๓.๓ โครงการความร่วมมือไทย – สิงคโปร์เพื่อพัฒนานาฬิกาอะตอมเชิงแสง ตามพระราชดำริฯ

(ผู้ถวายรายงาน : นายไพรัช ธัชยพงษ์)

๑. ความเป็นมา

สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินเยือนศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ เมื่อวันที่ ๒๐ มกราคม ๒๕๖๒ ทรงเป็นประธานในการลงนามความร่วมมือด้านการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม ระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT: National Institute of Metrology of Thailand) กับมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS : National University of Singapore)

ศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม (Centre for Quantum Technologies : CQT) มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS) ก่อตั้งเมื่อเดือนธันวาคม ค.ศ. ๒๐๐๗ เพื่อเป็นศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติแห่งแรกของสิงคโปร์ ภารกิจมุ่งเน้นการพัฒนาบุคลากรในสาขาเทคโนโลยีควอนตัมเพื่อสนับสนุนงานวิชาการและภาคอุตสาหกรรม และงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม ๓ ด้าน คือ Quantum Communication & Security, Quantum Computation & Simulation และ Quantum Sensing & Metrology มีบุคลากร ๒๒๖ คน เป็นนักวิทยาศาสตร์และนักศึกษา ๒๐๐ คน และมีงบประมาณราวปีละ ๖๘๖ ล้านบาท (๒๗.๗๘ ล้านเหรียญสิงคโปร์) (https://www.quantumlah.org/media/presentation/annualreport2022.pdf)

๒. โครงการ/กิจกรรมที่ดำเนินงานปี ๒๕๖๘

๒.๑ ความร่วมมือ NIMT-CQT ในการพัฒนานาฬิกาอะตอมเชิงแสง

๒.๑.๑ วัตถุประสงค์ : เพื่อใช้เป็นนิยามของหน่วยวินาทีในอนาคตของประเทศไทย รวมทั้งพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีควอนตัม โดย NIMT ใช้ไอออนของธาตุอิธเธอเบียม (Yb^+) และ CQT ใช้ไอออนของธาตุลูทิเทียม (Lu^+)

๒.๑.๒ ระยะเวลาดำเนินการ : ๗ ปี (๒๕๖๒ - ๒๕๖๙)

๒.๑.๓ นักวิจัยที่เกี่ยวข้อง

<u>นักวิจัยไทย</u>

- ดร. ปิยพัฒน์ พูลทอง นักมาตรวิทยาชำนาญการพิเศษ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
- ดร. รัฐกร แก้วอ่วม นักมาตรวิทยาปฏิบัติการ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
- ดร. ธเนศ พฤทธิวรสิน นักวิจัย Quantum Technology Foundation Thailand
- ดร. ธารา เฉลิมทรงศักดิ์ อาจารย์ วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยมหิดล
- นายนครินทร์ จายโจง นักศึกษาปริญญาเอก NUS (CQT) ด้าน Lutetium ion clock

<u>นักวิจัยสิงคโปร์</u>

- Dr. Murray Barrett Principal Investigator at CQT
- Dr. Kyle Arnold Researcher at CQT

๒.๑.๔ งบประมาณ : ปี ๒๕๖๒ - ๒๕๖๙ จำนวน ๗๓.๕๑ ล้านบาท จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และกระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม

