

โครงการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้าง
เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

โดย

วิรุพห์ สายคณิต

ฟอรัมวิทยาศาสตร์ทฤษฎี คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการรายงานถึง ความพยายามของนักวิทยาศาสตร์ไทยในการที่จะนำประเทศเข้าสู่ยุคไฮเทคด้วยการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ โดยมี ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิต เป็นหัวหน้า โครงการซึ่งประกอบด้วยนักวิทยาศาสตร์ไทยจากหลายสาขาและหลายสถาบัน โครงการนี้ใช้เวลาศึกษาเป็นเวลา 9 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2536 ถึง มีนาคม 2537 ในระยะแรกของโครงการเป็นการศึกษาสถานภาพของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนในประเทศภูมิภาคเอเชีย เช่น ประเทศสาธารณรัฐ ประชาชนจีน ประเทศญี่ปุ่น สาธารณรัฐเกาหลี และไต้หวัน ตามลำดับ จากการศึกษาและดูงานรวมทั้งการระดมความคิดจากผู้เชี่ยวชาญสาขาต่างๆทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ สรุปได้ว่าประเทศไทยมีศักยภาพเพียงพอในการที่จะดำเนินการสร้างเครื่องซินโครตรอน

โครงการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่อง กำเนิดแสงซินโครตรอน

โดย

วิรุพท์ สายคณิต

ฟอรัมวิทยาศาสตร์ทฤษฎี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. บทนำ

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอน ถูกเร่งให้มีพลังงานสูงถึงระดับ GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) แล้วบังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลมภายใต้สภาวะสุญญากาศ อนุภาคนี้จะปล่อยรังสีที่เรียกว่า รังสีซินโครตรอน (Synchrotron Radiation) ที่มีความถี่ในช่วง VUV (Vacuum Ultra Violet) ถึง X-rays ในทิศทางที่สัมพันธ์กับแนวทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เนื่องจากรังสีที่อิเล็กตรอนปล่อยออกมาที่มีความถี่อยู่ในช่วงของ VUV ถึง X-rays ดังนั้นจึงมีลักษณะเป็นแสงมากกว่าที่เป็นรังสี เพื่อความถูกต้องเราจะเรียกรังสีซินโครตรอนว่าเป็นแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light Sources) (รูปที่ 1) แสงซินโครตรอนนี้มีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างจากแสงที่เกิดจากอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ทั่ว ๆ ไปที่มีอยู่ในปัจจุบัน คุณสมบัติที่เป็นพิเศษนี้คือ

1. มีความสว่างสูงและความเข้มสูง
2. ลำแสงเป็นลำที่คมและชัด
3. เป็นแสงที่ Polarized แล้ว

และอื่น ๆ อีกมาก (รูปที่ 2) การที่แสงซินโครตรอนมีคุณสมบัติเฉพาะที่เหนือกว่าแสงทุกชนิดที่มีอยู่ในปัจจุบัน จึงได้มีการนำแสงซินโครตรอนประยุกต์กับปัญหาต่าง ๆ ทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกแขนง (รูปที่ 3)

ปัจจุบันมีเพียง 15 ประเทศในโลกเท่านั้นที่มีเครื่องซินโครตรอนไว้ใช้งานทางด้านวิจัยและพัฒนาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยกระจายกันอยู่ตามห้องปฏิบัติการทั่วโลกมากกว่า 41 แห่ง บางแห่งเครื่องซินโครตรอนอยู่ในลักษณะใช้งานมาแล้วหลายปี แต่มีบางเครื่องที่กำลังอยู่ในระหว่างการก่อสร้าง และมีอยู่ไม่น้อยที่กำลังอยู่ในระยะการออกแบบหรือมีเป็นโครงการที่จะสร้างเครื่องซินโครตรอน เช่น ในประเทศไทย เป็นต้น สำหรับในประเทศภูมิภาคเอเซียนั้นมีเพียง 4 ประเทศเท่านั้นที่มีเครื่องซินโครตรอนใช้งานหรือกำลังก่อสร้าง (ตารางที่ 1-4)

ประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศแรกในภูมิภาคเอเซีย ที่ได้สร้างเครื่องซินโครตรอนเครื่องแรกเมื่อประมาณ 30 ปี มาแล้ว ขณะนี้ประเทศญี่ปุ่นมีเครื่องซินโครตรอนมากกว่า 10 เครื่อง และกำลังก่อสร้างอีกหลายเครื่อง รวมทั้งเครื่องที่กำลังสร้างที่ซึ่งจะใหญ่ที่สุดในโลกเป็นเครื่องที่มีพลังงานถึง 8 GeV ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนได้ประสบความสำเร็จในการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคเพียง 4-5 ปีที่ผ่านมาโดยสร้างเป็นเครื่องเร่ง

อนุภาคที่สามารถแบ่งบางส่วนเพื่อใช้เป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ดังนั้นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนชนิดนี้จึงไม่ใช่เครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อการกำเนิดแสงซินโครตรอน

ประเทศเกาหลีเป็นประเทศที่ได้ตัดสินใจสร้างเครื่องซินโครตรอนเมื่อประมาณ 7-8 ปีที่ผ่านมา และตามโครงการจะเสร็จสมบูรณ์ในอีก 2-3 ปีข้างหน้า โดยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีพลังงานถึง 2 GeV ประเทศสุดท้ายในภูมิภาคเอเชียที่มีเครื่องซินโครตรอนก็คือ ประเทศสาธารณรัฐไต้หวัน ใช้เวลาก่อสร้าง 7-8 ปี เครื่องนี้มีพลังงานประมาณ 1.3 GeV และเพิ่งสร้างเสร็จเมื่อปลายปี ค.ศ. 1993 โดยได้ทำพิธีเปิดเป็นทางการเรียบร้อยแล้ว

จะเห็นได้ว่าประเทศที่มีการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระดับสูงเท่านั้นจึงสามารถสร้างเครื่องซินโครตรอน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เครื่องซินโครตรอนเป็นเครื่องที่แสดงถึงศักยภาพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศนั้น การสร้างเครื่องซินโครตรอนนั้นจะต้องอาศัยนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และผู้บริหารที่มีความสามารถทุกระดับ เพื่อที่จะทำให้เครื่องซินโครตรอนสามารถทำงานได้ ผลที่ได้จากการสร้างเครื่องซินโครตรอน นอกจากจะเป็นเครื่องที่มีประโยชน์อย่างมากทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์แล้ว การสร้างเครื่องซินโครตรอนจึงเป็นการยกระดับกำลังนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรด้านเทคนิคในระดับสูง

คณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติได้เล็งเห็นความสำคัญดังกล่าว จึงได้มีการพิจารณาศึกษาความเหมาะสมของประเทศไทยว่า มีศักยภาพเพียงพอที่จะดำเนินการสร้างเครื่องซินโครตรอนเช่นเดียวกับประเทศเกาหลีหรือไต้หวันหรือไม่ จากการพิจารณาที่ประชุมสภาวิจัยแห่งชาติสาขากายภาพและคณิตศาสตร์ ได้มีมติเห็นชอบให้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องซินโครตรอน และได้แต่งตั้งคณะฯ ศึกษาความเป็นไป โดยมี ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิต เป็นหัวหน้าคณะฯ คณะประกอบด้วย นักวิทยาศาสตร์จากหลายหน่วยงานที่มีความชำนาญต่าง ๆ กันดังนี้

- | | | |
|------------------------------|-----------------------|-------------|
| 1. ศ. ดร. วิรุฬห์ สายคณิต | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | เป็นหัวหน้า |
| 2. รศ. จงอร พิรานนท์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | |
| 3. รศ. ดร. อธิพัฒน์ วัลย์ทอง | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ | |
| 4. รศ. ดร. วิชิต ศรีตระกูล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | |
| 5. นาย ขจรศักดิ์ จัยวัฒน์ | สภาวิจัยแห่งชาติ | |

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ที่สุด ที่ประชุมได้มีมติเห็นชอบให้ทำการศึกษาจาก 4 ประเทศในภูมิภาคเอเชียที่มีเครื่องซินโครตรอนแล้วคือ ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ประเทศญี่ปุ่น ประเทศสาธารณรัฐเกาหลี และ ประเทศไต้หวัน การเดินทางได้ใช้เวลาทั้งหมด 17 วัน ตั้งแต่วันที่ 29 สิงหาคม - 14 กันยายน 2536 รายละเอียดของการเดินทางได้เสนอในเอกสารของสภาวิจัยแห่งชาติ รวมทั้งเอกสารและบทความภาษาอังกฤษลงใน AAPS Bulletin Vol. 3, No. 4, 25, December 1993.

2. ประวัติความเป็นมา

ความคิดในการเริ่มต้นเพื่อจะศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องซินโครตรอนขึ้นในประเทศไทยนั้น ได้เริ่มจากเมื่อ ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิต ได้เดินทางไปประชุมทางวิชาการ ณ ประเทศฟิลิปปินส์ ในปี พ.ศ. 2535 การที่ประชุมครั้งนั้น Prof. Dingchang Xian จากสาธารณรัฐประชาชนจีน ได้ให้การบรรยายพิเศษเกี่ยวกับโครงการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อศึกษาอนุภาคมูลฐาน (elementary particle) และผลพลอยได้จากการศึกษานี้ทำให้มีการใช้แสงซินโครตรอนจากเครื่องอนุภาค การบรรยายได้

แสดงถึงศักยภาพและประโยชน์ของแสงซินโครตรอนว่าสามารถประยุกต์เข้ากับทุก ๆ ปัญหาทางฟิสิกส์ เคมี ชีวะ และอุตสาหกรรม

ความจริงประโยชน์ของแสงซินโครตรอนนั้นในต่างประเทศได้ทราบกันมานานพอสมควรแล้วตั้งแต่ปี ค.ศ. 1947 เมื่อนักฟิสิกส์จากบริษัท G.E. ได้ใช้เครื่องเร่งอนุภาคที่มีพลังงานเพียง 70 MeV เพื่อศึกษา อนุภาคมูลฐาน และโดยความบังเอิญที่ขณะที่บังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลมนั้น ได้มีรังสีชนิดหนึ่ง แผ่กระจายออกมาในแนวสัมผัสกับรัศมีของวงโคจรของอิเล็กตรอนโดยที่ลำแสงที่แผ่ออกมานั้นมีความเข้ม สูงและเป็นลำแสงที่คมและชัดมาก หลังจากนั้นเป็นต้นมา ประเทศต่าง ๆ ในอเมริกาและยุโรปรวมทั้งประเทศ ญี่ปุ่นก็ให้เห็นความสำคัญและประโยชน์ของเครื่องซินโครตรอนว่า นอกจากจะนำไปใช้ในการศึกษาอนุภาค มูลฐานแล้ว ยังนำมาประยุกต์เข้ากับปัญหาพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ได้

