๓.๒ โครงการความร่วมมือไทย – KATRIN และ KIT ตามพระราชดำริฯ

(ผู้ถวายรายงาน : นายไพรัช ธัชยพงษ์)

๑. ความเป็นมา

เมื่อวันที่ ๒๘ มิถุนายน ๒๕๖๒ สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินทอดพระเนตร KATRIN Experiment ณ Karlsruhe Institute of Technology (KIT) เมืองคาร์ลสรู สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี

KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino experiment) เป็นการปฏิบัติการทดลองเพื่อวัดมวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน (electron antineutrino) ที่ปลดปล่อยออกมาจากการสลายตัวแบบบีตาของทริเทียมด้วยความแม่นยำที่ระดับต่ำกว่าอิเล็กตรอนโวลต์ (sub-eV) ตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรู (Karlsruhe Institute of Technology) เมืองคาร์ลสรู สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี มีนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร ช่างเทคนิค และนักศึกษามากกว่า ๑๕๐ คน จาก ๑๒ สถาบันใน ๕ ประเทศ ได้แก่ สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี สหราชอาณาจักรรัสเซีย สาธารณรัฐเช็ก สาธารณรัฐฝรั่งเศส และสหรัฐอเมริกา (http://www.katrin.kit.edu/)

อุปกรณ์สำคัญ คือ สเปกโทรมิเตอร์ หนัก ๒๐๐ ตัน ติดตั้งและผ่านการทดสอบจนสมบูรณ์เมื่อปี ๒๐๑๕ การทดลองเริ่มเมื่อปลายปี ๒๐๑๖ และเปิดตัวอย่างเป็นทางการช่วงกลางปี ๒๐๑๘ ด้วยการสลายตัวของทริเทียมเป็นครั้งแรกและมีการวัดผลทางวิทยาศาสตร์ครั้งแรกเมื่อเดือนเมษายน ๒๐๑๙ คาดว่าจะทดลองต่อไปอีก ๕ ปี (อ้างอิงจาก wikipedia)