๒.๑.๕ แผนการดำเนินงาน

- ปี ๒๕๖๒ – ๒๕๖๕ ร่วมวิจัยและสร้างอุปกรณ์กักขังไอออนซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่ CQT และ NIMT
- ปี ๒๕๖๒ ร่วมพัฒนาเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบางทองคำบนแผ่นเซรามิคอะลูมินาไนไตรด์ที่ CQT ที่สิงคโปร์แต่ไม่สมบูรณ์
- ปี ๒๕๖๓ พัฒนาชิ้นทองแดงและแผ่นเซรามิค MACOR ด้วยเทคโนโลยีในประเทศไทย
- ปี ๒๕๖๔ สร้างชิ้นส่วนอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อให้ได้อุปกรณ์กักขังไอออน
- ปี ๒๕๖๕ ประสบความสำเร็จในการกักขังไอออนเย็นของธาตุอิธเธอเบียม
- ปี ๒๕๖๕ - ๒๕๖๘ ทดสอบคุณสมบัติของไอออนอิธเธอเบียมที่กักขังได้
- ปี ๒๕๖๗ ปรับปรุงระบบการถ่ายภาพ และการตรวจวัดสถานะทางควอนตัมของนาฬิกาอะตอม
- ปี ๒๕๖๗ – ๒๕๖๘ การกักขังไอออน Yb-171 และ Yb-174 เพื่อเตรียมสำหรับการวัด Micromotion
- ปี ๒๕๖๗ – ๒๕๖๙ ศึกษาและทดสอบการนำเวลามาตรฐานประเทศไทยไปใช้งาน
- ปี ๒๕๖๘ – ๒๕๖๙ การวัดความคลาดเคลื่อนความถี่จาก Excess micromotion ด้วยวิธี Photon correlation method
- ปี ๒๕๖๙ - ๒๕๗๐ การเปรียบเทียบความถี่ด้วยระบบดาวเทียมนำทาง GNSS (Global Navigation Satellite System) เพื่อเปรียบเทียบความถี่ของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงระหว่าง NIMT และ CQT
- ปี ๒๕๗๑ - ๒๕๗๒ ทำการวัดความถี่ของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงของทั้ง ๒ หน่วยงาน ซึ่งทั้งสองธาตุนี้คาดว่าจะเป็นส่วนหนึ่ง ในการกำหนดมาตรฐานหน่วยวินาทีใหม่ในอนาคต
- ปี ๒๕๗๓ จะเริ่มพิจารณานิยามใหม่ของหน่วยวินาที

การดำเนินงานในปี ๒๕๖๘

[๑] การวัดความคลาดเคลื่อนความถี่จาก Excess micromotion ด้วยวิธี Photon correlation method

[๒] ศึกษาและทดสอบการนำเวลามาตรฐานปัจจุบันไปใช้งาน

๒.๒ โครงการ/กิจกรรมที่ดำเนินงานในปี ๒๕๖๘

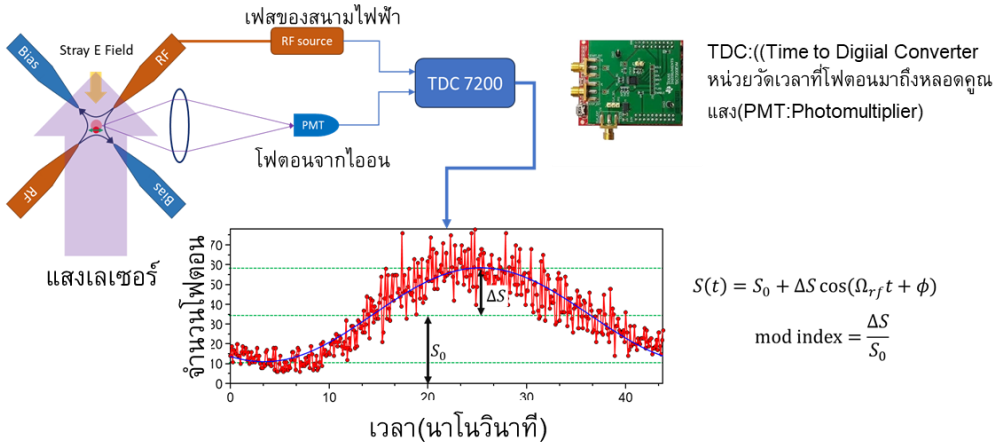
๒.๒.๑ การวัดความคลาดเคลื่อนความถี่จากไมโครโมชันส่วนเกิน (Excess micromotion) ด้วยวิธีหาสหสัมพันธ์กับโฟตอน (Photon correlation method)

ปี ๒๔๖๕ - ๒๕๖๖ ทีมวิจัยประสบความสำเร็จในการสร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่กักขังไอออนโดยลำพัง โดยปี ๒๕๖๕ สามารถสร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงของไทยสำเร็จ มีอุปกรณ์หลัก คือ อุปกรณ์ขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ (Helical Resonator) อุปกรณ์กักขังไอออน (Linear Quadrupole Trap) และส่วนอื่นทำหน้าที่สนับสนุน และเมื่อวันที่ ๑๖ มีนาคม ๒๕๖๕ ประสบความสำเร็จในการกักขังไอออน Trapped ions (Yb-171)

