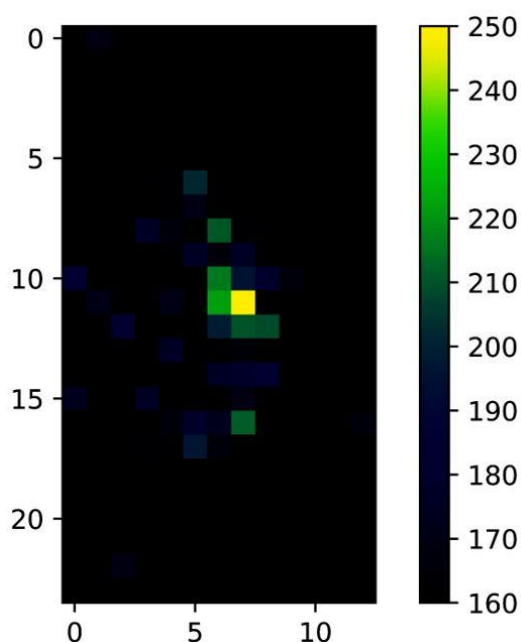
Trap - MOT) [20] ประกอบไปด้วยการทำความเร็วด้วยเลเซอร์ดอปเพลอร์ (Doppler laser cooling) ภายใต้สนามแม่เหล็กจากขดลวดต้านเฮล์มโฮลทซ์ (anti-Helmholtz coils) โดยเมื่อความยาวคลื่นของเลเซอร์ได้รับการควบคุมอย่างแม่นยำมากพอ และมีความเข้มพอเหมาะที่จะยังกอนุภาคให้อะตอมปลดปล่อยโฟตอนโดยตัวของมันเอง (spontaneous emission) อันตรกิริยาเชิงควอนตัมระหว่างอะตอมกับโฟตอนจะทำให้อะตอมแทบหยุดนิ่งได้ในเสี้ยววินาที

ถ้าเปรียบอะตอมเสมือนเป็นลูกบาสเกตบอลที่เคลื่อนที่อยู่ แต่ถูกโฟตอนที่ประหนึ่งว่าเป็นลูกปิงปองจำนวนมหาศาลชนในทิศตรงกันข้ามกับความเร็วของลูกบาสเกตบอล ลูกบาสเกตบอลจะช้าลงตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัมและกระบวนการดอปเพลอร์อุณหภูมิเชิงจลน์ของกลุ่มอะตอมสามารถลดลงไปได้ถึง 50 ไมโครเคลวิน หรือเทียบเท่ากับอัตราเร็วเฉลี่ยประมาณ 10 เซนติเมตรต่อวินาที เนื่องจากกระบวนการนี้ใช้เวลาประมาณ 200 มิลลิวินาทีเท่านั้น ดังนั้นอัตราหน่วง (deceleration) ที่แต่ละอะตอมได้รับมีค่าราว $1,700 \text{ เมตร/วินาที}^2$ ในขณะที่เดียวกัน สนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนต์คงที่จากขดลวดต้านเฮล์มโฮลทซ์ที่ใส่เข้าไปตั้งแต่เริ่มต้นจะทำให้แรงผลักบนอะตอมโดยโฟตอนแปรผันกับระยะการกระจัดจากจุดกึ่งกลางร่วมของสามแกน เกิดเป็น แรงส่งคืน (restoring force) โดยบ่งพลังงานศักย์อนุรักษ์ที่สัมพันธ์กับแรงดังกล่าวถูกใช้เพื่อเป็น ศักย์กักขังอะตอมเย็น นั่นเอง เมื่ออัตราการใส่อะตอมเย็นเข้าไปในบ่อศักย์มากกว่าอัตราการเล็ดลอดออกมา กลุ่มก๊าซอะตอมเย็นที่ถูกกักขังไว้ที่จุดกึ่งกลางร่วมก็จะเริ่มหนาแน่นขึ้น ซึ่งบางครั้งคำว่า กับดักทัศนศาสตร์แม่เหล็ก หรือ MOT ก็ถูกใช้เรียกกลุ่มก๊าซอะตอมเย็นนี้ โดยปกติ MOT จะเป็นทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร และบรรจุได้ประมาณพันล้านอะตอม การแยกอะตอมเพียงหนึ่งตัวจากกลุ่มอะตอมเย็นระดับพันล้าน สามารถทำได้โดยใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานต่อโฟตอนน้อยกว่าพลังงานกระตุ้นขั้นที่หนึ่งของอะตอมเพื่อสร้าง คีมจับเชิงแสง (optical tweezer) [21] การทดลองที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เลือกโฟกัสเลเซอร์ความยาวคลื่น 840 นาโนเมตร ลงไปยังขอบของกลุ่มอะตอมเย็นดังกล่าว กับดักแสงนี้จะจับอะตอมไว้ที่จุดโฟกัสของเลเซอร์ ด้วยขนาดเอวของเลเซอร์ที่จุดโฟกัสประมาณ 1 ไมโครเมตร ปริมาตรอันเล็กจิ๋วนี้บังคับให้อะตอมชนกันถึงจนทำให้จำนวนอะตอมสูงสุดที่คีมจับเชิงแสงนี้จะหนีบไว้ได้มีเพียงแค่ 1 อะตอม เมื่อปรับตัวแปรต่าง ๆ ให้อยู่ในขอบเขตการบรรจุแบบการแจกแจงปัวซองชั้นรอง (sub-Poissonian loading regime) โอกาสที่จะได้ผลลัพธ์เป็น 0 หรือ 1 อะตอมในกับดักจะมีค่าเท่ากันคือ 50 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเหตุที่อะตอมในคีมจับเชิงแสงจะเคลื่อนที่และปลดปล่อยโฟตอนตลอดเวลา ทำให้สามารถใช้กล้อง Electron Multiplying Charge-Coupled Device (EMCCD) ที่มีความไวต่อโฟตอนเดี่ยวตรวจจับโฟตอนภายในมุมตันค่าหนึ่งที่อะตอมเดี่ยวปลดปล่อยออกมาในระยะเวลาสั้น ๆ ได้ ปริมาณดังกล่าวได้รับการตีความเป็นจำนวนอะตอมในกับดักของคีมจับเชิงแสง