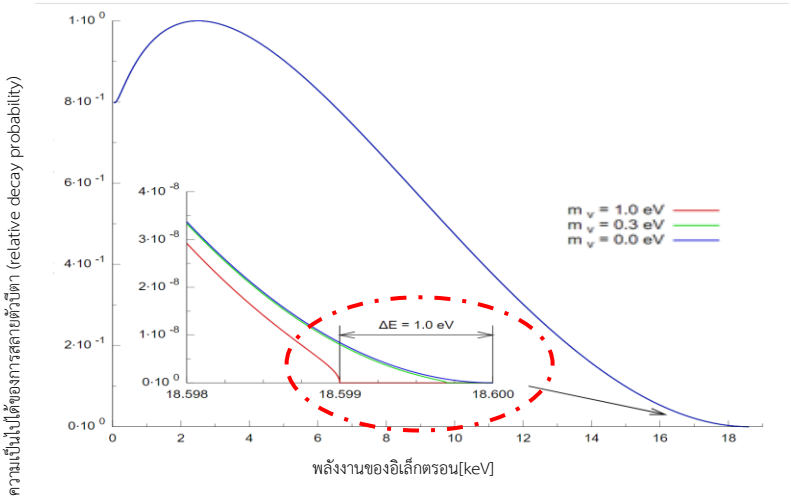
๒. มวลนิวทริโน

นิวทริโนมีมากมายในเอกภพนี้ ที่มีมากกว่าก็เพียงโฟตอนของแสงเท่านั้น หากเรามีแว่นตาวิเศษมองเห็นนิวทริโนได้ เราก็จะเห็นนิวทริโนเหมือนเห็นแสงเต็มไปหมด นิวทริโนจากนอกโลกมาจากดวงอาทิตย์ซูเปอร์โนวา และจากแหล่งอื่นที่ยังไม่ทราบอีก บนโลกเรามาจากโรงไฟฟ้าปรมาณูเป็นสำคัญ เดิมนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่านิวทริโนไร้มวลเหมือนโฟตอน จึงทำให้เราพบนิวทริโนมากมาย นิวทริโนคล้ายแสงเพราะความไร้มวลจึงเคลื่อนเร็วเท่าแสงไปทั่วเอกภพ แต่ในปี ๒๐๑๕ มีผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ที่พบว่า นิวทริโนในขณะเดินทาง เช่น จากดวงอาทิตย์มายังโลกเราเป็นต้นนั้น สามารถเปลี่ยนชนิดไปมาได้ (นิวทริโนมี ๓ ชนิด คือ อิเล็กตรอนนิวทริโน มิวออนนิวทริโน และทาวนิวทริโน) ปรากฏการณ์นี้แสดงว่านิวทริโนมิได้ไร้มวล มวลของนิวทริโนนั้นน้อยมาก ต่ำกว่าอิเล็กตรอนราว ๕๐๐,๐๐๐ เท่า (electron mass 0.511 MeV/c^2) วัดได้ยากและยังไม่ทราบค่าที่แท้จริงการทดลองก่อนหน้านี้ที่ Mainz (เยอรมนี) และ Troitsk (รัสเซีย) พบเพดานของมวลของอิเล็กตอนแอนตินิวทริโนว่าไม่เกิน 2.3 eV/c^2

การทดลอง KATRIN จะใช้วิธีการวัดที่คล้ายกันเพื่อจะค้นหาเพดานมวลที่ต่ำลงไปอีก ๑๐ เท่า กล่าวคือที่ 0.2 eV/c^2 (90% CL) หรือ พบค่าที่แท้จริงหากมวลมากกว่า 0.35 eV/c^2 อุปกรณ์การทดลองที่ KATRIN จึงต้องสร้างให้มีสมรรถนะสูงกว่าอดีตขึ้นไป ๒๐ เท่า จึงจะทำได้การเผยแพร่เมื่อ ๑๓ กันยายน ๒๐๑๙ พบว่า เพดานมวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนอยู่ที่ 1.1 eV/c2

๓. หลักการคิดในการหามวลของนิวทริโน

ทริเทียมสลายตัวได้ ฮีเลียม อิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน พลังงานส่วนใหญ่จากการสลายตัวของทริเทียมรวม 18.6 keV จะอยู่ในรูปพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน (ส่วนฮีเลียมได้รับน้อยมาก) เมื่อเกิดการสลายตัว อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนจะหายตัวไปจากสเปกโทรมิเตอร์ทันที จนเราไม่อาจวัดมวลโดยตรงของมันได้ จึงเหลือแต่อิเล็กตรอนที่เราจะวัดพลังงานแล้วนำไปประเมินมวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน



จากการการสลายตัวจำนวนมากหลาย ๆ ครั้ง นักวิทยาศาสตร์สามารถบันทึกเป็นสถิติของการสลายตัว (แกนตั้ง) และพลังงานของอิเล็กตรอน (แกนนอน) ที่เกิดขึ้นแสดงออกมาได้ดังในรูป เราจะเห็นจากรูปว่า อิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ๆ นั้นมีโอกาสเกิดสูง แต่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงใกล้ค่า 18.6 keV นั้นมีโอกาสเกิดน้อย (ราว ๑ ในล้านล้านของการสลายตัว) และจะเป็นบริเวณที่เราสนใจเป็นพิเศษเพราะว่าเป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนเอาพลังงานไปเกือบหมด จนแทบไม่เหลือให้อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนเลย หากอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนไร้มวลมันก็ไร้พลังงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะได้พลังงานทั้งหมดไปจนถึง 18.6 keV หรือนั่นคือเส้นสเปกตรัมของอิเล็กตรอนจะไปชนแกนนอนที่ 18.6 keV แต่หากมันมีมวล มันก็จะมีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับพลังงานมวลนิ่งของมัน (ตามสูตร $E = mc^2$) ส่งผลให้เส้นสเปกตรัมไปชนแกนนอนที่จุดต่ำกว่า 18.6 keV เช่น ที่ 18.599 keV ต่ำลงไป 1 eVเป็นต้น แสดงว่าอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนมีมวล 1 eV (หรืออีกตัวอย่างหนึ่งคือ 0.3 eV บริเวณตรงนี้นักวิทยาศาสตร์จะทำการวัดหลาย ๆ ครั้งแล้วไปสร้างสถิติหามวลที่แสนจะน้อยนิดของนิวทริโน

