วาระที่ 3.3
ความร่วมมือไทย-สิงคโปร์เพื่อพัฒนานาฟิกาอะตอมเชิงแสง*

ตามพระราชดำริสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี
(ประจำปี 2565)

รายงานเมื่อ
13 มีนาคม 2566

หน่วยงานร่วมโครงการ
1. มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริฯ
2. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
3. วิทยาลัยนานาชาติ ม.มหิดล
4. สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
5. Centre for Quantum Technologies, Singapore
6. National Institute of Information and Communication Technology, Japan
7. Quantum Technology Foundation Thailand(Tech Startup)

*ชื่อเต็มคือนาฟิกาอะตอมเชิงแสงด้วยไอออนเย็นของธาตุอิธเธอเบียม

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

- 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. แผนความร่วมมือ NIMT-CQT ในการพัฒนานาฬิกาอะตอมเชิงแสง

<u>วัตถุประสงค์</u> เพื่อใช้เป็นนิยามของหน่วยวินาทีในอนาคตของประเทศไทย รวมทั้งการพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีควอนตัม

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

- งบประมาณทั้งโครงการ 83.38 ล้านบาท
- **<u>อนุมัติแล้ว 5 ปี(62-66)จำนวน 57.53 ล้านบาท</u>**
- ระยะเวลาดำเนินการ 7 ปี(2562-69)

นักวิจัยไทย

- ดร. ปิยพัฒน์ พูลทอง NIMT
- ดร. ธเนศ พฤทธิวรสิน ม.มหิดล
- ดร. ธารา เฉลิมทรงศักดิ์ ม.มหิดล
- ดร. รัฐกร แก้วอ่วม มทส (จบป.เอกจากCQT/NUS)
- นายนครินทร์ จายโจง จบป.โท ม.มหิดล ขณะนี้เรียนป.เอกที่NUS(CQT)ด้าน Quantum Science with Strontium

นักวิจัยสิงคโปร์

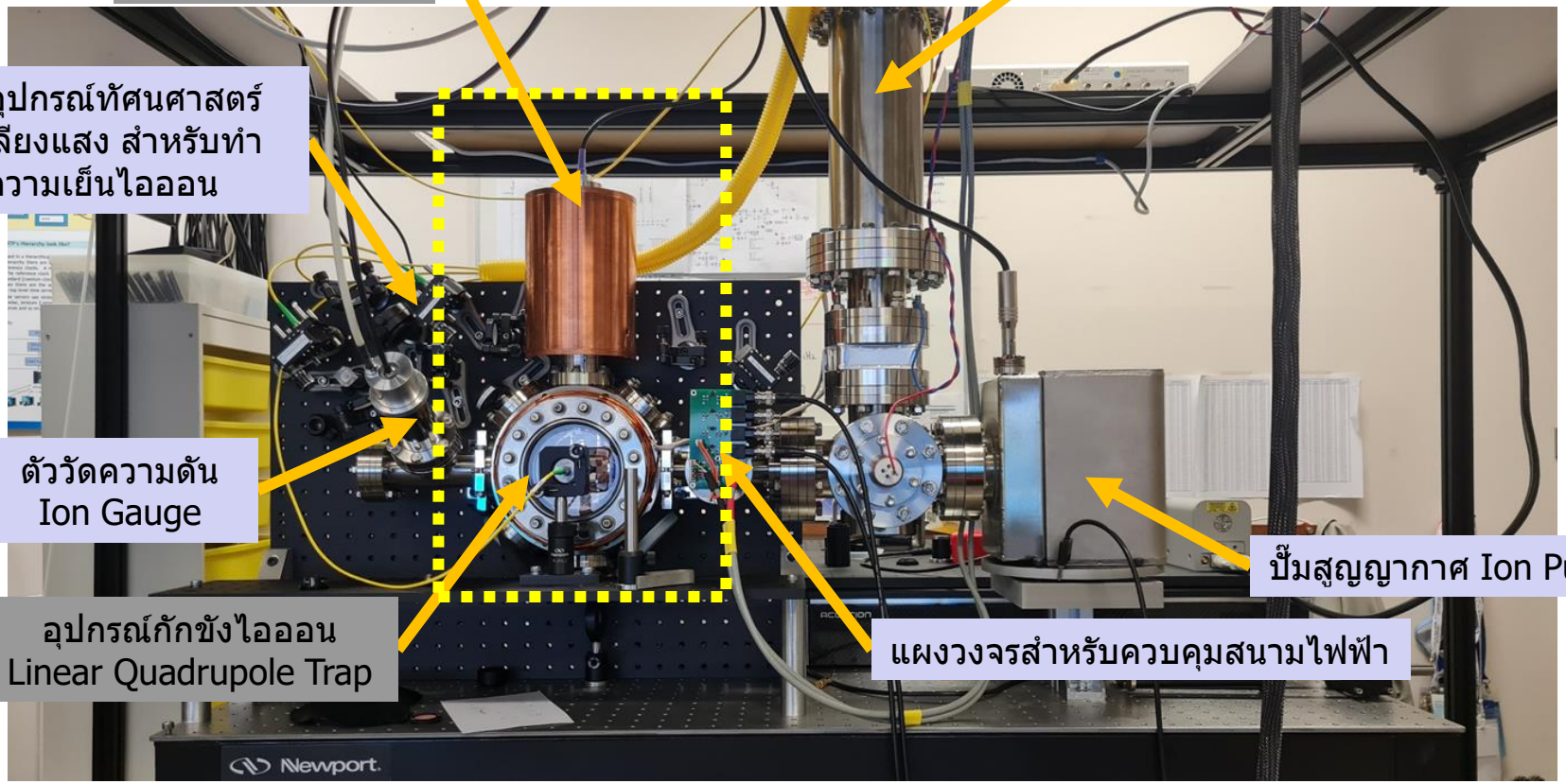
- Dr. Murray Barrett CQT

ปี 2562 – 2565 ร่วมวิจัยและสร้างอุปกรณ์กักขังไอออนของธาตุอิตเทอเบียม (Yb^+) ซึ่งเป็นหัวใจของนาฬิกาอะตอมที่ CQT และ NIMT

