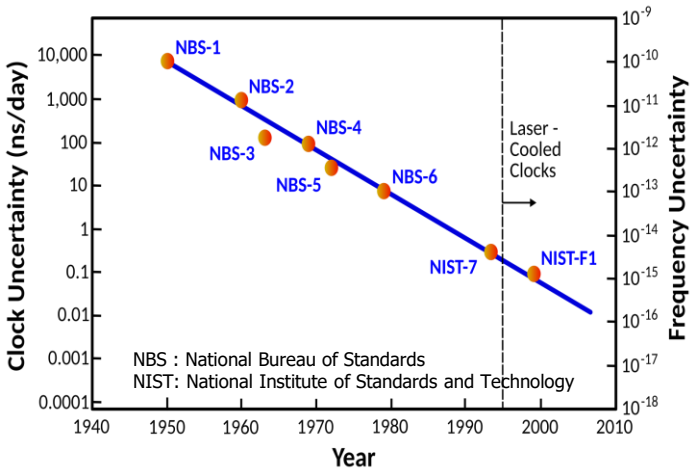
วาระที่ 3.3
โครงการความร่วมมือไทย-สิงคโปร์เพื่อพัฒนานาฟิกาอะตอมเชิงแสง

ตามพระราชดำริสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี
(ประจำปี 2568)

รายงานเมื่อ
16 มีนาคม 2569

1.ศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม (Centre for Quantum Technologies :CQT) ม.แห่งชาติสิงคโปร์(NUS)



- นาฬิกาอะตอมคืออุปกรณ์บอกเวลาที่แม่นยำที่สุดในโลกโดยใช้ความถี่การสั่นพ้อง (resonant)ที่แม่นยำของอะตอม(แทนการใช้กลไกทางกายภาพอย่างลูกตุ้มหรือควอตซ์) ในการวัดเวลา ซึ่งคลาดเคลื่อนเพียงประมาณหนึ่งวินาทีทุกๆ 100 ล้านปี นาฬิกาเหล่านี้มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อระบบดาวเทียมนำทาง GNSS การซิงโครไนซ์เวลาผ่านอินเทอร์เน็ต การทำธุรกรรมทางการเงิน และงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ขั้นสูง (wikipedia)
- เมื่อ 20 มกราคม 2562 สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินไปยังศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ ทรงเป็นประธานในการลงนามความร่วมมือด้านการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม ระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT: National Institute of Metrology of Thailand) กับมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS : National University of Singapore)

<u>วัตถุประสงค์</u> เพื่อใช้เป็นนิยามของหน่วยวินาทีในอนาคตของประเทศไทยนาฬิกา(**<u>แม่นยำประมาณ 10 $^{-16}$ วินาทีต่อวินาที)</u>**รวมทั้งการพัฒนาบุคลากรด้านเทคโน โลยีควอนตัม

- NIMT ใช้ไอออนของธาตุอิธเธอเบียม (Yb^+)
- CQT ใช้ไอออนของธาตุลูทิเทียม (Lu^+)

- งบประมาณทั้งโครงการ 83.38 ล้านบาท
- **<u>อนุมัติแล้ว 7 ปี(62-68)จำนวน 69.24 ล้านบาท</u>**
  (วช บพค สกสว กระทรวงDE)13

นักวิจัยไทย

- ดร. ปิยพัฒน์ พูลทอง NIMT
- ดร. รัฐกร แก้วอ่วม NIMT
- ดร. ธเนศ พฤทธิวรสิน ม.มหิดล
- ดร. ธารา เฉลิมทรงศักดิ์ ม.มหิดล
- นายนครินทร์ จายโจง จบป.โท ม.มหิดล ขณะนี้เรียนป.เอกที่NUS(CQT) ด้านนาฬิกาอะตอม Lu^+

นักวิจัยสิงคโปร์

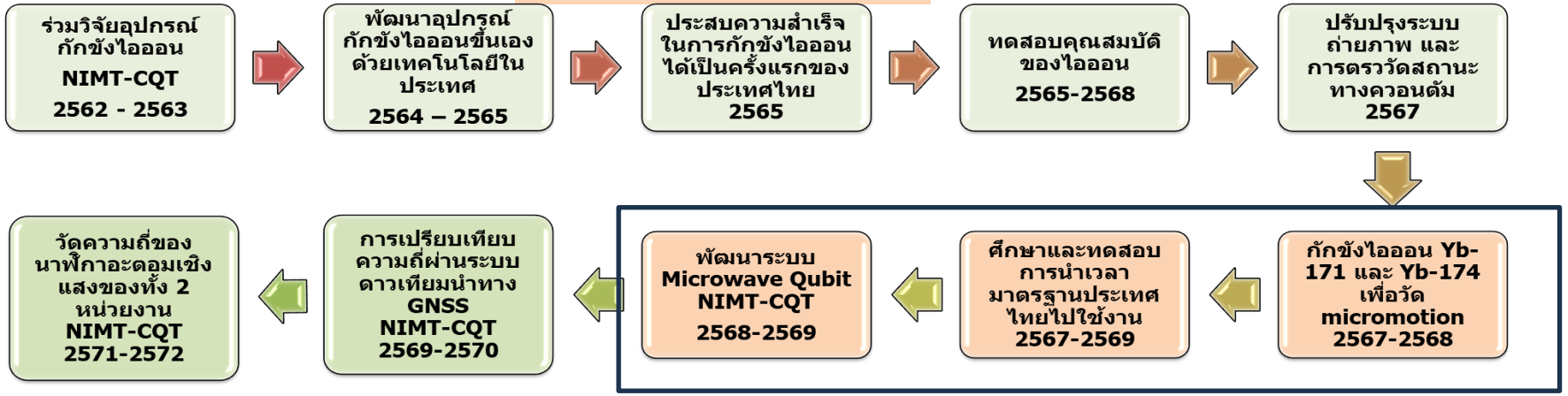
- Dr. Murray Barrett CQT
- Dr. Kyle Arnold CQT

