800004

ทางไปสู่การค้นพบ

แปลจาก

Roads to Discovery

by

Ralph E. Lapp

The New American Library, Inc., 1967

แปลและเรียบเรียง

โดย

ประชา พานิช

B. Sc. (Hons) Dip. in Ed.

ด้วยความช่วยเหลือ
จาก
บรรณารักษ์ประจำประเทศไทย
องค์การศึกษาของสหประชาชาติ

จัดพิมพ์จำหน่าย

พิมพ์ครั้งที่หนึ่ง ๕,๐๐๐ เล่ม

พ.ศ. ๒๕๑๕

๗.— บาท

Copyright 1960 by RALPH E. LAPP

Originally published by Harper & Row, Publishers, Inc.,
New York.

Courtesy of the University of California Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley, are illustrations

No. 1	p.	No. 2	p.
No. 7	p.	No. 28	p.
No. 34	p.	No. 35	p.
No. 39	p.		

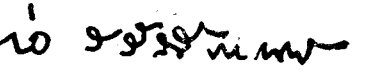
คำนำ

เนื่องด้วยคุรุสภามีวัตถุประสงค์จะส่งเสริมให้มีการแปลตำราภาษาต่างประเทศเป็นภาษาไทย เพื่อให้บรรดานักเรียน นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป ได้มีตำราภาษาไทยสำหรับศึกษาค้นคว้าได้กว้างขวางยิ่งขึ้น จึงได้แต่งตั้งคณะอนุกรรมการขึ้นคณะหนึ่ง เพื่อพิจารณาดำเนินการแปลตำราภาษาต่างประเทศ เป็นภาษาไทยซึ่งในระยะแรกนี้ คณะอนุกรรมการได้พิจารณาคัดเลือกหนังสือต่าง ๆ ไว้แล้ว รวม ๕ เรื่อง เรื่องที่แปลเสร็จเป็นเรื่องแรก คือ Roads to Discovery หรือ **ทางไปสู่การค้นพบ** ได้มอบหมายให้นายประชา พานิช อาจารย์ประจำวิทยาลัยวิชาการศึกษาปทุมวัน เป็นผู้แปล และรองศาสตราจารย์สลวย โรจนสโรช แห่งมหาวิทยาลัยศิลปากร เป็นผู้ตรวจต้นฉบับภาษาไทย องค์การค้าของคุรุสภาเป็นผู้จัดพิมพ์และจำหน่าย

การที่หนังสือเล่มนี้ได้แปลเสร็จเรียบร้อย ออกสู่สายตาของท่านนักศึกษาได้นี้ ก็ด้วยได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักข่าวสารอเมริกัน เป็นผู้ติดต่อขออนุญาตลิขสิทธิ์ จากเจ้าของต้นฉบับในต่างประเทศให้ คุรุสภาจึงต้องขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะอนุกรรมการหวังว่าหนังสือเล่มนี้คงจะอำนวยประโยชน์แก่นักเรียน และนักศึกษาสมเจตนารมณ์ของคุรุสภาทุกประการ

หากมีสิ่งใดที่ขาดตกบกพร่องอยู่บ้าง ก็พร้อมเสมอที่จะรับฟังคำติชมจากท่านผู้รู้ทุกโอกาส



(นายก่อ สวัสดิ์พาณิชย์)
อธิบดีกรมวิสามัญศึกษา
ประธานคณะอนุกรรมการพิจารณาดำเนินการ
แปลตำราภาษาต่างประเทศเป็นภาษาไทย

คณะอนุกรรมการพิจารณาดำเนินการแปลตำรา ภาษาต่างประเทศเป็นภาษาไทย

๑. นายก่อ สวัสดิ์พาณิชย์	เป็นประธานอนุกรรมการ
๒. นายนพ ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา	เป็นรองประธานอนุกรรมการ
๓. นางผอูน สุวรรณนาวิน	เป็นอนุกรรมการ
๔. นางส่องสี ชุติวงศ์	เป็นอนุกรรมการ
๕. นายประพัฒน์ แสงวณิช	เป็นอนุกรรมการ
๖. นางสลวย โรจนสโรช	เป็นอนุกรรมการ
๗. นายกำธร สถิรกุล	เป็นอนุกรรมการ
๘. หัวหน้าฝ่ายวิทยกิจ (นายนคร จันทร์วัฒนพงษ์)	เป็นอนุกรรมการและเลขานุการ
๙. หัวหน้าแผนกวารสาร (นางสาวน้ำทิพย์ สิโรรส)	เป็นอนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

สารบาญ

หน้า

บทที่ ๑ วิทยาศาสตร์คือการผจญภัยที่ยิ่งใหญ่ ๑

บทที่ ๒ ดร. เรินท์เกนค้นพบรังสีเอกซ์ ๑๗

บทที่ ๓ กัมมันตภาพรังสี ๓๕

บทที่ ๔ รัทเธอฟอร์ดนักค้นคว้าคนสำคัญ ๔๕

บทที่ ๕ ใจกลางของอะตอม ๖๔

บทที่ ๖ อะตอมตามแบบของบอร์ ๘๘

บทที่ ๗ อะตอมถูกทำให้แตกตัว ๙๙

บทที่ ๘ โครงสร้างของนิวเคลียส ๑๑๘

บทที่ ๙ กระสุนนัดสำคัญ ๑๓๓

บทที่ ๑๐ พลังงานจากยูเรเนียม ๑๕๑

บทที่ ๑๑ อะตอมภายใต้การควบคุม ๑๗๗

บทที่ ๑๒ เครืออะตอม ๑๙๙

บทที่ ๑๓ พลังงานจากดวงดาว ๒๑๙

บทที่ ๑๔ การเสาะแสวงหาอย่างไม่หยุดยั้ง ๒๔๐

วิทยาศาสตร์คือการผจญภัยที่ยิ่งใหญ่

วิทยาศาสตร์เป็นการผจญภัยที่ยิ่งใหญ่แห่งยุคของเราก่อนจะขึ้นศตวรรษนี้ไม่นาน วิทยาศาสตร์ในแนวแปลกและใหม่เริ่มดึงดูดความสนใจของบุคคลผู้มีความสามารถอยู่ในระดับอัจฉริยะ คนเหล่านี้ทำการค้นคว้าในห้องทดลองซึ่งมีแสงสว่างเพียงสลัว ๆ ไม่ค่อยมีเครื่องไม้เครื่องมืออะไรนัก บ้างทำงานคนเดียว บ้างทำงานเป็นคู่ ๆ ผลจากการทำงานอย่างทุ่มเทชีวิตจิตใจของนักวิทยาศาสตร์เพียงไม่กี่คนนี้ ยังไม่มีอะไรที่จะส่อให้เห็นว่างานของเขาจะมีผลให้โลกต้องตะลึงพรึงเพริด

ในประเทศอังกฤษ เยอรมนี ฝรั่งเศส และประเทศอื่น ๆ ในยุโรป นักวิทยาศาสตร์หลายท่าน เช่น รัทเธอฟอร์ด (Ruther ford) เรินท์เกน (Roentgen) เบคเกอเรล (Becquerel) และคนอื่น ๆ อีกนับสิบ กำลังกรุยทางไปสู่ยุคใหม่ เพื่อค้นหาความลับสุดยอดของสสาร พยายามศึกษาสิ่งซึ่งไม่เคยมีใครค้นพบมาก่อนเลย ความกระตือรือร้นอยากรู้อยากเห็นและความใคร่อย่างสุดขีดที่จะเรียนรู้ ทำให้คนเหล่านี้ไม่พอใจเพียงแต่ที่จะตั้งคำถามเรื่อยเปื่อยและนึกฝันเอาหรือเดาเอา หันมาแก้ปัญหาด้วยการทดลอง เพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นประโยชน์ต่อไป คำตอบซึ่งได้มาอย่างแสนเข็ญนั้นไม่ค่อยชัดเจนแจ่มแจ้งบ่อยครั้งและบางครั้งก็ดู

เหมือนไม่ได้ความเอาเสียเลย แต่ก็ยังคงบากบั่นต่อไป ตั้งปัญหาขึ้นใหม่บ้าง ทำการทดลองซ้ำแล้วซ้ำอีก ทำอย่างไม่มีเวลาหยุด ทำกันแบบที่เรียกว่าลืมกินลืมนอนทีเดียว

ถ้าเอาการทดลองในปัจจุบันเป็นบรรทัดฐานกันแล้ว ต้องนับว่าการทดลองเหล่านั้นเป็นงานที่หยาบมาก ถึงกระนั้นก็เป็นการทดลองที่ตรงเป้าหมาย น่าตื่นเต้น และลึกซึ้งอย่างน่าแปลกใจ การทดลองหนึ่งจะนำไปสู่อีกการทดลองหนึ่ง ผลที่ออกมาเพียงอย่างเดียวก่อให้เกิดแนวคิดใหม่ ๆ หลายอย่าง วิทยาศาสตร์ก้าวต่อไปได้ทันเวลาพอดีกับที่นักวิทยาศาสตร์รุ่นอาวุโสชักจะบ่นด้วยความไม่พอใจว่า ไม่ค่อยมีอะไรใหม่ ๆ ให้ค้นคว้ากัน

ถึงแม้เรื่องราวการค้นคว้าจะกระเส็นกระสายออกไปนอกห้องทดลอง ทำให้ทั่วโลกหันมาให้ความสนใจบ้าง แต่นักวิทยาศาสตร์ยังคงมีจำนวนน้อยอย่างน่าเวทนา ในปี ๑๙๐๕ ไอน์สไตน์ (Einstein) เสมียนจดทะเบียนสิ่งประดิษฐ์ชาวสวิส ผู้ไม่ยอมเชื่ออะไรง่าย ๆ ทำให้บรรดานักวิทยาศาสตร์ด้วยกันถึงกับสะดุ้ง ในแนวความคิดเกี่ยวกับอวกาศและพลังงาน ทฤษฎีของไอน์สไตน์ซึ่งกระตุ้นความสนใจของผู้ที่ได้อ่านพบในหน้าหนังสือพิมพ์ ทำให้ผู้อ่านทั้งกลัวและขบขัน การแสดงที่โวเดอร์วิลล์มีชื่อเสียงด้วยการแสดงล้อเลียนสัมพัทธภาพ ต่อเมื่อเวลาผ่านไปตั้งสี่สิบปี และระเบิดปรมาณูกลายเป็นความจริงขึ้นมานั่นแหละโลกจึงจะได้เข้าใจต่อความหมายอันแท้จริงของผลงานของไอน์สไตน์

นักวิทยาศาสตร์ผู้อุทิศชีวิตให้แก่การค้นคว้าหาความรู้เพิ่มขึ้น ได้ดำเนินงานของตนไปอย่างเชื่องช้า สงครามโลกครั้งแรกนับว่ามีส่วนช่วยเร่งเร้าให้เกิดความสนใจในวิทยาศาสตร์ขึ้น เนื่องจากเป็นที่รู้กันว่าวิทยาศาสตร์เปรียบเสมือนมีดสองคม คมหนึ่งอาจจะหวนกลับมาทำลายมนุษยชาติเองได้ แต่วิทยาศาสตร์อย่างที่สำคัญเหลือเกินที่เรียกว่าวิทยาศาสตร์พื้น ๆ หรือวิทยาศาสตร์มูลฐานนั้น ดูประหนึ่งว่าคุณค่าในการใช้ประโยชน์มีอยู่น้อยมาก แทบไม่ทำให้สังคมต้องหันมาสนใจกับนักฟิสิกส์ เคมี และคณิตศาสตร์กลุ่มเล็ก ๆ ผู้กรุยทางในการทดลองตอนต้น ๆ ไปสู่ความรู้อันเป็นวิทยาศาสตร์มูลฐานนั้น งานเหล่านั้นจึงต้องล้มลุกคลุกคลาน ก้าวไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ส่วนมากก็ขึ้นอยู่กับตัวบุคคล เช่น รัทเธอฟอร์ด หรือ มิลลิแกน (Millikan) หรือ บอร์ (Bohr) จะเกิดความคิดดี ๆ อะไรขึ้นมาบ้างมากน้อยแค่ไหน

ความคิดดี ๆ นั้นมักจะเกิดขึ้นในที่ซึ่งคาดไม่ถึง ตอนที่ไม่มีใครนึกฝัน อย่างไรก็ตามขณะที่งานค้นคว้าคืบหน้าไป อัจฉริยบุคคลก็ถูกดึงเข้ามาร่วมงานมากขึ้น ความคิดดี ๆ ก็เกิดขึ้นมากกว่าเดิม แนวความคิดที่ได้รับมาก่อน ๆ ก็สูงขึ้นมาท้าทายความเชื่อเก่า ๆ ของนักวิทยาศาสตร์โดยสิ้นเชิง สิ่งซึ่งเคยเชื่อกันว่าเป็นความจริงอันไม่มีวันจะเปลี่ยนไป ปรากฏว่าไม่ค่อยจะมั่นคงอย่างที่เคยเป็นมาเสียแล้ว ความคิดใหม่ ๆ ในฟิสิกส์เริ่ม

จะบั๊กหลักยืนหยัดอยู่ได้ในช่วงหลังของ ค.ศ. ๑๙๒๐ เศษ ๆ นับว่าสังคมนักวิทยาศาสตร์ตกอยู่ในสภาพที่สับสนชุลมุนวุ่นวาย

ความคิดแปลก ๆ ต้องได้รับการทดสอบและตรวจตราอย่างละเอียดลออ ด้วยการทดลองซึ่งอาศัยเครื่องมือใหม่ ๆ ในช่วงระยะที่เศรษฐกิจของโลกตกต่ำ คือในปี ค.ศ. ๑๙๓๐ และหลังจากนั้น วิทยาการด้านวิทยาศาสตร์มิได้พลอยตกต่ำไปด้วย จำนวนนักวิทยาศาสตร์กลับเพิ่มพูนขึ้น เครื่องมือใหม่ ๆ เช่น ไซโคลตรอน (Cyclotron) ถูกประดิษฐ์ขึ้น สิ่งต่าง ๆ เริ่มเฟื่องฟูขึ้น

ตอนนั้นเป็นช่วงระยะเวลาแห่งความตื่นเต้น แทบจะเรียกได้ว่าในชั่วคืนเดียว นักวิทยาศาสตร์จำต้องยอมเปลี่ยนแนวความคิดเกี่ยวกับอะตอม อันเป็นส่วนประกอบขั้นรากฐานของสสารทั้งหลาย ภาพโครงสร้างของอะตอมแบบง่าย ๆ ตามที่เคยยึดถือกันมาแต่ก่อน ถูกทำลายไป อย่างไม่มีวันที่จะกลับคืนมาได้ เนื่องจากการค้นพบอนุภาคมูลฐานใหม่ ๆ เช่น นิวตรอน และอนุภาคอื่น ๆ ซึ่งเล็กยิ่งไปกว่านั้น การทดลองซึ่งทำกันมามีผลกระทบกระเทือนต่อทุกคนบนโลกนี้อย่างไม่รู้จักจบสิ้น

ขณะที่ฮิตเลอร์กำลังสะสมกำลังทหารและกลองศึกเริ่มส่งเสียงกระหึ่มไปทั่วทวีปยุโรป นักวิทยาศาสตร์ทำงานกันอย่างหนักเพื่อหาวิธีแยกอะตอมออกเป็นส่วนย่อยลงไปอีก นับว่าเป็นเรื่องแปลกประหลาดทีเดียว ที่การค้นพบวิธีแยกอะตอมในปี ๑๙๓๘

นั้น อุบัติขึ้นที่ชานเมืองเบอร์ลินนั่นเอง ถ้าฮิตเลอร์รู้แต่เพียงน้อยนิดว่า การค้นพบนี้มีความสำคัญเพียงไร และส่งเสริมให้นักวิทยาศาสตร์ของเขาร่วมมือกันค้นคว้าต่อไป โลกทุกวันนี้อาจจะผิดแผกไปจากที่เห็น ๆ กันอยู่ก็ได้ เพราะเครื่องมือสำหรับพิชิตโลกอยู่ภายในเอื้อมมือของตนที่เดียว

เมื่อสงครามโลกครั้งที่สองเกิดขึ้น วิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ได้รับการกระทบกระเทือนมาก บรรดาศาสตราจารย์ผู้เคยชินกับบรรยากาศอันเงียบสงบของมหาวิทยาลัยถูกดึงตัวเข้าไปวุ่นวาย ทำงานค้นคว้าเกี่ยวกับการป้องกันประเทศ ใครเกิดมีความคิดดี ๆ อะไรขึ้นมาก็ไม่อาจจะใช้เวลาเป็นเดือน ๆ นั่งไตร่ตรองอยู่ได้ ต้องรีบดำเนินการทันทีทันใด ใช้ความคิดนั้นให้เป็นประโยชน์ในการสงคราม แม้แต่ความคิดแผลง ๆ ก็ยังมีค่าควรแก่การพิจารณาค้นคว้า ความสำคัญกลับไปอยู่ตรงที่ให้รู้ว่าอะไรบ้างที่ใช้ไม่ได้

งบประมาณสำหรับงานค้นคว้าของมหาวิทยาลัยซึ่งเคยได้เพียงจำนวนร้อย ถีบตัวพรวดพราดขึ้นไป เป็นโครงการที่ต้องใช้เงินเป็นล้าน ๆ ดอลลาร์ นักวิจัยซึ่งแต่ก่อนเคยทำงานคนเดียว กลับต้องควบคุมคนนับเป็นร้อย ๆ ให้ทำงานร่วมกัน การแลกเปลี่ยนความคิดอ่านและความรู้ต่าง ๆ ซึ่งเคยเป็นไปโดยเสรีก็ถูกระงับ ต้องมียามถืออาวุธเฝ้าห้องทดลองอย่างกวดขัน รายงานการค้นคว้าถูกประทับตรา *"ลับ"* ด้วยหมึกแดง และเก็บรักษาในตู้นิรภัยเหล็กกล้าเนื้อหนา

ภายใต้บรรยากาศแห่งความต้องการอย่างรีบด่วนของชาติเช่นนี้ นักวิทยาศาสตร์ต้องวางมือจากการทดลองค้นคว้าขั้นมูลฐานซึ่งพวกเขารักต้องอุทิศเวลาทั้งหมดให้แก่การนำเอาความรู้ซึ่งสะสมเพิ่มพูนไว้สมัยก่อนหน้าที่สงครามจะเกิดขึ้นมาใช้ให้เป็นประโยชน์แก่การพัฒนาอาวุธ ในระหว่างสงครามนั้น ได้อาศัยผลจากการค้นคว้าโดยเสรีนับเป็นสิบ ๆ ปี และผลการทดลองอย่างหนึ่ง คือการทำให้อะตอมของยูเรเนียมแยกออกเป็นสองส่วนได้กลายเป็นโครงการซึ่งต้องใช้เงินถึงสองพันล้านดอลลาร์ ใช้นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรเป็นพัน ๆ คน ในที่สุดได้ผลออกมาเป็นระเบิดปรมาณู ซึ่งจะเป็นไปไม่ได้เลยถ้าไม่ได้อาศัยผลจากการทำงานอย่างบากบั่น และดูเหมือนจะไม่เกิดประโยชน์อะไรเลยของนักวิทยาศาสตร์เพียงไม่กี่คน และคนเหล่านี้บางคนก็มีชีวิตอยู่จนได้เห็น *"ความคิดบ้าๆบอๆ"* ของเขากลายเป็นจริงขึ้นมา

เรื่องราวของระเบิดปรมาณู เป็นเรื่องของการผจญภัยที่ยิ่งใหญ่แห่งยุคอารยะ เป็นเรื่องเกี่ยวกับนักวิทยาศาสตร์ในประเทศหลายประเทศ เป็นเรื่องของความฉลาดหลักแหลมและการวิจัยอย่างไม่ท้อถอย มีการทำการทดลองหลายแง่หลายมุม ซึ่งหลายครั้งหวุดหวิดจะสำเร็จ นักวิทยาศาสตร์เกือบ ๆ จะประสบความสำเร็จหลายต่อหลายครั้ง แต่ก็ไม่สามารถขยับต่อไปได้แม้เพียงขั้นหนึ่ง ซึ่งเป็นขั้นสุดท้ายที่สำคัญที่สุด ขั้นซึ่งจะแสดงให้เห็น

ว่าเป็นงานของคนระดับอัจฉริยะที่แท้จริง แต่นั่นแหละอัจฉริยะบุคคลก็รู้จักพลาดเหมือนกัน แม้เฟอร์มิ (Fermi) และไอน์สไตน์ก็ไม่ใช่ว่าจะถูกเสมอไป คนธรรมดาอาจจะเห็นว่า คนอย่างไอน์สไตน์หรือเฟอร์มินั้น ดูเหมือนจะเป็นผู้ทำงานด้วยปาฏิหาริย์ แต่เฟอร์มิมองปาฏิหาริย์ในแง่ที่แตกต่างจากคนอื่น เขาเห็นว่าปาฏิหาริย์นั้น ที่จริงก็คือสิ่งซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้น้อยกว่าสิบครั้งในร้อยครั้งเท่านั้นเอง

การผจญภัยที่ยิ่งใหญ่ในอดีตทั้งหลายได้เร้าให้ทั่วโลกเกิดความสนใจ เรื่องการเดินทางทางทะเลไปสู่ดินแดนที่ไม่มีใครรู้จักของโคลัมบัส วาสโก ดา กามา และ แมกเจลเลน เป็นเรื่องที่อ่านกันอย่างตื่นเต้นสนุกสนานทุกวันนี้ เราอาจใช้จินตนาการติดตามแมกเจลแลนเดินทางรอบโลก และพบสิ่งที่น่าตื่นตาตื่นใจไปกับเขาได้ไม่ยากนัก แต่การติดตามนักวิทยาศาสตร์เข้าไปสู่ดินแดนอันเร้นลับและผจญภัยกับอะตอมไม่ใช่เป็นของง่าย ทั้ง ๆ ที่เป็นเรื่องน่าตื่นเต้นยิ่งกว่าการท่องเที่ยวของนักค้นคว้าสมัยก่อนเสียอีก ในการผจญภัยนี้นักวิทยาศาสตร์ได้ล่วงล้ำเข้าไปในอาณาเขตที่ไม่มีใครรู้จัก ไม่มีมนุษย์เคยย่างกรายเข้าไปก่อนเลย เป็นอาณาเขตซึ่งสมองของมนุษย์เท่านั้นที่จะไปถึงได้ นักวิทยาศาสตร์เหล่านี้สำรวจสิ่งซึ่งไม่อาจใช้ตามองได้ ในความว่างเปล่าซึ่งลึกล้ำหยั่งไม่ถึง ซึ่งเป็นโลกชั้นในของอะตอมซึ่งมองไม่เห็น

ช่างเป็นเรื่องซึ่งท้าทายมนุษย์เสียนี่กระไร โลกใหม่ซึ่งนักวิทยาศาสตร์จะพิชิตอยู่แค่ปลายนิ้วมือเขานี่เอง ที่ว่าโลกซึ่งจับต้องไม่ได้มองไม่เห็นอยู่แค่ปลายนิ้วมือนี้ เป็นเรื่องจริง ๆ ไม่ใช่เป็นการตีสำนวนโวหาร ดินแดนอันปราศจากขอบเขตสำหรับการค้นคว้าในอนาคตอยู่ที่นี่เอง ในการทำงานค้นคว้านั้นนักวิทยาศาสตร์ผู้เป็นนักค้นคว้าแห่งศตวรรษที่ยี่สิบ จำเป็นจะต้องเป็นผู้มีจิตใจอันเพียบพร้อมไปด้วยระเบียบวินัยมากกว่าจะมีความกล้าหาญทางกาย อย่างไรก็ตามเขาต้องกล้าโต้แย้ง กล้าท้าทายความรู้ความคิดซึ่งมีอยู่ก่อนและฝ่าฟันออกไปสู่แนวทางใหม่ ๆ เขาต้องกล้าเชื่อในสิ่งซึ่งเขาจะไม่มีวันมองเห็นได้ อาวุธอันน่าเกรงขามของนักวิทยาศาสตร์เหล่านี้คือวิธีการทางวิทยาศาสตร์ อันเป็นวิธีการค้นหาความจริงโดยไม่มีอคติ ไม่ให้อารมณ์ส่วนตัวเข้าไปเกี่ยวข้อง ใช้การตั้งทฤษฎีและทำการทดลอง บางครั้งทฤษฎีก็เป็นแบบคณิตศาสตร์นำมธรรมนำหน้าการทดลองไป และบางครั้งการทดลองกลับล้ำหน้าทฤษฎีไป ให้ผลซึ่งไม่ได้คาดคิดกันมาก่อนและกระตุ้นให้ตั้งทฤษฎีใหม่ ๆ ต่อไปอีก ตลอดเวลานักวิทยาศาสตร์แต่ละคนต่างมุ่งหน้าทำงานของตนไป ในขณะเดียวกันก็ยอมรับรู้ผลงานของนักวิทยาศาสตร์คนอื่น ๆ ด้วย ไม่มีใครมั่นใจได้ว่าทำการค้นแนวไหนจึงจะได้ผล

การค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์ได้เผยให้เห็นสิ่งซึ่งน่าแปลกใจชวนให้สนเท่ห์ภายในอะตอมมากยิ่งขึ้นทุกที หน่วยย่อยของอะตอมยิ่งเล็กลงไปอีกจนแทบจะไม่น่าเชื่อ นักวิทยาศาสตร์ได้ปรับจิตใจของตนเองให้เข้ากับมิติที่เล็กกระจิริดนี้ด้วยการได้ทดลองกันมาครั้งแล้วครั้งเล่าเป็นเวลานาน เขาทำตัวให้คุ้นกับสิ่งซึ่งไม่เคยหวังที่จะมองเห็นได้ ในรูปแบบที่คุ้นเคย เช่นนักวิทยาศาสตร์วาดภาพสมมุติให้อะตอมเป็นเสมือนระบบสุริยะเล็ก ๆ นิวเคลียสหรือแก่นของอะตอมเปรียบได้กับดวงอาทิตย์ รอบ ๆ นิวเคลียสคืออนุภาคซึ่งยิ่งเล็กและเบากว่าอะตอมเรียกว่าอีเล็กตรอน อันเปรียบได้กับดาวเคราะห์บริวารซึ่งโคจรรอบดวงอาทิตย์ นักวิทยาศาสตร์รู้ว่าภาพนี้เป็นภาพอย่างคร่าว ๆ เต็มที แต่ก็นับว่าเป็นรูปแบบที่มีประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้า ในเมื่อต้องการที่จะอธิบายถึงสิ่งเล็ก ๆ เช่นอะตอมนี้

ขอให้เราลองพิจารณาขนาดของอะตอมอย่างเล็กที่สุด เราไม่สามารถวัดอะตอมตามวิธีสามัญ ๆ แบบที่แม่บ้านใช้ไม้บรรทัดวัดม่านหน้าต่างได้ ถ้าท่านใช้ไมโครมิเตอร์แบบละเอียดท่านอาจวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดโลหะอะไรหลอดหนึ่ง ได้จนถึงเศษหนึ่งส่วนพันของนิ้ว หรือยิ่งไปกว่านั้น ท่านอาจจะวัดความหนาของกระดาษแผ่นนี้ได้อย่างง่ายดาย แต่ท่านไม่อาจที่จะวัดอะไรซึ่งเล็กไปกว่านี้ได้อีกแล้ว ถึงแม้จะใช้เครื่องมือที่แม่นยำละเอียด

อ่อนอย่างไมโครมิเตอร์ เพราะความขรุขระของไมโครมิเตอร์เอง เป็นอุปสรรคแก่การวัดของท่าน ดังนั้นถ้าต้องการจะวัดอย่างละเอียดขึ้นไปอีกต้องเลิกใช้เครื่องวัด เนื่องจากหยาบเกินไป และหันไปใช้วิธีซึ่งแตกต่างออกไปที่ละเอียดกว่า

บางครั้งเราอาจใช้แสงในการวัดได้ เรารู้ว่าเราอาจขยายอนุภาคซึ่งเล็กมาก เช่น ผุ่น ให้โตได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำให้ตามองเห็นได้ ข้อสำคัญที่เราต้องระลึกก็คือแสงนั่นเอง ที่ทำให้มองเห็นอนุภาคซึ่งถูกขยายให้โตแล้วได้ ทำให้เราวัดมันได้ หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ ผุ่นหรือเม็ดทราย หรือเม็ดเลือด หรือปอยผม ก็ถูกขยายให้โตได้ด้วยแสงของดวงอาทิตย์หรือหลอดไฟฟ้า สัมผัสผงผุ่นให้เราเห็นขนาดได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ การใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นการวัดทางแสง แทนการวัดแบบซึ่งต้องอาศัยการจับต้องโดยใช้ไมโครมิเตอร์

แม้แต่การวัดสิ่งเล็ก ๆ โดยใช้แสงก็ยังมีขอบเขตจำกัด และขอบเขตจำกัดนี้เกิดจากคุณสมบัติตามธรรมชาติของแสงเอง แสงที่ได้จากดวงอาทิตย์ หรือจากหลอดไฟฟ้าที่เรามองเห็นได้ เรียกว่าเป็นแสง "*สีขาว*" ถ้าเราให้ลำแสง "*สีขาว*" นี้ผ่านแท่งแก้วปริซึม เราจะเห็นแสงแยกออกเป็นแถบสีต่าง ๆ เราเรียกแถบสีนี้ว่าสเปคตรัม ถ้าพิจารณาสีของสเปคตรัมอย่างละเอียดแล้ว จะเห็นว่าประกอบด้วยสี แดง ส้ม เหลือง เรื่อยไปจนถึงน้ำเงินแกมเขียว

และสีม่วง พูดง่าย ๆ ก็คือ ตาคนไม่อาจมองเลยไปกว่าสีแดงทางริมหนึ่งของสเปคตรัม และสีม่วงทางอีกริมหนึ่งของสเปคตรัมได้ แต่นี่ก็ไม่ได้หมายความว่า เลยสองข้างนั้นไปแล้วไม่มีอะไร เพียงแต่ว่าตาเราไม่มีความรู้สึกต่อสีอื่น ๆ เท่านั้น ตรงนี้เป็นจุดสำคัญที่ต้องย้ำ ตามความรู้สึกของเรานั้นโลกเป็นอย่างที่เราเห็น แต่ในการเห็นนี้เรามองด้วยตาซึ่ง สามารถที่จะ รับรู้ สเปคตรัมได้อย่างจำกัดเท่านั้น

เราพอจะรู้จากประสบการณ์ทั่ว ๆ ไปว่า ยังมีแสงสีอื่นซึ่งมองไม่เห็นทั้งสองข้างของสเปคตรัม ลวดของเตาไฟฟ้าซึ่งร้อนจัดจะส่งแสงแดงเรื่อ ให้แสงซึ่งเรามองเห็น ครั้นเราปิดไฟ ลวดจะหยุดส่งแสง แต่เราก็ยังคงรู้สึกว่าลวดส่งความร้อนออกมาหลังจากแสงหายไปแล้วตั้งนาน กล่าวคือมีรังสีเลยสีแดงของสเปคตรัมออกมา ชื่อที่ถูกต้องของรังสีนี้คือ รังสีอินฟราเรด ซึ่งตามองไม่เห็นแต่ผิวหนังรู้สึกได้ เหนือสีม่วงขึ้นไปอีกข้างหนึ่งของสเปคตรัมก็มีรังสีซึ่งตามองไม่เห็น แต่ผิวหนังรู้สึกได้ เช่นเดียวกัน รังสีนี้เองที่ทำให้เกิดอาการแสบร้อน เมื่อถูกแดดเผาตอนอยู่ที่ชายหาด

สเปคตรัมของสีต่าง ๆ เป็นเรื่องที่นักวิทยาศาสตร์ศึกษากันนับเป็นปี ๆ และการศึกษานี้ทำให้ได้ความรู้เกี่ยวกับธรรมชาติของอะตอมมาก ซึ่งเราจะได้เห็นกันตอนหลัง หลังจากเริ่มศึกษาแล้ว

ไม่นานนักวิทยาศาสตร์พบว่าแสงมีธรรมชาติเป็นคลื่น ซึ่งหมายความว่าเราอาจอธิบายคุณสมบัติของแสงหลายประการได้ โดยการสมมุติว่าแสงมีความเป็นไปเหมือนอย่างที่คลื่นเป็น เมื่อเราโยนก้อนกรวดลงไปในน้ำนิ่ง จะเกิดคลื่นขึ้นเป็นระลอกซึ่งเป็นวงกลมแผ่กระจายกว้างออกไปทุกที ๆ และถ้าเราถ่ายรูปคลื่นนี้จะเห็นได้ว่ามียอดคลื่นและระลอกคลื่นอย่างชัดเจน ระยะทางจากยอดคลื่นหนึ่งถึงยอดคลื่นถัดไปเราเรียกว่าความยาวคลื่น นอกจากคลื่นน้ำแล้วก็ยังมีคลื่นเสียงในอากาศ คลื่นอันเกิดจากการสั่นสะเทือนในวัตถุ และคลื่นแสง

นับจากรังสีอินฟราเรดทางข้างหนึ่งของสเปคตรัม ไปยังรังสีเหนือม่วงทางอีกข้างหนึ่ง ความยาวของคลื่นแสงจะสั้นลงตามลำดับ ยิ่งแสงมีช่วงความยาว คลื่นสั้นก็ยิ่งใช้ในการวัดได้ละเอียดขึ้น เราอาจใช้กล้องจุลทรรศน์ซึ่งใช้รังสีเหนือม่วง อันมีช่วงความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงธรรมดา อนุภาคที่เล็กเกินกว่าที่จะวัดขนาดด้วยแสงธรรมดาได้ ข้อสำคัญที่ต้องการให้เข้าใจตอนนี้ก็คือ ยิ่งอนุภาคที่ต้องการวัดเล็กลง เครื่องมือที่จะใช้วัดต้องยิ่งละเอียดขึ้น

ถ้าถามว่าจะสร้างกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งมีอำนาจในการขยายสูงยิ่งไปกว่ากล้องซึ่งใช้รังสีเหนือม่วงได้ไหม คำตอบก็คือสร้างได้ แต่จำต้องใช้สิ่งซึ่งมีความยาวคลื่นช่วงสั้นลงไปอีก เราลองมาพิจารณาถึงอีเล็กตรอนซึ่งเป็นสิ่งเล็กที่สุดที่มีประจุไฟฟ้า หรือเป็น

"*ห่อ*" พลังงานไฟฟ้าอันเล็กแสนเล็ก อีเล็กตรอน คือส่วนเล็กที่สุดของสารซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ บางประเภทเรียกว่าเป็นอีเล็กตรอนที่ถูกขับยึดไว้ อีเล็กตรอนพวกนี้เป็นส่วนประกอบของอะตอมทั้งหลาย และยังมีอีเล็กตรอนอีกเป็นจำนวนมากมายเหลือคณานับซึ่งเป็นอีเล็กตรอนอิสระมีอยู่ทั่ว ๆ ไปทุกหนทุกแห่ง อีเล็กตรอนพวกหลังนี้ถูกมนุษย์นำมาใช้เป็นประโยชน์หลายต่อหลายทางด้วยกัน เช่น ใช้เป็นกระแสไฟฟ้า ใช้ในหลอดวิทยุ ในหม้อไฟฟ้า ในเครื่องฟังเสียง ในหลอดโทรทัศน์ เป็นต้น ในหลอดโทรทัศน์นั้น อีเล็กตรอนออกมาจากไส้โลหะทังสเตนซึ่งมีอุณหภูมิสูงเคลื่อนที่ไปอย่างรวดเร็ว ในหลอดโทรทัศน์ซึ่งเป็นหลอดสุญญากาศขนาดใหญ่ ภายใต้อำนาจของความต่างศักดาไฟฟ้าซึ่งสูงมาก เมื่ออีเล็กตรอนแต่ละตัวกระทบฉากเรืองแสง จะทำให้เกิดแสงเรืองเป็นจุดเล็ก ๆ ขึ้น อีเล็กตรอนเหล่านี้เป็นประตุจกระสุนเล็ก ๆ ภายในช่วงระยะเวลาเพียงหนึ่งในล้านวินาที มีอีเล็กตรอนเป็นจำนวนล้านล้านล้านตัวเคลื่อนที่อยู่ในหลอดโทรทัศน์ ตัวเลขนี้คงพอจะทำให้เรานึกออกว่าอีเล็กตรอนเล็กสักแค่ไหน

ดูเผิน ๆ แล้วอาจจะเห็นว่าอีเล็กตรอนไม่มีประโยชน์สำหรับกล้องจุลทรรศน์เพราะเป็นอนุภาคไม่ใช่คลื่น อย่างไรก็ตามเป็นที่รู้กันว่า อนุภาคซึ่งเป็นของแข็งก็มีสภาพความเป็นคลื่นด้วยเหมือนกัน ตามธรรมดาวัตถุโต ๆ จะไม่แสดงคุณสมบัติแห่งความ

เป็นคลื่นออกมา เราจะพยายามพิสูจน์ให้เห็นก็ไม่ได้ แต่สำหรับอนุภาคเล็ก ๆ แล้วสภาพความเป็นคลื่นกลับมีความสำคัญมาก เรารู้ว่าอีเล็กตรอนเล็กมากเหลือเกินและทำตัวเหมือนกับคลื่น ดังนั้นเราอาจกำหนดให้ลำอีเล็กตรอนมีความยาวคลื่นเฉพาะตัวขนาดหนึ่งซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของมัน ยิ่งความเร็วสูงช่วงความยาวคลื่นจะยิ่งสั้น แม้อีเล็กตรอนซึ่งมีความเร็วปานกลางก็ยังมีช่วงความยาวคลื่นสั้นกว่ารังสีเหนือม่วง

กล้องจุลทรรศน์อีเล็กตรอนได้รับการพัฒนาอย่างถึงขนาดที่ขยายวัตถุได้ตั้งแสนเท่า เราอาจถ่ายภาพไวรัสได้อย่างชัดเจนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อีเล็กตรอน แม้แต่โครโมโซมของเซลเพศซึ่งมีรูปร่างคล้ายเส้นด้ายก็ถ่ายภาพได้เช่นเดียวกัน โครโมโซมเหล่านี้เป็นตัวกำหนดกรรมพันธุ์ของพืช สัตว์ และมนุษย์ แต่ตัวโครโมโซมซึ่งเล็กมากแล้วนี้ก็ยังสลับซับซ้อนประกอบด้วยหน่วยที่เล็กลงไปอีกนับเป็นพันหน่วยซึ่งเรียกว่า ยีน กล้องที่ขยายได้มากที่สุด ก็ยังไม่อาจทำให้มองเห็นยีนนี้ได้ แต่การทดลองต่าง ๆ ของนักผสมพันธุ์ ทำให้เรารู้ว่ามันมีอยู่ ยิ่งไปกว่านั้นยีนซึ่งมองไม่เห็นนี้ยังประกอบขึ้นด้วยหน่วยซึ่งเล็กย่อยลงไปอีก เช่น โปรตีนต่าง ๆ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับชีวิต

นักเคมีผู้ทำการศึกษาธรรมชาติของโปรตีนได้พบว่า โปรตีนเองก็เป็นสิ่งซึ่งสลับซับซ้อนอย่างยิ่ง ร่างกายคนเราประกอบด้วย

โปรตีนต่าง ๆ หลายพันชนิด แต่ละชนิดมีโครงสร้างผิดแผกกันไป และต่างก็มีหน้าที่เฉพาะตัวในการทำงานของเซล แท้จริง โปรตีนคือโมเลกุลใหญ่ ๆ ที่สลับซับซ้อนมากและประกอบด้วยส่วนย่อยลงไปอีกที่เรียกว่ากรดอมิโน ตัวอย่างเช่นโมเลกุลของอินซูลินซึ่งทำจากตับวัว ประกอบด้วยกรดอมิโนห้าสิบเอ็ดกลุ่ม แต่ละกลุ่มประกอบด้วยส่วนที่เล็กลงไปอีกคืออะตอม โมเลกุลของเฮโมโกลบิน (เซลเลือดสีแดง) ประกอบด้วยอะตอมเกือบหมื่นอะตอม

เราจะพูดถึงสิ่งต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดเล็กมากแต่เพียงเท่านี้ก่อน ภายหลังจึงค่อยกลับมาพิจารณาอะตอมให้ละเอียดขึ้นไปอีก คือจะคำนวณขนาดของมัน และดูว่ามีอะไรอยู่ข้างในบ้างเท่าที่ได้กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับสิ่งที่เล็กลงไปเรื่อย ๆ นั้น หากเข้าใจได้ยากในตอนแรก ๆ ก็เป็นเพราะเมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมแล้วตัวเราโตเกินไป ไม่ใช่อะตอมเล็กเกินไป และเราไม่คุ้นเคยกับโลกอันแสนเล็กนี้ การเปรียบเทียบต่อไปนี้อาจจะทำให้เกิดความเข้าใจขึ้นบ้าง คือถ้านั่งเครื่องบินขึ้นไปสูง ๆ แล้วมองลงมายังบริเวณเมืองใหญ่ ๆ สักเมืองหนึ่ง เช่น มองลงมาจากที่สูงสักสิบไมล์ไปยังบริเวณจากมุมทางเหนือของวอชิงตัน ดี.ซี. ไปจดเมาท์ เวอร์นอน ซึ่งเคยเป็นที่อยู่ของ ยอร์ช วอชิงตัน จะเห็นตึกรามในเมืองเป็นกลุ่ม ๆ เรามองเห็นอาคารแต่ละกลุ่มแต่ไม่อาจแยกอาคารแต่ละอาคารจากกัน

ได้ แม้เราจะรู้ว่ามันอยู่ที่นั่น ในบ้านแต่ละหลังยังมีห้องอีกหลายห้อง มีคนหลายคน และมีวัตถุสิ่งของหลายอย่าง นครใหม่ ๆ ที่ทันสมัยมักจะมีสิ่งต่าง ๆ อยู่อย่างเป็นระเบียบ โดยนัยเดียวกัน ภาพขยายของโลกแห่งอะตอมซึ่งเราสัมผัสไม่ได้มองไม่เห็นนี้ ก็เป็นสิ่งสลับซับซ้อนมีระเบียบแบบแผนอย่างสวยงาม หนังสือนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะอธิบายว่านักวิทยาศาสตร์ *"เห็น"* อะไรในโลกอันเล็กมากนี้ และความวิจิตรงดงามกลมกลืนเหมาะสมในโลกนั้น

๒

ดร.เรินท์เกนค้นพบรังสีเอกซ์

ถ้าเรามองประวัติศาสตร์ย้อนหลังไป เพื่อหาว่ายุคปรมาณูเริ่มต้นที่ไหน จะเห็นว่าเราอาจเริ่มที่การทดลองของศาสตราจารย์วิชาฟิสิกส์ผู้มีเรือนร่างสูง ท่าทางคงแก่เรียน หนวดเคราขาว อาศัยอยู่ในเมืองวีร์ซบวร์ก มณฑลบาวาเรีย ตอนปลาย ค.ศ. ๑๘๙๕

ตอนที่ ดร. วิลเฮล์ม คอนราด เรินท์เกน หันมาสนใจปัญหาซึ่งทำให้เขาเกิดความสนเท่ห์มาเป็นเวลานานไม่น้อยแล้วนั้น เขามีอายุได้ ๕๐ ปี เขาอยากรู้ว่าจะเกิดอะไรขึ้นถ้าผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในหลอดแก้วซึ่งบีดสนิท และอากาศภายในถูกสูบออกจนเกือบหมด ถ้าจะใช้ภาษาวิชาการก็อาจกล่าวว่า เขาทำการทดลองให้กระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ เพราะอากาศซึ่งประกอบด้วยออกซิเยนและไนโตรเยนก็คือก๊าซนั่นเอง ในการทดลองนี้เขาใช้ภาชนะแก้วค่อนข้างโต รูปร่างเหมือนลูกแพร์ซึ่งเรียกกันว่าหลอดเลนเนาร์ด ในหลอดนี้มีขั้วโลหะหรือตัวนำไฟฟ้า ๒ ขั้ว เชื่อมติดอยู่ (ขั้วหนึ่งเรียกคะโทดหรือขั้วลบ และอีกขั้วหนึ่งเรียกแอโนดหรือขั้วบวก) และมีลวดต่อจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงมายังขั้วทั้งสอง ความจริงเรินท์เกนไม่ใช่เป็นคนแรกที่ทำการทดลองโดยใช้หลอดชนิดนี้ นักวิทยาศาสตร์หลายสิบคนเคยทดลอง

ผ่าน กระแส ไฟฟ้า เข้าไปใน หลอดแบบ เดียวกันมา แล้วตั้ง หลายปี ก่อนหน้าที่จะถึงการทดลองของเรินท์เกน ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป จากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์เหล่านี้ และการทดลองของเขาเอง เรินท์เกน รู้ว่าถ้าสูบอากาศออกจากหลอดทำให้เกิดสูญญากาศอย่างเลว คือเอาอากาศออกเสียจนเหลือเพียงหนึ่งในพันส่วน ของจำนวนเดิมแล้ว เมื่อผ่าน กระแส ไฟฟ้าเข้าไปในหลอด จะเกิดแสงสว่างไสวสีชมพูค่อนข้างสวยงามอยู่ทั่ว ๆ ไป และถ้าทำให้ความดันต่ำลงไปอีกโดยสูบเอาอากาศออกอีก แสงสีชมพูนั้นจะหายไป เกิดเป็นแสงสีน้ำเงินอ่อน ๆ ขึ้นมาแทนที่แผ่กระจายจากขั้วหนึ่งไปจนถึงอีกขั้วหนึ่ง ทั้งแสงสีชมพูและสีน้ำเงินนี้เกิดจากการที่อีเล็กตรอนผ่านเข้าไปในหลอดและปะทะกับอากาศซึ่งเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย ถ้าให้ความดันต่ำลงไปอีก แสงสีน้ำเงินนั้นจะหายไปด้วย เนื่องจากอากาศ (คืออะตอมของก๊าซ) มีอยู่น้อยไม่พอให้อีเล็กตรอนปะทะ

แต่ถึงแม้จะสูบเอาอากาศออกให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในหลอดก็ยังทำให้เกิดผลที่น่าสนใจ คือปลายหลอดข้างที่มีขั้วไฟฟ้าเชื่อมติดอยู่ให้แสงสลัว ๆ สีเขียว แสงเรืองสีเขียวนี้ เกิดจากการที่อีเล็กตรอนซึ่งมีความเร็วสูงปะทะกับเนื้อแก้ว

บ่ายวันศุกร์ที่ ๘ พฤศจิกายน ๑๘๙๕ นับว่าเป็นวันสำคัญวันหนึ่งในประวัติศาสตร์ของการค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์ หลังจากรับประทานอาหารกลางวันกับภรรยาแล้ว เรินท์เกนรีบกลับไปยังห้องทำงานเพื่อทำการทดลองอีกอย่างหนึ่ง ห้องทดลองของเรินท์เกนเป็นห้องชั้นล่าง เมื่อมองออกไปทางหน้าต่างจะเห็นสวนดอกไม้สวยงาม เขาทำงานคนเดียว ในห้องมีตู้ซึ่งเขาเก็บหลอดรูปร่างต่าง ๆ หลอดนี้เรินท์เกนเรียกหลอดดิสชาร์จ คนอื่น ๆ เรียกว่าหลอดเลนนาร์ดบ้าง หลอดครุกส์บ้าง ตามชื่อนักวิทยาศาสตร์ผู้ประดิษฐ์หลอดขึ้นมา ในระยะนั้นเรินท์เกนกำลังทำการทดลองโดยใช้หลอดเลนนาร์ด ซึ่งมีช่องที่ปิดไว้ด้วยแผ่นอลูมิเนียม แผ่นอลูมิเนียมนี้บางมากจนอีเล็กตรอนความเร็วสูงหรือรังสีคะโทด ซึ่งเกิดในหลอดผ่านออกสู่อากาศข้างนอกได้ เขาสนใจรังสีเหล่านี้มาก อย่างไรก็ตามเย็นวันนั้นเขาใช้หลอดดิสชาร์จซึ่งทำด้วยแก้วหนา และช่วงอลูมิเนียมที่เคยมีก็เอากระจกปิดไว้อย่างสนิทไม่ให้รังสีคะโทดผ่านได้ แถมห่อหลอดด้วยกระดาษแข็งอย่างมิดชิด ไม่ให้แสงจากหลอดเล็ดลอดออกมาได้

ต่อไปเขาปิดม่านหน้าต่าง จัดการให้เป็นที่แน่ใจว่าห้องมืดสนิท เมื่อสายตาคุ้นกับความมืดดีแล้ว เรินท์เกนก็ควานหาสวิทช์ด้วยความเคยชินมานาน พบแล้วก็เปิดสวิทช์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งให้โวลเตจสูง ไม่มีแสงลอดออกมาจากหลอดที่คลุมไว้นั้นเลย

ทันใดนั้นเขาเหลือบไปเห็นแสงเรืองสีน้ำเงินวับ ๆ แวม ๆ ห่างจากหลอดราว ๆ สามฟุต ซึ่งนับว่าเป็นเรื่องประหลาดมาก เขาปิดสวิทซ์ทันที โดยแทบไม่ต้องคิดและแสงนั้นก็หายไป แต่เมื่อเขาให้โวลเตจแก่หลอดอีกครั้งหนึ่งแสงนั้นก็ปรากฏขึ้นอีกทันที เป็นที่แน่นอนว่า ไม่ว่าแสงนั้นจะเป็นอะไรก็ตาม ต้องมีสาเหตุมาจากหลอดของเขา เรินท์เกนจุดไม้ขีดไฟส่องหาต้นตอของแสงนั้น และพบว่ามันมาจากกระดาษแข็งแผ่นหนึ่ง ซึ่งเขาใช้ในการทดลองก่อนหน้านั้น กระดาษนั้นเคลือบด้วยสารเคมีชื่อแบเรียม พลาติโนไซยาไนด์ การที่มันส่งแสงได้ทั้งที่อยู่ไกลจากหลอดคิสชาร์จนั้นเป็นการประหลาดมาก

เมื่อเรินท์เกนเอากระดาษแข็งแผ่นนั้นเข้าใกล้หลอดคิสชาร์จเข้าไปอีกก็พบว่า ตอนนี้มันเรืองแสงสว่างไสว เห็นได้อย่างชัดเจนว่าจะต้องมีอะไรสักอย่าง รังสีบางชนิดออกมาจากหลอดทำให้ผลึกสารเคมีซึ่งเคลือบกระดาษส่งแสงระยิบระยับ นักทดลองที่มีประสบการณ์น้อยกว่านี้ อาจจะไม่เอาใจใส่ต่อผลที่เกิดขึ้น แต่เรินท์เกนสำนึกได้ทันทีว่า รังสีหรืออะไรก็ตามนี้มีคุณสมบัติแปลกมาก คือไม่เพียงผ่านผนังแก้วของหลอดและกล่องกระดาษแข็งซึ่งหุ้มหลอดอยู่ได้เท่านั้น ยังผ่านทะลุความหนาของหนังสือ ที่เขาเอาไปวางขวางระหว่างหลอดกับแผ่นกระดาษ ซึ่งเคลือบด้วยผลึกสารเคมีนั้นได้

ความลึกลับของรังสีประหลาดเกิดขึ้นใน หลอดและสามารถผ่านวัตถุทึบ ทำให้ผลึกแบเรียมเรืองแสงได้นั้น กระตุ้นความสนใจของเรินท์เกนเป็นอย่างยิ่ง เขาตั้งชื่อรังสีซึ่งยังไม่มีใครรู้จักนี้เลยอย่างเหมาะสมว่า *"รังสีเอกซ์"* (X-rays)

ตอนนี้เรินท์เกนหมกมุ่นอยู่กับการค้นคว้าเกี่ยวกับรังสีเอกซ์อย่างไม่ลืมหูลืมตา เขาทำงานอยู่คนเดียว ทำการทดลองต่อเนื่องกันไป และเมื่อสิ้นปีนั้นเขาก็มีความรู้เกี่ยวกับรังสีเอกซ์มากมาย เขาพบว่ารังสีเอกซ์มีปฏิกิริยาต่อฟิล์มถ่ายรูปคือทำให้ฟิล์มดำ เขาห่อฟิล์มถ่ายรูปด้วยกระดาษสีดำเพื่อไม่ให้แสงแดดเข้าได้ วางดอกกุญแจโลหะบนห่อนั้นแล้วเอาไปรับรังสีเอกซ์ เมื่อเอาฟิล์มไปล้างก็พบว่ามีภาพของกุญแจอยู่ที่ฟิล์ม คือรังสีเอกซ์ทำให้ฟิล์มกลายเป็นสีดำหมด ยกเว้นตรงที่ซึ่งกุญแจวางอยู่ ซึ่งรังสีไปไม่ถึง รังสีถูกทำให้หยุดหรือถูกดูดกลืนโดยโลหะซึ่งใช้ทำกุญแจ

ภาพถ่ายกุญแจโดยรังสีเอกซ์ทำให้เรินท์เกนทึ่งมาก ต่อไปเขาเอาปืนกระบอกซึ่งเขารักมากออกมาถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ และพบว่ารายละเอียดของส่วนที่ทำด้วยโลหะปรากฏอย่างชัดเจน การทดลองนี้นับว่าเป็นการเริ่มต้นวิชาถ่ายรูปเพื่อการอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการใช้รังสีเอกซ์ตรวจสอบหาสิ่งบกพร่องภายในโครงสร้างของเครื่องจักร

เรินท์เกนไม่พอใจที่จะถ่ายแต่ภาพสิ่งไม่มีชีวิต เขาขอให้ภรรยาช่วยในการทดลองอย่างหนึ่ง คือเอากระดาษห่อฟิล์มถ่ายรูปวางใต้มือของนาง แล้วใช้รังสีเอกซ์จากหลอดของเขาส่องเป็นเวลานานสิบห้านาที เมื่อเอาฟิล์มไปล้างพบว่ารูปกระดูกนิ้วมือปรากฏอย่างชัดเจนอยู่ภายในรูปมือ ซึ่งพอมองเห็นเป็นรูปเป็นร่างแต่ไม่ค่อยชัด แสดงว่ากระดูกยอมให้รังสีผ่านได้น้อยกว่าส่วนที่เป็นเนื้อ รูปแหวนแต่งงานของเธอเห็นเด่นชัดที่สุดเพราะทองดูดกลืนรังสีได้หมด การทดลองนี้เป็นจุดริเริ่มศักราชใหม่ของการวิเคราะห์โรค เป็นการเริ่มต้นวิชารังสีวิทยา

เรินท์เกนยังได้พบอีกสิ่งหนึ่งซึ่งมีความสำคัญต่อความอยู่ดีกินดีของมนุษย์ยิ่งขึ้นไปอีก เขาใช้แผ่นกระดาษแข็งซึ่งฉาบด้วยผลึกของแบเรียมเป็นฉาก เอาฉากนี้เลื่อนเข้าไปวางใกล้ๆ หลอดรังสีเอกซ์ แล้วเอามือสอดเข้าไปอยู่ระหว่างหลอดกับฉาก เขาสามารถมองเห็นเงาของโครงกระดูกบนฉากได้ และเมื่อเขาขยับนิ้วก็เห็นเงาของกระดูกนิ้วเคลื่อนที่

เขาบันทึกไว้ว่า *"ถ้าชูมือไว้หน้าจอเรืองแสงจะเห็นเงามืดของกระดูก ส่วนรูปร่างของเนื้อรอบๆ กระดูกเห็นเพียงลางๆ เท่านั้น"* ตามที่ได้กล่าวมาบ้างแล้ว เราอธิบายปรากฏการณ์นี้ว่าเมื่อรังสีเอกซ์กระทบผลึกแบเรียมและผลึกสารอื่นๆ บางอย่าง จะเกิดแสงวูบวาบ คือผลึกเหล่านี้ดูดกลืนพลังงานจากรังสี

เอกซ์ แล้วส่งออกมาในรูปรังสีซึ่งมองเห็นด้วยตา ฉากซึ่งเคลือบด้วยผลึกนี้จะส่องแสงมากหรือน้อย แล้วแต่ความเข้มของรังสีเอกซ์ซึ่งไปปะทะ กระดูกมีความหนาแน่นมากจึงกันรังสีเอกซ์ไว้ได้มาก ทำให้เกิดเงามืดบนฉาก ส่วนเนื้อดูดกลืนรังสีได้น้อยกว่า ทำให้เกิดเงาซึ่งสว่างกว่าและมีสีน้ำเงินแกมเขียวเจือปนอยู่ด้วย ฉากเรืองแสงของเรินท์เกนได้กลายมาเป็นฟลูออโรสโคปรังสีเอกซ์ในปัจจุบันซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีคุณค่ามากในการตรวจร่างกายคน

ถึงแม้การเอารังสีเอกซ์ไปใช้ให้เป็นประโยชน์เป็นสิ่งสำคัญ แต่เรินท์เกนก็สนใจคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งที่เขาค้นพบมากกว่า เมื่อเขาปิดประตูขังตัวเองอยู่ในห้องทดลอง เขาจะหมกมุ่นอยู่กับการพยายามที่จะทำความเข้าใจเกี่ยวกับรังสีเอกซ์ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยไม่สนใจกับโลกภายนอก บางครั้งถึงกับลืมรับประทานอาหาร และบางครั้งก็นอนค้างอยู่ในห้องทดลองเสียเลย ตอนราว ๆ ปลายเดือนธันวาคม เขาได้รวบรวมข้อมูลและเขียนรายงาน เสนอต่อสมาคมวิทยาศาสตร์การแพทย์แห่งเมืองวีร์ซบวร์ก รายงานของเขาซึ่งมีชื่อเรื่องว่า *"รังสีชนิดใหม่"* เสนอผลค้นคว้าเกี่ยวกับคุณสมบัติของรังสีเอกซ์ ๑๗ ข้อ ซึ่งยังไม่เคยมีการค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์ที่มีความสำคัญพอ ๆ กันและเป็นผลงานของคน ๆ เดียวโดยสิ้นเชิงอย่างนี้มาก่อนเลย

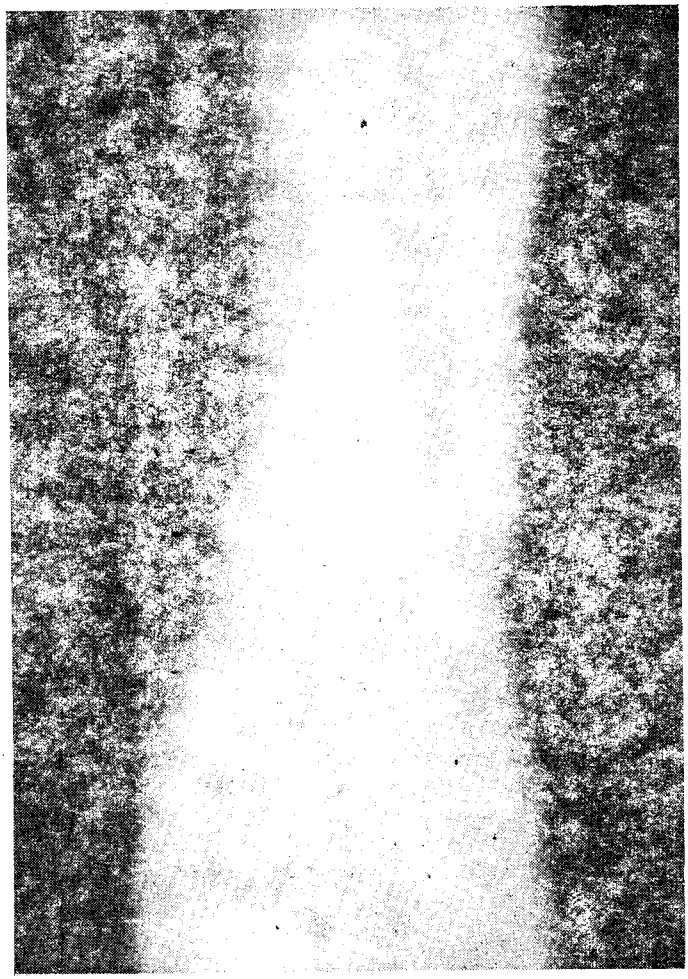
รายงานนี้ซึ่งลงวันที่ ๒๘ ธันวาคม ๑๘๙๕ ไม่ได้แพร่ไปสู่โลกภายนอกเมืองวีร์ซบวร์กในทันที แต่เรินท์เกนได้ส่งรูปซึ่งถ่ายด้วยรังสีเอกซ์เจ็ดรูปไปให้เพื่อนเจ็ดคน เพื่อนคนหนึ่งในเจ็ดคนนี้ ได้เล่าเรื่องการค้นพบนี้แก่นักหนังสือพิมพ์และเมื่อวันที่ ๕ มกราคม เรื่องราวของการค้นพบรังสีเอกซ์ก็ปรากฏในหน้าหนังสือพิมพ์เวียนนา เพรสส์ นับว่าเป็นเรื่องที่ก่อให้เกิดความตื่นเต้นกันมาก และในชั่วข้ามคืนผู้ค้นพบรังสีเอกซ์ก็มีชื่อเสียงโด่งดังไปทั่วโลก เรินท์เกนไม่ต้องการเช่นนี้เลยเพราะตลอดชีวิตของเขาเขาไม่ชอบเป็นข่าว เขาเคยบรรยายเรื่องรังสีเอกซ์ต่อสาธารณชนเพียงสองครั้งเท่านั้น

นักวิทยาศาสตร์อื่นๆ อีกหลายคนจะต้องตกตะลึงทีเดียวเมื่อรู้เรื่องการค้นพบของเรินท์เกน ไม่ต้องสงสัยเลยว่านักวิจัยคนอื่นๆ ได้ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ขึ้นโดยไม่รู้ตัว ในการใช้เครื่องมือคล้ายๆ เรินท์เกน เซอร์ วิลเลียม ครุกส์ (Sir William Crookes) นักวิทยาศาสตร์ผู้ยิ่งใหญ่ ชาวอังกฤษ ได้ใช้หลอดแบบเดียวกันและเกิดความรำคาญ เมื่อฟิล์มถ่ายรูปซึ่งเก็บไว้ในห้องทดลองเสียไปหมด เขาส่งฟิล์มคืนไปยังบริษัทผู้จำหน่ายห่อแล้วห่อเล่า พร้อมทั้งอุทธรณ์ว่าฟิล์มเหล่านั้นชำรุด เราพอจะเดาได้ว่าถ้าเซอร์ วิลเลียม เผอเรอทิ้งกุญแจบ้านไว้บนห่อฟิล์ม

นั่นเอง ทุกวันนี้เขาอาจจะได้รับการยกย่อง ว่าเป็นผู้ค้นพบรังสีเอกซ์ก็ได้

จะว่าการค้นพบของเรินท์เกนไม่มีผลสืบเนื่องมาจากงานของคนอื่นก็ไม่ถูกนัก ราว ๆ ยี่สิบปีก่อน ที่เรินท์เกนจะค้นพบรังสีเอกซ์นั้น นักฟิสิกส์ชื่อ โจฮันท์ ฮิททอร์ฟ (Johann Hittorf) ได้ทำการทดลองโดยใช้หลอดดิสชาร์จแบบเดียวกัน และการที่เรินท์เกนหันมาสนใจในแสงเรืองสีเขียว ซึ่งเกิดขึ้นที่ช่องกระจกและข้าง ๆ หลอดก็เนื่องมาจากงานค้นคว้าของนักวิทยาศาสตร์ชาวฮังการี ชื่อ ฟิลลิป เลนนาร์ด (Phillip Lenard)

เมื่อการค้นพบของเรินท์เกนถูกประกาศออกมา นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกก็พากันเข้าใจ ในความสำคัญของมัน อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามประชาชนคนธรรมดากลับตื่นกลัว หนังสือพิมพ์เช้าของอังกฤษชื่อ แสตนดาร์ด ลงเรื่องเกี่ยวกับรังสีเอกซ์ ในฉบับประจำวันที่ ๗ มกราคม ๑๘๙๖ ทำให้ประชาชนซึ่งไม่เข้าใจรังสีชนิดใหม่นี้พากันตกใจ เมืองหนึ่งถึงกับออกกฎหมายห้ามใช้กล้องรังสีเอกซ์ โดยอ้างว่ากลัวจะถูกนำไปใช้ล่วงล้ำในความลับส่วนตัวของบุคคล



รูปที่ ๑ ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ภาพแรก แสดงให้เห็นกระดูกหัก
(Courtesy the University of California Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley.)