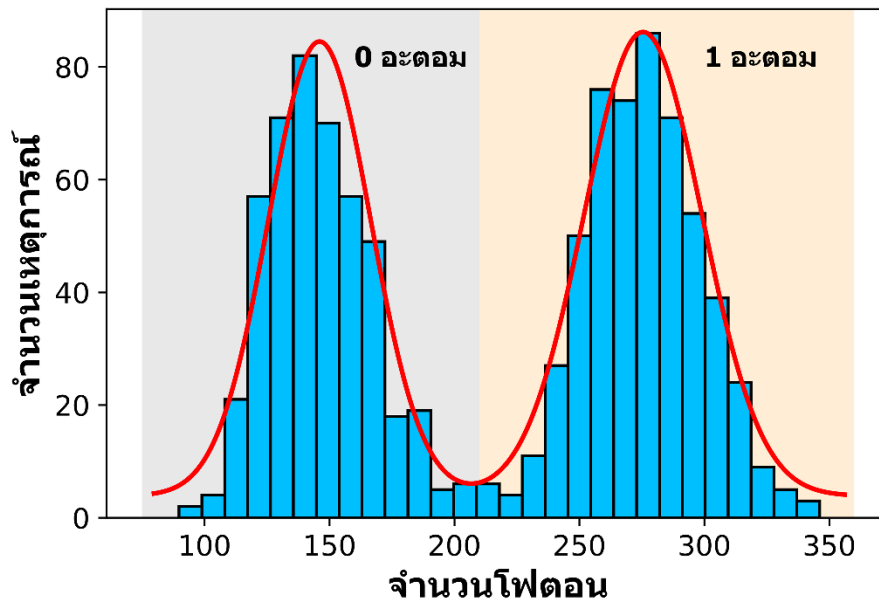
การตรวจวัดสัญญาณจากอะตอมเดี่ยว

ขั้นตอนการกักขังอะตอมเดี่ยวที่ว่ายากแล้ว แต่การตรวจวัดเพื่อยืนยันว่าสิ่งที่ได้คือ อะตอมเดี่ยว นั้นยากยิ่งกว่า เพราะสัญญาณจากอะตอมเดียวนั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นระบบตรวจจับโฟตอนต้องมีการป้องกันแสงรบกวนจากภายนอกให้ดีที่สุด โดยเมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2562 นักวิจัยของห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม (Quantum Atom Optics Laboratory) คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ก็สามารถทำการกักขังอะตอมเดี่ยวของธาตุรูบิเดียม-85 และตรวจวัดสัญญาณได้สำเร็จเป็นครั้งแรกของประเทศไทย หลังจาก 8 ปีของการพัฒนาอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ทั้งหมดที่จำเป็นขึ้นมาใช้งานเอง ภาพสัญญาณของอะตอมเดียวนั้นเกิดจากการฉายเลเซอร์ความถี่ใกล้เคียงกับช่องว่าง (gap) ระหว่างชั้นพลังงานของอะตอม ทำให้อะตอมเดี่ยวเคลื่อนที่และปลดปล่อยโฟตอนอย่างต่อเนื่อง โฟตอน