- ปี 2562 ร่วมพัฒนาเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบางทองคำบนแผ่นเซรามิคอะลูมินาไนไตรด์ที่ CQT ที่สิงคโปร์แต่ไม่สมบูรณ์
- ปี 2563 พัฒนาชั้นทองแดงบนแผ่นเซรามิค MACOR ด้วยเทคโนโลยีในไทย
- ปี 2564 สร้างชิ้นส่วนเพิ่มเติมเพื่อให้ได้หน่วยกักขังไอออนอิตเทอเบียม
- ปี 2565 ประสบความสำเร็จในการกักขังไอออนเย็นของธาตุอิตเทอเบียม

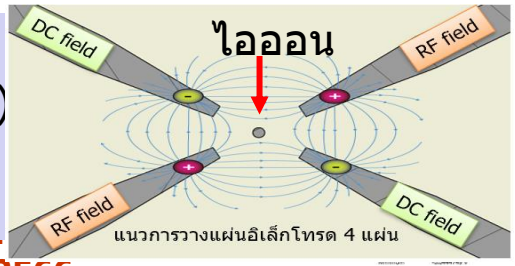
- ปี 2565 - 2566 ทดสอบคุณสมบัติของไอออนอิตเทอเบียมที่กักขังได้
- ปี 2566 - 2568 CQT มีแผนที่จะพัฒนานาฬิกาอะตอมขนาดเล็กเชิงพานิชย์ ซึ่งเป็นโอกาสที่ดีของประเทศไทยที่จะได้ร่วมวิจัยและออกแบบระบบต่างๆ ของนาฬิกาอะตอมขนาดเล็ก
- ปี 2567 - 2568 การเปรียบเทียบความถี่ด้วยระบบดาวเทียมนำทาง GNSS (Global Navigation Satellite System) เพื่อทำการเปรียบเทียบความถี่ของนาฬิกาอะตอมระหว่าง NIMT และ CQT
- นอกจากนี้จะเจรจาขยายความร่วมมือไปยัง NARIT (ไทย) และ NICT (ญี่ปุ่น) เพื่อใช้ระบบ VLBI (very large baseline interferometer) ในการเปรียบเทียบความถี่เพื่อให้แม่นยำมากกว่าระบบ GNSS
- ปี 2568 - 2569 ทำการวัดความถี่ของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงของทั้ง 2 หน่วยงานซึ่งทั้งสองธาตุนี้คาดว่าจะเป็นส่วนหนึ่ง ในการกำหนดมาตรฐานหน่วยวินาทีใหม่ของโลกในอนาคต
- ปี2569 จะเริ่มพิจารณานิยามใหม่ของหน่วยวินาที

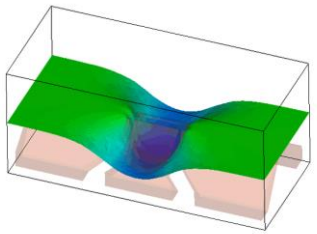
3.ความก้าวหน้าในปี 2565:สร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่กักขังไอออนได้แล้ว(1/4)



ระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงมีอุปกรณ์หลักคือ
- อุปกรณ์ขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ(Helical Resonator)
- อุปกรณ์กักขังไอออน(Linear Quadrupole Trap)

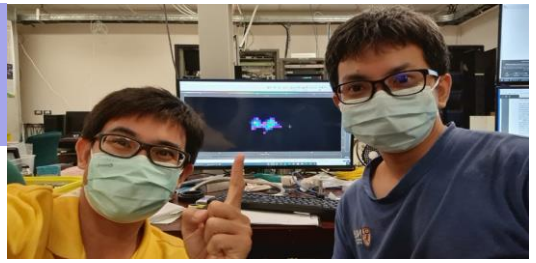
ส่วนหน่วยอื่นทำหน้าที่สนับสนุน





3. ความก้าวหน้าในปี 2565:อุปกรณ์ขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ(Helical Resonator)และอุปกรณ์กักขังไอออน(Linear Quadrupole(2/4)

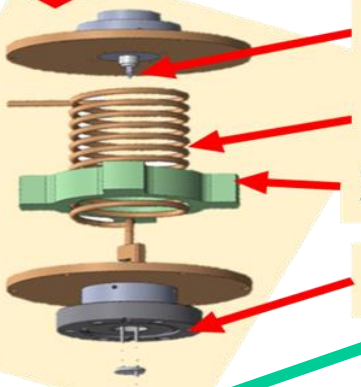
ชิ้นส่วนทั้งหมดนี้ออกแบบและผลิตด้วยเทคโนโลยีในประเทศไทย



1มีนาคม65: ดร.ปิยพัฒน์ พูลทอง และ ดร.รัฐกร แก้วอ่วมแสดงไอออนอิตเทอเบียม 174

อุปกรณ์ขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ(Helical Resonator)

- ลักษณะทรงกระบอก สร้างจากทองแดงบริสุทธิ์ภายมีขดลวด 2 ขด
- ทำหน้าที่รับสัญญาณมาขยายและกรองให้ได้ความถี่ที่ต้องการ