ปี ๒๕๖๗ ทีมวิจัยสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนเพื่อให้การถ่ายภาพไอออนชัดเจนมากขึ้นและทำให้ตำแหน่งไอออนเสถียรยิ่งขึ้น

ปี ๒๕๖๘ ทีมวิจัยสามารถวัดความคลาดเคลื่อนความถี่จากไมโครโมชันส่วนเกิน (Excess micromotion) สำหรับไอออนเดี่ยวและไอออนหลายตัว ซึ่งไมโครโมชันในนาฬิกาอะตอม คือ การเคลื่อนที่หรือการสั่นไหวด้วยความถี่สูงอันไม่พึงประสงค์ของไอออนที่ถูกกักไว้ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าภูมิหลัง (background electric field) อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการบอกเวลา เพื่อให้ได้ความแม่นยำสูงนักวิจัยจำเป็นต้องชดเชยไมโครโมชันส่วนเกิน (excess micromotion)

(๑) การวัดไมโครโมชันส่วนเกินด้วยการหาสหสัมพันธ์กับโฟตอน เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจจับและวัดความสั่นไหวของไอออนที่ถูกกักขัง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง (i) เวลาของการตรวจจับโฟตอนที่ปล่อยออกมาจากไอออนกับ (ii) เฟส (phase) ของสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ (RF) ที่ใช้ในการกักขัง



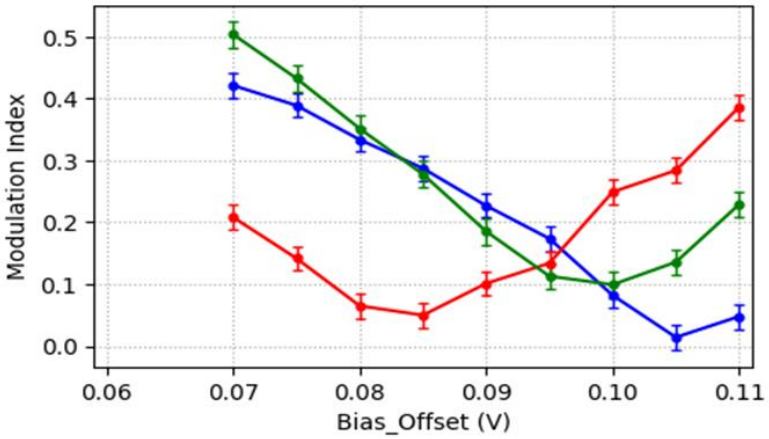
เราจะใช้แสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปที่ไอออน และวัดจำนวนโฟตอนเทียบกับเฟสของสนามไฟฟ้าที่แต่ละเวลา เมื่อนำจำนวนโฟตอนที่วัดได้ในแต่ละช่วงเวลามาพล็อตฮิสโตแกรมก็จะได้จำนวนโฟตอนแต่ละช่วงเวลา (สีแดง) และคลื่นไซน์เป็นค่าสมการที่สัมพันธ์กับชุดข้อมูล (สีดำ) ทั้งนี้เป็นไปตามหลักการของ Doppler effect กล่าวคือ เมื่อไอออนเคลื่อนที่สวนกับทิศของเลเซอร์ ความถี่ไอออนจะเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการกระเจิงโฟตอนมากขึ้น (บริเวณยอดของคลื่นไซน์) ในทางกลับกันเมื่อไอออนเคลื่อนที่ตามทิศของเลเซอร์ก็จะมีการกระเจิงโฟตอนที่ลดลง (บริเวณคลื่นไซน์ที่ต่ำ)

กรณีที่ไมโครโมชันสูง (ชดเชยไม่ดี) จำนวนโฟตอนจะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ดังภาพที่แสดง เราเรียกว่าเกิดไมโครโมชันส่วนเกิน (excess micromotion)

กรณีที่ไมโครโมชันต่ำหรือไม่มีส่วนเกิน (ชดเชยดีแล้ว) จำนวนโฟตอนตลอดช่วงคาบจะสม่ำเสมอไม่เป็นคลื่นไซน์