หลังจากการบรรยายของ Prof. Xian แล้ว ศ. ดร. วิรุฬห์ สายคณิต ก็ได้มีโอกาสพูดคุยและแลกเปลี่ยนความคิดกับ Prof. Xian เกี่ยวกับขั้นตอนในการสร้างเครื่องซินโครตรอน ซึ่ง Prof. Xian ได้แนะนำ ว่า ประเทศไทยน่าจะมีศักยภาพในการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อกำเนิดแสงซินโครตรอนเช่นเดียวกับประเทศ จีน ทั้งนี้ Prof. Xian ได้ให้เหตุผลว่าถึงแม้บุคลากรทางด้านทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศ ไทยคงน้อยอยู่ แต่ทางด้านเศรษฐกิจของประเทศไทยนั้นมีความมั่นคงและขนาดของประเทศชาติแล้วน่าจะ เหมาะสมที่จะเป็นประเทศที่ 5 ในประเทศเอเชียที่จะมีเครื่องซินโครตรอน Prof. Xian ได้ให้ข้อคิดเห็นต่อไป ว่าการสร้างเครื่องซินโครตรอนนั้นมีประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยทางอ้อมนั้นมีมากกว่าทางตรงเสีย อีก เช่น ในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน เมื่อรัฐบาลได้มีมติให้ดำเนินการสร้างเครื่องซินโครตรอนแล้ว ประเทศจีนก็ระดมกำลังของนักวิทยาศาสตร์ที่มีอยู่ภายในประเทศและกำลังอยู่ต่างประเทศให้กลับมาช่วยกัน สร้างเครื่องซินโครตรอน โดยใช้เวลาในการก่อสร้างและเริ่มดำเนินการทั้งหมด 10 ปี ซึ่งก็เกือบจะเท่ากับทุก ๆ ประเทศที่จะต้องใช้เวลาในการดำเนินการตลอดโครงการตั้งแต่เริ่มต้นด้วยความคิดการศึกษาความเป็นไปได้ (feasibility study) การออกแบบ (design) และการก่อสร้าง (construction)

Prof. Xian ได้กล่าวว่า ประเทศจีนนั้นมีความลำบากมากในการสร้างเครื่องซินโครตรอน ทั้งนี้เพราะ ประเทศจีนนั้นได้ถูกประเทศสหรัฐอเมริกาห้ามที่จะนำเครื่องมือประเภท High Technology เช่น Super-computer และอื่น ๆ อีกมาก ดังนั้นประเทศจีนจึงจำเป็นต้องสร้างเองเกือบทุกชิ้นส่วน ผลของการจะต้อง ทำเองนั้นทำให้ประเทศจีนสามารถฝึกนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร ที่มีความชำนาญเป็นจำนวนมาก อุปกรณ์บาง ส่วนของเครื่องซินโครตรอน เช่น ส่วนของ Linac นั้น ประเทศจีนก็ได้ทำให้กับประเทศเกาหลี และโครงการ SSC (Superconductor and Supercolliders) ซึ่งบังเอิญโครงการนั้นได้ถูกยกเลิกไปแล้ว

ความคิดต่าง ๆ ที่ได้จากการแลกเปลี่ยนกับ Prof. Xian ได้ถูกนำมาเสนอในที่ประชุมสภาวิจัยเพื่อ ศึกษาและวิเคราะห์จากการประชุมและวิเคราะห์วิจารณ์หลายครั้ง ในที่สุดที่ประชุมได้เห็นชอบ ในขั้นแรกให้ ศึกษาความเป็นไปได้เสียก่อน ถ้าหากภายหลังการศึกษาแล้วมีแนวโน้มที่จะเป็นไปได้ จึงจะดำเนินการในระยะ ที่สองคือ การทำรายงาน conceptual design report ขณะนี้คณะฯ กำลังดำเนินการที่จะสรุปผลการศึกษา ทั้งหมดให้สภาวิจัยแห่งชาติเพื่อพิจารณาว่าจะดำเนินการต่อไปหรือไม่อย่างไร เอกสารรายงานฉบับสมบูรณ์ที่ เสนอให้กับสภาวิจัยแห่งชาตินั้นคณะฯ ได้รวมข้อคิดเห็นที่ได้จากการเดินทางใน 4 ประเทศและการสัมมนา อย่างเข้มข้น ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 29 มกราคม 2537 ในการสัมมนานั้นทางคณะกรรมการฯ ได้เชิญผู้ที่สนใจ จะเข้าร่วมโครงการเพื่อวางแผนทำ conceptual design report รวมทั้งสิ้น 15 คน โดยแต่ละท่านก็เป็น ผู้เชี่ยวชาญในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องซินโครตรอน

การประชุมเพื่อวางแผนในการทำ conceptual design report นั้นได้จัดขึ้นที่ห้อง 206 ตึกฟิสิกส์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ การประชุมเริ่มต้นด้วย ศาสตราจารย์ ดร. วิรุพห์ สายคณิต บรรยายถึง สถานภาพของโครงการฯ จากนั้นได้มีการฉายวิดีโอเกี่ยวกับพิธีเปิดเครื่องซินโครตรอนของประเทศไต้หวัน รวมทั้งวิดีโอของคณะฯ ที่ได้เดินทางไปดูงานเน้นการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องซินโครตรอนใน ภูมิภาคเอเชีย ในช่วงบ่ายได้มีการบรรยายในหัวข้อต่าง ๆ เช่น Electron Gun, Linac, Injection Magnet and Power Supply, RF, Radiation Safty, Vacuum System, Beam Dynamics and Computer Simulation ที่ประชุมสัมมนาได้ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ที่ประชุมสัมมนาได้สรุปผลการสัมมนาให้โดย เสนอแนะว่าควรดำเนินการในระยะต่อไปคือ การทำแผน conceptual design report กำหนดการประชุม

3. เครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน

ในบทนำเราได้สมมติว่า เริ่มต้นอนุภาคอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงแหวน (Storage Ring) นั้นถูกเร่งให้มี พลังงานถึงระดับ GeV แล้วโดยพร้อมที่ปล่อยแสงซินโครตรอน (รูปที่ 4) แต่ทว่าก่อนที่อิเล็กตรอนจะมี พลังงานมากถึงเพียงนี้เพื่อที่จะคายแสงซินโครตรอนนั้น อิเล็กตรอนจะต้องถูกเร่งด้วยพลังงานตั้งแต่ศูนย์เสีย ก่อน ส่วนแรกของเครื่องเร่งอนุภาคคือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งเครื่องนี้จะยิงกลุ่มของอิเล็กตรอน ให้มีพลังงานสูงถึงระดับ MeV โดยต้องอาศัยความต่างศักย์สูง (High Voltage) (รูปที่ 5ก) ในอดีตก่อน ที่จะมีการพัฒนาปืนอิเล็กตรอนที่ก้าวหน้าขึ้น เขามักจะใช้เครื่องเร่งที่สามารถสร้างความต่างศักย์สูง เช่น เครื่องของ Cockcroft-Walton (รูปที่ 5ข) เป็นต้น และต่อมาก็ได้พัฒนาเป็นเครื่อง Van der Graff (รูปที่ 5ค) ทั้งสอง เครื่องนี้ไม่เหมาะที่จะใช้งานในปัจจุบัน ทั้งนี้เพราะเครื่องทั้งสองจะต้องถูกทำให้มีความต่างศักย์ ที่สูงมาก เพื่อเร่งอิเล็กตรอนในขั้นแรกให้มีพลังงานขึ้นถึงระดับ MeV นอกจากนี้ถ้าเพิ่มความต่างศักย์มาก เกินไป เครื่อง Van der Graff จะมีปัญหาเรื่องของการ Spark จึงทำให้เราไม่สามารถสร้างความต่างศักย์ ให้สูงกว่านี้ ดังนั้นปัจจุบันเครื่องเร่งในปัจจุบันจึงหันมาใช้ Electron Gun กันมากยิ่งขึ้น

ปืนอิเล็กตรอนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึงระดับ GeV ดังนั้นจึง จำเป็นจะต้องเร่งอิเล็กตรอนต่อไป วิธีการที่จะเร่งอิเล็กตรอนนั้นอาจแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีแรก การเร่งอิเล็กตรอนให้อยู่ในแนวเส้นตรง จนอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงถึง GeV การเร่งสามารถกระทำได้โดยเพิ่ม พลังงานจากเครื่องกำเนิด Microwave ที่เรียกว่า Kryston ซึ่งสามารถกำเนิดสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางไปตาม ท่อที่เป็นสูญญากาศ โดยเร่งลำอิเล็กตรอนตลอดระยะทางเป็นเส้นตรง เครื่องเร่งอิเล็กตรอนในส่วนนี้เรียกว่า Linac ซึ่งมีหลายประเทศในภูมิภาคเอเชียใช้อยู่ เช่น สาธารณรัฐประชาชนจีน สาธารณรัฐเกาหลี และประเทศ ญี่ปุ่น (รูปที่ 6ก) ความยาวของส่วนท่อที่เป็นเส้นตรงเพื่อนำอิเล็กตรอนนั้นขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอน ตอนสุดท้ายนี้ พลังงานสุดท้ายนอกจากขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นท่อส่งแล้วยังขึ้นอยู่กับพลังงานของเครื่อง Kryston

อีกวิธีหนึ่ง คือ แทนที่จะเร่งอนุภาคให้เป็นเส้นตรงก็บังคับให้อิเล็กตรอนหล่นออกจากปืนอิเล็กตรอน แล้ววิ่งเป็นวงกลม ดังนั้นวิธีนี้จะต้องใช้สนามแม่เหล็กที่สามารถปรับความเข้มได้เพื่อที่จะเร่งอิเล็กตรอนให้วิ่ง เป็นวงกลมจนมีพลังงานสูงถึงระดับ GeV เครื่องเร่งชนิดนี้เรียกว่า แบบ Booster (รูปที่ 6ข) เครื่องเร่ง ส่วนนี้มีหลายประเทศที่ใช้ เช่น ในประเทศภูมิภาคเอเชียมีใช้ในกับประเทศญี่ปุ่นและไต้หวัน

ไม่ว่าเราจะเร่งอิเล็กตรอนโดยใช้แบบ Linac หรือแบบ Booster จุดประสงค์เหมือนกันคือ ต้องเร่ง ให้อนุภาคมีพลังงานสูงสุดแล้วจึงยิงเข้าไปเก็บไว้ในวงแหวนที่เรียกว่า Storage Ring วงแหวนนี้ทำหน้าที่ เก็บลำของอิเล็กตรอนให้วิ่งวนในวงแหวนตลอดเวลา เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงถึงระดับ GeV แล้ว

ตามทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell Electromagnetism) อนุภาคใดที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วจะคายแสงที่มีความถี่ไปทิศทางต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคประจุ สำหรับอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงถึงระดับ GeV อนุภาคจะคายรังสีซินโครตรอนที่มีความเข้มสูง ถ้าแสงแคบคมชัดมีทิศทางของ polarization ด้วย (รูปที่ 2) และสัมพันธ์กับวงโคจรของอิเล็กตรอน คุณสมบัติอันนี้จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถเจาะช่วงต่าง ๆ ของ Storage Ring เพื่อดึงเอาแสงซินโครตรอนออกมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ ทั้งทางด้านการวิจัยและประยุกต์