ที่ถูกปลดปล่อยออกมานี้ได้ถูกรวบรวมด้วยชุดเลนส์รับแสงและโฟกัสลงบนกล้อง EMCCD ทำให้เกิดภาพสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเมื่อทำการถ่ายภาพอะตอมเดี่ยวจำนวน 1000 ครั้ง เพื่อให้ได้ความน่าจะเป็นของการจับอะตอมเดี่ยวในกับดักเชิงแสง จะเห็นได้ว่า ผลลัพธ์กราฟสถิติแสดงค่าความถี่จำนวนโฟตอนตรวจนับแสดงโอกาสของการตรวจวัดสูงที่สุดเพียง 2 จุด คือ ที่ประมาณ 150 โฟตอน ซึ่งเป็นจำนวนโฟตอนจากอะตอมพื้นหลัง (background) ที่แสดงถึงการไม่มีอะตอมเดี่ยวในกับดัก และที่ประมาณ 280 โฟตอน ที่เกิดจากอะตอมพื้นหลังร่วมกับโฟตอนจากอะตอมเดี่ยวอีก 130 โฟตอน ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องอย่างดีกับผลการคำนวณทางทฤษฎี จึงเป็นการยืนยันความถูกต้องของเหตุการณ์กักขังอะตอมเดี่ยวดังกล่าว พื้นที่ใต้กราฟทั้งสองส่วนที่บ่งบอกถึงโอกาสของการกักขัง 0 และ 1 อะตอมตามลำดับนั้นมีค่าเท่า ๆ กัน คือ 50 เปอร์เซนต์



รูปที่ 1 ภาพสัญญาณแสงหรือโฟตอนที่ปลดปล่อยจากอะตอมเดี่ยวที่บันทึกไว้ด้วยกล้อง EMCCD



รูปที่ 2 กราฟสถิติแสดงค่าความถี่จำนวนโฟตอนตรวจนับด้วยกล้อง EMCCD จำนวน 1,000 ครั้ง ใช้เวลาบันทึก 50 มิลลิวินาทีต่อครั้ง แท่งสีฟ้าแสดงผลการทดลอง เส้นสีแดงแสดงฟังก์ชันการกระจายแบบประจักษ์กว่า (Gaussian distribution) จากทฤษฎี การกระจายตัวของจำนวนโฟตอนตรวจนับรอบ ๆ ค่าสูงสุดเฉพาะที่ทางซ้ายมือ คือ สัญญาณจากแสงพื้นหลัง (background) ส่วนการกระจายข้อมูลทางขวามือแสดงจำนวนโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมเดี่ยวในกับดักและแสงพื้นหลัง

ความเป็นมาของห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม

ย้อนไปเมื่อเก้าปีที่แล้ว ในปี พ.ศ. 2553 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรานนท์ อนุกุล อดีตนักเรียนทุน โครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีหรือ พสวท. ณ ขณะนั้นเพิ่งจบปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ด้านสภาพนำยิ่งยวด (superconducting) และกลับมารับตำแหน่งอาจารย์ประจำที่ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้เพียงห้าปี ได้เข้าพุดคุยกับศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ธีรพัฒน์ วิสัยทอง ผู้อำนวยการของศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (Thailand Center of Excellence in Physics - ThEP) ณ ขณะนั้น ทั้งสองได้เล็งเห็นความสำคัญของเทคโนโลยีควอนตัมและมีความหวังที่จะให้ประเทศไทยมีการทำวิจัยเชิงทดลองที่ทัดเทียมกับประเทศชั้นนำของโลก จึงตัดสินใจก่อตั้งห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม (Quantum-Atom Optics Laboratory - QAO) รูปที่ 3 ภายใต้การสนับสนุนของศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการก่อตั้ง คือ การสร้างสสารควบแน่นโบส-ไอน์สไตน์ และการกักขังอะตอมเดี่ยวเพื่อใช้สำหรับการคำนวณควอนตัม งานที่ทำหามักเริ่มจากความคิด ความเชื่อกับห้องอันว่างเปล่า ทุนวิจัยที่จำกัด แต่ที่สำคัญคือความช่วยเหลือจากพี่ ๆ น้อง ๆ นักวิจัยและคณาจารย์ ผู้มีอุดมการณ์เดียวกันที่อยากจะเห็นการริเริ่มใหม่ ๆ และความเปลี่ยนแปลงของฟิสิกส์ทดลองในประเทศไทย