การที่รังสีเอกซ์สามารถ *"มองเข้าไปข้างใน"* ร่างกายมนุษย์ได้นั้นไม่ได้ทำให้บรรดานายแพทย์พากันท้อแท้เลย กลับยินดีรับเอารังสีนี้ไว้เป็นเครื่องมือใหม่ซึ่งมีประโยชน์มากในการวินิจฉัยโรค เท่าที่ทราบกันนั้นมีการใช้รังสีเอกซ์ให้เป็นประโยชน์เป็นครั้งแรกในสหรัฐอเมริกา เมื่อวันที่ ๓ กุมภาพันธ์ ๑๘๙๖ คือ ศาสตราจารย์ที่วิทยาลัยดาร์ทมัธสองคน ถ่ายภาพรังสีเอกซ์ของแขนผู้ชายคนหนึ่งเพื่อดูรอยหัก หลอดที่ใช้คราวนั้นให้รังสีเอกซ์อย่างอ่อนมากจนต้องฉายรังสีอยู่นานถึงยี่สิบนาที เพื่อที่จะให้เกิดภาพชัด

ปัจจุบันนี้รังสีเอกซ์มีประโยชน์ต่อชีวิตมาก เป็นเครื่องช่วยเหลือแพทย์อันล้ำค่าในการวิเคราะห์โรคของคนไข้ ความจริงข้อนี้ก็ได้เห็นกันอยู่แล้ว ไม่จำเป็นที่จะต้องกล่าวให้มากความไป ในที่นี้เราสนใจการใช้ประโยชน์ของวิทยาศาสตร์น้อยกว่าที่เราสนใจเรื่องราวความเป็นไปของตัวนักวิทยาศาสตร์เอง เราสนใจที่จะเรียนรู้ว่านักวิทยาศาสตร์ทำงานกันอย่างไร และ การทำงาน ของเขาเผยให้เรารู้อะไรเกี่ยวกับโครงสร้างของจักรวาลของเราบ้าง

เรินท์เกนเองหมกมุ่นอยู่กับการค้นคว้าอย่างทุ่มเทชีวิตจิตใจ เมื่อได้รู้ว่ารังสีเอกซ์เป็นรังสีที่ไม่มีใครเคยพบกันมาก่อน แตกต่างจากรังสีอื่น ๆ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในเวลานั้น เขาก็ตั้งปัญหาต่าง ๆ ถามตัวเองมากมาย เช่น รังสีนี้มีอำนาจในการทะลุทะลวงแค่ไหน

จะสามารถรวมรังสีนี้แบบเดียวกับที่เลนส์รวมแสงแดดได้ ไหม แท่งแม่เหล็กที่มีแรงมากจะมีผลต่อรังสีเอกซ์หรือไม่ รังสีเอกซ์เกิดขึ้นได้อย่างไร เมื่อรังสีเอกซ์ไปกระทบตะกั่วและไม่สามารถทะลุไปได้นั้นเกิดอะไรขึ้น รังสีเอกซ์เหมือนกันหมด หรือว่าขึ้นอยู่กับโวลเตจซึ่งใช้กับหลอดไฟฟ้า ชนิดของโลหะซึ่งใช้เป็นขั้ว ในหลอดไฟฟ้านั้นมีผลต่อรังสีเอกซ์ซึ่งเกิดขึ้นหรือไม่

เพื่อที่จะให้ได้คำตอบ เรินท์เกนเปลี่ยนคำถามเหล่านี้ไปเป็นการทดลองซึ่งเขาได้คิดขึ้นอย่างรอบคอบ เขาเอาแผ่นปลาตินัม แผ่นตะกั่ว แผ่นสังกะสี และแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งมีความหนาต่าง ๆ กัน ไปกั้นระหว่างหลอดรังสีเอกซ์กับกระจกถ่ายรูป เพื่อจะให้รู้ว่าธาตุต่าง ๆ ดูดกลืนรังสีมากน้อยแค่ไหน แล้วเขาคำนวณว่าจะต้องใช้วัตถุแต่ละอย่างเท่าใด จึงจะทำให้กระจกถ่ายรูปดำเท่า ๆ กัน โดยวิธีนี้เรารู้ว่าธาตุหนักดูดกลืนรังสีเอกซ์มากกว่าธาตุเบาถึงสิบหรือยี่สิบเท่า เนื่องจากตะกั่วหาง่าย ราคาถูก และเป็นธาตุหนักด้วย จึงใช้เป็นเครื่องกำบังรังสีเอกซ์ได้อย่างวิเศษ เรินท์เกนพบว่าแผ่นตะกั่วหนาเพียง ๐.๐๖ นิ้ว ก็สามารถดูดกลืนรังสีจากหลอดไฟฟ้าของเขาได้เกือบหมดเลยทีเดียว

เรินท์เกนไม่มีเครื่องมือทำโวลเตจสูงมาก ๆ เช่นสูงถึง ๑๐๐,๐๐๐ โวลต์ เพื่อใช้กับหลอดของเขา เขาจึงไม่อาจค้นคว้าเกี่ยวกับคุณสมบัติของรังสีเอกซ์ซึ่งมีพลังงานสูงมากเช่นนั้น

ถ้าหากว่าเขาสามารถทำเช่นนั้นได้ เขาคงจะสนใจอย่างมากที่เดียว ที่รังสีเอกซ์ซึ่งได้จากโวลเตจขนาด ๑๐๐,๐๐๐ โวลต์ มีอำนาจแทรกทะลุทะลวงมากเหลือเกิน เราเรียกรังสีเอกซ์ซึ่งมีอำนาจแทรกมากนี้ว่ารังสี *"แก่"* ส่วนรังสีจากเครื่องมือในตอนแรก ๆ ของเรินท์เกนเป็นรังสี *"อ่อน"* การตั้งชื่อแบบนี้เป็นการบอกถึงอำนาจในการแทรกทะลุ รังสีเอกซ์ที่ได้จากเครื่องเล็ก ๆ ที่หัวไปไหนมาไหนได้ ซึ่งทันตแพทย์ใช้ มักจะใช้โวลเตจราว ๆ ๖๕,๐๐๐ โวลต์ อย่างไรก็ตามรังสีเอกซ์ซึ่งใช้โวลเตจมากกว่านี้สองสามเท่าก็ใช้กันมากในวงการแพทย์ (ความเร็วที่อีเล็กตรอนเคลื่อนที่ในหลอดสูญญากาศจะขึ้นอยู่กับโวลเตจ)

สิ่งหนึ่งในหลายสิ่งที่เรินท์เกนอยากรู้ก็คือว่า เมื่อรังสีเอกซ์ถูกวัตถุดูดกลืนแล้วจะเกิดอะไรขึ้น เช่นว่าเกิดความร้อนขึ้นบ้างหรือไม่ เขาได้ทำการทดลองเพื่อวัดผลที่ว่านี้ และลงความเห็นว่า *"ข้าพเจ้าไม่อาจแสดงให้เห็นได้โดยการทดลองว่ารังสีเอกซ์มีผลให้เกิดความร้อนขึ้น"* ขอให้สังเกตคำพูดที่เรินท์เกนใช้ เขาไม่ได้ยืนยันว่าไม่เกิดความร้อนขึ้น เขาเพียงแต่บอกว่าในการทดลองของเขาไม่ปรากฏว่าเกิดความร้อนขึ้น นี่เป็นวิธีที่นักวิทยาศาสตร์บอกผลงานของเขาแก่ผู้อื่น ถ้าหากว่าเรินท์เกนมีเครื่องมือซึ่งมีความไวมาก ๆ อย่างที่ใช้กันในปัจจุบัน เขาควรจะยืนยันได้ว่า ความจริงแล้วเมื่อรังสีเอกซ์กระทบสสารแล้วถูกสสาร

ดูดกลืนไว้ รังสีเอกซ์จะกลายเป็นความร้อนไปในที่สุด อย่างไรก็ตามเครื่องมือของเขาหยาบเกินกว่าที่จะวัดผลที่เกิดขึ้นนี้ได้

คุณสมบัติอย่างหนึ่งของรังสีเอกซ์ซึ่งทำให้เรินท์เกน ทึ่งมากก็คือ รังสีเอกซ์สามารถทำให้อากาศเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ เขาพบว่าเมื่อให้ประจุไฟฟ้าแก่เส้นลวดซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าอยู่ตรงกลางกล่อง เส้นลวดจะเก็บประจุไฟฟ้าไว้ได้หลายวัน ถ้ามีฉนวนกั้นไม่ให้ลวดกับกล่องติดต่อกันทางไฟฟ้าได้ ประจุไฟฟ้าไม่ลดลงเลย อย่างไรก็ตามถ้าเขาฉายรังสีเอกซ์ไปที่กล่องแล้ว เส้นลวดจะเสียประจุไฟฟ้าไป การทดลองนี้อธิบายได้ว่ารังสีเอกซ์ทำให้อะตอมของอากาศเปลี่ยนไป จะโดยวิธีใดก็ตามที และอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปนี้เป็นสิ่งที่นำไฟฟ้าจากลวดไปยังข้างกล่อง ผลการทดลองนี้กระตุ้นให้เขาทำการศึกษา *"อากาศซึ่งมีประจุไฟฟ้า"* เขาทำการทดลองอย่างแยบคายหลายการทดลองด้วยกัน เช่น สังเกตอัตราซึ่งประจุไฟฟ้า *"รั่ว"* ออกไปจากลวดเมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนบรรจุในกล่องแทนอากาศ เขาพิสูจน์ได้ว่าก๊าซภายในกล่องเป็นตัวที่ทำให้ประจุไฟฟ้ารั่ว เพราะเมื่อเอาก๊าซหรืออากาศออกหมด รังสีเอกซ์ไม่อาจทำให้ประจุไฟฟ้าหายไปจากเส้นลวดตรงกลางกล่องได้

"อากาศซึ่งมีประจุไฟฟ้า" ที่เรินท์เกนทำการศึกษานี้เป็นสิ่งลึกลับสิ่งหนึ่ง ซึ่งไม่อาจอธิบายให้แจ่มแจ้งได้จนกว่านัก-

วิทยาศาสตร์จะรู้เรื่องอะตอมดีขึ้น ทุกวันนี้เรารู้ว่าอะตอมธรรมดามีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า คือมีอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบเท่ากัน เมื่อรังสีเอกซ์ปะทะอะตอมของอากาศหรือก๊าซ อนุภาคลบอนุภาคหนึ่งจะหลุดออกไป เมื่ออนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบหรืออีเล็กตรอนหลุดไปจากอะตอมซึ่งเป็นกลางสมดุลย์ทางไฟฟ้าจึงเสียไป อะตอมส่วนที่เหลือจึงมีประจุไฟฟ้าบวก เราเรียกอะตอมเช่นนี้ว่า *"ไอออน"* จะเห็นว่าไอออนไม่ใช่อะไรอื่นเลย แต่เป็นอะตอมซึ่งขาดอีเล็กตรอนไปหนึ่งตัวเนื่องจากการกระทบของรังสีเอกซ์นั่นเอง กระบวนการนี้เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) น่าเสียดายที่เรินท์เกนไม่มีความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างภายในของอะตอม เขาจึงฉงนสนเท่ห์ไม่มีที่สุดสิ้นที่รังสีเอกซ์ทำให้เกิดผลทางไฟฟ้าขึ้นในก๊าซ

เนื่องจากไอออนซึ่งเกิดขึ้นในก๊าซโดยการผ่านรังสีเอกซ์มีประจุไฟฟ้า เราจึงอาจวัดประจุนี้ได้ และการวัดประจุนี้ก็คือการวัดว่ารังสีเอกซ์ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนมากน้อยเท่าใดนั่นเอง วิธีวัดนี้รวดเร็วตรงไปตรงมา ทำให้ไม่ต้องใช้ฟิล์มถ่ายรูปวัดเอกซ์เรย์ ซึ่งเป็นวิธีที่ช้าน่าเบื่ออีกต่อไป การทำเครื่องมือสำหรับวัดก็เพียงแต่ต่อกล่องที่กล่าวถึงมาแล้ว (กล่องนี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ไอออนไนเซชัน แชมเบอร์) เข้ากับเครื่องมือวัดประจุไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า อีเล็กโตรสโคป หรืออีเล็กโตรมิเตอร์

ซึ่งก็ไม่ใช่อะไรอื่น หากเป็นเครื่องมือทางไฟฟ้าที่มีความไวมาก สำหรับที่จะวัดว่ามีประจุไฟฟ้าหรือไม่เท่าใดเท่านั้นเอง

ยังมีปัญหาใหญ่อีกปัญหาหนึ่งซึ่งหาคำตอบไม่ได้ แม้เรินท์-เกนจะทำการทดลองอื่น ๆ เกี่ยวกับรังสีเอกซ์แล้วหลายต่อหลายการทดลอง เขาได้รู้จากการทดลองว่ารังสีเอกซ์เกิดจากการที่รังสีคะโทด (อีเล็กตรอน) กระทบขั้วไฟฟ้าโลหะซึ่งติดอยู่ที่ปลายข้างหนึ่งของหลอด รังสีคะโทดหยุดอยู่แค่ขั้วนี้และเกิดรังสีเอกซ์ขึ้นมาแทน อาจจะเรียกรังสีเอกซ์ว่าเป็น "*บีศาจ*" ของรังสีคะโทดก็ได้ แต่ทว่ารังสีเอกซ์นี้มีลักษณะอย่างไร ความเห็นของนักวิทยาศาสตร์หลายท่านมีความโน้มเอียงไปในทางที่ว่ารังสีเอกซ์มีความสัมพันธ์กับรังสีเหนือม่วง แต่ไม่มีใครหยั่งรู้ว่าเป็นอะไรแน่

ปัจจุบันนี้เราเข้าใจกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์เมื่ออีเล็กตรอนความเร็วสูงถูกทำให้หยุดในแง่ทฤษฎี อย่างไรก็ตาม รายละเอียดทฤษฎีนี้เกี่ยวพันกับความรู้ชั้นสูงหลายอย่าง ซึ่งไม่จำเป็นต้องกล่าวถึงในที่นี้ เรารู้แต่เพียงว่าตามกฎทางฟิสิกส์นั้น อีเล็กตรอนซึ่งมีความเร็วสูงจะต้องปล่อยพลังงานออกมา เมื่อถูกทำให้หยุดอย่างฉับพลัน โดยเป้าซึ่งเป็นโลหะก็พอแล้ว พลังงานที่ปล่อยออกมานี้ปรากฏในรูปของพลังงานซึ่งเป็นกลุ่มเป็นก้อน (เรียกว่าควานตัมหรือโฟตอน) ซึ่งเราเรียกกันว่ารังสีเอกซ์ ยิ่งอีเล็กตรอนมีความ

เร็วสูง (โวลเตจซึ่งใช้กับหลอดรังสีเอกซ์มีค่ามาก) ก็ยิ่งมีพลังงานมาก และรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากการกระทบของอีเล็กตรอนก็ยิ่งมีพลังงานและอำนาจแทรกทะลุมาก

เรินท์เกนได้รับการตัดสินให้ได้รับรางวัลโนเบลทางฟิสิกส์รางวัลแรก ในปี ๑๙๐๑ เพื่อเป็นเกียรติแก่การค้นพบที่ยิ่งใหญ่ของเขา เขาได้รับรางวัลเป็นเกียรติยศอีกหลายรางวัล แต่เขาเป็นคนไม่ชอบทำตัวเป็นข่าว เรินท์เกนรักการท่องเที่ยวไปตามภูมิประเทศแถบภูเขาแอลป์ ป่ายปีนภูเขาอันขรุขระ เมื่ออายุได้เจ็ดสิบแปดไม่นานนักก่อนที่จะถึงแก่กรรมเขาพูดไว้ว่า *"ข้าพเจ้าไม่ชอบเดินไปตามทางที่ผู้คนใช้กันมาก ๆ ข้าพเจ้าชอบปีนป่ายก้อนหิน บุกป่าฝ่าหนาม ถ้าข้าพเจ้าหายไปละก็อย่าไปค้นหาตามถนนใหญ่เลย"*

เรินท์เกนไม่มีวันที่จะคาดคะเนได้ว่าการค้นพบเมื่อคืนวันที่ ๘ พฤศจิกายน ๑๘๙๕ ตอนที่เขาเตร็ดเตร่ออกไปนอกทางนั้นมีความสำคัญแค่ไหน คนอื่นซึ่งมีความสามารถน้อยกว่าเขาอาจจะมองไม่เห็นว่าแสงเรืองที่เกิดจากผลึก ซึ่งวูบวาบอยู่ในความมืดมีความหมายอะไรเป็นพิเศษ แต่เรินท์เกนยึดเอาผลประการเดียวนี้เป็นจุดเริ่มต้น ติดตามด้วยการทดลองอย่างระมัดระวัง สามารถให้ของใหม่แก่โลกได้ เราจะได้เห็นต่อไปว่าการค้นพบของเขา

ก่อให้เกิดการค้นคว้าซึ่งนำไปสู่การค้นพบที่สำคัญ ๆ โดยนักวิทยาศาสตร์ในประเทศอื่น การพบรังสีเอกซ์ของเรินท์เกนเป็นจุดจบของศักราชเก่า และเป็นจุดเริ่มต้นศักราชใหม่ของการค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์อันน่าตื่นเต้น

กัมมันตภาพรังสี

อังรี ปวงกาเร (Henri Poincaré) นักคณิตศาสตร์และนักฟิสิกส์ผู้มีชื่อเสียงชาวฝรั่งเศส แจ้งรายละเอียดการค้นพบที่น่าตื่นเต้นของเรินท์เกน แก่สถาบันวิทยาศาสตร์แห่งประเทศฝรั่งเศส เป็นครั้งแรกเมื่อวันที่ ๒๐ มกราคม ๑๘๙๖ อังรี ปวงกาเร ได้ตั้งข้อสันนิษฐานว่า รังสีเอกซ์มีความสัมพันธ์กับแสงเรืองสีเขียว ซึ่งนักวิทยาศาสตร์หลายคนสังเกตเห็นที่ข้างหลอดนำก๊าซ หรือหลอดดิสชาร์จ เรื่องนี้ต่อมาภายหลังเรินท์เกนได้แสดงให้เห็นว่าแสงทั้งสองอย่างนี้ไม่เกี่ยวข้องกัน แต่ตอนนั้นนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสผู้ปราดเปรื่องคนนั้นคิดว่า ปรากฏการณ์ทั้งสองเกิดขึ้นด้วยกัน

ไม่เป็นเรื่องแปลกอะไรที่ปวงกาเร จะเสนอแนะให้ อังรี เบคเกอเรล (Henri Becquerel) ผู้เป็นเพื่อนลองค้นคว้าดูว่ารังสีเอกซ์เกิดขึ้นจากสารบางอย่างหรือไม่ เช่น จากเกลือแร่บางชนิดซึ่งส่งแสงเรือง ๆ เมื่อได้รับแสงแดดเป็นต้น ปวงกาเรรู้ว่าบิดาของเบคเกอเรลทำการค้นคว้าเกี่ยวกับการเรืองแสง คือการที่ผลึกบางชนิดส่งแสงออกมาได้หลังจากถูกแสงแดด และในห้องทดลองของเขา เบคเกอเรลมีผลึกพวกนี้อยู่เป็นร้อยเป็นพันที่เดียว การที่แสงเรืองอาจจะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ได้นี้ ทำให้เบคเกอเรลตื่นเต้นมาก เขาลงมือค้นคว้าว่าจะเป็นจริงตามที่คาดหรือไม่

เบคเกอเรลเอากระจกถ่ายรูปเล็ก ๆ ห่อกระดาษดำ และเอาผลึกเกลือยูเรเนียมวางบนห่อแล้วเอาไปวางกลางแดด เบคเกอเรลทำการทดลองนี้อยู่ที่ปารีสและตอนนั้นเป็นฤดูหนาว หลังจากให้ตากแดดอยู่สี่ชั่วโมงแล้ว เขาก็เก็บห่อนั้นไปเข้าร่ม ตรงไปยังห้องมืดจัดการล้างกระจกถ่ายรูป เขารู้สึกดีใจมากเมื่อพบว่ามีรอยดำอยู่รอยหนึ่งบนกระจก ส่วนอื่น ๆ ของกระจกนั้นเกลี้ยงเกลา รอยดำนี้เป็นรูปเป็นร่างเหมือนผลึกยูเรเนียม ดังนั้นเบคเกอเรลจึงลงความเห็นว่า แสงเรืองซึ่งเกิดจากการที่แสงแดดไปกระทบยูเรเนียมได้ทำให้เกิดรังสี ซึ่งมีอำนาจแทรกทะลุแบบเดียวกับรังสีเอกซ์ของเรินท์เกน ตอนนี้ดูเหมือนว่าสมมุติฐานของปวงกาเรจะได้รับการยืนยันแล้ว เบคเกอเรลประกาศการค้นพบของเขาเมื่อวันที่ ๒๔ กุมภาพันธ์ ๑๘๙๖

ต่อมาอีกไม่นานเขาก็แสดงให้เห็นว่ารังสีที่ได้จากยูเรเนียมมีอำนาจแทรกทะลุ โดยเอาแผ่นโลหะบาง ๆ คั่นระหว่างกระจกถ่ายรูปกับผลึกยูเรเนียม เนื่องจากเขาเชื่อว่าแสงแดดทำให้ยูเรเนียมปล่อยแสงซึ่งมีอำนาจแทรกทะลุนี้ ดังนั้นทุกเช้าเขาจะกวาดสายตาสำรวจท้องฟ้าด้วยความหวังว่าอากาศจะแจ่มใสมีแดด แต่ส่วนมากท้องฟ้ามักจะเต็มไปด้วยเมฆ นาน ๆ แสงแดดอ่อน ๆ จึงจะส่องลงมายังกรุงปารีสสักครั้งหนึ่ง อากาศเลวทำให้เบคเกอเรลหัวเสีย เขาจึงเอาห่อกระจกถ่ายรูปซึ่งมีผลึกยูเรเนียมติดอยู่ด้วยเก็บไว้เสีย

ในลั้นชักโต๊ะ หลายวันต่อมาอากาศก็ยังไม่ดีขึ้น ในที่สุดเมื่อวันที่ ๑ มีนาคม ๑๘๙๖ เบคเกอเรลตัดสินใจล้างกระจกถ่ายรูปเสียให้รู้แล้วรู้รอดไป เขาคิดว่าบางทีแดดซึ่งทะลุก้อนเมฆลงมานั้นอาจจะมากพอที่จะทำให้เกิดรอยดำจาง ๆ ขึ้นก็ได้ ตอนนี้เบคเกอเรลเขียนเล่าไว้ทีหลังว่า *"ตรงข้ามกับที่คาดไว้ เงาของผลึกชัดเจนมากทีเดียว"* ด้วยความแปลกใจที่ผลึกยูเรเนียมซัลเฟตทำให้เกิดเงาชัดเจนเช่นนั้น เขาจึงทำการทดลองต่อไป และไม่ช้าก็พิสูจน์ความจริงได้ว่า เกลือแร่ยูเรเนียมบางชนิดให้รังสีซึ่งมีอำนาจแทรกทะลุโดยไม่ต้องให้ถูกแสงแดด พูดอีกอย่างหนึ่งก็คือรังสีนั้นเกิดขึ้นเอง ไม่เกี่ยวกับปรากฏการณ์การเรืองแสงเลย

เบคเกอเรลทำการทดลองซ้ำอีก คราวนี้เอาแผ่นอลูมิเนียมคั่นระหว่างผลึกยูเรเนียมกับกระจกถ่ายรูป เขาพบว่า *"รังสียูเรเนียม"* ออกมาจากผลึก แล่นทะลุแผ่นอลูมิเนียมและทำให้กระจกถ่ายรูปดำ การทดลองนี้ทำในที่มืด จึงเห็นได้ชัดว่ายูเรเนียมมีคุณสมบัติประหลาดอย่างยิ่ง คือเปล่งรังสีออกมาได้เรื่อย ๆ

เมื่อวันที่ ๒ มีนาคม ๑๘๙๖ ไม่ถึงสองเดือนหลังจากมีการประกาศถึงเรื่องการค้นพบรังสีเอกซ์ เบคเกอเรลได้ส่งผลการค้นคว้าของเขาไปยังสถาบันวิทยาศาสตร์แห่งประเทศฝรั่งเศส การค้นพบของเขาทำให้เพื่อน ๆ นักวิทยาศาสตร์ตกตะลึง เพราะเป็นเรื่องซึ่งขัดกับความเชื่อถือขั้นมูลฐาน ที่ว่าธาตุต่าง ๆ ซึ่ง

ประกอบขึ้นเป็นโลกและจักรวาลนั้นเป็นสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้ แต่พวกเขาก็เชื่อในความสามารถทางวิทยาศาสตร์ของเบคเกอเรล และรู้ว่าผลการค้นคว้าของเขาต้องเป็นจริง ตัวเบคเกอเรลเองเชื่อสนิทว่ารังสีที่เขาเรียก *"รังสียูเรเนียม"* นั้น เป็นสิ่งเดียวกันกับรังสีเอกซ์ ซึ่งเรินท์เกนพบ เพราะเขาพบว่ารังสีจากยูเรเนียมทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออนเช่นเดียวกับรังสีเอกซ์ แต่เบคเกอเรลก็มีความกังวลเกี่ยวกับธรรมชาติที่แท้จริงของรังสีนี้มาก นอกจากนี้เขายังคงมืดแปดด้าน ในเรื่องที่ว่าอะตอมของยูเรเนียมส่งรังสีออกมาได้อย่างไร

ธาตุยูเรเนียมถูกค้นพบในปี ๑๗๘๙ โดย มาร์ติน แคลปรอธ (Martin Klaproth) ถ้าตอนนั้นแคลปรอธมีอีเล็กโตรสโคปสำหรับวัดธาตุใหม่ของเขา ก็คงได้พบว่าธาตุนี้ทำให้อีเล็กโตรสโคปเสียประจุไฟฟ้า เราได้แต่นึกเดาเอาว่าเขาจะทำอะไรบ้าง จะสืบสาวสิ่งที่เขาค้นพบต่อไปอีกไหม หรือจะละเลยมันเสียเพราะเห็นว่าไม่สำคัญ อันที่จริงก่อนสมัยของเบคเกอเรลไปหนึ่งศตวรรษนั้นยังไม่ถึงเวลาที่จะมีการค้นพบเช่นนั้น ดังเช่นที่ลอร์ดรัทเธอฟอร์ดได้เคยให้แง่คิดไว้ว่า *"ลักษณะพิเศษของวิทยาศาสตร์ก็คือ แทบจะไม่มีการค้นพบอะไรเลย ถ้าจิตใจของคนยังไม่พร้อม"*

การค้นพบทั้งของเรินท์เกนและเบคเกอเรล ทำให้วงการวิทยาศาสตร์ไหวตัว ประชาชนพร้อมสำหรับของใหม่ๆ แล้วจริงๆ เอินเนสท์ รัทเธอฟอร์ด นักวิทยาศาสตร์หนุ่มจากนิวซีแลนด์เดินทางไปถึงห้องปฏิบัติการคาเวนดิช ในประเทศอังกฤษ ลงมือศึกษาการทำก๊าซให้เป็นไอออนโดยรังสีเอกซ์ งานของเบคเกอเรลกระตุ้นให้เขาเกิดความสนใจ เขาต้องการรู้ว่าไอออนซึ่งเกิดจากรังสีเอกซ์ของเรินท์เกน เหมือนกับไอออนซึ่งเกิดจากรังสียูเรเนียมหรือไม่ งานวิจัยของรัทเธอฟอร์ดเป็นการบุกเบิกทางไปสู่วิทยาศาสตร์แขนงใหม่เกี่ยวกับอะตอม เราจะพูดถึงการค้นคว้าของเขาในบทต่อไป

ในประเทศฝรั่งเศสนั้นเบคเกอเรลได้ทำให้ศาสตราจารย์ผู้สามารถคนหนึ่ง ที่สถาบันฟิสิกส์และเคมีหันมาสนใจศึกษาแร่ยูเรเนียม นักฟิสิกส์หนุ่มผู้นั้นชื่อ ปีแยร์ คูรี (Pierre Curie) มีภรรยาเป็นหญิงสาวชาวโปแลนด์ ชื่อ แมรี สโกลโดวสกา (Marie Sklodowska) สตรีผู้ถือกำเนิดในกรุงวอร์ซอผู้นี้เรียนสำเร็จวิชาเคมี ที่สถาบันซอร์บอนน์อันมีชื่อเสียงแห่งปารีส เธอพบกับปีแยร์ คูรี ที่นั่น ทั้งสองเข้าคู่กันได้เป็นอย่างดี แต่ละคนก็ใช้ความสามารถในแต่ละทางที่ตนมีอยู่ประกอบกันในการค้นคว้า

สองสามีภรรยาต้องการรู้ว่า ธาตุซึ่งให้รังสีที่มีอำนาจแทรกทะลุนั้นมีแต่ยูเรเนียมธาตุเดียวหรืออย่างไร จึงออกแบบอีเล็กโตรมิเตอร์ซึ่งมีความไวมาก สำหรับวัดสภาพนำไฟฟ้าของอากาศ

เขาใช้เครื่องมือนี้ศึกษาธาตุต่าง ๆ หลายอย่าง ไม่ช้าก็พบว่าธาตุธอเรียม ซึ่งเป็นธาตุหนักก็ให้รังสีซึ่งมีอำนาจแทรกทะลุเช่นเดียวกัน ดังนั้นรังสียูเรเนียมของเบคเกอเรลจึงไม่ใช่เป็นรังสีซึ่งได้จากยูเรเนียมเพียงอย่างเดียว ในปี ๑๘๙๘ แมรี คูรี เสนอให้ใช้ชื่อ "กัมมันตภาพรังสี" เรียกรังสีซึ่งถูกปล่อยออกมาโดยธาตุ เช่น ยูเรเนียม และ ธอเรียม

การได้พบว่าธอเรียม ก็เป็นธาตุกัมมันตภาพด้วย ช่วยกระตุ้นให้คนทั้งสองค้นคว้ากัมมันตภาพรังสีของธาตุอื่น ๆ ต่อไปโดยไม่หยุดยั้ง ในการทดสอบสินแร่ชนิดต่าง ๆ นั้น พิทช์ เบลนด์ ทำให้เขาสนใจมาก สินแร่นี้เป็นแหล่งของธาตุยูเรเนียมที่สำคัญ คือยูเรเนียมถูกแยกออกมาจากพิทช์เบลนด์ โดยกระบวนการทางเคมีอันยืดยาว สองสามีภริยาตรวจสินแร่ส่วนที่เหลือ หลังจากแยกยูเรเนียมออกไปแล้ว ก็พบว่าส่วนที่คิดกันว่าไร้ประโยชน์นั้น มีกัมมันตภาพรังสีประมาณสี่เท่าของยูเรเนียมจำนวนเท่า ๆ กัน ซึ่งทำให้ทั้งสองฉงนสนเท่ห์มาก เขาลงความเห็นว่ากัมมันตภาพรังสีอันรุนแรงนี้เกิดจากสารบางอย่างซึ่งยังไม่มีใครรู้จัก ที่ได้จากการแยกยูเรเนียม

สารที่ไม่มีใครรู้จักนี้คืออะไร นี่คือคำถามที่ล่อให้คนทั้งสองต้องทำการทดลองติดต่อกันไปอย่างยืดยาว และทำให้ปีแยร์ คูรี เลิกงานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารประเภทผลึก ซึ่ง

เขากำลังทำอยู่เสีย เพื่อจะได้อุทิศเวลาทั้งหมดทำงานกับภรรยาของเขา

ทั้งสองต้องการสินแร่พิทช์เบลนด์เป็นจำนวนมาก แต่ก็นับว่าโชคดีเพราะสิ่งซึ่งต้องการนั้นเป็นกากแร่ ไม่ใช่แร่ซึ่งเป็นผลผลิตโดยตรงของเหมือง เศษแร่ที่ต้องการนี้ได้มาจากเหมืองยูเรเนียมที่เมืองโจคิมสธาล ประเทศโบเฮเมีย เหมืองเหล่านี้ทำกันมาตั้งแต่ศตวรรษที่ ๑๕ เพื่อหาแร่เงิน สี่ศตวรรษต่อมาจึงทำเป็นเหมืองพิทช์เบลนด์ เพื่อเอายูเรเนียมไปใช้ผสมสีสำหรับทาเครื่องดินเผาและเครื่องแก้ว คนทั้งสองต้องคิดหากรรมวิธีทางเคมีเพื่อแยกสารเป็นจำนวนมาก ๆ อย่างที่ใช้กันในการอุตสาหกรรม ทั้ง ๆ ที่มีเงินสำหรับงานนี้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เครื่องมือเครื่องใช้ในการทดลองก็หยาบมาก และไม่มีผู้ช่วยเหลือเลย การค้นหาธาตุซึ่งไม่รู้คุณสมบัติทางเคมีมาก่อนเปรียบเหมือนหาเข็มในกองฟาง แต่น่าเหนื่อยหน่ายกว่าเพราะต้องใช้กรดและสารเคมี ซึ่งมีอันตราย โรงงานของเขาเป็นเพิงหยาบ ๆ อยู่ที่ชานนครปารีส ถ้าวันไหนอากาศดีก็ทำงานกันกลางแจ้ง นึกขอบอกขอบใจที่ดินฟ้าปรานีให้ไม่ต้องทนสูดกลิ่นอันน่ารำคาญรบกวนมากอย่างในวันที่ต้องทำงานในร่ม

ทั้งสองคนทำงานหนักมาก แยกกากยูเรเนียมจนกระทั่งได้ *"สารซึ่งมีกัมมันตภาพรังสีสูงกว่ายูเรเนียมถึงสี่ร้อยเท่า.....เรา*

เชื่อว่าในสารซึ่งแยกออกมาจากพิทช์เบล็นด์นั้นมีโลหะซึ่งไม่มีใครรู้จักกันมาก่อน" ทั้งสองตั้งชื่อโลหะนี้ว่า โปโลเนียม เป็นที่ระลึกแก่ประเทศบ้านเกิดของมาดาม คูรี

โปโลเนียม เป็นธาตุใหม่ที่สำคัญก็จริง แต่ก็ไม่ได้เป็นคำตอบที่สมบูรณ์แก่คำถามลึกลับที่ทั้งสองติดตามมา การค้นคว้ายังคงดำเนินต่อไป จนถึงปี ๑๘๙๘ หลังวันคริสต์มาสหนึ่งวัน จึงสามารถประกาศการค้นพบที่สำคัญได้อีกอย่างหนึ่ง คือทั้งสองแยกธาตุซึ่งมีกัมมันตภาพรังสีถึงพันเท่าของยูเรเนียมได้สำเร็จ และได้ตั้งชื่อธาตุใหม่ซึ่งมีกัมมันตภาพรังสีสูงมากนี้ว่า *"เรเดียม"* คำนี้เป็นภาษาละตินแปลว่า *"รังสี"*

สองสามีภรรยาไม่แน่ใจว่าเรเดียมมีกัมมันตภาพรังสีมากแค่ไหน เพราะที่แยกออกมาได้เล็กน้อยนั้นก็ปนอยู่กับแบเรียมซึ่งมีปริมาณมากกว่า และไม่มีกัมมันตภาพรังสี จึงได้แต่เดาเอาจนกว่าจะได้แยกพิทช์เบล็นด์เพิ่มขึ้นอีก และทำให้เรเดียมบริสุทธิ์ยิ่งขึ้น ทั้งคู่ลงมือทำงานต่อไปอย่างขยันขันแข็งและเสียสละ เมื่อได้กากยูเรเนียมจากเหมืองที่โจคิมสธาลมาหนึ่งตัน ก็ลงมือแยกเอาเรเดียมโดยใช้วิธีการยืดยาวและน่าเหนื่อยหน่าย บีแยร์ คูรี ลองเอาแขนไปรับรังสีเพียงเล็กน้อย ปรากฏว่าผิวหนังเป็นผื่นแดง เกิดแผลขึ้นและกว่าจะหายก็กินเวลาตั้งเดือน แต่ทั้งสองก็ทำงานต่อไปวันแล้ววันเล่าทั้ง ๆ ที่รู้ว่าธาตุเรเดียมเป็นธาตุที่มีอันตราย มือของมาดามคูรี

เริ่มแสดงอาการเจ็บปวดเนื่องจากรังสี นิ้วมือเริ่มชา แต่ก็ยังคงทำงานต่อไปในที่สุดในปี ๑๙๐๒ มาดามคูรี่ก็สามารถแยกเรเดียมออกมาได้มากพอดู ปรากฏว่ากัมมันตภาพรังสีของเรเดียมมากกว่าของยูเรเนียมถึงล้านเท่า

เรเดียมบริสุทธิ์ซึ่งแยกได้ในปี ๑๙๐๒ นั้น หนักไม่ถึงเศษหนึ่งส่วนร้อยออนซ์ ทุกวันนี้เรเดียมยังคงเป็นธาตุที่มีราคาสูง และหาได้ยาก สมัยของมาดามคูรี่ผ่านไปตั้งห้าสิบห้าปีแล้ว ในโลกยังมีธาตุซึ่งหายากนี้ราว ๆ ห้าปอนด์เท่านั้น

มาดามคูรี่ ทำงานค้นคว้าเพื่อปริญญาเอกสำเร็จในปี ๑๙๐๔ และในปีเดียวกันนั้นได้รับรางวัลโนเบลร่วมกับสามีและเบคเกอเรล เธอปฏิเสธที่จะจดทะเบียนสิทธิในการผลิตเรเดียม โดยยืนยันว่าเรเดียมเป็นของคนทั่วไป บางทีอาจจะเป็นเพราะรู้ล่วงหน้าว่าการค้นคว้าของเธอจะเป็นประโยชน์ในทางแพทย์ต่อไปอย่างมากมายก็ได้ จึงต้องการให้ทุกคนได้ใช้โดยเสรี สามีของมาดามคูรี่ด่วนถึงแก่กรรมเสียก่อนในฤดูใบไม้ผลิ ปี ๑๙๐๖ โดยอุบัติเหตุบนถนน เธอเศร้าโศกเนื่องจากการสูญเสียสามีมาก จึงได้อุทิศชีวิตแก่งานค้นคว้าและการเลี้ยงดูบุตรหญิงผู้ซึ่งต่อมาก็กลายเป็นนักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อเสียงคนหนึ่ง ทั้งแม่และลูกต้องประสบเคราะห์กรรมอย่างเดียวกัน คือถึงแก่กรรมเนื่องจากความเจ็บป่วยอันเกิดจากการที่ต้องรับกัมมันตภาพรังสีอยู่เรื่อย ๆ ทั้งสองถูกคุกคามโดย

อันตรายจากกัมมันตภาพรังสีอยู่ตลอดเวลา มาดามคูรี่เล่าว่าขณะที่เธอทำงานในตอนกลางคืนนั้น ขวดและภาชนะใส่สารเคมีในห้องทดลองของเธอจะลุกสว่างอยู่ในท่ามกลางความมืด

การค้นพบโดยบังเอิญในประเทศเยอรมัน กระตุ้นให้เบคเกอเรลทำการค้นคว้าในฝรั่งเศส และการค้นคว้านี้ทำให้เกิดการค้นคว้าของมาดามคูรี่และสามีอีกต่อหนึ่ง แต่สิ่งซึ่งได้เรียนรู้จากการค้นพบเหล่านั้น ยังน้อยกว่าปัญหาซึ่งเกิดตามขึ้นมา ธรรมชาติที่แท้จริงของรังสีต่าง ๆ และกระบวนการปล่อยกัมมันตภาพรังสี ความสัมพันธ์ระหว่างยูเรเนียม ธอเรียมและเรเดียมยังคงเป็นสิ่งซึ่งมืดมนอยู่ บุคคลผู้พบลู่ทางซึ่งทำให้สามารถคลี่คลายความสลับซับซ้อนของการค้นพบที่เกี่ยวโยงกันนั้น ได้แก่นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษผู้หนึ่ง คือ เอินเนสท์ รัทเธอฟอร์ดซึ่งนับได้ว่าเป็นผู้ที่สืบสาวหาคำตอบ ความลับอันสลับซับซ้อนนี้ได้มากกว่าผู้อื่น

๔

รัทเธอฟอร์ดนักค้นคว้าคนสำคัญ

การค้นพบรังสีเอกซ์ของเรินท์เกนทำให้รัทเธอฟอร์ดตื่นเต้นมาก รายงานเรื่องรังสีจากยูเรเนียมที่อ่านพบในวารสารทางวิทยาศาสตร์ของฝรั่งเศส ก็ทำให้เขาสนใจอย่างยิ่ง การค้นพบทั้งสองอย่างคือ รังสีเอกซ์และกัมมันตภาพรังสีมีความสำคัญต่ออาชีพซึ่งโด่งดังเหมือนพลุของรัทเธอฟอร์ดมากทีเดียว ในปี ๑๘๙๖ รัทเธอฟอร์ดยังหนุ่มแน่น อายุเพิ่งยี่สิบห้าปี เริ่มทำงานค้นคว้าด้วยตนเองที่ห้องทดลองคาเวนดิช ในประเทศอังกฤษ งานทางวิทยาศาสตร์ตอนต้นๆ ของเซอร์เจ.เจ. ทอมสัน (J.J. Thomson) เป็นผู้แนะแนวทางให้ ท่านเซอร์ผู้นี้มีชื่อเสียงจากการค้นคว้าเกี่ยวกับรังสีคะโทดหรืออีเล็กตรอน

รัทเธอฟอร์ด เลือกที่ทำการค้นคว้าได้เหมาะสมและเลือกเวลาได้พอดีด้วย ตอนนั้นความเชื่อถือเก่า ๆ กำลังถูกทำลายลงไป ผลจากการทดลองซึ่งมีขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้ความรู้ใหม่ ๆ เกี่ยวกับโครงสร้างทางฟิสิกส์ของโลก ก่อนขึ้นศตวรรษปัจจุบันเล็กน้อย โลกเก่าอันมั่นคงของนักฟิสิกส์กำลังพังทะลายลงด้วยอิทธิพลของความคิดใหม่ ๆ อันแปลกแหวกแนว กัมมันตภาพรังสีนับว่าเป็นเรื่องหนึ่งซึ่งท้าทายนักวิทยาศาสตร์อย่างฉกาจฉกรรจ์ เพราะทำให้ต้องตีความว่าสิ่งซึ่งเล็กที่สุดของสรรพ-

สิ่งทั้งหลาย คืออะตอมเองนั้นก็อาจเปลี่ยนแปลงได้ แต่ทว่าการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นได้อย่างไร อะตอมปล่อยรังสีออกมาได้อย่างไร รังสีเหล่านี้ที่จริงคืออะไร ปัญหาเช่นนี้ไม่มีใครบอกได้ รัทเธอฟอร์ดผู้เป็นนักทดลองที่สามารถยิ่ง มาถึงที่เกิดเหตุตอนที่กำลังมีการเปลี่ยนแปลงอันเป็นประวัติศาสตร์นั้นพอดี และได้กลายเป็นนักค้นคว้าผู้ยิ่งใหญ่แห่งโลกอันลึกลับนี้

ถึงตอนนี้ก็ควรจะได้กล่าวไว้เสียด้วยว่ารัทเธอฟอร์ดชอบทำงานเป็นกลุ่มเป็นคณะไม่เหมือนกับเรินท์เกน เขาชอบแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับเพื่อนนักวิทยาศาสตร์ ชอบเสนอแนะการทดลองใหม่ ๆ แก่คนเหล่านั้น รัทเธอฟอร์ดจึงเป็นผู้นำกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ ซึ่งได้รับการชักชวนเข้ามาทำงานที่ห้องปฏิบัติการคาเวนดิช และที่อื่น ๆ ซึ่งเขาไปทำงานอยู่

ปัญหาแรก ๆ ที่รัทเธอฟอร์ดสนใจคือ คุณสมบัติของรังสีเอกซ์ของเรินท์เกน และ *"รังสียูเรเนียม"* ของเบคเกอเรล การทดลองของเลนนาร์ดเกี่ยวกับรังสีคะโทดก็ทำให้เขาทึ่งมากเช่นเดียวกัน เขาเห็นว่าการที่เลนนาร์ดทำให้ลำแสงอีเล็กตรอนซึ่งมีความเร็วสูงผ่านทะลุแผ่นอลูมิเนียมบาง ๆ ซึ่งติดไว้ที่ช่องของหลอดดิสชาร์จได้นั้น ย่อมหมายความว่าอีเล็กตรอนซึ่งเล็กมากนี้สามารถลอดช่องว่างระหว่างอะตอมของอลูมิเนียมไปได้

ในฐานะที่เป็นนักทดลอง รัทเธอฟอร์ดยอมทุ่มเทเวลาให้แก่การวางแผนการทดลองอย่างรอบคอบ และการประดิษฐ์เครื่องมือซึ่งใช้ได้ผลอย่างยอดเยี่ยม เขาเห็นว่าการทำเครื่องมือทางไฟฟ้าซึ่งมีความไวมากเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง ในการทดลองตอนต้น ๆ เกี่ยวกับรังสีซึ่งได้จากยูเรเนียมเขาใช้อีเล็กโตรมิเตอร์วัดอำนาจการทำให้เกิดไอออน และอำนาจในการแทรกทะลุ เขาเอายูเรเนียมชิ้นเล็ก ๆ เข้ามาใกล้ไอออนไนเซชั่น แชมเบอร์ แล้วจดปริมาณกระแสไฟฟ้าซึ่งเกิดจากรังสีของยูเรเนียม นี่เป็นวิธีวัดจำนวนไอออนซึ่งเป็นกัมมันตภาพรังสีทำให้เกิดขึ้นในแชมเบอร์ โดยวิธีนี้เขาสามารถแสดงให้เห็นว่ามีรังสีซึ่งแตกต่างกันอยู่สองชนิด เพราะเมื่อเอาแผ่นกระดาษกั้นระหว่างแชมเบอร์กับยูเรเนียมกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว เห็นได้ชัดว่ามีรังสีผ่านไปได้น้อยมาก รังสีส่วนใหญ่ซึ่งทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนนั้น ถูกดูดกลืนโดยแผ่นกระดาษ รังสีซึ่ง *"อ่อน"* กว่าเหล่านี้รัทเธอฟอร์ดเรียกว่ารังสี *"แอลฟา"* ส่วนอีกรังสีหนึ่งซึ่งมีความแรงพอที่จะผ่านแผ่นกระดาษไปได้ เขาเรียกรังสี *"เบตา"* รังสีเบตานี้ตามปกติจะถูกทำให้หยุดได้โดยแผ่นอลูมิเนียมสองสามแผ่น

ต่อมาอีกไม่นานนัก นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ ปอล วิลลาร์ด (Paul Villard) พบรังสีซึ่งออกจากยูเรเนียมชนิดที่สาม รังสีนี้มีอำนาจในการแทรกทะลุยิ่งไปกว่ารังสีเบตา ซึ่งรัท-

เธอฟอร์ดพบ เราเรียกรังสีซึ่งมีอำนาจแทรกทะลุมากที่สุดนี้ว่ารังสี "*แกมมา*" การที่จะหยุดรังสีนี้ได้อาจจะต้องใช้แผ่นตะกั่วหนา ๆ รังสีแกมมามีคุณสมบัติเหมือนรังสีเอกซ์ ซึ่งเรินท์เกนทำขึ้นโดยการใช้หลอดดิสชาร์จทุกประการ

การที่แผ่นกระดาษสามารถหยุดรังสีแอลฟาได้ ทำให้รัท-เธอฟอร์ดฉงนมาก เขาจึงเริ่มทำการทดลองเกี่ยวกับรังสีนี้หลายการทดลองติดต่อกันไป ทำให้ได้ความรู้หลายอย่างเกี่ยวกับกัมมันต-ภาพรังสี ประการแรกที่เดียวเขาต้องการรู้ว่ารังสีเหล่านี้เป็นอะไรแน่ และต้องการที่จะหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมัน เขาพบว่าแม่เหล็กทำให้รังสีนี้เบี่ยงเบนได้ แม้ว่าจะทำได้ยากกว่ารังสีเบตา รัทเธอฟอร์ด วัดน้ำหนักของมันได้ด้วย เขารู้จักการทดลองหลายๆ วิธีว่า รังสีแอลฟาเป็นสสารชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวก และหนักกว่าอิเล็กตรอนหลายพันเท่า ตอนแรกดูเหมือนว่าหนักราว ๆ สองเท่าของอะตอมของไฮโดรเจน แต่ต่อมาภายหลังปรากฏว่าหนักกว่าเป็นสี่เท่า พูดสั้น ๆ ก็คือได้พบว่ารังสีแอลฟาเป็นอนุภาค ความเร็วสูง และขนาดค่อนข้างโต

รัทเธอฟอร์ด และคนอื่น ๆ อีกหลายคนเกิดความคิดขึ้นมาว่า ถ้าวัดประจุไฟฟ้าทั้งหมดซึ่งเกิดจากสารกัมมันตภาพได้ และสามารถนับจำนวนอนุภาคแอลฟาที่ถูกปล่อยออกมาได้ ก็จะรู้ว่า

ประจุไฟฟ้าของแต่ละอนุภาค (เราจะใช้คำว่า "*รังสี*" และ "*อนุภาค*" ในแง่ที่มีความหมายเดียวกัน สมัยก่อน นักวิทยาศาสตร์เรียกว่ารังสีแอลฟา และในปัจจุบันเรียกอนุภาคแอลฟา) การที่จะทำการทดลองนี้รัทเธอฟอร์ดต้องคิดทำเครื่องมือที่สามารถนับอนุภาคแอลฟาทีละตัวได้ เขาร่วมมือกับผู้ช่วยหนุ่มชาวเยอรมันชื่อ ฮันส์ ไกเกอร์ (Hans Geiger) เครื่องมือนี้จึงได้ชื่อว่า ไกเกอร์ เคาน์เตอร์ (Geiger Counter) อันนับเป็นเครื่องมือที่ดีที่สุดสำหรับดักจับอนุภาคเล็ก ๆ กล่าวโดยทั่ว ๆ ไป ไกเกอร์ เคาน์เตอร์ คือเครื่องมือที่มีความไวมาก อนุภาคเพียงอนุภาคเดียวผ่านเคาน์เตอร์ไป ก็ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามากพอที่จะเป็นชนวนให้ก๊าซในหลอดของเคาน์เตอร์ เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอย่างมากมายและรวดเร็ว รัทเธอฟอร์ด และไกเกอร์ช่วยกันปรับปรุงเครื่องมือนี้จนกระทั่งใช้การได้ดี เมื่ออนุภาคแอลฟาหนึ่งอนุภาคผ่านเข้าไป (ทาง "*หน้าต่าง*" ช่องเปิดปลายหลอด) จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น กระแสนี้เกิดขึ้นและหายไปอย่างรวดเร็ว อีเล็กโตรมิเตอร์จะบันทึกกระแสสั้น ๆ ที่เรียกว่า "*คิกส์*" (kicks) นี้ไว้ รัทเธอฟอร์ดใช้ฟิล์มเคลื่อนที่ถ่ายรูป "*คิกส์*" ของอีเล็กโตรมิเตอร์ ทำให้สามารถบันทึกการผ่านเข้าไปในหลอดของอนุภาคแอลฟาติดต่อกันไปได้ ในขณะเดียวกันก็ทำการวัดประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากสารซึ่งเปล่งอนุภาคแอลฟา โดยวิธีนี้รัทเธอฟอร์ดและ

ไกเกอร์ พบว่าอนุภาคแอลฟามีประจุไฟฟ้าเท่ากับของอีเล็กตรอนสองตัวรวมกัน

ประจุไฟฟ้าของอีเล็กตรอนเป็นประจุซึ่งเล็กที่สุดมักแทนกันด้วยอักษร "e" และเนื่องจากเป็นประจุชนิดลบ จึงเขียน "−e" แทนประจุของอีเล็กตรอน สำหรับประจุของอนุภาคแอลฟานั้นเป็นประจุชนิดบวกจึงเขียนว่า "+ 2e" ในบทต่อไปจะได้เห็นกันว่าความจริงข้อนี้เข้ากันได้เป็นอย่างดีกับเรื่องโครงสร้างของอะตอม

การทดลองนี้ทำให้รัทเธอฟอร์ดและคนอื่น ๆ ค่อนข้างจะแน่ใจว่า อนุภาคแอลฟาคืออะตอมของฮีเลียมที่ถูกทำให้เป็นไอออน รัทเธอฟอร์ดรู้ว่าฮีเลียมหนักกว่าไฮโดรเจนสี่เท่า (การวัดน้ำหนักของอนุภาคแอลฟาอย่างคร่าว ๆ ก็ได้ผลเช่นนี้) นอกจากนี้เขารู้ว่าเมื่ออะตอมของฮีเลียมเสียอีเล็กตรอนไปสองตัว จะมีประจุไฟฟ้า + 2e แต่ก็อีกนั่นแหละ เขาต้องการข้อพิสูจน์ที่แน่นอน ต้องการให้แน่ใจ เขาให้เหตุผลว่าอนุภาคแอลฟาเสียพลังงานไปหมดแล้ว มันจะหยุดเคลื่อนที่และรวมกัน อีเล็กตรอนสองตัวกลายเป็นอะตอมของฮีเลียมซึ่งเป็นกลาง ตราบใดที่อนุภาคแอลฟายังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงอยู่ มันจะยังคงเป็นไอออน คือยังมีประจุไฟฟ้าอยู่ การที่อนุภาคนี้มีประจุไฟฟ้า และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมากนี่เอง จึงสามารถทำให้อะตอมของออกซิเจน (หรือก๊าซอื่นๆ) ที่มันผ่านไปกลายเป็นไอออน หญ้าจะไม่ติดก้อนหินที่