การเก็บลำอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยพลังงานระดับ GeV นั้นเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อน เมื่ออิเล็กตรอนถูกยิงมาจาก Linac หรือ Booster อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมหรือวงโคจรที่ครบรอบในเส้นทางที่ถูกกำหนดไว้ด้วยสนามแม่เหล็กหลายชุด โดยแต่ละชุดอาจมีแม่เหล็ก 3 ตัว 3 ชุด เช่น แม่เหล็กตัวแรกเรียกว่าแม่เหล็ก 2 ขั้ว (Dipole Magnetic) มีหน้าที่เบี่ยงเบนทางเดินของอิเล็กตรอนให้โค้งเป็นวงกลม แม่เหล็กตัวที่สองเรียกว่า แม่เหล็ก 4 ขั้ว (Quadrupole) ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนให้อยู่กันเป็นกระจุกและไม่กระจายออกไป และแม่เหล็กตัวสุดท้ายเป็นแม่เหล็ก 6 ขั้ว เรียกว่า Sextupole (รูปที่ 7) ทำหน้าที่ปรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแม่เหล็กทั้ง 2 ตัว นอกจากนี้ยังมีแม่เหล็กอื่น ๆ ทั้งปรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นส่วนปลีกย่อย เมื่ออิเล็กตรอนถูกแม่เหล็กชุดดังกล่าวซึ่งเป็นชุดแรกกระทำ อิเล็กตรอนก็จะเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ถ้าต้องการให้อิเล็กตรอนวิ่งครบวงจร เราจะต้องสร้างชุดของสนามแม่เหล็กดังกล่าวหลาย ๆสิบชุด ขึ้นอยู่กับว่าพลังงานของอิเล็กตรอนนั้นมีมากน้อยเพียงใด การเลี้ยงตัวของแม่เหล็กก็ต้องอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของเครื่องซินโครตรอนที่จะสร้าง ถึงแม้ว่าเราจะวางชุดของแม่เหล็กเหล่านี้ครบรอบก็ตาม เรายังขาดสิ่งที่สำคัญ คือ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยพลังงานระดับ GeV อิเล็กตรอนนี้ก็คายแสงซินโครตรอนซึ่งก็คือ การคายพลังงานออกจากตัวอิเล็กตรอนนั่นเอง ดังนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ช้าลง เพื่อให้อิเล็กตรอนกลับมา มีพลังงานเท่ากับพลังงานเริ่มต้น เราจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอน ดังนั้นในส่วนของ Storage Ring เรามักจะพบช่องหนึ่งช่องใดที่เราจะต้องแทรกตัวให้พลังงานเรียกว่า Resonance Cavity ซึ่งเป็นอุปกรณ์ของ Microwave เพื่อเติมพลังงานให้กับอิเล็กตรอนทุกครั้งที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ อุปกรณ์นี้จะต้องมีไว้เพื่อเสริมพลังงานของอิเล็กตรอนเสมอ ด้วยเหตุนี้เราจึงเรียกอนุภาคที่ถูกเสริมนี้ว่า Synchrotron ในทาง ทฤษฎี อนุภาค Synchrotron นี้จะเคลื่อนที่อยู่ในวงแหวน เป็นระยะเวลาไม่มีจำกัด แต่ในทางปฏิบัติแล้ว อนุภาคนี้จะมีอายุได้เพียง 8-10 ชั่วโมงเท่านั้น แม้ว่าเราจะไม่เติมพลังงานจาก Microwave เข้าไปอีก ทั้งนี้เพราะว่าใน Storage Ring และส่วนของ Linac หรือภายในท่อที่นำอิเล็กตรอนจะเป็นสุญญากาศ 10^{-10} Tor แต่ก็มิอะตอมในอากาศมากพอที่จะทำอิเล็กตรอนเกิดการกระเจิง (Scattering) การกระเจิงนี้จะทำให้อายุของอิเล็กตรอนในวงแหวนมีอายุเพียง 8-16 ชั่วโมง

4. เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนชนิดต่าง ๆ

เครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนที่กล่าวมาแล้วเป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่มีส่วนประกอบแบบทั่ว ๆ ไป กล่าวคือ เป็นเครื่องเร่งอนุภาคสร้างขึ้นเพื่อใช้งานเฉพาะในการเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงในการศึกษาอนุภาคมูลฐาน (Elementary Particles) ภายหลังจึงนำเพียงบางส่วนของเครื่องเพื่อให้เกิดแสงซินโครตรอน ดังนั้นเราจึงเรียกเครื่องชนิดนี้ว่าเป็นรุ่นแรก (First Generation SR) (ตารางที่ 1) เครื่องรุ่นแรกนี้มีปัญหา มากทั้งนี้ นักฟิสิกส์ที่ต้องการแสงซินโครตรอนนั้นกับนักฟิสิกส์ที่ต้องการศึกษาอนุภาคมูลฐานขัดแย้งกันนัก-ฟิสิกส์อนุภาคมูลฐานต้องการลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากเพื่อไปชนเป้าที่ต้องการศึกษา ส่วนนัก-

วิทยาศาสตร์ที่ต้องการแสงซินโครตรอนนั้นต้องการแสงซินโครตรอนจากอิเล็กตรอนให้มากที่สุดที่จะทำได้ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนา

ด้วยเหตุนี้นักวิทยาศาสตร์จึงได้พยายามสร้างเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนรุ่นใหม่ โดยเฉพาะเครื่องซินโครตรอนรุ่นที่จะทำงานวิจัยทางด้านการนำแสงซินโครตรอนมาใช้งานอย่างเดียว เรามักจะเรียกเครื่องซินโครตรอนรุ่นนี้ว่า รุ่นที่ 2 (Second Generation SR) เครื่องนี้มีใช้งานอยู่ในหลายประเทศ เช่น ที่ประเทศญี่ปุ่น สาธารณรัฐประชาชนจีน ฯลฯ

ดังได้กล่าวแล้วว่าแสงที่ถูกปล่อยออกจากอิเล็กตรอนจะมีความถี่ตั้งแต่ UVU ถึง X-rays ถ้าเราต้องการขยายความกว้างของขอบเขตของแสงซินโครตรอนขึ้น เช่น เพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนถึง 6-8 GeV แสงที่มีพลังงานสูงสุดจะเป็นแสง X-rays พลังงานสูงหรือ Hard X-rays จากการศึกษาพบว่าการศึกษาที่อาศัยแสงซินโครตรอนนั้น 80% ไปอยู่ในช่วงของ UVU มากกว่าช่วง X-rays ดังนั้นแทนที่จะเป็นพลังงานซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง เช่น การเพิ่มพลังงานจะเป็น 2 เท่า แต่ค่าใช้จ่ายนั้นจะเป็น 10 เท่า ด้วยเหตุนี้ความตั้งใจของนักฟิสิกส์ ในปัจจุบันจึงมุ่งที่จะเพิ่มความเข้มและความสว่างมากกว่า

แสงซินโครตรอนที่กำเนิดจากวงแหวนเกิดจากการเบี่ยงเบนของลำอิเล็กตรอน เนื่องจากสนามแม่เหล็กเราจึงเรียกแสงนี้ว่า มาจาก Bending Magnet (รูปที่ 8ก) อุปกรณ์ที่สามารถเพิ่มความเข้มและความสว่างคือ อุปกรณ์แทรกเสริม (Insertion Devices, ID) (ดูรูปที่ 9) อุปกรณ์นี้จะแทรกเสริมเข้าไปในระหว่างแม่เหล็กชุดต่าง ๆ ที่อยู่ในวงแหวน อุปกรณ์นี้มี 2 ชนิด ชนิดแรก เรียกว่า Wiggler ซึ่งมีหน้าที่เพิ่มความเข้มของแสงซินโครตรอนเป็น 10-100 เท่า หลักการของ Wiggler ก็คือ เมื่ออิเล็กตรอนส่วนที่อยู่ในวงแหวนผ่านอุปกรณ์ Wiggler ซึ่งประกอบด้วย แม่เหล็กชิ้นเล็ก ๆ เป็นจำนวนมากเกี่ยวกับในลักษณะที่สลับขั้วกันเป็นคาบ ผลของการใช้แม่เหล็กเสริมทำให้อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ด้วยพลังงาน GeV แล้ว เคลื่อนที่เป็นลูกคลื่น การเคลื่อนเป็นลูกคลื่นก็คือ การเสริมความเร่งให้กับอิเล็กตรอนเป็นช่วง ๆ นั่นเอง ยังผลให้อิเล็กตรอนคายคลื่นแสงซินโครตรอนเพิ่มเติมจากที่เดิมมีอยู่แล้ว อุปกรณ์ Wiggler จึงเป็นการเสริมความเข้มและความสว่าง (รูปที่ 8ข) นอกจากนี้ถ้าต้องการความเข้มของแสงซินโครตรอนให้มีคมและมีทิศทางของ Polarize แล้ว และ Coherence ก็สามารถเพิ่ม อุปกรณ์ที่สลับขั้วซ้อนมากกว่านี้เรียกว่า Undulator (ดูรูปที่ 8ค) Undulator นี้จะช่วยเสริมความคมและเป็นลำที่เสริมมากกว่า Wiggler เมื่ออุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้แทรกเข้าไปในวงแหวนในส่วนหนึ่งส่วนใดของวงแหวนก็เป็นการยกระดับของเครื่องซินโครตรอน เราเรียกเครื่องซินโครตรอนชนิดนี้ว่า รุ่นที่ 3 (Third Generation SR) ประเทศที่ก้าวหน้าไปสู่รุ่นที่ 3 คือ ประเทศญี่ปุ่น ไต้หวัน สาธารณรัฐเกาหลี และในยุโรป

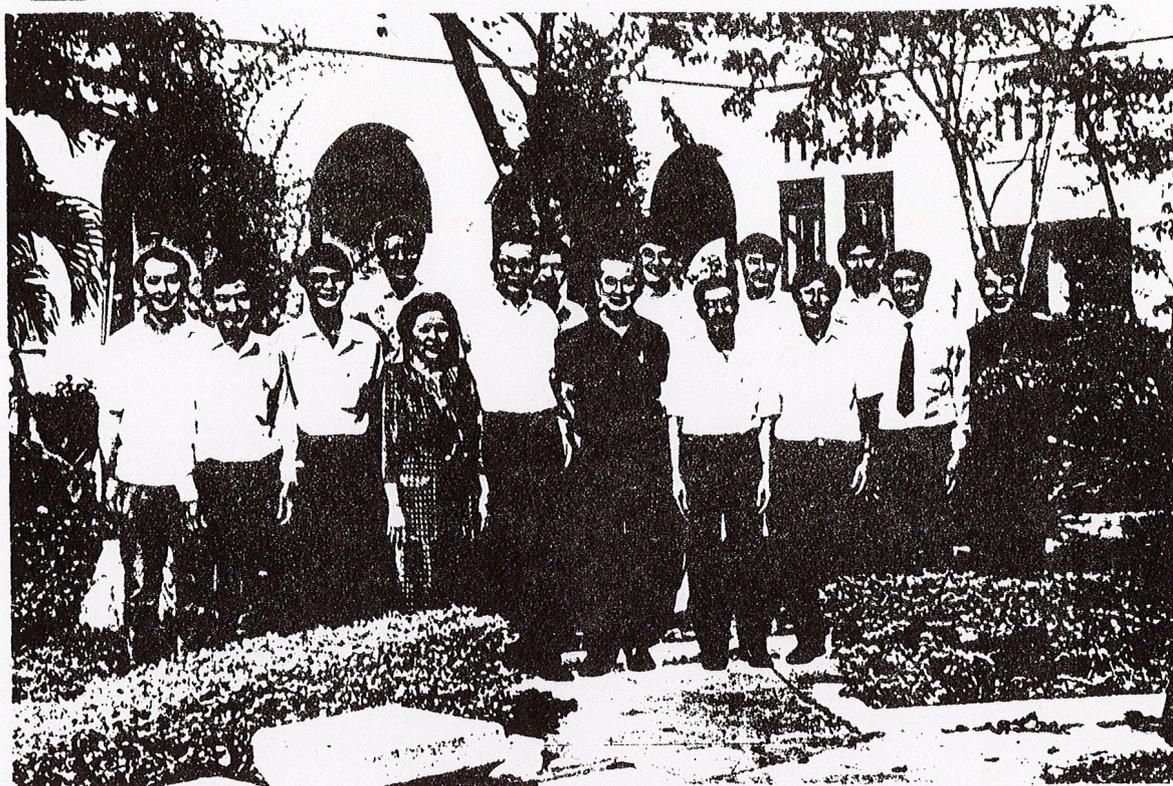
ถ้าหากต้องการลำแสงที่ออกมาเป็นแสงเลเซอร์แล้ว เครื่องซินโครตรอนก็สามารถทำได้โดยใช้หลักการที่แทรก Undulator เข้าไปจะทำให้ลำแสงที่ออกมาเป็นแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูงเป็นหมื่นเท่าของเครื่อง Laser ที่มีอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้แสงเลเซอร์ที่เกิดจากเครื่องซินโครตรอนยังมีความถี่ที่ปรับได้แสงเลเซอร์ที่กำเนิดมาจากอนุภาคซินโครตรอนเรียกว่า Free Electron Laser (FEL) เครื่องซินโครตรอนที่มีอุปกรณ์เสริมเพื่อกำเนิด FEL เราเรียกว่า Fourth Generation ปัจจุบันมีเพียงไม่กี่ประเทศเท่านั้นที่สามารถผลิต FEL เพื่อใช้งาน การวิจัยทางด้าน FEL กำลังดำเนินไปอย่างไม่หยุดและกำลังเป็นหัวข้อที่สำคัญอันหนึ่งในวงการผู้ใช้แสงซินโครตรอนในการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (รูปที่ 10) แสดงถึงวิวัฒนาการของความเข้มของแสงเนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในอดีต ปัจจุบัน และอนาคต