2. แผนความร่วมมือ NIMT-CQT ในการพัฒนานาฬิกาอะตอมเชิงแสง(1/2)

- 2562 – 2565 ร่วมวิจัยและสร้างอุปกรณ์กักขังไอออนของธาตุอิตเทอเบียม (Yb+) ซึ่งเป็นหัวใจของนาฬิกาอะตอมที่ CQT และ NIMT
- 2562 ร่วมพัฒนาเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบางทองคำบนแผ่นเซรามิคอะลูมินาไนไตรด์ที่ CQT ที่สิงคโปร์แต่ไม่เสร็จสมบูรณ์
- 2563 พัฒนาชั้นทองแดงบนแผ่นเซรามิค MACOR ด้วยเทคโนโลยีในไทย
- 2564 สร้างชิ้นส่วนเพิ่มเติมเพื่อให้ได้หน่วยกักขังไอออนอิตเทอเบียม
- 2565 ประสบความสำเร็จในการกักขังไอออนเย็นของธาตุอิตเทอเบียม
- 2565 - 2568 ทดสอบคุณสมบัติของไอออนอิตเทอเบียมที่กักขังได้
- 2567 ปรับปรุงระบบการถ่ายภาพ และการตรวจวัดสถานะทางควอนตัมของนาฬิกาอะตอม
- 2567 – 2568 การกักขังไอออน Yb-171 และ Yb-174 เพื่อเตรียมสำหรับการวัด micromotion
- **2567 – 2569 ศึกษาและทดสอบการนำเวลามาตรฐานประเทศไทยไปใช้งาน**
- **2568 – 2569 การวัดความคลาดเคลื่อนความถี่จาก Excess micromotion ด้วยวิธี Photon correlation method**
- 2569 - 2570 การเปรียบเทียบความถี่ด้วยระบบดาวเทียมนำทาง GNSS (Global Navigation Satellite System) เพื่อทำการเปรียบเทียบความถี่ของนาฬิกาอะตอมระหว่าง NIMT และ CQT
- 2571 - 2572 ทำการวัดความถี่ของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงของทั้ง 2 หน่วยงานซึ่งทั้งสองธาตุนี้คาดว่าจะเป็นส่วนหนึ่ง ในการกำหนดมาตรฐานหน่วยวินาทีใหม่ของโลกในอนาคต
- 2573 จะเริ่มพิจารณานิยามใหม่ของหน่วยวินาที

2. แผนความร่วมมือ NIMT-CQT ในการพัฒนานาฬิกาอะตอมเชิงแสง(2/2)

ภาพรวมแผนดำเนินการ

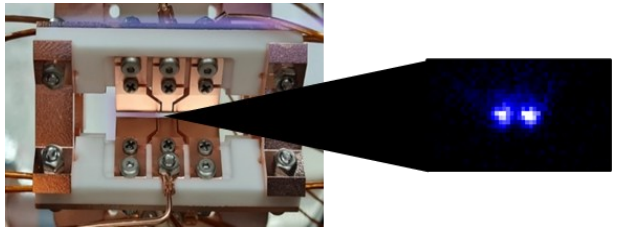


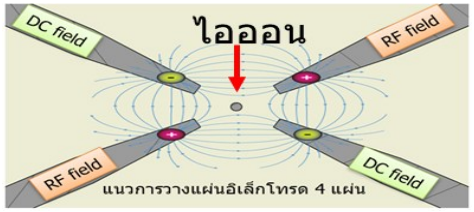
การดำเนินงานในปี 2568

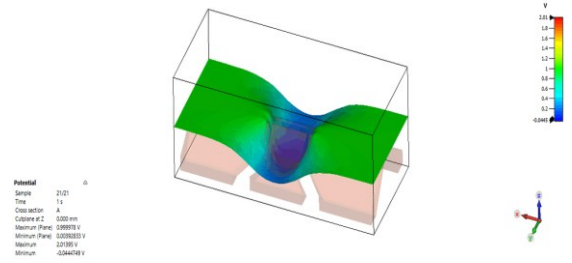
1. การวัดความคลาดเคลื่อนความถี่จาก Excess micromotion ด้วยวิธี Photon correlation method
2. ศึกษาทดสอบการนำเวลามาตรฐานปัจจุบันไปใช้งาน

3.ความก้าวหน้าในปี 2568(1/3): การวัดความคลาดเคลื่อนความถี่จากไมโครโมชันส่วนเกิน(Excess micromotion) ด้วยวิธีหาหาสหสัมพันธ์กับโฟตอน (Photon correlation method)

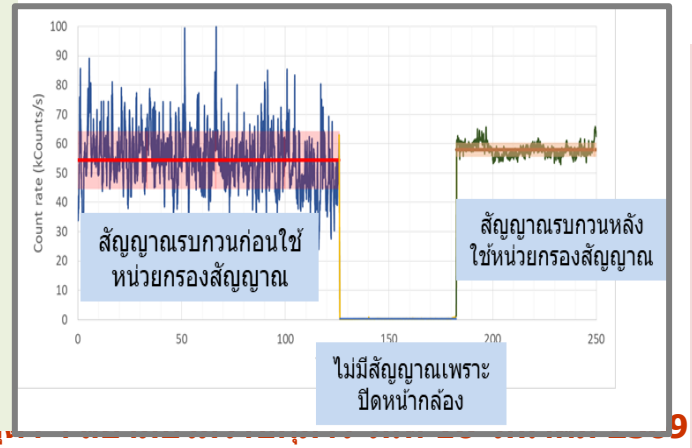
<u>ผลงานในปี2565-66</u> สามารถกักขังและถ่ายภาพไอออนในการสร้างความถี่นาฬิกาได้สำเร็จ







