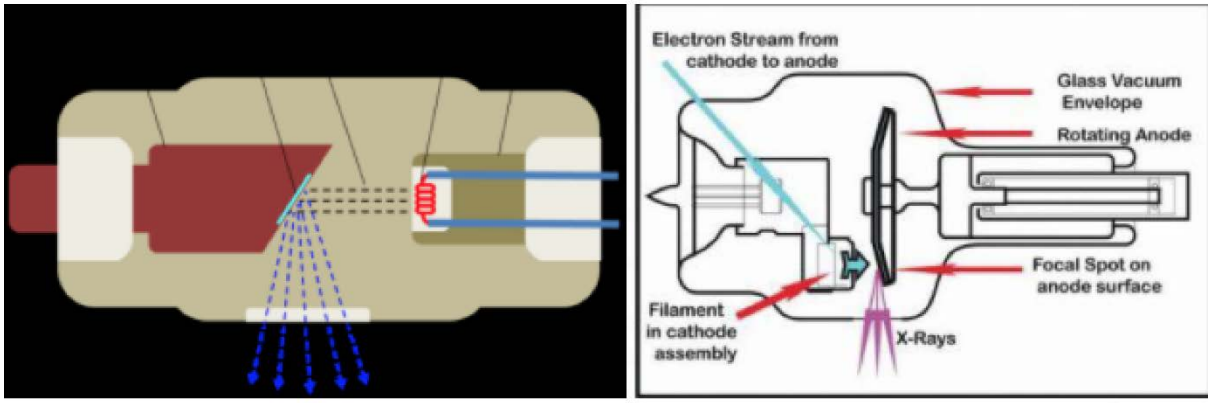
# หลอดรังสีเอกซ์แบบเป้าโลหะเหลว Metal Jet X-ray sources for synchrotron-like performance in the home lab

หลอดรังสีเอกซ์แบบใช้โลหะเหลวหรือโลหะเจทสามารถผลิตรังสีเอกซ์ลำขนาดเล็กที่เล็กกว่าไมโครโฟกัสแบบอื่น มีความเข้มสูงมากจนเหมือนกับยกเครื่องซินโครตรอนมาใช้ในห้องแลป หลอดรังสีเอกซ์ทั่วไปเป็นเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีใช้ทั่วไปในโรงพยาบาล คลินิก ในงานตรวจสอบทางอุตสาหกรรม ตัวหลอดเป็นแก้วสุญญากาศต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ภายในมีขั้วแคโทดสำหรับให้อิเล็กตรอน ด้านตรงข้ามเป็นขั้วแอโนดทำด้วยแท่งโลหะ เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดจะหลุดออกและเคลื่อนที่ไปกระทบเป้าโลหะที่แอโนด ทำให้เกิดรังสีเอกซ์แบบเบรมสตราห์ลุงออกมา เมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบเป้าโลหะจะปลดปล่อยพลังงานออกมา ส่วนหนึ่งเป็นรังสีเอกซ์ที่ออกมาทางช่องหน้าต่างของหลอด อีกส่วนหนึ่งเป็นความร้อนที่แท่งโลหะ การใช้งานจำเป็นต้องระบายความร้อนออกจากแท่งโลหะเพื่อไม่ให้เกิดการหลอมละลาย การแก้ปัญหาจึงมีการใช้เป้าโลหะแบบแท่นหมุนเพื่อกระจายความร้อน แต่หากใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานานอาจต้องหยุดพักเพื่อลดความร้อนของเป้าไม่ให้เกิดความเสียหาย รวมทั้งจำกัดการใช้ความเข้มของอิเล็กตรอนเพื่อผลิตรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงมาก