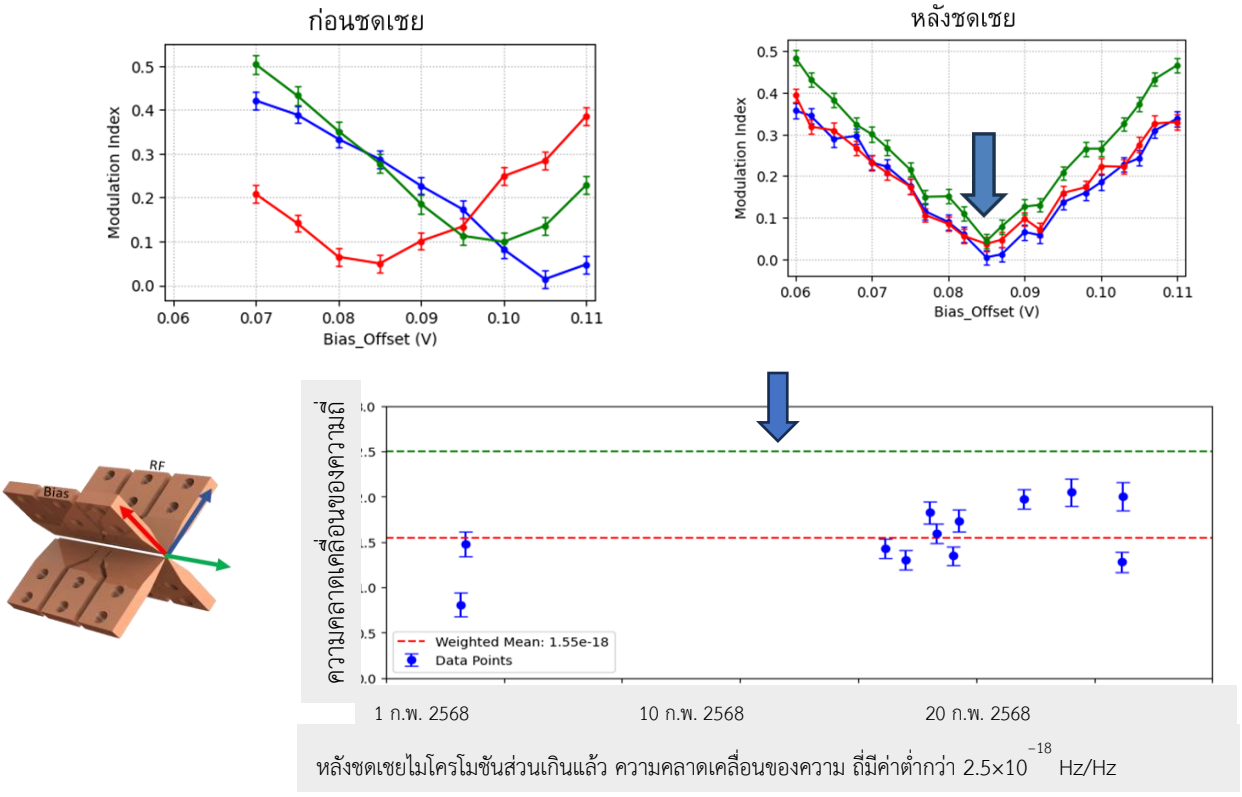
(๒) ดัชนีส่วนเกิน (modulation index) เนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็นเหตุที่ทำให้เกิดไมโครโมชันส่วนเกินเราจึงจำเป็นต้องวัดส่วนเกินนี้เทียบกับสนามไฟฟ้า

การวัดขนาด (amplitude) ของไมโครโมชันส่วนเกิน ทำได้โดยการหาดัชนีส่วนเกิน ตามสมการเทียบกับความแรงของสนามไฟฟ้าภูมิหลัง (background electric field) ได้ดังแสดง ในภาพนี้มีสามเส้นเพราะแสดงทั้ง ๓ มิติของไมโครโมชัน



เมื่อทำการชดเชยสนามไฟฟ้าภูมิหลังเรียกว่าการไบอัส (bias) ด้วยการปรับสนามไฟฟ้าที่ใช้กักขังไอออนทั้ง ๓ มิติ ทำให้ไมโครโมชันทั้ง ๓ แกนมีค่าต่ำสุดที่ค่าสนามไฟฟ้าระหว่าง 0.08-0.09 v