<u>ผลงานในปี2567</u> กำจัดสัญญาณรบกวนเพื่อให้การถ่ายภาพไอออนชัดเจนมาก ขึ้นและทำให้ตำแหน่งไอออนเสถียรยิ่งขึ้น

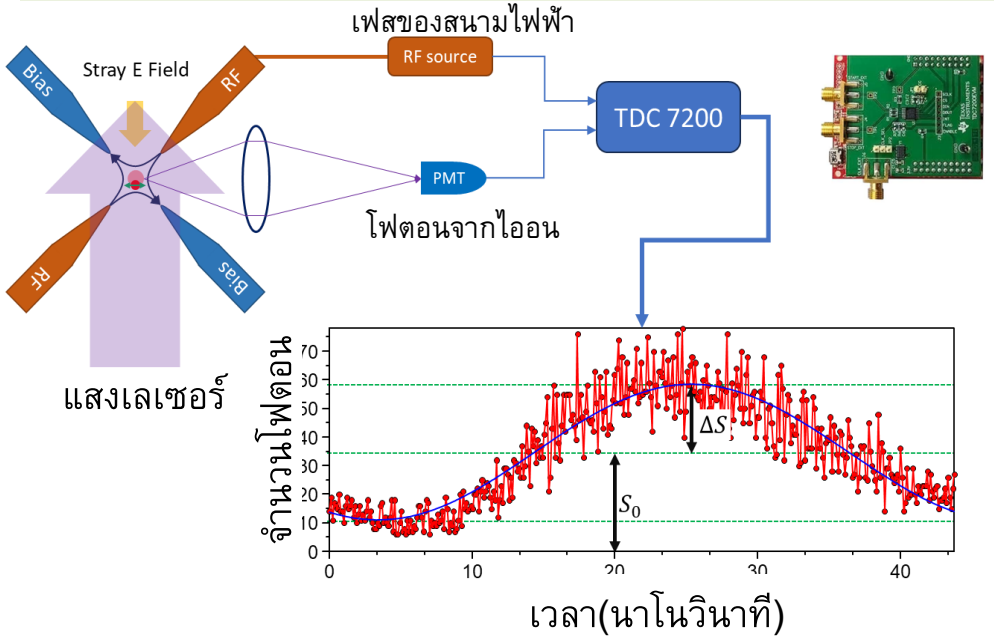


<u>ในปี2568</u> วัดความคลาดเคลื่อนความถี่จากไมโครโมชันส่วนเกิน(**Excess micromotion**) สำหรับไอออนเดี่ยวและไอออนหลายตัว

- ไมโครโมชันในนาฬิกาอะตอมคือการเคลื่อนที่หรือการสั่นไหวด้วยความถี่สูงอันไม่พึงประสงค์ของไอออนที่ถูกกักไว้**ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าภูมิหลัง(background electrical field)** **รบกวน**อาจทำให้เกิดความผิด พลาดในการบอกเวลา
- เพื่อให้ได้ความแม่นยำสูงนักวิจัยจำเป็นต้อง**ชดเชยไมโครโมชันส่วนเกินไป(excess micromotion)นี้**

3.ความก้าวหน้าในปี 2568 : (1)การวัดความคลาดเคลื่อนความถี่จากไมโครโมชันส่วนเกิน(Excess micromotion) ด้วยวิธีหาหาสหสัมพันธ์กับโฟตอน (Photon correlation method) (1/3)

3.1 <u>การวัดไมโครโมชันส่วนเกินด้วยการหาสหสัมพันธ์กับโฟตอน</u> เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจจับและวัดความสั่นไหวของไอออนที่ถูกกักขัง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง(i)เวลาของการตรวจจับโฟตอนที่ปล่อยออกมาจากไอออนกับ(ii)เฟส(phase)ของสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ (RF) ที่ใช้ในการกักขัง



TDC:((Time to Digiial Converter หน่วยวัดเวลาที่โฟตอนมาถึงหลอดคูณแสง(PMT:Photomultiplier)

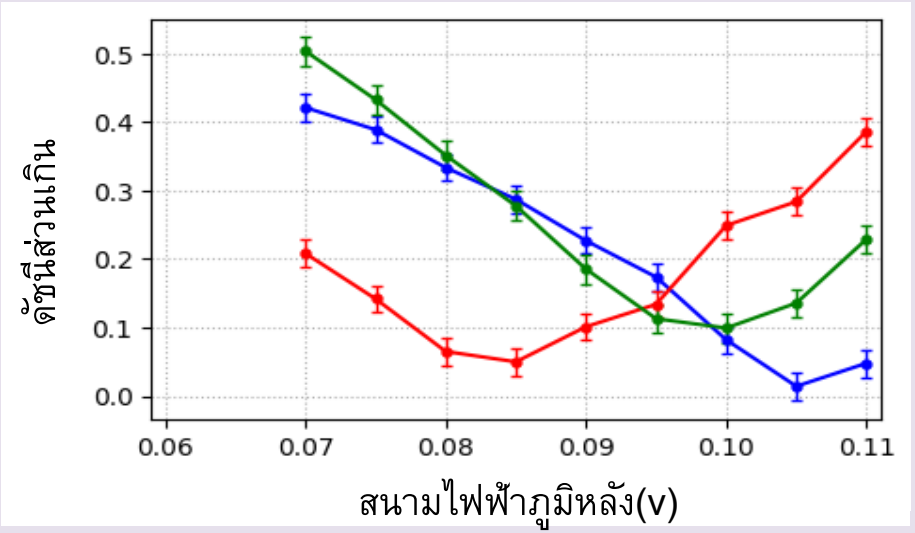
$$S(t) = S_0 + \Delta S \cos(\Omega_{rf} t + \phi)$$