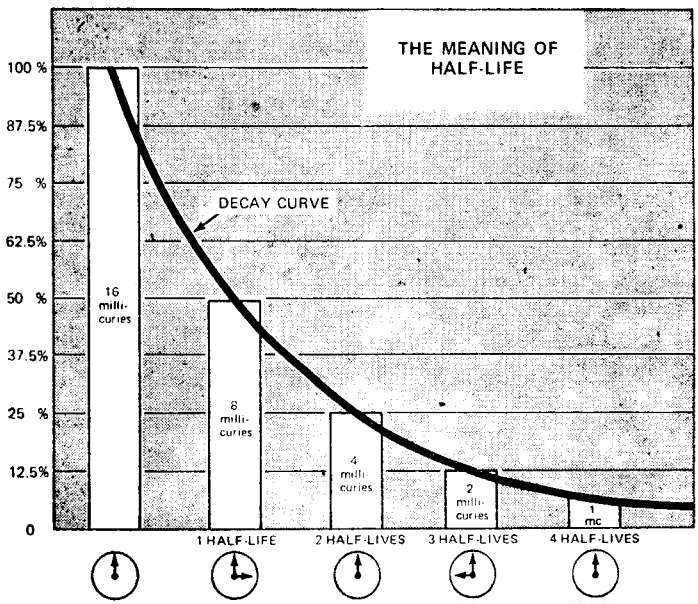
กลิ้งไปฉันใด อนุภาคแอลฟาที่มีความเร็วสูงจะไม่รวมตัวกับอีเล็กตรอนฉันนั้น

พูดอีกอย่างหนึ่งก็คือ อนุภาคแอลฟาทำให้อีเล็กตรอนหลุดไปจากอะตอมของก๊าซ แต่ตอนนี้ตัวมันเองเคลื่อนที่เร็วเกินไปกว่าที่จะดึงดูดอีเล็กตรอนที่มันทำให้หลุดออกมาได้ ซึ่งถ้าความเร็วต่ำกว่านั้นอาจจะทำได้ อนุภาคแอลฟาเปลี่ยนอะตอมของก๊าซที่มันผ่านไปให้เป็นไอออน แต่ในการปะทะแต่ละครั้ง อนุภาคแอลฟาซึ่งมีความเร็วสูงนั้นจะเสียพลังงานไปบ้าง และจะเคลื่อนที่ช้าลง ครั้นเมื่อเสียพลังงานไปเกือบหมดแล้วก็ไม่สามารถจะปะทะกับอะตอมได้แรงพออีกต่อไป ดังนั้นจึงสูญเสียอำนาจในการทำให้เกิดไอออนไป รัทเธอฟอร์ด สงสัยว่าเมื่อเป็นเช่นนี้แล้ว อนุภาคแอลฟาซึ่งสิ้นฤทธิ์ และมีประจุไฟฟ้าบวกนั้น จะไม่จับเอาอีเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบไว้สองตัว แล้วกลายเป็นอะตอมปกติของธาตุฮีเลียมหรือ น่าจะต้องทดสอบทฤษฎีโดยเอายูเรเนียมชิ้นเล็ก ๆ ใส่ในหลอดบาง ๆ ซึ่งแม้อนุภาคแอลฟาที่มีความเร็วไม่สูงมากนักก็ผ่านได้ แล้วเอาหลอดที่หนากว่าสวมนอกหลอดนี้อีกที่หนึ่ง ถ้าอนุภาคแอลฟาซึ่งสิ้นฤทธิ์แล้ว หรือฮีเลียมไอออน ซึ่งกลายเป็นอะตอมของฮีเลียม ตามธรรมดาแล้วมีจริง ควรจะถูกกักอยู่ในหลอดชั้นนอกซึ่งเดิมเป็นสูญญากาศนั้น แน่ละก๊าซฮีเลียมซึ่งได้มาโดยวิธีนี้จะมีปริมาณน้อยมาก แต่ก็อาจจะมากพอที่จะทดสอบดูได้ว่าใช่ฮีเลียมหรือไม่

ดู ๆ ไปแล้วแนวการทดลองนี้ก็สมเหตุสมผลอยู่ ดังนั้น รัทเธอฟอร์ดจึงลงมือโดยไม่รีรอ เขาตัดสินใจใช้วิธีซึ่งมีความไวมากในการทดสอบหาร่องรอยของก๊าซฮีเลียม คือติดอีเล็กโตรดโลหะหรือขั้วไฟฟ้าเล็ก ๆ สองอันเข้าในหลอดแก้วชั้นนอก, เขาปล่อยเครื่องมือทดลองไว้สองสามวัน เพื่อให้อนุภาคแอลฟาซึ่งกักไว้ในหลอดชั้นใน ได้มีเวลาผ่านออกไปยังหลอดชั้นนอกเป็นจำนวนมาก แล้วรัทเธอฟอร์ดกับเพื่อนร่วมงานอีกคนหนึ่งก็ให้โวลเตจแก่อีเล็กโตรดทั้งสอง โวลเตจนี้มากพอที่จะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออนภายใต้ความดันต่ำ ๆ แต่ไม่มากถึงกับทำให้เกิดรังสีเอกซ์ขึ้นมา คือมากพอที่จะทำให้ก๊าซในชั้นนอกส่งแสงเป็นสีออกมา เมื่อนักวิทยาศาสตร์ทั้งสอง ตรวจแสงนี้ด้วยสเปคโตรสโคป ซึ่งใช้แท่งแก้วปริซึมในการแยกแสง ก็พบเส้นสเปคตรัมซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของก๊าซฮีเลียม เป็นการพิสูจน์โดยไม่มีข้อสงสัยเลยว่าเกิดฮีเลียมขึ้นในการทดลองนี้ และนี่ก็เป็นข้อพิสูจน์ซึ่งแย้งไม่ได้เลยว่าอนุภาคแอลฟานั้นที่แท้ก็คือ อะตอมของฮีเลียมซึ่งเสียอีเล็กตรอนไปสองตัว ในตอนหลังเราจะได้เห็นกันว่าอะตอมของธาตุทุกธาตุมีสเปคตรัมแตกต่างกัน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เรารู้ได้ว่าเป็นธาตุอะไร ความจริงธาตุฮีเลียมถูกพบเป็นครั้งแรกในสเปค-ตรัมของแสงเดดก็โดยวิธีนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุต่าง ๆ ในอนุกรมธาตุกัมมันตภาพ ซึ่งขั้นต้นด้วยยูเรเนียมและสิ้นสุดลงด้วยตะกั่ว ก็เป็นที่สนใจของรัทเธอฟอร์ดด้วยเช่นเดียวกัน เขาทำการค้นคว้ากับเพื่อนร่วมงานอีกคนหนึ่ง และในที่สุดก็สามารถอธิบายได้ว่าทำไมยูเรเนียมจึงมีเรเดียมปนอยู่น้อยเหลือเกิน เพื่อที่จะให้เข้าใจเรื่องนี้ เราต้องดูระยะเวลาซึ่งอะตอมของยูเรเนียมใช้ในการที่จะเปลี่ยนไปเป็นอะตอมของตะกั่ว

ก่อนอื่นเราต้องหันมาพิจารณาว่า เมื่อสารเช่นเรเดียม ปล่อยอนุภาคแอลฟานั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง สมมุติว่าเราสามารถแยกอะตอมของเรเดียมออกมาได้อะตอมหนึ่งแล้ว เฝ้าดูมันสลายตัว เราจะต้องรอนานเท่าใดจึงจะเกิดเหตุการณ์นั้นขึ้น คำตอบก็คือไม่มีใครรู้ได้ อะตอมนั้นอาจจะสลายตัวทันที หรืออาจจะอยู่ไปนานตั้งล้านปีก็ได้ ต่อเมื่อเรามีหลาย ๆ อะตอมเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ เราจึงอาจศึกษาความเป็นไปโดยเฉลี่ยของมันได้ ตอนนี้ถ้าเรา *"นับ"* จำนวนอะตอมซึ่งปล่อยอนุภาคแอลฟา เราจะพบว่าอะตอมของเรเดียมทำตัวเหมือนกับเป็นเครื่องมือจับเวลาที่เที่ยงตรงมาก จากการวัดอย่างแม่นยำพบว่าการที่เรเดียมจะสูญเสียความสามารถ ในการปล่อยกัมมันตภาพรังสีไปครึ่งหนึ่งนั้น ใช้เวลา ๑๖๐๐ ปี ถ้าเราตั้งต้นด้วยเรเดียมบริสุทธิ์จำนวนไม่มาก ซึ่งปล่อยอนุภาคแอลฟา ได้ ๑ ล้านอนุภาคต่อวินาที อีกราว ๆ



รูปที่ ๒ เส้นโค้งในรูปแสดงให้เห็นถึงความหมายของคำว่าครึ่งชีวิต คือแสดงให้เห็นว่าเมื่อใดปริมาณกัมมันตภาพรังสีมีค่าเท่าใด ตามรูปนี้สารกัมมันตภาพมีครึ่งชีวิตสามชั่วโมง หน่วยคูรี เป็นหน่วยซึ่งเทียบเท่ากับกัมมันตภาพรังสีจากเรเดียมบริสุทธิ์ ๑ กรัม (Courtesy the University of California Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley.)

๑๖๐๐ ปี นับจากปัจจุบัน (ราว ๆ ปี ๓๕๖๐) ถ้าเรายังมีชีวิตคอยนับอยู่ เราจะพบว่ากัมมันตภาพรังสีเหลือเพียงครึ่งเดียว คือจะมีอนุภาคแอลฟาออกมาเพียงห้าแสนอนุภาคต่อวินาที เราเรียกระยะเวลาซึ่งสารเสียสภาวะกัมมันตภาพไปครึ่งหนึ่งว่า ครึ่ง

ชีวิต สารกัมมันตภาพนั้นกำลังจะตายอยู่ตลอดเวลา แต่ไม่ตายสนิทสักที

การสูญเสียสภาวะกัมมันตภาพ นับว่าเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวอันแปลกประหลาดของธาตุกัมมันตภาพทุกชนิด ธาตุแต่ละธาตุจะมีความเป็นครึ่งชีวิตเฉพาะตัว ธาตุเรเดียมซึ่งมีความเป็นครึ่งชีวิตหนึ่งในพันหกร้อยปี ได้ชื่อว่าเป็นธาตุที่มีอายุยืน ตรงข้ามกับธาตุโปโลเนียม ซึ่งมีความเป็นครึ่งชีวิตเพียงในสามนาที จัดว่าเป็นธาตุที่มีอายุสั้น ยูเรเนียมมีความเป็นครึ่งชีวิตนานอย่างน่าพิศวง คือ ๔.๕ พันล้านปี ปัญหามีอยู่ว่าเราจะอธิบายการที่มีเรเดียมอยู่ในโลกตราบจนทุกวันนี้ได้อย่างไร เมื่อตอนที่โลกเกิดขึ้นนั้นอาจมีเรเดียมอยู่เป็นจำนวนมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปถึงห้าพันล้านปี เรเดียมก็ควรลดลงจนแทบจะไม่มีเหลืออยู่อีกด้วย จะต้องมีสาเหตุบางอย่างที่ทำให้เรเดียมยังคงเหลืออยู่จนถึงปัจจุบันนี้

ลู่ทางซึ่งช่วยแก้ปัญหานี้ คือความจริงที่ว่าเราจะพบเรเดียมในสินแร่ซึ่งมียูเรเนียมอยู่เสมอไป รัทเธอฟอร์ด ไขปัญหาได้อย่างทะลุปรุโปร่ง เมื่อเขาศึกษากัมมันตภาพรังสีจากยูเรเนียมและสารกัมมันตภาพอื่น ๆ อธิบายอย่างง่ายได้ว่า รัทเธอฟอร์ดพิจารณาว่าเมื่ออะตอมปล่อยอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้า เช่นอนุภาคแอลฟาออกมาแล้ว ตัวมันเองจะเป็นอย่างไร รัทเธอฟอร์ดให้

เหตุผลว่า เนื่องจากอนุภาคแอลฟา คือไอออนของธาตุฮีเลียม ซึ่งมีมวลสารมากพอดู ดังนั้นอะตอมซึ่งสูญเสียอนุภาคแอลฟาจึงควรจะเปลี่ยนไปเป็นธาตุใหม่ เพราะอะตอมเดิมจะต้องขาดน้ำหนักและประจุไฟฟ้าไปอย่างแน่นอน เพื่อที่จะให้เข้าใจว่าการสูญเสียมวลสารและประจุไฟฟ้ามีความหมายเช่นไร เราต้องดูสิ่งที่เรียกกันว่า ตารางธาตุสักเล็กน้อยก่อน และเราต้องพิจารณาเรื่องน้ำหนักของอะตอมด้วย

ธาตุซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติมีอยู่เก้าสิบสองธาตุด้วยกัน ธาตุเหล่านี้เรียงลำดับจากไฮโดรเจนซึ่งเป็นก๊าซเบา จนถึงโลหะยูเรเนียมซึ่งเป็นธาตุหนัก ในระหว่างธาตุเบาที่สุดกับหนักที่สุดนี้มีก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นที่รู้จักกันดี ก๊าซไนโตรเจนซึ่งมีอยู่เหลือเฟือในอากาศ ธาตุคาร์บอน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของถ่าน ธาตุเงินทอง และธาตุที่หาได้ยาก เช่น สมาเรียม ยูโรเบียม และอื่นๆ ซึ่งไม่ค่อยเป็นที่รู้จักกันดีนัก ดมิตริ เมนเดลีฟ (Dmitri Mendeleev) นักเคมีชาวรัสเซีย ทำการศึกษาเกี่ยวกับธาตุหกสิบธาตุซึ่งรู้จักกันเมื่อสมัยร้อยปีมาแล้ว ได้พบว่าธาตุบางธาตุมีความคล้ายคลึงกันทางเคมี เขาแบ่งธาตุออกเป็นพวก ๆ อย่างมีระเบียบ คือจัดให้ธาตุซึ่งมีสมบัติทางเคมีคล้ายกันอยู่ในช่องแนวดิ่งเดียวกันในตาราง ตารางธาตุสมัยใหม่มีลักษณะดังในรูปถัดไป ให้สังเกตว่าธาตุเช่น ลิเธียม โซเดียม โปแตสเซียม และซีเซียม อยู่ในช่องดิ่งเดียวกัน และทุกธาตุมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกัน

ในตารางนี้ธาตุต่าง ๆ ถูกเรียงลำดับตามน้ำหนักอะตอม จากน้อยไปมาก โดยกำหนดขึ้นว่าน้ำหนักอะตอมของออกซิเจนเท่ากับ ๑๖.๐๐๐๐๐ พอดี และเปรียบเทียบน้ำหนักอะตอมของธาตุอื่นกับอะตอมของออกซิเจน ตามสเกลนี้น้ำหนักอะตอมของไฮโดรเจนเท่ากับ ๑.๐๐๘ ของคาร์บอน ๑๒.๐๑ ของเหล็ก ๕๕.๘๕ เงิน ๑๐๗.๘๘๐ ตะกั่ว ๒๐๗.๒๑ และของยูเรเนียมเท่ากับ ๒๓๘.๐๗ จะเห็นว่าอะตอมของคาร์บอนหนักเป็นสิบสองเท่าของอะตอมของไฮโดรเจน

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	1 H 1.0078										2 He 4.003
2	3 Li 6.940	4 Be 9.00	5 B 10.82	6 C 12.00	7 N 14.008	8 O 16.0000	9 F 19.00				10 Ne 20.183
3	11 Na 22.994	12 Mg 24.32	13 Al 26.97	14 Si 28.06	15 P 30.98	16 S 32.06	17 Cl 35.457				18 A 39.944
4	19 K 39.096	20 Ca 40.08	21 Sc 45.10	22 Ti 47.90	23 V 50.95	24 Cr 52.01	25 Mn 54.93	26 Fe 55.85	27 Co 58.94	28 Ni 58.69	
	29 Cu 63.57	30 Zn 66.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.60	33 As 74.91	34 Se 78.96	35 Br 79.916				36 Kr 83.7
5	37 Rb 85.48	38 S 87.63	39 Y 88.92	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.95	43 Tc	44 Ru 101.7	45 Rh 102.91	46 Pd 106.7	
	47 Ag 107.880	48 Cd 112.41	49 In 114.76	50 Sn 118.70	51 Sb 121.76	52 Te 127.61	53 I 126.92				54 Xe 131.3
6	55 Cs 132.91	56 Ba 137.36	57 La 138.92	* 72 Hf 178.6	73 Ta 180.88	74 W 183.92	75 Re 186.31	76 Os 190.2	77 Ir 193.1	78 Pt 195.23	
	79 Au 197.2	80 Hg 200.61	81 Tl 204.39	82 Pb 207.21	83 Bi 209.00	84 Po 210	85 At 212.7				86 Rn 222
7	87 Fr 223.7	88 Ra 226.05	89 Ac 227.05	90 Th 232.12	91 Pa 231.7	92 U 238.07					

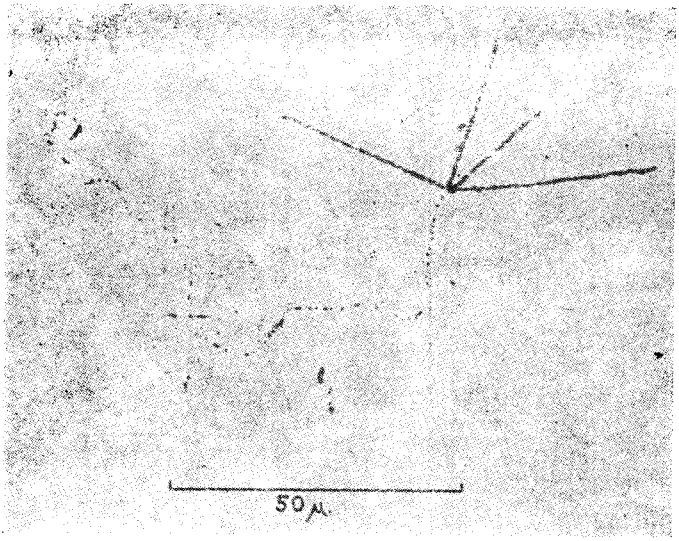
	RARE EARTHS	58 Ce 140.13	59 Pr 140.92	60 Nd 144.27	61 Pm 145.0	62 Sm 150.43	63 Eu 152.0	64 Gd 156.9	65 Tb 159.2	66 Dy 162.46	67 Ho 164.94	68 Er 167.20	69 Tm 169.4	70 Yb 173.04	71 Lu 174.99

รูปที่ ๓ การเรียงลำดับธาตุเป็นหมวดหมู่ ในช่องแนวตั้งแต่ละช่อง (ตัวเลขโรมันกำกับ) มีธาตุซึ่งคุณสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกัน ช่องตามแนวนอน (เลขฝรั่งกำกับ) แต่ละช่องตรงกับชั้นอีเล็กตรอนชั้นต่าง ๆ ในอะตอม

ในสมัยที่เมนเดลีฟยังมีชีวิตอยู่นั้น ยังไม่มีใครพบธาตุหนักๆ เกินจากตะกั่ว ผลจากงานค้นคว้าของมาดามคูรี่และคนอื่น ๆ ทำให้เห็นได้ชัดว่าธาตุพบใหม่ เช่น เรเดียม โปโลเนียมและเรดอน จะต้องมีที่อยู่ในตารางธาตุที่ใดที่หนึ่ง น้ำหนักอะตอมและอะตอมมิกนัมเบอร์ของธาตุใหม่เหล่านี้ใช่ว่าจะหาได้ง่าย ๆ อะตอมมิกนัมเบอร์นั้น มีความสำคัญมากไม่ใช่เพียงแต่บอกว่าแต่ละธาตุอยู่ตรงไหนในตารางธาตุเท่านั้น ไฮโดรเจนมีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๑ เป็นธาตุแรกในตารางธาตุ ยูเรเนียมมีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๙๒ เป็นธาตุสุดท้าย อะตอมมิกนัมเบอร์คือจำนวนประจุไฟฟ้าบวกในอะตอม นี่เป็นแนวคิดซึ่งจะได้พูดถึงกันในบทต่อไป

รัทเธอฟอร์ดมีความเห็นว่า เมื่ออะตอมของธาตุหนักปล่อยอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าไปแล้ว มันจะกลายเป็นอะตอมซึ่งแตกต่างจากเดิม คือเป็นอะตอมของอีกธาตุหนึ่ง พูดอีกอย่างหนึ่งก็คือเขามองเห็นอย่างแจ่มแจ้งว่าสภาวะกัมมันตภาพก็คือการ ระเบิดขับอนุภาคออกมา และเหลืออะตอมไว้ ตามแนวความคิดของรัทเธอฟอร์ดนั้น อะตอมที่เหลือนี้มีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับอะตอมเดิม เปรียบได้กับความสัมพันธ์ระหว่างพ่อแม่กับลูก เรารู้ว่าอนุภาคแอลฟามีน้ำหนัก ๔ หน่วย และมีประจุไฟฟ้าบวก ๒ หน่วย ดังนั้นถ้าอะตอมของยูเรเนียมปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมาอนุภาคหนึ่ง มันจะสลายตัวกลายเป็นอะตอมลูกซึ่งหนักน้อยกว่า

ที่เราเห็นรอยเท้าเปื้อน ๆ ย่ำไปบนพื้นที่สะอาดข้างล่าง อะตอมของธาตุกัมมันตภาพกำลังปล่อยอนุภาคแอลฟา อนุภาคแอลฟาออกจากโปโลเนียมซึ่งเป็นผงเล็ก ๆ ผั่งอยู่ในเยื่อใส ๆ ของน้ำยาเคลือบพีล์มถ่ายรูป เส้นดำ ๆ หนา ๆ คือทางเดินของอนุภาคแอลฟาซึ่งมีความเร็วสงที่ถูกปล่อยออกมาในการสลายตัวของ



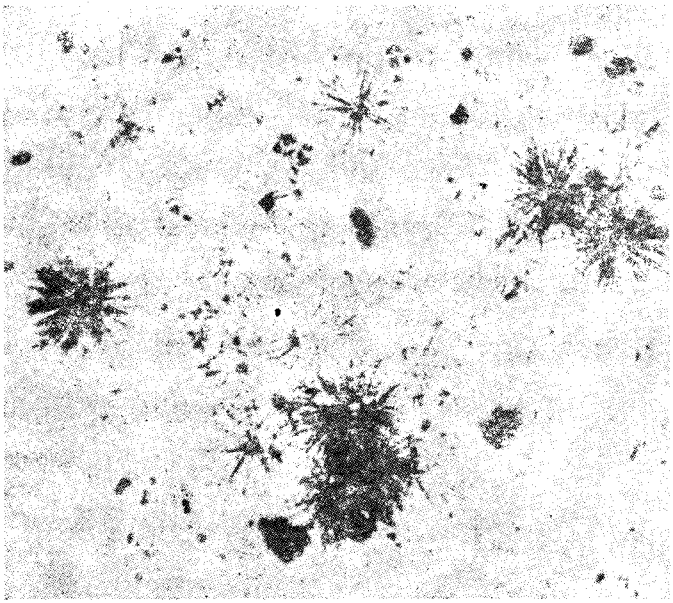
รูปที่ ๔ รูป "ดาว" เส้นหนักซึ่งแยกเป็นสี่แฉกคือทางเดินของอนุภาคแอลฟา อันเกิดจากการสลายตัวโดยผลพลอยได้จากธอเรียม เส้นบาง ๆ คด ๆ คือทางเดินของอนุภาคเบตา

เส้นสเกลซึ่งมีความยาวจริง ๕๐ ไมครอน (๐.๐๐๒ นิ้ว) ที่เห็นในรูปพอจะทำให้นึกออกว่ารูปนี้ถูกขยายมากเพียงใด

อะตอม ภาพเช่นนี้เรียกกันว่าภาพ "*ดาว*" เนื่องจากระยะทางซึ่งอนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ในน้ำยายาวเพียงเศษสองส่วนพัน ถึงเศษสามส่วนพันของนิ้วเท่านั้น เราต้องขยายฟิล์มถ่ายรูปหลายเท่าเพื่อให้ได้รูปภาพดังที่แสดงอยู่นี้

ภาพประกอบอีกภาพหนึ่งแสดงให้เห็นผลซึ่งเกิดจากการให้อะตอมของธาตุกัมมันตภาพเป็นจำนวนมากอยู่ในฟิล์มเป็นเวลานาน จะเห็นกลุ่มทางเดินรูปร่างเหมือนตัวเม่น แต่ละทางเดินหรือแต่ละเส้นของกระจุกซึ่งมีรูปร่างเป็นแฉก ๆ เกิดจากอนุภาค-แอลฟาซึ่งตอนแรกออกมาจากอะตอม "*พ่อแม่*" แล้วออกจากอะตอม "*ลูก*" อะตอม "*หลาน*" และอะตอม "*เหลน*" ในที่สุดให้สังเกตว่ามีทางเดินซึ่งคด ๆ งอ ๆ เส้นเล็กกว่าทางเดินของอนุภาคแอลฟาแต่ยาวกว่ามาก นี่คือทางเดินของอนุภาคเบตา (อีเล็กตรอน) ซึ่งถูกปล่อยออกมาในการที่อะตอมสลายตัวตามลำดับ (ภาพนี้ได้มาโดยใช้ภาพหลาย ๆ ภาพประกอบกันเข้า ภาพเหล่านี้ได้จากฟิล์มถ่ายรูปที่ความลึกต่างกัน)

น่าเสียดายที่ในสมัยของรัทเธอฟอร์ด ไม่มีน้ำยาถ่ายรูปซึ่งมีความไวมากอย่างนี้ รัทเธอฟอร์ดและเพื่อนร่วมงานต้องขบปัญหาอันสลับซับซ้อนเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสี และโครงสร้างของอะตอมโดยสรุปผลจากข้อมูลการทดลองซึ่งมีภาพอยู่ด้วยน้อยมาก เป็นการคลำหาทางในที่มืดอย่างแท้จริง ยิ่งไปกว่านั้นยังมีหลายสิ่ง



รูปที่ ๕ ภาพฟิล์มถ่ายรูปซึ่งผึ้งผงโปโลเนียมไว้เป็นหย่อม ๆ เส้นตรง ๆ คือทางเดินของอนุภาคแอลฟา ความจริงอนุภาคแอลฟาออกมาทุกทิศทุกทาง แต่ทางเดินซึ่งอยู่ในระนาบที่อยู่ในโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ขยายภาพนี้เท่านั้นที่เห็นยาวเต็มที่

หลายอย่างซึ่งลวงให้เข้าใจผิด การค้นคว้าวิจัยทั้งหมดก็ล้วนแต่เป็นสิ่งที่ผิดแผกไปจากที่เคยพบเคยเห็น แม้คนที่ทำงานอย่างรอบคอบที่สุดก็ยังเข้าใจสับสน ต้องนับว่ารัทเธอฟอร์ดเป็นผู้ยิ่งใหญ่แห่งยุคนี้ เขาสำรวจดินแดนแห่งความรู้ผืนใหม่และเข้ายึดครองเป็นเจ้าของได้สำเร็จ

๕

ใจกลางของอะตอม

ชาวกรีกโบราณเป็นผู้ริเริ่มแนวคิดเกี่ยวกับอะตอม ตั้งแต่ก่อนสมัยพระเยซูราว ๆ ห้าร้อยปี พวกเขาไตร่ตรองเรื่องโครงสร้างขั้นสุดท้ายของโลก และสงสัยว่าถ้าแยกเม็ดทรายหรือหยดน้ำสักหยดหนึ่งให้เล็กลงไปเรื่อย ๆ แล้ว จะมีอะไรเหลืออยู่ ชาวกรีกมีความเห็นว่าในที่สุดจะถึงขั้นที่ไม่สามารถแยกสสารซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดแล้วออกเป็นสองส่วนได้ และได้คิดชื่อ *"อะตอม"* ขึ้นซึ่งมีความหมายว่า *"ตัดไม่ได้อีกแล้ว"* น่าเสียดายที่คนเหล่านั้นไม่มีเครื่องมือที่จะทำการทดลอง เพื่อทดสอบทฤษฎีนี้อย่างจริงจัง จึงพอใจเพียงแค่นึกคิดจากการพิจารณาธรรมชาติของสิ่งต่าง ๆ เท่านั้น

ตอนเริ่มต้นศตวรรษปัจจุบันนี้ นักวิทยาศาสตร์ก็ยังคงคำนึงและเดาอยู่ แต่ก็ลงมือทำกันมากขึ้น คือหันเข้าหาห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบความคิดเหล่านั้น นักวิทยาศาสตร์เชื่อเหมือนกันว่าอะตอมเป็นสิ่งเล็กที่สุดแล้ว เล็กจนแยกออกต่อไปไม่ได้แล้ว ก่อนการค้นพบกัมมันตภาพรังสีนั้น นักวิทยาศาสตร์เป็นจำนวนมากพอใจในทรรศนะที่มองว่าอะตอมเป็นเสมือนลูกบิลเลียดที่เล็กมากเหลือเกิน หรือเป็นทรงกลมซึ่งแข็งแกร่งไม่มีอะไรจะผ่านทะลุไปได้

สิ่งซึ่งทำให้นักวิทยาศาสตร์ฉงนสนเท่ห์ก็คือ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอะตอม การทดลองในตอนแรก ๆ เกี่ยวกับอีเล็กตรอนก่อให้เกิดความงงงวยแก่นักวิทยาศาสตร์ เพราะไม่สามารถที่จะเชื่อมโยงความคิดที่ว่าอะตอมมีประจุไฟฟ้า กับความคิดที่ว่าอะตอมเป็นวัตถุตันแบบลูกบิลเลียดได้ การพบกัมมันตภาพรังสีทำให้ความคิดเดิมที่ว่าอะตอมเป็นสิ่งซึ่งแข็งแรงมั่นคงต้องคลอนแคลนถึงรากฐานทีเดียว และการค้นคว้าวิจัยของรัทเธอฟอร์ดในเรื่องกัมมันตภาพรังสีนั้นทำให้อะตอมต้อง *"แตกสลาย"* ไปจริง ๆ นักวิทยาศาสตร์ล้มเลิกความคิดที่ว่า อะตอมเป็นลูกกลมซึ่งแข็งแกร่งและมีขนาดเล็กมากเหลือเกิน การที่อะตอมเปลี่ยนเป็นอะตอมชนิดที่แตกต่างออกไป ในกระบวนการปล่อยกัมมันตภาพรังสีนั้นทำให้ความเชื่อที่ว่าอะตอมเป็นสิ่งซึ่งไม่มีผู้ใดทำลายได้ เป็นอันพับไป ถึงแม้การปล่อยอนุภาคแอลฟาโดยอะตอมของธาตุหนัก ๆ จะไม่ใช่เป็นการแยกอะตอมเป็นสองเสี่ยง แต่ก็ต้องนับว่าเป็นการแตกตัวของอะตอมอย่างแท้จริง และเป็นเรื่องที่นักฟิสิกส์ยอมรับยอมเชื่อกันอย่างไม่มีข้อสงสัย

นักวิทยาศาสตร์พากันฉงนสนเท่ห์เป็นอันมากว่า อีเล็กตรอนเกี่ยวพันกับโครงสร้างของอะตอมอย่างไร ความสงสัยนี้มีมาก่อนหน้าที่การทดลองอันปราดเปรื่องของรัทเธอฟอร์ด จะทำให้พอรู้อะไรต่ออะไรเกี่ยวกับภายในอะตอมเสียอีก การที่สังเกตเห็นว่าอี-

เล็กตรอนหรือรังสีคะโทดผ่านแผ่นอลูมิเนียมบาง ๆ ได้อย่างง่ายดาย ทำให้เลนนาร์ดสันนิษฐานว่า แทนที่อะตอมจะทึบตัน ข้างในควรจะเป็นที่ว่างเปล่าเสียเป็นส่วนมาก ดูเหมือน เจ.เจ. ทอมสัน จะเป็นคนแรกที่มีความคิดว่าภายในอะตอมมีอีเล็กตรอนอยู่ และเป็นส่วนประกอบที่สำคัญเสียด้วย ในปีเดียวกันกับที่ได้มีการพบเรเดียม ทอมสันกล่าวว่า *"ข้าพเจ้าคิดว่าในอะตอมมีอนุภาคอีเล็กตรอนอยู่เป็นจำนวนมาก"* เขาอธิบายว่า อะตอมมีความเป็นกลางในแง่ของประจุไฟฟ้า คือมีประจุไฟฟ้าบวกซึ่งลบล้างกันพอดีกับประจุลบของอีเล็กตรอน ดูเหมือนว่าในทรรศนะของทอมสันนั้นอะตอมจะเป็นทรงกลมซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวกและมีอีเล็กตรอนประปรายทั่ว ๆ ไป ต่อมาเขาได้ปรับปรุงขยับขยายทรรศนะนี้เป็นว่าอีเล็กตรอนอยู่เป็นชั้น ๆ ซึ่งเป็นทรงกลม ด้วยความเป็นอัจฉริยะ เขามองเห็นความสัมพันธ์ระหว่างชั้นต่าง ๆ ของอีเล็กตรอนกับคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของบรรดาธาตุทั้งหลาย พูดอีกอย่างหนึ่งก็คือ เขาชี้ให้เห็นว่าชั้นอีเล็กตรอนเป็นสิ่งซึ่งกำหนดคุณสมบัติทางเคมีของธาตุทั้งหลาย เขามีแนวความคิดซึ่งตอนหลังได้ถูกปรับปรุง ทำให้อธิบายคุณสมบัติทางเคมีของธาตุได้อย่างรัดกุม ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

เมื่อมองย้อนหลังไปดูประวัติ ความเป็นไปเกี่ยวกับอะตอมในตอนแรก ๆ แล้วก็น่าประหลาดใจมากที่นักวิทยาศาสตร์ญี่ปุ่น

ชื่อ ฮันตาโร นากาโอกา ได้มองเห็นความคล้ายคลึงของโครงสร้างของอะตอมกับของดวงดาวบนท้องฟ้า เขามีความเห็นว่าอีเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ประจุไฟฟ้าบวก ซึ่งอยู่ตรงกลาง เหมือนกับที่ดาวบริวารของดาวเคราะห์ หมุนไปรอบดาวเคราะห์ อย่างไรก็ตาม ความคิดนี้ได้รับความสนใจน้อยมาก เพราะนักวิทยาศาสตร์ไม่เต็มใจที่จะรับความคิดใหม่ ๆ ซึ่งไม่มีผลการทดลองสนับสนุน

วิวัฒนาการใหม่ ๆ และแปลก ๆ ในฟิสิกส์มีผลให้เกิดแนวความคิดใหม่ ๆ ขึ้น ณ ที่ต่าง ๆ ในปี ๑๙๐๕ อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ เสนอแนวคิดซึ่งค่อนข้างจะแผลงและใหม่เสียจนยากที่จะเชื่อได้ คือเสนอทฤษฎีสัมพัทธภาพ (เฉพาะ) ไอน์สไตน์อ้างว่ามวลสารและพลังงานมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดมาก และเขาได้สร้างสมการง่าย ๆ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองนี้ ถ้าให้ m แทนมวลสาร E แทนพลังงาน สมการของไอน์สไตน์คือ $E = mc^2$ ซึ่ง c^2 คือความเร็วของแสงยกกำลังสอง ค่านี้จะคงที่เสมอไม่เปลี่ยนแปลง ยังมีสิ่งอื่น ๆ อีกที่ไอน์สไตน์แถลงออกมา ซึ่งขัดกับแนวคิดที่นักวิทยาศาสตร์ยอมรับกันมาเป็นเวลานานไม่น้อยไปกว่าเรื่องมวลสารกับพลังงาน เราจะพิจารณาแต่เรื่องสมการมวลสาร–พลังงานของเขาสักเล็กน้อย

สำหรับคนส่วนมากคำว่ามวลสารมีความหมายค่อนข้างจะจริงจัง คือ หมายถึงน้ำหนัก ส่วนคำว่าพลังงานนั้นสำหรับคนทั่วไปรู้สึกว่ามีความหมายน้อย พลังงานมีอยู่หลายชนิดหรือหลายรูปด้วยกัน เช่น พลังงานจลน์ หรือพลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่กระสุนซึ่งมีความเร็วสูงมาก ดาวเทียมซึ่งวนเวียนรอบโลกไม่รู้จักหยุดหย่อน เป็นตัวอย่างของสิ่งที่มีพลังงานจลน์ ปริมาณทางฟิสิกส์เช่นมวลสารและพลังงาน มีหน่วยวัดโดยเฉพาะเป็นอย่าง ๆ ไป หน่วยเหล่านี้ค่อนข้างจะเป็นของแปลกสำหรับผู้ที่ไม่ได้เป็นนักวิทยาศาสตร์ เช่น เราวัดมวลสารเป็นกรัม (๔๕๓.๖ กรัม เท่ากับ ๑ ปอนด์) ความเร็วของแสงวัดได้ ๑๘๖,๐๐๐ ไมล์ ต่อ วินาที หรือถ้าใช้หน่วยซึ่งมักจะใช้กันในวิทยาศาสตร์จะมีค่าสามหมื่นล้านเซนติเมตรต่อวินาที (๒.๕๔ เซนติเมตรเท่ากับ ๑ นิ้ว)

ขอให้เรามาดูผลจากการใช้สมการ $E = mc^2$ ของไอน์สไตน์ เมื่อเราให้ m เท่ากับหนึ่งปอนด์หรือ ๔๕๓.๖ กรัม และ c เท่ากับสามหมื่นล้านเซนติเมตรต่อวินาที สมการนี้จะทำให้เรารู้ว่ามวลสารหนึ่งปอนด์มีค่าเทียบเท่ากับพลังงานเท่าใด ถ้าแทนค่าเหล่านี้ในสมการจะพบว่า E เท่ากับ ๔ แล้วตามด้วยศูนย์อีก ๒๓ ศูนย์ มาดูกันว่าค่ามากมายมหาศาลคือ ๔๐๐,๐๐๐,๐๐๐,๐๐๐,๐๐๐,๐๐๐,๐๐๐,๐๐๐ นี้ มีความหมายแค่ไหน ตาม

หน่วยที่เราใช้คือมวลสารเป็นกรัมและความเร็วเป็นเซนติเมตรต่อวินาทีนั้น พลังงานจะมีหน่วยเป็นเออร์ก หน่วยนี้เราอาจจะไม่คุ้นเคยจึงจะเปลี่ยนเสียให้เป็นแคลอรี ตอนนี้ขอให้ยอมรับเอาก็แล้วกันว่า ๑ แคลอรีเท่ากับ ๔๒ ล้านเออร์กเมื่อหารตัวเลขมากมายข้างบนนั้นด้วย ๔๒ ล้าน จะได้ผลลัพธ์โดยประมาณราว ๆ ๑๐,๐๐๐,๐๐๐,๐๐๐,๐๐๐,๐๐๐ แคลอรี

นักเคมีบอกให้เรารู้ว่าดินระเบิดแรงสูง เช่น TNT หนึ่งตัน เมื่อระเบิดจะให้ความร้อน ๑ พันล้านแคลอรี เมื่อเอาเลขจำนวนนี้ไปหารหมื่นล้านล้าน ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้จากมวลสาร ๑ ปอนด์ จะเห็นว่ามวลสารหนึ่งปอนด์ให้พลังงานเท่ากับ TNT สิบล้านตัน ผลลัพธ์อันมากมายนี้ดูแล้วไม่น่าเชื่อโดยสิ้นเชิง สสารเพียง ๑ ปอนด์ น้อยนิดจะเทียบเท่ากับ TNT ตั้งสิบล้านตันได้อย่างไรกัน

เพื่อที่จะตอบคำถามนี้เราต้องย้อนกลับไปหาข้อสมมุติของไอน์สไตน์ ที่ว่ามวลสารเทียบเท่ากับพลังงานตามสมการของเขานั้นเป็นความจริง แต่สมการนั้นไม่ได้ชี้ลู่ทางว่าพลังงานจะถูกปล่อยออกมาได้อย่างไร สมการเพียงแต่บอกว่าถ้าสามารถทำให้อะตอมทั้งหมดของสสาร ๑ ปอนด์ กลายเป็นพลังงานโดยสิ้นเชิงในทันทีทันใด จะเกิดการระเบิดซึ่งมีความรุนแรงเท่ากับการระเบิดของ TNT สิบล้านตัน อย่างไรก็ตามสมการของไอน์-

สไตน์ยังใช้ได้ในกรณีที่เกิดพลังงานน้อย ๆ กว่านั้น ตัวอย่างเช่น ในการเผาถ่านหิน (การลุกไหม้ทางเคมี) ในกระบวนการลุกไหม้นั้นคาร์บอนรวมกับออกซิเจน เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดพลังงานออกมาในรูปความร้อน คือ ของแข็งรวมกับก๊าซ เกิดเป็นก๊าซอีกอย่างหนึ่งขึ้น เราอาจคำนวณแบบเดียวกับในตัวอย่างที่แล้วมาได้ว่า ในกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินหนึ่งปอนด์นั้นมวลสารบางส่วนเปลี่ยน (ตามสมการ $E=mc^2$ ของไอน์สไตน์) เป็นพลังงาน แต่เรื่องของเรื่องก็อยู่ที่ว่าสมการ $E = mc^2$ นั้นเมื่อห้าสิบปีมาแล้วมีความหมายในทางปฏิบัติน้อยมาก ไม่ใช่เป็นเรื่องที่จะได้พบกันเป็นปกติธรรมดา

ไม่มีใครรู้กันว่าโครงสร้างภายในอะตอมเป็นอย่างไร ถึงแม้จะเดากันถึงเรื่องพลังงานของอะตอม แต่ก็เป็นการพูดไปโดยไม่มีอะไรเกิดขึ้น เพราะพลังงานนี้อยู่สุดเอื้อมของมนุษย์ ทฤษฎีใหม่แบบแหวกแนวของไอน์สไตน์ไม่มีผลต่อกระบวนการทางเคมีเช่น การลุกไหม้ของถ่านหิน อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์เช่น รัทเธอฟอร์ด รู้ว่าอะตอมมีพลังงานมากมายทีเดียว เขารู้ว่าเรเดียม ๑ กรัม มีความร้อนอยู่ในตัว และให้พลังงานออกมาราว ๑๐๐ แคลอรีทุก ๆ ชั่วโมง พลังงานนี้มีต้นกำเนิดมาจากอะตอม คือเกิดจากกระบวนการแตกทำลาย ซึ่งปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา อนุภาคเหล่านี้ให้พลังงานในรูปของความร้อน

อนุภาคแอลฟาซึ่งธาตุหนัก ๆ ปล่อยมานั้นมีพลังงานมากพอควร กระบวนการแตกทำลายทำให้เกิดอนุภาคแอลฟาซึ่งมีมวลสารไม่น้อย และมีความเร็วสูง ทำนองเดียวกันที่กระสุนปืนจริง ๆ ถูกขับออกมาจากลำกล้องเนื่องจากการปล่อยพลังงานอย่างกระทันหัน (การระเบิดของดินปืนทำให้ก๊าซซึ่งร้อนขยายตัว) อนุภาคแอลฟาก็ถูกขับออกมาโดยการเปลี่ยนแปลงบางอย่างของพลังงานภายในอะตอม สิ่งนี้เองที่ชวนให้ฉงนสนเท่ห์ยิ่งนักกระสุนหรืออนุภาคแอลฟานี้เอาพลังงานมากมายมาจากไหน หรือพูดอีกอย่างหนึ่งก็คือ เกิดอะไรขึ้นในอะตอม ใครเล่าจะตอบคำถามเช่นนี้ได้ ในเมื่อไม่มีผู้ใดรู้ว่าข้างในอะตอมเป็นอย่างไร

รัทเธอฟอร์ด ศึกษาปัญหานี้หลังจากที่มีการประกาศทฤษฎีของไอน์สไตน์ออกมาไม่นานนัก ตอนนั้นเขากำลังศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคแอลฟาร่วมกับ ดร. ไกเกอร์ ทั้งสองสังเกตเห็นว่า เมื่ออนุภาคแอลฟาผ่านแผ่นโลหะบาง ๆ ซึ่งทำจากธาตุหนัก ๆ อนุภาคบางตัวเบี่ยงเบนไปจากเส้นตรง ซึ่งเป็นแนวทางเดินเดิม และกระเด็นไปในทิศทางต่าง ๆ การกระจัดกระจายของอนุภาคแอลฟานี้ความจริงเกิดขึ้นไม่มาก และรัทเธอฟอร์ดคิดว่าเป็นสิ่งที่เป็นไปได้เพราะแม้แผ่นโลหะจะบางอย่างที่สุดแล้ว ก็ยังมีอะตอมซ้อน ๆ กันอยู่หลายต่อหลายชั้น ดังนั้นอนุภาคแอลฟาก็อาจจะเหไปจากทางเดิมได้บ้าง เนื่องจากไปกระทบกับอะตอม

ของแผ่นโลหะนั้นหลาย ๆ ครั้ง ดู ๆ ไปแล้วก็ไม่ค่อยมีความหมายอะไรนัก จนกระทั่งวันหนึ่งในปี ๑๙๐๙ ดร. ไกเกอร์มาหารัทเธอฟอร์ด และขอให้รัทเธอฟอร์ดตั้งปัญหาในการวิจัยให้แก่ เอิร์นเนสต์ มาร์สเดน ซึ่ง ดร. ไกเกอร์ กำลังเป็นผู้ผึกให้ รัทเธอฟอร์ดตอบว่า *"ทำไมไม่ให้แกลองสังเกตดูว่าอนุภาคแอลฟาจะถูกทำให้กระจัดกระจายไปเป็นมุมมาก ๆ ได้หรือไม่"* รัทเธอฟอร์ดเองไม่เคยคิดว่าจะเกิดผลอะไรที่น่าสนใจขึ้นมา เพียงแต่คิดว่าจะทำให้เกิดประสบการณ์ที่ดีนั้นเอง

สองสามวันไกเกอร์รุดเข้ามาหารัทเธอฟอร์ด ท่าทางตื่นเต้นอย่างเห็นได้ชัด เขาร้องออกมาว่า *"เราพบว่าอนุภาคแอล-ฟาบางตัวกระดอนถอยหลังเลยทีเดียวละ"*

การทดลองของไกเกอร์และมาร์สเดน นั้นเป็นการทดลองอย่างตรงไปตรงมา เขาใช้สารกัมมันตภาพชิ้นเล็ก ๆ เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา เอาสารนี้ใส่ในหลอดซึ่งมีแผงโลหะสองแผงวางเรียงกัน ที่แผงทั้งสองเจาะรูเล็ก ๆ ไว้ทำให้อนุภาคแอลฟาซึ่งเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเท่านั้นที่จะผ่านแผงนี้ไปได้ และให้ *"ลำแสง"* อนุภาคแอลฟาที่ผ่านมานี้ปะทะแผ่นโลหะบาง ๆ ซึ่งทำด้วยทองหรืออลูมิเนียม ความหนาของแผ่นโลหะน้อยกว่าหนึ่งในพันของนิ้ว หลังแผ่นโลหะบาง ๆ นี้มีฉากเล็ก ๆ ซึ่งฉาบ

ไว้ด้วยสังกะสีซัลไฟด์ ฉากนี้หมุนไปได้รอบ ๆ เมื่ออนุภาคแอลฟาไปปะทะฉากตัวหนึ่ง ก็จะเกิดแสงบนฉากตรงจุดที่ถูกกระทบขึ้นวูบหนึ่ง อากาศในหลอดนั้นถูกสูบออก เพราะมีฉะนั้นจะทำให้อนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ช้าลง เมื่อเอาฉากเข้าไปอยู่ใน *"วิถีกระสุน"* คืออยู่ตรง ๆ ตามแนวแกนของหลอด ก็จะสามารถนับจำนวนอนุภาคแอลฟาซึ่งแล่นทะลุแผ่นโลหะบาง ๆ และถูกเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยได้ เมื่อเลื่อนฉากไปให้ทำมุมกับลำแสงก็นับอนุภาคแอลฟาได้อีก นักวิทยาศาสตร์ทั้งสองแปลกใจมากที่ได้พบว่ามีอนุภาคแอลฟา ซึ่งออกไปในทิศทางตั้งฉากกับลำแสง ถึงแม้จะมีเป็นจำนวนน้อยก็ตาม ทั้งสองยังพบด้วยว่าอนุภาคบางตัวถูกทำให้กระจัดกระจายไปเป็นมุมกว่า ๙๐° คือพุ่งกลับไปทางต้นกำเนิดของอนุภาค

รัทเธอฟอร์ด เขียนเล่าไว้ภายหลังว่า *"เป็นเหตุการณ์ซึ่งเหลือเชื่อที่สุดเท่าที่ได้เคยพบมาในชีวิต ไม่น่าเชื่อพอ ๆ กับการยิงกระสุนปืนใหญ่ ๑๕ นิ้ว เข้าใส่เยื่อกระดาษบาง ๆ แล้วพบว่ากระสุนกระดอนกลับมาถูกคนยิง"*

รัทเธอฟอร์ด ได้ไตร่ตรองพิจารณาเหตุการณ์อันน่าตื่นเต้นที่เกิดขึ้น เมื่ออนุภาคแอลฟากระทบอะตอมของแผ่นโลหะนั้น เขาเห็นว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะเกิดจากการกระทบหลาย ๆ ครั้งติดต่อ

กัน เพราะถ้าเป็นเช่นนั้นอนุภาคแอลฟาก็จะเพียงแต่กระดอนไปมาเท่านั้น ไม่ถึงกับถูกเบี่ยงเบนไปเป็นมุมมาก ๆ ฉะนั้นจะต้องเป็นเรื่องของการชนกับอะตอมเดียวเพียงครั้งเดียว ตอนนี้รัทเธอฟอร์ดเข้าถึงหัวใจของเรื่องทีเดียว อนุภาคแอลฟาเพียงแต่เฉียด ๆ ผิวอะตอมไปเท่านั้นหรือ หรือว่าเจาะลึกเข้าไปถึงแก่นของอะตอม รัทเธอฟอร์ดสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า การที่อนุภาคแอลฟาจะกระจัดกระจายไปจากแนวทางเดิมอย่างมากมายเช่นนั้น จะต้องเกิดจาก *"การกระทบอย่างใกล้ชิด"* ทีเดียว คือ อนุภาคแอลฟาจะต้องเฉียดเข้าไปใกล้ประจุไฟฟ้า ซึ่งรวมกันอยู่อย่างหนาแน่น ถ้าประจุไฟฟ้าของอะตอมกระจายอยู่ทั่ว ๆ ไป โดยสม่ำเสมอ คล้าย ๆ กับเป็นกลุ่มเมฆซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกลมแล้ว อนุภาคแอลฟาจะไม่ถูกทำให้กระเด็นออกจากแนวทางของมันอย่างมากเช่นนั้นได้ เขาได้คิดแบบอะตอมซึ่งมีแก่นกลางหรือนิวเคลียสขึ้น แล้วคำนวณว่าถ้าอนุภาคแอลฟาเข้ามาอยู่ภายในระยะทางหนึ่งจากนิวเคลียสซึ่งมีประจุบวกนี้แล้ว มันจะถูกทำให้เบี่ยงเบนไปเป็นมุมซึ่งมีค่าเฉพาะมุมหนึ่ง การคำนวณของเขาให้ผลตรงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองเกี่ยวกับการกระจายของอนุภาคแอลฟา

ความคิดที่ว่าอะตอมเป็นเสมือนลูกบิลเลียดที่แข็งแกร่งถูกทำให้ย่อยยับไปเสียแล้ว อะตอมแบบใหม่ของรัทเธอฟอร์ด ซึ่งถือ

ว่าอะตอมเปรียบเสมือนสุริยจักรวาลเล็กกระจ้อยร่อยเข้ามาแทนที่ ในเวลาต่อมาหลังจากนั้น เมื่อเล่าถึงกำเนิดของทฤษฎีที่ว่าอะตอมมีนิวเคลียสหรือแก่นกลาง รัทเธอฟอร์ดจะยกเอาเหตุการณ์ทั้งหมดนี้มาเป็น *"ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นว่า เราค้นพบความจริงโดยบังเอิญได้เสมอ"*

จะว่าโดยบังเอิญ หรือตั้งใจก็ตามที ไม่ต้องสงสัยเลยว่ารัทเธอฟอร์ดได้ล่วงล้ำเข้าไปยังใจกลางของความลึกลับเกี่ยวกับโครงสร้างของอะตอม นิวเคลียสซึ่งมีขนาดเล็กมาก มีประจุไฟฟ้าบวกและมีมวลสารเป็นจำนวนมากของอะตอม ทำหน้าที่เหมือนดวงอาทิตย์ อีเล็กตรอนทั้งหลายซึ่งอยู่เป็นระยะห่างออกไปมาก (เปรียบเทียบกับขนาดของนิวเคลียส) เปรียบได้กับดาวบริวารรอบ ๆ ดวงอาทิตย์ นี่เป็นแนวความคิดในแง่ที่เกี่ยวกับประจุไฟฟ้าของอะตอมซึ่งจะเป็นที่ว่าง มีสสารอยู่เพียงประปรายที่นั่นบ้างที่นี่บ้างเหมือนกับสุริยจักรวาลของเรานั่นเอง ในที่สุดข้อสงสัยเกี่ยวกับอะตอมของนากาโอกา นักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่นก็ถูกต้อง แต่รัทเธอฟอร์ดเป็นผู้เปลี่ยนผลจากการทดลองเกี่ยวกับการกระจัดกระจายของอนุภาคแอลฟา ให้เป็นทฤษฎีใหม่ขึ้นมา

ทฤษฎีอันน่าตื่นเต้นของรัทเธอฟอร์ด ถูกพิมพ์เผยแพร่ในปี ๑๙๑๑ ภายหลังจากที่เขามั่นใจแล้วว่าการทดลองทั้งหลายทำให้สรุปผลได้เพียงอย่างเดียวเท่านั้น คืออะตอมจะต้องมีนิวเคลียสซึ่ง

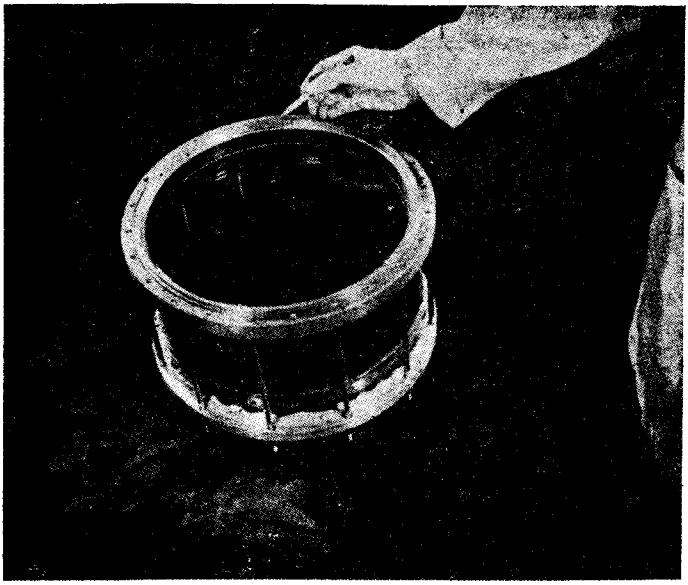
เล็กมาก และหนักมาก คือมวลสารแทบทั้งหมดของอะตอมอยู่ที่นั่น เขายังสามารถแสดงให้เห็นได้ด้วยว่านิวเคลียสจะต้องเล็กอย่างเหลือที่พรรณนาทีเดียว กินเนื้อที่เพียงหนึ่งส่วนในแสนส่วนของเนื้อที่ทั้งหมดของอะตอมเท่านั้น

ขอให้สังเกตว่าเป็นเรื่องน่าสนใจมากที่อนุภาคแอลฟาเป็นตัวที่ก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ มากมายเกี่ยวกับอะตอม กลับเป็นประโยชน์ในการหาคำตอบปัญหาเหล่านั้น อย่างไรก็ตามไม่ใช่ว่าจะตอบปัญหาได้หมด เพราะยังไม่มีใครสามารถอธิบายตัวกระบวนการแผ่กัมมันตภาพรังสีเองได้ ความรู้รากฐานเบื้องต้นยังมีช่องโหว่ใหญ่ ๆ อีกหลายแห่ง ซึ่งยังทำให้เต็มสมบูรณ์โดยเร็วไม่ได้ ถึงกระนั้นการทดลองแต่ละครั้งก็เพิ่มพูนความรู้ให้มากขึ้น นักวิทยาศาสตร์แต่ละคนได้อาศัยประสบการณ์ของคนก่อน ๆ เป็นมรดกตกทอดกันมาในการที่จะสร้างเสริมความรู้ต่อไป เช่นการทดลองเกี่ยวกับการกระจายของอนุภาคแอลฟา ก็อาศัยการค้นพบของเรินท์เกน เบคเกอเรล คูรี่ และคนอื่น ๆ อีกหลายคน ยิ่งไปกว่านั้นเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ก็เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงการรวมกลวิธีหลาย ๆ อย่าง ซึ่งเป็นผลงานของนักวิทยาศาสตร์หลาย ๆ ท่านเข้าด้วยกัน

เครื่องมือเครื่องใช้นั้นนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งยวด เพราะนักวิทยาศาสตร์ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับอนุภาคซึ่งเล็กมากจนมอง

ด้วยตาเปล่าไม่เห็น การทดลองซึ่งมีความหมายต่อการค้นคว้าอย่างแท้จริง จะสำเร็จได้ก็ต้องอาศัยเครื่องมือและวิธีการหลาย ๆ อย่าง ฉากเรืองแสง กระจกและฟิล์มถ่ายรูป และเครื่องนับไอออน ล้วนแต่เป็นเครื่องมือในการวิจัยเกี่ยวกับอะตอมที่มีประโยชน์มาก เกือบจะเป็นเวลาเดียวกันกับที่รัทเธอฟอร์ดประกาศทฤษฎีนิวเคลียร์อะตอมขึ้น เพื่อนนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษคนหนึ่งคือ ซี.ที.อาร์ วิลสัน (C.T.R. Wilson) ได้พบวิธีสังเกตปรากฏการณ์เกี่ยวกับอะตอมอย่างใหม่ ซึ่งแตกต่างไปจากวิธีเดิมมาก คือได้ประดิษฐ์เครื่องมือเรียกกันว่าห้องเมฆ (cloud chamber) ซึ่งทำให้มองเห็นเส้นทางเดินของอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าได้

ห้องเมฆของวิลสันอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าให้ก๊าซ (เช่นอากาศ) ซึ่งถูกเก็บไว้ในที่จำกัดขยายตัว ก๊าซนั้นจะเย็นลง และถ้าก๊าซนั้นอิ่มตัวด้วยไอน้ำ ไอน้ำจะกลายเป็นหยดน้ำเล็ก ๆ ถ้าไม่มีฝุ่นละอองให้เกาะ ไอน้ำก็จะรวมตัวเกาะบนไอออนที่มีอยู่ไม่ว่าจะเป็นไอออนอะไร ดร.วิลสันสร้างภาชนะทรงกระบอก มีแผ่นแก้วปิดข้างบน เพื่อให้มองอะไร ๆ ที่เกิดขึ้นภายในได้ ตรงกันข้ามกับแผ่นแก้วมีลูกสูบซึ่งเคลื่อนที่เข้าออกได้ เพื่ออัดและขยายอากาศในห้องเมฆ และจัดให้มีแสงส่องเข้าไปทำให้ภายในห้องเมฆสว่าง ดร. วิลสันแสดงให้เห็นว่าถ้าเอาสารกัมมันตภาพชิ้นเล็ก ๆ ใส่ไว้ในห้องเมฆข้างหนึ่ง และให้ห้องขยายตัวให้พอ