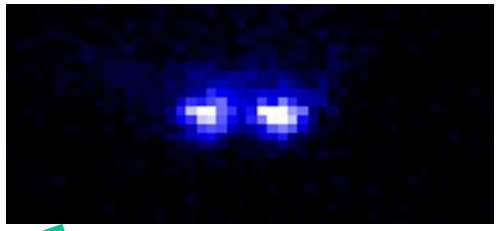


ขดลวดสำหรับส่งสัญญาณความถี่

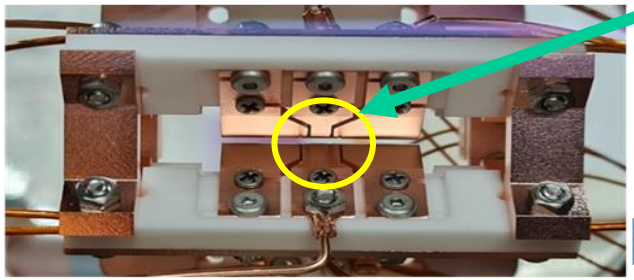
ขดลวดสำหรับรับสัญญาณความถี่

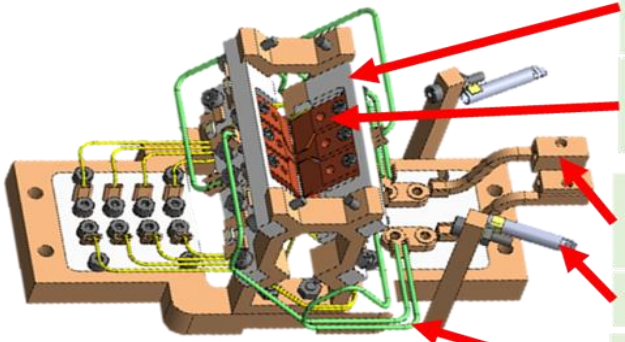
ตัวยึดขดลวดสร้างจากเทฟลอน

ช่องต่อไปยังระบบสูญญากาศ



ตำแหน่งที่กักกันไอออน





แท่นยึดแผ่นอิเล็กโทรดทำจากเซรามิค

แผ่นอิเล็กโทรดทำจากทองแดงบริสุทธิ์

ขั้วรับสัญญาณจาก Helical Resonator

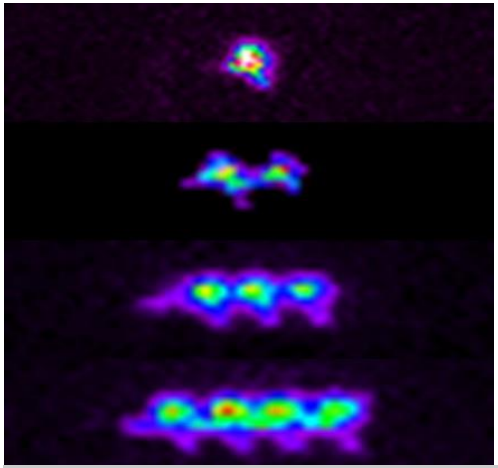
แหล่งจ่ายอะตอมอิตเทอเบียม

สายนำสัญญาณ RF (สีเขียว)
สายสัญญาณ DC (สีเหลือง)

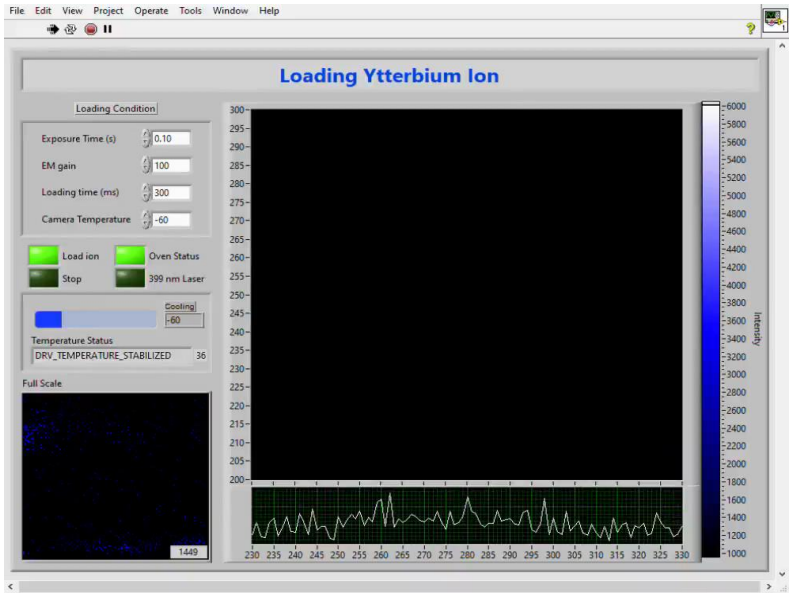
อุปกรณ์กักขังไอออน(Linear Quadrupole Trap)

- ชิ้นส่วนหลักของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่ใช้ไอออน
- ได้รับความร่วมมือจาก CQT(สิงคโปร์)ในการสร้างและยืนยันผลของแบบจำลอง
- ชิ้นส่วนต่างๆสร้างจากบริษัท startup ในประเทศไทย และจากห้องปฏิบัติการโรงงาน (Mechanical workshop) ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

3. ความก้าวหน้าในปี 2565: (i)ระบบโปรแกรมสำหรับการโหลดและกักขังไอออนอัตโนมัติและ (ii)ระบบโปรแกรมการถ่ายภาพไอออน (3/4)