$$\text{mod index} = \frac{\Delta S}{S_0}$$

- เราจะใช้แสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปที่ไอออน และวัดจำนวนโฟตอนเทียบกับเฟสของสนามไฟฟ้าที่แต่ละเวลา
- เมื่อนำจำนวนโฟตอนที่วัดได้ในแต่ละช่วงเวลามาพล็อตฮิสโตแกรมก็จะได้จำนวนโฟตอนแต่ละช่วงเวลา (สีแดง) และคลื่นไซน์เป็นค่าสมการที่สัมพันธ์กับชุดข้อมูล(สีดำ)
- ทั้งนี้เป็นไปตามหลักการของ Doppler effect กล่าวคือ เมื่อไอออนเคลื่อนที่สวนกับทิศของเลเซอร์ความถี่ไอออนจะเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการกระเจิงโฟตอนมากขึ้น(บริเวณยอดของคลื่นไซน์) ในทางกลับกันเมื่อไอออนเคลื่อนที่ตามทิศของเลเซอร์ก็จะมีการกระเจิงโฟตอนที่ลดลง(บริเวณคลื่นไซน์ที่ต่ำ)
- กรณีที่ไมโครโมชันสูง (ชดเชยไม่ดี) จำนวนโฟตอนจะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ดังภาพที่แสดงเราเรียกว่าเกิด**ไมโครโมชันส่วนเกิน(excess micromotion)**
- กรณีที่ไมโครโมชันต่ำหรือไม่มีส่วนเกิน (ชดเชยดีแล้ว) จำนวนโฟตอนตลอดช่วงคาบจะสม่ำเสมอไม่เป็นคลื่นไซน์

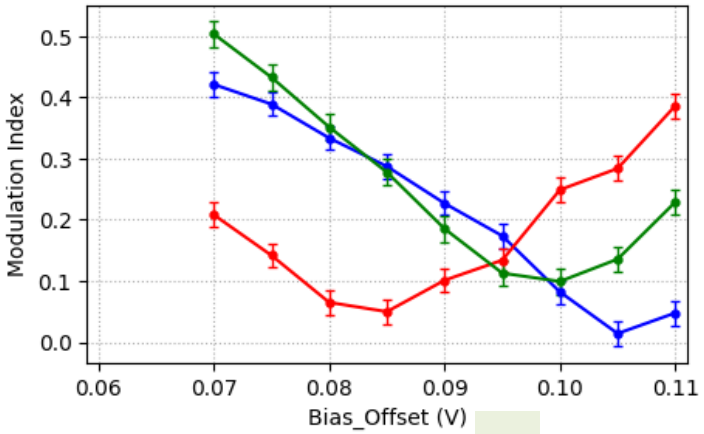
<u>3.2 ดัชนีส่วนเกิน(modulation index)</u> เนื่องจากสนาม ไฟฟ้าเป็นเหตุที่ทำให้เกิดไมโครโมชันส่วนเกินเราจึงจำเป็นต้องวัดส่วนเกินนี้เทียบกับสนามไฟฟ้า

การวัดขนาด(amplitude)ของไมโครโมชันส่วนเกิน ทำได้โดยการหาดัชนีส่วนเกิน ตามสมการเทียบกับความแรงของสนามไฟฟ้าภูมิหลัง (background electrical field)ได้ดังแสดง ในภาพนี้มีสามเส้นเพราะแสดงทั้ง 3 มิติของไมโครโมชัน



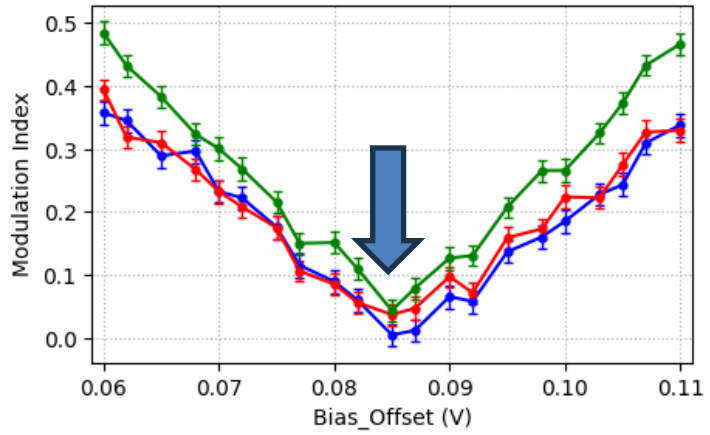
3.ความก้าวหน้าในปี 2568): (1) การวัดความคลาดเคลื่อนความถี่จากไมโครโมชันส่วนเกิน(Excess micromotion) ด้วยวิธีหาหาสหสัมพันธ์กับโฟตอน (Photon correlation method) (2/3)