รูปที่ ๖ รูปห้องเมฆของวิลสัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ นิ้ว ซึ่งใช้ในการวิจัยเกี่ยวกับอะตอมที่หอปฏิบัติการแห่งชาติ บรูคฮาเวน เจ้าหน้าที่กำลังชี้ให้ดูฝาบนของห้องเมฆ การถ่ายภาพทางเดินต่าง ๆ ต้องถ่ายผ่านฝานี้ไป

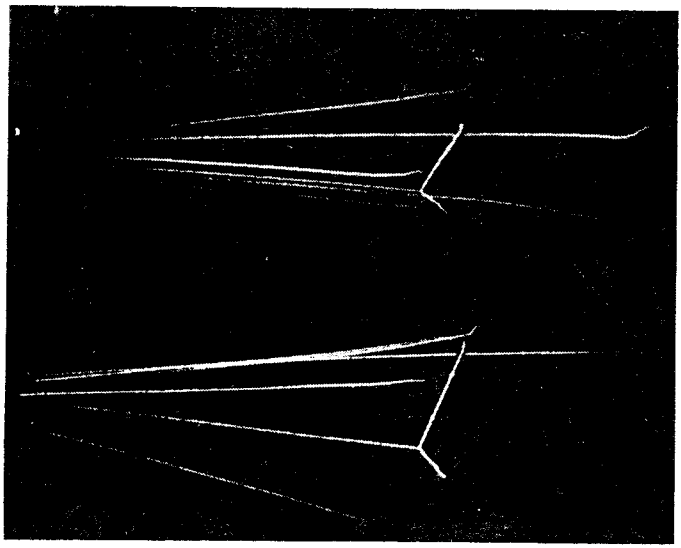
เหมาะ หยดน้ำเล็ก ๆ จะกลั่นตัวบนไอออนซึ่งเรียงรายอยู่ตามทางซึ่งอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าผ่านไป

เส้นทางเดินซึ่งเกิดจากอนุภาคแอลฟานั้นเห็นได้อย่างชัดเจนในภาพถ่าย ลักษณะเฉพาะตัวของทางเดินเหล่านี้ก็คือไม่แต่เพียงเป็นเส้นตรงโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ยังขาดหายไปโดยฉับพลัน คือมีความยาวที่แน่นอนอีกด้วย ถ้าเราพิจารณาทางเดินอย่างละเอียดก็

อาจจะนับจำนวนหยดไอน้ำเล็ก ๆ ได้ ทำให้สามารถรู้จำนวนไอออน ซึ่งเกิดจากอนุภาคแอลฟา ขณะที่มันผ่านไปในห้องเมฆได้ อนุภาคแอลฟาส่วนมากจะทำให้เกิดไอออนตามเส้นทางที่มันผ่านไป ประมาณ ๒๐๐,๐๐๐ ไอออนด้วยเหตุนี้จึงสามารถคำนวณพลังงานของอนุภาคแอลฟาแต่ละอนุภาคได้ โดยเอาจำนวนไอออนคูณด้วยพลังงานซึ่งต้องใช้ในการทำให้อะตอมกลายเป็นไอออนในอากาศ จากการทดลองพบว่าในการทำอะตอมซึ่งเป็นกลางหนึ่งอะตอม ให้เป็นไอออนต้องใช้พลังงานราว ๆ ๓๒ อีเล็กตรอนโวลต์ (ev) อีเล็กตรอนโวลต์เป็นหน่วยของพลังงานซึ่งเราจะใช้บ่อย ๆ ดังนั้นจะให้คำอธิบายไว้ในที่นี้ อีเล็กตรอนตัวหนึ่งในหลอดโทรทัศน์อาจจะถูกเร่งโดยศักดาไฟฟ้าสูงถึง ๑๘,๐๐๐ โวลต์ เราถือว่าอีเล็กตรอนตัวนี้มีพลังงาน ๑๘,๐๐๐ ev หรือ ๑๘ Kev (กิโลอีเล็กตรอนโวลต์) โดยนัยเดียวกันอีเล็กตรอนซึ่งถูกเร่งโดยศักดาไฟฟ้าสองล้านโวลต์มีพลังงาน ๒ Mev อักษร M แทนล้าน ทีนี้ขอให้เรากลับมาคำนวณพลังงานของอนุภาคแอลฟา จะเห็นว่า ๓๒ (พลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้อะตอมหนึ่งอะตอมกลายเป็นไอออน) คูณด้วย ๒๐๐,๐๐๐ (จำนวนไอออนซึ่งเกิดจากอนุภาคแอลฟาหนึ่งอนุภาค) ได้ผลลัพธ์ ๖,๔๐๐,๐๐๐ ev หรือ ๖.๔ Mev นี่เป็นพลังงานของอนุภาคแอลฟาหนึ่งอนุภาค

จะเห็นว่าอนุภาคแอลฟาซึ่งถูกปล่อยออกมาโดยธาตุกัมมันตภาพนั้นเป็นกระสุนเล็ก ๆ ซึ่งมีพลังงานสูง กระสุนเหล่านี้ถูกยิง

ออกมาด้วยความเร็วถึง ๑๐,๐๐๐ ไมล์ต่อวินาที เมื่อผ่านไปในก๊าซทำให้ก๊าซกลายเป็นไอออน เพราะประจุบวกซึ่งมีขนาดเป็นสองเท่าของประจุ (ลบ) ของอีเล็กตรอน จะดึงดูดอีเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบที่อยู่ในส่วนนอก ๆ ของอะตอมของก๊าซ แรงดึงดูดมากจนทำให้อีเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมเดิม และอะตอมนั้นก็กลายเป็นไอออน ตามที่ได้กล่าวแล้วก่อนหน้านี้ ว่าการที่จะทำอะตอมให้เป็นไอออนนั้นต้องใช้พลังงาน ดังนั้นอนุภาพแอลฟาจึงเสียพลังงานไปเรื่อย ๆ เนื่องจากการกระทบแต่ละครั้งขณะที่มันไปตามทางของมัน



รูปที่ ๗ ภาพถ่ายแสดงอนุภาคแอลฟากระทบกับอะตอมของออกซิเจนในห้องเมฆ (Courtesy P.M.S. Blackett)

หลังจากการทดลองเกี่ยวกับการกระจัดกระจายของอนุภาคแอลฟาเป็นครั้งแรกหลายปี การทดลองโดยใช้ห้องเมฆทำให้ได้พบเหตุการณ์ที่น่าตื่นเต้นซึ่งนาน ๆ จึงจะเกิดขึ้นสักครั้งหนึ่ง เหตุการณ์นี้คือการที่อนุภาคแอลฟากระทบกับอะตอมของออกซิเจนซึ่งบรรจุอยู่ในห้องเมฆ เพราะว่าอะตอมของก๊าซอยู่กันอย่างหนาแน่นน้อยกว่าของแผ่นโลหะ การที่อนุภาคแอลฟาจะถูกอะตอมของก๊าซทำให้กระจายจึงเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก ภาพถ่ายแสดงให้เห็นเหตุการณ์ซึ่งหาดูได้ยากนี้ คือเมื่ออนุภาคเข้าไปใกล้แกนกลางของอะตอมมาก ในรูปเราจะเห็นทางเดินของอนุภาคแอลฟา ซึ่งเป็นเส้นที่สองนับจากข้างบน ทางเดินนี้ตอนแรกเป็นเส้นตรงตามปกติ ครั้นมาถึงตรงจุดซึ่งเส้นนั้นแยกออกเป็นสองแฉก อนุภาคแอลฟาถูกทำให้เบนลงไปทางเบื้องล่างของภาพและหยุดอยู่ที่นั่น เส้นซึ่งแยกขึ้นไปข้างบนซึ่งเป็นเส้นที่โตและสั้นกว่า คือทางเดินของนิวเคลียสของออกซิเจน ซึ่งกระเด็นออกไป เนื่องจากการปะทะ นิวเคลียสนี้หนักกว่าจึงไปในก๊าซได้ไม่ไกล การปะทะเป็นการปะทะแบบยืดหยุ่น เปรียบได้กับลูกกอล์ฟปะทะกับลูกบิลเลียดบนโต๊ะบิลเลียด ลูกกอล์ฟ (อันเปรียบได้กับอนุภาคแอลฟา) เล็กกว่าและเบากว่าจึงกระดอนออกจากลูกบิลเลียด ส่วนลูกบิลเลียดนั้นสะท้อนไปเป็นระยะทางไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับที่ลูกกอล์ฟกระเด็นไป จะเห็น

ได้ว่าภาพซึ่งได้จากห้องเมฆเช่นนี้ มีความสำคัญมากในการที่จะทำความเข้าใจเหตุการณ์ซึ่งเกิดขึ้นแก่สิ่งเล็ก ๆ เช่นอะตอมนี้

ในอะตอมตามแบบของรัทเธอฟอร์ด ที่ว่ามีกลุ่มอีเล็กตรอนวนเวียนอยู่รอบนิวเคลียสนั้น ถือว่าจำนวนประจุไฟฟ้าบวกในนิวเคลียสเท่ากับจำนวนอีเล็กตรอนอันมีประจุไฟฟ้าลบ รัทเธอ-ฟอร์ดรู้ว่าอีเล็กตรอนซึ่งอยู่ในทางโคจรของมันนี่เอง ที่ทำให้อะ-ตอมเป็นรูปเป็นร่างขึ้นมา เขารู้ด้วยว่าเมื่ออนุภาคแอลฟาทะลวงเข้าไปในอะตอมของทองหรือปลาตินัมซึ่งมีอีเล็กตรอนอยู่ในทางโคจรเป็นจำนวนมากนั้น อนุภาคแอลฟามีโอกาสที่จะเข้าใกล้อีเล็กตรอนเหล่านี้มากกว่านิวเคลียสซึ่งเล็กมากและอยู่โดดเดี่ยว เขาสงสัยว่าเป็นไปได้หรือไม่ที่อีเล็กตรอนจะทำให้อนุภาคแอลฟาเบี่ยงเบนไปจากเส้นทางเดิม แต่แล้วเขาก็แสดงให้เห็นได้ว่า การที่อนุภาคแอล-ฟากระทบกับอีเล็กตรอนนั้น ไม่สามารถทำให้อนุภาคแอลฟาซึ่งหนักกว่ามาก (หลายพันเท่า) เบี่ยงเบนไปได้ ถึงแม้จะเกิดขึ้นบ่อยกว่าการกระทบกับนิวเคลียสก็ตาม ยิ่งไปกว่านั้นอีเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเพียงประจุเดียว ส่วนนิวเคลียสของทองคำมีประจุไฟฟ้าบวกถึง ๗๙ ประจุ เรื่องนี้เปรียบเทียบได้กับการที่ช้างสามารถบุกดงไผ่ไปได้โดยไม่ยาก แต่เมื่อมาพบกับต้นไม้ใหญ่เข้ามันก็ต้องหลบหลีกไปเสีย

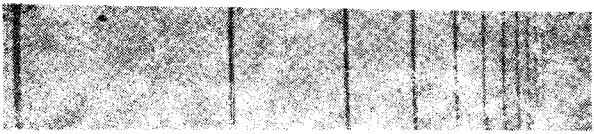
เรารู้อะไรเกี่ยวกับอีเล็กตรอนทั้ง ๗๙ ตัว ซึ่งอยู่ในวงโคจรในอะตอมของทองคำและเกี่ยวกับประจุบวกทั้ง ๗๙ ประจุในนิวเคลียสนั้นบ้าง ประจุบวกเหล่านี้คืออะไรกัน การจัดระเบียบของอีเล็กตรอนรอบนิวเคลียสเป็นไปอย่างไร อะไรทำให้มันอยู่ในวงโคจรได้ ปัญหาเหล่านี้ไม่มีผู้ใดตอบได้ในตอนนั้น ถึงแม้รัทเธอร์ฟอร์ดจะช่วยในการตอบปัญหาเหล่านี้หลายอย่าง แต่ผู้ซึ่งสามารถไขความลับเกี่ยวกับส่วนนอกของอะตอม คือนักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์กชื่อนีลส์ บอร์ (Niels Bohr)

อะตอมตามแบบของบอร์

รัทเธอฟอร์ดแหวกแนวบ้องกันของอะตอมได้สำเร็จ เขาเผยให้เห็นว่าอะตอมเป็นที่ว่างเปล่าแทบทั้งหมด และมวลสารส่วนใหญ่ของอะตอมอยู่ที่นิวเคลียส มีอีเล็กตรอนโคจรอยู่รอบ ๆ นิวเคลียสอย่างไม่หยุดหย่อน แต่รัทเธอฟอร์ดไม่สามารถอธิบายโครงสร้างชั้นนอกของอะตอมได้ คือไม่อาจอธิบายการที่อีเล็กตรอนอยู่กันเป็นชั้น ๆ รอบนิวเคลียส

นักฟิสิกส์ในเชิงทฤษฎีผู้ยิ่งใหญ่คนหนึ่งจากกรุงโคเปนเฮเกน ได้เสนอทฤษฎีซึ่งทำให้สามารถอธิบายเรื่องชั้นนอก ๆ ของอะตอมได้มากที่เดียว นักวิทยาศาสตร์คนนี้คือ นีลส์ บอร์ นีลส์ บอร์ และนักวิทยาศาสตร์อีกเป็นจำนวนมากรู้สึกฉงนสนเท่ห์ที่ข้อมูลซึ่งมีอยู่มากมายแสดงว่า ในอะตอมนั้นสิ่งทั้งหลายจะต้องอยู่กันอย่างมีระเบียบแบบแผนไม่อย่างใดก็อย่างหนึ่ง ตัวอย่างซึ่งได้เคยกล่าวถึงมาแล้วก็คือ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในก๊าซฮีเลียม จะให้แสงซึ่งมีลักษณะเฉพาะออกมา แสงซึ่ง (เมื่อผ่านเครื่องมือแล้ว) มองเห็นเป็นเส้น ๆ เหล่านี้แต่ละเส้นมีสีต่าง ๆ กัน และอาจวัดด้วยเครื่องมือทางแสงได้อย่างละเอียดถี่ถ้วนมาก ก๊าซฮีเลียมจะให้เส้นซึ่งไม่ซ้ำกับก๊าซอื่น ก๊าซไฮโดรเจนก็ให้เส้นซึ่งจัดได้เป็นหมู่หรือกลุ่ม แต่ละเส้นในแต่ละกลุ่มมีความยาวคลื่น

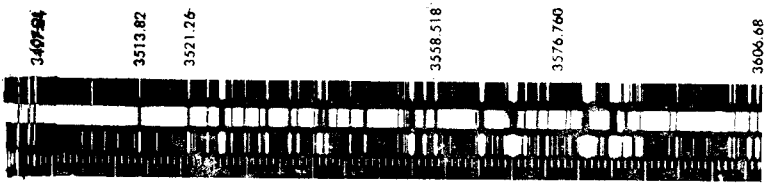
ของตัวเอง และทุก ๆ ธาตุมีคุณสมบัติเช่นนั้น สเปคตรัมหรือภาพถ่ายของเส้นเหล่านี้เรียงเป็นระเบียบอย่างน่าประหลาดใจ (ดูรูปประกอบ) เราอาจเขียนสูตรคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นซึ่งเรียงลำดับกันนี้ได้ แสดงให้เห็นชัดว่าจะต้องมีระเบียบแบบแผนที่แน่นอนภายในอะตอม



รูปที่ ๘ สเปคตรัมอย่างง่ายของไฮโดรเจน ได้จากการแยกแสงโดยแท่งแก้วปริซึม เส้นสเปคตรัมเส้นหนึ่งจะเกิดจากแสงซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนปล่อยออกมา เมื่ออีเล็กตรอนกระโดดจากวงโคจรหนึ่งไปยังอีกวงโคจรหนึ่ง

จากธาตุไฮโดรเจนเรื่อยไปในตารางธาตุจนถึงยูเรเนียม สเปคตรัมซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับแต่ละธาตุ จะมีจำนวนเส้นมากขึ้นและสลับซับซ้อนขึ้น เราพอจะมองเห็นความสลับซับซ้อนและจำนวนเส้นได้จากภาพซึ่งแสดงให้เห็นเส้นของสเปคตรัมอันได้จากช่องระหว่างอาร์คซึ่งทำด้วยเหล็ก (ใช้เหล็กเป็นอีเล็กโตรดสองอันทำให้เกิดก๊าซร้อนจัดมากระหว่างอีเล็กโตรดทั้งสอง) ในภาพนั้น (ส่วนหนึ่งของ) สเปคตรัมของแสงแดดอยู่ระหว่างกลาง (ส่วนหนึ่งของ) สเปคตรัมซึ่งได้จากเหล็ก ในดวงอาทิตย์นั้นมี

ธาตุต่าง ๆ อยู่มากมายหลายชนิด เราจะเห็นได้จากภาพว่าดวงอาทิตย์ให้เส้นสเปคตรัมซึ่งตรงกับเส้นสเปคตรัมของเหล็ก นี่เป็นข้อพิสูจน์ว่ามีธาตุเหล็กอยู่ในดวงอาทิตย์ โดยวิธีนี้เองที่ธาตุฮีเลียมถูกค้นพบเป็นครั้งแรก คือพบว่าเป็นส่วนประกอบอย่างหนึ่งของดวงอาทิตย์มาก่อนที่จะพบในโลกนี้เสียอีก



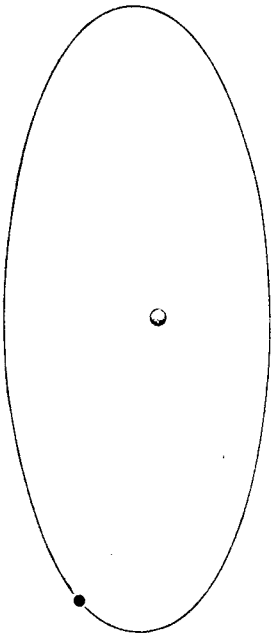
รูปที่ ๙ ส่วนหนึ่งของสเปคตรัมรังสีเหนือม่วง ซึ่งได้จากเหล็กที่ร้อนจัดจนกลายเป็นไอ (แถบบนและล่าง) และจากดวงอาทิตย์ (แถบกลาง) สเปคตรัมทั้งหมด จากรังสีเหนือม่วงถึงอินฟราเรดจะมีจำนวนเส้นหลายพันเส้น แต่ละเส้นเกิดจากการที่อีเล็กตรอนกระโดดจากวงโคจรหนึ่งไปยังอีกวงโคจรหนึ่ง และมีความยาวคลื่นที่แน่นอนค่าหนึ่งซึ่งวัดได้อย่างละเอียดเป็นตัวเลขถึงหกตัว

ทฤษฎีโครงสร้างของอะตอมของบอร์นั้น พยายามหาทางที่จะอธิบายสเปคตรัมของธาตุไฮโดรเจนและธาตุอื่น ๆ และก็อธิบายได้สำเร็จ ดร. บอร์ สมมุติว่าอะตอมของไฮโดรเจนประกอบด้วยนิวเคลียสซึ่งมีมวลสารมากอยู่ตรงกลาง นิวเคลียสนี้มีประจุไฟฟ้าบวกหนึ่งประจุ และมีอีเล็กตรอนหนึ่งตัว เคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียส จะเห็นได้ว่าบอร์ใช้ทฤษฎีของรัทเธอฟอร์ดที่

ว่าอะตอมมีนิวเคลียสนั่นเอง ในการตั้งข้อสมมุตินี้ บอร์ไม่ได้เสนออะไรใหม่ขึ้นมา นักวิทยาศาสตร์คนอื่น ๆ ก็ได้เคยคิดเกี่ยวกับแบบของอะตอม ซึ่งมีไฮโดรเจนประกอบด้วยนิวเคลียสที่มีประจุไฟฟ้าหนึ่งหน่วย (ต่อไปเราจะเรียกว่าโปรตอน ถึงแม้ในสมัยของบอร์ยังไม่ได้ใช้ชื่อนี้กัน) และมีอีเล็กตรอน ๑ ตัว วนเวียนอยู่รอบ ๆ อะตอมแบบนี้ทำให้เกิดปัญหาขึ้น เนื่องจากโปรตอนและอีเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าชนิดตรงกันข้าม จึงควรจะดึงดูดซึ่งกันและกัน และอีเล็กตรอนควรจะดวงสว่านเข้าชนนิวเคลียส ถ้าเป็นเช่นนี้จริง ไม่ใช่แต่ทฤษฎีอะตอมเท่านั้นที่จะถึงแก่กาลวิบัติ จักรวาลทั้งจักรวาลก็จะแตกทำลายลงไปด้วย แต่ก็เห็นอยู่ชัด ๆ แล้วว่าเหตุการณ์เช่นนั้นไม่เกิดขึ้น ปัญหาจึงมีอยู่ว่าเพราะเหตุใดจึงไม่เกิด ทำไมทุกวันนี้อีเล็กตรอนจึงวนเวียนอยู่ได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่หยุดหย่อนในวงจรเดียวกันกับที่เคยอยู่ เมื่อสมัยโรมันหรือสมัยก่อนประวัติศาสตร์

ดูไปก็ชวนให้เสนอคำอธิบายโดยอาศัยหลักของระบบสุริยะ โลกเราเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์ในวงโคจรอันมหึมา ระยะทางเฉลี่ยจากโลกถึงดวงอาทิตย์ประมาณ ๙๓ ล้านไมล์ เนื่องจากโลกใช้เวลาหนึ่งปีในการเคลื่อนที่ครบรอบ เราจึงรู้ว่าอัตราเร็วเฉลี่ยในการโคจรเท่ากับ ๖๖,๐๐๐ ไมล์ต่อชั่วโมง แต่ทำไมโลกจึงเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์ไปได้เรื่อย ๆ เล่า ทั้ง ๆ ที่แรงโน้มถ่วง

ระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ควรจะดึงดูดให้เข้าหากัน คำตอบก็คือ เพราะโลกเคลื่อนที่นั่นเอง การเคลื่อนที่ของโลกทำให้เกิดแรงเหวี่ยง ซึ่งถ้าไม่มีแรงดึงดูดของดวงอาทิตย์แล้ว จะทำให้โลกหลุดออกไปเหมือนกับหยดน้ำบนล้อ ซึ่งกำลังหมุนและแรงเหวี่ยงเท่ากับแรงดึงดูดของดวงอาทิตย์พอดี



รูปที่ ๑๐ ไฮโดรเจน ๑ ซึ่งเป็นอะตอมที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด ประกอบด้วยโปรตอนหนึ่งตัวเป็นนิวเคลียส และอีเล็กตรอนหนึ่งตัวเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ ในรูปนี้ขนาดของนิวเคลียสถูกขยายให้โตผิดส่วน และขนาดจริงของอะตอมจะเล็กกว่าในภาพนี้ถึงหนึ่งพันล้านเท่า

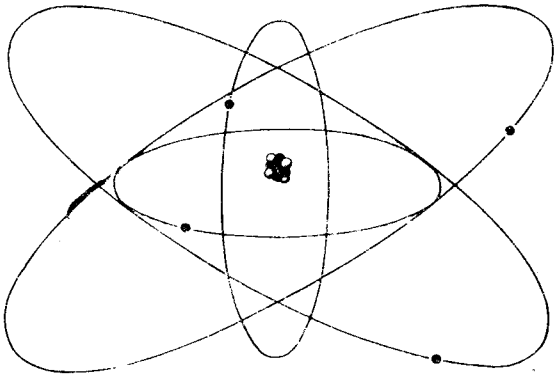
สำหรับในบั่จจุบันนี้สิ่งเหล่านี้ไม่ใช่เป็นสิ่งซึ่งเหลือที่จะเชื่อ เพราะเรามีดาวเทียมโคจรอยู่รอบ ๆ โลก ดาวเทียมเหล่านี้ถูกยิงขึ้นไปอย่างระมัดระวังให้มีความเร็วที่พอเหมาะ เพื่อให้เส้นทางเดินกลายเป็นวงโคจรที่ทำให้มันคงอยู่ได้ ดาวเทียมที่เป็นบริวารของโลกต้องมีความเร็ว ๖ ไมล์ต่อวินาที จึงจะเข้าสู่วงโคจรได้ และถ้าไม่มีแรงต้านทานของอากาศแล้ว มันอยู่ในวงจรตลอดไป แต่เนื่องจากมีความเสียดทานของอากาศเล็กน้อย ความเร็วของมันจะลดลง ทำให้โคจรต่ำลงสู่อากาศของโลก และพบจุดจบเมื่อเรามองเห็นเป็นทางลุกสว่างในท้องฟ้า

โลกเราเคลื่อนที่ไปในที่ว่าง ซึ่งไม่มีความเสียดทานรอบดวงอาทิตย์ จึงไม่ต้องประสบชะตากรรมแบบเดียวกับดาวเทียม ดวงจันทร์เคลื่อนที่ไปโดยไม่หยุดหย่อนรอบ ๆ โลก ก็โดยสาเหตุเดียวกัน อีเล็กตรอนก็หมุนรอบนิวเคลียสของอะตอมในที่ว่างซึ่งไม่มีความฝืด อย่างไรก็ตาม ตามกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์นั้น อีเล็ก-ตรอนซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วขนาดนั้น คือความเร็วหลายร้อยเท่าของความเร็วของดาวเทียม จะต้องปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสี คือแสงสว่าง และเมื่อเสียพลังงานไป วงโคจรของอีเล็กตรอนจะแคบเข้า คือเข้าไปใกล้นิวเคลียสทุกที ๆ จนในที่สุดจะพุ่งเข้าชนนิวเคลียสเลยทีเดียว

บอร์ตั้งข้อสมมุติซึ่งค่อนข้างจะอุกอาจว่า แนวคิดแบบเก่านั้นผิด เขาเสนอแนวคิดใหม่ขึ้นแทนว่า อีเล็กตรอนอาจอยู่ในวงจรซึ่งคงที่ได้โดยไม่ปล่อยพลังงานออกมา และเมื่ออยู่ในวงโคจรหนึ่ง จะมีค่าพลังงานเฉพาะตัวค่าหนึ่ง อีเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรเช่นนี้ได้ชื่อว่าอยู่ใน *"สถานะนิ่ง"* ไม่มีการสูญเสียพลังงาน เมื่ออะตอมดูดกลืนพลังงาน เช่น ในการที่ก๊าซในหลอดดิสชาร์จถูกกระตุ้นอย่างรุนแรงด้วยไฟฟ้า อีเล็กตรอนจะกระโดดจากวงโคจรหนึ่งไปยังอีกวงโคจรหนึ่ง ซึ่งกว้างกว่า และเมื่ออีเล็กตรอนในอะตอม ซึ่งได้รับพลังงานกระตุ้นแล้วนี้กระโดดกลับเข้าไปยังวงโคจรข้างใน พลังงานจะถูกปล่อยออกมาในรูปของแสง เนื่องจากมีวงโคจรที่เป็นไปได้สำหรับอีเล็กตรอนมากมาย การเปลี่ยนวงโคจรที่เป็นไปได้จึงมีอยู่หลายวิธี แต่ละวิธีให้แสงสีต่าง ๆ ซึ่งอะตอมเปล่งออกมานั่นเอง ตอนนี้เราจะเห็นว่าเส้นต่าง ๆ อันมีระเบียบของสเปคตรัมของธาตุต่าง ๆ นั้นมีความหมายอย่างไร คือเป็นผลโดยตรงจากการที่มีวงโคจรที่แน่นอนสำหรับอีเล็กตรอนในอะตอมนั่นเอง กล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือตามทรรศนะใหม่อันห้าวหาญของบอร์ เกี่ยวกับโครงสร้างของอะตอมนั้น ถือว่ามีวงโคจรอันมีระเบียบอยู่จำนวนหนึ่งซึ่งอีเล็กตรอนอยู่ได้ และจะมีการปล่อยพลังงานซึ่งมักจะอยู่ในรูป

ของแสงสีต่าง ๆ ของเส้นสเปคตรัมซึ่งได้พูดถึงมาแล้ว เมื่ออีเล็ก-ตรอนกระโดดจากวงโคจรหนึ่งไปยังอีกวงโคจรหนึ่ง เนื่องจากบอร์กำหนดลงไปว่า มีจำนวนโคจรที่เป็นไปได้ ซึ่งเว้นระยะห่างอย่างมีระเบียบอยู่จำนวนหนึ่งเท่านั้น และแต่ละวงโคจรก็มีค่าพลังงานเฉพาะตัวค่าหนึ่ง จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนวงโคจรแต่ละครั้งจะทำให้มีพลังงานอันมีค่าแน่นอนออกมาค่าหนึ่ง เส้นสเปคตรัมเส้นหนึ่งจึงได้จากการที่อีเล็กตรอนกระโดดจากวงโคจรหนึ่งไปยังอีกวงโคจรหนึ่ง เช่นเส้นต่าง ๆ ในรูปซึ่งแสดงสเปคตรัมของไฮโดรเจนอันเป็นอะตอมง่าย ๆ มีโปรตอนหนึ่งตัวและอีเล็กตรอนหนึ่งตัวเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ ไฮโดรเจนชนิดธรรมดามีวงจรซึ่งเป็นไปได้อยู่เป็นจำนวนไม่มากนัก จึงมีการเปลี่ยนวงโคจรได้ไม่กี่วิธี แต่ละวิธีก็ให้เส้นสเปคตรัมของไฮโดรเจนหนึ่งเส้น

ทฤษฎีของบอร์ ซึ่งเขาเสนอขึ้นในปี ๑๙๑๓ ขณะที่ทำงานร่วมกับรัทเธอฟอร์ด ที่มหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์นั้นไม่ใช่ว่าจะอธิบายปัญหาต่าง ๆ ที่มีอยู่ได้หมด แต่ก็นับว่าเป็นพื้นฐานในการสร้างทฤษฎีเกี่ยวกับโครงสร้างของอะตอมอย่างใหม่ขึ้น นักฟิสิกส์ได้แบบของอะตอมซึ่งพอที่จะเชื่อถือได้ โครงสร้างของอะตอมซึ่งสลับซับซ้อนยิ่งขึ้นไป เช่น ของเหล็กซึ่งมีอีเล็กตรอนในวงโคจรอยู่ ๒๖ ตัวเห็นได้ชัดว่าจะต้องยุ่งยากขึ้นไปอีก เช่นว่าอีเล็กตรอนเหล่านี้อยู่กันรอบ ๆ นิวเคลียสอย่างไร เป็นต้น

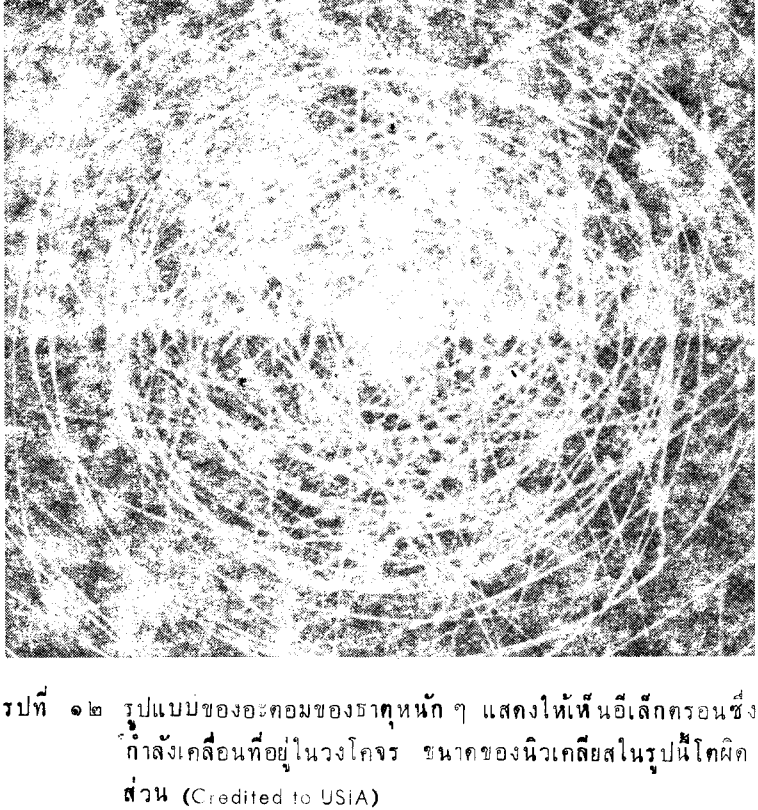


รูปที่ ๑๑ แผนภาพแสดงให้เห็นนิวเคลียสอันหนาแน่น (ขนาดขยายจนโตผิดส่วนมาก) ของอะตอมของธาตุเบา ๆ (เบอริลเลียม) ซึ่งมีอีเล็กตรอนในวงโคจรสี่ตัว

ในอะตอมตามแบบของบอร์นั้น อีเล็กตรอนพวกซึ่งอยู่นอกสุดเป็นตัวซึ่งทำให้เกิดเส้นต่าง ๆ ในสเปคตรัม พูดอีกอย่างก็คือว่า อีเล็กตรอนพวกที่อยู่ชั้นนอก ๆ นั้นอยู่ห่างออกไปจากประจุของนิวเคลียสจึงถูก *"ยึด"* กับนิวเคลียสไว้อย่างหลวม ๆ ทำให้อีเล็กตรอนเหล่านี้หลุดออกไป หรือเคลื่อนที่ไปมาได้ง่ายกว่าพวกอีเล็กตรอนซึ่งอยู่ข้างใน อีเล็กตรอนชั้นนอก ๆ นี้เองที่มีความสำคัญเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีของอะตอม และอีเล็กตรอนพวกนี้อีกเช่นเดียวกันที่ถูกทำให้หลุดไปโดยง่าย โดยกระบวนการทำให้เป็นไอออน

เกี่ยวกับคุณสมบัติของธาตุ เช่น โซเดียม โปแตสเซียม และธาตุอื่น ๆ ซึ่งอยู่ในแถวเดียวกัน ในตารางธาตุนั้น เราอาจ

สมมุติว่าการที่ธาตุเหล่านี้ มีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกัน เป็นเพราะอะตอมของแต่ละธาตุมีอีเล็กตรอนชั้นนอกตัวหนึ่ง ซึ่งเป็น "อิสระ" ขอให้เรามาดูอะตอมมิกนัมเบอร์ ซึ่งเรียงกันตามลำดับของธาตุเหล่านี้ ไฮโดรเจน มีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๑ จึงมีอีเล็กตรอนในวงโคจร ๑ ตัว ลิเธียม มีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๓ โซเดียม ๑๑ โปแตสเซียม ๑๙ รูบิเดียม ๓๗ และซีเซียม ๕๕ คือทุกธาตุมีจำนวนอีเล็กตรอนเป็นเลขคี่ ถ้าเอาตัวเลขตัวหนึ่งลบออกจากเลขตัวถัดไป เราจะได้ลำดับเลขต่อไปนี้ ๒, ๘, ๘, ๑๘, ๑๘ ทีนี้ถ้าเราดูแถวสุดท้ายในตารางธาตุ เริ่มด้วยฮีเลียมซึ่งมีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๒ ถัดลงไปคือ นีออน (๑๐) อาร์กอน (๑๘) คริปตอน (๓๖) และซีนอน (๕๔) ล้วนแต่เป็นเลขคู่ทั้งสิ้น ถ้าเราเอาอะตอมมิกนัมเบอร์ลบกัน เราจะได้ลำดับเลขชุดเดิม คือ ๘, ๘, ๑๘ และ ๑๘ ที่น่าสังเกตเกี่ยวกับธาตุพวกนี้ก็คือ ทุกธาตุเป็นก๊าซเฉื่อยซึ่งไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับธาตุอื่น ในทางตรงข้ามธาตุ เช่น โซเดียม โปแตสเซียม รวมกับธาตุอื่นได้ง่าย เช่น รวมกับธาตุคลอรีน เกลือแกงนั้นคือสารประกอบของโซเดียมกับคลอรีน หรือ NaCl



รูปที่ ๑๒ รูปแบบของอะตอมของธาตุหนัก ๆ แสดงให้เห็นอีเล็กตรอนซึ่งกำลังเคลื่อนที่อยู่ในวงโคจร ขนาดของนิวเคลียสในรูปนี้โตผิดส่วน (Credited to USIA)

เนื่องจากก๊าซเฉื่อย ๆ ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับธาตุอื่น จึงน่าจะถือว่าอีเล็กตรอนของก๊าซพวกนี้ประกอบกันขึ้นเป็น "*ชั้นปิด*" คือชั้นซึ่งมีอีเล็กตรอนเป็นจำนวน ๒, ๘ และ ๑๘ โซเดียม มี "*ชั้นปิด*" ๒ ชั้น คือ ชั้นซึ่งมีอีเล็กตรอน ๒ และ ๘ ตัว และมีอีเล็กตรอนเพียงตัวเดียวอยู่ในวงโคจรนอกสุด ส่วนคลอรีน

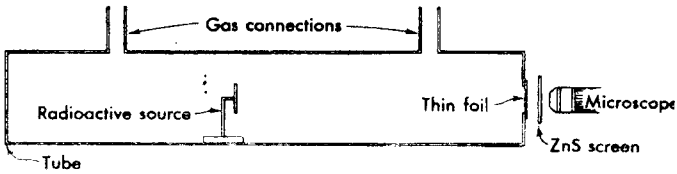
๗

อะตอมถูกทำให้แตกตัว

ในโอกาสที่ไปเยือนสหรัฐอเมริกา ก่อนเกิดสงครามโลกครั้งที่ ๑ ลอร์ดรัทเธอฟอร์ดได้ทำนายไว้ว่า *"มีทางที่จะทำให้นิวเคลียสของอะตอมเปลี่ยนแปลงไปได้โดยให้นิวเคลียสของฮีเลียมซึ่งได้จากสารกัมมันตภาพกระแทกกับอะตอมอย่างจัง ๆ"* พูดอีกอย่างหนึ่งก็คือว่า นักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ชั้นนำชาวอังกฤษผู้นี้ เชื่อว่าไม่เพียงแต่อาจทำให้อนุภาคแอลฟาเปลี่ยนทิศทางอย่างกะทันหัน เช่น ในการทดลองเกี่ยวกับการกระจายของอนุภาคแอลฟาได้เท่านั้น แต่อนุภาคแอลฟาบางตัวอาจจะพุ่งเข้ากระแทกนิวเคลียสโดยตรงเลยก็ได้

รัทเธอฟอร์ด ต้องรอจนสงครามเลิกจึงได้กลับไปทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ความคิดของเขา เขาออกแบบเครื่องมือดังแสดงในภาพ เครื่องมือนั้นประกอบด้วยหลอดแก้วยาวซึ่งสามารถเก็บก๊าซไว้ได้ ที่ปลายหลอดข้างหนึ่ง รัทเธอฟอร์ดเอาสารซึ่งให้อนุภาคแอลฟา (เขาใช้สารซึ่งได้จากการสลายตัวของเรเดียม) ไปวางไว้ แหล่งของอนุภาคแอลฟานี้เคลื่อนไปมาในหลอดได้ เขาเอาแผ่นโลหะบาง ๆ ปะไว้ที่ช่องที่ปลายอีกข้างหนึ่งของหลอด และจัดฉากซึ่งฉาบสังกะสีซัลไฟด์ดังแสดงในรูป แล้วจัดให้มีกล้อง

จุลทรรศน์ไว้สำหรับมองแสงวูบวาบ อันเกิดจากการที่อนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้ากระทบฉาก



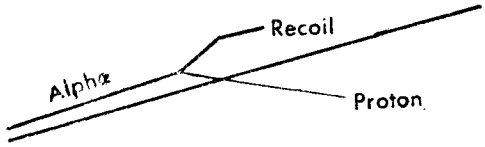
รูปที่ ๑๔ แผนภาพเครื่องมือของรัทเธอฟอร์ด ซึ่งใช้สังเกตการทำให้อะตอมแตกออกเป็นครั้งแรก

รัทเธอฟอร์ดพบว่า เมื่อบรรจุออกซิเจนไว้ในหลอดจะไม่เกิดแสงวูบวาบบนฉาก ถ้าฉากอยู่ห่างแหล่งของอนุภาคแอลฟาเกินกว่า ๗ เซนติเมตร ดังนั้นระยะนี้จึงเป็นระยะสูงสุดหรือระยะไกลที่สุดที่อนุภาคแอลฟาจากแหล่งซึ่งเขาใช้อยู่ จะเดินทางไปได้ ครั้นเมื่อเอาออกซิเจนออกและบรรจุไนโตรเจนเข้าไปในหลอด เขาสังเกตเห็นแสงบนฉาก แม้ฉากจะอยู่ห่างจากแหล่งของอนุภาคแอลฟามากกว่า ๗ เซนติเมตร และเมื่อเลื่อนให้ฉากห่างออกไปไกลกว่าระยะนี้ถึงสี่เท่าก็ยังคงสังเกตเห็นแสงอยู่บ้าง ไม่ต้องสงสัยว่าการที่อนุภาคแอลฟากระทบกับอะตอมของไนโตรเจนนั้น ทำให้เกิดอนุภาคบางอย่างซึ่งเคลื่อนที่ได้เป็นระยะทางไกล ๆ ขึ้น รัทเธอฟอร์ดทดสอบตรวจตราการทดลองนี้อย่างระมัดระวังและในที่สุดก็สรุปว่า *"เป็นการยากที่จะไม่ให้สรุปว่าอะตอมซึ่งเคลื่อนที่ได้เป็นระยะทางไกล ๆ อันเกิดจากการที่อนุภาคแอลฟา*

กระทบไนโตรเจนเหล่านี้ อาจจะเป็นอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งมีประจุไฟฟ้า" กล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ เขาถือว่าอนุภาคแอลฟาชนนิวเคลียสของไนโตรเจนแล้วมีโปรตอนออกมา ให้สังเกตว่าในการสรุปนั้นรัทเธอฟอร์ดใช้คำว่า *"อาจจะ"* เขาไม่แน่ใจว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เป็นระยะทางไกล ๆ นั้นคือโปรตอน เพราะเขามีแต่เพียงหลักฐานแวดล้อมเท่านั้น แต่เขาก็ให้เหตุผลว่า เนื่องจากโปรตอนมีมวลสารหนึ่งในสี่และมีประจุไฟฟ้าครึ่งหนึ่งของอนุภาคแอลฟา จึงอาจเดินทางในก๊าซได้ไกลกว่าอนุภาคแอลฟา อนุภาคที่รัทเธอฟอร์ดรู้จักซึ่งมีคุณสมบัติครบถ้วนเช่นนี้ก็มีอยู่แต่โปรตอนเท่านั้น

หลังจากนั้นไม่กี่ปี การศึกษาโดยใช้ห้องเมฆก็แสดงว่า ข้อสรุปของรัทเธอฟอร์ดถูกต้อง คือ การที่อนุภาคแอลฟากระทบกับนิวเคลียสของไนโตรเจนซึ่งนาน ๆ จึงจะเกิดขึ้นสักครั้งนั้นทำให้โปรตอนหลุดออกมาจากนิวเคลียสจริง ๆ ที่ว่านาน ๆ จึงจะเกิดขึ้นสักครั้งนั้นหมายความว่า อนุภาคแอลฟาเพียงตัวเดียวในล้านตัวเท่านั้นจะทำให้เกิดโปรตอน ตัวอื่น ๆ ไม่อาจล่วงล้ำเข้าไปในนิวเคลียสได้ การที่เหตุการณ์อันนี้เกิดขึ้นได้ยาก เป็นเพราะนิวเคลียสของไนโตรเจนมีประจุไฟฟ้าบวกอยู่มาก จึงผลักอนุภาคแอลฟาส่วนใหญ่ที่เข้ามาออกไปเสีย

เหตุการณ์ซึ่งรัทเธอฟอร์ดศึกษาในปี ๑๙๑๙ นั้น นักวิทยาศาสตร์อีกคนหนึ่ง คือ พี.เอ็ม.เอส แบล็คเก็ตต์ (P.M.S. Blackett) ถ่ายภาพไว้ได้โดยใช้ความอุตสาหะอย่างยิ่งยวด หลังจากถ่ายภาพห้องเมฆกว่า ๒๓,๐๐๐ ภาพ และตรวจทางเดินของอนุภาคแอลฟากว่าห้าแสนทางแล้ว ดร. แบล็คเก็ตต์จึงได้พบข้อพิสูจน์ดังแสดงในภาพ ในภาพนั้นอนุภาคแอลฟาเข้ามาในห้องเมฆจากทางซ้าย เราจะเห็นทางซึ่งอนุภาคผ่านไปเป็นเส้นตรง ไม่มีการ



รูปที่ ๑๕ รูปแสดงอนุภาคแอลฟาผ่านก๊าซไนโตรเจนในห้องเมฆ อนุภาคแอลฟาชนกระแทกกับนิวเคลียสของไนโตรเจน ทำให้โปรตอนหลุดออกมา ส่วนของนิวเคลียสที่เหลือ (ออกซิเจน) กระดอนขึ้นไปทางขวามือ

เบี่ยงเบน อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าทางเดินเส้นบนหักงออย่างฉับพลัน และทางซึ่งแยกขึ้นไปหนาขึ้น แบล็คเก็ตต์ได้พิสูจน์ว่าทางเดินซึ่งยาวกว่าและเป็นเส้นบางตรงนั้นเป็นทางเดินของโปรตอน ถ้าอย่างนั้นทางเดินซึ่งเป็นเส้นหนาเล่าคืออะไร

เรารู้ว่าไนโตรเจนมีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๗ และนิวเคลียสมีโปรตอน ๗ ตัว เรารู้ด้วยว่าอนุภาคแอลฟามีประจุไฟฟ้าบวกสองประจุเนื่องมาจากโปรตอน ๒ ตัว ตัวละหนึ่งประจุ นัก

วิทยาศาสตร์ถือว่าในกรณีที่เรากำลังพิจารณาอยู่นี้ หรือในกระบวนการใด ๆ ก็ตามประจุไฟฟ้าจะต้องมีค่าคงที่ ซึ่งหมายความว่าถ้าปฏิกิริยาเริ่มด้วยอนุภาคสองอนุภาค คือ ไนโตรเจน และอนุภาคแอลฟา เราจะมีประจุไฟฟ้าอยู่ ๗+๒ หรือ ๙ ประจุ เราจะทำลายประจุไฟฟ้าเหล่านี้ไม่ได้ แต่อาจจะแบ่งเสียใหม่ได้ ในรูปถ่ายจากห้องเมฆ เรารู้ว่าผลที่ได้อย่างหนึ่งคือโปรตอน เราจึงต้องอนุมานว่า เนื่องจากผลบวกของประจุไฟฟ้าจะต้องไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นผลที่ได้อีกอย่างหนึ่งจะต้องเป็นอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าเท่ากับ ๙—๑ หรือ ๘ ประจุชนิดบวก ซึ่งเรารู้จากตารางธาตุว่าเป็นออกซิเจน เราจึงสรุปว่านิวเคลียสซึ่งกระดอนออกไปในกรณีนี้คือ ออกซิเจน

การทดลองของรัทเธอฟอร์ด ซึ่งใช้อนุภาคแอลฟายิงไนโตรเจนเป็นการทำให้นิวเคลียสแตกกระจายได้สำเร็จเป็นครั้งแรก ถึงแม้ว่านิวเคลียสจะไม่ถูกแยกเป็นสองเสี่ยงใหญ่ ๆ แต่ก็ต้องนับว่าถูกทำให้บี่นไปทีเดียว นับเป็นจุดเริ่มต้นของวิทยาศาสตร์บทใหม่ ซึ่งตั้งชื่อเรื่องได้ว่า *"ปฏิกิริยานิวเคลียร์"* โดยการทำให้แก่นของอะตอมแตกออกนี้ นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสุดยอดแห่งความลึกลับของความลับทั้งหลาย คือ รู้เรื่องแรงซึ่งยึดส่วนประกอบเล็ก ๆ ของนิวเคลียสไว้ด้วยกัน

เมื่อตอนที่รัทเธอฟอร์ด ทำให้นิวเคลียสของไนโตรเจนแหว่งไปนั้น ความรู้เกี่ยวกับนิวเคลียสยังไม่ค่อยจะน่าประหลาดใจเท่าใดนัก คือ รู้กันว่านิวเคลียสมีความหนาแน่นมาก แข็งมาก แต่ไม่มีใครรู้เกี่ยวกับองค์ประกอบของมันมากนัก ที่แน่นอนคือรู้ว่ามีโปรตอนอยู่ในนิวเคลียส แต่ก็คิดกันว่าต้องมีอย่างอื่นอยู่ด้วย เพราะอะตอมของธาตุหนัก ๆ เช่น ยูเรเนียม มีโปรตอนเพียง ๙๒ ตัว แต่หนักกว่าโปรตอนถึงเกือบ ๒๓๘ เท่า นอกจากนี้ยังมีปัญหาชวนให้ฉงนที่ว่า อนุภาคซึ่งประกอบขึ้นเป็นนิวเคลียสจับยึดกันอยู่ได้อย่างไร มีแรงอะไรสำหรับการยึดเหนี่ยวกันนี้ ตัวอย่าง เช่น อนุภาคแอลฟาก็เป็นที่รู้กันว่าหนักกว่าโปรตอนสี่เท่าทั้ง ๆ ที่มีโปรตอนอยู่เพียง ๒ ตัวเท่านั้น จึงมีเหตุผลพอที่จะถือว่าต้องมีอนุภาคอื่นอีก ๒ ตัว ซึ่งแต่ละตัวหนักเท่ากับโปรตอน แต่ไม่มีประจุไฟฟ้าเหมือนโปรตอน อนุภาคอันไม่มีประจุไฟฟ้าซึ่งก่อให้เกิดปัญหานี้ถูกตั้งชื่อว่า *"นิวตรอน"* ถึงแม้จะไม่มีข้อพิสูจน์ว่ามีอยู่จริง ๆ แต่นิวตรอนก็ได้ถูกถือว่าเป็นองค์ประกอบอีกอย่างหนึ่งของนิวเคลียส (ความจริงแล้วในตอนแรกเชื่อกันว่านิวตรอนคือโปรตอนซึ่งเป็นกลาง เกิดจากการรวมโปรตอนกับอีเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ ประจุไฟฟ้าของอนุภาคทั้งสองหักล้างกันพอดี) ตอนต่อไปเราจะได้เห็นว่าต้องรอไปจนถึงปี ค.ศ. ๑๙๓๒ จึงจะมีการพิสูจน์ได้สำเร็จว่านิวตรอน

เป็นอนุภาคอย่างหนึ่งต่างหากในนิวเคลียส ไม่มีประจุไฟฟ้าเลย ปัญหาซึ่งทำความงงงวยให้แก่นักค้นคว้าทดลองในตอนแรก ๆ ที่พยายามทำความเข้าใจการทดลองของรัทเธอฟอร์ด มีอยู่หลายข้อ เช่นว่า สำหรับอนุภาคแอลฟานั้น อนุภาคทั้งสี่ซึ่งเป็นส่วนประกอบของนิวเคลียสคือนิวตรอน ๒ ตัว และโปรตอน ๒ ตัว ยึดกันอยู่ได้อย่างไร เมื่ออนุภาคแอลฟากระทบนิวเคลียสของไนโตรเจนนั้นเกิดอะไรขึ้น นิวเคลียสจับอนุภาคแอลฟาไว้แล้วปล่อยโปรตอนออกมาใช่หรือไม่

ขณะที่นักวิทยาศาสตร์เหล่านี้พยายามคิดค้นเกี่ยวกับนิวเคลียสอยู่นั้น การค้นคว้าในแนวใหม่อีกแนวหนึ่งซึ่งต่อไปจะมีประโยชน์แก่การศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยานิวเคลียร์มากได้เกิดขึ้น นั่นคือการวัดมวลสาร หรือน้ำหนักของอะตอมอย่างละเอียดซึ่งมีชื่อทางวิชาการว่า แมส สเปคโตรสโคปี (mass spectroscopy) นักวิทยาศาสตร์ได้สงสัยมานานแล้วว่า อะตอมของธาตุใดธาตุหนึ่งนั้นอาจจะหนักไม่เท่ากัน สาเหตุแห่งข้อสงสัยนี้มีมาหลายทางด้วยกันตัวอย่างเช่น มีการค้นพบว่าในบรรดาอะตอมของธาตุหนัก ๆ ซึ่งอยู่ใกล้ ๆ เรเดียมและยูเรเนียมนั้น มีอะตอมซึ่งให้กัมมันตภาพรังสีถึงสามสิบกว่าชนิด เนื่องจากไม่มีธาตุกัมมันตภาพซึ่งเบากว่าตะกั่ว (อะตอมมิกนัมเบอร์ ๘๒) อะตอมสามสิบกว่าชนิดนี้ จึงอาจจะเป็นธาหนึ่งธาตุใดในจำนวนธาตุ (ซึ่งหนัก

กว่าตะกั่ว) ประมาณสิบธาตุเท่านั้น นอกจากนี้แล้ว นักเคมีได้แสดงให้เห็นว่าอะตอมกัมมันตภาพบางชนิด มีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนกัน ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อนักเคมีวิเคราะห์ตะกั่วซึ่งได้จากสินแร่ชนิดต่าง ๆ ก็พบว่าตะกั่วซึ่งเป็นธาตุถาวร และเป็นธาตุสุดท้าย ในกระบวนการสลายตัวตามลำดับของธาตุกัมมันตภาพต่าง ๆ นั้น มีน้ำหนักอะตอมประมาณ ๒๐๖ ถ้าเป็นตะกั่วซึ่งปนอยู่กับสินแร่ที่มียูเรเนียม และจะมีน้ำหนักอะตอมประมาณ ๒๐๘ เมื่อปนอยู่กับธอเรียม เมื่อเป็นเช่นนี้ย่อมหมายความว่ามีอะตอมซึ่งเป็นธาตุชนิดเดียวกัน แต่มีน้ำหนักต่าง ๆ กัน อะตอมเช่นนี้เรียกว่าไอโซโทป (isotope)

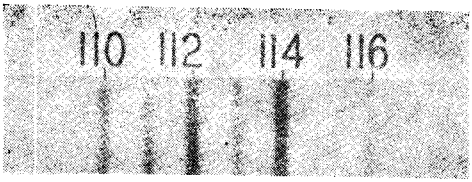
นักวิทยาศาสตร์ชื่อ เอฟ. ดับเบิลยู. แอสตัน (F.W. Aston) ในประเทศอังกฤษและ เอ. เจ. เดมป์สเตอร์ (A.J. Dempster) ในสหรัฐอเมริกา ได้คิดเครื่องมือหาน้ำหนักอะตอม เรียกว่า แมส สเปคโตรกราฟ ซึ่งสามารถแยกไอโซโทปของธาตุออกจากกันได้ ทำให้เรารู้จักไอโซโทปแต่ละชนิด ในที่นี้เราไม่จำเป็นที่จะต้องรู้เรื่องเกี่ยวกับเครื่องมือนี้มากนัก นอกจากว่าแมส สเปคโตรกราฟ เป็นเครื่องมือที่ทำให้อะตอมซึ่งมีประจุไฟฟ้า เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า อะตอมซึ่งมีน้ำหนักต่างกันจะแยกตัวออกจากกัน เมื่อไปตกบนกระจกถ่ายรูปจะปรากฏเป็นเส้น ๆ เส้นหนึ่งเกิดจากอะตอมพวกหนึ่ง โดยการวัดเส้นเหล่านี้ก็อาจคำนวณน้ำหนักของอะตอมแต่ละพวกหรือแต่ละ

ไอโซโทปได้โดยการใช้เครื่องมือชนิดนี้มีผู้พบว่าก๊าซนีออนซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาตินั้นประกอบด้วยไอโซโทปสองชนิดผสมกัน ชนิดหนึ่งมีน้ำหนักอะตอม ๒๐ (Ne^{20}) อีกชนิดหนึ่งมีน้ำหนักอะตอม ๒๒ (Ne^{22}) ไอโซโทปชนิดเบามีอยู่มากกว่าชนิดหนักถึงสิบเท่า จึงทำให้น้ำหนักอะตอมของนีออนธรรมดาเท่ากับ ๒๐.๒

การเขียนสัญลักษณ์ของไอโซโทปนั้นนิยมเขียนสัญลักษณ์ทางเคมีของธาตุลงไปโดยมีตัวเลขกำกับอยู่ข้างบนทางขวามือ ตัวเลขนี้เป็นตัวเลขจำนวนเต็มซึ่งมีค่าใกล้เคียงที่สุดกับน้ำหนักอะตอมของไอโซโทป เราเรียกตัวเลขนี้ว่า แมสนัมเบอร์ นอกจากนี้มักจะนิยมเขียนตัวเลขบอกอะตอมมิกนัมเบอร์ ไว้ข้างล่างสัญลักษณ์ทางเคมีด้วย อะตอมมิกนัมเบอร์คือตัวเลขที่บอกตำแหน่งของธาตุในตารางธาตุและบอกจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสของไอโซโทปนั้นด้วย เช่น นีออน มีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๑๐ ก็เขียนให้ครบว่า $_{10}Ne^{20}$

ธาตุบางธาตุมีเพียงไอโซโทปเดียว เช่น ทอง (Au^{197}) แทนทาลัม (Ta^{181}) เบอร์ริลเลียม (Be^{9}) ฟลูออรีน (F^{19}) และแมงกานีส (Mn^{55}) ธาตุอื่นๆ อาจจะมีสองหรือสามไอโซโทป หรือมากกว่านั้นคืออาจมีถึงสิบไอโซโทปก็มี เช่น ดีบุกมีไอโซโทป ซึ่งมีแมสนัมเบอร์ ๑๑๒, ๑๑๔, ๑๑๕, ๑๑๖, ๑๑๗, ๑๑๘, ๑๑๙, ๑๒๐, ๑๒๒, และ ๑๒๔ ภาพถ่ายซึ่งได้จาก แมส สเปคโตรกราฟ จะแสดงให้เห็นได้

อย่างง่ายดายว่าไอโซโทปต่าง ๆ ของธาตุหนึ่ง ๆ มีมากน้อยกว่ากันอย่างไร เช่น ในรูปแสดงให้เห็นไอโซโทปของแคดเมียม ๖ ไอโซโทปในจำนวนทั้งหมดที่มีอยู่ ๘ (ไอโซโทปซึ่งมีแมสนัมเบอร์ ๑๐๖ และ ๑๐๘ มีอยู่น้อยเกินไป จึงไม่เห็นในภาพ)