สามารถกักขังไอออนได้ 7 ตัว ยิ่งหลายตัวยิ่งมีความแม่นยำ



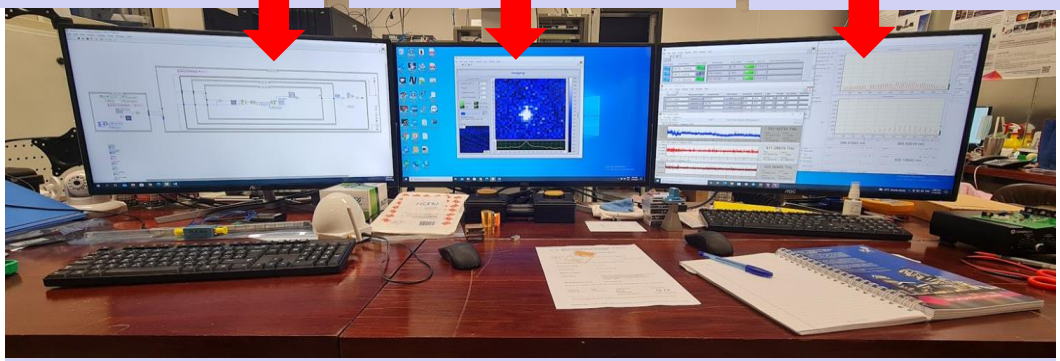
ระบบโปรแกรมสำหรับการโหลดและกักขังไอออนอัตโนมัติ

- การโหลดและกักขังไอออนมีขั้นตอนที่จะต้องเปิดปิดแสงเลเซอร์ และควบคุมการถ่ายภาพตามลำดับ ซึ่งมีความซับซ้อนละเอียดอ่อน
- คณะวิจัยได้เขียนโปรแกรมเพื่อใช้กักขังไอออน โดยตัวโปรแกรมสามารถที่จะควบคุมลำดับการโหลดและกักขังไอออนได้

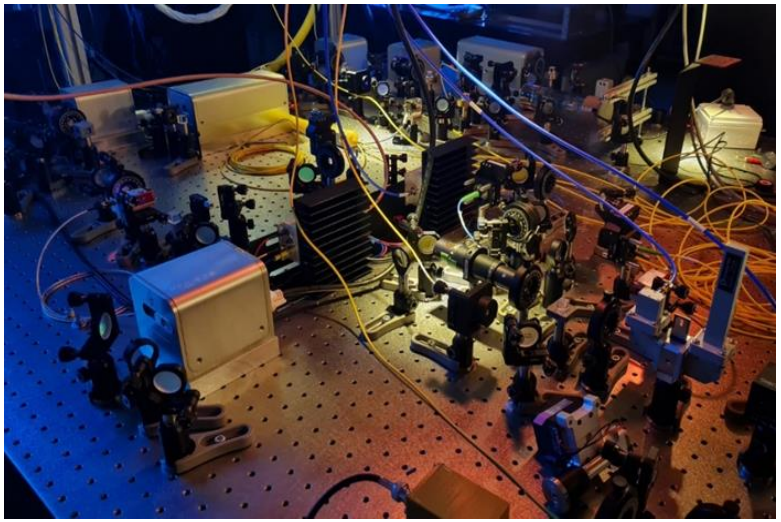
(1)source code ของโปรแกรมควบคุมกล้อง

(2)โปรแกรมควบคุมกล้องสำหรับถ่ายภาพไอออน

(3)จอแสดงความถี่ของเลเซอร์ที่ใช้งาน

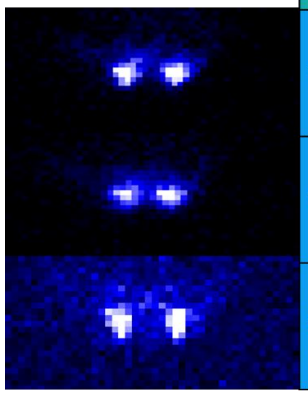


นอกเหนือจากระบบโปรแกรมควบคุมการกักขังและทำความเย็นไอออนแล้วยังมีระบบควบคุมกล้องในการถ่ายภาพไอออน