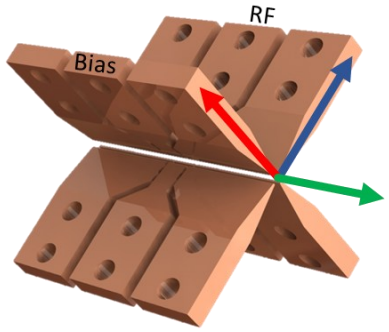
ก่อนชดเชย

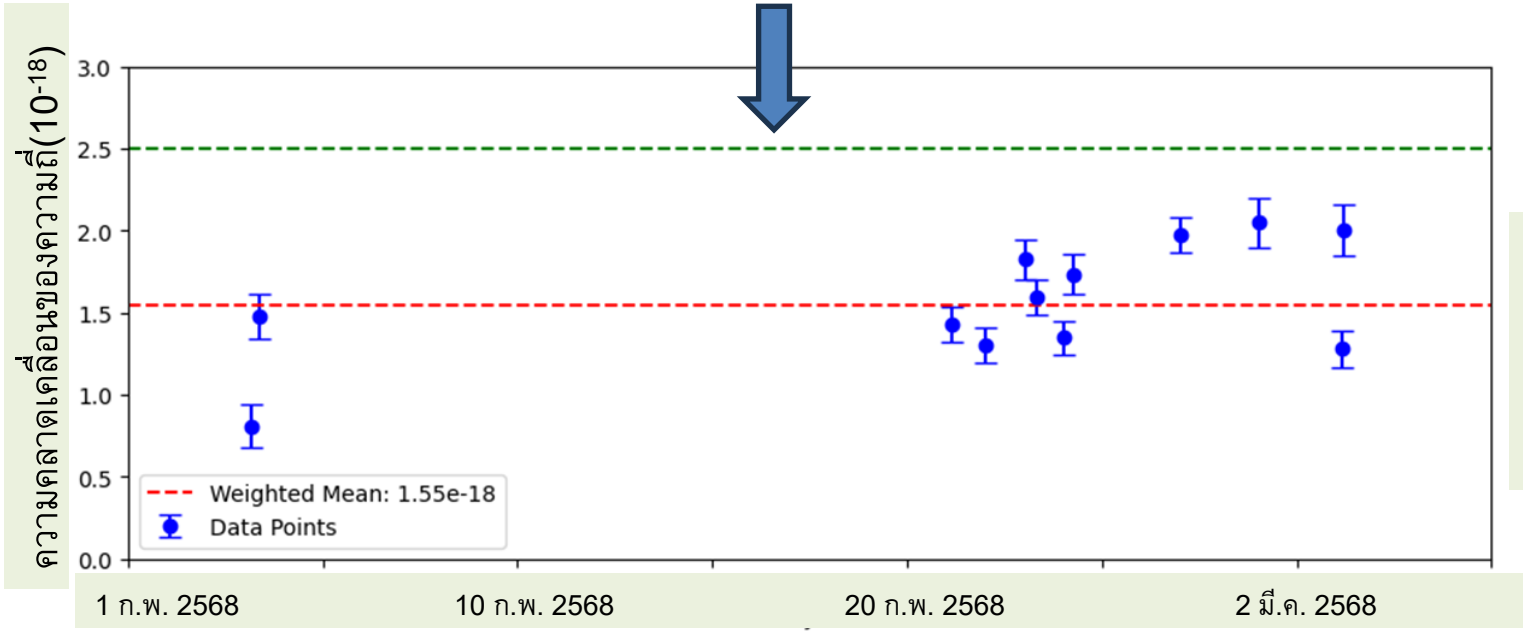


- เมื่อทำการชดเชยสนามไฟฟ้าภูมิหลังเรียกว่าการไบอัส(bias)ด้วยการปรับสนามไฟฟ้าที่ใช้กักขังไอออนทั้ง 3 มิติ ทำให้ไมโครโมชันทั้ง 3 แกนมีค่าต่ำสุดที่ค่าสนามไฟฟ้าระหว่าง 0.08-0.09 v
- นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าต่ำสุดของไมโคโครโมชันที่เหลืออยู่มีค่าต่ำกว่า 2.5×10^{-18} Hz/Hz

หลังชดเชย



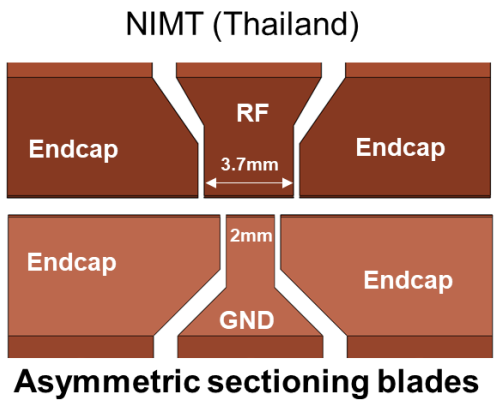


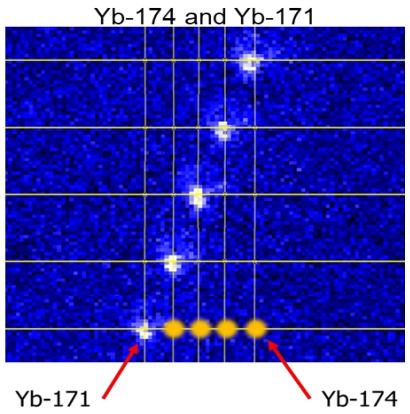


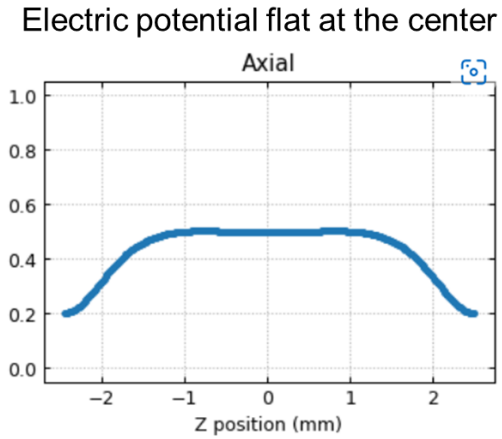
หลังชดเชยไมโครโมชันส่วนเกินแล้ว ความคลาดเคลื่อนของความถี่มีค่าต่ำกว่า 2.5×10^{-18} Hz/Hz

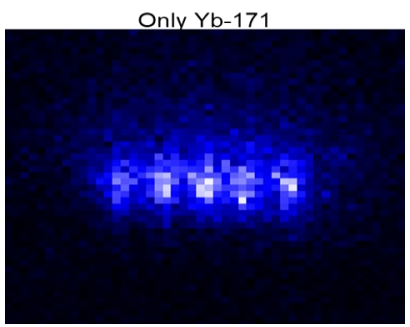
หมายเหตุ การกักขังไอออนในสนามไฟฟ้านั้นไอออนจะมีการเคลื่อนที่อีกแบบหนึ่งที่ไม่ได้แสดงในที่นี้เรียกว่าการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก (secular motion) ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้ากระแสสลับ RF เช่นกันและสามารถทำให้ลดลงได้เมื่อทำให้ไอออนเย็นตัวลง