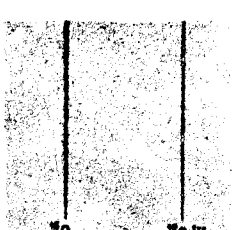


รูปที่ ๑๖ ภาพถ่ายซึ่งได้จากแมส สเปคโตกราฟ แสดงเส้นซึ่งเกิดจากไอโซโทปของแคดเมียม ๖ ไอโซโทป ในจำนวนทั้งหมด ๘ ไอโซโทป

เครื่องมือหาน้ำหนักของอะตอมนี้ ไม่เพียงแต่สามารถแยกไอโซโทปของธาตุออกจากกันเท่านั้น ยังอาจจะใช้ในการเปรียบเทียบน้ำหนักของไอโซโทปอย่างใดอย่างหนึ่งกับน้ำหนักของไอโซโทปซึ่งรู้ค่าได้แล้วได้อีกด้วย ทำให้สามารถคำนวณน้ำหนักของไอโซโทปที่ยังไม่รู้ค่าได้ ก่อนหน้านี้ได้กล่าวแล้วว่า เราใช้น้ำหนักของออกซิเจนเป็นมาตรฐาน คือให้มีค่า ๑๖.๐๐๐๐๐ ตอนนั้นเราไม่ได้ให้คำจำกัดความของหน่วยน้ำหนักนี้ มาถึงตอนนี้เราจะกำหนดลงไปว่าน้ำหนักของไอโซโทปของออกซิเจน O^{16}

เท่ากับ ๑๖.๐๐๐๐๐ หน่วย อะตอมมิก แมส (amu) นี่คือมาตรฐานของเราซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบกับอะตอมอื่น ๆ

มีอยู่หลายวิธีที่จะเปรียบเทียบน้ำหนักของ ไอโซโทป ต่าง ๆ อย่างแน่นอน เช่น เราอาจหาน้ำหนักของคาร์บอน ๑๒ ได้โดยการเปรียบเทียบ มีเทน หรือ CH_4 ซึ่งเป็นสารประกอบอย่างหนึ่งของคาร์บอน กับ ออกซิเจน ๑๖ ถ้าเรารู้น้ำหนักของไฮโดรเจน เราก็อาจคำนวณน้ำหนักของคาร์บอนได้ วิธีการก็คือใช้แมส สเปคโตรกราฟ เปรียบเทียบออกซิเจน ๑๖ ซึ่งเป็นมาตรฐานกับมีเทน ดังในรูปที่ ๑๗ เส้นสองเส้นซึ่งเป็นของออกซิเจนและมีเทน ที่ได้จากสเปคโตรกราฟ นั้นเราวัดได้อย่างแน่นอน (ทำให้รู้น้ำหนักของมีเทน) เมื่อหักน้ำหนักของไฮโดรเจน ๔ อะตอม ซึ่งรู้ค่าแล้วออก จะได้น้ำหนักของคาร์บอน ๑๒

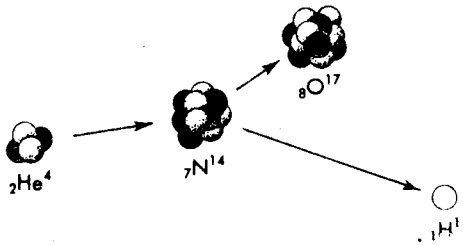


รูปที่ ๑๗ ภาพถ่ายจาก แมส สเปคโตรกราฟ แสดงเส้นสองเส้นซึ่งเกิดจาก O^{16} และมีเทน หรือ CH_4 ระยะระหว่างเส้นทั้งสองทำให้วัดมวลสารของ CH_4 ได้โดยใช้ O^{16} เป็นมาตรฐาน

ในจำนวนไอโซโทปซึ่งถาวรที่มีอยู่ในธรรมชาติ ๒๘๖ ไอโซโทปนั้น มีอยู่หลายไอโซโทปที่เดียวที่ได้รับการวัดน้ำหนักหรือมวลสารอย่างละเอียดแม่นยำมาก น้ำหนักอะตอมที่แท้จริงของไฮโดรเจนอะตอมนั้นไม่ใช่ ๑ แต่เท่ากับ ๑.๐๐๘๑๔๕ ไนโตรเจน ๑๔ มีมวลสาร ๑๔.๐๐๗๕๒ และออกซิเจน ๑๗ มีน้ำหนักหรือมวลสารที่แน่นอนเท่ากับ ๑๗.๐๐๔๕๓ น้ำหนักเหล่านี้อยู่ในหน่วย amu เนื่องจากเรารู้ว่า ฮีเลียม ๔ มีมวลสาร ๔.๐๐๓๘๗๙ จะเห็นว่าตอนนี้เรามีค่ามวลสารที่แท้จริงของอนุภาคต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทดลองของรัทเธอฟอร์ดที่ไนโตรเจนถูกทำให้แตกออก เราอาจเขียนสมการของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามรูปข้างล่าง (รูปที่ ๑๘) ดังนี้

$$\underset{2}{\overset{4}{\mathrm{He}}} + \underset{7}{\overset{14}{\mathrm{N}}} = \underset{8}{\overset{17}{\mathrm{O}}} + \underset{1}{\overset{1}{\mathrm{H}}}$$

อนุภาคแอลฟา นิวเคลียสของ นิวเคลียสของ โปรตอน
ไนโตรเจน ออกซิเจน



รูปที่ ๑๘ แผนภาพแสดงการแตกตัวของนิวเคลียสเป็นครั้งแรกในการทดลองของรัทเธอฟอร์ด อนุภาคแอลฟากระแทกนิวเคลียสของไนโตรเจน ทำให้โปรตอนความเร็วสูงหลุดออกมา นิวเคลียสที่เหลือกลายเป็นออกซิเจนกระเด็นไปเนื่องจากการกระแทกนั้น

ในปฏิกิริยานี้เราถือว่าไนโตรเจนมีแมสนัมเบอร์เท่ากับ ๑๔ เพราะก๊าซไนโตรเจนมีไอโซโทปชนิดนี้อยู่ถึง ๙๙.๖ เปอร์เซ็นต์ ตัวเลขที่อยู่บนตัวอักษรทางด้านซ้ายมือของสมการรวมกันได้ ๑๘ ดังนั้นเมื่อเอาแมสนัมเบอร์ของโปรตอนซึ่งเท่ากับ ๑ หักออกเสียจะยังเหลือ ๑๗ ซึ่งเป็นแมสนัมเบอร์ของนิวเคลียสของออกซิเจน คือเราถือว่าแมสนัมเบอร์แต่ละข้างรวมกันต้องเท่ากัน ส่วนตัวเลขซึ่งบอกจำนวนประจุไฟฟ้าที่อยู่ข้างล่างตัวอักษรก็เช่นเดียวกัน

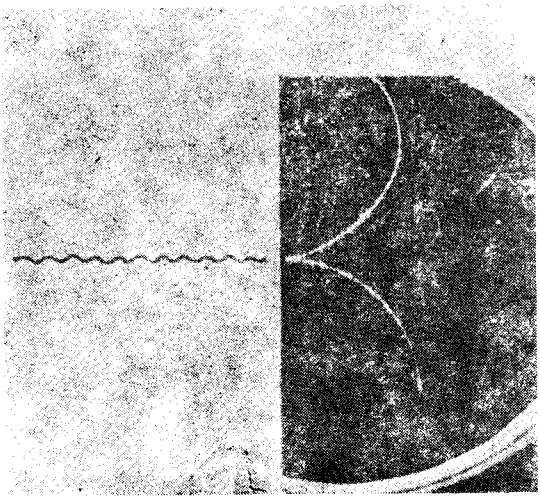
ต่อไปเราจะรวมค่ามวลสารที่แท้จริงของ อนุภาค ทาง ซ้ายมือของสมการ แล้วเอาไปเปรียบเทียบกับผลบวกของมวลสารของอนุภาคที่เกิดขึ้นซึ่งอยู่ทางขวามือของสมการ

He^4 = 4.003879 amu O^{17} = 17.00453 amu

N^{14} = 14.00752 amu H^1 = 1.008145 amu

$He^4 + N^{14}$ = 18.01140 amu $O^{17} + H^1$ = 18.01268 amu

จะเห็นว่าน้ำหนักของ O^{17} และ H^{1} รวมกันมากกว่าน้ำหนักของ He^{4} และ N^{14} รวมกันอยู่ ๐.๐๐๑๒๘ หน่วยอะตอมมิกแมส ซึ่งตอนแรกก็ดูเป็นสิ่งแปลก เพราะดูเหมือนว่าปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้น คือเมื่ออนุภาคแอลฟาชนนิวเคลียสของไนโตรเจนนั้น ทำให้เกิดมวลสารขึ้นมาซึ่งเป็นการแย้งกับกฎเบื้องต้นที่ว่ามวลสารและพลังงานจะไม่เพิ่มหรือลด ตรงนี้เองที่สมการ $E = mc^2$ ของไอน์สไตน์มีประโยชน์แก่เรา โดยการใช้สมการซึ่งให้ความสัมพันธ์ระหว่างมวลสารกับพลังงานนี้ เราอาจแสดงว่ามวลสาร ๑ amu เทียบเท่ากับพลังงาน ๙๓๑ ล้านอีเล็กตรอนโวลต์ (1 amu = 931 MeV) เมื่อเอาจำนวนนี้คูณ ๐.๐๐๑๒๘ ซึ่งเป็นมวลสารที่เพิ่มจะได้ผลลัพธ์ ๑.๒ MeV ครานี้เราสามารถที่จะบอกว่าการที่ทางขวามือของสมการมีพลังงานเกิดมานั้นหมายความว่า เพื่อที่จะให้ปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้เกิดขึ้นได้นั้น อนุภาคแอลฟาจะต้องมีพลังงาน ๑.๒ MeV พูดอีกอย่างหนึ่งก็คือว่า ต้องใช้พลังงานในการทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้น ต่อไปเราจะเห็นว่าในปฏิกิริยานิวเคลียร์อื่น ๆ ที่มีพลังงานออกมาก็มี ในกรณีของปฏิกิริยาที่รัทเธอฟอร์ดเป็นผู้พบนี้ พลังงานถูกใส่เข้าไปในรูปของพลังงานจลน์ (พลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่) ของอนุภาคแอลฟาซึ่งมีความเร็วสูงมาก

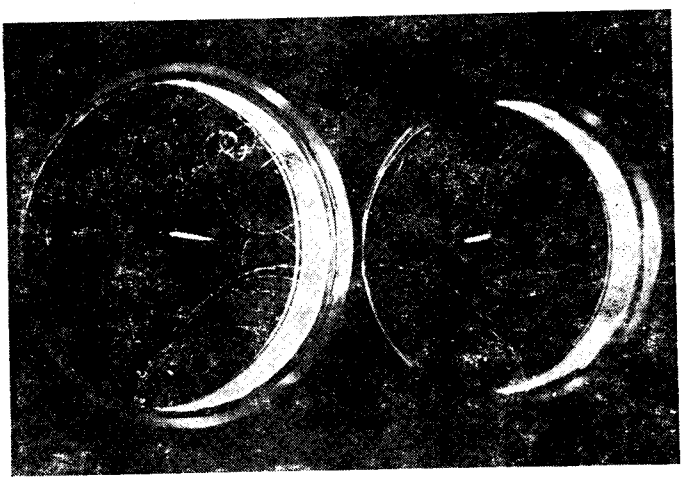


รูปที่ ๑๙ ภาพถ่ายจากห้องเมฆ แสดงให้เห็นการเกิดอีเล็กตรอนเป็นคู่ ๆ รังสีเอ็กซ์เข้ามาทางซ้ายมือแล้วกลายเป็นอีเล็กตรอนคู่หนึ่งซึ่งมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกัน สนามแม่เหล็กที่ห้องเมฆทำให้อีเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่โค้งขึ้น อีกตัวหนึ่งโค้งลง

ถ้าไม่มีสมการซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลสารกับพลังงานแล้ว เราจะไม่มีทางที่จะอธิบายพลังงานซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้เลย ตัวอย่างซึ่งน่าทึ่งที่แสดงให้เห็นว่ามวลสารกับพลังงานสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด เห็นได้จากรูปถ่ายในห้องเมฆข้างบนนั้น ในการทดลองซึ่งถ่ายรูปมานี้มีรังสีเอกซ์เข้ามายังห้องเมฆทางด้านซ้าย ที่ตรงกลางห้องเมฆเกิดปรากฏการณ์ซึ่งไม่ค่อยจะได้พบบ่อยนัก คือรังสีเอกซ์กลายเป็นอีเล็กตรอนคู่หนึ่ง

กระบวนการนี้ซึ่งมีชื่อว่า แพร์ โปรดัคชั่น (Pair production) แสดงให้เห็นการเปลี่ยนจากพลังงาน (รังสีเอกซ์) เป็นสสาร (อีเล็กตรอน ๑ คู่) โดยสิ้นเชิง ซึ่งจะเกิดขึ้นบ่อย ๆ ถ้ารังสีเอกซ์มีพลังงานสูง เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้นเราจะได้พูดถึงต่อไป อย่างไรก็ตามเรามักจะไม่ค่อยสังเกตเห็นในก๊าซ เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับของแข็งแล้วจำนวนอะตอมของก๊าซมีน้อยมาก

ก่อนที่จะอธิบายเหตุการณ์อันน่าตื่นตาตื่นใจนี้ จะพูดถึงอีเล็กตรอนก่อนสักเล็กน้อย ถ้าเราให้รังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาเข้าไปในห้องเมฆซึ่งจัดให้มีสนามแม่เหล็กอยู่ ภาพถ่ายที่ได้จะมีลักษณะดังภาพข้างล่าง อีเล็กตรอนส่วนมากที่เกิดจากรังสีเอกซ์ซึ่งมีพลังงานสูงนั้นมาจากผนังห้องเมฆนั่นเอง ทางเดินของอีเล็กตรอนเหล่านี้ เป็นเส้นเล็ก ๆ เห็นได้ชัด และโค้งเป็นวงกลม เนื่องจากอำนาจของสนามแม่เหล็ก ยิ่งอีเล็กตรอนมีพลังงานน้อย เส้นทางเดินซึ่งเป็นวงกลมจะยิ่งเล็ก จะสังเกตเห็นว่าเส้นโค้งมีอยู่สองแบบ คือ โค้งขึ้น และ โค้งลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าอนุภาคมีประจุไฟฟ้าบวกหรือลบ อีเล็กตรอนที่โค้งขึ้นมีประจุไฟฟ้าลบ ส่วนที่โค้งลงมีประจุไฟฟ้าบวก



รูปที่ ๒๐ รังสีแกมมากระแทกผนังห้องเมฆ ทำให้เกิดอีเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เบี่ยนส่วนโค้งของวงกลม เนื่องจากอำนาจของสนามแม่เหล็ก (Courtesy Professor P.G. Kruger)

ที่ว่ามีอีเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวกนั้น ตอนแรกอาจจะทำให้เกิดความสับสนขึ้นบ้าง เพราะตั้งแต่ต้นมาจนถึงบัดนี้ เราได้พูดเบี่นทำนองที่ว่าอีเล็กตรอนทั้งหมดมีประจุไฟฟ้าลบ ความจริงนั้น อีเล็กตรอนชนิดลบนั้นมีคู่ฝาแฝดซึ่งมีประจุบวก ทั้งสองชนิดมีมวลสารเท่ากันและลักษณะอื่น ๆ เหมือนกันหมด แตกต่างกันแต่ประจุไฟฟ้าเท่านั้น ขนาดของประจุก็เท่ากัน เพียงแต่เครื่องหมายต่างกัน คืออย่างหลังนี้เบี่นบวกแทนที่จะเบี่นลบ อีเล็กตรอนซึ่งมีประจุบวกนี้เรียกว่าโพสิตรอน (positron) ฝาแฝดโพสิตรอนนี่แปลกมากคือไม่ได้มีอยู่ตามปกติธรรมดาในธรรมชาติ จะต้องถูก

สร้างขึ้นมาจากกระบวนการนิวเคลียร์ เช่น เมื่อรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์กระทบกับสสาร รังสีนั้นอาจจะหายไปและเกิดอีเล็กตรอนขึ้นมาคู่หนึ่ง คือเป็นอีเล็กตรอนธรรมดาตัวหนึ่ง อีกตัวหนึ่งเป็นโพสิตรอน ภาพถ่ายห้องเมฆที่เอ่ยถึงข้างบนนั้นแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจนี้ ในรูปนั้น รังสีแกมมาเข้ามาจากทางซ้าย (เราไม่เห็นรังสีแกมมา เพราะไม่มีประจุไฟฟ้าจึงไม่ทำให้เกิดไอออนสำหรับให้หยดน้ำเกาะตามทางที่ผ่านไป) และเกิดทางเดินสองทางซึ่งโค้งออกจากกันขึ้นอย่างฉับพลัน ภาพอันน่าทึ่งนี้แสดงให้เห็นจริงๆ ว่าอนุภาค (สสาร) สองอนุภาคเกิดขึ้นจากพลังงาน (รังสีแกมมา) หรืออีเล็กตรอนเป็นตัวเป็นตนขึ้นมาจากพลังงาน

ได้ชี้ให้เห็นแล้วว่าอีเล็กตรอนมีมวลสารน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับโปรตอน เท่าที่รู้กันอีเล็กตรอนมีมวลสาร ๐.๐๐๐๕๕ amu ซึ่งเทียบเท่ากับพลังงาน ๐.๕๑ MeV ดังนั้นถ้ารังสีแกมมาจะทำให้เกิดอีเล็กตรอนขึ้นคู่หนึ่ง จะต้องมีพลังงานสองเท่านี้ คือ ๑.๐๒ MeV พลังงานของรังสีแกมมา ส่วนซึ่งเกินกว่านี้จะกลายไปเป็นพลังงานของการเคลื่อนที่ของอีเล็กตรอน จากการทดลองพบว่ารังสีแกมมาซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าหนึ่งล้าน อีเล็กตรอนโวลต์ไม่ทำให้เกิดคู่อีเล็กตรอนขึ้น ถ้าพลังงานเกินกว่าค่าวิกฤตนี้จึงจะเกิด

ถ้าจะถามว่ากระบวนการตรงกันข้ามคือ สสารเปลี่ยนไปเป็นพลังงานมีหรือไม่ คำตอบก็คือมี เพราะปรากฏว่าโพสิตรอนมี

อายุสั้นมากเหลือเกิน เมื่อมันเคลื่อนที่ช้าลงและเข้าใกล้อีเล็กตรอนชนิดลบ มันอาจจะทำลายตัวเองและอีเล็กตรอนได้ เมื่อสิ่งนี้เกิดขึ้น อีเล็กตรอนทั้งคู่จะหายไปกลายเป็นรังสีแกมมา กระบวนการสร้างและทำลายอีเล็กตรอนนี้เป็นตัวอย่างของการเปลี่ยนกลับไปกลับมาระหว่างมวลสารกับพลังงาน ซึ่งเห็นได้อย่างชัดแจ้ง นับเป็นหลักฐานซึ่งแสดงให้เห็นความจริงของสูตร $E = mc^2$ ของไอน์-สไตน์ที่ไม่มีทางหักล้างได้เลย

๙

โครงสร้างของนิวเคลียส

ข่าวที่ว่ารัทเธอฟอร์ดทำให้อะตอมแตกตัวออกได้ ไม่ก่อให้เกิดความตื่นเต้นมากเท่ากับข่าวการพบรังสีเอกซ์ของเรินท์เกน อย่างไรก็ตามข่าวนี้ไปถึงหูประชาชนและผู้คนก็พากันวิตกวิจารณ์เกี่ยวกับผลอันจะมีมาจากวิวัฒนาการล่าสุด จากห้องทดลองวิทยาศาสตร์ บางคนถึงกับเขียนจดหมายถึงรัทเธอฟอร์ด ทำนายว่าการที่มนุษย์ไปวุ่นวายกับอะตอมนั้น จะก่อให้เกิดความหายนะอย่างใหญ่หลวง แต่รัทเธอฟอร์ดไม่แยแสกับความคิดที่เขาเห็นว่าไร้สาระเหล่านั้น นี่คือทรรศนะซึ่งเขายึดถืออยู่จวบจนสิ้นชีวิต เขาไม่คิดว่าการค้นคว้าของเขาจะเกี่ยวข้องกับคนทั่ว ๆ ไปมากนัก

อย่างไรก็ดี อาเธอร์ เอ็ดดิงตัน (Arthur Eddington) นักดาราศาสตร์ผู้มีชื่อเสียง ซึ่งอยู่ในสมัยเดียวกับรัทเธอฟอร์ดได้แถลงว่า *"เป็นที่รู้กันว่ามีพลังงานปรมาณูอยู่อย่างเหลือเฟือในสสารทั้งหลาย บางครั้งเราก็พากันฝันว่าสักวันหนึ่งมนุษย์จะรู้จักวิธีเอาพลังงานนี้มาใช้ให้เป็นประโยชน์"* คำทำนายซึ่งว่าไว้ใน ค.ศ. ๑๙๒๐ นั้น ตอนนั้นก็ยังดูเหมือนไกลสุดเอื้อมอยู่ เพราะนักฟิสิกส์ยังมีความรู้เกี่ยวกับนิวเคลียสอย่างเลือนลางเต็มทน

แน่นอนละ นักวิทยาศาสตร์รู้ว่านิวเคลียสเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับอะตอม รู้ว่ามีประจุไฟฟ้าบวกและจำนวนโปรตอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวกนั้น เท่ากับจำนวนอีเล็กตรอนซึ่งมีอยู่ในอะตอม จากการทดลองค้นคว้าอันเยี่ยมยอดของรัทเธอฟอร์ด ทำให้รู้ว่านิวเคลียสนั้นไม่ใช่ว่าจะเป็นสิ่งซึ่งไม่อาจจะแตะต้องได้ มันอาจจะถูกทำให้แตกหลุดออกมาได้ แต่นอกเหนือไปจากนี้แล้วความรู้ที่มีอยู่นั้นก็ล้าสมัยและไม่เพียงพอ ไม่มีใครรู้ว่าโครงสร้างภายในเป็นอย่างไร อนุภาคซึ่งอยู่ในนิวเคลียสมีคุณสมบัติเช่นไรบ้าง เช่น ทำไมจึงยึดกันอยู่ได้ หรือทำไมนิวเคลียสบางนิวเคลียสจึงถาวร แต่นิวเคลียสอื่นไม่ถาวร นักวิทยาศาสตร์กำลังยืนอยู่ที่ปากประตูแห่งความรู้ มีความกระหายที่จะได้เห็นลึกเข้าไปอีกว่าเกิดอะไรขึ้นภายในใจกลางของอะตอม

ธรรมชาติของนิวเคลียสดึงดูดความสนใจของรัทเธอฟอร์ดมาก ในการศึกษาเรื่องนี้ตอนแรกๆ เขาทายว่า *"ไม่ต้องสงสัยว่าใจกลางของอะตอมซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวก (นิวเคลียส) นี้เป็นระบบที่มีการเคลื่อนที่อันสลับซับซ้อน ส่วนประกอบส่วนหนึ่งคืออะตอมของฮีเลียม และอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งมีประจุไฟฟ้า (อะตอมซึ่งกลายเป็นไอออน)"* สาเหตุที่เขาเห็นว่าในนิวเคลียสจะต้องมีฮีเลียมไอออน ก็เพราะอะตอมกัมมันตภาพปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา สำหรับเรื่องที่เกี่ยวกับโปร-

ตอนในนิวเคลียสนั้นเขาเขียนไว้ว่า *"ดูเหมือนว่าอะตอมของสสารซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวกนั้น จะดึงดูดซึ่งกันและกัน ถ้าหากว่าอยู่ใกล้กันมาก เพราะถ้าไม่เป็นเช่นนั้นแล้วก็เป็นการยากที่จะเข้าใจว่า อนุภาคซึ่งอยู่ที่ใจกลางของอะตอม จะยึดกันอยู่ได้อย่างไร"*

ก่อนหน้านี้ได้กล่าวไว้ว่า อนุภาคสี่อนุภาคจับกันขึ้นเป็นอนุภาคแอลฟา หรือนิวเคลียสของฮีเลียม (สองในสี่นี้คือโปรตอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวก ส่วนอีกสองอนุภาคคือนิวตรอนนั้น ตอนนั้นยังไม่มีใครรู้ว่าธรรมชาติที่แท้จริงเป็นเช่นไร) เราจะอธิบายความจริงที่ว่าอนุภาคทั้งสี่นี้รวมกันอยู่ได้อย่างไร นิวตรอนทั้งสองนั้นมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ส่วนโปรตอนทั้งสองมีประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันผลักกันอย่างที่เรารู้ๆ กันแล้ว ถ้าแรงซึ่งเกี่ยวข้องมีแต่แรงทางไฟฟ้าเท่านั้น อนุภาคแอลฟาหรือนิวเคลียสอื่น ๆ ทุกนิวเคลียสควรจะระเบิดกระจายออกเป็นชิ้น ๆ นี่คือปัญหาใหญ่ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์เผชิญอยู่ในสมัยที่รัทเธอฟอร์ดแยกอะตอมได้สำเร็จ และก็ยังเป็นปัญหาอยู่จนกระทั่งบัดนี้ เพียงแต่ว่าตอนนี้นักวิทยาศาสตร์รู้เรื่องเกี่ยวกับนิวเคลียสมากขึ้น สามัญสำนึกทำให้ต้องถือว่านิวตรอนและโปรตอนจับกันไว้ด้วยแรงดึงดูดอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งมีระยะการกระทำสั้นมาก เราจะเรียกแรงนี้ว่าแรงนิวเคลียร์

เอาเป็นว่าแรงนิวเคลียร์ทำให้อนุภาคในนิวเคลียสยึดกันไว้ได้ก็แล้วกัน ลองมาศึกษานิวเคลียสง่าย ๆ เพื่อให้รู้ลักษณะของการจับยึดกันไว้นี้บ้าง เรารู้ว่าไฮโดรเจน (H^1) ซึ่งบางทีเรียกกันว่าโปรเทียม (protium) นั้น เป็นอะตอมซึ่งเบาที่สุด มีน้ำหนักอะตอม ๑.๐๐๘๑๔๕ และนิวเคลียสมีประจุบวกหนึ่งประจุ นับว่าเป็นนิวเคลียสเดียว ในจำนวนนิวเคลียสทั้งหลายที่มีเพียงอนุภาคเดียว คือโปรตอนอยู่ในนิวเคลียส น้ำหนักของอะตอมของไฮโดรเจนนี้จัดกันไว้อย่างละเอียดลออมาก ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับการชั่งน้ำหนักคนแล้วก็เหมือนกับจะชั่งคนให้ละเอียดถึงขนาดน้ำหนักของแสตมป์เพียงดวงเดียว การชั่งน้ำหนักอะตอมสลับซับซ้อนขึ้นไปอีกเล็กน้อย คือ ไอโซโทปของไฮโดรเจนที่มีชื่อว่าไฮโดรเจนหนัก หรือ ดิวทีเรียม (deuterium) ในธรรมชาติจะมีดิวทีเรียม ๑ ส่วน ต่อไฮโดรเจนธรรมดา ๕,๐๐๐ ส่วน ไอโซโทปนี้ต่างกับไฮโดรเจนธรรมดาตรงที่ว่าในนิวเคลียสมีอนุภาคสองอนุภาค อนุภาคหนึ่งคือโปรตอน ส่วนอีกอนุภาคหนึ่งเป็นนิวตรอน ซึ่งเราจะได้พูดถึงคุณสมบัติของมันในบทต่อไป นิวตรอนมีน้ำหนักอะตอม ๑.๐๐๘๙๘๕ ตอนนี้เราอาจหาน้ำหนัก(หรือมวลสาร) ของดิวทีเรียมได้โดยรวมน้ำหนักของโปรตอนกับนิวตรอน ได้ผลลัพธ์ ๒.๐๑๗๑๓๐ amu

เมื่อเอาน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณนี้ไปเปรียบเทียบกับน้ำหนักจริงซึ่งวัดได้โดยใช้แมส สเปคโตกราฟ แล้วเป็นอย่างไรบ้าง ปรากฏว่ามวลสารที่วัดได้เท่ากับ ๒.๐๑๔๗๔๐ amu ซึ่งน้อยกว่าที่คำนวณโดยรวมน้ำหนักของโปรตอนและนิวตรอนเข้าด้วยกันอยู่ ๐.๐๐๒๓๙ หน่วยอะตอมมิกแมส เห็นได้ชัดว่าในการสร้างไฮโดรเจนหนักขึ้นนี้ มวลสารส่วนหนึ่ง *"หาย"* ไป

โดยการใช้สมการ $E=mc^2$ เราอาจเปลี่ยนมวลสารที่ *"หาย"* ไปนี้เป็นพลังงานเนื่องจาก ๑ amu เท่ากับ 931 MeV จะเห็นว่าพลังงานที่เกี่ยวข้องในที่นี้เท่ากับ ๒.๒๒ MeV นี่คือพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ซึ่งทำให้นิวตรอนและโปรตอนรวมกันอยู่ได้ในนิวเคลียสของไฮโดรเจน *"หนัก"* จากการสังเกตในการทดลองพบว่าเมื่อนิวตรอนและโปรตอนอิสระรวมกัน รังสีแกมมาจะถูกปล่อยออกมา นี่เป็นการเปลี่ยนจากมวลสารเป็นพลังงาน ในทางตรงกันข้ามเมื่อให้รังสีแกมมาชนนิวเคลียสของดิวทีเรียม นิวเคลียสนี้อาจจะแยกออกเป็นนิวตรอนและโปรตอน ถ้ารังสีแกมมานั้นมีพลังงานมากกว่า ๒.๒๒ MeV สิ่งนี้นับเป็นกระบวนการกลับกัน คือเป็นการเปลี่ยนพลังงานให้เป็นมวลสาร เพราะเราได้เห็นแล้วว่าน้ำหนักของอนุภาคทั้งสองอันเกิดจากการแยกตัวของนิวเคลียสนั้น เมื่อแยกกันอยู่จะมากกว่าน้ำหนักของนิวเคลียสเมื่อยังไม่ได้แยกออกจากกัน

วิธีหนึ่งที่จะเห็นการรวมและแยกตัวของนิวเคลียส ของดิวทีเรียม ก็คือสมมุติว่าเมื่ออยู่ในนิวเคลียสนั้น นิวตรอนและโปรตอนอยู่ในสภาพซึ่งไม่ปกติ เนื่องจากเสียมวลสารซึ่งเคยมีอยู่ตามธรรมดาไปบ้าง ครั้นเมื่อได้รับพลังงานซึ่งเทียบเท่ากับมวลสารที่หายไปนั้น อนุภาคทั้งสองก็กลับมีน้ำหนักเต็มตามเดิม เป็นอิสระแก่กันไม่ยึดจับกันและกันอีกต่อไป

สำหรับฮีเลียม ๔ นั้น เราอาจทำการคำนวณทำนองเดียวกัน โดยรวมมวลสารของนิวตรอนและโปรตอน ปรากฏว่าผลบวกของมวลสารของนิวตรอนสองตัวและโปรตอนสองตัว เมื่อแยกกันอยู่ มากกว่าค่ามวลสารที่ได้จากการวัด He^4 อยู่ ๐.๐๓๐๓ amu (He^4 มีมวลสาร ๔.๐๐๒๘๐ amu) เมื่อใช้สมการ $E = mc^2$ ของไอน์สไตน์อีกจะพบว่ามวลสารที่หายไปเทียบเท่ากับพลังงาน ๒๘.๒ MeV แสดงว่าโปรตอนและนิวตรอนซึ่งรวมกันแบบนี้ยึดกันเหนียวแน่นมาก ดังนั้นนิวเคลียสของฮีเลียมหรืออนุภาคแอลฟาจึงเป็นอนุภาคที่ถาวรอย่างยิ่ง ในการที่จะทำให้แยกออกจากกันนั้น ต้องใช้พลังงานถึง ๒๘.๒ MeV

เมื่อเราศึกษาอะตอมซึ่งซับซ้อนและหนักมากขึ้นไปอีก ก็พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสเพิ่มขึ้น แมกนีเซียมมีพลังงานยึดเหนี่ยวถึง ๒๐๐ MeV และของยูเรเนียมถึง ๑,๘๐๐ MeV ถ้าเราสามารถทำนิวเคลียสของยูเรเนียมให้แตกกระจาย

ออกเป็นอนุภาคนิวตรอน และโปรตอนเป็นจำนวน ๒๓๘ อนุภาค จะได้พลังงานออกมาถึง ๑๘๐๐ ล้านอีเล็กตรอนโวลต์ อย่างที่ทุกคนก็ทราบแล้วว่า อะตอมของยูเรเนียมได้ถูกทำให้แยกออกเป็นสองเสี่ยงในกระบวนการที่เรียกว่า นิวเคลียร์ พีชชั่น (nuclear fission) (บทที่ ๑๐) ในกระบวนการนี้ เราเอาพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสมาได้เพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น คือพลังงานที่ได้นั้นเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวของสองส่วนที่แยกออกกับพลังงานยึดเหนี่ยวทั้งหมดของนิวเคลียสของยูเรเนียมก่อนที่จะถูกแยกพลังงานหลังนี้เท่ากับ ๑๘๐๐ MeV ส่วนพลังงานของอะตอมซึ่งมีมวลสาร ๑๑๙ เท่ากับ ๑,๐๐๐ MeV เนื่องจากมีสองเสี่ยง พลังงานทั้งหมดจึงเท่ากับ ๒,๐๐๐ MeV ในกระบวนการแตกทำลายหรือพีชชั่นจึงมีพลังงานออกมาเท่ากับ ๒,๐๐๐ – ๑,๘๐๐ หรือ ๒๐๐ MeV เหตุที่เราเอาพลังงานนี้ออกมาได้ก็เพราะนิวเคลียสของยูเรเนียม ซึ่งไม่ถาวรนั้นแยกออกเป็นสองส่วนซึ่งถาวรกว่า นี่เป็นการเกริ่นเรื่องนิวเคลียร์พีชชั่นล่วงหน้า แต่การที่ได้เห็นเสียตั้งแต่ตอนนี้ว่าในปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้น ทำไมจึงเกิดพลังงานและเกิดขึ้นได้อย่างไร ก็นับว่าเป็นสิ่งที่มีประโยชน์

ส่วนประกอบของนิวเคลียสของอะตอมส่วนใหญ่ ถูกจับให้อยู่รวมกันด้วยพลังงานเฉลี่ยเกือบเท่าๆกัน คือแต่ละโปรตอน

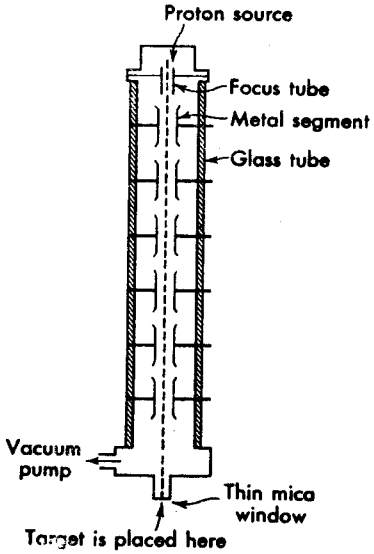
หรือนิวตรอนรวมอยู่กับนิวเคลียส ด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวราว ๆ ๗ ถึง ๘ MeV เราอาจอธิบายความจริงข้อนี้ได้ถ้าคิดเสียว่าอนุภาครวมกันอยู่ในนิวเคลียสอย่างหนาแน่นมาก แม้จะถึงกับสมมุติว่านิวเคลียสทำตัวเหมือนกับของเหลว ซึ่งมีความหนาแน่นมากก็ได้ โดยอาศัยแบบซึ่งสมมุตินี้นี้ เราอาจกล่าวว่ารัศมีของนิวเคลียสเพิ่มขึ้นช้า ๆ เมื่อน้ำหนักของอะตอมมากขึ้นตามลำดับนิวเคลียสซึ่งหนักที่สุด เช่น ยูเรเนียมกว้างกว่านิวเคลียสซึ่งเบาที่สุดราว ๆ ห้าเท่า มีวิธีอยู่หลายวิธีที่อาจใช้วัดหรือคำนวณรัศมีของนิวเคลียส ปรากฏว่านิวเคลียสของธาตุหนักเช่นทอง ($_{72}Au^{107}$) ซึ่งประกอบด้วยโปรตอน ๗๒ ตัวและนิวตรอน ๑๐๗ ตัว มีรัศมีประมาณเศษหนึ่งส่วนล้านล้านเซนติเมตร

ถ้าแม้แต่นิวเคลียสของธาตุหนัก ๆ ยังเล็กมากเช่นนี้ แต่แล้วน้ำหนักของอะตอมทั้ง ๙๙.๙๕ เปอร์เซ็นต์กลับรวมอยู่ที่นั่นก็ย่อมหมายความว่านิวเคลียสมีความหนาแน่นมากเหลือเกิน เราคำนวณได้ว่าความหนาแน่นของนิวเคลียสมากกว่าความหนาแน่นของน้ำถึงร้อยล้านล้านเท่า ถ้าเผื่อว่าโลกเรายุบตัวลงจนยังเหลือแต่นิวเคลียส คือเอาอีเล็กตรอนออกจากอะตอมทุกอะตอมของโลก แล้วเอานิวเคลียสเหล่านั้นมาเรียงติด ๆ กัน โลกจะลดขนาดลงเหลือเป็นทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางสองร้อยหลาเท่านั้น

รัทเธอฟอร์ดและบรรดานักวิทยาศาสตร์สมัยเดียวกับเขารู้ตัวดีว่า ความสามารถที่จะทำให้นิวเคลียสแตกกระจายเพื่อที่จะค้นหาความลับของมันนั้นมีอยู่จำกัด คือต้องอาศัยอนุภาคแอลฟาที่ได้จากธาตุกัมมันตภาพตามธรรมชาติเป็นกระสุนสำหรับยิง สิ่งที่เขาต้องการซึ่งเป็นของจำเป็นมาก ก็คือเครื่องมือสำหรับยิงอะตอมที่คนเป็นผู้ทำขึ้นมาและที่คนสามารถควบคุมได้

เซอร์ จอห์น ค็อกครอฟท์ (John Cockcroft) และ อี.ที.วอลตัน (E.T. Walton) เป็นผู้ประดิษฐ์เครื่องมือสำหรับทำให้อนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าเกิดความเร็วสูงมากเป็นรายแรก ในปี ๑๙๒๙ ทั้งสองท่านนี้ ทำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงแบบใหม่ได้สำเร็จ สามารถทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้เป็นแสน ๆ โวลต์ นอกจากสิ่งนี้ แล้วยังมีอีกสองอย่างที่จะทำให้เครื่องมือสมบูรณ์ขึ้นมา อย่างแรกคือต้นกำเนิดของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ทั้งสองได้ออกแบบอาร์คไฟฟ้าซึ่งใช้ในการทำให้อะตอมของก๊าซไฮโดรเจนกลายเป็นไอออน คือกลายเป็นโปรตอน นักฟิสิกส์ได้อาศัยโปรตอนนี้เป็นกระสุนชนิดใหม่ในการยิงของอะตอม นับเป็นกระสุนที่คล่อง-แคล่วกว่าอนุภาคแอลฟา สิ่งต่อไปที่ต้องการคือกลไกที่จะเร่งให้โปรตอนนี้มีความเร็วสูง นักวิทยาศาสตร์ทั้งสองได้สร้างหลอดแก้วยาวขึ้นจัดให้มีสูบสำหรับสูบอากาศออกตลอดเวลา แหล่งกำเนิดของโปรตอนอยู่ที่ยอดหลอดสำหรับเร่งอนุภาคดังในรูป ในหลอดนี้

มีโลหะทรงกระบอกชุดหนึ่งวางเรียงกัน ทรงกระบอกแต่ละอันต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงทางสายซึ่งผ่านเข้ากับข้างของหลอดใหญ่



รูปที่ ๒๑ แผนภาพเครื่องเร่งอนุภาคของค็อกครอฟท์และวอลตัน

เครื่องเร่ง ค็อกครอฟท์—วอลตัน ทำงานดังต่อไปนี้ โปรตอนจากปลายบนของหลอดถูกรวมให้เป็นลำอนุภาคแคบ ๆ เคลื่อนที่ไปตามแกนของหลอด ผ่านทรงกระบอกโลหะซึ่งเรียงกันอยู่ ลำอนุภาคนี้ถูกดึงดูดเข้าทรงกระบอกโลหะอันแรก เนื่องจากทรงกระบอกมีโวลเตจไฟฟ้าสูง ความเร็วของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น เมื่อโปรตอนออกมาจากทรงกระบอกอันแรกก็จะถูกดูดโดยทรงกระบอกอันที่สองซึ่งมีโวลเตจสูงขึ้นไปอีก ดังนี้ต่อ ๆ กันไปจนกระทั่ง

ถึงทรงกระบอกอันสุดท้ายที่ฐานของเครื่องเร่ง แล้วจึงไปกระแทกสารซึ่งจัดให้เป็น "*เป้า*" เพื่อจะได้ศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยการปรับโวลเตจที่ให้แก่หลอด นักวิทยาศาสตร์ทั้งสองสามารถควบคุมพลังงานของโปรตอนได้ ทำให้สามารถศึกษาผลที่เกิดจากโปรตอนซึ่งถูกเร่งโดยโวลเตจจาก ๒๐๐,๐๐๐ ถึง ๔๐๐,๐๐๐ โวลต์

ค็อกครอฟท์กับวอลตัน เลือกธาตุลิเธียม ($_{3}Li^{7}$) อันเป็นธาตุเบาเป็นเป้าอันแรก โปรตอนซึ่งออกจากเครื่องมือผ่านทาง "*หน้าต่าง*" ซึ่งทำด้วยแผ่นไมคาบาง ๆ นั้น มีกำลังอ่อนมาก สามารถเคลื่อนที่ไปในอากาศได้เป็นระยะทางราว ๆ ๑ ซม. เท่านั้น แต่ถึงกระนั้นนักวิทยาศาสตร์ทั้งสองก็ยังหวังว่าคงจะเกิดปฏิกิริยาให้สังเกตเห็นได้บ้าง ทั้งคู่ประหลาดใจมากเมื่อพบว่า "*เป้า*" ลิเธียมกลายเป็นต้นกำเนิดของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทางมากพอดู จากการถ่ายภาพโดยอาศัยห้องเมฆ วอลตันและเพื่อนร่วมงานอีกคนหนึ่งพบว่านิวเคลียสของลิเธียม แยกออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน คือลิเธียมเกิดพีชชั่นได้อนุภาคแอลฟาสองอนุภาค อาจเขียนปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ดังนี้

$$_{1}H^{1} + {}_{3}Li^{7} = {}_{2}He^{4} + {}_{2}He^{4}$$

โปรตอน + ลิเธียม = อนุภาคแอลฟา + อนุภาคแอลฟา

เราจะใช้ความรู้เรื่องอะตอมมิกแมส คำนวณพลังงานซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยานี้ดูอีก ปรากฏว่าผลบวกของมวลสารของอนุภาคแอลฟาน้อยกว่ามวลสารของโปรตอนกับลิเธียมรวมกันอยู่ ๐.๐๑๘๖ หน่วย อะตอมมิกแมส เมื่อคูณสารที่ขาดไปนี้ด้วย ๙๓๑ MeV ได้ผลลัพธ์ ๑๗.๓๒ MeV เนื่องจากเกิดอนุภาคแอลฟาสองอนุภาค แต่ละอนุภาคจึงมีพลังงาน ๘.๖๗ MeV โดยการวัดระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่พบว่าอนุภาคมีพลังงานใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้นี้จริง ๆ

ข้อที่น่าแปลกใจเกี่ยวกับการที่นิวเคลียสถูกทำให้แตกตัวเป็นครั้งแรกนี้ก็คือ อนุภาคซึ่งใช้ยิงได้ผลนั้นมีพลังงานน้อยเหลือเกิน คือกครอฟท์กับวอลตัน คงจะมีความรู้สึกเหมือนนักล่าสัตว์ที่ยิงสัตว์ตัวโต ๆ ได้โดยใช้บืนกระบอกเล็กนิดเดียว โดยการใช้กระสุนโปรตอนซึ่งมีพลังงานไม่ถึง ๑ MeV ทั้งสองสามารถทำให้นิวเคลียสของลิเธียมปล่อยพลังงานออกมากว่า ๑๗ MeV ด้วยเหตุนี้เราจึงน่าจะให้อภัยแก่ผู้ที่คิดผันจะใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้ให้เป็นประโยชน์ แต่ข้อขัดข้องก็มีอยู่ว่า ความจริงนั้นคือกครอฟท์กับวอลตันใส่พลังงานเข้าไปในเครื่องของเขามากกว่าที่เขาเองเอาออกมาได้จากปฏิกิริยาของลิเธียม ที่เป็นเช่นนี้เพราะโปรตอนเพียงสองสามตัว จากล้านตัวเท่านั้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา พลังงานซึ่งใช้ในการทำโปรตอนมากกว่าพลังงานที่ได้จากการที่เกิดอนุภาคแอลฟาซึ่งมีความเร็วสูงนี้มากนัก

ความจริงค็อกครอฟท์กับวอลตันบังเอิญเลือกเป้าซึ่งเหมาะกับกระสุนโปรตอน ธาตุอื่น ๆ ซึ่งไม่ใช่ลิเธียมจะไม่ให้ผลซึ่งสังเกตได้ชัด คือเกิดอนุภาคแอลฟาซึ่งความเร็วสูงเช่นนั้น การที่โปรตอนซึ่งมีพลังงานน้อย ๆ ทำให้นิวเคลียสของลิเธียมแตกออกได้ มีผลให้นักวิทยาศาสตร์หลายคนเปลี่ยนแปลงแนวความคิดเกี่ยวกับนิวเคลียสเสียใหม่ เดิมทีเดียวส่วนมากคิดกันว่าโปรตอนซึ่งมีพลังงานอ่อน ๆ เช่นนั้นจะต้องถูกผลักโดยประจุไฟฟ้าบวกของนิวเคลียส ไม่มีทางที่จะเข้าไปใกล้เสียด้วยซ้ำ แต่กลับปรากฏว่าโปรตอนบางตัวชนเอานิวเคลียสเลยทีเดียว เห็นได้ชัดว่าค้นพบจุดอ่อนใน *"แนวป้องกัน"* ของนิวเคลียสของลิเธียมและสามารถหลบหลีกแรงผลักซึ่งเป็นสิ่งกีดขวางอยู่ได้ ตามแนวคิดเดิมนั้นเหตุการณ์เช่นนี้จะไม่มีโอกาสเกิดขึ้นได้เลย นอกจากเครื่องกีดขวางนิวเคลียสอันเกิดจากประจุไฟฟ้าบวกนั้นสูงเกินกว่าที่โปรตอนซึ่งมีพลังงานเพียงเล็กน้อยจะข้ามไปได้

อย่างไรก็ตามวิวัฒนาการแนวใหม่ในฟิสิกส์ภาคทฤษฎี ซึ่งมีขึ้นก่อนหน้าการทดลองของค็อกครอฟท์กับวอลตันเพียงเล็กน้อยชี้ให้เห็นแนวคิดใหม่เกี่ยวกับเครื่องกีดขวางของนิวเคลียส ทฤษฎีใหม่นี้สามารถอธิบายสิ่งซึ่งก่อนหน้านี้ทำให้ทุกคนฉงนสนเท่ห์ คือการที่อนุภาคแอลฟาออกมาจากนิวเคลียสของธาตุหนัก ๆ ได้ ตามทฤษฎีก่อน ๆ นั้นอนุภาคแอลฟาควรจะถูกกักอยู่ในนิวเคลียส

ตลอดไป เพราะพลังงานของมันไม่พอเพียงที่จะ *"กระโดด"* ข้าม *"เครื่องกีดขวาง"* ซึ่งล้อมรอบนิวเคลียสอยู่ออกมาได้

ในปี ค.ศ. ๑๙๒๖ เออร์วิน ชเรอดิงเงอร์ (Erwin Schrodinger) นักวิทยาศาสตร์เชื้อชาติออสเตรีย เป็นผู้ริเริ่มวิชากลศาสตร์ของคลื่น (wave mechanics) ซึ่งต่อมาได้ทำให้ฟิสิกส์เปลี่ยนแปลงไปมาก วิชาแขนงใหม่ของเขานี้เน้นหนักไปในเรื่องคุณสมบัติทางคลื่นของสสาร และประสบความสำเร็จในการอธิบายปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้างของอะตอม ซึ่งแต่ก่อนไม่มีทางอธิบายได้ นักวิทยาศาสตร์สามคน คนหนึ่งทำงานคนเดียว ใช้วิทยาศาสตร์แขนงใหม่นี้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการที่ธาตุกัมมันตภาพปล่อยรังสีแอลฟา คนทั้งสามได้แก่ อาร์. ดับเบิลยู. เกอเนย์ (R.W. Gurney) ซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์อังกฤษ ทำงานร่วมกับนักวิทยาศาสตร์ชาวสหรัฐ ฯ ชื่อ เอ็ดเวิร์ด ยู. คอนดอน (Edward U. Condon) อีกคนหนึ่งคือ ยอร์ช แกมเมาว์ (George Gamow) นักวิทยาศาสตร์เชื้อชาติรัสเซีย ทั้งสามท่านนี้คิดค้นวิธีทางคณิตศาสตร์ซึ่งอธิบายการที่อนุภาคแอลฟาออกมาจากนิวเคลียสได้ ทุกคนยอมรับว่าอนุภาคแอลฟาไม่สามารถที่จะ *"ข้าม"* เครื่องกีดขวางของนิวเคลียสได้ จึงต้องสมมุติว่าอนุภาค นั้น *"ลอด"* หรือ *"แทรก"* ผ่านสิ่งกีดขวางไปโดยอาศัยคุณสมบัติความเป็นคลื่นที่มันมีอยู่

เราอธิบายการที่โปรตอนซึ่งมีพลังงานน้อย ๆ เข้าไปในนิวเคลียสของลิเธียมได้ โดยคิดในเชิงกลับกันกับการที่นิวเคลียสปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา เพราะถ้าอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าสามารถ "*รั่ว*" ออกมาจากนิวเคลียสได้แล้ว ก็ดูเป็นการสมควรที่น่าจะ "*แทรก*" ซึมเข้าไปได้เช่นเดียวกัน ในกรณีของโปรตอนก็เป็นเช่นนั้นเอง คือเกราะป้องกันนิวเคลียสของลิเธียมซึ่งทนทานต่อกระสุนโปรตอนที่มีพลังงานต่ำ ๆ นั้น บังเอิญมีรูอยู่ ข้อมูลซึ่งได้จากการยิงลิเธียมด้วยโปรตอนทำให้เราได้รู้หลายสิ่งหลายอย่างเกี่ยวกับการจัดวางนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียสของลิเธียม แต่ในเรื่องนี้เราไม่อาจจะไปไกลกว่านี้ได้ เพราะเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยาก จะกล่าวแต่เพียงว่าการทดลองยิงนิวเคลียสทำให้เราได้รู้ว่าอะไรเกิดขึ้นในนิวเคลียสมากทีเดียว และทำให้ได้ลู่ทางอันมีค่าเกี่ยวกับภายในอันมืดมนของใจกลางของสสารนั่น

กระสุนนัดสำคัญ

สิ่งซึ่งจะเป็นกุญแจไขประตูไปสู่แหล่งพลังงานอะตอม ทำให้ได้พลังงานมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในที่สุดนั้น ไม่ใช่โปรตอน ไม่ใช่อนุภาคแอลฟา แต่เป็นอนุภาคอีกชนิดหนึ่งคือ นิวตรอน เซอร์ เจมส์ แชดวิค (James Chadwick) เป็นผู้ค้นพบนิวตรอนในปี ๑๙๓๒ ที่มหาวิทยาลัย เคมบริดจ์ เขาทำการทดลองที่นักวิทยาศาสตร์เยอรมันสองคนคือ วัลท์เธอร์ โบเธอะ (Walther Bothe) และ เอช. เบคเกอร์ (H. Becker) เป็นผู้เริ่มไว้ก่อนหน้านั้นสองปี ทั้งสองคนนั้นพบว่าเมื่อให้อนุภาคแอลฟาจากธาตุโปโลเนียมชนกับธาตุเบา ๆ ซึ่งถ้าให้ดีแล้วควรใช้ธาตุเบอริลเลียมจะเกิดรังสีอย่างหนึ่งขึ้นมา รังสีนี้มีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงมาก และจากการเริ่มต้นนี้ ไอรีน คูรี (Irene Curie) (บุตรีของผู้ค้นพบเรเดียม) กับสามีคือ เฟรดเดอริค โจลิโย คูรี (Frederic Joliot Curie) ได้พบต่อไปว่า รังสีอันรุนแรงนี้อาจทำให้โปรตอนซึ่งมีพลังงานสูงออกมาจากอะตอมของสารประเภทที่มีไฮโดรเจนอยู่มาก เช่น จากปาราฟฟีน ได้

แชดวิค ตัดสินใจศึกษารังสีซึ่งได้จากธาตุเบอริลเลียมนี้ โดยใช้ห้องเมฆซึ่งบรรจุก๊าซไนโตรเจนไว้เต็ม เขาต้องการดูว่ามีลู่ทางที่จะเรียนรู้ธรรมชาติของรังสีประหลาดนี้บ้างหรือไม่ ในไม่ช้าก็พบว่า

ในห้องเมฆนั้นเกิดแต่ทางเดินเดี่ยว ๆ เท่านั้น แชดวิคคิดว่าทางเดินเดี่ยวเหล่านี้จะต้องเป็นทางเดินของนิวเคลียสของไนโตรเจน ซึ่งมีความเร็วสูง อันเกิดจากการที่รังสีประหลาดนั้นชนอะตอมของไนโตรเจน และทำให้อะตอมของไนโตรเจนกระดอนไป ในการชนนั้นต้องมีวัตถุสองอย่าง อย่างหนึ่งคืออะตอมของไนโตรเจน และอีกอย่างหนึ่ง คือ รังสีซึ่งยังไม่มีผู้รู้จักอันได้จากธาตุเบอริล-เลียม แต่นิวเคลียสของไนโตรเจนอย่างเดียวเท่านั้นที่ปรากฏร่องรอยให้เห็นในห้องเมฆ ส่วนรังสีอันรุนแรงนั้นไม่ทำให้เกิดไอออน จึงไม่เห็นทางเดินของมัน ซึ่งย่อมหมายความว่ารังสีนี้ไม่มีประจุไฟฟ้า ยิ่งไปกว่านั้นแชดวิครู้ได้ว่ามันจะต้องเป็นอนุภาคซึ่งหนักมากพอดูทีเดียว ไม่ใช่เป็นเพียงรังสีแกมมาซึ่งมีพลังงานสูง จึงสามารถชนอะตอมของไนโตรเจนให้กระเด็นไปอย่างแรงเช่นนั้นได้ จากการศึกษาทางเดินของไนโตรเจนที่ถูกชนในห้องเมฆ แชดวิคคำนวณได้ว่ามวลสารของอนุภาคนั้นเท่า ๆ กับมวลสารของอะตอมของไฮโดรเจน เขาตั้งชื่ออนุภาคใหม่นี้ว่านิวตรอน การค้นพบนิวตรอนของแชดวิคเกิดขึ้นสิบปีหลังจากที่รัทเธอฟอร์ดได้ทำนายไว้ว่า อนุภาคเช่นนี้จะต้องเป็นส่วนประกอบขั้นมูลฐานของนิวเคลียสทั้งหลาย

สองสามีภรรยา สกุลโจลิโย-คูรี ผู้ซึ่งเกือบจะค้นพบนิวตรอนไปเหมือนกัน ได้ทำการค้นคว้าต่อไป และได้พบสิ่งซึ่ง

มีความสำคัญพอ ๆ กัน คือพบว่าเมื่อใช้อนุภาคแอลฟายิงธาตุเบาๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ธาตุอลูมิเนียม จะได้ โพสิตรอนออกมา สิ่งที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์ทั้งสองแปลกใจมากคือ ยังคงมีโพสิตรอนออกจากแผ่นอลูมิเนียมนั้น แม้ว่าจะเอาสารซึ่งให้กำเนิดอนุภาคแอลฟาออกไปเสียแล้ว เห็นได้ชัดว่าแผ่นอลูมิเนียมถูกทำให้มีกัมมันตภาพ กัมมันตภาพรังสีจากแผ่นอลูมิเนียมนี้ลดลงอย่างรวดเร็ว แต่การลดก็เป็นไปในทำนองเดียวกับกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ เราอาจอธิบายการเกิดธาตุกัมมันตภาพใหม่นี้ขึ้นมาโดยเขียนสมการนิวเคลียร์ดังต่อไปนี้

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} = {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

(นิวตรอน)

เนื่องจากเรารู้จากการทดลองว่า เกิดนิวตรอนขึ้นในปฏิกิริยานี้ เราจึงรู้ว่าธาตุใหม่นี้คืออะไร คือเรารวมอะตอมมิกนัมเบอร์ ทางซ้ายมือของสมการได้ ๑๓+๒=๑๕ ซึ่งจะต้องเป็นอะตอมมิก-นัมเบอร์ของอะตอมของธาตุทางขวามือ เพราะนิวตรอนมีอะตอมมิกนัมเบอร์เท่ากับศูนย์ ตามตารางธาตุนั้น ธาตุซึ่งมีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๑๕ คือ ฟอสฟอรัส แมสนัมเบอร์ของธาตุใหม่นี้หาได้โดยรวม ๒๗ กับ ๔ ได้ ๓๑ หักแมสนัมเบอร์ของนิวตรอนซึ่งเท่ากับ ๑ ออกเสีย ยังเหลือ ๓๐ เป็นอันว่าธาตุใหม่ซึ่งสองสามีภรรยาพบคือ $^{30}_{15}\mathrm{P}$ หรือฟอสฟอรัส ๓๐

ฟอสฟอรัสซึ่งมีอยู่ตามธรรมชาติเป็นไอโซโทปซึ่งมีแมสนัมเบอร์ ๓๑ ดังนั้นฟอสฟอรัสใหม่นี้ จึงเป็นไอโซโทปซึ่งแตกต่างจากไอโซโทปที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ตรงที่ว่าในนิวเคลียสมีนิวตรอนน้อยกว่าหนึ่งตัว อะตอมของฟอสฟอรัส ๓๐ ไม่ถาวร สลายตัวโดยการปล่อยอนุภาคโพสิตรอนตามสมการ

$$^{30}_{15}P = ^{30}_{14}Si + ^{0}_{+1}e$$

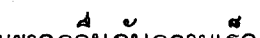
(โพสิตรอน)

การปล่อยโพสิตรอนมีผลให้ฟอสฟอรัสเปลี่ยนไปเป็นซิลิกอน การเปลี่ยนนี้เร็วมากเพราะฟอสฟอรัส ๓๐ มี "ครึ่งชีวิต" เพียง ๒ $\frac{๑}{๒}$ นาที อะตอมของซิลิกอนที่เกิดขึ้นนี้เป็นอะตอมที่ถาวรคือไม่เปลี่ยนเป็นอะตอมของธาตุอื่นต่อไปอีก เราเรียกชื่อไอโซโทปที่ถูกทำให้มีกัมมันตภาพว่าเรดิโอไอโซโทป หลังจากการทำให้เกิดกัมมันตภาพได้สำเร็จ ในปี ๑๙๓๔ ไม่นานนักก็มีการค้นพบเรดิโอไอโซโทปใหม่เป็นจำนวนร้อย ๆ นอกจากรังสีแอลฟาแล้วอนุภาคอื่น ๆ ก็ทำให้เกิดเรดิโอไอโซโทปได้เช่นเดียวกัน