5. ประโยชน์และการใช้งาน

อนุภาคอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ภายในวงแหวนจะคายลำแสงซินโครตรอนตลอดเวลาในทิศทางที่สัมผัสทางโคจรของอิเล็กตรอน (ดูรูปที่ 4) การใช้ประโยชน์จึงสามารถทำได้โดยเจาะช่องต่าง ๆ จากใน Storage Ring เพื่อดึงแสงที่มีความถี่ตั้งแต่ UVU ถึง X-rays เนื่องจากแสงซินโครตรอนมีความเข้มสูง และเป็นแสงที่ Polarized แล้ว แสงซินโครตรอนที่มีความถี่ในช่วง UVU จะมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อวงการแพทย์ การทำโครงสร้างทางเคมี เนื่องจากแสงซินโครตรอนมีความเข้มสูง การทดลองต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างผลึกหรืออะตอมหรือโมเลกุลสามารถใช้เวลาเพียงเป็นหมื่นเท่า เช่น ได้มีการการศึกษาโครงการของ Haemoglobin โดย Prof. Perentz ซึ่งใช้เวลาถึง 14 ปี แต่ในปัจจุบันถ้าใช้แสงจากเครื่องซินโครตรอน จะเหลือเพียงไม่กี่ชั่วโมง รูปที่ 11 และ 12 แสดงการใช้แสงซินโครตรอนในการแพทย์และสารกึ่งตัวนำ

ต่อไปเป็นตัวอย่างที่แสงซินโครตรอนประสบความสำเร็จมาแล้วในการประยุกต์กับปัญหาต่าง ๆ

1. การวิจัยสมบัติของโลหะโดยใช้แสง X-Ray กระเจิงแบบ Compton Scattering
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของสสารชนิดต่าง ๆ
3. ศึกษาขบวนการปฏิกิริยาทางเคมีของผลึก
4. ศึกษาพื้นผิวของสสารและรอยต่อของสสารด้วยการปลูกผลึก
5. ศึกษาโครงสร้างของกล้ามเนื้อ
6. ศึกษาโครงสร้างของสสารในระดับกลางโดยใช้การกระเจิงของมูมน้อย ๆ
7. ศึกษาสมบัติของสสารภายใต้ความดันสูงและอุณหภูมิสูง
8. ศึกษาระดับพลังงานของอะตอมโมเลกุลและไอออน
9. ศึกษาสถานะโหนดของนิวเคลียสโดยแสงซินโครตรอน
10. ศึกษาขบวนการปฏิกิริยาของก๊าซโดย Photochemical
11. ศึกษาสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของผลึก
12. ศึกษาการดูดของก๊าซบนผิวสสาร
13. ศึกษาการตีบของเส้นเลือดในหัวใจโดยแสงซินโครตรอน
14. พัฒนากล้องจุลทรรศน์ X-Ray เพื่อศึกษาตัวอย่างในชีววิทยา
15. ศึกษากลไกของการเจริญเติบโตของการปลูกผลึกในสาร

6. สรุป

รูปที่ 14 การประชุมระดมความคิดของนักวิทยาศาสตร์ไทยที่สนใจจะ
เข้าร่วมการจัดทำโครงการสร้างเครื่องซินโครตรอนในระยะที่ 2

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน เป็นอุปกรณ์ต้นกำเนิดชนิดเดียวที่มีขอบเขตการใช้งานที่กว้างขวาง ครอบคลุมตั้งแต่ด้านการแพทย์ วิทยาศาสตร์ และ วิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งจะมีผลต่อการวิจัย และการพัฒนาทาง ด้านชีววิทยา พลังงานและเทคโนโลยีสารสนเทศ ซึ่งจัดว่าเป็นเทคโนโลยีแขนงสำคัญของอนาคต นอกจากนี้ การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นกำเนิดดังกล่าวต้องอาศัยเทคโนโลยีหลากหลาย ซึ่งเป็นเทคโนโลยีพื้นฐาน ของอุตสาหกรรมใหม่ ปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวชี้บ่งถึงความเป็นไปได้ที่ประเทศใดประเทศหนึ่งจะสามารถออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ก็คือพื้นฐานและกำลังคนทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ในระยะเริ่มต้นและโอกาสที่จะถ่ายทอดและดูดซึมเทคโนโลยีจากต่างประเทศ พิจารณาจากปัจจัยหลักดังที่ กล่าวมานี้ จะเห็นว่าโครงการสร้างเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีความเป็นไปได้เป็นอย่างสูงที่จะประสบผล สำหรับประเทศไทยสมควรจัดไว้เป็นส่วนหนึ่งของแผนงานหลักการพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยี

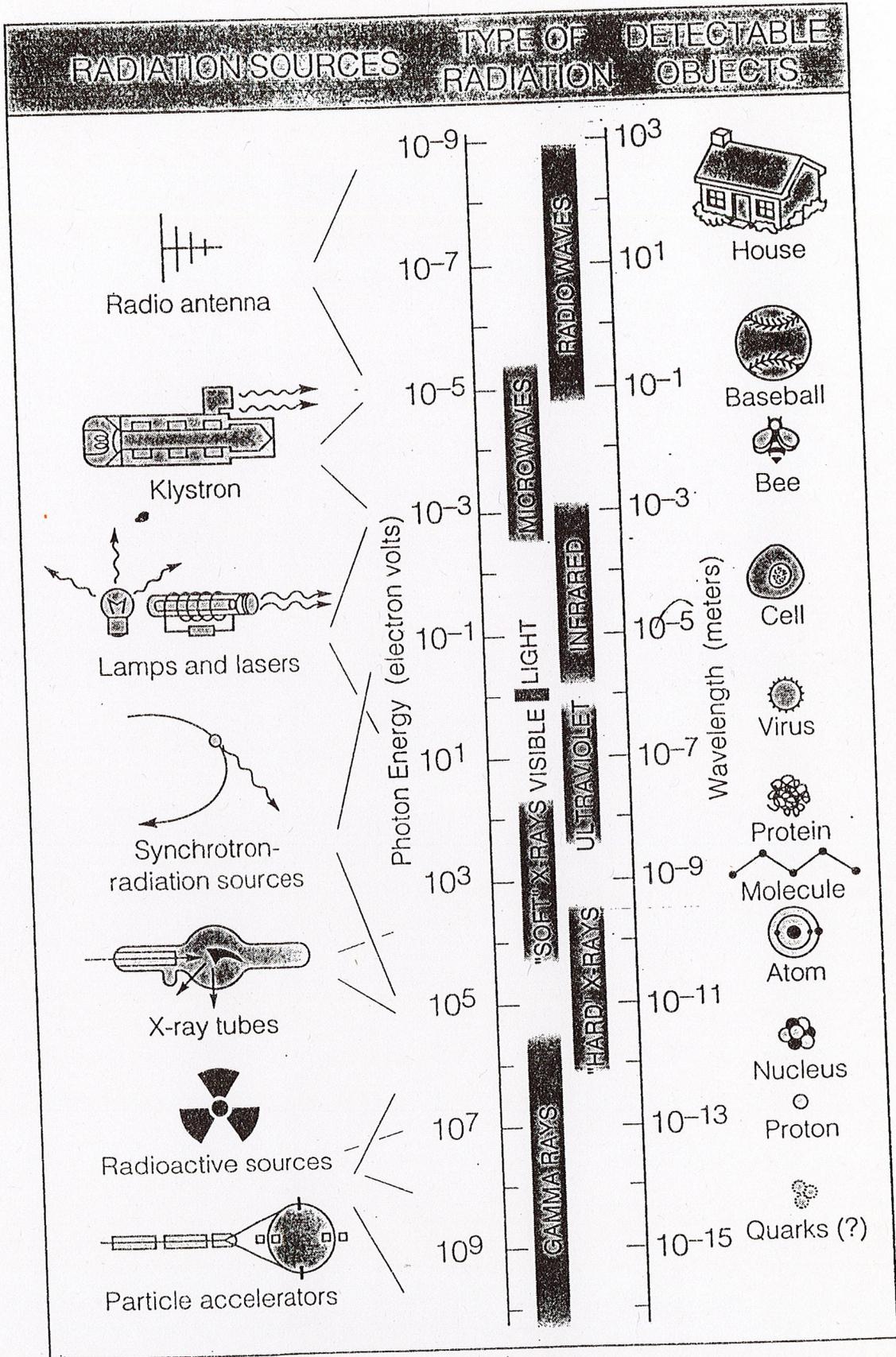
จากการประชุมกลุ่มที่เป็นผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทำให้ได้ข้อสรุปที่สำคัญคือ

- 1) เห็นควรให้ดำเนินการต่อไปในการทำ conceptual design report โดยให้สภาวิจัยแห่งชาติ สาขากายภาพและคณิตศาสตร์เป็นผู้ดำเนินการ โดยเสนอโครงการผ่านเข้ากองทุน วิทยาศาสตร์หรือโครงการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของ สภาวิจัยแห่งชาติ
- 2) เครื่องซินโครตรอนที่จะสร้างควรมีพลังงานอยู่ระหว่าง 1-1.2 GeV (ประเทศสาธารณรัฐ ประชาชนจีน 2.3 GeV, ประเทศญี่ปุ่น 3 GeV, ประเทศเกาหลี 2 GeV และประเทศ ไต้หวัน 1.3 GeV)

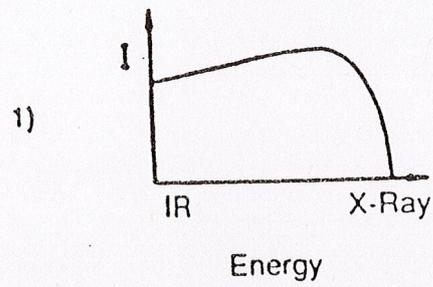
- 3) รูปแบบของเครื่องซินโครตรอนควรเป็นแบบ Linac (จีน ญี่ปุ่น และเกาหลีใต้ เป็นแบบ Linac ส่วนไต้หวันเป็นแบบ Booster) แบบ Linac มีประโยชน์ในกรณีที่ต้องใช้ส่วนของทำการกำเนิด Free Electron Laser
- 4) สถานที่อาจจะเป็นไปได้หลายแบบ เช่น ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ นครนายก
- 5) ควรติดตามความก้าวหน้าของเครื่องซินโครตรอนของอเมริกาและยุโรป เพื่อเปรียบเทียบกับของเอเชีย จากการเปรียบเทียบโดยการดูงานจะช่วยให้เราสามารถเลือกนำเอาสิ่งที่ดีและเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนในอนาคตข้างหน้า ซึ่งลักษณะนี้ประเทศอื่น ๆ ในภูมิภาคเอเชีย เช่น ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ญี่ปุ่น ต่างก็ได้สร้างนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจำนวนหนึ่ง เดินทางไปดูงานทางอเมริกาและยุโรปก่อนที่จะทำโครงการ Conceptual design report