อุปกรณ์ของ KATRIN จะมีสเปกโทรมิเตอร์ทำหน้าที่กรอง (ด้วยศักย์ไฟฟ้า) อิเล็กตรอนพลังงานต่ำ ๆ ออกไปให้มากที่สุด เหลือเพียงอิเล็กตรอนจากกรณีพิเศษที่พลังงานสูงพอ (ใกล้ 18.6 keV) เท่านั้นที่จะข้ามศักย์ไฟฟ้านี้ไปถึงหน่วยตรวจวัดได้ นักวิทยาศาสตร์ของ KATRIN จะใช้วิธีทางสถิติให้หน่วยตรวจวัดนับหลาย ๆ ครั้ง (ที่บริเวณใกล้ 18.6 keV) เรียกว่า การรณรงค์เพื่อหาค่ามวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน ผลจากการรณรงค์ครั้งแรก (๑๐ เมษายน - ๑๓ พฤษภาคม ๒๐๑๙) เผยแพร่เมื่อ ๑๓ กันยายน ๒๐๑๙ พบว่า เพดานมวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนอยู่ที่ 1.1 eV

การศึกษาเครื่องตรวจวัดพลังงานของรังสี ๒ ชนิด คือ นิวตรอน และรังสีเอ็กซ์ หรือ รังสีแกมมา เครื่องตรวจวัดชนิดแรก คือ เครื่องตรวจวัดพลังงานนิวตรอนรูปทรงกลมของโบนเนอร์ ซึ่งสามารถตอบสนองต่อนิวตรอนที่มีพลังงานตั้งแต่ 0.001 eV จนถึง 100 GeV ทำให้เครื่องชนิดนี้มีประโยชน์ในงานป้องกันรังสีนิวตรอนที่มาจากเครื่องเร่งอนุภาค ส่วนเครื่องตรวจวัดชนิดที่สอง คือ เครื่องตรวจวัดพลังงานรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาชนิดแคดเมียมเทลูไลด์ ในการศึกษาเครื่องตรวจวัดทั้ง ๒ ชนิดนี้ จะใช้โปรแกรมการจำลองแบบมอนติคาโลที่ชื่อ FLUKA มาใช้ในการจำลองการฉายรังสีและเก็บข้อมูลจากการตอบสนองของเครื่องตรวจวัด ซึ่งโปรแกรมการจำลองนี้จะมีประโยชน์ต่อการใช้ออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจวัด และระบบป้องกันรังสีที่เป็นอันตราย

๔. การทำงานของอุปกรณ์ของ KATRIN

[๑] การสลายตัวของทริเทียมจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนหายตัวไปจากสเปกโทรมิเตอร์อย่างรวดเร็ว ตรวจวัดไม่ได้ อิเล็กตรอนเริ่มเดินทางไปสู่หน่วยตรวจวัด

[๒] อิเล็กตรอนจะเดินทางต่อไปยังสเปกโทรมิเตอร์โดยมีสนามแม่เหล็กนำไป ทริเทียมจะถูกสูบออกไปเพื่อไม่ให้เดินทางเข้าไปในสเปกโทรมิเตอร์

[๓] กำแพงศักย์ไฟฟ้าสถิตจะกรองไม่ให้อิเล็กตรอนพลังงานจลน์ต่ำผ่านไปได้ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงมากพอเท่านั้นจึงจะสามารถผ่านสเปกโทรมิเตอร์ไปยังหน่วยตรวจวัดที่อีกปลายหนึ่งของสเปกโทรมิเตอร์ได้