รูปที่ 3 แสดงการทดลองกักขังอะตอมเดี่ยวในปี พ.ศ. 2562 ซึ่งเป็นหนึ่งใน 10 แผนวิจัยในห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ทีมนักวิจัยของห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัมใช้เวลากว่าเก้าปีผนวกกับความทุ่มเททั้งกายและใจของนักเรียนไทยรุ่นต่อรุ่น คณาจารย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรานนท์ หัวหน้าห้องวิจัย ในการเรียนรู้ทั้งฟิสิกส์และวิศวกรรมศาสตร์ในหลายสาขาย่อย เพื่อพัฒนาและสร้างอุปกรณ์ที่จำเป็นในการทำวิจัยกักขังอะตอมเดี่ยว เช่น วงจรควบคุมกระแสและอุณหภูมิของไดโอดเลเซอร์ วงจรควบคุมอุปกรณ์กล้ำแสงด้วยเสียง (acousto-optic modulator) เป็นต้น โดยมีการออกแบบและพัฒนาเป็นลำดับขั้นอย่างก้าวหน้าตลอดมาจนในที่สุดสามารถทำงานสอดคล้องประสานกันเพื่อกักขังอะตอมเดี่ยวได้ในปี พ.ศ. 2562 อันถือได้ว่าเป็นครั้งแรกของประเทศไทย ปัจจุบันห้องปฏิบัติการตั้งอยู่ที่ชั้นสองของอาคารปฏิบัติการกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และกำลังสร้างการทดลองที่น่าทึ่งอื่น ๆ อีกเช่น การสร้างอุปกรณ์โฟโตนิกส์ซิลิคอนสำหรับการตรวจวัดสารชีวภาพร่วมกับสถาบันวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, การวัดสนามแม่เหล็กเชิงอะตอม, และการสร้างเซนเซอร์ควอนตัมหาแหล่งน้ำมันและแร่ธาตุใต้พิภพโดยใช้อะตอม เป็นต้น ทั้งหมดนี้ดำเนินงานภายใต้ โครงการจัดตั้งศูนย์วิจัยเทคโนโลยีควอนตัม ซึ่งมีสถานะเป็นหน่วยงานภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภาพฉายพัฒนาการจาก อดีต ปัจจุบัน และความมุ่งหวังในอนาคต อาจอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

อดีต - ปลายปี พ.ศ. 2553 ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ภายใต้สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ได้ทำการให้ทุนวิจัยและจัดตั้งห้องวิจัยทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในเวลานั้น ถือได้ว่าเป็นห้องวิจัยด้านอะตอมเย็นแห่งเดียวในประเทศไทย และเป็นหนึ่งในสองของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (อีกแห่งอยู่ที่ประเทศสิงคโปร์ ซึ่งเริ่มดำเนินการก่อนหน้าประเทศไทยเพียง 3 ปี) เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาปฏิบัติงานตามแผน 5+3 ปี (พ.ศ. 2553-2558 และ 2559-ปัจจุบัน) ได้มีการออกแบบ สร้าง ทดสอบ ผลิตเชิงพาณิชย์ อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับสาขาวิจัยวิทยาศาสตร์ของอะตอม-โมเลกุล-แสง จำนวน 14 รายการ และส่งมอบเทคโนโลยีไปสนับสนุนกิจกรรมวิจัยในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ควอนตัมเกิดใหม่ทั่วประเทศ มีการดำเนินงานและแสดงผลสัมฤทธิ์ที่สำคัญทั้งด้านการออกแบบและผลิตอุปกรณ์วิจัย สร้างเทคโนโลยีอะตอมเย็น จนถึงการพัฒนา นักศึกษา-นักวิจัย และสร้างความร่วมมือกับสถาบันวิจัยในต่างประเทศ ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 4 เมื่อสิ้นสุดห้วงเวลาดังกล่าว ประเทศไทยจึงได้มีเทคโนโลยีในการสร้างเครื่องมือวิจัยราคาสูงที่จำเป็นจนถือได้ว่าเพียงพอต่อการดำเนินงานวิจัยขั้นต่อไปคือ การประดิษฐ์นวัตกรรมขึ้นจากเทคโนโลยีควอนตัม