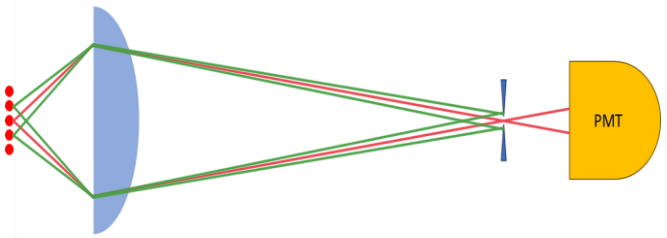
3.ความก้าวหน้าในปี 2568(1/3): (1) การวัดความคลาดเคลื่อนความถี่จากไมโครโมชันส่วนเกิน(Excess micromotion) ด้วยวิธีหาสหสัมพันธ์กับโฟตอน (Photon correlation method)(3/3)







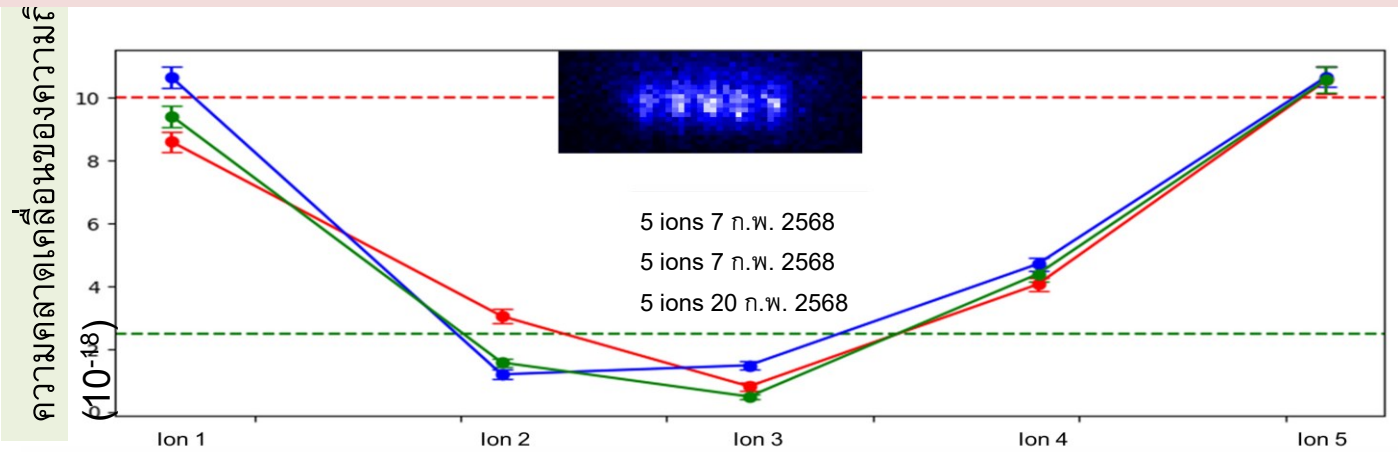


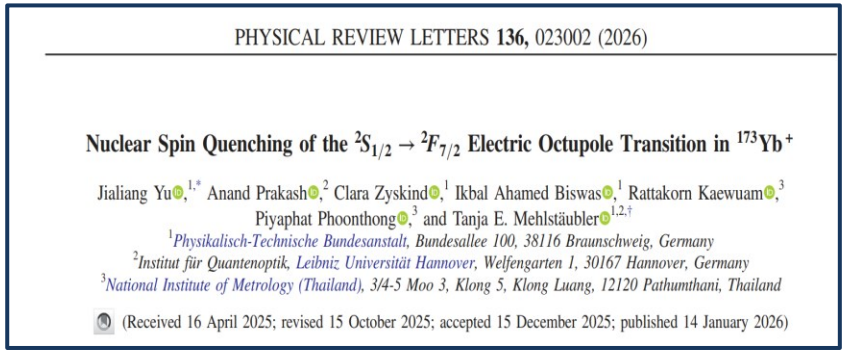


วิธีที่ 2 จะใช้รูเข็ม(pinhole) ป้องกันโฟตอนที่กระเจิงมาจากไอออนตัวอื่น

การวัดไมโครโมชันส่วนเกินสำหรับ**<u>ไอออนหลายตัว(เพื่อสร้างนาฬิกาหลายตัว)</u>**ที่ถูกกักขัง สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

- **วิธีที่1** การกักขังไอออนที่มี**<u>ไอโซโทปต่างกัน เช่น Yb-174 และ Yb-171</u>** และวัดโฟตอนที่กระเจิงแสงเฉพาะไอโซโทปที่สนใจ
- **วิธีที่2** การกักขัง**<u>ไอโซโทปเดียวกัน</u>**แต่ใช้รูเข็ม(pinhole) เพื่อที่จะป้องกันโฟตอนที่กระเจิงมาจากไอออนตัวอื่น
- การทดลองพบว่าวิธีที่ 1 ไม่สามารถให้ผลการทดลองที่ทำซ้ำได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการสลับตำแหน่งของไอออนทำให้ไม่สามารถที่จะควบคุมให้ไอออนอยู่ตำแหน่งเดิมได้ตลอดจึง**<u>ยกเลิกกรณีนี้</u>**
- สำหรับวิธีที่ 2 จะใช้รูเข็ม(pinhole)ป้องกันโฟตอนที่กระเจิงมาจากไอออนตัวอื่น ดังภาพ พบว่าความคลาดเคลื่อนความถี่สำหรับการกักขังไอออนจำนวน 5 ตัว อันเนื่องมาจากผลกระทบของไมโครโมชันส่วนเกิน **<u>มีค่าต่ำกว่า 1.2×10^{-17} Hz/Hz ซึ่งนำไปใช้งานได้ จึงเลือกวิธีนี้</u>**