7. เอกสารอ้างอิง

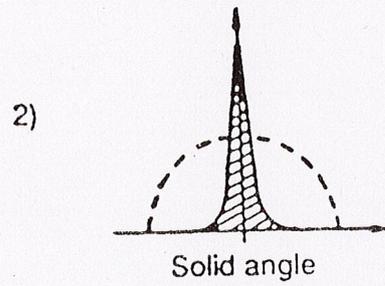
1. Chuang, Zhang., "China's Accelerators : Past and Next Decades." AAPPS Bulletin, Vol. I, No. I, June 1991. P. 47-49.
2. Institute of High Energy Physics, Annual Report 1988, June 1989. PP. 82, Beijing, China.
3. JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team, SPring-8 Project : Part I, Facility Design 1991. (Revised), August 1991. PP. 326; Part II, Facility Design (Supplement 1992), Japan.
4. National Laboratory for High Energy Physics, Photon Factory, MONBUSHO, 1988. PP. 79, Japan.
5. Pohang Accelerator Laboratory, "Pohang Light Source : Design Report" January 1992, P.R. Korea.
6. Pohang Light Source : Annual Report 1991, Pohang Institute of Science and Technology, Republic Korea
7. Brochure of Synchrotron Radiation Research Center, No. 1, R&D Road, Science-Based Industrial Park, Hsinchu, Taiwan R.O.C.
8. Institute for Nuclear Study, The University of Tokyo, User's Guild, 1993. PP. 30, Tokyo, Japan.
9. Beijing Electron Positron Collider National Laboratory, BSRF Activity Report 1991. PP. 193, Beijing, China.
10. Beijing Electron Positron Collider National Laboratory, BSRF Activity Report 1992. PP. 193, Beijing, China.
11. Institute of High Energy Physics Academia Sinica, The Beijing Electron-Positron Collider, 1993. PP. 38, China.
12. SORTEC Corporation, SORTEC, Tsukuba Research Laboratory, Japan.
13. Pohang Accelerator Laboratory, PLS Newsletter, Nov. 1992, No. 1.
14. Pohang Accelerator Laboratory, PLS Newsletter, Nov. 1992, No. 2.
15. Virulh Sa-yakanit, Feasible Study of the Construction of Synchrotron Radiation Facility in Thailand, AAPPS Bulletin, Vol.3, No4, Dec 1993, p. 25-26.
16. Virulh Sa-yakanit, Thai Project on Synchrotron Radiation, SYNCHROTRON RADIATION FACILITIES IN ASIA, May 1994, Tokyo, Japan.



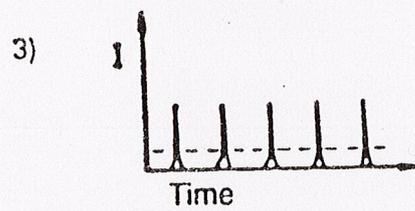
รูปที่ 1 แสดงสเปกตรัมของแสงในช่วงความถี่และพลังงานต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าการที่จะเห็นวัตถุได้นั้น ความยาวช่วงคลื่นของแสงและวัตถุควรมีขนาดใกล้เคียงกัน



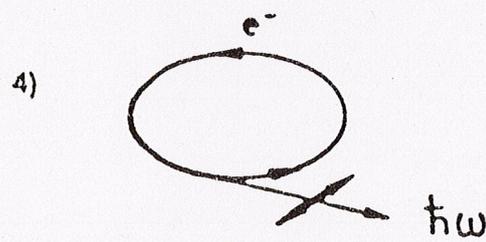
Continuous spectrum



Emission in small solid angle



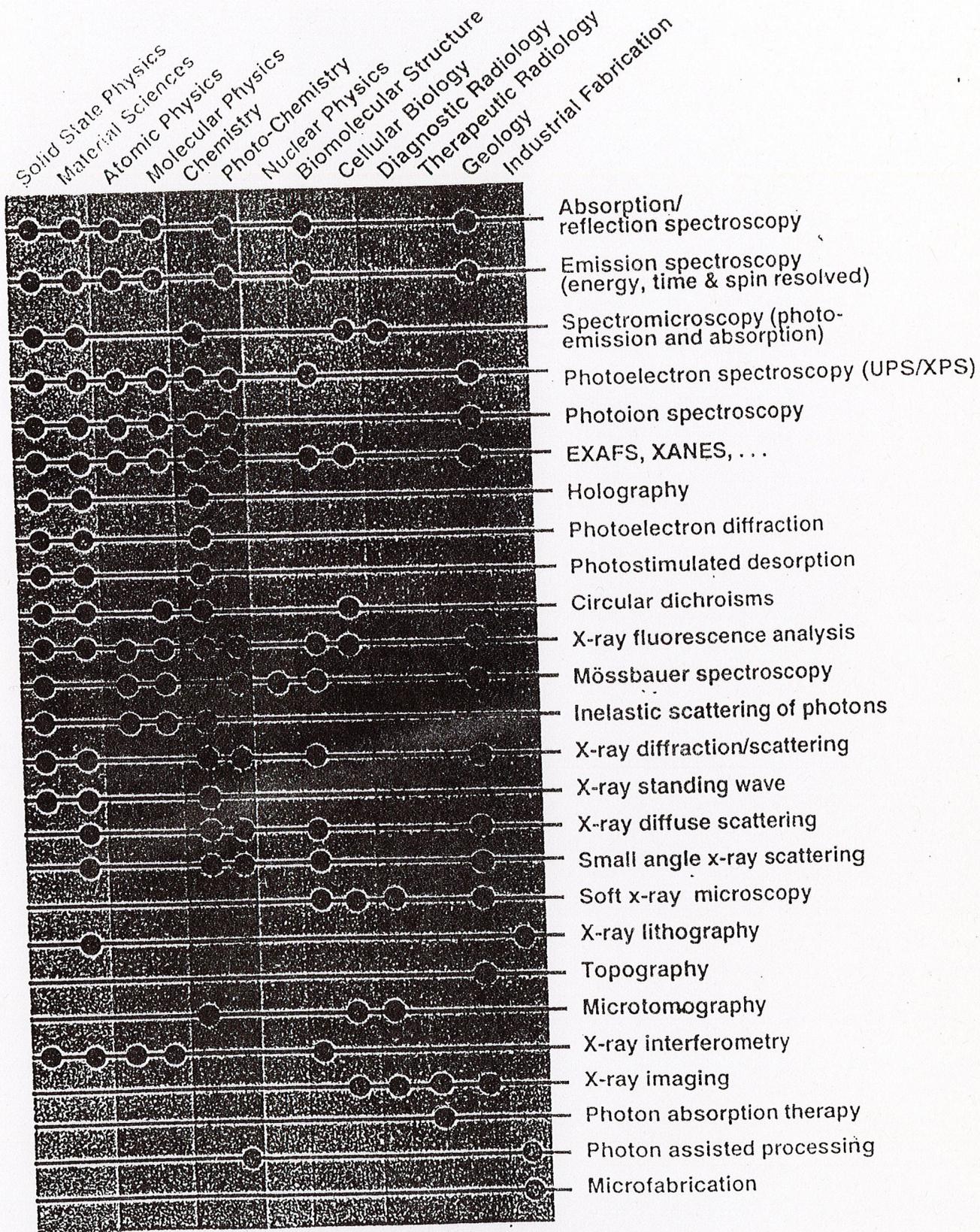
Pulsed time structure



High degree of polarisation

5) Properties can be calculated/predicted

รูปที่ 2 แสดงคุณลักษณะเฉพาะของแสงซินโครตรอน



รูปที่ 3 แสดงขอบเขตของการใช้แสงซินโครตรอนในการประยุกต์กับ
ปัญหาด้วยอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ

ตารางที่ 1-4 แสดงความก้าวหน้าของเครื่องซินโครตรอนในรุ่นต่าง ๆ

TABLE 1
FIRST GENERATION STORAGE RING SYNCHROTRON RADIATION SOURCES

LOCATION	RING (INST.)	ELECTRON ENERGY (GeV)	NOTES
CHINA Beijing	BEPC(Inst.High En.Phys.)	1.5-2.8	Partly Dedicated
DENMARK Aarhus	ASTRID (ISA)	0.6	Partly Dedicated
FRANCE Orsay	DCI(LURE) ACO(LURE)	1.8 0.54	Dedicated **
GERMANY Bonn Hamburg	ELSA (Bonn Univ.) DORIS III (HASYLAB) PETRA II (HASYLAB)	1.5-3.5 4.5-5.3 7-14	Partly Dedicated Partly Dedicated Planned Use
ITALY Frascati	ADONE (LNF)	1.5	Partly Dedicated
JAPAN Sendai Tsukuba	TSSR(Tohoku Univ.) Accumulator Ring(KEK) TRISTAN Main Ring(KEK)	1.5 6 6-30	Proposed/Part.Ded Partly Dedicated Planned Use
NETHERLANDS Amsterdam Eindhoven	AmPS EUTERPE(Tech.Univ.Eind.)	0.9 0.4	Planned Use * Planned Use *
U S A Gaithersburg, MD Ithaca, NY Stanford, CA	SURF II (NIST) CESR (CHESS) SPEAR (SSRL) PEP (SLAC/SSRL) Tantalus (SRC)	0.28 5.5 3-3.5 5-15 0.24	Dedicated Partly Dedicated Dedicated ** **
Stoughton, WI U S S R/ CIS Kharkov Novosibirsk	N-100 (KPI) VEPP-2M(Inst.Nucl.Phys.) VEPP-3 (Inst.Nucl.Phys.) VEPP-4 (Inst.Nucl.Phys.)	0.1 0.7 2.2 5-7	Dedicated Partly Dedicated Partly Dedicated Partly Dedicated

* In Construction as of 2/92 ** Withdrawn from operation

TABLE 2
SECOND GENERATION STORAGE RING SYNCHROTRON RADIATION SOURCES

LOCATION	RING (INST.)	ELECTRON ENERGY (GeV)	NOTES
BRAZIL Campinas	LNLS-1	1.15	Dedicated *
CHINA (PRC) Hefei	HESYRL (USTC)	0.8	Dedicated
ENGLAND Daresbury	SRS(Daresbury)	2	Dedicated
GERMANY Berlin	BESSY	0.8	Dedicated
INDIA Indore	INDUS-1(Ctr.Adv.Tech.)	0.45	Dedicated *
JAPAN Osaka Osaka	UVSOR (Inst.Mol.Science) KANSAI SR	0.75 2.0	Dedicated Proposed/ Dedicated
Tokyo Tsukuba Tsukuba	SOR-Ring(U of Tokyo-ISSP) TERAS (Electro Tech.Lab.) Photon Factory (KEK)	0.38 0.6 2.5	Dedicated Dedicated Dedicated
SWEDEN LUND	MAX (Univ. of Lund)	0.55	Dedicated
USA Baton Rouge, LA Stoughton, WI Upton, NY	CAMD(Louisiana State Univ) Aladdin (SRC) NSLS I (Brookhaven Lab.) NSLS II(Brookhaven Lab.)	1.2 0.8-1 0.75 2.5	Dedicated * Dedicated Dedicated Dedicated
USSR/CIS Kharkov Moscow Zelenograd	HP-2000 (KPI) Siberia I(Kurchatov Inst) Siberia II(Kurchatov Inst) TNK (F.V. Lukin Inst.)	2.0 0.45 2.5 1.2-1.6	Dedicated* Dedicated Dedicated* Dedicated*