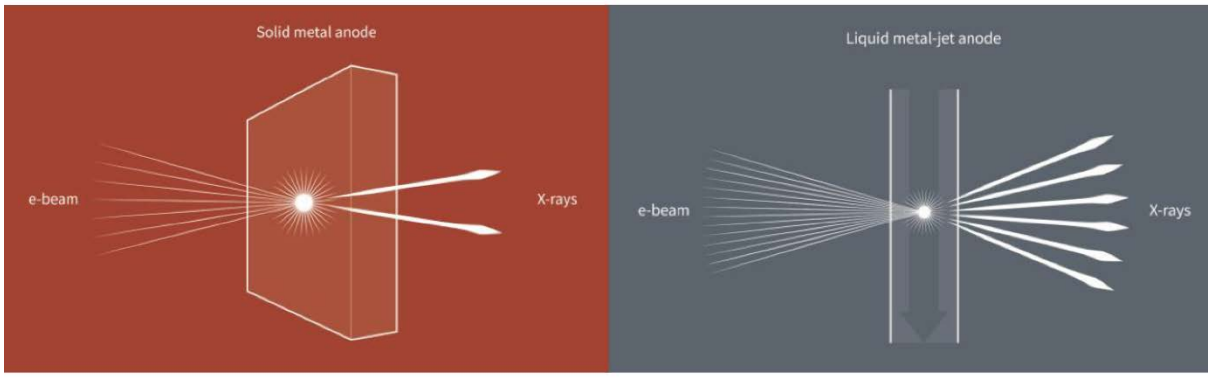



กัญชา (Marijuana, Cannabis indica)

รูปที่ 1 หลอดรังสีเอกซ์แบบ Static anode และแบบ Rotating anode

หลอดรังสีเอกซ์แบบใช้โลหะเจทเป็นการแทนที่ส่วนของโลหะที่ใช้เป็นแอโนดหรือเป้าของอิเล็กตรอนจากเดิมใช้โลหะแข็งเปลี่ยนโลหะเหลวเจท การใช้โลหะเหลวเป็นแอโนดเป็นการแก้ปัญหาการยิงอิเล็กตรอนที่

กำลังสูงหรือเป็นเวลานานจะทำให้แอโนดมีความร้อนสูงจนหลอมละลายได้ เมื่อใช้อิเล็กตรอนที่มีความเข้มสูงขึ้นทำให้สามารถผลิตรังสีเอกซ์ที่ความเข้มสูงขึ้นเช่นกัน




กัญชา (Marijuana, Cannabis indica)

รูปที่ 2 เปรียบเทียบการใช้แอโนดแบบโลหะแข็งกับแอโนดเป็นโลหะเจท

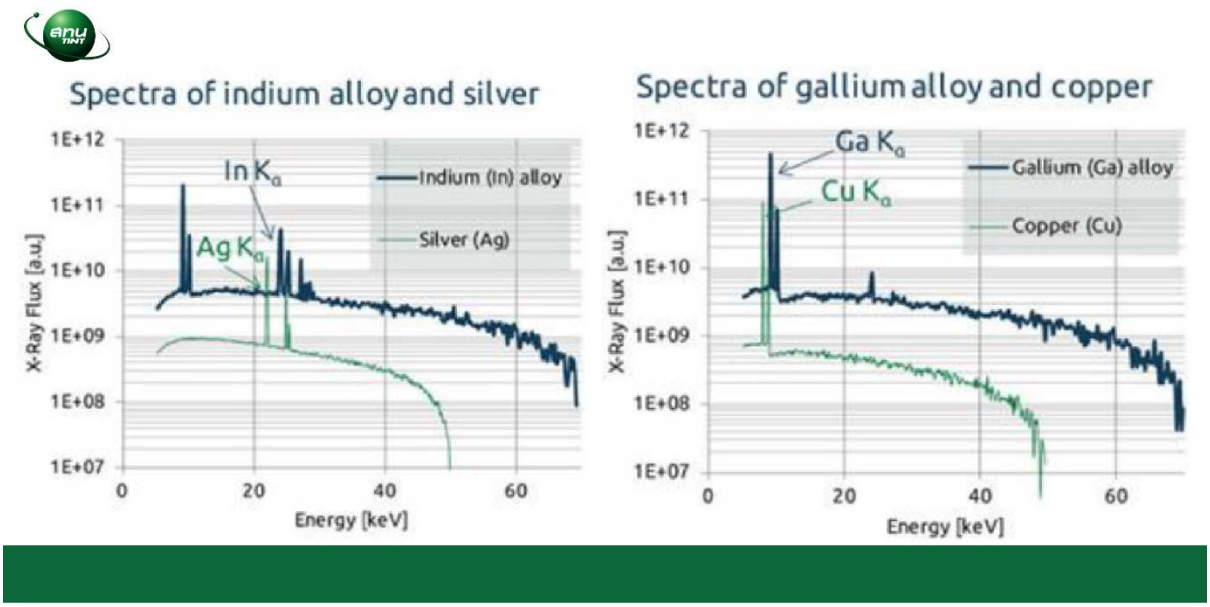
กำลังของหลอดรังสีเอกซ์ในการให้อิเล็กตรอนเพื่อผลิตรังสีเอกซ์ถูกจำกัดจากความร้อนที่สูงของขั้วแอโนด สำหรับขั้วแอโนดหลอดรังสีเอกซ์แบบเดิมต้องรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย ส่วนการใช้แอโนดเป็นโลหะเหลวไม่จำเป็นต้องกังวลเรื่องจุดหลอมเหลว เพราะแอโนดมีสภาพหลอมเหลวอยู่แล้วโดยมีการหมุนเวียนโลหะเหลวด้วยอัตราเร็วเกือบ 100 เมตรต่อวินาที การเพิ่มกำลังให้กับหลอดรังสีเอกซ์จะมีผลกับความกว้างของลำอิเล็กตรอน ดังนั้น เมื่อใช้แอโนดเป็นโลหะเหลวทำให้เพิ่มกำลังได้มากขึ้น และเมื่อโฟกัสลำอิเล็กตรอนให้เล็กลง จะทำให้ได้รังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงมาก

**สเปกตรัมของโลหะเหลว**

In order to reach different X-ray emission lines, different metal alloys are used. First generation metal-jet sources feature metal alloys that are molten at more or less room temperature. Still, several alloys have emission characteristics similar to regular solid anodes. Future upgrades can also include alloys with higher melting points.

โลหะเหลวที่ใช้ทำแอโนดเป็นโลหะอัลลอยด์ที่มีสภาพเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างเช่น อัลลอยด์ของแกลเลียม เป็นโลหะผสมแกลเลียม (Ga) ให้รังสีเอกซ์ Kα พลังงาน 9.2 keV ซึ่งใกล้เคียงกับ Kα ของทองแดง (Cu) ที่พลังงาน 8.0 keV

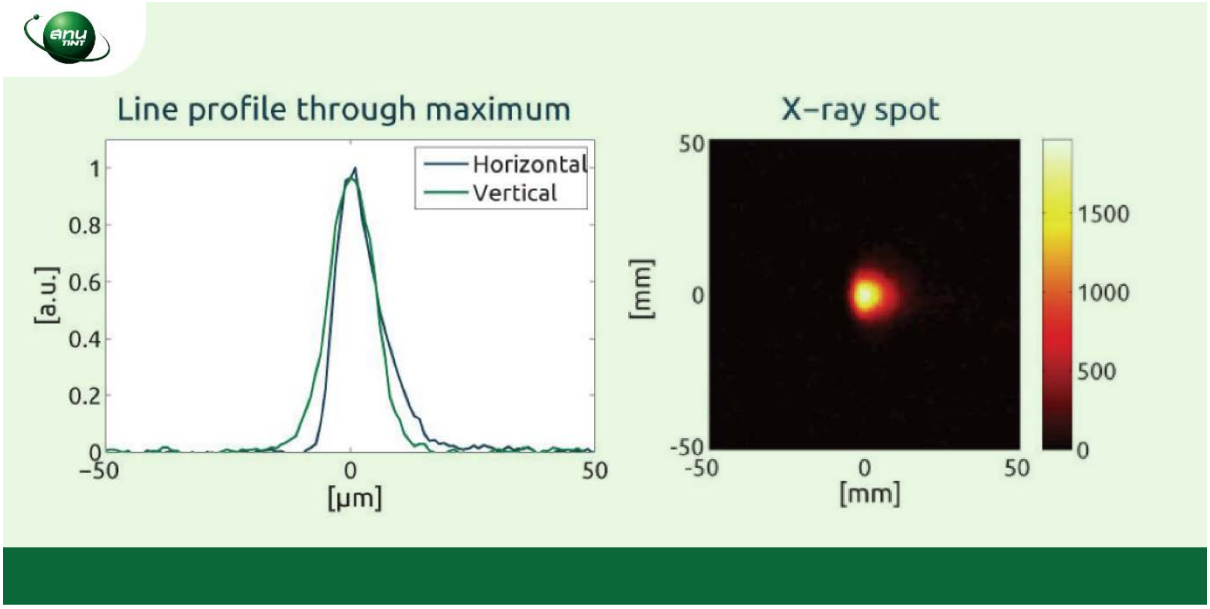
อัลลอยด์ของอินเดียม เป็นโลหะผสมอินเดียม (In) ให้รังสีเอกซ์ Kα พลังงาน 24.2 keV ซึ่งใกล้เคียงกับ Kα ของเงิน (Ag) ที่พลังงาน 22.1 keV