นิวตรอนทำให้ธาตุบางธาตุกลายเป็นธาตุกัมมันตภาพได้ เมื่อมาถึงตอนนี้เราจึงใคร่แนะนำให้รู้จักกับชายผู้หนึ่งซึ่งต่อมาจะกลายเป็น "เจ้านาย" ของนิวตรอน บุคคลผู้นี้คือ เอนริโค เฟอร์มิ (Enrico Fermi) นักวิทยาศาสตร์หนุ่มชาวอิตาลี เดิมเขาเป็นนักฟิสิกส์เชิงทฤษฎี แต่ได้เปลี่ยนมาเป็นนักทดลอง เมื่อ

ได้ทราบความสำคัญของนิวตรอนและการเกิดกัมมันตภาพรังสีโดยการทำขึ้น เฟอร์มิใช้เวลาไม่นานรวบรวมนักวิทยาศาสตร์หนุ่ม ๆ ชาติเดียวกันกับเขาเข้าด้วยกัน คนเหล่านี้ ต่อมาต่างก็มีชื่อเสียงด้วยตนเองในทางต่าง ๆ กัน เฟอร์มิและสมัครพรรคพวกช่วยกันใช้อนุภาคนิวตรอนยิงธาตุทุก ๆ ธาตุอย่างมีระบบ จากการทดลองเหล่านี้เขาได้พบสิ่งที่น่าสนใจมาก คือว่าอะตอมของแทบทุกธาตุจับอนุภาคนิวตรอนได้ แต่จะจับได้ดีมากถ้านิวตรอนนั้นมีพลังงานน้อย ๆ เราก็พอจะเข้าใจว่านิวตรอนสามารถหลบหลีกแรงผลักทางไฟฟ้าของอะตอมได้โดยง่าย เพราะนิวตรอนเองไม่มีประจุไฟฟ้า แต่น่าแปลกใจว่าทำไมนิวเคลียสจึงจับนิวตรอนได้ง่าย ถ้านิวตรอนเสียพลังงานที่มีอยู่ให้เกือบหมดเสียก่อน ทำไมนิวตรอนซึ่งมีความเร็วน้อยจึงให้ผลดีกว่านิวตรอนซึ่งมีความเร็วสูง ในการทำให้นิวเคลียสเกิดกัมมันตภาพขึ้น

คำตอบปัญหาเหล่านี้อยู่ที่สภาพความเป็นคลื่นของนิวตรอน ถึงแม้นิวตรอนจะเป็นสสารเล็ก ๆ แข็งแกร่งและไม่มีประจุไฟฟ้า แต่นิวตรอนก็มีคุณสมบัติแห่งความเป็นคลื่นอยู่ และเนื่องด้วยเหตุนี้เราจึงอาจถือว่า นิวตรอนมีความยาวคลื่นขนาดหนึ่ง ความยาวคลื่นนี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานของมัน ถ้าพลังงานยิ่งมากจะยิ่งเคลื่อนที่เร็ว และเมื่อเคลื่อนที่เร็วความยาวคลื่นจะยิ่งสั้นลง ฉะนั้นเมื่อนิวตรอนเคลื่อนที่ช้าลง ความยาวคลื่นจะยาวขึ้น (เพื่อช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่าง

ความยาวคลื่นกับความเร็ว ลองนึกถึงภาพงูเลื้อยไปตามพื้น เมื่อเลื้อยเร็ว ๆ อาจจะมีรูปร่างอย่างนี้ และเมื่อเลื้อยช้า ๆ ไปแทบไม่ไหว เช่นหลังจากกินอิ่มใหม่ ๆ มีรูปร่างอย่างนี้  คือยอดคลื่นอยู่ห่างกันมากกว่าตอนที่เลื้อยเร็วๆ) เนื่องจากคุณสมบัติแห่งความเป็นคลื่นนี่เอง นิวตรอนอิสระที่เคลื่อนที่ช้า ๆ จึงมีโอกาสที่จะแทรกเข้าไปในนิวเคลียสและถูกจับโดยนิวเคลียส มากกว่านิวตรอนเร็ว และมากกว่าอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้ามาก ความจริงแล้วเมื่อเกิดนิวตรอนขึ้นมานั้น นิวตรอน ซึ่งไม่ถูกจับโดยนิวเคลียสหาได้ยากมาก

นิวตรอนซึ่งเกิดจากอนุภาคแอลฟากระทบธาตุเบา ๆ เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูง ถ้าให้นิวตรอนเร็ว ๆ เหล่านี้ชนอะตอมของธาตุเบา ๆ เช่น ไฮโดรเจน เบอริลเลียม และคาร์บอนอีกต่อหนึ่ง ความเร็วจะลดลงเพราะการชนแต่ละครั้งจะทำให้เสียพลังงานไปทีละน้อย ธาตุเหล่านี้ได้ชื่อว่าทำหน้าที่เป็น มอเดอเรเตอร์ คือทำให้ความเร็วของนิวตรอนลดลง ธาตุบางธาตุ เช่นโบรอน ถึงแม้จะเป็นธาตุเบาก็ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นตัวลดความเร็ว เพราะมีความโน้มเอียงในทางที่จะจับนิวตรอนเอาไว้เลย แทนที่จะให้ชนแล้วกระเด็นออกไป

ในบรรดาธาตุทั้งหลายที่เฟอร์มิใช้นิวตรอนยิงนั้น มีอยู่ธาตุหนึ่งซึ่งอยู่ท้ายสุดในตารางธาตุ คือธาตุที่ ๙๒ ยูเรเนียม วัน

หนึ่งในฤดูใบไม้ผลิปี ค.ศ. ๑๙๓๔ เฟอร์มิ ยิงยูเรเนียมด้วยนิวตรอน และพบว่ายูเรเนียมเกิดกัมมันตภาพรังสีมากเช่นเดียวกับธาตุอื่น ๆ ความจริงนี่ก็ไม่ใช่เรื่องผิดปกติอะไรเลย แต่ที่ทำให้เฟอร์มิสงสัยคือ ในการยิงนี้เกิดอะตอมกัมมันตภาพขึ้นมาสี่ชนิดต่าง ๆ กัน หรืออย่างน้อยที่สุดเขาก็ได้พบว่ามีอนุภาคเบตา ซึ่งเกิดจาก "*ครึ่งชีวิต*" ต่าง ๆ กันถึงสี่อย่าง ดูไปแล้วก็สมเหตุสมผลที่จะถือว่าอนุภาคเบตาพวกหนึ่งมาจาก U^{239} อันเกิดจากการที่นิวตรอนถูกจับโดย U^{238} ตามสมการ ${}_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} = {}_{92}U^{239}$ แล้ว U^{239} นี้ปล่อยอนุภาคเบตาซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ ตามสมการ

$$ {}_{92}U^{239} = {}_{93}X^{239} + {}_{-1}e^{0} $$

ในที่นี้ X คือธาตุซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ U^{239} เพราะเมื่ออะตอมเสียประจุไฟฟ้าลบไปหนึ่งประจุ (คือเสียอนุภาคเบตา) ก็มีผลเท่ากับได้รับประจุบวกมาหนึ่งประจุ ดังนั้นอะตอมมิกนัมเบอร์จึงต้องเพิ่มขึ้น ๑ หน่วย นี่หมายความว่า X จะต้องเป็นธาตุใหม่ที่เรียกว่าธาตุทรานส์ยูเรเนียม หรือธาตุที่ตามหลังยูเรเนียมในตารางธาตุ เรื่องนี้เป็นเรื่องที่น่าตื่นเต้นมาก และอาจจะทายต่อไปได้ว่าธาตุที่ ๙๓ นี้ ไม่ถาวรสลายตัวเกิดเป็นธาตุที่ ๙๔ ขึ้น

เฟอร์มิตีพิมพ์ผลงานของเขา โดยเขียนบทความทางวิชาการชื่อ "*ลู่ทางที่จะทำธาตุซึ่งมีอะตอมมิกนัมเบอร์สูงกว่า ๙๒*" ลง

ในนิตยสารทางวิทยาศาสตร์ของอังกฤษฉบับหนึ่งชื่อ เนเจอร์ ฉบับวันที่ ๑๖ มิถุนายน ๑๙๓๔ ในบทความนี้เฟอร์มิกล่าวถึงธาตุที่ ๙๓ โดยเฉพาะ แต่ก็ได้ทำนายเกี่ยวกับธาตุที่ ๙๔ และ ๙๕ ไว้ด้วย ข่าวที่ว่าอาจจะทำธาตุใหม่ขึ้นมาได้นี้ เป็นที่สนใจแก่นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก นักวิทยาศาสตร์ในสหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส อังกฤษ สวิส และประเทศอื่น ลงมือทำการทดลองต่าง ๆ ซ้ำกับที่เฟอร์มิเคยทำบ้างและค้นคว้าสืบต่อไปบ้าง การค้นคว้าเหล่านี้ดำเนินไปเป็นเวลาห้าปี และในระหว่างนั้นบรรดานักวิทยาศาสตร์พากันแน่ใจว่าไม่เพียงแต่ได้ยืนยันว่า เฟอร์มิได้ทำธาตุที่ ๙๓ ขึ้นเท่านั้น หากได้พบธาตุอื่นซึ่งอยู่ถัดไปจากยูเรเนียมเพิ่มขึ้นด้วย

ครั้นแล้วก็ถึงเดือนธันวาคม ค.ศ. ๑๙๓๘ นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันสองคนคือ ออตโต ฮาน (Otto Hahn) และ ฟริตซ์ ชะตราซมันน์ (Fritz Strassmann) ได้ทำการทดลองครั้งสำคัญซึ่งจะมีผลในการเปลี่ยนวิถีชีวิตของมนุษย์ในที่สุด ทั้งสองคนนี้ทำการค้นคว้าอยู่ที่ห้องทดลองของสถาบันไกเซอร์ วิลเฮล์ม ชานกรุงเบอร์ลิน เขาทำการทดลองซึ่งเฟอร์มิเคยทำมาก่อนคือ เขายิงยูเรเนียมด้วยนิวตรอน แล้วใช้วิธีการทางเคมีแยกธาตุกัมมันตภาพต่าง ๆ ออกจากยูเรเนียมตามลำดับ ทำซ้ำ ๆ อยู่หลายเดือน และระหว่างนั้นก็คิดว่าได้พบธาตุซึ่งมีอะตอมมิกนัมเบอร์จาก ๙๘

ถึง ๙๖ ทั้งสองมุ่งวิเคราะห์ส่วนที่แยกออกมาซึ่งคิดว่าควรจะมีธาตุเรเดียม (๘๘) แอคติเดียม (๘๙) และธอเรียม (๙๐) อยู่เล็กน้อย

ฮานและชะตราซมันน์ ประหลาดใจมากที่พบว่าส่วนที่เขาทำการวิเคราะห์นั้น มีธาตุแบเรียมอันมีน้ำหนักปานกลางคือ ๕๖ อยู่ จะเป็นไปได้อย่างไรกัน ที่นิวตรอนชนยูเรเนียมแล้วเกิดธาตุซึ่งอยู่กลางตารางธาตุนับจากธาตุ ๙๒ ซ้ำเกิดมากพอที่จะหาพบเสียด้วยดูประหนึ่งว่าอะตอมของยูเรเนียมถูกแบ่งครึ่งทีเดียว นักวิทยาศาสตร์ทั้งสองเขียนจดหมายเล่าผลการค้นพบนี้ไปยังบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ของเยอรมัน ชื่อ นาทัวร์วิซเซ่นชาฟเทิน (Naturwissenchaften) เมื่อวันที่ ๒๒ ธันวาคม ค.ศ. ๑๙๓๘ ทั้งสองยังชี้ให้เห็นว่า ถ้าแบเรียมมีไอโซโทปซึ่งมีแมสนัมเบอร์ ๑๓๘ แล้ว อะตอมอีกชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการที่นิวตรอนชนยูเรเนียม ๒๓๘ จะต้องเป็นแมงกานีส ๑๐๑ (แม้ทั้งสองจะไม่พบธาตุนี้ในการทดลอง)

แม้จะมีหลักฐานยืนยันเช่นนั้น นักวิทยาศาสตร์เยอรมันทั้งสองก็ยังระมัดระวังมาก บางทีอาจเป็นเพราะเกรงใจนักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อเสียงทั้งหลายที่เขากำลังเจริญรอยตามอยู่ แต่ก็อาจจะเป็นเพราะทั้งสองเห็นว่าเป็นการเหลือเชื่อ ที่อะตอมของยูเรเนียมจะถูกทำให้แตกกระจุยกระจายได้เช่นนั้นมากกว่า อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะ

มีเหตุผลเช่นไร ทั้งสองก็ตีพิมพ์ผลการค้นพบออกเผยแพร่โดยไม่ยืนยันข้อสรุปใด ๆ ทั้งสิ้น เสร็จแล้วก็หันมาพิจารณาใคร่ครวญผลการค้นคว้าของตนต่อไป

ในโอกาสต่อมาศาสตราจารย์ฮานได้เขียนไว้ว่า "*สาเหตุใหญ่ที่ทำให้เราระมัดระวังจนเกินไป ก็เนื่องจากว่าเราเป็นนักเคมี จึงมีความลังเลใจที่จะประกาศการค้นพบ อันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากทางฟิสิกส์ อย่างไรก็ตามเราได้เอ่ยถึงการทำให้ยูเรเนียม 'แตกกระจัดกระจาย' ซึ่งหมายถึงกระบวนการที่ได้แบเรียม ซึ่งอยู่ต่ำลงไปในตารางธาตุมากมาโดยไม่นึกไม่ฝัน*"

ก่อนที่จะตีพิมพ์ผลการทดลอง ฮานและชะตราซมันน์ได้ส่งข่าวการค้นพบไปให้ ลีเซ่อ ไมท์เนอร์ (Lise Meitner) เพื่อนเก่าผู้เคยร่วมงานกันมา แต่ได้ถูกบีบบังคับให้ออกไปเสียจากประเทศเยอรมันอันอยู่ภายใต้ระบบนาซีของฮิตเลอร์ ลีเซ่อ ไมท์-เนอร์ ซึ่งเป็นนักฟิสิกส์เชื้อชาติออสเตรีย ได้ไปอยู่ที่สวีเดน เขากับหลานชายชื่อ ออตโต ฟริซค์ (Otto Frisch) ผู้เป็นนักฟิสิกส์ที่มีชื่อเสียงคนหนึ่งจากห้องทดลอง นีลส์ บอร์ ณ กรุงโคเปนเฮเกน ได้ร่วมมือกันวิเคราะห์ผลการทดลองของฮานและชะตราซมันน์ ในที่สุดทั้งคู่ก็แน่ใจว่าอะตอมถูกแยกออกเป็นสองเสี่ยงจริง ๆ จึงลงมือหาทางพิสูจน์และอธิบายปฏิกิริยานิวเคลียร์ใหม่อันแตกต่างจากที่เคยพบกันมานี้

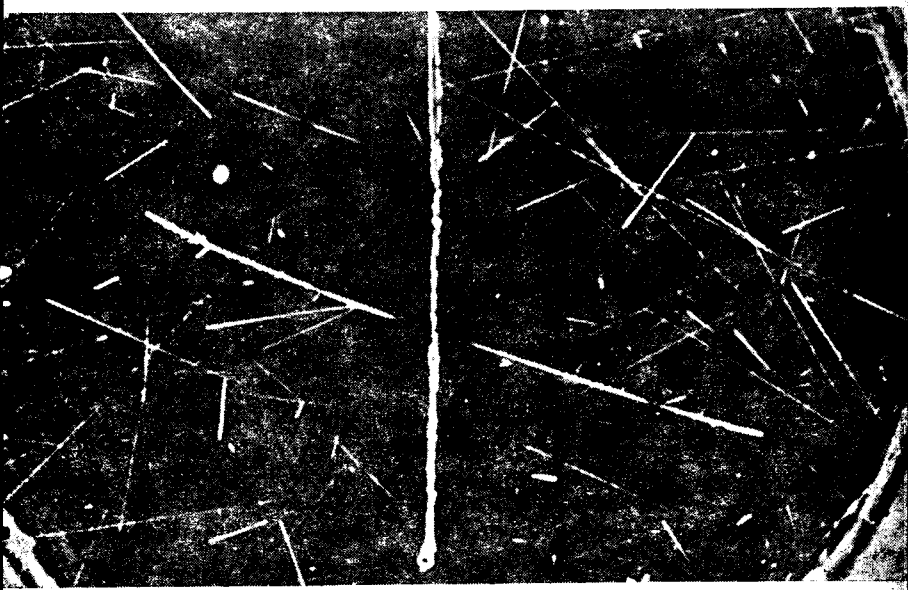
แรกทีเดียว ลีเซ่อ ไมท์เนอร์ ทำการคำนวณเพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ใหม่นี้ เขาใช้แบบโครงสร้างของนิวเคลียสซึ่งสมมุติว่านิวเคลียสของยูเรเนียม อันประกอบด้วยอนุภาค ๒๓๘ อนุภาค กระทำตัวประหนึ่งเป็นของเหลวหยดเล็ก ๆ เมื่อถูกนิวตรอนกระแทกหยดของเหลวนี้จะสั่นไปมา และอาจจะถูกรบกวนมากพอที่จะทำให้นิวตรอนกับโปรตอนเกิดเป็นปฏิบักษ์ต่อกันอย่างรุนแรง มีผลให้นิวเคลียสยืดตัวออกเป็นรูปดัมเบลล์ และโปรตอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าจะทำให้ปลายดัมเบลล์ทั้งสองข้างห่างออกจากกันทุกที ๆ ในที่สุดแรงซึ่งยึดเหนี่ยวสองส่วนไว้ด้วยกันจะหมดสิ้นไป และส่วนทั้งสองจะหลุดออกจากกัน ทั้งหมดนี้เกิดขึ้นภายในเวลาเศษหนึ่งส่วนล้านล้านวินาทีเท่านั้น ดร. ฟริชค์ เรียกกระบวนการนี้ว่าเป็นกระบวนการเกิดฟิชชั่นของนิวเคลียสของยูเรเนียม

ขั้นต่อไปคือการแสดงให้เห็นว่า นิวเคลียร์ฟิชชั่นเกิดขึ้นได้จริง เพื่อการนี้ ดร. ฟริชค์ ซึ่งกำลังหยุดพักผ่อนเนื่องจากเทศกาลคริสต์มาสอยู่ในสวีเดน ได้รีบกลับไปยังประเทศเดนมาร์กเพื่อทำการติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดส่วนอะตอมยูเรเนียม ที่แตกออกมาด้วยความเร็วสูง จากการเอาค่าอะตอมมิกแมสของส่วนที่แตกออกมาไปเปรียบเทียบกับอะตอมมิกแมสของยูเรเนียม เป็นที่คาดกันว่านิวเคลียร์ฟิชชั่นจะส่งพลังงานออกมาเทียบเท่ากับ ๐.๒๑ หน่วยอะตอมมิกแมส คือราว ๆ 200 MeV พลังงานจากฟิชชั่นนี้อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ของส่วนที่แตกออกมานั้น และเนื่องจาก

ส่วนที่แตกออกนี้มีประจุไฟฟ้ามาก ฟริซค์จึงรู้ว่าอาจใช้ห้องไอออนบันทึกกระแสไฟฟ้าสั้น ๆ ที่เกิดขึ้นได้ ต่อมาไม่นานเขาก็พิสูจน์ได้ว่าในการที่ยูเรเนียมเกิดฟิชชั่นนั้น อะตอมถูกแยกเป็นสองเสี่ยงจริง ๆ

เนื่องจากทั้งทฤษฎีและการทดลองยืนยันการเกิดฟิชชั่นอย่างแน่นแฟ้น จึงไม่ต้องมีข้อสงสัยอะไรเกี่ยวกับปรากฏการณ์ใหม่นี้ต่อไปอีกแล้ว ได้อธิบายมาแล้วว่าอะตอมของยูเรเนียมแยกออกเป็นอะตอมขนาดกลางซึ่งมีความถาวรสองอะตอม และพลังงานซึ่งถูกปล่อยออกมาในขบวนการฟิชชั่นนั้น คือผลต่างระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมของยูเรเนียมกับผลบวกของพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมสองเสี่ยงที่แตกออกมา เป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องระลึกได้ว่าในการเดินฟิชชั่นนั้น จำนวนนิวตรอนและโปรตอนทั้งหมดยังเท่าเดิม เพียงแต่มีการจัดวางเสียใหม่ คือเปลี่ยนจากที่มี ๒๓๘ อนุภาคในนิวเคลียสเดียว มาเป็นสองนิวเคลียส ซึ่งจำนวนโปรตอนและนิวตรอนรวมกันแล้วเท่ากับที่มีอยู่ในนิวเคลียสเดิม ก่อนหน้านี้ได้เห็นแล้วว่า ถ้ามวลสารทั้งหมดของอะตอมของยูเรเนียมกลายเป็นพลังงานจะมีค่า ๒๓๘ × ๙๓๑ MeV หรือ ๒๒๐,๐๐๐ MeV ในขบวนการเกิดฟิชชั่นนั้นเราได้มาแต่พลังงาน เนื่องจากการสับเปลี่ยนที่อยู่ของนิวตรอนและโปรตอนเท่านั้น ซึ่งมีค่าเพียง ๒๐๐ MeV หรือเพียง ๐.๑ เปอร์เซ็นต์ของพลังงานอันมากมายของนิวเคลียสของยูเรเนียม อย่างไรก็ตาม

จากที่ได้คำนวณกันมาแล้วว่าพลังงานที่เกิดจากมวลสารหนึ่งปอนด์นั้น เทียบเท่าดินระเบิด TNT จำนวน ๑๐,๐๐๐,๐๐๐ ตัน ดังนั้นจะเห็นว่าถึงแม้เราจะเอาพลังงานมาได้เพียงเศษหนึ่งส่วนสิบของหนึ่งเปอร์เซ็นต์ของจำนวนนี้ เราก็ยังคงได้พลังงานซึ่งเทียบเท่ากับ TNT ถึง ๑๐,๐๐๐ ตัน จากยูเรเนียม ๑ ปอนด์



ที่ ๒๒ ภาพถ่ายจากห้องเมฆ แสดงให้เห็นนิวเคลียสของยูเรเนียมเกิดฟิชชน แยกออกเป็นสองส่วน เส้นยาว (เส้นล่าง) เป็นทางเดินของส่วนที่มีน้ำหนักเบากว่า เส้นซึ่งอยู่ในแนวระดับคือแผ่นทองคำอาบยูเรเนียม (Courtesy Professor J.K. Boggild)

ข้อพิสูจน์อันน่าตื่นเต้นเกี่ยวกับการแยกตัวของอะตอมยูเรเนียม ได้มาจากภาพถ่ายในห้องเมฆ นักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์กชื่อ เจ. เค. เบิกกิลด์ (J.K. Boggild) เอาแผ่นทองคำบางๆ ขึงไว้ตรงกลางห้องเมฆบนแผ่นทองคำนี้มียูเรเนียมเป็นชั้นบางๆ เขาจัดให้ลำอนุภาคนิวตรอนไปชนยูเรเนียม และถ่ายรูปทางเดินของอนุภาคต่าง ๆ ในห้องเมฆนั้น ผลปรากฏว่าเขาได้รูปถ่ายของอะตอมของยูเรเนียมจำนวนหนึ่งซึ่งกำลังเกิดฟิชชั่น เส้นแนวระดับสีขาวในภาพประกอบนั้นคือแผ่นทองคำซึ่งมียูเรเนียมติดอยู่ และเส้นหนาๆ สองเส้น ซึ่งออกมาจากแผ่นยูเรเนียมคือทางเดินของส่วนของยูเรเนียม ซึ่งแยกออกเป็นสองเสี่ยง เส้นสั้น ๆ ซึ่งออกมาจากตอนปลายทำให้แต่ละเส้นมีรูปร่างคล้ายต้นคริสต์มาส

นิวเคลียสของยูเรเนียมไม่ค่อยจะเป็นใจ คือไม่แยกออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กันบ่อยนัก แต่มักจะแยกออกเป็นคู่ๆ มีขนาดต่าง ๆ กันไป อย่างไรก็ตามมวลสารของแต่ละคู่รวมกันได้เท่ากับมวลสารของยูเรเนียมเสมอไป จากการวิเคราะห์ความยาวของระยะทางที่ส่วนซึ่งแตกออกไปเคลื่อนที่ไปในอากาศ ทำให้รู้ว่าแบ่งออกได้เป็นสองพวก คือพวกซึ่งมีน้ำหนักเบาเคลื่อนที่ได้ประมาณ ๑ นิ้ว และพวกซึ่งหนักมากเคลื่อนที่เป็นระยะทางประมาณ ๐.๘ นิ้ว

ถึงตอนนี้เราต้องรู้บางสิ่งบางอย่างเกี่ยวกับยูเรเนียมเพิ่มเติม จึงจะเข้าใจการแยกตัวของอะตอมของยูเรเนียมได้ชัดเจน ศาสตราจารย์ เอ. เจ. เดมป์สเตอร์ (A. J. Dempster) แห่งมหาวิทยาลัยชิคาโก ได้ใช้แมส สเปคโตกราฟ ตรวจยูเรเนียมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและพบว่าที่เข้าใจกันว่ามีแต่ยูเรเนียม ๒๓๘ นั้นไม่ถูก ความจริงมีไอโซโทปซึ่งเบากว่าอยู่ด้วย ไอโซโทป $^{235}_{U}$ ซึ่งเบากว่าอยู่ ๓ หน่วยอะตอมมิกแมส ปนอยู่กับ $^{238}_{U}$ ในอัตราส่วนหนึ่งต่อร้อยสี่สิบ หรือยูเรเนียมตามธรรมชาตินั้นเป็น $^{238}_{U}$ เสียร้อยละ ๙๙.๓ ส่วนอีกร้อยละ ๐.๗ คือ $^{235}_{U}$

ปรากฏว่าไอโซโทปชนิดเบาซึ่งหายากนี่เองที่เกิดฟิชชั่นได้ง่าย ดังนั้นในการเขียนสมการของฟิชชั่น เราจะใช้นิวเคลียสของ $^{235}_{U}$ ไม่ใช่นิวเคลียสของไอโซโทปชนิดหนัก เราเขียนสมการได้ดังนี้

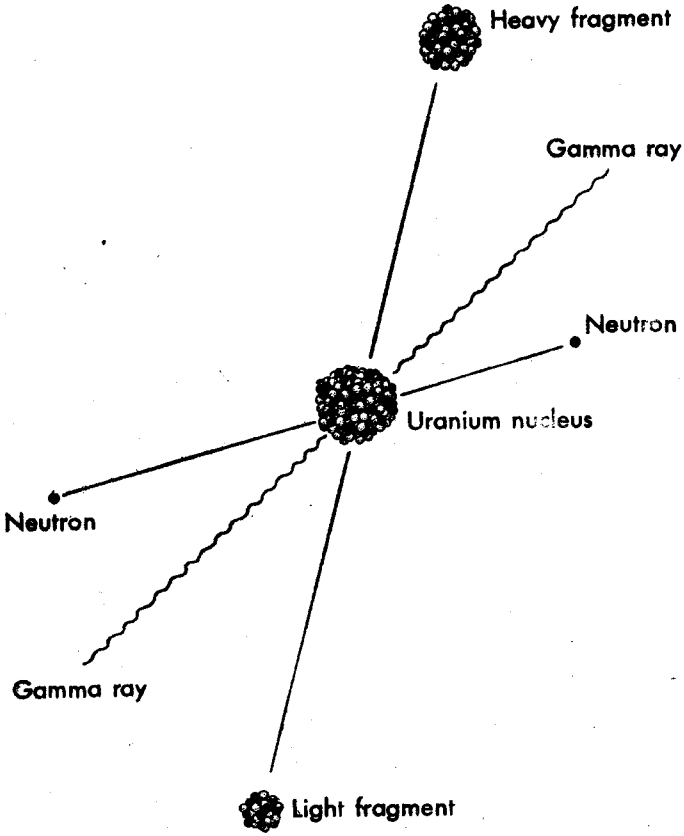
$$^{235}_{U} + ^{1}_{n} = ^{139}_{La} + ^{95}_{Mo} + 2n^{1}$$

ยูเรเนียม + นิวตรอน = แลนธานัม + โมลิบดินัม + 2 นิวตรอน

นี่เป็นเพียงวิธีหนึ่งในหลาย ๆ วิธีที่นิวเคลียสของยูเรเนียมแยกตัว แต่ก็นับว่าเป็นวิธีที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก ถ้ารวมมวลสารของอนุภาคที่เกี่ยวข้องเข้าด้วยกัน ทางซ้ายมือของสมการได้ ๒๓๕.๑๒๔ + ๑.๐๐๙ = ๒๓๖.๑๓๓ ส่วนทางขวามือคือ

๑๓๘.๙๕๕ + ๙๔.๙๔๕ + ๒.๐๑๘ = ๒๓๕.๙๑๘ มวลสาร

หายไป ๐.๒๑๕ amu ซึ่งเทียบเท่ากับ ๒๐๐ MeV



รูปที่ ๒๓ แผนภาพแสดงนิวเคลียสของยูเรเนียมเกิดฟิชชั่น แตกออกเป็น สองเสี่ยง

สำหรับนิวตรอนซึ่งเกิดเพิ่มขึ้นมา ๒ ตัวนั้น มีความสำคัญมาก แต่ในตอนนี้เราจะผ่านไปก่อน ค่อยหวนกลับมาพูดถึงในบทต่อไป ขอให้เรามาดูสิ่งซึ่งดูเหมือนจะผิดพลาดในการเขียนสมการของพีชชั่นกันก่อน ถ้าเราดูตารางธาตุจะเห็นว่า แลนธานัม มีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๕๗ และโมลิบดินัม ๔๒ ซึ่งรวมกันได้ ๙๙ ไม่เท่ากับอะตอมมิกนัมเบอร์ ๙๒ ของยูเรเนียม ความคลาดเคลื่อนไม่ตรงกันนี้ อธิบายได้ว่าตอนที่เกิดพีชชั่นนิวเคลียสของแลนธานัม และโมลิบดินัมไม่ได้เกิดขึ้นทันที แต่อะตอมทั้งสองนี้เป็นธาตุถาวร ซึ่งเกิดจากการสลายตัวตามลำดับของธาตุกัมมันตภาพพวกหนึ่งสำหรับแลนธานัมนั้น เริ่มต้นด้วยไอโอดีน ซึ่งมีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๕๓ ไอโอดีนเป็นธาตุกัมมันตภาพปล่อยอนุภาคเบตา (ทำให้ได้ประจุบวกเพิ่มขึ้น) กลายเป็นซีนอน ซีนอนสลายตัวต่อไปเป็นซีเซียม (อะตอมมิกนัมเบอร์ ๕๕) การสลายตัวทั้งสองครั้งนี้เป็นไปอย่างรวดเร็ว และซีเซียมสลายตัวโดยมีครึ่งชีวิต ๑๐ นาที กลายเป็นไอโซโทปของแบเรียมชนิดหนึ่ง ซึ่งสลายตัวต่อไปอีก โดยมีครึ่งชีวิต ๘๕ วินาที กลายเป็นแลนธานัม ๑๓๙ ซึ่งมีความถาวร เมื่อย้อนกลับไปดูจะเห็นว่า เนื่องจากส่วนที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่ง ตอนที่เกิดพีชชั่นนั้น มีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๕๓ อีกส่วนหนึ่งจึงมีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๙๒ - ๕๓ หรือ ๓๙ (ธาตุ ๓๙ คือ ยิทเทรียม)

เมื่อรวมเบ็ดเสร็จแล้วอะตอมอันเป็นผลที่เกิดจากพีชชั่นนั้น มีอยู่เป็นจำนวนกว่าร้อยชนิดซึ่งมีครึ่งชีวิตนานพอสมควร และยังมีไอโซโทปซึ่งมีอายุสั้น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก เริ่มจากสังกะสีพวก rare earths ทั้งหมดจนถึงยูโรเบียม มีอะตอมมิกนัมเบอร์ต่าง ๆ กันถึง ๓๓ ค่า แมสนัมเบอร์ของไอโซโทปเหล่านี้มีตั้งแต่ ๗๒ ถึง ๑๕๖ แต่ที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือแถว ๆ แมสนัมเบอร์ ๙๕ และ ๑๓๙ บางไอโซโทปก็มีอายุนาน เช่น สตรอนเทียม ๙๐ มีครึ่งชีวิต ๒๘ ปี ซีเซียม ๑๓๗ มีครึ่งอายุราว ๆ ๓๐ ปี และ ซีเรียม ๑๔๔ ราว ๆ ๑ ปี

ทั้งหมดที่กล่าวมานี้ก็มีส่วนช่วยในการอธิบายว่า ทำไมเมื่อนักวิทยาศาสตร์พยายามวิเคราะห์ผลการยิงยูเรเนียมด้วยนิวตรอน จึงพากันจับต้นชนปลายไม่ค่อยจะถูก เขาไม่รู้ว่าธาตุที่เกิดจากพีชชั่นนั้นมีหลายอย่าง และมีครึ่งชีวิตต่าง ๆ กัน ธาตุเหล่านี้เองที่คิดกันว่าเป็นธาตุพวกที่มาทีหลังยูเรเนียม เลยทำให้ออกนอกลู่นอกทางไป สาเหตุอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์พลาดไปไม่พบพีชชั่นเป็นเวลาหลายปีก็คือ พวกเขาไม่คิดว่านิวเคลียสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงเช่นนั้นได้

๑๐

พลังงานจากยูเรเนียม

ข่าวการทำให้อะตอมแตกออกเป็นสองเสี่ยงในประเทศเยอรมัน แผ่กระจายออกไปสู่ห้องทดลองของนักวิทยาศาสตร์ชาติต่าง ๆ ราวกับไฟไหม้บ้าก่อนที่จะมีการตีพิมพ์ผลการทดลองของฮานและชะตราซมันน์ หรือคำอธิบายพีชชั่นของ ลีเซ่อ ไมท์-เนอร์เสียอีก ต่อมาข่าวนี้จะมีความสำคัญอย่างยิ่งยอดแก่นักฟิสิกส์ร่างบึกบึนชาวอิตาลีผู้หนึ่งชื่อ เอ็นริโค เฟอร์มิ ตอนที่เขาได้รับทราบเรื่องราวของพีชชั่นของยูเรเนียมนั้น เฟอร์มิเพิ่งไปถึงสหรัฐอเมริกา และเริ่มทำงานวิจัยที่มหาวิทยาลัยโคลัมเบีย เขานึกรู้ทันทีว่าสิ่งที่เขาเคยคิดว่าธาตุที่เป็นธาตุหลังยูเรเนียมนั้น คือยูเรเนียมสองส่วนที่แตกออกไปอย่างไม่ต้องสงสัย

เฟอร์มิ รู้ด้วยว่าการที่อะตอมของยูเรเนียมแตกออกเป็นสองส่วนนั้น ไม่จำเป็นจะต้องหมายความว่านิวเคลียร์พีชชั่นจะกลายเป็นแหล่งของพลังงานซึ่งจะเอามาใช้ประโยชน์ได้ ในการทดลองครั้งหนึ่ง นิวตรอนอาจทำให้ยูเรเนียมตั้งล้านอะตอมเกิดพีชชั่น แต่ก็จะไม่ให้พลังมากมายเท่าใดเลย เพียงแต่พอจะทำให้แมลงวันตัวหนึ่งบินได้สักครู่เท่านั้นเอง และปัญหาที่ยุ่งยากที่สุดเกี่ยวกับการทดลอง ก็คือต้องบรรจุพลังงานเข้าไปมากกว่าพลังงานที่ได้ออกมาจากการเกิดพีชชั่นมากนัก เฟอร์มิรู้ว่าถ้าจะให้พีชชั่นมี

ความสำคัญในแง่ของการใช้ให้เป็นประโยชน์แล้ว จะต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบที่เลี้ยงตัวเองได้ คือว่าพีชชั่นหนึ่งจะต้องทำให้เกิดพีชชั่นต่อ ๆ ไปอีกเป็นลูกโซ่ เพื่อว่าพลังงานจะได้เพิ่มพูนขึ้น ปัญหาก็มีอยู่ว่าพีชชั่นซึ่งเกิดแก่นิวเคลียสของยูเรเนียมนั้นจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ที่ว่านี้ได้อย่างไร

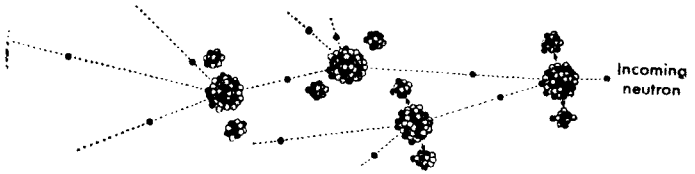
ทางที่จะแก้ปัญหานี้อยู่ที่นิวตรอน เพราะนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ทำให้เกิดพีชชั่น ดังนั้นถ้าจะให้ยูเรเนียมเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่แล้ว จะต้องให้พีชชั่นผลิตนิวตรอนออกมา เฟอร์มิคิดว่าเรื่องนี้มีทางเป็นไปได้ เพราะพีชชั่นเป็นกระบวนการแตกทำลายซึ่งรุนแรงมาก อาจจะมีนิวตรอนหลุดออกมาจากนิวเคลียสซึ่งกำลังแยกตัว หรือส่วนซึ่งแยกออกมาแล้วอาจปล่อยนิวตรอนออกมาก็ได้ อย่างไรก็ตามเฟอร์มิมีความรู้สึกว่า นิวเคลียสซึ่งกำลังเกิดพีชชั่นนั่นเองน่าจะให้นิวตรอน เขาจึงเริ่มทำการทดลองเพื่อดูว่าที่เขาคิดนี้ถูกต้องหรือไม่

แม้ในการทดลองขั้นแรก ๆ ก็ต้องใช้ยูเรเนียมเป็นจำนวนมาก ครั้นการวิจัยเริ่มมีท่าทีว่าจะได้ผล และรัฐบาลยิ่งให้การอุดหนุนทางด้านการเงินด้วยแล้วก็ยิ่งต้องการยูเรเนียมเป็นปริมาณมากขึ้นไปอีก ตอนแรก ๆ ได้ธาตุยูเรเนียมจากประเทศแคนาดา

พอมาถึงระยะระหว่างสงคราม จึงได้เพิ่มเติมมาเป็นจำนวนมาก จากเหมืองที่ชินโคโลบี (Shinkolobwe) ในใจกลางเบลเยี่ยม คองโก เหมืองเหล่านี้ถูกพบครั้งแรกในระหว่างสงครามโลกครั้งที่หนึ่ง โดยนักขุดแร่ซึ่งกำลังเสาะหาแร่เงิน ที่เหมืองนี้มีสายแร่พิทช์เบลนด์เป็นจำนวนมาก และเนื่องจากสินแร่ที่นี่มียูเรเนียมปนอยู่มาก คือเป็นยูเรเนียมเสียถึงร้อยละ ๖๐ ดังนั้นยูเรเนียมส่วนใหญ่จึงได้มาจากที่นี่ หลังสงครามโลกครั้งที่หนึ่ง เมื่อแร่เรเดียมมีราคาสูงถึงออนซ์ละสามล้านดอลลาร์ เหมืองนี้ก็กลายเป็นแหล่งของเรเดียม แต่เมื่อฮิตเลอร์เริ่มคุกคามยุโรป เหมืองชินโคโลบีก็ล้มเลิกกิจการไป เพิ่งมาเปิดใหม่เมื่อเป็นที่ประจักษ์ชัดว่า มีความต้องการยูเรเนียมสำหรับผลิตพลังงานปรมาณู

เมื่อเริ่มการวิจัยนั้น เฟอร์มีมียูเรเนียมซึ่งไม่ค่อยบริสุทธิ์นักอยู่สองสามร้อยปอนด์ จุดมุ่งหมายใหญ่ของเขาก็เพื่อจะดูว่าเมื่อนิวเคลียสของยูเรเนียมแยกออกนั้น เกิดนิวตรอนขึ้นหรือไม่ ถ้าเกิดเกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่าใด การเอาพลังงานปรมาณูมาใช้จะเป็นไปได้หรือไม่ ขึ้นอยู่กับการทดลองซึ่งเฟอร์มีและผู้ร่วมงานทำกันอยู่ที่บริเวณมหาวิทยาลัยโคลัมเบีย ห่างจากแมนฮัตตันไม่กี่ไมล์ผู้คนเป็นจำนวนล้านในใจกลางของมหานครนิวยอร์ก ไม่ได้ตระหนักถึงงานที่คนสองสามคนกำลังทำกันอยู่อย่างเงียบ ๆ ในห้องทดลองของมหาวิทยาลัยแห่งนี้เลย ไม่นานนัก นักวิทยาศาสตร์เหล่านั้นก็

ได้พิสูจน์สิ่งที่เฟอร์มิเคยคิดว่าน่าเป็นไปได้ คือเมื่อใช้นิวตรอนยิงยูเรเนียม มีนิวตรอนออกมา งานขั้นต่อไปก็คือหาว่าเมื่อนิวเคลียส ๆ หนึ่งแตกออกนั้นมีนิวตรอนหลุดออกมากี่ตัว



รูปที่ ๒๔ แสดงการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของยูเรเนียม นิวตรอนตัวที่เข้ามาทางขวามือกระแทกกับนิวเคลียสของยูเรเนียม ทำให้นิวเคลียสแยกออกเป็นสองเสี่ยง และเกิดนิวตรอนขึ้นสองตัว นิวตรอนสองตัวนี้กระแทกกับนิวเคลียสของยูเรเนียมอีกสองนิวเคลียส ทำให้เกิดนิวตรอนขึ้นอีกห้าตัว โดยวิธีนี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

อนาคตของพลังงานปรมาณูขึ้นอยู่กับจำนวนนิวตรอนนี่เอง จำนวนนี้นับว่ามีความสำคัญมากเพราะถ้าค่าเฉลี่ยน้อยเกินไป เช่น ถ้าน้อยกว่าสอง ก็จะไม่สามารถทำให้ยูเรเนียมเกิดปฏิกิริยาต่อ ๆ กันไปเป็นลูกโซ่ได้ ถ้าโดยเฉลี่ยแล้วแต่ละ ฟิชชั่นให้นิวตรอนน้อยกว่าสองตัว ก็จะเป็นการยากในการป้องกันไม่ให้นิวตรอนหายไปก่อนที่จะได้มีการกระทบกับนิวเคลียสของยูเรเนียม อันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสืบเนื่องต่อ ๆ ไปเองได้ การที่จะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ได้นั้น อย่างน้อยนิวตรอนหนึ่งตัวซึ่งได้จากฟิชชั่นหนึ่ง จะต้องทำให้นิวเคลียสของยูเรเนียมอีกนิวเคลียสหนึ่ง เกิดฟิชชั่น

นอกจากนี้เฟอร์มียังรู้ว่าสารอื่นซึ่งปนอยู่กับยูเรเนียม เช่น ธาตุโบรอน ซึ่งมีน้ำหนักเบา จะจับนิวตรอน แย่งนิวตรอนไปเสียบ้าง และยูเรเนียม ๒๓๘ ซึ่งมีจำนวนมากกว่าถึง ๑๔๐ เท่านั้น เมื่อจับนิวตรอนแล้วจะไม่เกิดฟิชชั่นและที่ร้ายยิ่งไปกว่านั้น ก็คือ นิวตรอนอาจจะหลบหลีกผ่านยูเรเนียมสูญหายไปเสียเลย ด้วยเหตุนี้เองการที่จะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ขึ้นได้ จะต้องมีนิวตรอนเกิดขึ้นประมาณ ๒ ตัว จากแต่ละนิวเคลียสของยูเรเนียม ที่เกิดฟิชชั่น จากการวัดตอนแรก ๆ พบว่า แต่ละฟิชชั่นให้นิวตรอนประมาณ ๒.๓ นิวตรอน ตอนหลัง ๆ เมื่อได้ปรับปรุงวิธีการแล้ววัดได้ประมาณ ๒.๕ นิวตรอน เนื่องจากนิวตรอนนั้นแบ่งครึ่งไม่ได้ ตัวเลข ๒.๕ จึงหมายความว่าเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งได้จากการที่บางครั้งฟิชชั่นก็ให้ ๒ นิวตรอน และบางครั้งให้ ๓ นิวตรอน อย่างไรก็ดีดูเหมือนจะมีนิวตรอนเหลือพอ ที่จะให้เสียไปเพราะถูกนิวเคลียสอื่นจับ หรือสูญหายไปบ้าง

ความจริงเฟอร์มี ยังอยู่ห่างไกลจากการทำให้ยูเรเนียมเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ได้สำเร็จนัก แน่ละยังมีความหวังอยู่บ้าง แต่ก็ยังไม่มีใครรู้ว่าจะต้องใช้ยูเรเนียมบริสุทธิ์เป็นจำนวนสักเท่าใด หรือว่ายูเรเนียมซึ่งบริสุทธิ์ถึงขนาดที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ได้นั้น จะผลิตขึ้นได้หรือไม่ อย่างไรก็ตามเป็นที่ประจักษ์ชัดแก่เฟอร์มีว่าจะใช้ยูเรเนียมซึ่งเป็นแท่งตันไม่ได้เพราะยูเรเนียม ๒๓๘ ซึ่งมีอยู่

มากมายนั้นจะจับนิวตรอน โดยไม่ทำให้เกิดฟิชชั่นมากเกินไป จะต้องหาทางไม่ให้นิวตรอนต้องประสบชะตากรรมอันไม่พึงประสงค์นั้น และเฟอร์มิก็เกิดความคิดว่าน่าจะใช้ธาตุเบา ๆ ใส่เข้าไปในกองยูเรเนียม เพื่อทำให้นิวตรอนลดความเร็วลง เขาให้เหตุผลว่าถ้านิวตรอนกระดอนไปมาโดยให้กระทบกระแทกกับธาตุเบา ๆ เช่น คาร์บอน นิวตรอนจะมีโอกาสหนีจากการถูกจับโดยยูเรเนียม ๒๓๘ และด้วยเหตุที่เคลื่อนที่ช้าลง โอกาสที่จะทำให้นิวเคลียสของยูเรเนียม ๒๓๕ แยกสลายก็มีมากขึ้น

เขาคิดว่าจะใช้คาร์บอนหรือแกรไฟท์เป็นจำนวนมาก และจัดให้มีแท่งยูเรเนียมอยู่ในกองคาร์บอนนี้ กระจายอยู่ทั่ว ๆ ไป นิวตรอนซึ่งเกิดจากฟิชชั่นของยูเรเนียม จะออกมากระทบอะตอมของคาร์บอนถ้าคาร์บอนบริสุทธิ์พอมันจะกระดอนไปมาโดยไม่ถูกจับ ในการที่นิวตรอนปะทะกับธาตุเบา ๆ หรือที่เรียกว่ามอเดอเรเตอร์นี้มันจะเสียพลังงาน จึงทำให้เกิดฟิชชั่นกับยูเรเนียม ๒๓๕ ได้ดีขึ้น และโอกาสที่ถูกจับโดยยูเรเนียม ๒๓๘ ก็มีน้อยลงดังได้กล่าวมาแล้ว ครั้นแล้วเมื่อมีความเร็วน้อยนิวตรอนจะแทรกซึมกลับเข้าไปในยูเรเนียม หลังจากที่ใช้เวลาส่วนมากอยู่ในคาร์บอนก็จะทำให้ยูเรเนียม ๒๓๕ เกิดฟิชชั่นโดยไม่ยากนัก และทำให้เกิดนิวตรอนมากขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อ ๆ ไป

จะต้องใช้ยูเรเนียมสักเท่าใด คาร์บอนสักเท่าใด ทั้งสองอย่างนี้จะต้องบริสุทธิ์ขนาดไหนไม่มีใครตอบได้ แต่เฟอร์มิเป็นทั้งนักปฏิบัติและนักทฤษฎี วันนี้เขาจะอยู่ในห้องทดลองเพื่อวัดว่าคาร์บอนดูดกลืนนิวตรอนได้แค่ไหน วันถัดไปเขาจะคำนวณดูว่าต้องใช้ยูเรเนียมกี่แท่งสำหรับแกรไฟท์จำนวนเท่านั้นเท่านี้ การคำนวณหาว่าแท่งยูเรเนียมขนาดไหนจึงจะดีที่สุด และจะจัดวางในท่ามกลางแกรไฟท์อย่างไรนั้นเป็นเรื่องยุ่งยากมาก เพราะต้องคำนึงถึงส่วนประกอบต่าง ๆ หลายอย่างด้วยกัน

เมื่อนักวิทยาศาสตร์เหล่านั้นทดลองไปคำนวณไป ก็เป็นที่ประจักษ์ชัดว่ามีภาระหนักอยู่สามประการ ในการที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่สำเร็จขึ้นมาได้

ประการแรกคือ จำเป็นต้องใช้ยูเรเนียมหลายตันที่เดียว ปัญหานี้ไม่ได้อยู่ที่การผลิตอย่างเดียวเท่านั้น แต่เป็นเรื่องที่นักเคมีและวิศวกรต้องหาวิธีทำให้ได้ยูเรเนียมบริสุทธิ์อย่างที่ไม่เคยทำกันมาก่อนเลย แม้ธาตุอื่น ๆ ก็ไม่เคยทำให้บริสุทธิ์ถึงขนาดนั้น จะต้องหาทางกำจัดไม่ให้มีโบรอนปนอยู่ แม้แต่เพียงนิดเดียว ถึงขนาดที่ป้องกันไม่ให้คนงานซึ่งจะจับต้องยูเรเนียมใช้สบู่ ซึ่งมีส่วนผสมของโบรอนอยู่ เพราะอาจทำให้ยูเรเนียมหรือแกรไฟท์มีตำหนิได้

ประการที่สองคือ ต้องผลิตแกรไฟท์ซึ่งบริสุทธิ์อย่างเยี่ยมยอดเป็นร้อย ๆ ตันก้อนที่เดียว แกรไฟท์ซึ่งมีคุณภาพที่ต้องการนั้น

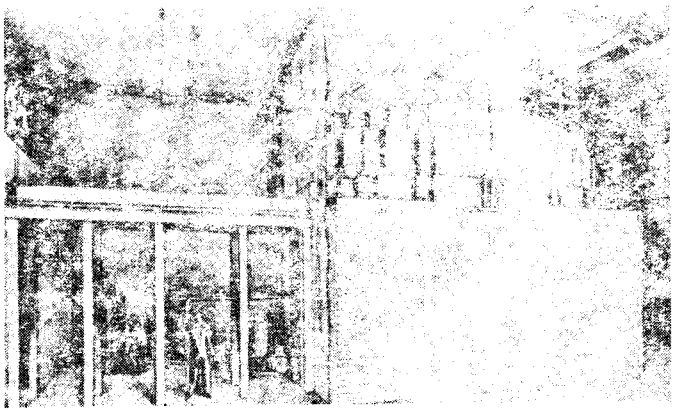
หาไม่ได้ในตลาด การหาวิธีที่จะทำให้แกรไฟท์บริสุทธิ์ไม่มีส่วนผสมที่อาจเป็นอันตรายจึงนับเป็นงานใหญ่โตพอดู

ประการที่สามคือ ต้องมีการคำนวณอย่างสลับซับซ้อน ต้องตั้งทฤษฎีใหม่อันจะทำนายว่า จะเกิดอะไรขึ้นกับนิวตรอนที่อยู่ภายในแกรไฟท์กับยูเรเนียม ซึ่งจัดวางในท่าต่าง ๆ จะต้องมีวิธีการทางคณิตศาสตร์แบบใหม่สำหรับปัญหานี้ และถึงแม้จะทำกันถึงขนาดนี้แล้ว ค่าที่ได้ก็เป็นแต่เพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น

แม้จะสามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ไปได้แล้ว ก็ยังมีปัญหายากยิ่งเกี่ยวกับการควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไปอีก เป็นที่ตกลงกันว่า ควรใช้ธาตุที่สามารถดูดกลืนนิวตรอนได้ดีสำหรับควบคุม ปรากฏว่า แคดเมียม เป็นธาตุหนึ่งซึ่งชอบนิวตรอนมาก จึงใช้โลหะนี้ทำเป็นแท่งยาว ๆ ใส่ไว้ในโครงสร้าง ซึ่งประกอบด้วยยูเรเนียมและแกรไฟท์ คือคิดกันว่าเมื่อใส่เข้าไปทั้งแท่งก็จะดูดกลืนนิวตรอนได้มาก และเมื่อดึงออกมาก็จะเป็นการปล่อยนิวตรอนไว้ให้เกิดปฏิกิริยาต่อ ๆ ไป มีการคำนวณกันว่าจะต้องใช้แคดเมียมสักเท่าใด จึงจะหยุดปฏิกิริยาได้โดยสิ้นเชิง เพื่อว่าปฏิกิริยาลูกโซ่จะไม่มีโอกาสเกิดขึ้นมากมายจนเอาไว้ไม่อยู่ และเพื่อที่จะให้เป็นการปลอดภัยยิ่งขึ้น ยังจัดให้มีแท่งแคดเมียมสำหรับควบคุมเผื่อไว้อีกหลายอัน เพื่อจะได้ใส่เข้าไปหากจำนวนที่คำนวณไว้ไม่เพียงพอ

จำนวนผู้ร่วมงานกับเฟอร์มิซึ่งเป็นกลุ่มเล็ก ๆ ตอนที่เริ่มงานในปี ๑๙๓๙ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และในปลายปี ๑๙๔๒ นักวิทยาศาสตร์อีกกลุ่มใหญ่มาสมทบกับนักวิทยาศาสตร์พวกเดิม มีการย้ายที่ทำงานไปยังบริเวณของมหาวิทยาลัยชิคาโก ซึ่งอยู่ห่างทะเลสาบมิชิแกนไม่ถึงไมล์ทางใต้ของเมืองชิคาโก

เฟอร์มิและเพื่อนร่วมงานประมาณ ๔๐ คน มาถึงจุดวิกฤตในประวัติศาสตร์ ตอนบ่าย วันที่ ๒ ธันวาคม ๑๙๔๒ ทั้งหมดจับกลุ่มกันอยู่ที่สนามสควอชร้าง ติดกับสนามฟุตบอลซึ่งไม่ใช้ของมหาวิทยาลัย เบื้องหน้าคนเหล่านั้นคือสิ่งก่อสร้างมหึมาสีดำเมื่อม ทำด้วยแกรไฟท์ข้างในมียูเรเนียมบรรจุอยู่ถึงเจ็ดตัน ในรูปแสดงให้เห็นแกรไฟท์ชั้นที่สิบเก้า สลับด้วยยูเรเนียม



รูปที่ ๒๕ รูปปฏิกรณ์ที่สแตกก์ฟิลด์ มหาวิทยาลัยชิคาโก ปฏิกิริยาลูกโซ่คงที่เกิดขึ้นเป็นครั้งแรกที่นี่ เมื่อวันที่ ๒ ธันวาคม ๑๙๔๒ ที่หน้าปฏิกรณ์จะเห็นเครื่องนับนิวตรอนแขวนอยู่สามเครื่อง และทางด้านซ้ายมือจะเห็นนักวิทยาศาสตร์คนหนึ่งกำลังดึงแท่งควบคุมออกจากปฏิกรณ์

กองแกร ไฟท์ซึ่ง ได้รับฉายาจากนักวิ ทยาศาสตร์คนหนึ่ง ว่า *"อสูรเงียบ"* ยังคงเงียบสงบไม่มีปฏิกิริยาลูกโซ่ภายในแม้แต่น้อย เพราะเฟอร์มิระมัดระวังอย่างเต็มที่ โดยใส่แท่งแคดเมียมซึ่งเป็นตัวควบคุมทุกแท่งเข้าไปจนสุด เมื่อเขาให้สัญญาณจึงค่อยชักแท่งหนึ่งออกมาช้า ๆ มีเครื่องนับหรือเคาน์เตอร์สามเครื่อง (แขวนอยู่ข้างกองแกรไฟท์ดังในรูป) ทำหน้าที่นับนิวตรอนซึ่งเกิดขึ้น ส่วนนิวตรอนที่จะเป็นตัวทำให้เริ่มต้นเกิดปฏิกิริยานั้น ได้จากรังสีคอสมิก ซึ่งเข้ามายังโลกเราอยู่ตลอดเวลา หรืออาจจะมาจากการที่ยูเรเนียมเกิดฟิชชั่นขึ้นเองโดยบังเอิญก็ได้

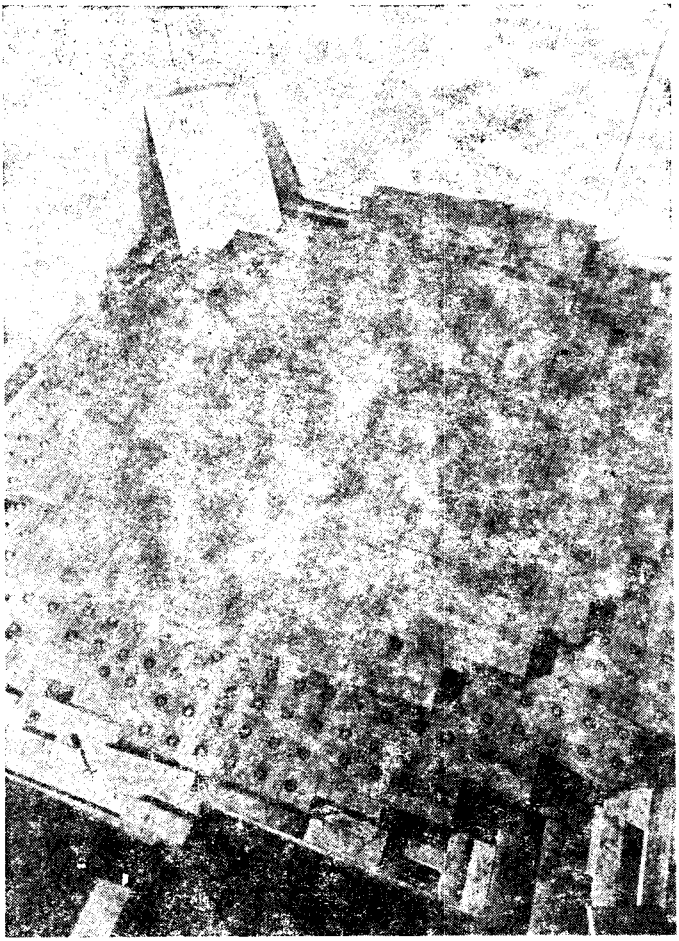
เมื่อมีนิวตรอนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เคาน์เตอร์ก็เริ่มมีเสียงดังขึ้นเป็นระยะ ๆ ตอนแรกเป็นไปอย่างช้า ๆ ครั้นแท่งแคดเมียมถูกดึงออกมาอีก ๖ นิ้ว แล้วอีก ๑ ฟุต เคาน์เตอร์ก็ส่งเสียงมากขึ้นจนกระทั่งเป็นเสียงสม่ำเสมอ เพราะนิวตรอนซึ่งหลุดพ้นจากการดูดกลืนของแคดเมียมออกมาได้เร็วขึ้น