* In construction as of 2/92

TABLE 3
THIRD GENERATION STORAGE RING SYNCHROTRON RADIATION SOURCES

LOCATION	RING (INST.)	ELECTRON ENERGY (GeV)	NOTES
BRAZIL Campinas	LNLS-2	2.0	Design/Dedicated
CHINA (ROC-TAIWAN) Hsinchu	SRRC(Synch.Rad.Res.Ctr.)	1.3	Dedicated *
ENGLAND Daresbury	DAPS(Daresbury Lab.)	0.5-1.2	Design/Dedicated
FRANCE Grenoble	ESRF	6	Dedicated *
Orsay	Super ACO (LURE)	0.8	Dedicated
	SOLEIL (LURE)	2.15	Design/Dedicated
GERMANY Dortmund	DELTA (Dortmund Univ.)	1.5	Dedicated/ FEL Use *
Berlin	BESSY II	1.5-2	Proposed/ Dedicated
INDIA Indore	INDUS-2 (Ctr.Adv.Tech.)	2	Dedicated *
ITALY Trieste	ELLETRA (Synch.Trieste)	1.5-2	Dedicated *
JAPAN Hiroshima	HISOR (Hiroshima Univ.)	1.5	Proposed/ dedicated
Kyushu	SOR (Kyushu Univ.)	1.5	Proposed/ Dedicated
Nishi Harima (Riken/Jaeri)	SPring-8	8	Dedicated *
Tsukuba	NIJI IV	0.5	Dedicated/FEL Use
KOREA Pohang	Pohang Light Source	2	Dedicated *
SWEDEN Lund	MAX II (Univ. of Lund)	1.5	Dedicated
SWITZERLAND Villigen	SLS (Paul Scherrer Inst.)	1.5-2.1	Design/Dedicated
USA Argonne, IL	APS (ANL)	7	Dedicated *
Berkeley, CA	ALS (LBL)	1.5	Dedicated
Durham, NC	FELL (Duke University)	1-1.3	Dedicated/ FEL Use *

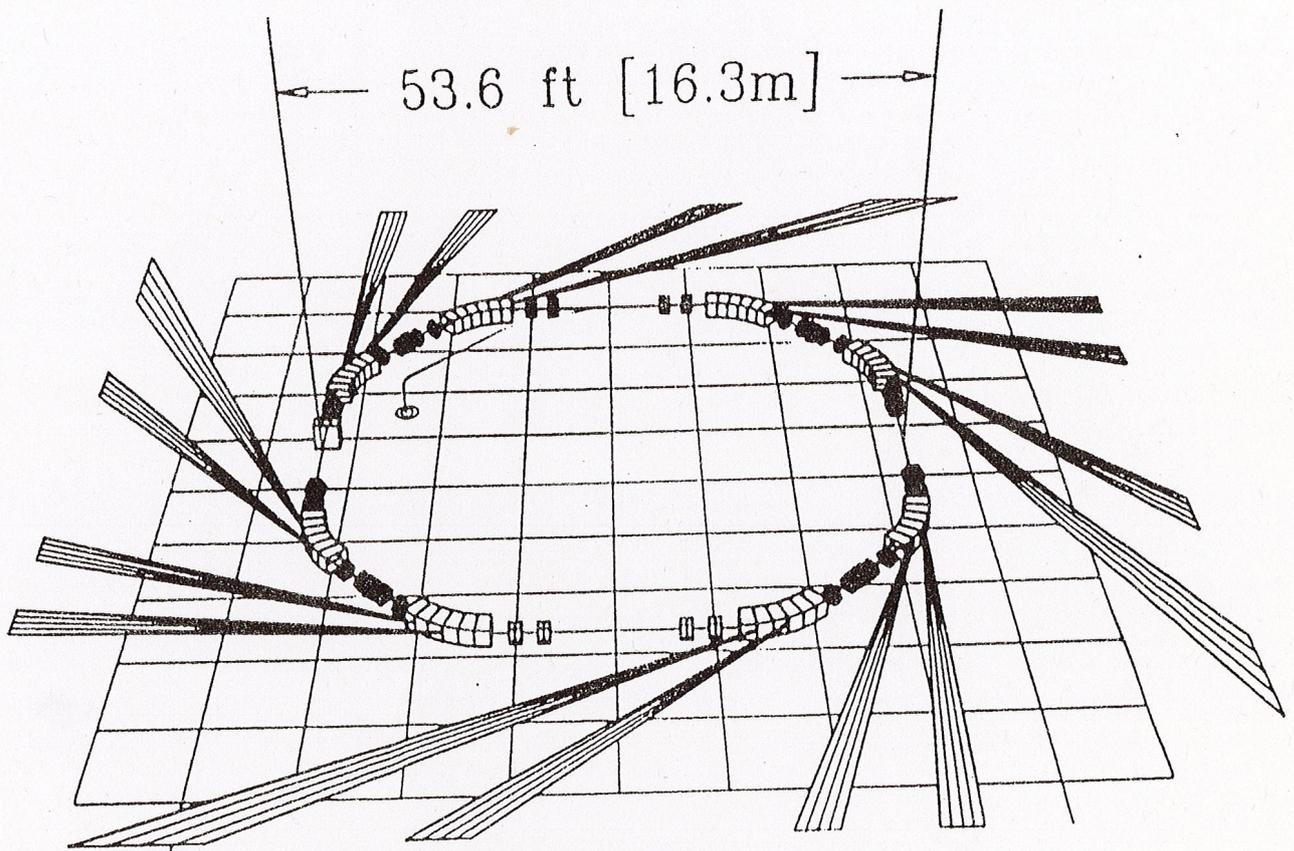
* In construction as of 2/92

TABLE 4
STORAGE RING SOURCES FOR X-RAY LITHOGRAPHY

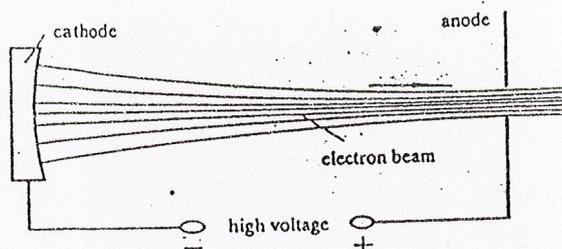
Germany Berlin	COSY	0.59	**
Japan Atsugi	NAR (NTT)	0.8	Operational
Atsugi	SUPER-ALIS (NTT)	0.6	Operational
Tokyo	AURORA (SHI)	0.65	Operational
Tsukuba	LUNA (IHI)	0.8	Operational
Tsukuba	NIJI I (ETL-SEI)	0.27	**
Tsukuba	NIJI II (ETL-SEI)	0.6	Operational
Tsukuba	NIJI III (ETL-SEI)	0.62	Operational
Tsukuba	SORTEC (ETL)	1.0	Operational
USA E. Fishkill, NY	HELIOS (IBM)	0.7	Operational
Upton, NY	SXLS (Brookhaven Lab.)	0.7	Construction
USSR/CIS Novosibirsk	SIBERIA-SM	0.6	Construction

** Withdrawn from operation.

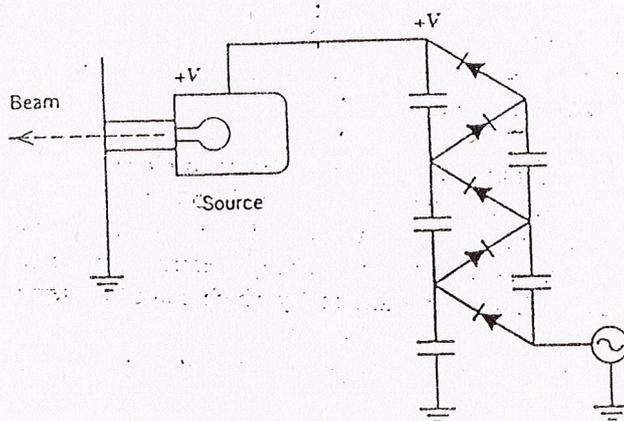
NTT is Nippon Telegraph and Telephone, SHI is Sumitomo Heavy Industries, IHI is Ishikawajima-Harima Heavy Industries, ETL is the Electrotechnical Laboratory, SEI is Sumitomo Electric Industries. The IBM ring at E. Fishkill was developed in England by Oxford Instruments.



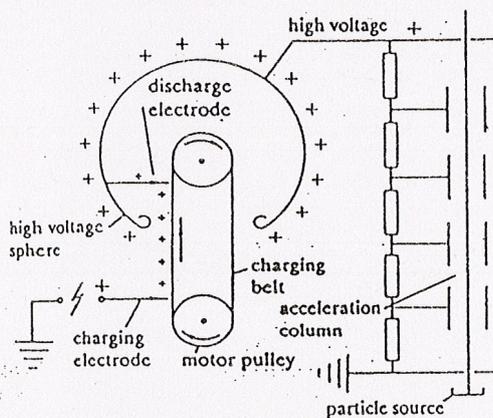
รูปที่ 4 แสดงแสงซินโครตรอนกระจายออกในทิศทางต่าง ๆ รอบวงแหวน