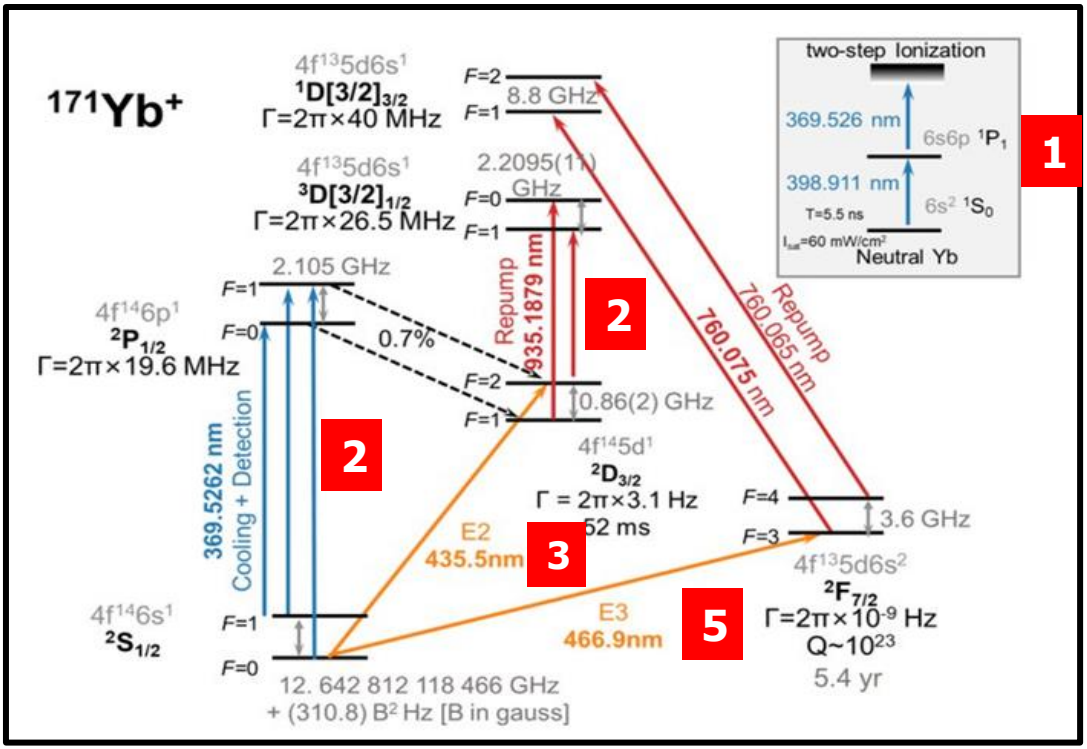
ระบบเลเซอร์ที่ใช้กับนาฬิกาอะตอมเชิงแสง

3.ความก้าวหน้าในปี2565:ความยาวคลื่นของเลเซอร์สำหรับแต่ละไอโซโทปของอิตเทอเบียม(4/4)



Isotope	Cooling Laser (nm)	Exciting Laser (nm)	Repump Laser (nm)
Yb174	369.525 07(1)	398.911 35(1)	935.180 41(5)
Yb172	369.524 49(1)	398.911 04(1)	935.188 04(5)
Yb171	369.526 19(1)	398.910 91(1)	935.188 35(5)

- คณะวิจัยได้ทำการทดสอบโปรแกรมอัตโนมัติโดยการกักขังไอโซโทปต่างๆ ของอิตเทอเบียม
- ทั้งนี้ด้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยในต่างประเทศเพื่อที่จะหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่ใช้ในการกักขัง พบว่าสามารถที่กักขังไอออนของธาตุอิตเทอเบียมที่มีไอโซโทป 174, 172 และ 171 ได้ตามลำดับ



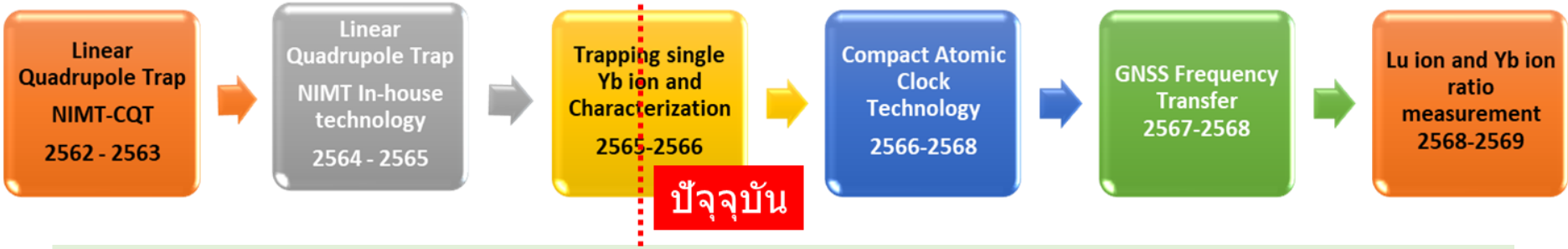
ระดับชั้นพลังงานของไอออนอิตเทอเบียม171

การทำงานของเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

1. **ทำให้อะตอมกลายเป็นไอออน ด้วย** 398.9nm และ 369.5nm
2. **ทำให้ไอออนเย็นและถูกกักขัง** ด้วย 369.5nm และ 935.2nm
3. **สร้างความถี่นาฬิกา(E2 clock transition)** ด้วย 435.5nm กระตุ้นอิเล็กตรอนจาก S ไป D
4. **ตรวจว่าอิเล็กตรอนในชั้น S ไป Dไหมด้วย 369.5nm** ถ้าภาพไอออนสว่าง แสดงว่าไม่โดนกระตุ้น ถ้าภาพมืด แสดงว่าอิเล็กตรอนโดนกระตุ้นไปแล้ว
5. **ส่วน E3 466.9 nm**นั้นจะใช้เป็นนาฬิกาอีกหนึ่งความถีในอนาคต

- ในปี 2566 จะเป็นการทดสอบคุณสมบัติของไอออนและวัดความถี่ของไอออน
- ปัจจุบันไทยใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียยมีความถูกต้องราว10^{-13} – 10^{-14} ใน1วินาที
- นาฬิกาอะตอมอิธเธอเบียมจะเพิ่มความถูกต้องเป็น 10^{-16} – 10^{-18} ใน1วินาที

4. แผนเวลาของโครงการ



สรุปผลการดำเนินงานของโครงการในปี 2565

- การสร้างอุปกรณ์สำหรับกักขังไอออน (Linear Quadrupole Trap) ด้วยเทคโนโลยีที่สามารถทำได้ในประเทศไทย
- การสร้างและติดตั้งระบบเลเซอร์ เพื่อใช้ในการกักขัง และทำความเย็นไอออน
- ประสบความสำเร็จในการกักขังไอออนเย็นของธาตุอิตเทอเบียม 174 เมื่อวันที่ 1 มีนาคม 2565
- การเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการโหลด และกักขังไอออน
- ทำการทดลองกักขังไอโซโทปต่างๆของอิตเทอเบียม

ภาพรวมตั้งแต่2562-69

ปี 2562 – 2565 ร่วมวิจัยและสร้างอุปกรณ์กักขังไอออนของธาตุอิตเทอเบียม (Yb+) ซึ่งเป็นหัวใจของนาฬิกาอะตอมที่ CQT และ NIMT