ปัจจุบัน - เมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2562 ที่ผ่านมา ทีมนักฟิสิกส์วิศวกรรม ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ใช้เลเซอร์และระบบควบคุมที่พัฒนาเอง ในการลดพลังงานของกลุ่มก๊าซของอะตอมรูบิเดียม-85 ลงไปที่อุณหภูมิค่าประมาณ 50 ไมโครเคลวิน (ต่ำกว่าจุดที่เย็นที่สุดในจักรวาลอีกกว่าหนึ่งแสนเท่า) อะตอมกว่าพันล้านตัวถูกห่อหุ้มลงในกับดักแสงเลเซอร์ที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ จนมีเพียงอะตอมเดี่ยวที่ถูกกักขังไว้และได้รับการบันทึกภาพด้วยกล้อง EMCCD ทั้งหมดนี้เกิดขึ้นภายในระยะเวลาเพียงแค่เสี้ยววินาที ในสภาพสุญญากาศระดับเดียวกับบรรยากาศบนดวงจันทร์ จึงถือเป็นหลักไมล์อันสำคัญยิ่งของการวิจัยระดับแนวหน้าในประเทศไทย อุปมาได้ว่า การมองหาอะตอมเดี่ยว 1 อะตอมบนเหรียญ 1 บาทนั้น ยากเย็นพอ ๆ กับการมองหาเหรียญ 1 บาท บนดวงจันทร์ และอะตอมเดี่ยวนี้อีกคือ หน่วยย่อยเล็กสุดของคอมพิวเตอร์ควอนตัม เช่น เซอร์คิวิตควอนตัม และการสื่อสารควอนตัม ที่จะประสานเข้ากับเครือข่ายควอนตัมมากมายจนในที่สุดรวมเป็นระบบควอนตัมอินเทอร์เน็ต