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*

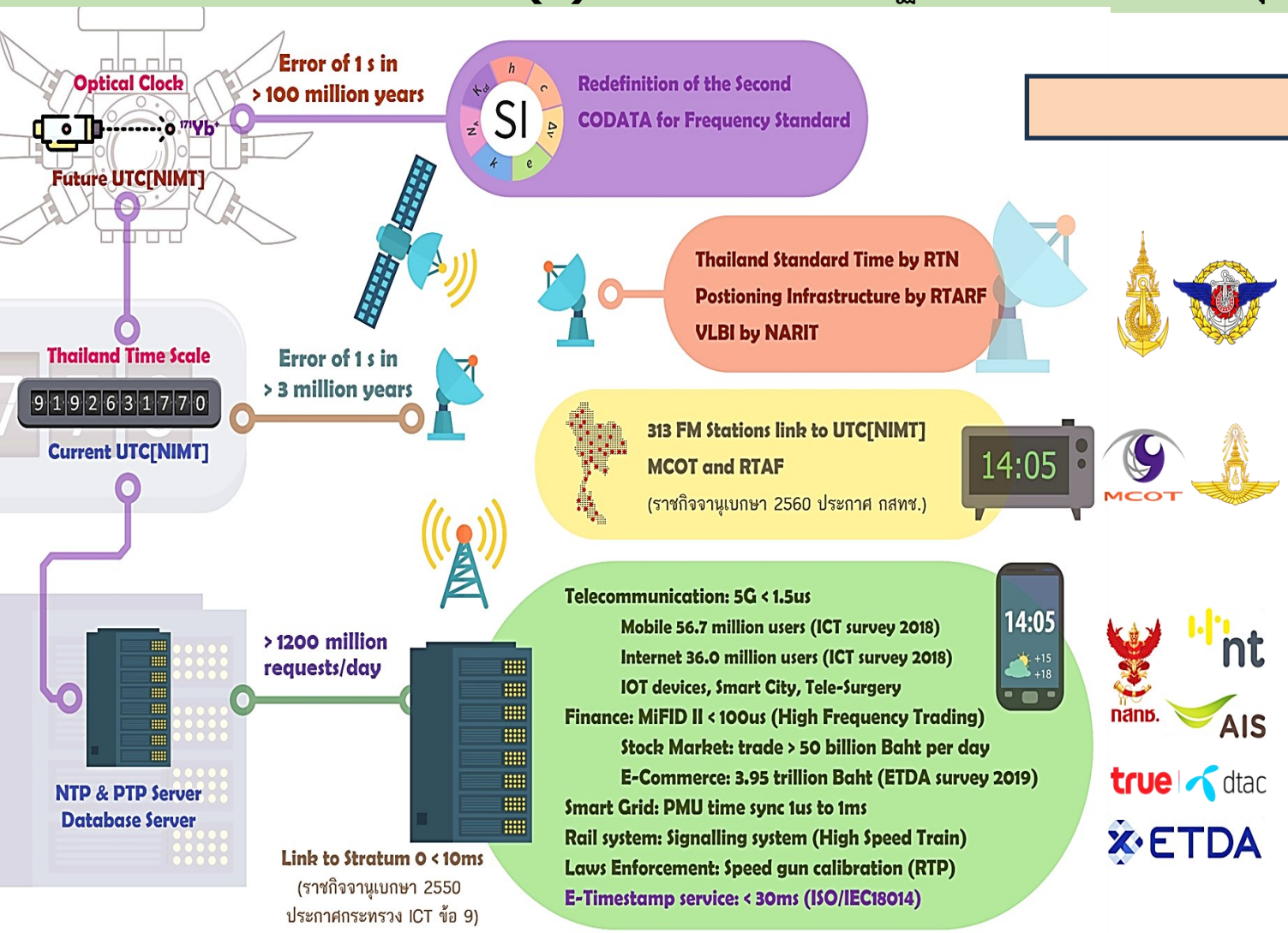
[2]*Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover, Germany*

[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)

(2)ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ใน Physical Review Letters 2026

3.ความก้าวหน้าในปี 2568: (3)การนำเวลามาตรฐานประเทศไทยปัจจุบันไปใช้งาน



<u>ความถี่โดยตรงที่ได้จาก optical clock จะถูกนำไปใช้ใช้ในการสอบเทียบเวลาของนาฬิกาอะตอมแบบซีเซียมของประเทศไทยปัจจุบันแทนที่จะต้องไปเทียบกับต่างประเทศเดือนละครั้ง ทำให้ประเทศไทยเป็นอิสระจากต่างประเทศ</u>

เวลาและความถี่มาตรฐานจากนาฬิกาอะตอมซีเซียมจะถูกนำไปใช้ประกาศเวลามาตรฐานประเทศไทยโดย กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ และถูกนำไปใช้เป็นเวลามาตรฐานสำหรับการระบุพิกัดของกรมแผนที่ทหาร

เวลามาตรฐานประเทศไทยจากนาฬิกาอะตอมซีเซียมถูกถ่ายทอดไปยังสถานีวิทยุ FM เพื่อส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้งานทั่วประเทศไทยผ่านระบบ FM RDS

เวลามาตรฐานประเทศไทยจากนาฬิกาอะตอมซีเซียม ถูกถ่ายทอดไปยังเซิฟเวอร์กระจายเวลามาตรฐานไปยังผู้ใช้งานต่างๆ เช่น