- ปี 2562 ร่วมพัฒนาเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบางทองคำบนแผ่นเซรามิคอะลูมินาไนไตรด์ที่ CQT ที่สิงคโปร์แต่ไม่สมบูรณ์
- ปี 2563 ไม่สามารถส่งนักศึกษาทุนปริญญาโท(พสวท)ไป CQTได้ เพราะCOVID-19 ต้องเลื่อนไปหลังสถานการณ์ดีขึ้นแล้ว
- ปี 2563 พัฒนาชั้นทองแดงบนแผ่นเซรามิค MACOR ด้วยเทคโนโลยีในไทย
- ปี 2564 สร้างชิ้นส่วนเพิ่มเติมเพื่อให้ได้หน่วยกักขังไอออนอิตเทอเบียม
- ปี 2565 ประสบความสำเร็จในการกักขังไอออนเย็นของธาตุอิตเทอเบียม

- ปี 2565 - 2566 ทดสอบคุณสมบัติของไอออนอิตเทอเบียมที่กักขังได้
- ปี 2566 - 2568 CQT มีแผนที่จะพัฒนานาฬิกาอะตอมขนาดเล็กเชิงพานิชย์ ซึ่งเป็นโอกาสที่ดีของประเทศไทยที่จะได้ร่วมวิจัยและออกแบบระบบต่างๆ ของนาฬิกาอะตอมขนาดเล็ก
- ปี 2567 - 2568 การเปรียบเทียบความถี่ด้วยระบบดาวเทียมนำทาง GNSS (Global Navigation Satellite System) เพื่อทำการเปรียบเทียบความถี่ของนาฬิกาอะตอมระหว่าง NIMT และ CQT
- นอกจากนี้จะเจรจาขยายความร่วมมือไปยัง NARIT (ไทย) และ NICT (ญี่ปุ่น) เพื่อใช้ระบบ VLBI (very large baseline interferometer) ในการเปรียบเทียบความถี่เพื่อให้แม่นยำมากกว่าระบบ GNSS
- ปี 2568 - 2569 ทำการวัดความถี่ของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงของทั้ง 2 หน่วยงานซึ่งทั้งสองธาตุนี้คาดว่าจะเป็นส่วนหนึ่ง ในการกำหนดมาตรฐานหน่วยวินาทีใหม่ของโลกในอนาคต
- ปี2569 จะเริ่มพิจารณานิยามใหม่ของหน่วยวินาที

การปร
สมเด็จ

5.สรุป

1. เมื่อ 20 มกราคม 2562 สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราช ดำเนินไปยังศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม(CQT) มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ ทรงเป็นประธานในการลงนามความร่วมมือด้านการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัมระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติกับมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS)
2. ทั้งสองประเทศจะร่วมกันวิจัยและพัฒนานาฬิกาอะตอมเพื่อใช้เป็นนิยามของหน่วยวินาทีในอนาคตของประเทศไทย รวมทั้งการพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีควอนตัมระยะเวลา 7 ปี(2562-69) งบประมาณฝ่ายไทย 83.38 ล้านบาท อนุมัติแล้ว 5 ปี(62-66)จำนวน 57.53 ล้านบาท
3. สิ่งที่ไทยได้รับคือ (3.1) นาฬิกาที่พัฒนาใหม่นี้จะแม่นยำกว่านาฬิกาซีเซียมของประเทศในปัจจุบันถึง 10,000 เท่า (3.2)ทัดเทียมนานาชาติด้านมาตรฐานการกำหนดนิยามของหน่วยวินาที (3.3)ลดค่าใช้จ่ายจากการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ เช่น อุปกรณ์สำหรับกักขังไอออนที่มีขายในต่างประเทศมีราคาสูงถึงกว่า 300,000 USDเป็นต้น (3.3) นาฬิกาอะตอมเชิงแสงจะเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญให้กับประเทศไทย ในด้านสื่อสาร (5G network) ระบบธุรกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Financial Technology) ระบบโครงข่ายพิกัดหมุดหลักฐานแห่งชาติ เป็นต้น(3.5) สร้างบุคลากรที่มีคุณภาพและศักยภาพระดับนานาชาติ (3.3)บริษัทในประเทศไทยสามารถที่จะสร้างชิ้นส่วน หรืออุปกรณ์เพื่อสนับสนุนเทคโนโลยีควอนตัมได้
4. **ผลกระทบเนื่องจากCOVID-19ทำให้NIMTต้องวิจัยพัฒนาอุปกรณ์กักขังไอออนอิเธอเบียมขึ้นมาเองในประเทศและจะทำการเปรียบเทียบกับของCQTในสิงคโปร์**
5. **ในปี2565 สามารถสร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่กักขังไอออนได้แล้วและทดสอบได้ถึง 7 ไอออน**
6. **สามารถการพัฒนา(i)ระบบโปรแกรมสำหรับการโหลดและกักขังไอออนอัตโนมัติและ(ii)ระบบโปรแกรมการถ่ายภาพไอออน**
7. **พัฒนาระบบเลเซอร์สำหรับ(i)กระตุ้นอะตอมของธาตุ Ytterbium (398.9nm)(ii) เลเซอร์สำหรับทำความเย็นไอออนของธาตุ Ytterbium (369.5nm)และ(iii)เลเซอร์สำหรับ Repump (935.2nm)**
8. **ในปี2566-68มีแผนทำนาฬิกาขนาดเล็กเชิงพาณิชย์และในปี2569สามารถทำนิยามใหม่ของหน่วยวินาที**