เฟอร์มิยืนอยู่ข้างเครื่องนับนิวตรอน อย่างไม่สะทกสะท้าน จดค่าที่อ่านได้ และคำนวณอย่างรวดเร็วโดยใช้สไลด์รูล พอคำนวณไปแล้วครั้งหนึ่ง เขาก็จะร้องบอกให้จัดแท่งแคดเมียมสำหรับควบคุมใหม่ครั้งหนึ่ง แล้วก็คำนวณใหม่และจัดใหม่อีก บรรยากาศในห้องเริ่มตึงเครียดขึ้น การทดลองจะเป็นผลสำเร็จหรือล้ม

เหลวกันแน่ คำตอบอยู่ที่ตัวเลขที่อ่านจากเคาน์เตอร์ และที่ผลการคำนวณของเฟอร์มินั่นเอง

เวลาผ่านไปนาทีแล้วนาทีเล่า แท่งแคดเมียมตัวควบคุมถูกขยับแล้วขยับอีก ตัวเลขที่อ่านจากเคาน์เตอร์ถูกนำไปคำนวณหลายต่อหลายครั้ง แต่ละครั้งเคาน์เตอร์จะดังรัวยิ่งขึ้น ในที่สุดเฟอร์มิก็เงยหน้าขึ้นจากสไลด์รูล รอยยิ้มปรากฏบนใบหน้าอันเข้มของเขา เขาประกาศอย่างสงบเงียบว่า *"ปฏิกิริยาลูกโซ่คงตัวแล้ว"* และด้วยวาจานั้นมนุษยชาติก็ย่างเข้าสู่ยุคปรมาณู

ความสำเร็จของเฟอร์มิที่ชิคาโกนับว่า เป็นสิ่งที่ช่วยบุกเบิกแนวทางให้แก่การสร้างปฏิกรณ์นิวเคลียร์ใหญ่ ๆ และปฏิกรณ์เหล่านี้ได้กลายเป็นแบบสำหรับโรงงานผลิตแรงงานนิวเคลียร์ และเครื่องจักรกลซึ่งใช้พลังงานปรมาณู ที่สร้างกันขึ้นภายหลังสงครามโลกครั้งที่สอง ปฏิกิริยาลูกโซ่คงตัวที่ทำได้สำเร็จเป็นครั้งแรกนี้ชี้ให้เห็นว่า เราได้เครื่องมือเครื่องใช้ซึ่งมีกำลังมากกว่าที่เคยมีมา โดยการใช้พลังงานจากยูเรเนียม พลังงานของส่วนที่แยกออกของยูเรเนียมจากเครื่องมือเหล่านี้ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน คือใช้คูลแลนท์ผ่านเข้าไปยังใจกลางของปฏิกรณ์ เพื่อรับเอาพลังงานความร้อนออกมา คูลแลนท์นี้อาจเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ เช่น ใช้น้ำหรือโลหะหลอมเหลว เช่น โซเดียมเหลว เมื่อความร้อนถูกเอาออกมาจากปฏิกรณ์แล้วก็ถูกส่งผ่านไปยังจักรกลความร้อน เพื่อ



รูปที่ ๒๖ ภาพถ่ายปฏิกรณ์เครื่องแรกขณะกำลังก่อสร้าง ภาพนี้ถ่ายเมื่อเดือนพฤศจิกายน ๑๙๔๒ ตอนที่กำลังวางแกรไฟท์ชั้นที่สิบเก้า เมื่อปฏิกรณ์อยู่ในสภาพวิกฤต จะต้องมีแกรไฟท์ถึงสามสิบเจ็ดชั้นด้วยกัน (Courtesy Argonne National Laboratory)

เปลี่ยนน้ำให้เป็นไอ และใช้หมุนเทอร์บีน พูดอีกอย่างหนึ่งก็คือว่าใจกลางของปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทำหน้าที่แทนเตาของโรงงานไฟฟ้าแบบธรรมดา ซึ่งใช้ไอน้ำที่ได้จากถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในที่นี้เราใช้ยูเรเนียมแทนถ่านหิน

ยูเรเนียมหนึ่งปอนด์สามารถให้ความร้อนเท่ากับถ่านหิน ๒,๓๐๐,๐๐๐ ปอนด์ อย่างไรก็ตามจะต้องมียูเรเนียมในปฏิกรณ์นิวเคลียร์มากพอที่จะทำให้ปฏิกรณ์อยู่ในสภาพวิกฤต คือถึงจุดซึ่งเกิดนิวตรอนขึ้นมากกว่าที่เสียไป ในกรณีของปฏิกรณ์แรกที่ชิคาโกนั้นต้องใช้ยูเรเนียมประมาณเจ็ดตันจึงจะถึงสภาพวิกฤต ยูเรเนียมที่ว่านี้เป็นยูเรเนียมชนิดธรรมดาซึ่งมี U^{238} อยู่ ๙๙.๓ เปอร์เซ็นต์ และ U^{235} ๐.๗ เปอร์เซ็นต์ ในปฏิกรณ์นั้นจึงมี U^{235} อยู่ประมาณหนึ่งร้อยปอนด์ แต่เนื่องจากแกรไฟท์และยูเรเนียมที่ใช้นั้นไม่บริสุทธิ์เท่าแกรไฟท์และยูเรเนียมที่เราผลิตได้ในปัจจุบัน ดังนั้นจึงอาจถือได้ว่าถ้าเราสามารถทำยูเรเนียมบริสุทธิ์ได้ ปริมาณยูเรเนียมที่จะทำให้ปฏิกรณ์อยู่ในสภาพวิกฤตจะน้อยกว่าร้อยปอนด์มากทีเดียว

เราได้ U^{235} บริสุทธิ์มาอย่างไร คำตอบซึ่งค่อนข้างตื้น ๆ และตรงไปตรงมาก็คือ แยกมันออกมาจาก U^{238} ซึ่งมีอยู่ตามธรรมชาติเป็นจำนวนมากกว่า คำตอบแบบนี้พูดง่ายแต่ทำยากแสนเข็ญ เพราะไอโซโทปของยูเรเนียมทั้งชนิดเบาและหนักนี้ผสมกัน

อยู่อย่างกลมกลืนมาก และทั้งสองก็มีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนกัน วิธีที่จะใช้แยกออกจากกัน จึงควรจะเป็นวิธีทางฟิสิกส์มากกว่าทางเคมี ก่อนหน้านี้เราได้เห็นแล้วว่า เราสามารถแยกไอโซโทปทั้งสองออกจากกันได้โดยใช้แมส สเปคโตกราฟ นี่ก็นับว่าเป็นวิธีหนึ่งได้ อย่างไรก็ตามยูเรเนียมที่เป็นก๊าซก็มี คืออยู่ในรูปของสารประกอบชื่อ ยูเรเนียม เฮกซฟลูออไรด์ หรือ UF_6 ดังนั้น วิธีซึ่งปรากฏว่าได้ผลดีกว่า จึงเป็นวิธีที่อาศัยกระบวนการที่เรียกว่าการแผ่กระจายของก๊าซ หลักการที่ใช้นั้นทำนองเดียวกับการใช้ตะแกรงร่อนแยกก้อนกรวดเล็กและโตออกจากกัน เราเอาหลักการนี้มาใช้กับโมเลกุลของยูเรเนียม โดยอาศัยทฤษฎีที่ว่าโมเลกุลของไอโซโทปชนิดเบา จะเคลื่อนที่เร็วกว่าโมเลกุลของไอโซโทปชนิดหนักเล็กน้อย นักวิทยาศาสตร์เกิดความคิดว่าถ้าให้ยูเรเนียมผ่านเครื่องกรองซึ่งมีรูพรุนเล็ก ๆ โมเลกุลของ U^{235} ซึ่งเคลื่อนที่เร็วกว่าจะผ่านเครื่องกรองได้ดีกว่าโมเลกุล ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของ U^{238} แน่ละช่องของเครื่องกรองจะต้องมีขนาดเล็กอย่างเหลือเกิน มิฉะนั้นก๊าซก็จะผ่านไปได้หมด ไม่ใช่ผ่านได้แต่โมเลกุลของ U^{235} ซึ่งเบากว่าและเร็วกว่า

ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สองนั้น ได้มีการทุ่มเทความพยายามอย่างมากเพื่อออกแบบและสร้างโรงงานกรองก๊าซ ที่โอ๊ค-ริดจ์ รัฐเทนเนสซี ภาพประกอบนี้อาจจะพอทำให้นึกเห็นได้ว่า

เป็นงานที่ใหญ่โตขนาดไหน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรู้ว่าโรงงานนี้ต้องใช้เงินในการสร้างถึง ๕๕๐ ล้านดอลลาร์ โรงงานแยกยูเรเนียมนี้ประกอบด้วยท่อเหล็กกล้า ซึ่งเป็นทางให้ยูเรเนียมผ่านเป็นระยะทางยาวถึงสามแสนไมล์ ท่อนี้เมื่อต่อจากโลกจะยาวเลยดวงจันทร์ไปเสียอีก โรงงานอื่น ๆ ซึ่งสร้างขึ้นภายหลังสงครามที่เมืองปาดูคาห์ รัฐเคนทักกี และที่เมืองปอร์ตมัธ รัฐโอไฮโอก็ทำนองเดียวกัน เมื่อก๊าซยูเรเนียมฟุ้งกระจายผ่านตะแกรงหรือจุกซึ่งมีรูพรุนไป มันจะไปรวมกันอีกข้างหนึ่งโดยที่มีส่วนผสมเป็น U^{235} เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เรียกว่ามีเปอร์เซ็นต์ของ U^{235} สูงขึ้น โดยหมุนเวียนก๊าซที่มี U^{235} เพิ่มขึ้นเล็กน้อยผ่านเครื่องกรองหลาย ๆ พันชั้น องค์ประกอบที่เป็น U^{235} ก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ก๊าซซึ่งเป็น U^{235} ประมาณ ๙๕ เปอร์เซ็นต์ อีก ๕ เปอร์เซ็นต์เป็น U^{238}

การที่จะแยกเอา U^{235} ให้ได้ตามต้องการนั้นต้องใช้ยูเรเนียมตามธรรมชาติเป็นจำนวนมาก เมื่อคิดรวมทั้งที่สูญเสียไปในการทำด้วยแล้ว พอจะประมาณได้ว่าในการทำยูเรเนียมชนิดที่มี U^{235} อยู่ถึง ๙๕ เปอร์เซ็นต์เป็นจำนวน ๑๐ ปอนด์ ต้องใช้ยูเรเนียมตามธรรมชาติราว ๆ ๑ ตัน แม้จะเป็นโรงงานที่ทันสมัยที่สุด ค่าใช้จ่ายในการผลิตจะอยู่ระหว่าง ๗,๐๐๐ ถึง ๘,๐๐๐ ดอลลาร์ต่อปอนด์ โรงงานเหล่านี้จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า

อย่างมากมาย ปัจจุบันนี้พลังงานไฟฟ้าของประเทศสหรัฐฯ กว่า ๑๐ เปอร์เซ็นต์ ถูกใช้ไปทางนี้ และแต่ละปีโรงงานผลิตยูเรเนียมใช้แร่ยูเรเนียมตามธรรมชาติคิดเป็นมูลค่าถึง ๕๐๐ ล้านดอลลาร์

การที่ต้องใช้ยูเรเนียมเป็นจำนวนมหึมาเช่นนี้ ทำให้เกิดความกระตือรือร้นที่จะเสาะหาแหล่งแร่ยูเรเนียมใหม่ ๆ กัน ความจริงก็ไม่มีใครคาดว่า จะได้พบเหมืองแบบเหมืองชินโคโลบีอีก แต่ก็หวังกันว่าอาจจะได้พบแหล่งแร่ซึ่งมีคุณภาพไม่ค่อยดีนักบ้าง

การค้นคว้าอย่างกว้างขวางในสหรัฐอเมริกา ทำให้ได้พบแหล่งแร่ยูเรเนียมอันใหญ่โตที่รัฐนิวเม็กซิโก บริเวณทะเลสาบแอมโบรเซีย แร่นี้อยู่ลึกลงไปจากพื้นในระยะสามร้อยถึงพันฟุต มีเนื้อยูเรเนียมอยู่ในแร่ราว ๆ ๐.๑ ถึง ๐.๕ เปอร์เซ็นต์ คำนวณกันว่าที่นิวเม็กซิโกนี้มีปริมาณแร่ถึงสามสิบล้านตัน แหล่งยูเรเนียมอื่น ๆ ที่ โคโลราโด แอริโซนา ไวโอมิง และรัฐทางตะวันตกบางรัฐก็อาจจะมีแร่อยู่เป็นปริมาณพอ ๆ กัน

ประเทศแคนาดา เป็นที่มาของยูเรเนียมมานานแล้ว หลังสงครามโลกครั้งที่สองก็มีการพบแหล่งใหม่ ๆ เพิ่มขึ้น ทั้งยังมีการค้นหาตามแผนการรีบด่วนกันอีกด้วย ผลปรากฏว่าผู้เชี่ยวชาญคำนวณว่าสินแร่ยูเรเนียมในประเทศแคนาดามีปริมาณสูงสุดถึง

สองร้อยห้าสิบล้านตัน ทั้งๆ ที่ทางภาคเหนือของประเทศมีบริเวณซึ่งยังไม่ได้รับการค้นหาอีกมาก

สินแร่ยูเรเนียมซึ่งมีคุณภาพสูงยังคงมาจากแอฟริกา แต่ต้องขุดลึกลงไป ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ปรากฏว่าเศษแร่ที่เหมืองเพชรและทองที่แอฟริกาใต้ ได้กลายเป็นแหล่งยูเรเนียมใหม่ขึ้นมา กากแร่ที่ทิ้งแล้วนั้นกองสูงเป็นภูเขาอยู่นอกโรงงานถลุงทองคำ มียูเรเนียมอยู่เป็นมูลค่ามากกว่าทองคำที่เคยมีอยู่หลายเท่า ถึงแม้ปริมาณยูเรเนียมคิดเป็นร้อยละจะต่ำ แต่ปัจจุบันนี้แหล่งแร่ใหม่เหล่านี้ ก็ให้ยูเรเนียมมากกว่าที่ได้จากเบลเยี่ยม คองโก

เมื่อการเสาะหาแร่แห่งยุคปรมาณูอันมีค่ากระชั้นขึ้น ก็มีการพบยูเรเนียมในที่อื่นๆ ของโลกอีก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในออสเตรเลีย สำหรับประเทศหลังม่านเหล็กนั้น เราไม่ค่อยจะรู้เรื่องราวเกี่ยวกับการทำเหมืองยูเรเนียมมากนัก แต่เนื่องจากอาณาเขตของประเทศโซเวียตรัสเซียกว้างใหญ่ไพศาลมาก จึงพอจะเดาได้ว่ามียูเรเนียมอยู่มากพอทีเดียว ปัจจุบันนี้เป็นที่เห็นพ้องต้องกันว่ายูเรเนียมที่มีอยู่พอที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงได้นานกว่าถ่านหินและน้ำมันถึงยี่สิบห้าเท่า

อย่างไรก็ตามก่อนที่จะมีการค้นพบแหล่งแร่ใหญ่ๆ เหล่านี้ ก่อนที่จะหา U^{235} มาได้เป็นจำนวนมากๆ เช่นนี้ดังนาน นัก

วิทยาศาสตร์กลุ่มเล็ก ๆ ภายใต้การนำของ ดร. เจ. โรเบิต อ๊อปเปน-ไฮเมอร์ (J. Robert Oppenheimer) ได้ลงมือค้นหาวิธีที่จะได้อำนาจการระเบิดจากอะตอมของยูเรเนียม ปัญหายากยิ่งปัญหาหนึ่งซึ่งนักวิทยาศาสตร์ที่ชุมนุมกันอยู่ที่ ลอส อลาโมส ต้องหาทางแก้ก็คือการหาว่าต้องใช้ยูเรเนียมเป็นปริมาณสักเท่าใด จึงจะเป็นลูกระเบิดขึ้นมาได้ ยูเรเนียมซึ่งจะใช้ทำลูกระเบิดนี้ไม่เหมือนกับดินระเบิด ที. เอ็น. ที. ซึ่งจะเอามากองสะสมกันเท่าใดก็ไม่ระเบิด ยูเรเนียมซึ่งจะใช้เป็นลูกระเบิดนั้น ถ้าเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้ว เราจะทำอะไรก็ได้ จะเอาค้อนทุบ เอาไฟเผาหรืออะไรก็ตามใจ จะไม่เกิดอะไรขึ้น แต่ถ้าเมื่อใดเรารวบรวมไว้ในที่แห่งเดียวกันมากเกินไปจะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ และมีการระเบิดขึ้น

ให้เรามาดูกันว่า เกิดอะไรขึ้นเมื่อเราสะสมวัตถุระเบิดนี้ ถ้าเราเริ่มด้วยยูเรเนียมน้อย ๆ ขนาดสักเท่าลูกกอล์ฟ จะไม่มีปฏิกิริยาลูกโซ่ขึ้นมา ทั้งนี้เพราะนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากพีชชั่นนั้นก่อนที่จะไปกระทบอะตอมต่อไป จะเคลื่อนที่เป็นระยะทางพอสมควร คือราวๆ หนึ่งนิ้วดังนั้นถ้าก้อนยูเรเนียมมีขนาดเล็ก นิวตรอนส่วนมากจะหลุดหายไปเสีย ไม่ทำให้เกิดพีชชั่นต่อไป

เราอาจสงสัยว่าเดิมทีเดียวนิวตรอนนั้นมาจากไหนกัน ได้กล่าวไว้แล้วว่า มีที่มาของนิวตรอนจากหลายแห่งด้วยกัน รังสีคอสมิกซึ่งเข้ามาสู่โลกเรานั้นก็ทำให้เกิดนิวตรอนบ้าง และยูเรเนียม

บางอะตอมก็อาจจะเกิดพีชชั่นขึ้นได้เอง อันอาจทำให้เกิดนิวตรอน ซึ่งเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาลูกโซ่ แต่เพื่อที่จะให้กระบวนการนี้เป็นไปโดยรวดเร็ว นักวิทยาศาสตร์ใช้นิวตรอนซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างเรเดียมกับเบอริลเลียม

ถ้าเราทำให้ก้อนยูเรเนียมซึ่งมีขนาดเท่าลูกกอล์ฟ โตขึ้นทีละน้อย ๆ จะเกิดอะไรขึ้น ยิ่งขนาดเพิ่มขึ้น โอกาสของนิวตรอนที่จะหลุดหายไปก็ยิ่งน้อยลง นิวตรอนซึ่งเกิดจากพีชชั่นก็จะถูกกักอยู่ภายในก้อนยูเรเนียมมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดพีชชั่นและเกิดนิวตรอนมากขึ้นไปอีก โดยวิธีนี้จำนวนนิวตรอนจะถูกสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อถึงจุดวิกฤตจุดหนึ่ง จำนวนนิวตรอนซึ่งหลุดไปจากก้อนยูเรเนียมจะน้อยกว่าจำพวกนิวตรอนซึ่งเกิดขึ้นข้างใน ตอนนี้ปริมาณยูเรเนียมซึ่งเรามีอยู่ในสถานะวิกฤตพอดี และถ้าเราเพิ่มปริมาณยูเรเนียมเมื่อใดจะเกิดการระเบิดขึ้นเมื่อนั้น

ที่ห้องทดลองที่ ลอส อลาโมส มีการทดลองเพื่อหาว่ายูเรเนียมปริมาณเท่าใดจึงจะอยู่ในสภาพวิกฤต นักวิทยาศาสตร์พากันตั้งชื่อการทดลองนี้ว่า *"การแหย่หางมังกร"* เพราะเป็นการทดลองที่ค่อนข้างจะมีอันตราย วิธีการซึ่ง ดร. หลุยส์ สล็อตติน ทำไปมีดังนี้ เขาเอายูเรเนียมมาสองชิ้น แต่ละชิ้นมีขนาดน้อยกว่าขนาดวิกฤต รูปร่างเป็นครึ่งทรงกลม ซึ่งเมื่อประกบกันเข้าจะมีขนาดเท่าลูกเบสบอล กลวิธีในการทดลองก็คือ เอาครึ่งทรงกลม

ทั้งสองเข้าหากันช้า ๆ และวัดจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องนับ หรือเคาน์เตอร์ สล็อตตินใช้เครื่องนับแบบมีเสียง เพื่อที่เขาจะได้ยินเมื่อเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ขึ้น นอกจากนี้เขายังแบ่งสัญญาณจากเครื่องนับไปยังเครื่องมือ ซึ่งสามารถบันทึกเป็นเส้นสีแดงบนกระดาษกราฟ เขาสามารถที่จะรู้ได้ว่านิวตรอนเกิดขึ้นช้าเร็วเพียงใด โดยการเหลือบดูเครื่องบันทึกนี้

สล็อตติน เอาชิ้นยูเรเนียมสองชิ้นนี้วางบนรางแนวระดับบนโต๊ะ แล้วผลักทั้งสองส่วนเข้าหากันช้า ๆ พร้อมทั้งสังเกตอัตราการเพิ่มของนิวตรอนอย่างระมัดระวัง ไม่ช้าเขาก็เกิดความชำนาญในการคาดคะเนจุดวิกฤต เขาจะหยุดเลื่อนชิ้นยูเรเนียมโดยที่ทั้งสองส่วนยังอยู่ห่างกัน และโดยการวัดระยะห่างนี้ก็คำนวณได้ว่ามวลสารวิกฤตควรจะมีค่าสักเท่าใด

แม้แต่นักทดลองซึ่งรอบคอบที่สุดก็อาจจะผิดพลาดได้ แต่การผิดพลาดในกรณีนี้อาจมีอันตรายถึงชีวิต อยู่มาวันหนึ่งสล็อต-ตินก็ประสบอุบัติเหตุ ซึ่งนับว่าเป็นคราวเคราะห์ร้ายเหลือเกิน เพราะครั้งนั้นเป็นครั้งสุดท้ายที่เขาจะต้องทำการทดลองนี้ เขากำลังแสดงวิธีทำการทดลองให้เพื่อนนักวิทยาศาสตร์อีกหกคนดู คนทั้งหกยืนอยู่เบื้องหลัง ขณะที่เขากำลังแสดง *"การแหย่หางมังกร"* อันละเอียดอ่อนนั้น จะด้วยเหตุใดก็เหลือเดา ปรากฏว่าเขาลื่นไถล ทำให้ครึ่งทรงกลมทั้งสองเคลื่อนเข้าใกล้กันเกินจุดวิกฤต

นิวตรอนก็ทะลักออกมา เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่อันปราศจากการควบคุม และเครื่องนับก็ส่งเสียงกรีดร้องราวกับโกรธจัด เส้นหมึกสีแดงบนเครื่องบันทึกกวาดออกไปจนเลยสเกล นักวิทยาศาสตร์หนุ่มเคลื่อนที่อย่างฉับพลันโดยไม่ต้องยั้งคิด เขาไม่ได้คิดถึงความปลอดภัยส่วนตัวเลย ทั้ง ๆ ที่รู้ดีว่าสิ่งที่อยู่ในอุ้งมือเขาคือลูกระเบิดปรมาณู เขาทุ่มตัวไปข้างหน้าแล้วใช้มือเปล่า ๆ ดึงสองส่วนออกจากกัน

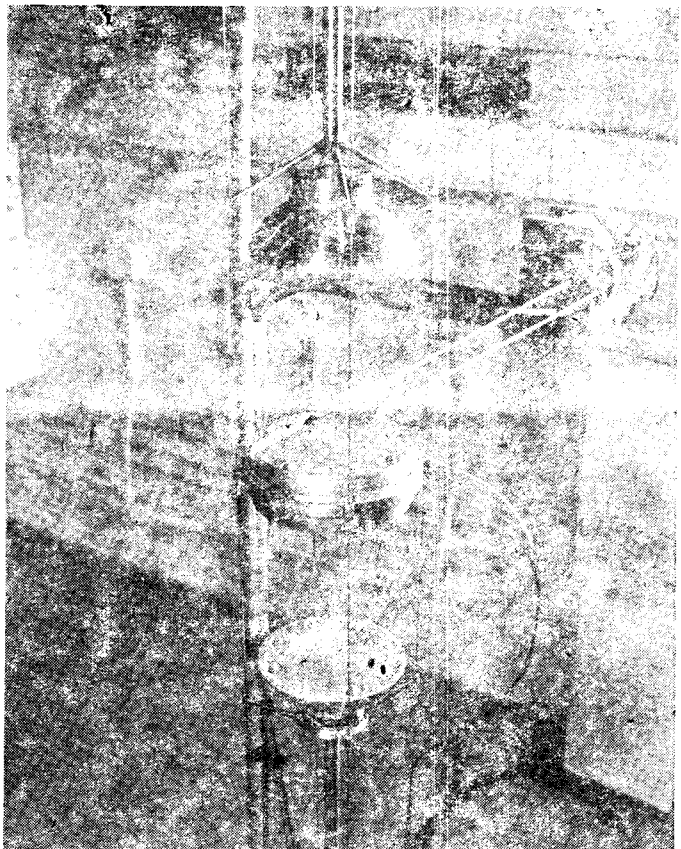
ปฏิกิริยาลูกโซ่หยุดลง แต่ก็สายไปเสียแล้วเพราะถึงจะไม่มีการระเบิดขึ้น แต่กัมมันตภาพรังสีก็กระจายออกมา มีเปลวร้อนวูบออกมาจากครึ่งทรงกลมทั้งสอง สล็อตตินเล่าในภายหลังว่าเขารู้สึกเหมือนได้ชิมน้ำกรดเข้าไป นอกจากนั้นก็ไม่มีอะไรอีก เพียงแต่ตัวเย็นเฉียบด้วยความเสียวสยองเท่านั้น นิวตรอนและรังสีแกมมาเป็นจำนวนมากได้แทรกทะลวงผ่านเข้าไปในร่างกายของเขา การที่เขาปฏิบัติอย่างว่องไวทำให้ปฏิกิริยาหยุดลงได้ และการที่เขาก้มลงคร่อมโต๊ะทำให้ร่างกายตนบังรังสีไว้แทบจะไม่ถูกคนอื่นเลย

เก้าวันต่อมา สล็อตตินก็สิ้นชีวิตอย่างน่าอนาถ เขาตกเป็นเหยื่อของกัมมันตภาพรังสี รังสีที่เขาได้รับนั้นมากเกินพอที่จะทำให้เสียชีวิตได้ ไม่มีใครสามารถช่วยอะไรเขาได้เลย นอกจากจะช่วยให้เจ็บปวดน้อยลงบ้างเท่านั้น คนอื่น ๆ ที่อยู่ในห้องนั้นถูกส่งเข้าโรงพยาบาล แต่หลังจากไม่สบายเพียงเล็กน้อยก็หายเป็นปกติดีหมด บางคนไม่เป็นอะไรเลยเสียด้วยซ้ำไป

การทดลองแบบของสล็อตตินได้ถูกห้ามโดยเด็ดขาด ไม่มีใครในประเทศสหรัฐอเมริกาต้องเสี่ยงอันตรายในการทดลองแบบที่ทำกัน ณ ห้องทดลอง ลอส อลาโมส อีกแล้ว วิธีสมัยใหม่นั้นใช้เครื่องมือควบคุมจากระยะไกล และใช้โทรทัศน์ให้เป็นประโยชน์ การรวมชิ้นยูเรเนียมเข้าด้วยกันจะถูกทำอยู่ภายในสถานที่ซึ่งล้อมรอบด้วยกำแพงคอนกรีต ห่างจากศูนย์ควบคุมถึงเศษหนึ่งส่วนสี่ไมล์

การทำระเบิดปรมาณูจริง ๆ อาศัยหลักการเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องการทดลองของสล็อตติน แต่การสะสมยูเรเนียมจะต้องเป็นไปโดยรวดเร็ว แทนที่จะทำอย่างช้า ๆ มิฉะนั้นแล้วมันจะเพียงแต่เกิดความร้อนขึ้นและขยายตัวจนกระทั่งไม่อยู่ในสภาพวิกฤตอีกต่อไป กลวิธีในการทำระเบิดปรมาณูก็คือ เอาแต่ละส่วนของลูกระเบิดซึ่งมียูเรเนียมน้อยกว่าค่าวิกฤต มารวมกันอย่างรวดเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ และให้อยู่ด้วยกันนานพอที่จะทำให้เกิดนิวตรอนจากฟิชชั่นขึ้นเป็นจำนวนมากพอ

การรวมส่วนของลูกระเบิดเข้าด้วยกันอย่างรวดเร็วเช่นนั้นมีอยู่สองวิธีด้วยกัน วิธีหนึ่งคือเอาส่วนของลูกระเบิดไว้ที่ปลายลำกล้องปืนซึ่งปิดสนิทข้างละชั้น เครื่องมือนี้เรียกว่าปืน ที่ปลายข้างที่เป็นเป้ามียูเรเนียมขนาดน้อยกว่าขนาดวิกฤตฝังอยู่ในแท่งโลหะแท่งโต ในลำกล้องปืนมีกระสุนยูเรเนียมซึ่งมีดินปืนติดอยู่ข้าง



รูปที่ ๒๗ เครื่องมือนี้มีชื่อว่า เจซีเบล เป็นเครื่องมือสำหรับรวมยูเรเนียมให้เกิดสภาพวิกฤต ใช้วิธีควบคุมจากระยะไกล อยู่ที่ ลอสอลาโมส นิวเม็กซิโก ในรูปจะเห็นทรงกลมขนาดซอฟท์บอล ซึ่งแยกออกเป็นสามส่วน สามส่วนนี้จะถูกรวมเข้าด้วยกัน และสภาพวิกฤตจะถูกควบคุมโดยการเลื่อนแผ่นแบน ๆ ตรงใจกลางเข้าออก (Courtesy the University of California Lawrence Radiation Laboratory, Berkely.)

ท้าย การจุดระเบิดดินปืนทำได้โดยอาศัยพิวส์ เมื่อดินปืนระเบิด กระสุนก็วิ่งเข้าชนเป้า

เมื่อกระสุนพุ่งเข้าไปในเป้า จะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ขึ้น ภายในเวลาเศษหนึ่งส่วนล้านวินาที ปฏิกิริยาก็เกิดขึ้นหมด และโลหะซึ่งเดิมเคยเย็นดูเป็นมันเลื่อม จะกลายเป็นกลุ่มก๊าซซึ่งร้อนจัดแผ่กระจาย และระเบิด มีอุณหภูมิหลายล้านองศา นักวิทยาศาสตร์ซึ่งชุมนุมกันเพื่อสังเกตการทดลองระเบิดปรมาณูลูกแรกที่ อลาโมกอร์โด เมื่อเช้าตรู่วันที่ ๑๖ กรกฎาคม ๑๙๔๕ ได้เห็นเหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้น เมื่อฮิโรชิมา และนางาซากิ ถูกระเบิดปรมาณู ก็ปรากฏผลทำนองเดียวกัน

ลูกระเบิดซึ่งทิ้งที่ฮิโรชิมานั้นเป็นแบบ *"ปืน"* แต่ระเบิดที่ทดลองที่อลาโมกอร์โด และทิ้งที่นางาซากินั้นเป็นแบบที่แตกต่างออกไป ซึ่งจัดว่าเป็นแบบที่รัดกุมกว่า แบบนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ได้อย่างสมบูรณ์กว่า ยูเรเนียมซึ่งมีอยู่ในลูกระเบิดถูกใช้ไปมากกว่า นัยหนึ่งคือเป็นลูกระเบิดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า การทำงานของลูกระเบิดอาศัยหลักการใหม่ ที่เรียกว่าการระเบิดเข้าใน (implosion)

ลูกระเบิดแบบระเบิดเข้าในนี้ ที่ตรงกลางมีสิ่งซึ่งเรียกว่า *"นุค"* อันประกอบด้วยทรงกลมกลวงทำด้วย U^{235} หรือพลูโต-

เนียม (ซึ่งต่อไปจะได้เห็นว่าเกิดพีชชั่นได้ง่ายเท่ากับ U^{235}) ข้างในทรงกลมกลวงซึ่งมีขนาดเท่าลูกเบสบอลนี้ มีวัตถุรูปร่างเหมือนลูกปิงปอง ประกอบด้วยโปโลเนียมและเบอริลเลียมทำหน้าที่เป็นแหล่งของนิวตรอน มีโลหะฉาบเบอริลเลียมไว้เพื่อกันไม่ให้รังสีแอลฟาจากโปโลเนียมมากระทบรอบ "*นุค*" มีโลหะหนาหุ้มอยู่ และรอบโลหะนี้มีดินระเบิดแรงสูงอีกชั้นหนึ่ง ดินระเบิดทำเป็นรูปร่างเหมือนปริซึมเป็นจำนวนมาก ประกอบกันขึ้นเป็นเครื่องห่อหุ้มรอบ "*นุค*" และชั้นโลหะซึ่งหุ้มนุคไว้ ปริซึมแต่ละอันต่อกับเครื่องจุดชนวนซึ่งจะทำให้ระเบิดเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า วงจรไฟฟ้าซึ่งพันอยู่รอบ ๆ ทรงกลมอันเทอะทะนี้จัดทำเป็นพิเศษ เพื่อให้มีกระแสไฟฟ้ากระตุ้นปริซึมทุกอันพร้อม ๆ กัน

เมื่อจุดชนวนดินระเบิด ที. เอน. ที. ซึ่งอยู่ข้างนอกจะเกิดการระเบิดอย่างแรง เพราะมีดินระเบิดอยู่หลายพันปอนด์ นอกจากระเบิดออกข้างนอกแล้ว ยังมีแรงระเบิดเข้าข้างในด้วยแรงระเบิดเข้านี้ทำให้ "*นุค*" ยุบเข้าไป เกิดการรวมกันจนอยู่ในสถานะเกินวิกฤตและเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ขึ้น การรวมแบบนี้ปรากฏว่าได้ผลดีกว่าแบบอื่น และยูเรเนียมหรือพลูโตเนียมหมดไปมากกว่า

ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นเรื่องของอาวุธสมัย ค.ศ. ๑๙๔๕ กำลังระเบิดเทียบเท่ากับดินระเบิด ที. เอน. ที ประมาณ ๒๐,๐๐๐

ตัน รุนแรงพอที่จะทำลายนครใหญ่ ๆ เช่น ฮิโรชิมาได้ แต่ก็ยังนับว่าเป็นอาวุธที่ล้าสมัยเมื่อเทียบกับอาวุธในปัจจุบัน ซึ่งเป็นระเบิดที่มีอานุภาพสูงกว่าถึงพันเท่า คืออาวุธที่หนังสือพิมพ์มักจะเรียกกันว่า ระเบิดไฮโดรเจน

อะตอมภายใต้การควบคุม

ความจริงนั้นการควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ ทำกันได้สำเร็จก่อนลูกระเบิดปรมาณู นี่เป็นเรื่องจำเป็น เพราะต้องอาศัยปฏิกิริยาลูกโซ่ในการผลิตสารซึ่งจะใช้ทำลูกระเบิดแทน U^{235} ในกรณีที่ไม่สามารถหายูเรเนียมเป็นจำนวนมาก ๆ ได้ ธาตุซึ่งใช้แทนนี้เป็นธาตุที่ทำขึ้นโดยยิงยูเรเนียมธรรมดาด้วยนิวตรอน ในบทต่อไปจะได้กล่าวถึงการค้นพบธาตุใหม่ ๆ สำหรับในที่นี้จะเพียงแต่ถือเอาว่ายูเรเนียมซึ่งเป็นธาตุที่ ๙๒ นั้น อาจจะกลายเป็นพลูโตเนียมซึ่งเป็นธาตุที่ ๙๔ ได้

เฟอร์มิต้องการสร้างปฏิกรณ์นิวเคลียร์ซึ่งผลิตนิวตรอนได้เป็นจำนวนมาก แล้วให้ยูเรเนียม ๒๓๘ จับนิวตรอนนี้อีกต่อหนึ่ง และกลายเป็นพลูโตเนียม โดยอาศัยประสบการณ์ที่ได้มาจากปฏิกรณ์ที่ชิคาโก และตอนหลังที่โอ๊คริดจ์ เทนเนสซี คณะนักวิทยาศาสตร์ได้ออกแบบปฏิกรณ์ใหม่ซึ่งดีกว่าเดิม ปฏิกรณ์นี้อยู่บนฝั่งแม่น้ำโคลัมเบีย ในบริเวณที่ค่อนข้างเปลี่ยวแห่งหนึ่งของรัฐวอชิงตัน

การสร้างปฏิกรณ์นิวเคลียร์เหล่านี้ขึ้น ก็ด้วยความมุ่งหมายเพียงอย่างเดียวคือ ผลิตพลูโตเนียม มีการออกแบบให้สามารถเอายูเรเนียมซึ่งถูกยิงด้วยนิวตรอน ที่ใจกลางของปฏิกรณ์ออกมาได้ แล้วใช้กรรมวิธีทางเคมีแยกเอาพลูโตเนียมไว้ งานนี้นับว่าเป็นสิ่งซึ่งท้าทายทั้งนักวิทยาศาสตร์และทั้งวิศวกรมาก เพราะจะมีขั้นส่วน

ของอะตอมซึ่งถูกแยกออกหรือเกิดพีชชั่นแล้วปะปนอยู่กับยูเรเนียม ด้วย อะตอมซึ่งแยกออกเหล่านี้มีกัมมันตภาพรังสีสูงมาก จึงต้องมีการป้องกันอย่างระมัดระวังที่สุด ไม่ให้ผู้ใดได้รับรังสีอันมีอันตรายนี้ ที่ใจกลางของปฏิกรณ์มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ แท่งคาร์บอนหรือแกรไฟท์ จัดวางเป็นรูปลูกบาศก์มีหมา และมีช่องสำหรับให้หลอดยาว ๆ ทำด้วยอลูมิเนียมสอดเข้าไปทางข้างหนึ่งทะลุถึงอีกข้างหนึ่งได้ แท่งยูเรเนียมทรงกระบอก (เรียกกันว่า "*สลัก*") จำนวนเป็นร้อย ๆ จะถูกผลักเข้าไปทางช่องของหลอดอลูมิเนียม "*สลัก*" ยูเรเนียมแต่ละอันจะมีกระป๋องอลูมิเนียมห่อหุ้มไว้เป็นอย่างดี เพื่อไม่ให้อะตอมที่สลายตัวหลุดออกมาได้

ในที่สุดคณะนักวิทยาศาสตร์ของเฟอร์มิ ก็สามารถสร้างปฏิกรณ์ซึ่งทำให้อะตอมของยูเรเนียมทุก ๆ สิบอะตอมที่เกิดพีชชั่นปล่อยนิวตรอนออกมามากพอที่จะไปเปลี่ยน U^{238} ให้เป็นพลูโตเนียมได้แปดอะตอม เนื่องจากพลูโตเนียม ๑ ปอนด์ มีจำนวนอะตอมอยู่ ๑๒×๑๐^{21} (หนึ่งหมื่นสองพันล้านล้านล้าน) อะตอม การที่จะให้ได้พลูโตเนียมวันละหนึ่งปอนด์นั้น U^{235} จะต้องแตกตัววินาทีละ ๑๗×๑๐^{18} (สิบเจ็ดล้านล้านล้าน) อะตอม เราได้เห็นแล้วว่าเมื่อยูเรเนียมแตกตัวเป็นสองเสี่ยง แต่ละเสี่ยงมีความเร็วสูงมาก สูงกว่าความเร็วของดาวเทียมที่โคจรรอบโลกมากมายนัก พลังงานอันมหาศาลซึ่งเก็บอยู่ในอะตอมจะถูกปล่อยออกมาบ้าง

คือเป็นพลังงานส่วนที่แยกออกปลิวว่อนนี่เอง ครั้นไปกระทบกับอะตอมอื่นเข้าพลังงานนี้จะหมดไปอย่างรวดเร็ว และเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน

ถึงแม้ความร้อนที่เกิดจากการแยกตัวของแต่ละอะตอมจะน้อยมาก แต่เมื่อมีอะตอมเป็นจำนวนตั้งหลายล้านล้านล้าน แยกตัวใน ๑ วินาที เช่นนี้ ความร้อนที่เกิดขึ้นย่อมรุนแรงมาก ปฏิกรณ์อันใหญ่โตที่แฮนฟอร์ด รัฐวอชิงตันนั้น ถ้าไม่มีการระบายความร้อนแล้ว อุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ยูเรเนียมจะละลายหมด และจะปล่อยกัมมันตภาพรังสีอันร้ายแรงออกมา ทั้งปฏิกรณ์ก็จะพินาศลงโดยสิ้นเชิงด้วย เพื่อไม่ให้ปฏิกรณ์ร้อนจัดเช่นนั้น จึงมีการสูบน้ำจากแม่น้ำโคลัมเบีย เข้าไปทางช่องของแท่งอลูมิเนียม ความร้อนของแท่งยูเรเนียมก็จะถูกถ่ายให้แก่น้ำ เมื่อน้ำอันร้อนจัดไหลออกมาจากปฏิกรณ์จะถูกปล่อยให้เย็นลงชั่วครู่หนึ่ง แล้วจึงไหลลงแม่น้ำตามเดิม

พลังงานความร้อนซึ่งได้จากปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นในระหว่างสงครามนี้มากพอสำหรับนครใหญ่ ๆ นครหนึ่งทีเดียว แต่เนื่องจากการสร้างปฏิกรณ์นั้นมีจุดประสงค์แต่เพียงอย่างเดียว คือ ผลิตพลูโตเนียมเท่านั้น ความร้อนที่ได้จึงถูกทิ้งไป การที่จะทำความร้อนนี้ให้เป็นพลังงานที่มีประโยชน์ ซึ่งมักจะทำกันให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าราคาถูก ๆ นั้น ถือว่าเป็นงานด้านวิศวกรรม ซึ่งแม้ปัจจุบันนี้ก็ยังไม่ประสบความสำเร็จกันอย่างสมบูรณ์นัก โดย

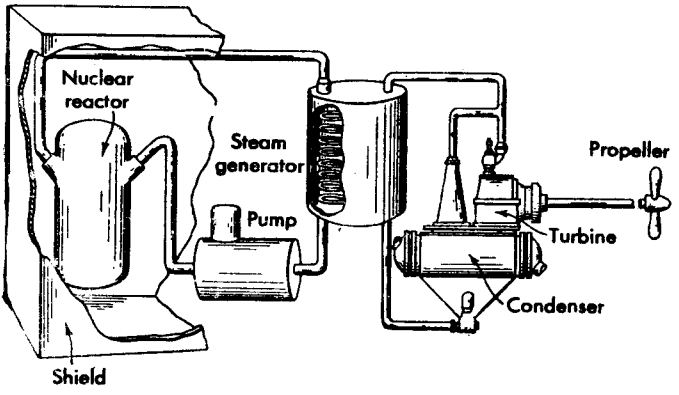
หลักการแล้วเห็นได้ชัดว่า อะตอมของยูเรเนียมเป็นแหล่งพลังงานมหึมา เหตุการณ์อันสำคัญที่ฮิโรชิมาและนางาซากิ แสดงให้เห็นความจริงข้อนี้อย่างแจ่มแจ้ง อย่างไรก็ตามการควบคุมพลังงานอะตอมนี้นับว่า เป็นงานด้านวิศวกรรมที่ยากลำบากอย่างยิ่งทีเดียว

ในตอนต้น ๆ มีผู้เสนอแนะให้ใช้พลังงานอะตอมให้เป็นประโยชน์หลายอย่างด้วยกัน อย่างหนึ่งคือใช้ขับเคลื่อนเรือดำน้ำ เมื่อเดือนมีนาคม ๑๙๓๙ เฟอร์มิได้ติดต่อกับกระทรวงกองทัพเรือสหรัฐพยายามชักนำให้เห็นด้วยกับความคิดนี้ ข้อเสนอของเขาไม่ค่อยได้ผลมากนัก สาเหตุส่วนหนึ่งก็คือภาระในการพัฒนาอาวุธปรมาณูในยามสงครามเป็นของกระทรวงกลาโหม และสาเหตุอีกส่วนหนึ่งคือ ตอนนั้นจุดมุ่งหมายอยู่ที่ลูกระเบิดปรมาณูมากกว่าวิธีขับเคลื่อนเรือดำน้ำแบบใหม่ แต่หลังจากสงครามไม่นานปรากฏว่ามีนายทหารเรือผู้หนึ่งมีจิตใจจดจ่ออยู่กับเรือดำน้ำปรมาณูเสียเหลือเกิน

นายพลเรือ (ตอนนั้นมียศเป็นเรือเอก) เอช.จี. ริคโคเวอร์ (H.G. Rickover) ทุ่มเทพลังทั้งหมดที่มีอยู่ ให้แก่โครงการนี้ ความกระตือรือร้นของเขาช่างตรงกันข้ามกับความเฉยเมยของกองทัพเรือเสียนี่กระไร แต่ริคโคเวอร์ก็ยังก้าวไปข้างหน้าโดยไม่ท้อถอย เขาเห็นว่ายูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงที่ดีเลิศสำหรับการขับเคลื่อนใต้น้ำ เชื้อเพลิงแบบใหม่นี้เพียงปอนด์เดียวมีค่าเทียบเท่ากับน้ำมัน

เชื้อเพลิงถึงสองแสนห้าหมื่นแกลลอน เครื่องจักรกลนิวเคลียร์ไม่ต้องใช้อากาศ ไม่เหมือนกับเครื่องยนต์แบบสันดาปภายใน ฉะนั้นถ้าสามารถสร้างเครื่องจักรกลนิวเคลียร์ ให้ใช้ประโยชน์ได้จริง ๆ แล้ว เรือดำน้ำพลังงานปรมาณูจะสามารถดำน้ำได้เป็นเวลานาน ด้วยความเร็วสูง

นายทหารเรือผู้ทรหดรู้ว่า การ ทำปฏิกรณ์ แบบ ใหม่ สำหรับเรือดำน้ำปรมาณูลำแรกจะเป็นงานที่ยากทีเดียว ปฏิกรณ์ที่ต้องการนี้ ไม่ ได้มีกำลังมากมายอย่างปาฏิหาริย์ที่อยู่ บนฝั่งแม่น้ำ โคลัมเบีย แต่ถึงแม้จะเล็กกว่าสักสิบเท่าก็ยังคงโตเกินไปกว่าที่จะบรรจุในเรือดำน้ำได้ ดังนั้นจะต้องมีการออกแบบใหม่ ริคโคเวอร์ได้มอบงานนี้ส่วนหนึ่งให้แก่บริษัทไฟฟ้าเวสติงเฮาส์



รูปที่ ๒๘ แผนภาพเครื่องจักรกลนิวเคลียร์ของเรือดำน้ำนอตทิลัส (Courtesy Westinghouse Electric Corp)

จุดสำคัญของงานก็คือการออกแบบปฏิกรณ์ให้เล็กพอที่จะใช้ในเรือดำน้ำได้ แต่ก็ต้องมีกำลังมากพอที่จะทำให้เรือขับเคลื่อนไปได้ด้วยความเร็วสูงมาก แบบที่ตกลงใช้กันในที่สุดประกอบด้วยภาชนะรูปทรงกระบอก ข้างในมีแท่งยูเรเนียม ๒๓๕ อันมีค่ารูปร่างเรียว ๆ เป็นจำนวนมาก น้ำบริสุทธิ์ภายใต้ความดันสูงถูกสูบเข้าไปให้ไหลวนเวียนรอบแท่งเชื้อเพลิงเหล่านี้ มีท่อโลหะเป็นจำนวนมากวางตามยาวในภาชนะทรงกระบอกนั้น เพื่อเอาความร้อนออกมาจากใจกลางของปฏิกรณ์ น้ำในท่อเหล่านี้รับความร้อนออกมาและส่งผ่านไปยังเครื่องจักรกลความร้อน

ถึงตอนนี้จะหยุดการบรรยายลักษณะของปฏิกรณ์ไว้นิดหนึ่งเพื่อชี้ให้เห็นว่า เมื่อได้ความร้อนมาแล้วไม่ว่าจะได้จากยูเรเนียมหรือจากการเผาไหม้ของถ่านหินหรือน้ำมันก็ตาม ความร้อนนั้นจะถูกนำไปใช้โดยวิธีธรรมดา ในโรงงานผลิตไฟฟ้าซึ่งใช้ถ่านหินนั้น วิศวกรต้องพบกับไอน้ำภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงอยู่ตลอดเวลา สำหรับโรงงานซึ่งใช้พลังงานนิวเคลียร์นั้น ไอน้ำจะพุ่งเข้าไปในเครื่องเทอร์บินกระแทกใบพัดทำให้เพลาหมุน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งติดกับเพลาก็จะผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมา

ทำไมในกรณีของปฏิกรณ์สำหรับเรือใต้น้ำ งานด้านวิศวกรรมตอนนี้จึงยุ่งยากเสียเหลือเกิน ที่เป็นเช่นนี้เพราะเกิดปัญหาทางเทคนิคมากมายในการทำวัสดุ ซึ่งจะสามารถทนทานต่อ

อุณหภูมิสูง และทนต่อกัมมันตภาพรังสีภายในใจกลางของปฏิกรณ์ ยิ่งไปกว่านั้นวัสดุก่อสร้างแทบทั้งหมดที่ใช้กันในการทำหม้อน้ำแบบธรรมดามีส่วนประกอบของธาตุซึ่งไม่เหมาะสมกับปฏิกรณ์ปรมาณู อย่างไรก็ตามสิ่งซึ่งยุ่งยากที่สุดก็คือมีความจำเป็นที่จะต้องมีการกั้นบังกัมมันตภาพรังสีอันรุนแรง ซึ่งออกมาจากใจกลางปฏิกรณ์ ปฏิกรณ์ขนาดมหึมาสำหรับผลิตพลูโตเนียมนั้นมีกำแพงคอนกรีตหนาหลายฟุตล้อมรอบ กำแพงนี้ดูดกลืนรังสีอันมีอันตรายเอาไว้ คนจึงสามารถเข้าไปทำงานใกล้ ๆ ปฏิกรณ์ได้โดยปลอดภัย แต่การปิดกั้นปฏิกรณ์ของเรือดำน้ำเป็นเรื่องลำบากทีเดียว เพราะจะต้องให้น้ำหนักและขนาดของสิ่งที่จะใช้กั้นเล็กพอที่จะบรรจุลงที่ในเรือได้

เรือดำน้ำซึ่งขับเคลื่อนด้วยพลังงานปรมาณูลำแรกของสหรัฐ ฯ ชื่อ นอตติลัส อันเป็นชื่อเรือในนิยายชื่อ *"ใต้ทะเลสองหมื่นโยชน์"* ของ จูลส์ เวิร์น เพื่อให้แน่ใจว่าเรือดำน้ำตัวอย่างลำแรกนี้ จะสามารถอยู่ในสภาพที่เรือดำน้ำจริง ๆ ต้องเผชิญ การสร้างจึงทำกันที่เมืองอาร์โค รัฐไอดาโฮ ซึ่งเป็นสถานที่ขององค์การพลังงานปรมาณู ที่นั่นมีการสร้าง *"ทะเล"* ขึ้นด้วย คือทำถังใหญ่จุน้ำสี่แสนแกลลอนล้อมรอบตัวเรือ ในภาพข้างล่างเป็นรูปเครื่องยนต์ปรมาณูขั้นทดลองเครื่องแรกบรรจุอยู่ในโครงเรือสำหรับทดสอบ

เมื่อวันที่ ๒๑ มกราคม ๑๙๕๔ เรือดำน้ำนอตติลัส ก็ถูกปล่อยลงน้ำที่เมืองโกรตัน รัฐคอนเนกติกัต ในเวลาไม่ช้าใบพัดคู่ห้าแฉกก็พุ้ยน้ำเป็นทางไปตามแม่น้ำเทมส์ เรือดำน้ำใช้พลังงานปรมาณูลำแรกของโลกกลายเป็นความจริงขึ้นมาแล้ว ต่อมาอีกไม่นาน เรือดำน้ำรูปร่างบ้อม ๆ ลำนี้ก็ได้ทำสถิติในด้านความเร็ว และการดำได้นาน เหนือกว่าที่เรือดำน้ำแบบธรรมดาได้เคยทำไว้มาก นอตติลัสแล่นไปได้เป็นระยะทาง ๖๒,๕๐๐ ไมล์ โดยไม่ต้องเติมเชื้อเพลิงใหม่เลย ถ้าเป็นเรือดำน้ำธรรมดาแล้วจะต้องใช้น้ำมันเชื้อเพลิงไปถึงกว่าสองล้านแกลลอน กองทัพเรือสหรัฐ ฯ ซึ่งไม่ค่อยจะมีศรัทธาในเรือที่ใช้พลังงานปรมาณูมาก่อน เริ่มเห็นว่าเรือนอตติลัสจะเป็นจุดเริ่มต้นของกองทัพเรือ ที่ขับเคลื่อนโดยพลังงานนิวเคลียร์ จึงอนุมัติให้สร้างเรือปรมาณูแบบที่ดีกว่าเดิมขึ้นใหม่อีก และในปี ๑๙๕๘ เรือดำน้ำแห่งราชนาวีสหรัฐ ฯ ชื่อ สเกต ก็ออกสู่ทะเลสมทบกับเรือลำพี่ การเดินทางลอดใต้ทะเลน้ำแข็งที่ขั้วโลกเหนือของเรือดำน้ำปรมาณูทั้งสองเป็นข่าวพาดหัวของบรรดาหนังสือพิมพ์ทั้งหลายทีเดียว

เรือดำน้ำปรมาณูอื่น ๆ ที่จะไปร่วมกับนอตติลัสต่อไปนั้นมีมีชื่อแปลก ๆ เช่น สคิปแจ็ค ไตรตัน ฮาลิบัต สอร์ดฟิช และซี แดรกกอน ภายในปี ๑๙๖๑ กองทัพสหรัฐ ฯ จะมีกองเรือดำน้ำอันทันสมัยขนาดเล็กแต่มีประสิทธิภาพสูงยิ่ง เรือไตรตันซึ่ง

เป็นเรือดำน้ำขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่เคยสร้างมา มีระวางขับน้ำถึงแปดพันตัน และมีราคา ๑๐๐ ล้านดอลลาร์ เรือดำน้ำแบบใหม่ที่สุดที่จะได้รับการออกแบบให้มีความเร็วสูงมาก และจะติดตั้งเครื่องยิงจรวดโพลาริสจากใต้ทะเล อาวุธแบบใหม่นี้ได้รับการพิจารณาให้มีความสำคัญทางการทหารเป็นอันดับแรกทีเดียว

เรือลาดตระเวณปรมาณูของสหรัฐ ฯ ชื่อ ลองก์บีช จะมีระวางขับน้ำหนึ่งหมื่นสี่พันตัน ทำหน้าที่เป็นฐานเคลื่อนที่สำหรับยิงจรวดนำวิถี เรือลำนี้ขับเคลื่อนโดยปฏิกรณ์สองปฏิกรณ์ และคาดกันว่าจะมีความเร็วกว่าสี่สิบนอต

เรือปรมาณูลำใหญ่ที่สุดของกองทัพเรือสหรัฐ ฯ ชื่อ เอนเตอร์ไพรส์ ซึ่งเป็นเรือบรรทุกเครื่องบินขนาดใหญ่ มีระวางขับน้ำแปดหมื่นหกพันตัน มีลานบินยาว ๑,๑๐๐ ฟุต ซึ่งยาวกว่าสนามฟุตบอลเกือบสี่เท่า พลังงานซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนได้มาจากปฏิกรณ์นิวเคลียร์แปดปฏิกรณ์ เรือบรรทุกเครื่องบินลำนี้จะมีความเร็วสามสิบสามนอต

ในราวปี ค.ศ. ๑๙๖๐ เศษ ๆ กองทัพเรือสหรัฐ ฯ จะเป็นผู้ใช้พลังงานจากยูเรเนียมรายใหญ่ที่เดียว กำลังจากปฏิกรณ์ในเรือรวมกันจะมากกว่าล้านกิโลวัตต์ เหตุที่กองทัพเรือสามารถเป็นผู้ใช้พลังงานจากยูเรเนียมเป็นจำนวนมากเป็นรายแรกได้ เป็นเพราะในกิจการเกี่ยวกับทหารนั้น การคิดค่าใช้จ่ายไม่เหมือนกับ

ทางฝ่ายพลเรือน ถ้าผู้บริหารนครใหญ่แห่งใดคิดสร้างโรงงานไฟฟ้าซึ่งใช้พลังงานปรมาณูขึ้นมา จะถูกวิพากษ์วิจารณ์อย่างหนัก เพราะทั้งค่าก่อสร้างและค่าดำเนินงานแพงกว่าโรงงานแบบธรรมดาที่ใช้กันอยู่ ประชาชนจะพากันไม่พอใจเพราะค่าไฟฟ้าจะแพงขึ้น ปัญหาใหญ่ที่ว่าจะเลือกใช้โรงงานแบบพลังงานนิวเคลียร์หรือแบบธรรมดาจึงอยู่ที่ค่าใช้จ่ายนี้เอง ด้วยเหตุนี้ในสหรัฐ ฯ จึงมีโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ใหญ่ ๆ อยู่เพียงไม่กี่แห่ง เพราะต้นทุนสูงเกินไป

ที่ว่ายูเรเนียมปอนด์เดียวให้พลังงานเทียบเท่ากับถ่านหินถึง ๒,๓๐๐,๐๐๐ ปอนด์นั้น ดูเป็นตัวเลขที่น่าพอใจมาก แต่ความจริงแล้วยังไม่ได้คิดถึงค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ที่นอกเหนือออกไป ซึ่งจำเป็นในการสร้างโรงงานนิวเคลียร์ โรงงานนิวเคลียร์มีราคาแพง เพราะมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างเครื่องป้องกันอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี การที่ต้องใช้วัสดุพิเศษสร้างปฏิกรณ์ก็มีส่วนทำให้ราคาของโรงงานสูง นอกจากนี้แล้วเชื้อเพลิงยูเรเนียมในปฏิกรณ์นั้นไม่ใช่ว่าจะปล่อยให้ถูก *"เผาไหม้"* จนหมดไปเลยได้ แต่ต้องเอาออกมาเสียก่อน หลังจากใช้ไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เพราะเมื่อแท่งยูเรเนียมเกิดการ *"เผาไหม้"* แล้วคุณสมบัติทางกายภาพจะเปลี่ยนแปลงไปมาก ถ้าทิ้งไว้ในปฏิกรณ์นาน ๆ จะเกิดความเสียหายมาก จึงต้องเอาออกมาจากปฏิกรณ์