[๔] อิเล็กตรอนมาถึงปลายทางและถูกนับจำนวนด้วยเครื่องตรวจวัด จำนวนที่นับได้ต่อวินาทีขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้า

สเปกโทรมิเตอร์หนัก ๒๐๐ ตันผลิตที่โรงงานในเมืองเด็กเก็นดอร์ฟ (Deggendorf) ซึ่งห่างจากคาร์ลสรูเพียง ๔๐๐ กิโลเมตร (กม.) แต่ความใหญ่โตทำให้ขนส่งทางถนนไม่ได้ต้องใช้ทางน้ำ เริ่มจากแม่น้ำดานูบไปยังทะเลดำผ่านทะเลเมดิเตอร์เรเนียนออกสู่มหาสมุทรแอตแลนติกเพื่อไปยังท่าเมืองแอนทเวิร์ป จากนั้นจึงไปทางแม่น้ำไรน์ไปยังเมืองคาร์ลสรู การขนส่งอ้อมระยะทางเกือบ ๙,๐๐๐ กม. ทำให้เหลือทางบกช่วงสุดท้ายเพียง ๗ กม. จากอู่เรือลีโอโพลด์ชาเฟ (Leopoldshafen) ไปยังสถานีทดลองที่สถาบันเทคโนโลยรคาร์ลสรู ใช้เวลาทั้งสิ้น ๖๓ วัน

๕. ความร่วมมือวิจัยระหว่างประเทศไทย และKATRIN

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้รวมตัวกันเป็นภาคีไทย-แคทริน (Thai-KATRIN Consortium) ที่จะเข้าร่วมทำงานวิจัยกับ KATRIN เบื้องต้นคาดว่าเป็นการศึกษาและตรวจวัด สนามแม่เหล็ก (เนื่องจากมีความเชี่ยวชาญมาแล้วจาก โครงการภาคีความร่วมมือไทย – จูโน่) ตัวอย่างหัวข้อความร่วมมือ อาทิ

- ศึกษาการจำลองสนามแม่เหล็ก (magnetic field modeling)
- การประเมินค่าสนามแม่เหล็ก (evaluation of B field)
- เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กแบบเคลื่อนที่และแบบอยู่ประจำที่ (mobile/stationary sensors)
- การวิเคราะห์ข้อมูล (data analysis)
- แผนระยะยาวในการเฝ้าติดตามค่าสนามแม่เหล็ก (long term monitoring)

ขณะนี้ยังไม่มีประเด็นด้านการเงินในการเป็นสมาชิก การเข้าร่วมเก็บผลการทดลอง (คิดสัดส่วนตามจำนวนสมาชิกในแต่ละปีจะทำการทดลอง ๓ ครั้ง ๆ ละ ๖๐ วัน) และการเข้าร่วมการประชุมความร่วมมือ (collaboration meeting) ปีละ ๒ ครั้ง (ช่วงฤดูใบไม้ผลิ และ ช่วงฤดูใบไม้ร่วง) ที่ผ่านมามีการประชุมร่วมกัน ๒ ครั้ง ในปี ๒๕๖๒ คือเมื่อเดือนพฤษภาคม และกันยายน ๒๕๖๒ ณ Karlsruhe Institute of Technology (KIT) เมืองคาร์ลสรู สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี