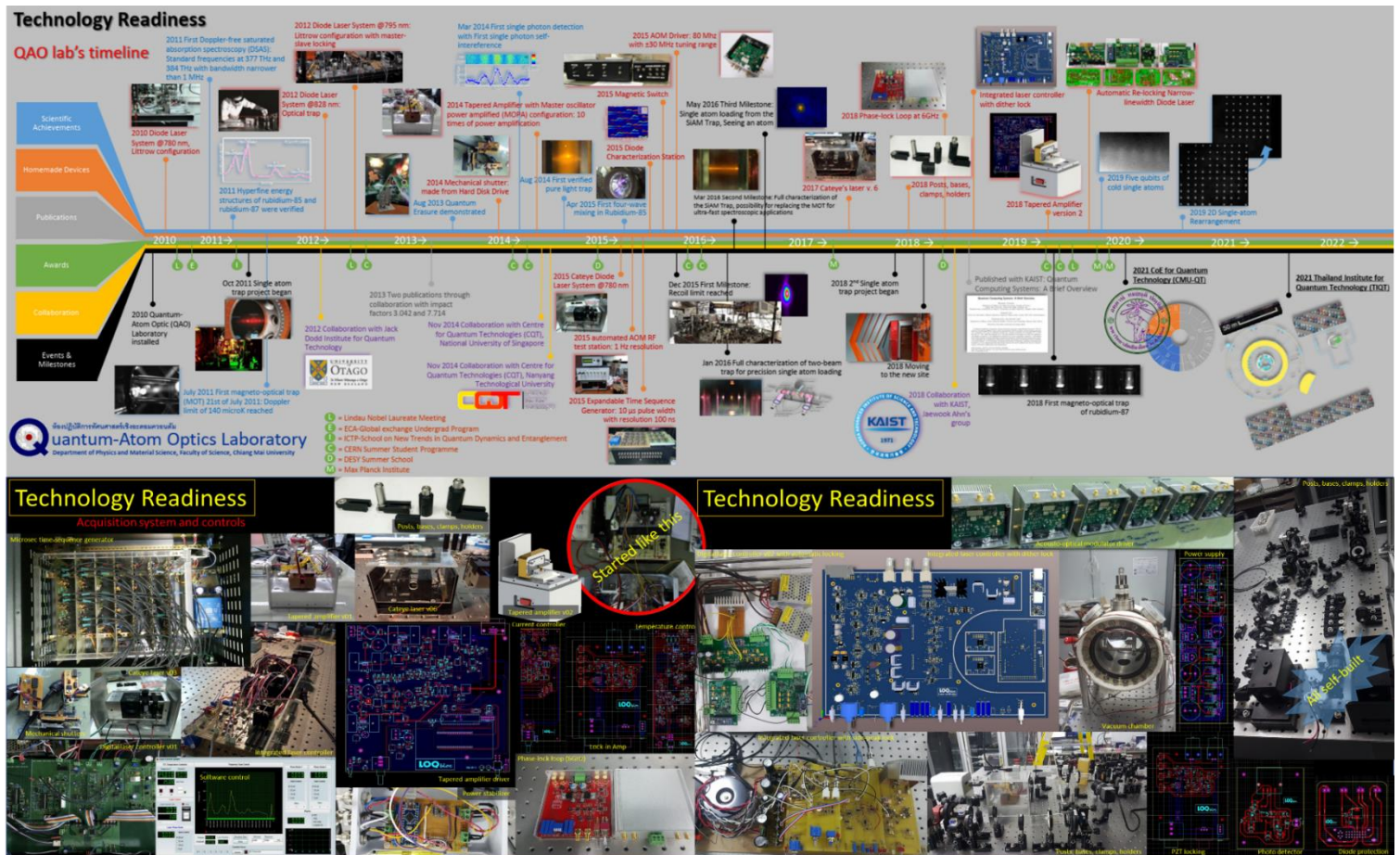
เนื่องจากได้มีการวางแผนงานและตั้งสมประสงค์ด้านเทคโนโลยีควอนตัมมาเป็นระยะเวลากว่า 9 ปี ปัจจุบันมหาวิทยาลัยเชียงใหม่มีนักวิจัยควอนตัม ตำแหน่งอาจารย์จากคณะต่าง ๆ เช่น วิทยาศาสตร์ (27) วิศวกรรมศาสตร์ (15) เศรษฐศาสตร์ (8) เกษตรศาสตร์ (3) และสถาบันวิศวกรรมชีวการแพทย์ (5) เป็นต้น รวมเป็นจำนวนรวมทั้งสิ้น 58 คน อีกทั้งภายในระยะเวลา 5 ปีข้างหน้าจะมีนักวิจัยที่สำเร็จการศึกษาจากต่างประเทศกลับมาสมทบตามแผนงานที่วางไว้อย่างต่อเนื่องอีกไม่น้อยกว่า 17 คน ทีมวิจัยควอนตัมของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ได้สร้างความร่วมมือวิจัยอย่างใกล้ชิดกับ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, มหาวิทยาลัยบูรพา และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และกับสถาบันต่างประเทศ เช่น Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Korea; Max Planck Institute of Quantum Optics, Germany; Centre for Quantum Technologies (CQT), Singapore เป็นต้น รวมทั้งยังมี MOUs ด้านความร่วมมือเพื่อสร้างคอมพิวเตอร์ควอนตัมแบบสภาพนำยวดยิ่งกับ สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อีกทั้งยังสร้างวัฒนธรรมการแบ่งปันทรัพยากรวิจัย ภายใต้โครงการจัดตั้งศูนย์วิจัยเทคโนโลยีควอนตัม เพื่อวิจัย พัฒนา และผลิตนวัตกรรมฐานเทคโนโลยีควอนตัมได้ในระยะเวลาสั้นที่สุดผ่านการจัดตั้งโรงปรุเพื่อเทคโนโลยีควอนตัม (Fabrication Laboratory for Quantum Technology) ในปี พ.ศ. 2562

โดยในเบื้องต้นกิจกรรมวิจัยกำลังเน้นหนักไปที่การสร้างเซนเซอร์ควอนตัม และคอมพิวเตอร์ควอนตัมโดยใช้ทั้งอะตอมเย็น และวงจรรวมตัวนำยิ่งยวด