ก

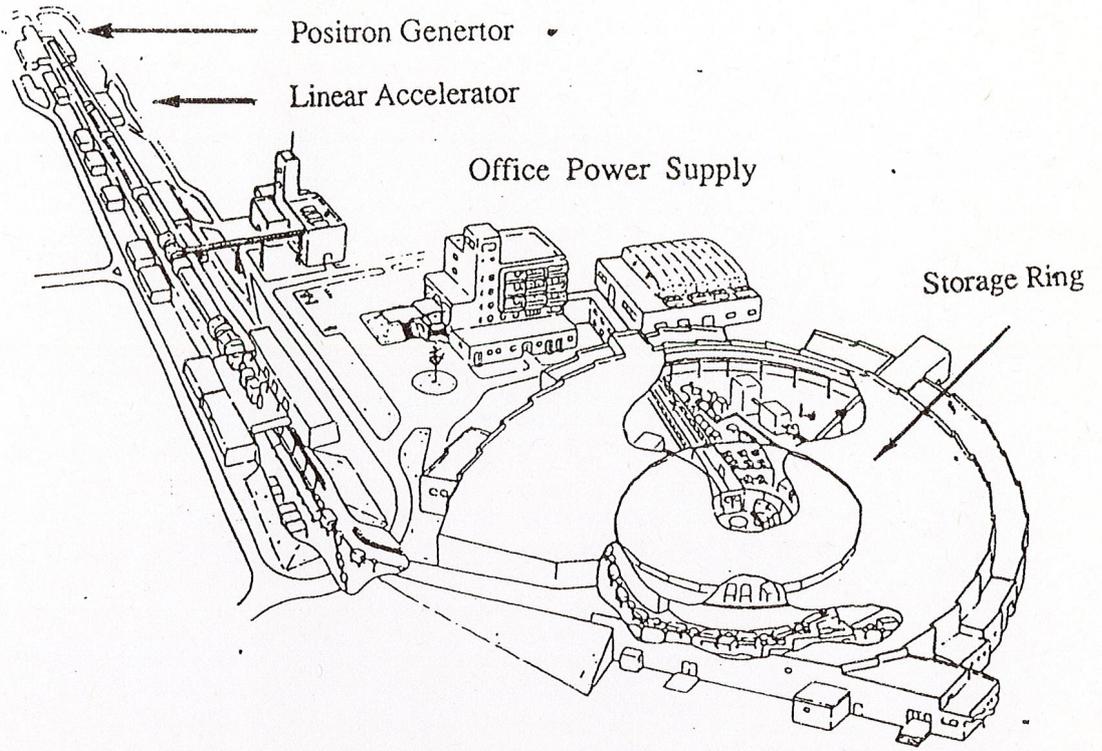


ข

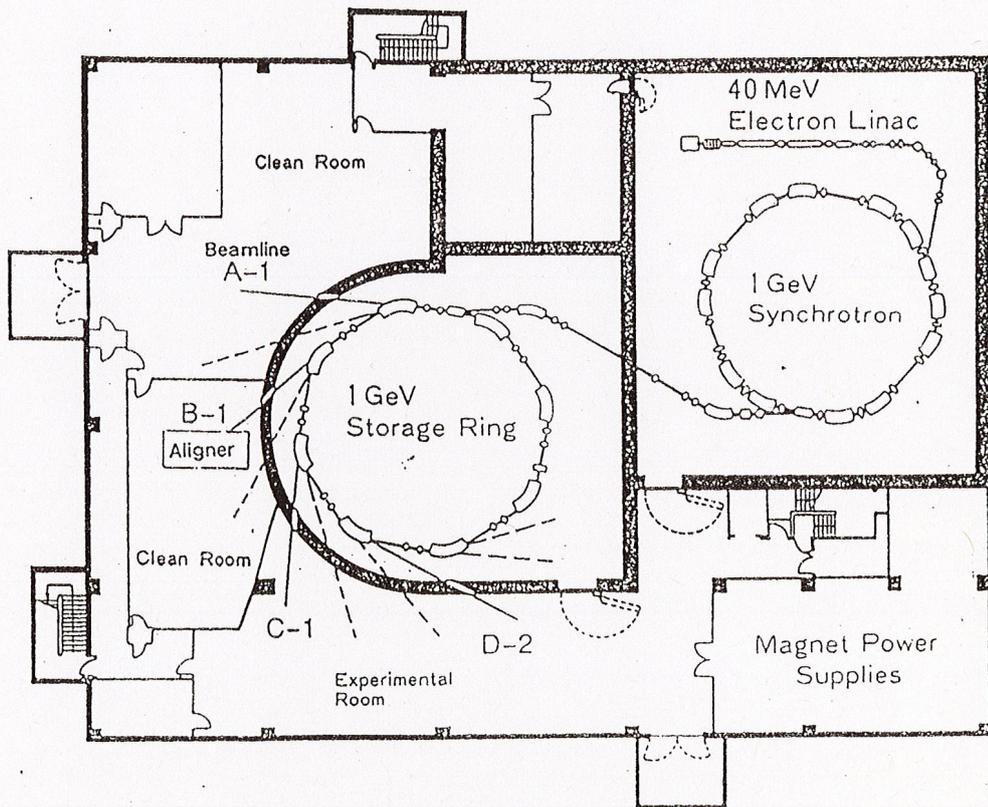


ค

รูปที่ 5 ก แสดงหลักการเร่งอนุภาคโดยไฟฟ้าสถิต
 ข แสดงวงจรของเครื่องเร่งไฟฟ้าสถิตคอกครอฟท์-วอลตัน
 ค แสดงวงจรของเครื่องเร่งไฟฟ้าสถิตแวนเดอร์กราฟ

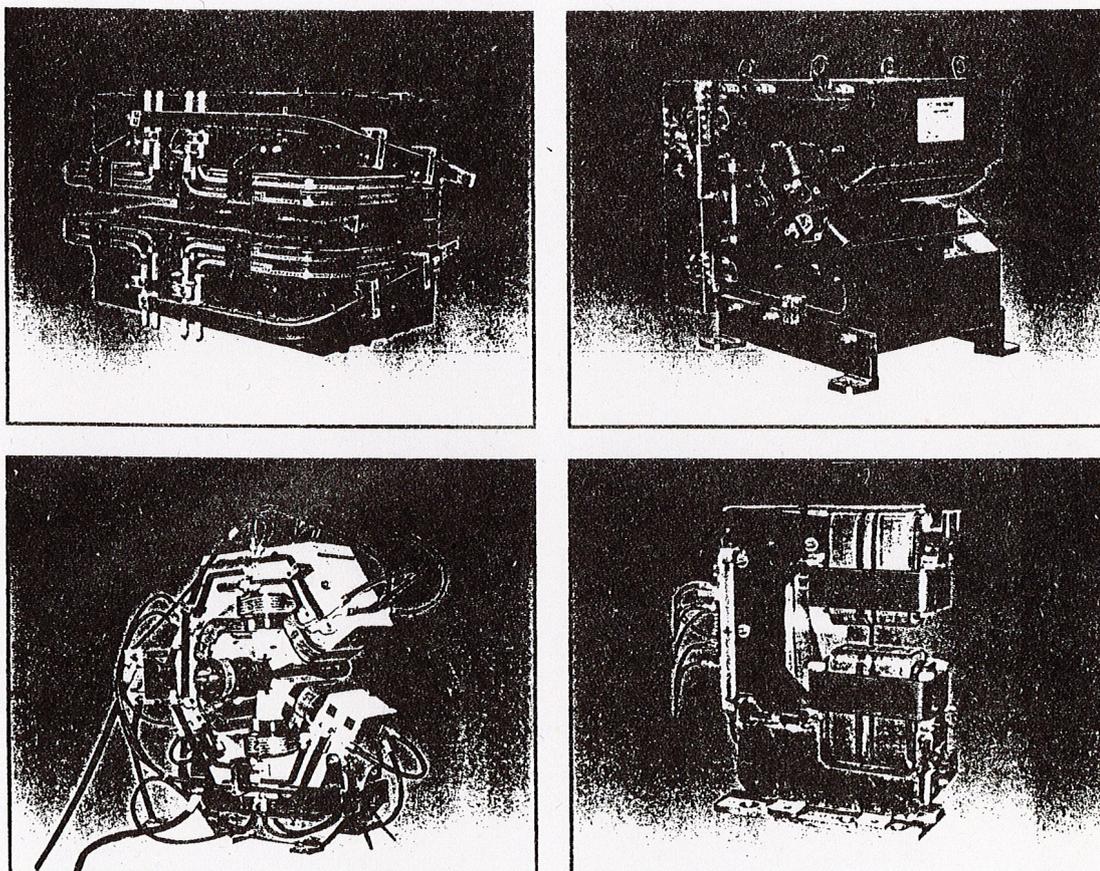


ก

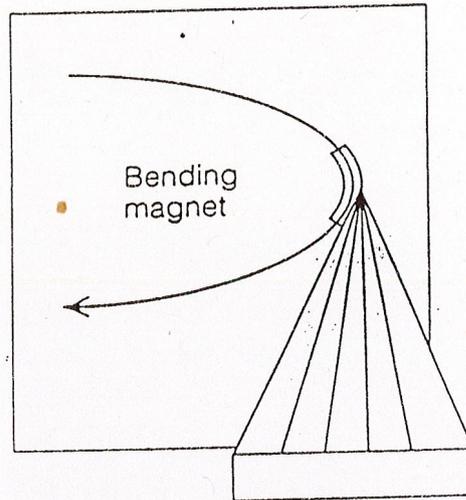


ข

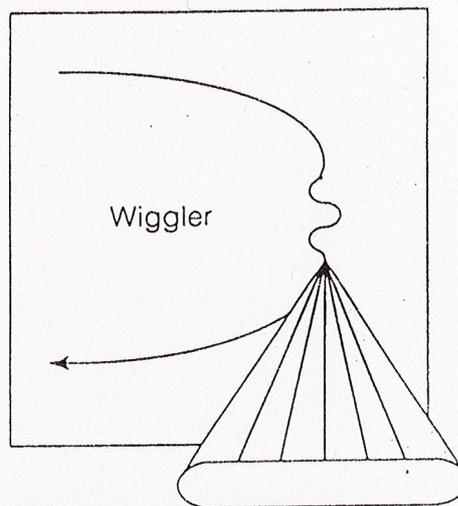
รูปที่ 6 ก แสดงเครื่อง SR แบบ Linac
 ข แสดงเครื่อง SR แบบ Booster



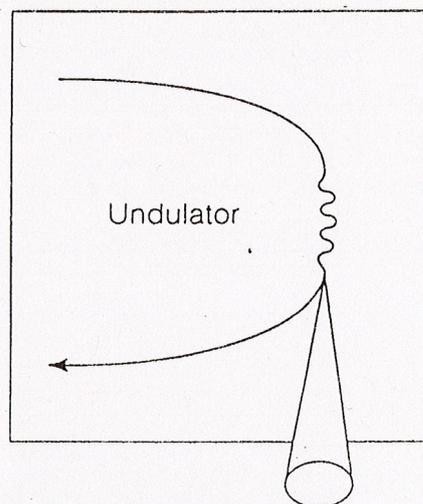
รูปที่ 7 แสดงแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ จากบริษัทฮุนได แม่เหล็กเหล่านี้ใช้ในการควอนตัมและอื่น ๆ ของอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ไป และ Storage Ring