ภาคีไทย-แคทริน รับผิดชอบการวัดและคำนวณค่าสนามแม่เหล็กใน Main Spectrometer (MS) เป็นการรับช่วงต่อจาก Prof. Alexander Osipowicz นักวิจัยที่วิจัยด้านการวัดและคำนวณค่าสนามแม่ เหล็กใน Main Spectrometer (MS) ซึ่งกำลังจะเกษียณอายุ Prof. Alexander Osipowicz ได้สาธิต Mobile sensor unit ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กแบบอัตโนมัติที่สามารถเคลื่อนที่ในแนวเส้นรอบวงตามแนวดิ่งของ MS และในปี ๒๕๖๓ มีแผนจะส่งนักวิจัยและ/หรือนักศึกษาเข้าร่วมศึกษาและเรียนรู้การทดลองในครั้งที่ ๓ ในมีนาคม ๒๕๖๓ พร้อมทั้งศึกษาการทำงานของระบบวัดสนามแม่เหล็กแบบอัตโนมัติของ Mobile sensor unit แต่เนื่องจากสถานการณ์ โควิด-๑๙ จึงจำเป็นต้องเลื่อนออกไป

ด้านการพัฒนากำลังคน KIT มีโปรแกรมบรรยายการประชุมเชิงปฏิบัติการและการฝึกอบรมสำหรับนักศึกษา ป.โท เอก เป็นหลักสูตรระยะสั้น ๒ - ๓ สัปดาห์ รับจำนวน ๒๐ - ๓๐ คนต่อหลักสูตร (ไม่มีทุนให้) โดยทาง KATRIN สามารถแนะนำให้นักศึกษาไทยเข้าร่วมได้ ในแต่ละปีจะมีหัวข้อที่แตกต่างกันไป (https://www.kseta.kit.edu/trainingprogram.php)

สำหรับการฝึกงานวิจัย (internship) ของนักศึกษา ป.โท และ เอก จะให้ติดต่อผ่านอาจารย์ที่เป็นผู้ร่วมวิจัยด้วยกัน

กิจกรรมที่ผ่านมา

ครั้งที่ ๑ : นักวิจัยจากจุฬาฯ (ดร.บุรินทร์ อัศวพิภพ และดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี) และนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยสุรนารี (ดร. ชิโนรัตน์ กอปเดช และ ศาสตราจารย์ ดร.ยูเป็ง แยน (Yupeng Yan) หัวหน้าศูนย์เชี่ยวชาญด้านฟิสิกส์พลังงานสูง มทส.) เดินทางไป KATRIN เมื่อ ๑๗ พฤษภาคม ๒๕๖๒ ณ KIT เพื่อแลกเปลี่ยนร่วมกับ Prof. Ference Glück (ผู้ศึกษาการป้องกันสนามแม่เหล็กโลก) Prof. Guido Drexlin (KATRIN spokesperson & project leader) และ Prof. Markus Steidl (KATRIN deputy project leader)

ครั้งที่ ๒ : ดร.บุรินทร์ ดร.นฤมล และดร.ชิโนรัตน์ เข้าร่วมการประชุม 37th KATRIN Collaboration meeting วันที่ ๔ - ๘ พฤศจิกายน ๒๕๖๒ ณ KIT และได้รับรองจาก Collaboration Board ให้เข้าร่วมเป็นสมาชิกของ KATRIN ในนาม Thai-KATRIN Consortium

๖. การดำเนินงานปี ๒๕๖๓

- นายวีระวัฒน์ ก่อแก้ว นิสิต ป.ตรี สาขาฟิสิกส์ จุฬาฯ เริ่มศึกษาการคำนวณสนามแม่เหล็กจากขดลวดไฟฟ้าเพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการจำลองสนามแม่เหล็กในการทดลอง KATRIN (ปัจจุบันนายวีระวัฒน์ ได้เปลี่ยนการศึกษาไปทำงานด้านควอนตัมแทน)
- ดร.บุรินทร์ ประสานไปยัง Prof. Guido Drexlin เมื่อวันที่ ๗ มกราคม ๒๕๖๔ ซึ่ง Prof. Guido แจ้งว่าให้ติดต่อไปยัง Prof. Markus Steidl เรื่องโครงการความร่วมมือด้าน Magnetic Field Measurements and Simulations KATRIN
- ดร.บุรินทร์ ได้ส่ง E-mail เรื่องโครงการความร่วมมือด้าน Magnetic Field Measurements and Simulations KATRIN ไปยัง Prof. Markus Steidl แล้ว แต่ยังไม่ได้รับการตอบกลับ