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าต่ำสุดของไมโคโครโมชันที่เหลืออยู่มีค่าต่ำกว่า 2.5×10^{-18} Hz/Hz



หลังชดเชยไมโครโมชันส่วนเกินแล้ว ความคลาดเคลื่อนของความ ถี่มีค่าต่ำกว่า 2.5×10^{-18} Hz/Hz

หมายเหตุ *การกักขังไอออนในสนามไฟฟ้านั้นไอออนจะมีการเคลื่อนที่อีกแบบหนึ่งที่ไม่ได้แสดงในที่นี้เรียกว่าการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก (secular motion) ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้ากระแสสลับ RF เช่นกันและสามารถทำให้ลดลงได้เมื่อทำให้ไอออนเย็นตัวลง*

การวัดไมโครโมชันส่วนเกินสำหรับไอออนหลายตัว (เพื่อสร้างนาฬิกาหลายตัว) ที่ถูกกักขัง สามารถทำได้ ๒ วิธี

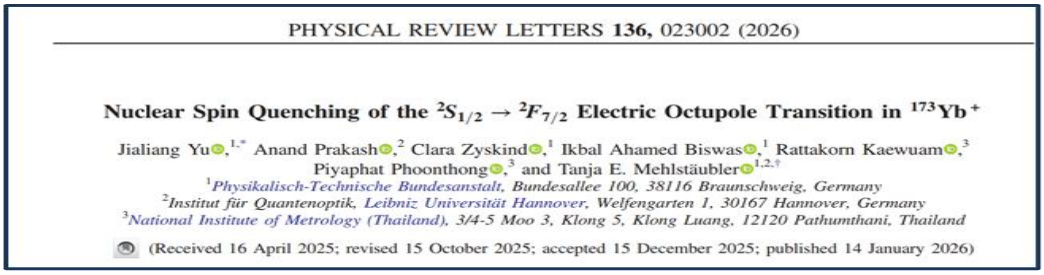
วิธีที่ ๑ การกักขังไอออนที่มีไอโซโทปต่างกัน เช่น Yb-174 และ Yb-171 และวัดโฟตอนที่กระเจิงแสงเฉพาะไอโซโทปที่สนใจ

วิธีที่ ๒ การกักขังไอโซโทปเดียวกันแต่ใช้รูเข็ม (pinhole) เพื่อที่จะป้องกันโฟตอนที่กระเจิงมาจากไอออนตัวอื่น

การทดลองพบว่าวิธีที่ ๑ ไม่สามารถให้ผลการทดลองที่ทำซ้ำได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการสลับตำแหน่งของไอออนทำให้ไม่สามารถที่จะควบคุมให้ไอออนอยู่ตำแหน่งเดิมได้ตลอดจึงยกเลิกกรณีนี้

สำหรับวิธีที่ ๒ จะใช้รูเข็ม (pinhole) ป้องกันโฟตอนที่กระเจิงมาจากไอออนตัวอื่น จากการทดลอง พบว่าความคลาดเคลื่อนความถี่สำหรับการกักขังไอออนจำนวน ๕ ตัว อันเนื่องมาจากผลกระทบของไมโครโมชันส่วนเกิน มีค่าต่ำกว่า 1.2×10^{-17} Hz/Hz ซึ่งนำไปใช้งานได้ ทีมวิจัยจึงเลือกวิธีนี้ในการวัดความคลาดเคลื่อน

๒.๒.๒ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ใน Physical Review Letters 2026



PHYSICAL REVIEW LETTERS **136,** 023002 (2026)

Nuclear Spin Quenching of the $^2S_{1/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ Electric Octupole Transition in $^{173}Yb^+$

Jialiang Yu,[1,*] Anand Prakash,[2] Clara Zyskind,[1] Ikbal Ahamed Biswas,[1] Rattakorn Kaewuam,[3] Piyaphat Phoonthong,[3] and Tanja E. Mehlstäubler[1,2,†]