ก

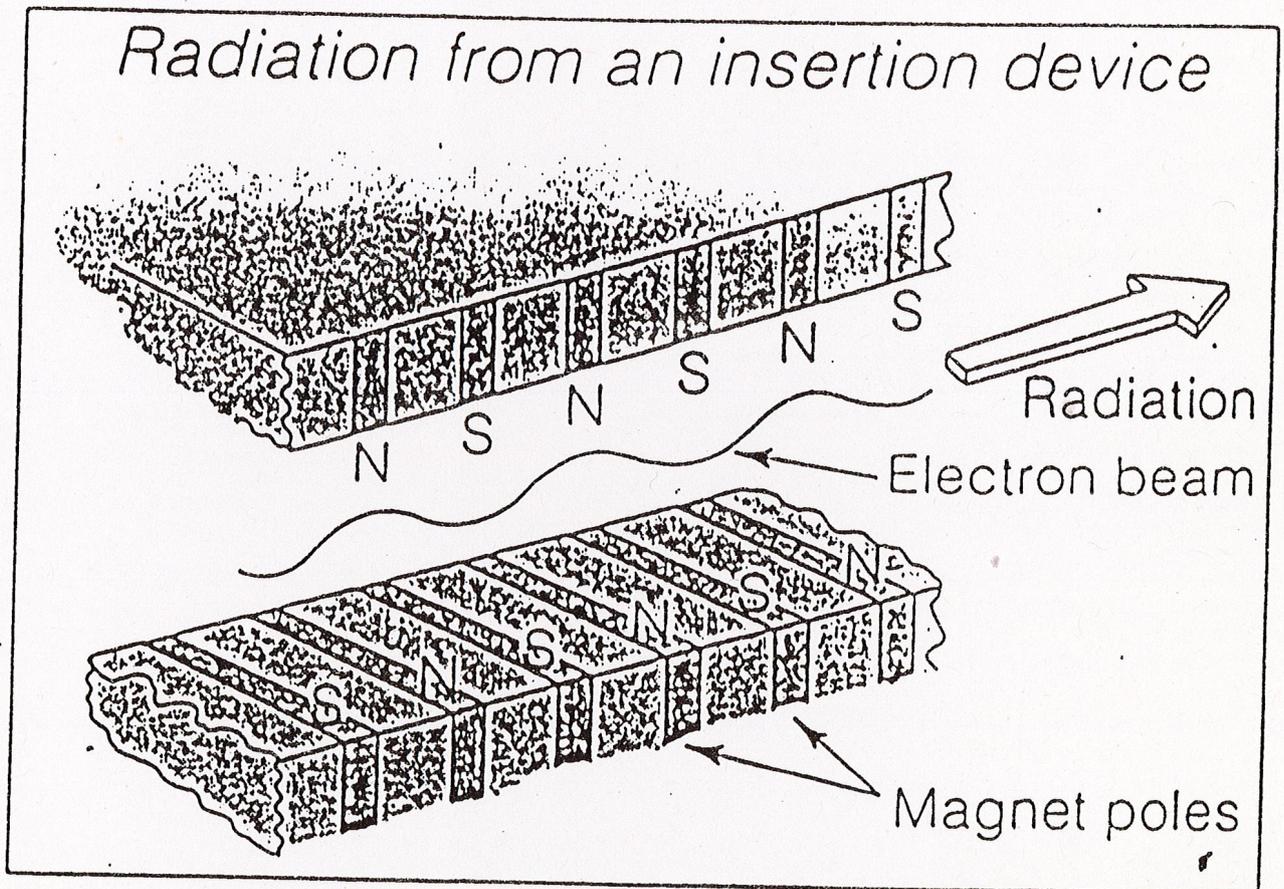


ข

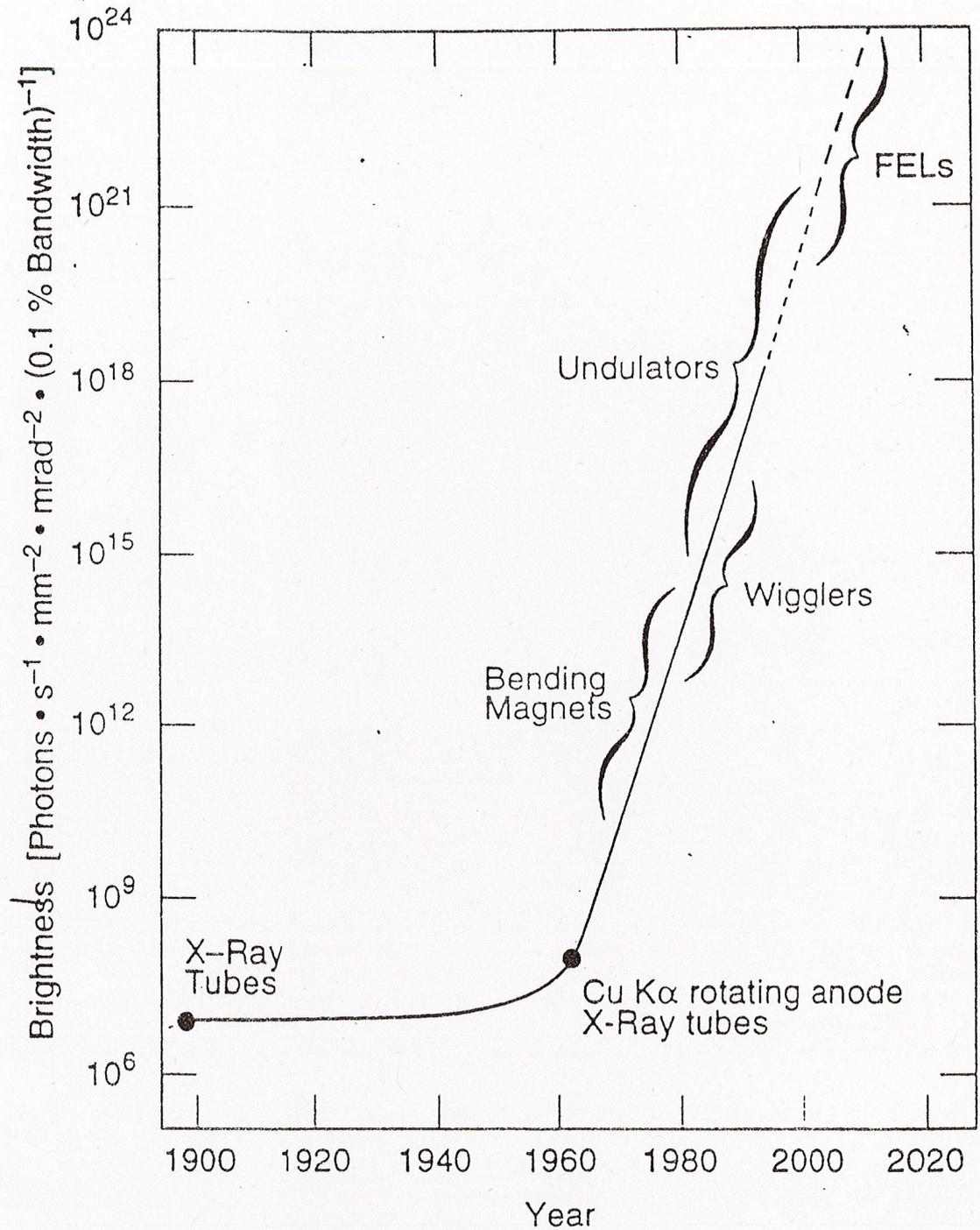


ค

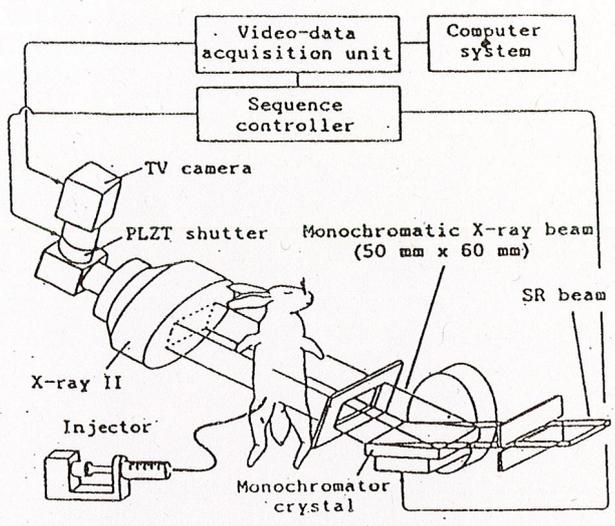
- รูปที่ 8 ก แสดงแสงซินโครตรอนกระจายออกเป็นรูปพัดอันเนื่องจากแม่เหล็กเบี่ยงเบน
 ข แสดงแสงซินโครตรอนกระจายออกเป็นรูปพัดด้วยแม่เหล็ก Wiggler
 ค แสดงลำแสงซินโครตรอนกระจายออกเป็นจุดอันเนื่องจากอุปกรณ์ Undulator



รูปที่ 9 แสดงอุปกรณ์ insertion device ที่มีแม่เหล็กถาวรที่มีขั้วสลับเป็นเหตุ
ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้ความเร็วแสง

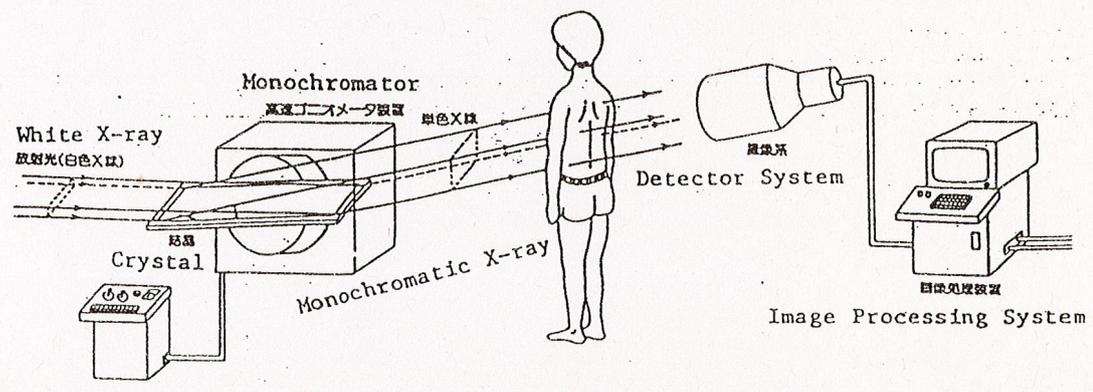


รูปที่ 10 แสดงความสว่างที่ได้จากอุปกรณ์ต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มต้นถึงปัจจุบัน

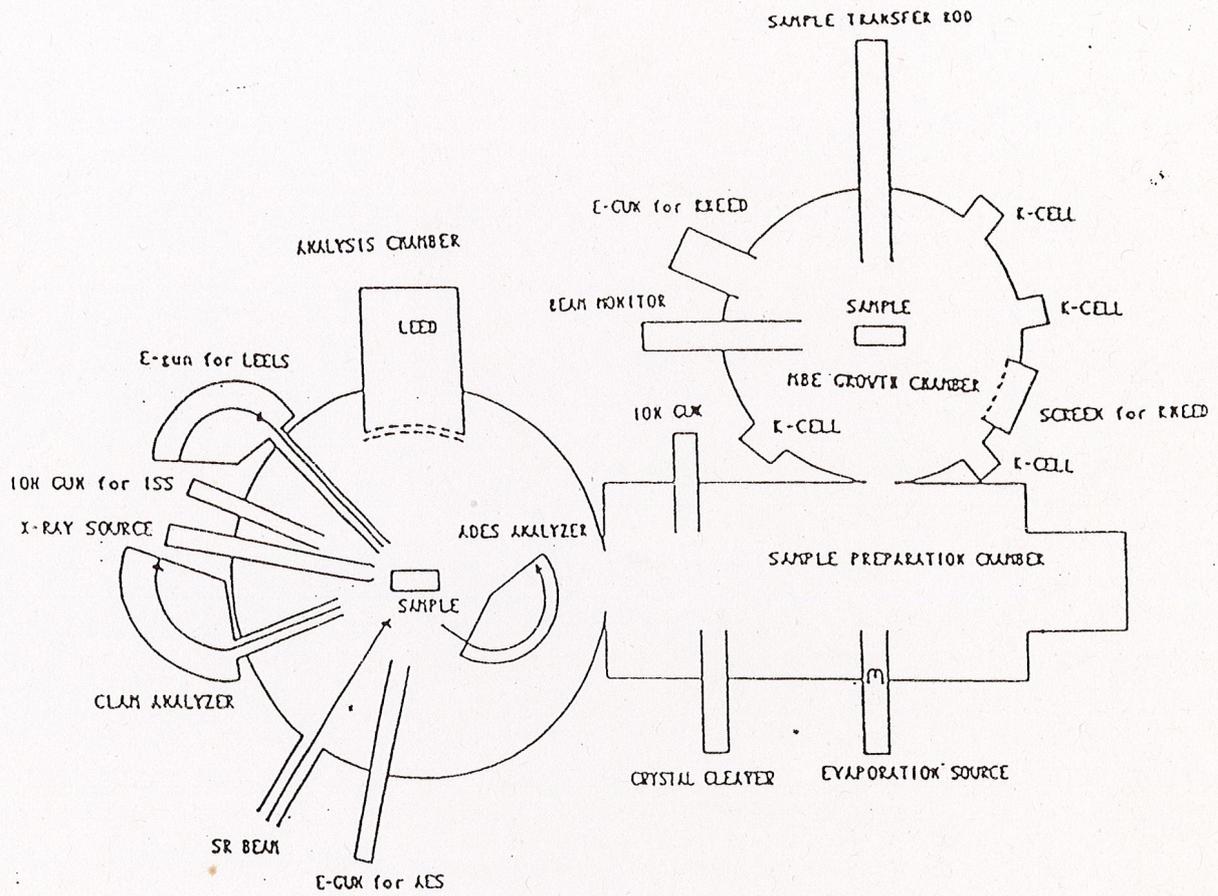


Configuration of the digital radiography system.

รูปที่ 11 แสดงถึงการใช้แสง SR เพื่อศึกษาเส้นเลือดในหัวใจของกระต่ายทดลอง



รูปที่ 12 ในขนาดอันไกลนี้ แสง SR จะสามารถนำมาใช้กับมนุษย์



รูปที่ 13 แสง SR ฉายบนตัวอย่างซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่เตรียมจากเครื่อง MB (Molecular Beam Epitaxy) ความสะอาดของเครื่องนี้คือ เมื่อเตรียมตัวอย่างโดย MBE แล้ว ตัวอย่างนี้ สามารถส่งผ่านมายังห้องวิเคราะห์โดยไม่ต้องนำตัวอย่างออกจากห้องที่ปกติจะมีความดันต่ำ 10^{-10} Torr การ ฉายแสง SR ลงบนผลึกที่เตรียมจาก MBE จะทำให้ได้ข้อมูลของผิวของในผลึก