๗. สรุป

- การทดลอง KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino experiment) ตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรู (Karlsruhe Institute of Technology) เมืองคาร์ลสรู สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี เริ่มเก็บผลการทดลองทางวิทยาศาสตร์เมื่อเดือนเมษายน ๒๕๖๒ วัตถุประสงค์หลัก เพื่อหาค่ามวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน ที่ได้จากการสลายแบบบีตาของทริเทียม (ไอโซโทปหนึ่งของไฮโดรเจน)
- นิวทริโนเป็นอนุภาคที่มีอยู่มากเป็นอันดับสองในเอกภพรองจากโฟตอน ไม่มีประจุไฟฟ้า มีอยู่ด้วยกัน ๓ ชนิด โดยสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาจากชนิดหนึ่งไปเป็นอีกสองชนิดได้ขึ้นอยู่กับพลังงานและระยะทางที่มันเคลื่อนที่ (เป็นพฤติกรรมที่ไม่ปรากฏในอนุภาคชนิดอื่น) จากพฤติกรรมนี้ทำให้ทราบว่านิวทริโนมีมวลที่น้อยมาก (น้อยกว่ามวลอิเล็กตรอนราว ๕ แสนเท่า) แต่ยังไม่ทราบว่ามีค่าเท่าไรแน่
- การทราบมวลของนิวทริโนจะทำให้เราเข้าใจว่า เหตุใดนิวทริโนจึงมีมวลที่น้อยนิดและมีที่มาอย่างไร นอกจากนี้ยังอาจช่วยไขปริศนาเกี่ยวกับสสารมืดและพลังงานมืดที่เป็นองค์ประกอบหลักของเอกภพด้วยก็ได้
- นักวิจัยจากจุฬาฯ มทส. และ มช. มีความสนใจที่จะเข้าร่วมการทดลอง KATRIN โดยในเบื้องต้นจะร่วมศึกษาเกี่ยวกับการประเมินค่าสนามแม่เหล็กในสเปกโทรมิเตอร์และการป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กโลก (ทั้งสามสถาบันมีประสบการณ์จากการทดลองอื่น เช่น JUNO และ PITZ เป็นต้น)

- นักศึกษาระดับ ป.โท และ เอก สามารถเข้าร่วมรับฟังการบรรยาย การประชุมเชิงปฏิบัติการ และการฝึกงานวิจัยที่ KIT ได้ ซึ่งมีลักษณะเป็นหลักสูตรระยะสั้น ๒ - ๓ สัปดาห์
- สถาบันฟิสิกส์และเทคโนโลยีลำอนุภาค (Institute for Beam Physics and Technology : IBPT) เป็นอีกหน่วยงานหนึ่งในสังกัดสถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรู IBPT บริหารระบบลำอนุภาคและเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์เพื่อให้สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรูเป็นผู้นำด้านเครื่องเร่งอนุภาคและเทคโนโลยีตรวจวัดอนุภาคระบบที่สำคัญมี ๓ ระบบ คือ [๑] KARA (จาก KArlsruhe Research Accelerator) [๒] FLUTE (จาก Far-infrared Linac and(Und) [๓] MCF (จาก Magnet Characterization Facilities)
- คณะนักวิจัยของเนคเทค/สวทช. จะร่วมมือวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีในย่านคลื่นเทราเฮิรตซ์กับ IBPT/ KIT
- เนื่องจากสถานการณ์โควิด-๑๙ ในปี ๒๕๖๓ ทำให้การดำเนินการต่อไม่ได้ ต่อมานักวิจัยไทยสามารถติดต่อกับผู้ประสานงานที่ KATRIN ในเดือนมกราคม ๒๕๖๔ ได้แล้ว

๘.ประเด็นเสนอต่อที่ประชุม

เพื่อรับทราบผลการดำเนินงานปี ๒๕๖๓