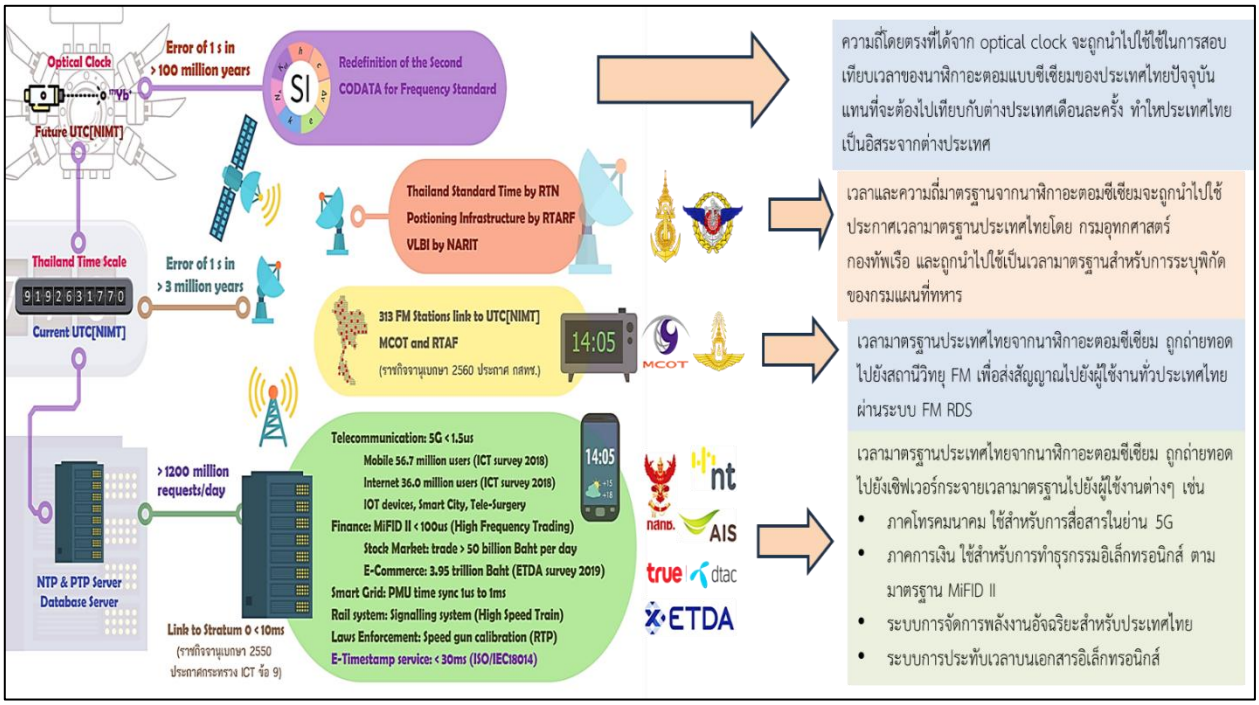
[1]*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany*

[2]*Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover, Germany*

[3]*National Institute of Metrology (Thailand), 3/4-5 Moo 3, Klong 5, Klong Luang, 12120 Pathumthani, Thailand*

(Received 16 April 2025; revised 15 October 2025; accepted 15 December 2025; published 14 January 2026)

๒.๒.๓ การนำเวลามาตรฐานประเทศไทยปัจจุบันไปใช้งาน



ปัจจุบันทั้งภาครัฐและเอกชนนำเวลามาตรฐานประเทศไทยไปใช้งานไม่ว่าจะเป็นการสอบเทียบเครื่องมือ หรือการขอปรับเทียบเวลาผ่านระบบอินเทอร์เน็ต

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ และกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ได้ร่วมกันประสานเวลา เพื่อให้เวลาที่ประกาศโดยกรมอุทกศาสตร์มีความเชื่อมโยงกับเวลาสากลเชิงพิกัดของประเทศไทย (UTC[NIMT])

ปัจจุบันเป็นนาฬิกาอะตอมซีเซียมแม่นยำราว 10^{-13} วินาทีต่อวินาที ส่วนนาฬิกาเชิงแสงใหม่นี้จะมีความแม่นยำราว 10^{-16} วินาทีต่อวินาที ซึ่งนาฬิกาอะตอมเชิงแสงยังคงอยู่ในขั้นงานวิจัย ทำให้ไม่มีขายตามท้องตลาด มีหลายบริษัทที่พยายามทำออกมาขายเชิงพานิชย์