- ภาคโทรคมนาคม ใช้สำหรับการสื่อสารในย่าน 5G
- ภาคการเงิน ใช้สำหรับการทำธุรกรรมอิเล็กทรอนิกส์ตามมาตรฐาน MiFID II
- ระบบการจัดการพลังงานอัจฉริยะสำหรับประเทศไทย
- ระบบการประทับเวลาบนเอกสารอิเล็กทรอนิกส์

- ปัจจุบันทั้งภาครัฐและเอกชนนำเวลามาตรฐานประเทศไทยไปใช้งานไม่ว่าจะเป็นการสอบเทียบเครื่องมือ หรือการขอปรับเทียบเวลาผ่านระบบอินเทอร์เน็ต
- สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ และกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ก็ได้ร่วมกันประสานเวลา เพื่อให้เวลาที่ประกาศโดยกรมอุทกศาสตร์มีความเชื่อมโยงกับเวลาสากลเชิงพิกัดของประเทศไทย (UTC[NIMT])
- ปัจจุบันเป็นนาฬิกาอะตอมซีเซียมแม่นยำราว 10^{-13} วินาทีต่อวินาที ส่วนนาฬิกาเชิงแสงใหม่นี้จะมีความแม่นยำราว 10^{-16} วินาทีต่อวินาที ซึ่งนาฬิกาอะตอมเชิงแสงยังคงอยู่ในขั้นงานวิจัย ทำให้ไม่มีขายตามท้องตลาด มีหลายบริษัทที่พยายามทำออกมาขายเชิงพานิชย์

4.สรุป

1. เมื่อ 20 มกราคม 2562 สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินไปยังศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ ทรงเป็นประธานในการลงนามความร่วมมือด้านการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม ระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT: National Institute of Metrology of Thailand)กับมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS : National University of Singapore)
2. นับตั้งแต่พ.ศ.2562-65 ประเทศไทยสามารถสร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงสำเร็จและสามารถกักขังไอออนได้เป็นครั้งแรก โดยมีอุปกรณ์หลักคือ(1)อุปกรณ์ขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ (Helical Resonator) และ(2)อุปกรณ์กักขังไอออน (Linear Quadrupole Trap) และกำลังสร้างระบบเลเซอร์ที่จะไปทำให้อะตอมเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานที่สามารถใช้ความถี่มาตรฐานได้
3. ในพ.ศ. 2566 สถานการณ์ COVID-19 คลี่คลายลง นักวิจัยไทยจึงได้เดินทางไปร่วมกับสิงคโปร์สร้างอุปกรณ์สำหรับกักขังไอออน ร่วมกับ CQT เป็นงานต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มโครงการ แต่หยุดชะงักไปเนื่องจากโควิด19 ได้ต้นแบบ Linear Quadrupole Trap เพื่อนำมาทำการทดลองต่อในไทย เทียบผลกับสิงคโปร์
4. ในพ.ศ. 2567 ทีมนักวิจัยได้ร่วมปรับปรุงระบบการถ่ายภาพไอออน การตรวจวัดสถานะทางควอนตัมและการวัดการสั่นของไอออน(micromotion) นอกจากนี้ยังร่วมมือกับหน่วยงานต่างๆ เพื่อนำเวลามาตรฐานไปใช้งาน
5. ในพ.ศ. 2568 ทีมนักวิจัยประสบความสำเร็จในการวัดการสั่นของไอออน(micromotion) สำหรับไอออนเดี่ยว และไอออนหลายตัว ซึ่งช่วยทำให้การปรับลดสนามไฟฟ้าภูมิหลัง ทำได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้ความไม่แน่นอนของนาฬิกาอะตอมมีค่าลดลง
6. ปัจจุบันสถาบันมาตรวิทยามีนาฬิกาซีเวียมที่แม่นยำประมาณ **10^{-13} วินาทีต่อวินาที** ส่วนนาฬิกาเชิงแสงที่กำลังทำใหม่นี้จะมีความแม่นยำประมาณ **10^{-16} วินาทีต่อวินาที** เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบนาฬิกาซีเซียม **นาฬิกาอะตอมเชิงแสงยังคงอยู่ในขั้นงานวิจัย ทำให้ไม่มีขายตามท้องตลาด มีหลายบริษัทที่พยายามทำออกมาขายเชิงพานิชย์**
7. นาฬิกาที่มีความแม่นยำจะทำให้โครงสร้างพื้นฐานทางด้านเวลาของประเทศดีขึ้น เป็นรากฐานที่สำคัญของระบบดิจิทัลของประเทศ นอกจากนี้ระบบการกักขังไอออนยังเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญที่จะทำให้นักวิทยาศาสตร์ไทยสามารถทำการทดลองทางด้านควอนตัมฟิสิกส์ได้
8. แผนงานในอนาคต

   - 2569 การประเมินความไม่แน่นอนอันเกิดมาจากสิ่งรบกวนอื่นๆ เช่น สนามแม่เหล็ก อุณหภูมิของไอออน เป็นต้น
   - 2569 - 2570 การเปรียบเทียบความถี่ด้วยระบบดาวเทียมนำทาง GNSS (Global Navigation Satellite System) เพื่อทำการเปรียบเทียบความถี่ของนาฬิกาอะตอมระหว่าง NIMT และ CQT
   - 2571 - 2572 ทำการวัดความถี่ของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงของทั้ง 2 หน่วยงาน(ไทยและสิงคโปร์)ซึ่งทั้งสองอิธเธอเบียม (Yb+) ธาตุลูทิเทียม (Lu+) นี้คาดว่าจะเป็นส่วนหนึ่ง ในการกำหนดมาตรฐานหน่วยวินาทีใหม่ของโลกในอนาคต
   - 2573 จะเริ่มพิจารณานิยามใหม่ของหน่วยวินาที

ประเด็นเสนอที่ประชุม

เพื่อรับทราบผลการดำเนินงาน ปี 2568
และอนุมัติงบประมาณปี2569