ประเด็นเสนอที่ประชุม

เพื่อรับทราบผลการดำเนินงาน ปี 2565
และเห็นชอบแผนการดำเนินงาน ปี 2566

จบ

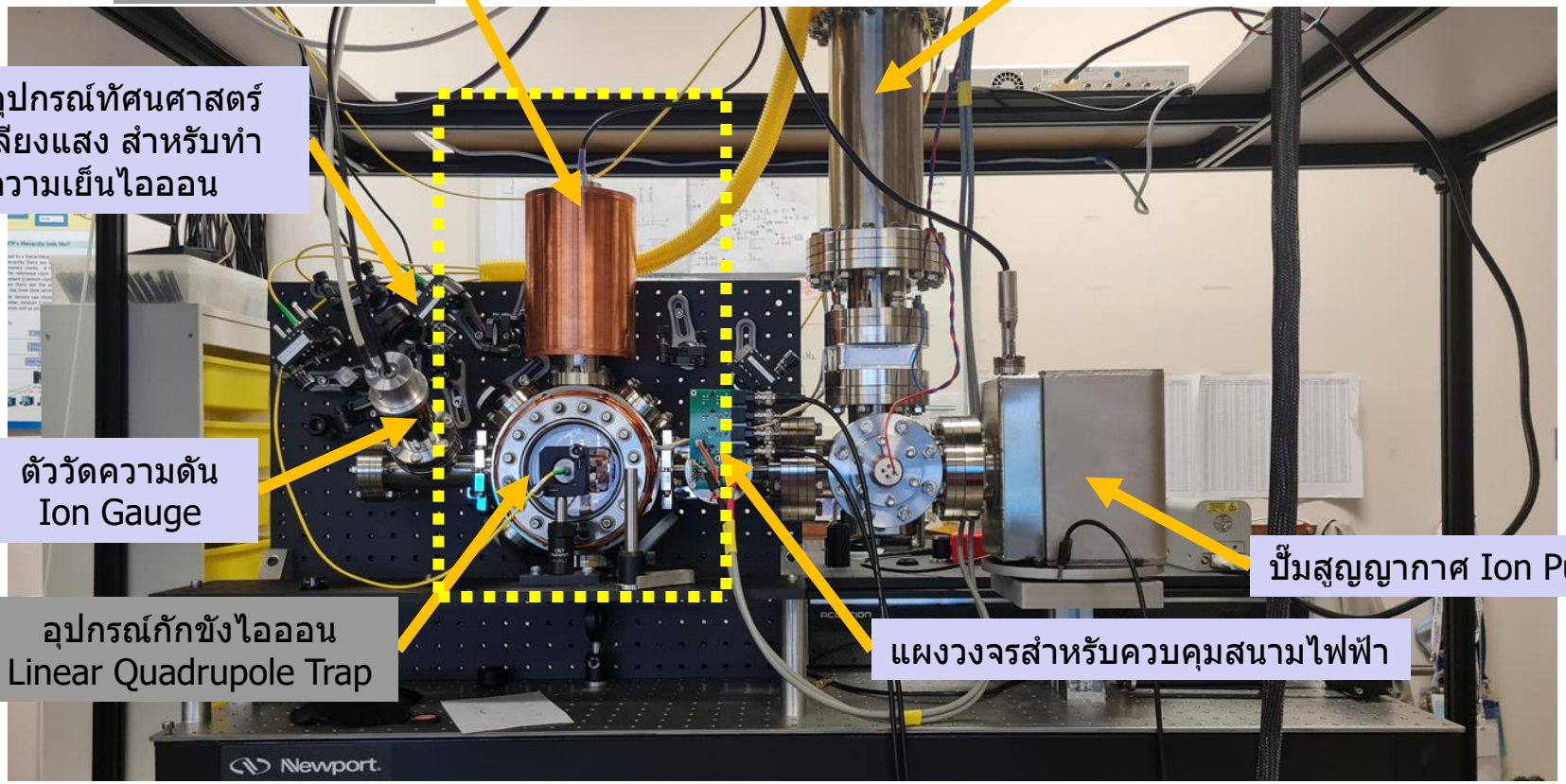
Backup Slides

3.ความก้าวหน้าในปี 2565:สร้างระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่กักขังไอออนได้แล้ว(1/4)

อุปกรณ์ขยาย
สัญญาณคลื่นวิทยุ
Helical Resonator

ปั๊มสูญญากาศ
Titanium Sublimation Pump

ชุดอุปกรณ์ทัศนศาสตร์
ลำเลียงแสง สำหรับทำ
ความเย็นไอออน



ตัววัดความดัน
Ion Gauge

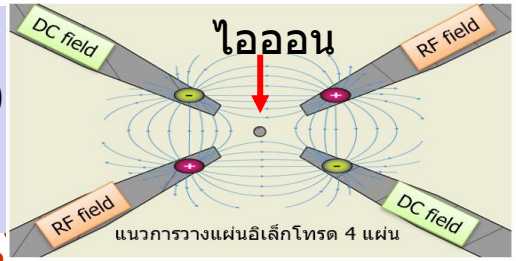
ปั๊มสูญญากาศ Ion Pump

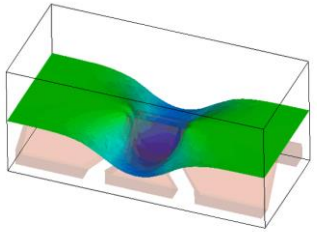
อุปกรณ์กักขังไอออน
Linear Quadrupole Trap