๓. สรุป

๑) เมื่อวันที่ ๒๐ มกราคม ๒๕๖๒ สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินไปยังศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ ทรงเป็นประธานในการลงนามความร่วมมือด้านการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม ระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT) กับมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS : National University of Singapore)

๒) นับตั้งแต่ ปี ๒๕๖๒ - ๒๕๖๕ ประเทศไทยสามารถสร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงสำเร็จโดยมีอุปกรณ์หลักคือ (๑) อุปกรณ์ขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ (Helical Resonator) และ (๒) อุปกรณ์กักขังไอออน (Linear Quadrupole Trap) และกำลังสร้างระบบเลเซอร์ที่จะไปทำให้อะตอมย้ายชั้นพลังงานให้ความถี่เป็นนาฬิกาที่ต้องการ

๓) ปี ๒๕๖๖ สถานการณ์ COVID – 19 คลี่คลายลง นักวิจัยไทยจึงได้เดินทางไปร่วมกับสิงคโปร์สร้างอุปกรณ์สำหรับกักขังไอออน ร่วมกับ CQT เป็นงานต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มโครงการ แต่หยุดชะงักไปเนื่องจากโควิด ๑๙ ได้ต้นแบบ Linear Quadrupole Trap เพื่อนำมาทำการทดลองต่อในไทย เทียบผลกับสิงคโปร์

๔) ในปี ๒๕๖๗ ทีมนักวิจัยได้ร่วมปรับปรุงระบบการถ่ายภาพไอออน การตรวจวัดสถานะทางควอนตัมและการวัดการสั่นของไอออน (Micromotion) นอกจากนี้ยังร่วมมือกับหน่วยงานต่าง ๆ เพื่อนำเวลามาตรฐานไปใช้งาน

๕) ปัจจุบันสถาบันมาตรวิทยามีนาฬิกาที่แม่นยำประมาณ ๑๐ $^{-๑๓}$ วินาทีต่อวินาที ส่วนนาฬิกาเชิงแสงที่กำลังทำใหม่นี้จะมีความแม่นยำประมาณ ๑๐ $^{-๑๖}$ วินาทีต่อวินาที ซึ่งนาฬิกาอะตอมเชิงแสงยังคงอยู่ในขั้นงานวิจัย ทำให้ไม่มีขายตามท้องตลาด มีหลายบริษัทที่พยายามทำออกมาขายเชิงพานิชย์ แต่ยังไม่ประสบผลสำเร็จ

๖) นาฬิกาที่มีความแม่นยำจะทำให้โครงสร้างพื้นฐานทางด้านเวลาของประเทศดีขึ้น เป็นรากฐานที่สำคัญของระบบดิจิทัลของประเทศ นอกจากนี้ ระบบการกักขังไอออนยังเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญที่จะทำให้นักวิทยาศาสตร์ไทยสามารถทำการทดลองทางด้านควอนตัมฟิสิกส์ได้

๗) แผนงานในอนาคต

- ปี ๒๕๖๙ การประเมินความไม่แน่นอนอันเกิดมาจากสิ่งรบกวนอื่นๆ เช่น สนามแม่เหล็ก อุณหภูมิของไอออน เป็นต้น
- ปี ๒๕๖๙ - ๒๕๗๐ การเปรียบเทียบความถี่ด้วยระบบดาวเทียมนำทาง GNSS (Global Navigation Satellite System) เพื่อทำการเปรียบเทียบความถี่ของนาฬิกาอะตอมระหว่าง NIMT และ CQT
- ปี ๒๕๗๑ - ๒๕๗๒ ทำการวัดความถี่ของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงของทั้ง ๒ หน่วยงาน (ไทยและสิงคโปร์) ซึ่งธาตุทั้งสอง ได้แก่ อิธเธอเบียม (Yb^+) ธาตุลูทิเทียม (Lu^+) นี้คาดว่าจะเป็นส่วนหนึ่ง ในการกำหนดมาตรฐานหน่วยวินาทีใหม่ของโลกในอนาคต
- ปี ๒๕๗๓ จะเริ่มพิจารณานิยามใหม่ของหน่วยวินาที

๔. ประเด็นเสนอต่อที่ประชุม

เพื่อรับทราบผลการดำเนินงานปี ๒๕๖๘ และเห็นชอบแผนการดำเนินงานปี ๒๕๖๙