รูปที่ 3 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จากเป้าโลหะเหลวที่ใช้อัลลอยด์แกลเลียมและอินเดียม

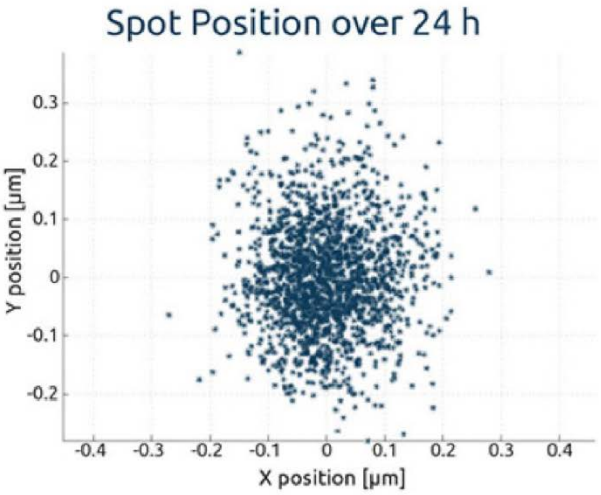
**คุณภาพของลำรังสี**

การพัฒนาของอุปกรณ์โฟกัสรังสีและการใช้แคโทดเป็น $LaB_6$ ซึ่งมีความเข้มสูง การโฟกัสลำอิเล็กตรอนและการไหลของโลหะเหลวที่สม่ำเสมอ ทำให้ได้ลำรังสีเอกซ์ขนาดเล็กที่มีความเข้มสูงและสม่ำเสมอโดยลำรังสีปรับขนาดได้ตามต้องการ สามารถทำให้เป็นจุดเล็กๆ หรือปรับสัดส่วนของลำรังสีก็ได้




รูปที่ 4 การกระจายความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ใช้เป้าเป็นโลหะเหลว

การทดสอบความเสถียรของตำแหน่งรังสีเอกซ์ พบว่า ลำรังสีมีความเสถียรสูง ในรูปแสดงจุดภาพลำรังสีเอกซ์ที่ใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง มีความเบี่ยงมาตรฐานน้อยกว่า 0.1 μm




เทคโนโลยีโลหะเจททำให้ลดเวลาในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์โดยยังได้ภาพที่คมชัด ทำให้ได้ผลทั้งความเที่ยงตรงและมานยำในงานด้านการวิเคราะห์ ทำให้ขนาดลำรังสีของการใช้ไมโครโฟกัสรังสีเอกซ์จากเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 μm ลดลงมาเหลือไม่ถึง 1 μm การใช้แอโนดของหลอดรังสีเอกซ์แบบโลหะเหลวเจทจึงเหนือกว่าการใช้แอโนดเป็นโลหะแข็งแบบเก่า

https://www.excillum.com/products/metaljet/

https://www.nist.gov/system/files/documents/pml/div683/conference/12_espes.pdf