แผงวงจรสำหรับควบคุมสนามไฟฟ้า

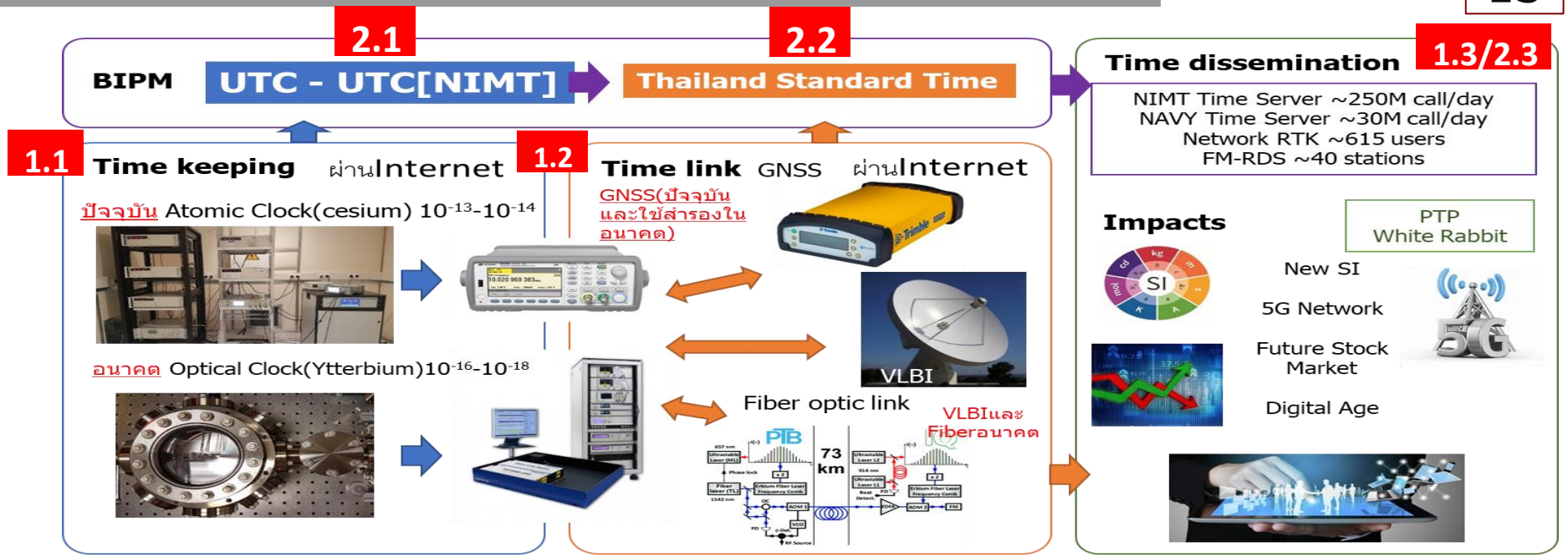
ระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงมีอุปกรณ์หลักคือ
- อุปกรณ์ขยายสัญญาณคลื่นวิทยุ(Helical Resonator)
- อุปกรณ์กักขังไอออน(Linear Quadrupole Trap)

ส่วนหน่วยอื่นทำหน้าที่สนับสนุน





4.กลไกการผลิตระบบเวลามาตรฐานประเทศไทยโดยใช้ Atomic Clock



1. ระบบเวลามาตรฐานประเทศไทยประกอบไปด้วย (1.1)ระบบการรักษาเวลาและความถี่ (Time Keeping) (1.2)ระบบการเปรียบเทียบเวลาและความถี่ (Time Link)และ(1.3)ระบบการถ่ายทอดเวลาและความถี่ (Time Dissemination)
2. ในการทำงานนั้น(2.1) เวลาและความถี่ของ Atomic Clock ไทยและเวลาไทยเทียบกับGNSS ทั้งสองข้อมูลนี้ผ่านinternetไปคำนวณผลต่าง UTC(สากลที่BIMP)-UTC(NIMT)ซึ่งปกติจะต่างราว 100 นาโนวินาที (2.2) นำผลต่างมาแก้ไข Atomic clock ไทยแล้วบวกด้วย7ชมทำให้ได้เวลามาตรฐานไทย(Thailand Standard Time) แล้วจึง(2.3)ส่งผลให้หน่วยงานต่างๆผ่าน Time dissemination ไปใช้ได้
3. ปัจจุบันไทยใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมมีความถูกต้องประมาณ $10^{-13} – 10^{-14}$ ใน1วินาทีและผ่านระบบดาวเทียมนำทาง(GNSS : Global Navigation Satellite System)
4. อนาคตเมื่อนาฬิกาอะตอมอิธเธอเบียมสำเร็จจะเพิ่มความถูกต้องเป็น $10^{-16} – 10^{-18}$ ใน1วินาทีและผ่านVLBIและFiber opticsที่สัญญาณรบกวนต่ำกว่า
5. ปัจจุบันมี(1)การขอปรับเทียบเวลาจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติประมาณวันละกว่า 250 ล้านครั้ง/วัน(2)กรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือประมาณ 30 ล้านครั้ง/วัน(3) ระบบระบุพิกัดด้วยระบบดาวเทียมนำทางซึ่งต้องใช้ค่าชดเชยเวลาเพื่อเพิ่มความแม่นยำมีจำนวนผู้ใช้งานประมาณ 615 ราย และระบบการกระจายเวลามาตรฐานไทยผ่านสถานีวิทยุจำนวน 40 สถานี ซึ่งจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นทุกปีอย่างมีนัยยะสำคัญเพราะการใช้งานระบบการทำธุรกรรมออนไลน์และระบบการสื่อสารต่างๆ เติบโตอย่างก้าวกระโดด

หมายเหตุ: (1)การคำนวณเวลามาตรฐานสากลเชิงพิกัด (Coordinated Universal Time, UTC) ทำณ สำนักงาน ชั่ง ตวง วัด ระหว่างประเทศ (BIPM:Bureau International des Poids et Measures) ประเทศฝรั่งเศส(2)PTP White Rabbit ระบบเวลาสำหรับเครื่องเร่งอนุภาค