อนาคต - ในระยะเวลา 3 ปีข้างหน้า หน่วยวิจัยต่าง ๆ ภายใต้โครงการจัดตั้งศูนย์วิจัยเทคโนโลยีควอนตัม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จะเริ่มย้ายสถานที่ปฏิบัติงานไปวิทยาเขตแม่เหิยะเพื่อสถาปนาระบบนิเวศควอนตัมที่ยั่งยืน (sustainable quantum ecosystem) อันประหนึ่งเป็นการเริ่มต้นของ “วิทยาเขตแห่งนวัตกรรม” (innovation campus) โดยจะยังคงเน้นงานวิจัยในสามเสาหลัก คือ ด้านการคำนวณควอนตัม (รวมถึงวงจรและซอฟต์แวร์ควอนตัม) เซนเซอร์ควอนตัม และวิศวกรรมควอนตัม กิจกรรมวิจัยจะเริ่มจากการจัดตั้งอุทยานซอฟต์แวร์ (software park) ภายใต้สถาบันวิจัยเทคโนโลยีควอนตัม (Research Institute for Quantum Technology) ที่จะทำงานร่วมกับโรงประลองเพื่อผลิตนวัตกรรมฐานเทคโนโลยีควอนตัม อันจะทำหน้าที่เชื่อมต่อและผลักดันผลงานวิจัยและพัฒนาจนสามารถเข้าสู่โปรแกรมบ่มเพาะเชิงธุรกิจของอุทยานวิทยาศาสตร์แห่งชาติภาคเหนือ (Northern Science Park) ให้สามารถสร้างมูลค่าเพิ่ม เพื่อนำไปสู่ความยั่งยืนในการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมและเข้าสู่ช่วงเวลาแห่งการ “อินโนเวตในประเทศไทย” (Innovated in Thailand) ภายใน 5 ปีนับจากนี้ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ต้องสามารถแปลงการลงทุนด้านนวัตกรรมเทคโนโลยีควอนตัมให้เกิดเป็นผลลัพธ์ให้ได้ โดยคาดว่าจะตั้งประดิษฐ์ 5 รายการแรก กล่าวคือ หน่วยความจำควอนตัมที่ใช้อะตอมเดี่ยวในการเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์ควอนตัม เครื่องวัดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กความไวสูงสำหรับงานสำรวจธรณีวิทยา/ งานด้านการแพทย์ เซนเซอร์ตรวจหาแหล่งน้ำมันและก๊าซธรรมชาติความไวสูง อุปกรณ์ตรวจคัดกรองทางการแพทย์ความไวสูงโดยใช้ซิลิกอนนาโนโฟโตนิกส์ และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กความไวสูงเพื่องานด้านความมั่นคง น่าจะสามารถใช้งานได้จริงและเป็นประโยชน์กับสังคมและชุมชน รวมถึงสามารถเข้าสู่กระบวนการบ่มเพาะเชิงธุรกิจ ทั้งหมดนี้จะสามารถดำเนินการได้จากภายในวิทยาเขตแม่เหิยะ นอกจากนี้ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ยังมีแผนงานในการดึงเอากลุ่มคนที่มีความสามารถระดับโลก (global talents) เข้ามาร่วมกันทำวิจัยผ่านการประสานงานของกลุ่มนักวิชาชีพในสหรัฐอเมริกาและแคนาดา (The Association of Thai Professionals in America and Canada - ATPAC) อย่างต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง ผู้อำนวยการศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ที่สนับสนุนการก่อตั้งห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์เชิงอะตอมควอนตัม และให้การสนับสนุนเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ทั้งคำแนะและการสนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. สิทธิชัย โกโกลอยอดม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่เอื้อเฟื้อกล้อง EMCCD ในการถ่ายภาพอะตอมเดี่ยวครั้งนี้ นอกจากนั้นขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์บุญรักษา สุนทรธรรม สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) สำหรับโต๊ะปฏิบัติการทัศนศาสตร์ และสุดท้าย ดร. ประพงษ์ คล้ายสุวรรณ สถาบันสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องดูดสุญญากาศเชิงประจุในการทำระบบสุญญากาศสูงในงานวิจัยนี้มา ณ ที่นี้



รูปที่ 4 การดำเนินงานและผลสัมฤทธิ์ที่สำคัญ ด้านการออกแบบและผลตอบรับวิจัย สร้างเทคโนโลยีอะตอมเย็น จนถึงการพัฒนานักศึกษา-นักวิจัย และความร่วมมือกับสถาบันต่างประเทศ ในระยะดำเนินการปี พ.ศ. 2553-2562

เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Arute, K. Arya, R. Babbush et al., “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor”, *Nature*, 574, 505 (2019).
- [2] D. Sheng, S. Li, N. Dural and M. V. Romalis, “Subfemtotesla scalar atomic magnetometry using multipass cells”, *Physical Review Letters* 110, 160802 (2013).
- [3] Q. Zhao, B. L. Fan, S. G. Wang and L. J. Wang, “A vector atomic magnetometer based on the spin self-sustaining Larmor method”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 481, 257 (2019).
- [4] J. D. Li, W. Quan, B. Q. Zhou, Z. Wang, J. X. Lu, Z. H. Hu, G. Liu and J. C. Fang, “SERF atomic magnetometer—recent advances and applications: A review”, *IEEE Sensors Journal*, 18, 8198 (2018).
- [5] J. A. Sedlacek, A. Schwettmann, H. Kübler and J. P. Shaffer, “Atom-based vector microwave electrometry using Rubidium Rydberg atoms in a vapor cell”, *Physical Review Letters*, 111(6), 063001 (2013).
- [6] A. Facon, E. K. Dietsche, D. Grosso, S. Haroche, J.-M. Raimond, M. Brune and S. Gleyzes, “A sensitive electrometer based on a Rydberg atom in a Schrödinger-cat state”, *Nature* 535, 262 (2016).
- [7] H. Q. Fan, S. Kumar, J. Sedlacek, H. Kübler, S. Karimkashi and J. P. Shaffer, “Atom based RF electric field sensing”, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 48(20), 202001 (2015).
- [8] S. Kumar, H. Q. Fan, H. Kübler, A. J. Jahangiri and J. P. Shaffer, “Rydberg-atom based radio-frequency electrometry using frequency modulation spectroscopy in room temperature vapor cells”, *Optics Express*, 25(8), 8625 (2017).
- [9] S. Abend, M. Gebbe, M. Gersemann, H. Ahlers, H. Müntinga, E. Giese, N. Gaaloul, C. Schubert, C. Lämmerzahl, W. Ertmer, W. P. Schleich and E. M. Rasel, Atom-chip fountain gravimeter, *Physical Review Letters* 117, 203003 (2016).
- [10] X. J. Wu, Z. Pagel, B. S. Malek, T. H. Nguyen, F. Zi, D. S. Scheirer and H. Müller, “Gravity surveys using a mobile atom interferometer”, *Science Advances*, 5(9), eaax0800 (2019).
- [11] V. Ménoret, P. Vermeulen, N. Le Moigne, S. Bonvalot, P. Bouyer, A. Landragin and B. Desruelle, “Gravity measurements below $10^{-9}g$ with a transportable absolute quantum gravimeter”, *Scientific Reports*, 8, 12300 (2018).
- [12] I. S. Madjarov, A. Cooper, A. L. Shaw, J. P. Covey, V. Schkolnik, T. H. Yoon, J. R. Williams and M. Endres, “An atomic-array optical clock with single-atom readout”, *Physical Review X*, 9, 041052 (2019).
- [13] M. A. Norcia, A. W. Young, W. J. Eckner, E. Oelker, J. Ye and A. M. Kaufman, “Seconds-scale coherence on an optical clock transition in a tweezer-array”, *Science*, 366(6461), 93 (2019).
- [14] S. L. Campbell, R. B. Hutson, G. E. Marti, A. Goban, N. Darkwah Oppong, R. L. McNally, L. Sonderhouse, J. M. Robinson, W. Zhang, B. J. Bloom and J. Ye, “A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock”, *Science* 358, 90, (2017).

- [15] J. Yin, Y. Cao, Y. H. Li et al., “Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers”, *Science*, 356(6343), 1140, (2017).
- [16] L.-M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac and P. Zoller, “Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics”, *Nature* 414, 413, (2001).
- [17] C. D. Bruzewicza, J. Chiaverini, R. McConnell and J. M. Sage, “Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges”, *Applied Physics Reviews*, 6, 021314 (2019).
- [18] J. F. Sherson, C. Weitenberg, M. Endres, M. Cheneau, I. Bloch and S. Kuhr, “Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator”, *Nature* 467, 68 (2010).
- [19] D. Barredo, V. Lienhard, S. de Léséleuc, T. Lahaye and A. Browaeys, “Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom”, *Nature* 561, 79 (2018).
- [20] K. Krzystof, V. C. Long, K. D. Xuan M. Głodź, B. N. Huy and J. Szonert, “Magneto-optical trap: Fundamentals and realization”, *Computational Methods in Science and Technology*, SI(2), 115 (2010).
- [21] M. S. Rocha, “Optical tweezers for undergraduates: Theoretical analysis and experiments”, *American Journal of Physics*, 77, 704 (2009).