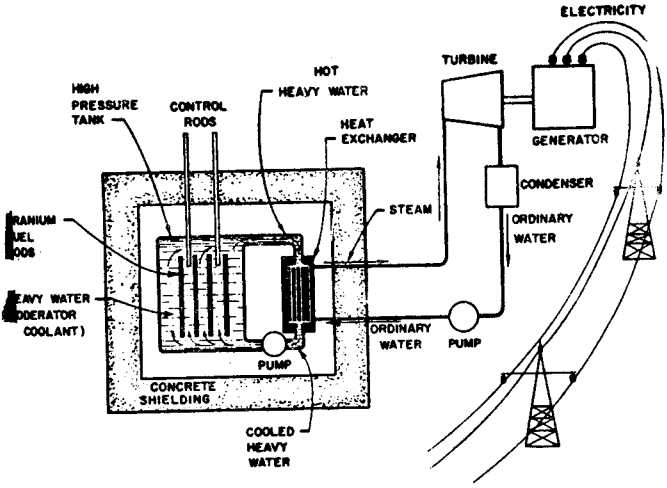
เมื่อถึงกำหนดเวลา เพื่อกลั่นกรองเอาเชื้อเพลิงส่วนที่ยังไม่ได้ใช้ การทำเช่นนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง นับเป็นการเพิ่มต้นทุนโรงงานซึ่งใช้พลังงานนิวเคลียร์

เมื่อโรงงานไฟฟ้าแบบธรรมดาซึ่งใช้เครื่องจักรไอน้ำระเบิดขึ้น แรงระเบิดของหม้อน้ำมักจะทำให้เกิดความเสียหายแก่สิ่งที่อยู่ในบริเวณใกล้ ๆ เท่านั้น ซึ่งส่วนมากก็เสียหายแต่ภายในโรงงาน สำหรับโรงงานที่ใช้พลังงานนิวเคลียร์นั้นถ้าคิดผลจากแรงระเบิดก็อาจจะพอ ๆ กัน แต่สิ่งที่น่าเป็นห่วงมากก็คือ แท่งยูเรเนียมเชื้อเพลิงอาจจะแตกกระจายและกัมมันตภาพรังสีฟุ้งกระจายไปในอากาศ ถ้าเกิดอุบัติเหตุแบบนี้ใกล้บริเวณที่มีผู้คนหนาแน่นก็อาจจะเป็นอันตรายอย่างใหญ่หลวง โรงงานที่ใช้พลังงานนิวเคลียร์บางแห่งในสหรัฐ ฯ พยายามแก้ปัญหานี้โดยสร้างเครื่องห่อหุ้มเป็นรูปทรงกลมล้อมรอบปฏิกรณ์ หากเกิดอุบัติเหตุขึ้นกับปฏิกรณ์ชั้นส่วนที่แตกกระจายจะได้ตกอยู่ภายในนั้น การก่อสร้างเพิ่มเติมเช่นนี้ทำให้ราคาของโรงงานเพิ่มขึ้นมากพอดู

จะอย่างไรก็ตามโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งใช้พลังงานนิวเคลียร์ได้ถูกสร้างขึ้นบ้างแล้ว ถึงแม้จะเป็นจำนวนไม่มาก โรงงานแรกในสหรัฐ ฯ ที่อยู่ ชิปปิงปอร์ต รัฐเพนซิลเวเนีย ไม่ไกลไปจากพิตส์เบิร์ก จุดประสงค์ของการสร้างโรงงานนี้ก็เพื่อให้เป็นที่สำหรับผึกหัดงานด้านวิศวกรรมและด้านการดำเนินงาน โดยที่รู้

กันล่วงหน้าดีอยู่แล้วว่าค่าใช้จ่ายในการผลิต ไม่มีทางที่จะแข่งขันกับ โรงงาน ซึ่งใช้ ถ่าน หินอัน มี ราคาถูก ในแถบพิตส์เบิร์ก ได้เลย โรงงานที่ชิปปิงปอร์ตมีราคา ๑๑๐ ล้านดอลลาร์ และได้รับการออกแบบให้ผลิตไฟฟ้าในระยะเริ่มต้นได้ ๖๐,๐๐๐ กิโลวัตต์ ต่อไปหวังกันว่าอาจจะเพิ่มขึ้นได้ถึง ๑๐๐,๐๐๐ กิโลวัตต์ หลักการของโรงงานที่ชิปปิงปอร์ตนี้ คล้ายคลึงกับเครื่องจักรกลของเรือดำน้ำนอตติลัสมาก เพียงแต่มีกำลังมากกว่า และขนาดใหญ่กว่า ต้นทุนเบื้องต้นในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานนิวเคลียร์นี้สูงราว ๆ สิบเท่าของไฟฟ้าที่ได้จากโรงงานซึ่งใช้ถ่านหิน แต่เมื่อปรับปรุงยูเรเนียมเชื้อเพลิงให้ดีขึ้น ตัวเลขนี้อาจจะลดลงได้มาก อย่างไรก็ตามโอกาสที่จะทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงจนพอที่จะทำให้โรงงานนี้แข่งขันกับโรงงานธรรมดาที่ใช้ ถ่าน หิน ได้มีน้อยมาก

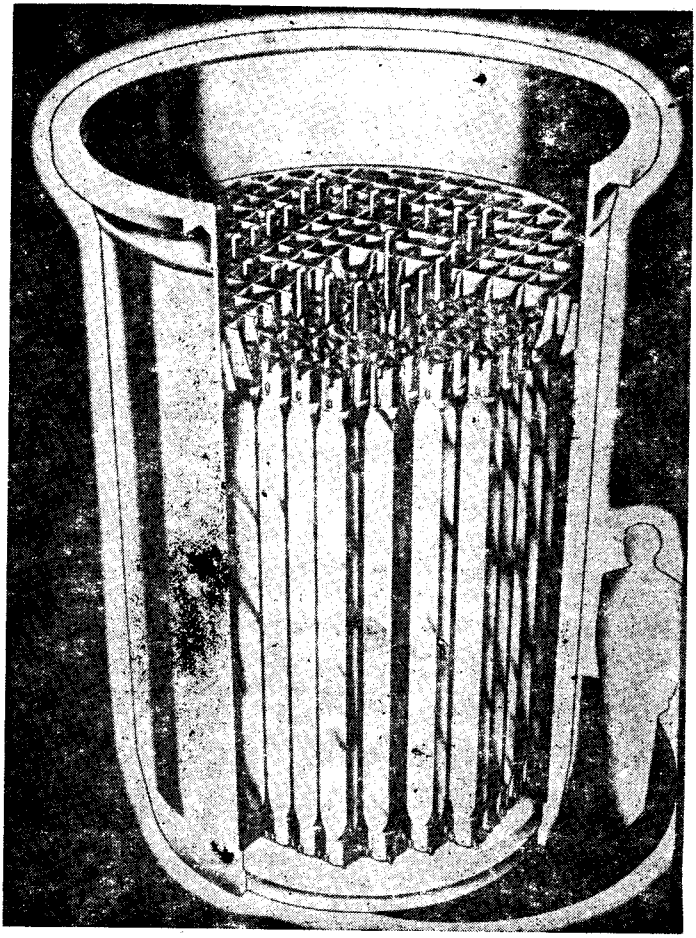
มีโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์หลาย โรง ซึ่งเป็น แบบ ที่ ก้าวหน้า ทำให้ผลิตไฟฟ้าได้ถูกกว่าโรงงานที่ชิปปิงปอร์ตมากพอดู เช่น โรงไฟฟ้าที่เดรสเด็น รัฐอิลลินอยส์ ไม่ไกลจากชิคาโก มีกำหนดจะผลิตไฟฟ้าได้เต็มที่ในปี ๑๙๖๐ โรงงานที่เดรสเด็น คอมมอนเวลธ์ เอดิสัน นี้มีกำลังในการผลิตทั้งหมด ๑๘๐,๐๐๐ กิโลวัตต์



รูปที่ ๒๙ โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานนิวเคลียร์แบบหนึ่ง

โรงงานพลังงานนิวเคลียร์อีกโรงหนึ่งขนาด ๑๓๔,๐๐๐ กิโลวัตต์ ได้ถูกสร้างขึ้นที่ โรว์ รัฐแมสซาชูเซตส์ โดยบริษัทแยงกี อีเล็กตริก คาดว่าจะผลิตได้เต็มที่ในปี ๑๙๖๑ นอกจากนี้บริษัทคอนโซลิเดทเต็ด เอดิสัน ยังหวังว่าในปีเดียวกันโรงงานยักษ์ขนาด ๒๕๕,๐๐๐ กิโลวัตต์ ทางตอนเหนือของนครนิวยอร์กจะเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าได้

โรงงานพลังงานนิวเคลียร์แบบใหม่อีกโรงหนึ่ง กำลังถูกสร้างขึ้นใกล้ ๆ ลากูนา บีช ไม่ไกลจากดีทรอย โรงงานนี้มีชื่อว่า โรงงานเอ็นริโค เฟอร์มิ ได้รับการออกแบบให้ผลิตไฟฟ้าได้ ๙๐,๐๐๐ กิโลวัตต์ และให้ "*เพาะ*" เชื้อเพลิงนิวเคลียร์



รูปที่ ๓๐ ใจกลางปฏิกรณ์ของโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์แห่งแรกของสหรัฐฯ แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียมผังอยู่ในช่องโลหะผสมเซอโคเนียมภายในปฏิกรณ์ น้ำไหลภายใต้ความดันผ่านแท่งเชื้อเพลิงเอาความร้อนออกไปยังจักรกลความร้อนข้างนอก (Courtesy Westinghouse Electric Corp)

ขึ้นมากกว่าที่ใช้ไป แก่นของปฏิกรณ์ค่อนข้างเล็ก ประกอบด้วยกลุ่มแท่งยูเรเนียมซึ่งจมอยู่ในโซเดียมเหลว นอกแกนมียูเรเนียม ๒๓๘ ล้อมโดยรอบ นิวตรอนที่ออกมาจะถูกดูดกลืนโดยยูเรเนียม ๒๓๘ นั้น และเกิดพลูโตเนียมขึ้น ปฏิกรณ์นี้ได้รับการออกแบบให้ใช้ยูเรเนียม ๒๓๕ ไปในแกนราว ๆ ๒๐๐ ปอนด์ และในขณะเดียวกันเกิดพลูโตเนียมขึ้นมา ๒๔๐ ปอนด์ นอกแกน ทำให้ได้กำไรเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ๔๐ ปอนด์

เรื่องนี้พังดูค่อนข้างจะเหลือเชื่อ เพราะเหมือนกับว่าได้อะไรมาโดยไม่ต้องเสียอะไรเลย และถ้าขายพลูโตเนียมที่ได้มานี้แก่รัฐบาลออนซ์ละราว ๆ ๑,๐๐๐ ดอลลาร์ โดยที่ซื้อยูเรเนียม ๒๓๕ มาในราคาถูกกว่านั้นมาก ก็ดูเหมือนจะเป็นวิธีร่ำรวยโดยทางลัดทีเดียว ความจริงแล้วไม่ใช่ว่าจะเป็นการสร้างเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ขึ้นมาจากธาตุซึ่งไม่มีค่า แต่เป็นการเปลี่ยนยูเรเนียมให้เป็นพลูโตเนียมนั่นเอง นับเป็นการใช้ยูเรเนียมอันเป็นทรัพยากรของโลกให้มีประโยชน์มากยิ่งขึ้น ในทางทฤษฎีแล้ว โดยวิธีการ "เพาะ" นี้ เราอาจเอาพลังงานของยูเรเนียมทั้งหมด คือทั้งยูเรเนียม ๒๓๕ และยูเรเนียม ๒๓๘ มาใช้ได้ ถ้าหากทำยูเรเนียม ๒๓๘ ให้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ โดยการทำให้เป็นพลูโตเนียมไม่ได้แล้ว เราเอาพลังงานมาจากยูเรเนียมได้เพียง ๐.๗ เปอร์เซ็นต์เท่านั้น คือเอามาจากยูเรเนียม ๒๓๕ โดยกรรมวิธีคล้าย ๆ กัน เราอาจทำ

ธอเรียมให้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นมนุษย์เราจึงมีทั้งยูเรเนียมและธอเรียม เป็นทรัพยากรที่อาจเอาไปทำประโยชน์ได้

โลกเรานี้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์อันมหึมาอย่างแท้จริง ประมาณอย่างหยาบ ๆ แล้ว เราอาจเอาวัตถุอันมีค่านี้ขึ้นมาใช้ถึงสิบล้านตัน ซึ่งเทียบเท่ากับถ่านหิน ๒๐ ล้านล้านตัน มนุษย์กำลังใช้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล (ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซที่เกิดตามธรรมชาติ) ในอัตราที่มากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อสนองความต้องการของประชากรซึ่งมีจำนวนเพิ่มขึ้น และทางเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมซึ่งรุดหน้าไปตลอดเวลา ครั้งหนึ่งดูเหมือนกับว่าเรามีถ่านหินและน้ำมันมากเกินพอ แต่ทุกวันนี้เราใช้เชื้อเพลิงมากกว่าสมัยร้อยปีมาแล้วถึงห้าร้อยเท่า และในไม่ช้าจะเพิ่มอีกสองเท่าสามเท่าตัว สูงขึ้นเรื่อย ๆ เป็นที่รู้กันว่าน้ำมันดิบนั้นมีอยู่จำกัด จะทายได้ว่าเราจะผลิตเชื้อเพลิงเหลวได้ไม่พอใช้ ก่อนจะสิ้นศตวรรษนี้

การใช้พลังงานนิวเคลียร์ในการอุตสาหกรรมนั้น ในตอนต้นเป็นไปอย่างเชื่องช้า แต่เมื่อได้เห็นส่วนดีของมันแล้ว ก็แน่ใจได้ว่าขุมกำลังแหล่งใหม่นี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ผู้เชี่ยวชาญพากันทำนายว่าตอนปลายศตวรรษนี้ ยูเรเนียมจะเป็นสิ่งที่ใช้กันแทนถ่านหินตามโรงงานใหม่ ๆ คาดกันว่า เมื่อถึงเวลานั้นจะมีโรงงานพลังงานนิวเคลียร์ขนาดใหญ่ถึงห้าร้อยล้านกิโลวัตต์

โรงงานไฟฟ้าแบบธรรมดานั้นเรื่องเถ้าถ่านเศษเชื้อเพลิงไม่ค่อยมีปัญหาอะไรมาก ไม่เหมือนโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ซึ่งการกำจัดเถ้าถ่านกัมมันตภาพอาจก่อให้เกิดอันตรายอย่างใหญ่หลวงได้ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ให้เถ้าถ่านซึ่งมีกัมมันตภาพรังสีเทียบเท่ากับเรเดียมหลายตัน ได้กล่าวมาแล้วว่า แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียมนั้นจะหมดไปเพียงบางส่วนเท่านั้น และส่วนที่ยังไม่ได้ใช้จะปนกันอยู่กับเถ้าถ่านกัมมันตภาพ ต้องใช้กระบวนการทางเคมีแยกออกจากกัน ในการนี้ต้องใช้น้ำยาเคมีเป็นจำนวนมาก และน้ำยานั้นจะมีกัมมันตภาพรังสีอย่างแรง คำนวณกันว่าเมื่อสิ้นศตวรรษนี้กากกัมมันตภาพเช่นนี้ จะสะสมอยู่เป็นปริมาณถึงสองพันล้านแกลลอน ซึ่งจะต้องหาวิธีกำจัดที่ปลอดภัยและถาวร ดูเหมือนว่าการเก็บไว้ใต้พื้นโลกแบบใดแบบหนึ่งจะเป็นคำตอบ ได้มีผู้เสนอแนะว่าเหมืองเกลือมีสภาพทางธรณีวิทยาเหมาะสมที่สุดสำหรับเก็บและป้องกันไม่ให้กัมมันตภาพรังสีขึ้นมาสู่อากาศและน้ำที่ผิวโลก

การใช้พลังงานนิวเคลียร์ขับเคลื่อนเรือและใช้ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า สองอย่างนี้เป็นการใช้แหล่งพลังงานใหม่ให้เป็นประโยชน์ ในปี ๑๙๖๐ เศษๆ ย่อมจะเป็นไปได้ที่ว่าประสบการณ์ที่กองทัพเรือได้มา อาจนำไปสู่การใช้เรือซึ่งขับเคลื่อนด้วยพลังนิวเคลียร์ในกองเรือพาณิชย์ แต่เนื่องจากในปัจจุบันราคาเครื่องจักรกลนิวเคลียร์ยังสูงมาก คงอีกนานจึงจะมีเรือนิวเคลียร์ซึ่งไม่ใช่เป็นของ

ทางการทหาร เพื่อที่จะให้เป็นการประหยัดนั้น โรงงานนิวเคลียร์ต้องมีขนาดใหญ่มาก ปฏิกรณ์ที่ใช้กับเรือมีขนาดปานกลางเท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นการที่เนื้อที่สำหรับติดตั้งในเรือมีจำกัดทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงแบบของปฏิกรณ์ ซึ่งมีส่วนให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น

ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย เกี่ยวกับแบบของปฏิกรณ์แล้ว โอกาสที่จะใช้เครื่องจักรกลนิวเคลียร์ซึ่งมีกำลังน้อยๆ เช่น ใช้กับรถยนต์ รถบรรทุก รถโดยสาร มีน้อยมาก สำหรับรถไฟฟ้า พูดในแง่ของเทคนิคก็เป็นเรื่องที่ทำได้ แต่ก็ไม่น่าทำนักเพราะราคาสูงมาก และอันตรายอันจะเกิดมาจากรถชนกันหรือตกรางมีมากเหลือเกิน รถไฟน่าจะถูกขับเคลื่อนด้วยพลังงานจากอะตอมโดยทางอ้อมมากกว่า คือจะเป็นรถไฟไฟฟ้า แล่นไปตามรางซึ่งได้รับกระแสไฟฟ้าจากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์

เครื่องบินซึ่งขับเคลื่อนด้วยพลังงานจากอะตอมเป็นข่าวหนังสือพิมพ์มากกว่าสิบห้าปีแล้ว การรายงานข่าวแบบคาดคะเนบางข่าวทำให้ผู้คนพากันเชื่อว่า เครื่องบินปรมาณูสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วสมบูรณ์แล้ว พร้อมที่จะทดลองบินได้ ตามความเป็นจริงนั้นกองทัพอากาศสหรัฐฯ ได้ดำเนินงานตามโครงการ เอ.เอ็น.พี. (Aircraft, Nuclear Propulsion) อย่างกว้างขวางมาหลายปีแล้ว เมื่อถึงปี ๑๙๖๐ จำนวนเงินซึ่งได้ใช้จ่ายไปในการสร้างเครื่องบินทั้งระเบิด แบบขับเคลื่อนด้วยพลังงานนิวเคลียร์จะมีมูลค่าเกือบ

พันล้านดอลลาร์ เครื่องบินขนาดใหญ่นั้นอาจบินได้โดยใช้พลังงานอะตอมอย่างแทบจะไม่ต้องมีข้อสงสัย แต่ที่เป็นปัญหาอยู่มากก็คือว่า เครื่องบินนั้นจะมีความสามารถในการสงครามแค่ไหน

ตามหลักการเครื่องบินนิวเคลียร์เป็นเครื่องบินไอพ่นขนาดใหญ่ ใช้ความร้อนซึ่งได้จากปฏิกรณ์ซึ่งมียูเรเนียมเป็นเชื้อพลิงแทนความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงธรรมดา ความร้อนซึ่งสูงมาก จากปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ถูกถ่ายทอดให้แก่อากาศซึ่งถูกดูดเข้าไปในเครื่องจักรกลไอพ่น เนื่องจากกัมมันตภาพรังสีมีมากและการสร้างเครื่องกำบังให้เพียงพอก็ทำได้ลำบาก (อุปสรรคเกี่ยวกับน้ำหนักบังคับอยู่) นักบินจึงต้องอยู่ที่ส่วนหน้าสุดของเครื่องบิน การออกแบบเช่นนี้ ทำให้นักบินได้รับกัมมันตภาพรังสีน้อยลง

ตอนนี้ยังคงเร็วเกินไปที่จะประเมินคุณค่าในอนาคตของเครื่องบินทั้งระเบิดนิวเคลียร์ แต่สำหรับเครื่องบินพลเรือนที่ใช้พลังงานนิวเคลียร์นั้น เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าจะมีราคาสูงลิ่วแพงเกินไป ที่จะใช้เป็นเครื่องบินโดยสารพลเรือน เรื่องนี้ก็เหมือนกับในกรณีเรือดำน้ำนิวเคลียร์อีก คือทางการทหารจะถือว่าคุณค่าในการรบสำคัญกว่าเรื่องราคา

การเริ่มต้นยุคอวกาศทำให้ความสนใจมุ่งไปสู่เชื้อเพลิงที่จะทำให้จรวดเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น และบรรทุกสัมภาระได้มากยิ่งขึ้น ย่อมเป็นของธรรมดาเหลือเกินที่นักวิทยาศาสตร์จะเห็นว่า ยูเรเนียม

เป็นเชื้อเพลิงที่วิเศษสำหรับใช้กับจรวด จรวดแบบธรรมดาที่ใช้สารเคมีเป็นเชื้อเพลิงนั้น ทำงานโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีไฮโดรคาร์บอนกับก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ออกซิเจนจะถูกนำติดไปกับจรวดในรูปของออกซิเจนเหลว เมื่อส่วนผสมนี้ถูกจุดระเบิดในห้องสันดาปของจรวดจะเกิดเสียงดังน่ากลัว และก๊าซอุณหภูมิสูงจะถูกพ่นออกมาอย่างรวดเร็วทางช่องเล็ก ๆ ข้างท้ายจรวด การพ่นก๊าซร้อนออกมานี้ทำให้จรวดถูกผลักขึ้นไปจากฐานยิง และตัวจรวดจะพุ่งขึ้นสู่ท้องฟ้า จรวดไม่ได้ขึ้นไปโดยการผลักอากาศอย่างที่เชื่อกันโดยทั่ว ๆ ไป ความจริงนั้นจรวดจะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าในอวกาศซึ่งไม่มีอากาศจะต่อต้าน ถ้าบนโลกเราไม่มีบรรยากาศจรวดจะออกจากฐานได้เร็วกว่า

การขับเคลื่อนของจรวดเป็นเรื่องที่เกี่ยวกับ การกระทำและการโต้ตอบ ถ้าคนกระทำโดยพุ่งหลาวลงไปในน้ำจากท้ายเรือกรรเชียง เรือจะโต้ตอบโดยการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ถ้าคนกระโจนลงน้ำจากเรือแคนู เรือจะพุ่งไปข้างหน้าทีเดียว เพราะมันเบากว่าเรือกรรเชียงมาก โดยนัยเดียวกันจรวดเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยการพ่นก๊าซร้อนไปข้างหลัง ถ้าก๊าซยิ่งเบาและยิ่งร้อน (ความเร็วยิ่งสูง) ประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนก็ยิ่งดี

จรวดนิวเคลียร์ก็เป็น ไปตามกฎการ ขับเคลื่อนเช่น เดียวกับจรวดธรรมดา จักรกลของจรวดส่วนที่ใช้พลังงานนิวเคลียร์ก็คือ

ปฏิกรณ์ซึ่งทำให้เกิดความร้อน เทียบได้กับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเคมีในจรวดทั่วไป อย่างไรก็ตามความร้อนมากมายซึ่งได้มานี้ไม่ทำให้จรวดเคลื่อนที่ไปได้ จะต้องใช้ไปทำให้ก๊าซซึ่งมีน้ำหนักเบาร้อนขึ้นและพ่นออกมาจากท่อเครื่องยนต์ของจรวด จึงจะเกิดผล วิศวกรทางนิวเคลียร์กำลังทำงานเรื่องนี้อยู่ ตามโครงการป้องกันประเทศของสหรัฐ ฯ ที่ชื่อว่าโครงการโรเวอร์

โครงการโรเวอร์มีจุดมุ่งหมาย ที่จะสร้างจักรกลจรวดนิวเคลียร์ ซึ่งจะเป็นปฏิกรณ์ที่มีรูปร่างกะทัดรัดและมีกำลังสูง คณะวิศวกรมีแผนที่จะสูบไฮโดรเจนเหลวเข้าไปในแก่นปฏิกรณ์ซึ่งร้อนจัด มีผลให้ไฮโดรเจนเหลวซึ่งเย็นจัดนั้นกลายเป็นก๊าซอุณหภูมิสูง ก๊าซนี้เองจะเป็นตัวขับเคลื่อนจรวดขึ้นสู่ท้องฟ้า ทำนองเดียวกับจรวดแบบธรรมดา โครงการโรเวอร์ได้ผ่านช่วงแห่งความคิดฝันไปแล้ว แต่ในแง่ของเทคนิคยังคงอยู่ในระยะเริ่มต้น นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรยังต้องแก้ปัญหาเรื่องการสร้างวัสดุที่จะสามารถทนทานต่อสภาพรุนแรงต่าง ๆ ซึ่งจำเป็นสำหรับเครื่องจักรกลของจรวด อย่างไรก็ตามทุกคนเชื่อมั่นว่าจะทำจรวดนิวเคลียร์ได้ สิ่งซึ่งกระตุ้นให้บรรดานักวิทยาศาสตร์และวิศวกรพยายามต่อไปก็คือ ความหวังที่จะได้ใช้เชื้อเพลิงอันดีเลิศสำหรับจรวดคือ ยูเรเนียม การสำรวจอวกาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้วงอวกาศชั้นนอกซึ่งไกลออกไปจากโลกเรา จะเป็นไปได้ก็ด้วยการควบคุมอะตอมให้ได้

๑๒

เครื่องอะตอม

จักรวาลที่เรามองเห็น ประกอบด้วย โลกของเรา ดาวเคราะห์อื่น ๆ ดวงอาทิตย์ และดาวฤกษ์อื่น ๆ ซึ่งอยู่ห่างไกลอย่างเหลือล้น เป็นที่รวมของสรรพสิ่งบนฟากฟ้าอันสลับซับซ้อน และมีอาณาเขตกว้างใหญ่สุดที่จะประมาณได้ กล้องโทรทัศน์มหึมาขนาด ๒๐๐ นิ้ว ที่เมาท์ พาโลมา มองออกไปยังห้วงอวกาศอันไพศาล เห็นดวงดาวซึ่งอยู่ไกลลิบลับ แสงจากดวงดาวเหล่านั้นใช้เวลาถึงสองพันล้านปีจึงจะมาถึงโลกเรา เนื่องจากแสงเคลื่อนที่ในอวกาศด้วยความเร็ว ๑๘๖,๐๐๐ ไมล์ ต่อวินาที จึงหมายความว่าขอบจักรวาลอยู่ห่างออกไปถึงหมื่นล้านล้านล้านไมล์

มนุษย์ได้สำรวจความลึกลับของอวกาศ โดยใช้เครื่องมือซึ่งมีความไวที่ได้คิดประดิษฐ์ขึ้นมาอย่างชาญฉลาด แสงระยิบระยับเพียงน้อยนิดจากดวงดาวซึ่งอยู่ไกลแสนไกล ก็เพียงพอที่จะทำให้รู้ได้ว่าดาวนั้นประกอบขึ้นด้วยธาตุอะไรบ้าง ชั้นบรรยากาศที่หุ้มห่อโลกเราอยู่ ทำให้การสังเกตดวงดาวไม่ค่อยจะแจ่มชัด อุปสรรคนี้จะหมดไป เมื่อจรวดนำเอาเครื่องมือ และในที่สุดจะนำเอาคนขึ้นไปยังดาวเทียม หรือยังหอสังเกตการณ์บนดวงจันทร์ แต่แม้จะใช้เพียงข้อมูลซึ่งมีอยู่ในปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์ก็ได้ก้าวไปไกลมากในการไขปัญหาเกี่ยวกับห้วงอวกาศ

นักฟิสิกส์นิวเคลียร์และนักดาราศาสตร์ได้ร่วมมือ กันค้นหากุญแจที่จะไขความลึกลับนี้ วิธีการของนักวิทยาศาสตร์ก็คือใช้ความรู้ที่ได้มาจากการทดลองเกี่ยวกับอะตอมในห้องทดลอง ไปตั้งทฤษฎีซึ่งอาจจะอธิบายธรรมชาติของดวงดาวและอาจจะอธิบายจักรวาลได้ด้วย

โดยการวิเคราะห์แสงจากดวงดาว นักวิทยาศาสตร์สามารถรู้องค์ประกอบของมันได้ เพราะอะตอมของแต่ละธาตุจะให้แสงซึ่งมีความยาวคลื่นอันมีลักษณะเฉพาะตัว ทำให้สามารถบอกได้อย่างแน่นอนว่าเป็นอะตอมชนิดใด ตัวอย่างเช่น เรารู้ได้อย่างง่ายดายว่า ในแสงอาทิตย์นั้นมีแสงซึ่งมาจากอะตอมของไฮโดรเจนรวมอยู่ด้วย ธาตุเหล็กและธาตุอื่นอีกหลายธาตุก็มีอยู่ในดวงอาทิตย์ รวมทั้งธาตุฮีเลียมซึ่งครั้งแรกพบในดวงอาทิตย์ ก่อนที่จะพบบนโลกเราเสียอีก

ดวงดาวนับเป็นพัน ๆ ล้านในจักรวาลนั้นประกอบขึ้นด้วยธาตุซึ่งเป็นที่รู้จักและพบกันในโลก ธาตุเหล่านี้อาจจะมีอุณหภูมิ และอยู่ภายใต้ความกดดันสูงมาก อยู่ลึกเข้าไปในดวงดาวซึ่งกำลังส่องแสงโชติช่วง แต่ถึงกระนั้นก็ยังเป็นธาตุอย่างเดียวกันกับที่มีอยู่ในโลก เท่าที่รู้กันนั้นธาตุซึ่งมีมากที่สุดในจักรวาลคือไฮโดรเจน ซึ่งเป็นธาตุที่ง่ายที่สุดและเบาที่สุด ความจริงข้อนี้ส่อให้เห็นว่าไฮโดรเจนอาจจะเป็นองค์ประกอบมูลฐานของโครงสร้างของดวงดาว

ทั้งหลาย ภายใต้สภาพการณ์แปลก ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในดวงดาวเหล่านั้น ธาตุไฮโดรเจนอาจจะรวมตัวกันเป็นธาตุที่หนักกว่า เช่น ฮีเลียม นอกจากฮีเลียมแล้วเราก็พอจะสันนิษฐานได้ว่าอะตอมอื่น ๆ ที่สลับซับซ้อนก็อาจเกิดขึ้นได้เช่นกัน ดังนั้นเราจึงอาจเดาต้นกำเนิดของธาตุทั้งหลายได้ ปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์บางคนกำลังสืบสาวเรื่องราวอยู่ตามแนวนี้

ทีนี้หันกลับมายังโลกเรา ดูสิ่งที่ใกล้ตัวเราเองบ้าง เราจะพิจารณาอะตอมทั้งหลายซึ่งมีอยู่ในโลก นักเคมีได้พยายามแยกธาตุต่าง ๆ ออกมา นับตั้งแต่สมัยต้น ๆ ที่นักวิทยาศาสตร์แบ่งสิ่งทั้งหลายออกเป็น ดิน น้ำ ลม ไฟ ด้วยความอุตสาหะวิริยะของนักวิทยาศาสตร์เป็นจำนวนมากในหลายประเทศ สารทุกชนิดเป็นต้นว่า สินแร่ต่าง ๆ ของเหลว ก๊าซ และสารอินทรีย์ได้ถูกทำการวิเคราะห์ นักวิทยาศาสตร์พบว่าธาตุบางธาตุรวมกันเป็นสารประกอบทางเคมี โดยวิธีซึ่งคล้ายคลึงกัน และเรียนรู้ทีละน้อย ๆ ว่า ธาตุต่าง ๆ เป็นไปตามระเบียบแบบแผนอย่างสม่ำเสมอเริ่มต้นด้วยไฮโดรเจนและสิ้นสุดลงที่ยูเรเนียม ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเราอาจให้หมายเลขแก่ธาตุทั้งหลาย ขึ้นต้นด้วยไฮโดรเจนซึ่งมีอะตอมมิกนัมเบอร์ ๑ เรื่อย ๆ ไปจนถึงหมายเลข ๙๒ สำหรับยูเรเนียม ในการจัดเรียงลำดับธาตุต่าง ๆ เหล่านั้นนั้น ตอนแรกก็มีช่องว่างที่นั่นบ้างที่นี่บ้าง แต่ก็เข้าใจกันว่าที่ว่างเหล่านั้นเป็นของ

ธาตุซึ่งยังไม่ได้ค้นพบ และจะค้นพบกันต่อไปในอนาคตซึ่งก็ปรากฏต่อมาว่าเป็นความจริง

ไม่ใช่ว่าอะตอมทุกอะตอมของธาตุใดธาตุหนึ่ง จะมีน้ำหนักเท่ากันหมด ทั้งนี้ยกเว้น ทอง แทนทาลัม เบอริลเลียม และฟอสฟอรัส ส่วนทองแดง เงิน และธาตุอื่น ๆ ส่วนมากจะประกอบด้วยอะตอมหลายชนิดซึ่งมีน้ำหนักต่าง ๆ กัน ที่เรียกกันว่า ไอโซโทป จากธาตุที่เบาที่สุด (ไฮโดรเจน ๑) ถึงธาตุหนักที่สุด (ยูเรเนียม ๒๓๘) นั้น มีจำนวนไอโซโทป หรือนิวเคลียสชนิดต่าง ๆ กัน ถึงเกือบ ๓๐๐ ชนิด

วิธีการที่ส่วนประกอบขั้นมูลฐาน คือ นิวตรอนและโปรตอน รวมกันเข้าเป็นนิวเคลียสของอะตอมของธาตุต่าง ๆ นั้น มีความโน้มเอียงที่เห็นได้อย่างชัดเจน อะตอมของธาตุเบา ๆ เช่น อลูมิเนียม มีโปรตอนและนิวตรอนในใจกลางหรือนิวเคลียสรวมกันเป็นจำนวน ๒๗ คือ ๑๓ โปรตอน และ ๑๔ นิวตรอน เมื่อขึ้นไปถึงธาตุที่มีน้ำหนักปานกลาง เช่น ไอโอดีน (อะตอมมิกนัมเบอร์ ๕๓) เราพบว่ามีนิวตรอน ๗๔ ตัว และโปรตอน ๕๓ ตัว ในนิวเคลียสของไอโอดีน ๑๒๗ การมีนิวตรอนมากกว่าโปรตอนยิ่งเห็นได้ชัดยิ่งขึ้นในนิวเคลียสของยูเรเนียม ๒๓๘ คือ มีนิวตรอน ๑๔๖ และโปรตอน ๙๒ ตัว สำหรับจำนวนโปรตอนจำนวนหนึ่งนั้น จะมีจำนวนนิวตรอนอยู่เพียงบางจำนวน

เท่านั้นซึ่งเมื่อรวมกันแล้ว ทำให้เกิดนิวเคลียสซึ่งมั่นคงถาวร องค์ประกอบเช่นนี้มีอยู่เพียงอย่างเดียวสำหรับไอโอดีน ๑๒๗ คือ ถ้านิวเคลียสของมันถูกบังคับให้มีนิวตรอนมากกว่า ๗๔ มันจะกลายเป็นนิวเคลียสซึ่งไม่มีความถาวร หรือมีกัมมันตภาพ เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยปล่อยรังสีเบตาออกมา และกลายเป็นอะตอมของธาตุซีนอน

จากที่ได้กล่าวถึงมาแล้วเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสีนั้น เรารู้ว่าธาตุหนัก ๆ บางธาตุไม่มีความถาวรโดยธรรมชาติ เราแบ่งธาตุกัมมันตภาพตามธรรมชาติอันสืบเนื่องมาจากธาตุหนัก ๆ เช่น ธาตุยูเรเนียม ๒๓๘ ออกได้เป็นสี่พวก ธาตุเรเดียม ๒๒๖ เป็นสมาชิกของพวกหนึ่งในจำนวนสี่พวกนั้น ธาตุนี้มีครึ่งชีวิต ๑,๖๐๐ ปี ซึ่งนับว่าสั้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับอายุของโลกเรา เราพบเรเดียมตามธรรมชาติ เพราะมันเกิดขึ้นมาเรื่อย ๆ โดยการสลายตัวของยูเรเนียมซึ่งมีอายุยาวมาก ยูเรเนียม ๒๓๘ มีครึ่งชีวิตนานถึง ๔.๕ พันล้านปี เนื่องจากโลกเราเกิดขึ้นเมื่อประมาณห้าพันล้านปีมาแล้ว ปริมาณยูเรเนียม ๒๓๘ จึงสูญสิ้นไปกว่าครึ่งเล็กน้อย สิ่งซึ่งเหลืออยู่แทนที่ยูเรเนียมทุกวันนี้คือตะกั่ว ๒๐๖ ซึ่งเป็นสมาชิกปลายสุดของพวกยูเรเนียม เราอาจอาศัยสินแร่ซึ่งมียูเรเนียมเจือปนอยู่เป็นเครื่องวัดอายุของโลกได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสินแร่ ซึ่งตลอดเวลาที่ผ่านมามนุษย์ไม่ได้รบกวนโดยการขุดค้น

ขึ้นมา การวัดอัตราส่วนระหว่างยูเรเนียม ๒๓๘ กับตะกั่ว ๒๐๖ ทำให้นักวิทยาศาสตร์คำนวณได้โดยตรงว่าสินแร่นั้นเกิดขึ้นเมื่อใด ได้มีการคำนวณทำนองเดียวกันนี้สำหรับลูกอุกกาบาตซึ่งตกลงมายังโลก เราเชื่อว่าระบบสุริยะของเรามีอายุประมาณห้าพันล้านปี โดยการวัดด้วย *"นาฬิกาอะตอม"*

นอกจากธาตุกัมมันตภาพชนิดหนัก ๆ แล้วยังมีธาตุกัมมันตภาพเบา ๆ ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติอีกด้วย ธาตุเหล่านี้เกิดขึ้นเดี่ยว ๆ ไม่ได้อยู่ในจำพวกทั้งสี่ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ธาตุกัมมันตภาพประเภทโดดเดี่ยวที่สำคัญมากธาตุหนึ่ง คือ โปแตสเซียม ๔๐ โดยเฉลี่ยแล้วคนเราแต่ละคนมีโปแตสเซียมอยู่ในร่างกายประมาณครึ่งปอนด์ และในครึ่งปอนด์นี้เป็นโปแตสเซียม ๔๐ เสียประมาณเศษหนึ่งส่วนพันออนซ์ เนื่องจากมีโปแตสเซียมชนิดนี้อยู่นี่เอง เราจึงมีกัมมันตภาพรังสีเล็กน้อยทุก ๆ วินาที โปแตสเซียม ๔๐ จำนวน ๗,๐๐๐ อะตอม จะสลายตัว กัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นนี้คิดเป็นหนึ่งในห้าส่วนของรังสีที่มนุษย์ได้รับจากสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ โปแตสเซียม ๔๐ นับได้ว่าเป็นอะตอมที่แปลกปลอมเข้ามาปะปนอยู่กับธาตุเบา ๆ อื่น ๆ เมื่อตอนที่โลกเกิดขึ้นนั้นอาจจะมีไอโซโทปซึ่งมีกัมมันตภาพอยู่หลายชนิดก็ได้ แต่ได้สูญสิ้นไปหมดเหลือแต่โปแตสเซียม ๔๐

ในบรรดาธาตุเบาๆ นั้นยังมีอีกธาตุหนึ่งซึ่งเป็นธาตุกัมมันตภาพ คือ คาร์บอน ๑๔ แต่ครึ่งชีวิตของธาตุน้อยมาก (๕,๗๐๐ ปี) จนเราต้องอนุมานเอาว่ามันเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา มิฉะนั้นก็คงจะหมดสิ้นไปแล้ว คาร์บอน ๑๔ เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศของโลกโดยการที่นิวตรอนในรังสีคอสมิก กระทบกับไนโตรเจน ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดคาร์บอน ๑๔ ซึ่งอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ แทรกซึมเข้าไปอยู่ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด คนเราได้รับกัมมันตภาพรังสีจากคาร์บอน ๑๔ น้อยกว่าที่ได้รับจากโปแตสเซียมมาก

คาร์บอน ๑๔ มีประโยชน์มาก ทำให้เรารู้อายุของโบราณวัตถุได้ เช่น อายุของเรือบูชาพระอาทิตย์ ในหลุมฝังศพของชาวอียิปต์ เนื่องจากคาร์บอน ๑๔ เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศตลอดเวลา ไม้ที่ใช้สร้างเรือจึงมาจากต้นไม้ซึ่งต้องมีธาตุนี้อยู่บ้าง เมื่อต้นไม้ถูกโค่นการรับคาร์บอนจากอากาศก็หยุดลง ครั้นมาถึงปัจจุบันปริมาณคาร์บอน ๑๔ ในเนื้อไม้จะลดลง เพราะในช่วงเวลาเป็นพัน ๆ ปีนั้นอะตอมสลายตัวอยู่ตลอดเวลา เรารู้อัตราการสลายตัวของคาร์บอน ๑๔ เราจึงรู้อายุของเรือบูชาพระอาทิตย์ได้อย่างแน่นอน โดยวัดปริมาณคาร์บอน ๑๔ ที่เหลืออยู่ในเนื้อไม้ ดร. วิลลาร์ด เอฟ. ลิบบี เป็นผู้ริเริ่มวิธีการที่น่าทึ่งในการหา

อายุของสิ่งของในอดีตแบบนี้เป็นคนแรก ตั้งแต่นั้นมานักโบราณคดีได้ใช้วิธีนี้กันทั่วโลก

ปริมาณคาร์บอน ๑๔ ซึ่งมีอยู่ตามธรรมชาติ ในสิ่งมีชีวิตทั้งหลายนั้นน้อยมาก จึงต้องมีกลวิธีพิเศษสำหรับวัด อย่างไรก็ตามเราอาจทำธาตุนี้ขึ้นเป็นจำนวนมาก ๆ ได้ โดยใช้เครื่องไซโคลตรอนหรือเครื่องมือสำหรับเร่งอนุภาคชนิดอื่น คาร์บอน ๑๔ ที่ทำขึ้นมาได้ มีประโยชน์ในการวิจัยเกี่ยวกับชีววิทยาและการแพทย์มาก เราอาจใช้ธาตุนี้ผสมกับยาแล้วใช้ทดลองกับสัตว์หรือมนุษย์ ซึ่งทั้งนี้ก็ต้องใช้เป็นปริมาณน้อยเหลือเกิน เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี เมื่อเราเอาเลือดหรือเนื้อเยื่อมาตรวจดู ก็จะรู้ได้ว่าคาร์บอน ๑๔ ได้ผ่านส่วนใดของร่างกายบ้าง การทดลองเช่นนี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับกลไกของร่างกายเท่านั้น แต่ยังช่วยให้เกิดความรู้อันจะทำให้วิธีการรักษาพยาบาลก้าวหน้าไปอีกด้วย สารกัมมันตภาพซึ่งเอามาใช้ประโยชน์เช่นนี้ เรียกว่า เทรซเซอร์

เทรซเซอร์ซึ่งเป็นสารกัมมันตภาพยังมีอยู่อีกหลายชนิด เช่น ไอโซโทปของฟอสฟอรัส โซเดียม เหล็ก ทอง เป็นต้น ธาตุเหล่านี้ช่วยให้ทำการสำรวจหน้าที่ต่าง ๆ ของเซลในร่างกายมนุษย์ได้อย่างกว้างขวาง และใช้กันในการค้นคว้าด้านอื่น ๆ อีกมากด้วย ไอโซโทปของธาตุกัมมันตภาพเพียงเล็กน้อย มีราคาค่างวด

เพียงสองสามเซ็นต์ อาจทำให้เกิดประโยชน์ได้อย่างมากทีเดียว ทั้ง ๆ ที่ไอโซโทปกัมมันตภาพของฟอสฟอรัสอย่างบริสุทธิ์เพียงไม่ถึงเอานซ์มีราคาตั้งพันล้านดอลลาร์

ได้พบกันว่าธาตุกัมมันตภาพมีคุณค่าต่อชาวนามาก เพราะการวิจัยโดยใช้เทรซเซอร์ ช่วยให้นักวิทยาศาสตร์เข้าใจการเจริญเติบโตของพืช ทำให้รู้ว่าปุ๋ยอะไรจึงจะดีที่สุดสำหรับพืชแต่ละอย่าง และรู้วิธีที่จะต่อสู้กับศัตรูพืชอย่างได้ผล การวิจัยเกี่ยวกับอะตอมในศตวรรษที่ผ่านมาเริ่มเกิดประโยชน์ต่อชาวนา คือทำให้พืชผลดีขึ้นและค่าใช้จ่ายลดน้อยลง

วงการอุตสาหกรรมก็ได้รับประโยชน์ โดยการใช้กัมมันตภาพด้วยเช่นเดียวกัน ทำให้สามารถรู้ถึงการสึกหรอของเครื่องยนต์และประสิทธิภาพของการใช้น้ำมันหล่อลื่นได้อย่างรวดเร็ว การศึกษาเกี่ยวกับความผิดต่าง ๆ อาศัยวิธีใหม่นี้ทั้งสิ้น ตัวอย่าง เช่น อาจจะเอาสารกัมมันตภาพเพียงเล็กน้อยผังยางรถยนต์ไว้ แล้วศึกษาความสึกหรอจากการใช้โดยอาศัยไกเกอร์เคาน์เตอร์ บริษัทผลิตเครื่องซักผ้าอาจศึกษาการทำงานของเครื่องได้โดยอาศัยเทรซเซอร์ อาจประเมินผลของการใช้สบู่และน้ำยาซักฟอกต่าง ๆ โดยทำให้สารกัมมันตภาพติดเสื้อผ้า แล้วเอาเสื้อผ้าไปซักด้วยน้ำยาชนิดต่าง ๆ และวัดดูว่ากัมมันตภาพลดลงมากน้อยเพียงใด

โรงงานทำบุหรี่ใช้เครื่องวัดซึ่งอาศัยกัมมันตภาพรังสีสำหรับตรวจปริมาณของยาเส้นในบุหรี่ที่มวนแล้ว คือ ให้รังสีผ่านมวนบุหรี่ ปริมาณรังสี ซึ่งถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นยาที่อยู่ข้างใน ถ้ามากเกินไปหรือน้อยไป ปริมาณรังสีซึ่งออกไปทางอีกข้างหนึ่งของบุหรี่จะเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะรู้ได้โดยใช้เครื่องมืออีเล็กโตรนิก วัดกระบวนการทั้งหมดนี้เป็นกระบวนการแบบอัตโนมัติ รวดเร็วมากไม่ทำให้การผลิตช้า และไม่ทำให้บุหรี่เป็นพิษ (บุหรี่ซึ่งมีตำหนิจะถูกคัดทิ้งออกไปโดยอัตโนมัติเช่นเดียวกัน)

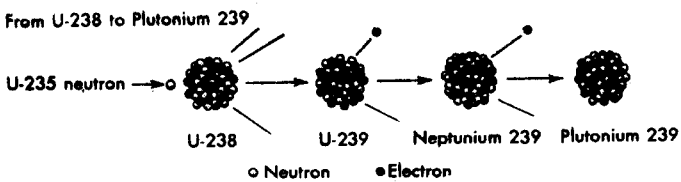
เครื่องวัดความหนาซึ่งอาศัยกัมมันตภาพรังสี ก็ใช้กันมากในวงการอุตสาหกรรม คือใช้ในการควบคุมความหนาของแผ่นวัตถุ ไม่ว่าจะเป็น เหล็กกล้า อลูมิเนียม กระดาษ ปลาสติก หรือ ลิโนเลียม วิธีการก็คล้ายกับเครื่องตรวจบุหรี่ คือใช้รังสีส่องเข้าไปจากข้างหนึ่งของแผ่นโลหะแล้ว วัดปริมาณรังสีที่ผ่านแผ่นโลหะอันเคลื่อนที่ไปอย่างรวดเร็วนั้นทางอีกข้างหนึ่ง ถ้าแผ่นโลหะตรงไหนบางไปหรือหนาไป เครื่องมืออีเล็กโตรนิกจะส่งสัญญาณไปยังเครื่องรีดแผ่นโลหะ ซึ่งจะทำให้มีการปรับปรุงขึ้นโดยอัตโนมัติ แผ่นโลหะจะถูกรีดให้มีความหนาโดยสม่ำเสมอ

เราอาจทำอะตอมกัมมันตภาพขึ้นมาได้ อย่างน้อยที่สุดหนึ่งชนิด สำหรับธาตุแต่ละธาตุ ตัวอย่างเช่นไฮโดรเจน ซึ่งปกติประกอบด้วย H^1 และ H^2 (ดิวทีเรียม หนักสองเท่าของไฮ-

โดรเจนธรรมดา) เราอาจทำไฮโดรเจนซึ่งหนักเป็นสามเท่าของธรรมดา ที่เรียกว่า H^3 หรือ T^3 (ทริเทียม) ได้ โดยใช้นิวตรอนยิงลิเธียม ๖ ธาตุเบา ๆ ส่วนมากมีไอโซโทปกัมมันตภาพ ธาตุละ ๓, ๔ หรือ ๕ ชนิด ธาตุที่มีน้ำหนักปานกลางจะมีมากกว่านี้ เช่น ไอโอดีน มีไอโซโทปชนิดถาวรอยู่เพียงชนิดเดียวคือ ไอโอดีน ๑๒๗ แต่มีไอโซโทปกัมมันตภาพในช่วงไอโอดีน ๑๑๙ ถึง ไอโอดีน ๑๓๙ คิดเป็นไอโซโทปทั้งหมดยี่สิบชนิด สำหรับธาตุในตารางธาตุนับไปถึงธาตุที่ ๘๑ ได้มีผู้พบไอโซโทปกัมมันตภาพแล้วราว ๆ ๗๐๐ ชนิด ต่อจากนี้ไปจนถึงธาตุที่ ๙๒ จะพบธาตุกัมมันตภาพทั้งประเภทที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และถูกสร้างขึ้นมา รวมกันราว ๑๗๐ ชนิด

ธาตุยูเรเนียมเป็นธาตุสุดท้ายในตารางธาตุอยู่เป็นเวลานานทีเดียว ยูเรเนียม ๒๓๘ เป็นธาตุหนักที่สุดที่มนุษย์รู้จัก ต่อมาในปี ๑๙๓๖ ฮาน และ ชะตราซมันน์ ซึ่งตอนนั้นร่วมทำงานอยู่กับ ลีเซ่อ ไมท์เนอร์ ได้สรุปผลจากการทดลองว่ายังมีธาตุซึ่งหนักกว่านั้น ซึ่งได้จากการยิงยูเรเนียม ๒๓๘ ด้วยนิวตรอน เมื่อยูเรเนียม ๒๓๘ จับนิวตรอนควรจะเกิดยูเรเนียม ๒๓๙ และเขาทั้งสองเห็นว่ายูเรเนียม ๒๓๙ นี้ ควรจะปล่อยอนุภาคเบตาอีกต่อหนึ่งแล้วตัวเองกลายเป็นธาตุที่ ๙๓ คนทั้งสองสามารถวัดกัม-

มันตภาพของยูเรเนียม ๒๓๙ และพบว่ามีครึ่งชีวิต ๒๓ นาที แต่ไม่สามารถใช้วิธีการทางเคมีแสดงให้เห็นได้ว่ามีธาตุที่ ๙๓ อยู่



รูปที่ ๓๑ นิวเคลียสของยูเรเนียม ๒๓๘ จับนิวตรอนหนึ่งตัว กลายเป็นยูเรเนียม ๒๓๙ ซึ่งปล่อยอนุภาคเบตา (อีเล็กตรอน) แล้วกลายเป็นเนปจูเนียม ๒๓๙ นิวเคลียสหลังนี้ปล่อยอนุภาคเบตาอีกครั้งหนึ่ง เกิดเป็นธาตุใหม่คือ พลูโตเนียม ๒๓๙

ตอนต้นปี ๑๙๔๐ นักวิทยาศาสตร์อเมริกันสองคนประสบความสำเร็จในการค้นหาธาตุที่ ๙๓ ดร. เอ็ดวิน แม็คมิลแล็น กับ ดร. พีลลิป เอเบลสัน ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการรังสี ของมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ทั้งสองยิงยูเรเนียมซึ่งทำเป็นแผ่นบาง ๆ ด้วยนิวตรอน อะตอมของยูเรเนียมบางอะตอมเกิดฟิชชั่นขึ้น ชิ้นส่วนของอะตอมที่เกิดฟิชชั่นนี้กระเด็นออกมา ยูเรเนียมที่เหลือจึงไม่มีส่วน ของอะตอมที่เกิดฟิชชั่นซึ่งมีกัมมันตภาพรังสีสูงมากปะปนอยู่ การทำเช่นนี้ทำให้แม็คมิลแล็น และเอเบลสัน ศึกษาแผ่นยูเรเนียมได้โดยกัมมันตภาพรังสีของชิ้นส่วนของอะตอมที่เกิดฟิชชั่นไม่มารบกวน ทั้งสองได้พบกัมมันตภาพรังสีของยูเรเนียม ๒๓๙ ที่ฮานและเพื่อนร่วมงานเคยพบมา

แล้ว สามารถใช้วิธีการทางเคมีค้นพบธาตุที่ ๙๓ ซึ่งอยู่ในแผ่นยูเรเนียมด้วย

ทั้งสองตั้งชื่อธาตุใหม่ว่า เนปจูเนียม (Np) ตามชื่อดาวเนปจูน ซึ่งอยู่ใกล้ดาวยูเรนัสมากที่สุด เนปจูเนียมซึ่งพบนี้คือ Np^{239} นักวิทยาศาสตร์ทั้งสองสามารถหาครึ่งชีวิตได้ว่าเท่ากับ ๒.๓ วัน เนื่องจากเมื่ออะตอมของธาตุปล่อยอนุภาคเบตาตำแหน่งในตารางธาตุจะสูงขึ้นหนึ่งที่ ดังนั้นการสลายตัวของ Np^{239} จึงควรจะให้ธาตุที่ ๙๔ ทั้งแม็คมิลแล็นและเอเบลสันได้พยายามหาร่องรอยของธาตุนี้ แต่ก็ไม่พบ

ในปี ๑๙๔๐ นักวิทยาศาสตร์ที่มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียอีกกลุ่มหนึ่ง มี ดร. เกล็น ที. ซีบอร์ก เป็นหัวหน้าทำการค้นหาธาตุซึ่งมีอะตอมมิกนัมเบอร์มากกว่ายูเรเนียมตามแนวทางใหม่ คือยิงยูเรเนียมด้วยไฮโดรเจนชนิดหนัก (ดิวทีรอน หรือ H^2) ซึ่งได้จากเครื่องไซโคลตรอน ปฏิกิริยานิวเคลียร์ซึ่งเกิดขึ้นเป็นไปตามสมการ

$$_{92}U^{238} + {}_{1}H^{2} = {}_{93}Np^{238} + 2\,{}_{0}n^{1}$$

ยูเรเนียม + ดิวทีรอน = เนปจูเนียม + นิวตรอน

ปฏิกิริยานี้อาจจัดเข้าในประเภท *"เข้าไป"* แล้ว *"ออกมา"* คือ ดิวทีรอนตัวหนึ่ง *"เข้าไป"* ซึ่งหมายความว่าถูกกลืนโดย

ยูเรเนียม ๒๓๘ และมีนิวตรอน *"ออกมา"* สองตัว เนื่องจากดิวทีรอนประกอบขึ้นด้วยโปรตอน ๑ ตัว และนิวตรอน ๑ ตัว เราอาจมองปฏิกิริยานี้ในแง่ที่ว่า โปรตอนตัวหนึ่งแลกที่กับนิวตรอนในนิวเคลียสตัวหนึ่ง ในการนี้แมสนัมเบอร์ยังคงมีค่าเท่าเดิม แต่การเปลี่ยนโปรตรอนกับนิวตรอน มีค่าเท่ากับเลื่อนตำแหน่งในตารางธาตุขึ้นไปหนึ่งตำแหน่ง ปฏิกิริยานี้จึงทำให้เกิดไอโซโทปของเนปจูเนียม ซึ่งในที่นี้ได้แก่ Np^{238} ซีบอร์กและเพื่อนร่วมงานพบว่าไอโซโทปนี้สลายตัวกลายเป็นธาตุที่ ๙๔ ต่อไป ซึ่งพิสูจน์ได้โดยวิธีการทางเคมี ธาตุใหม่นี้ได้รับการตั้งชื่อว่าพลูโตเนียม (Pu) ตามชื่อของดาวพลูโต ปรากฏว่าไอโซโทปที่พบนี้คือ Pu^{238} และไอโซโทปนี้ปล่อยอนุภาคแอลฟา มีครึ่งชีวิต ๙๐ ปี ต่อมาก็ได้พบไอโซโทป Pu^{239} ที่แม็คมิลแล็นและเอเบลสันพยายามค้นหาและพบว่าเป็นธาตุที่ปล่อยอนุภาคแอลฟา มีครึ่งชีวิต ๒๔,๔๐๐ ปี

ธาตุเนปจูเนียมและพลูโตเนียม เป็นธาตุซึ่งมนุษย์สร้างขึ้นมาในปี ๑๙๔๐ ไม่ต้องสงสัยว่าธาตุทั้งสองนี้ครั้งหนึ่งเคยมีอยู่แล้วในโลก แต่เนื่องจากมีอายุสั้นจึงได้หมดสิ้นไปนานแล้ว การค้นพบธาตุทั้งสองนี้เป็นเรื่องน่าตื่นเต้นมาก เพราะหมายความว่ามนุษย์ได้ยืดหัวหาดสำหรับการบุกรุกเข้าไปในอาณาบริเวณใหม่ซึ่ง

อยู่เลยยูเรเนียมไปในตารางธาตุ ใครจะบอกได้ว่าอาจจะพบธาตุใหม่ อะไรต่อไปอีก และคุณสมบัติของธาตุใหม่ ๆ เหล่านี้เป็นอย่างไรบ้าง

เราต้องไม่ลืมว่าตอนที่พลูโตเนียมถูกค้นพบนั้น มีนักวิทยาศาสตร์กลุ่มหนึ่งกำลังทำงานอย่างลับ ๆ หาทางทำระเบิดปรมาณูเป็นที่รู้กันว่าวัสดุสำคัญสำหรับลูกระเบิดก็คือ ยูเรเนียม ๒๓๕ แต่การทำยูเรเนียมเป็นจำนวนมากนั้น เป็นปัญหาซึ่งสลับซับซ้อนและยุ่งยากยิ่งนัก ในการสอดส่องมองหาวัสดุอย่างอื่นสำหรับทำลูกระเบิด ซึ่งอาจจะหาได้ง่ายกว่านั้น นักวิทยาศาสตร์เหล่านี้ได้หันมาพินิจพิจารณาธาตุที่ค้นพบใหม่นี้ จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทำให้รู้อย่างแน่นอนว่าพลูโตเนียม ๒๓๙ จะเกิดฟิชชั่นเมื่อถูกยิงด้วยนิวตรอน เช่นเดียวกับที่ยูเรเนียม ๒๓๕ เกิดฟิชชั่น สิ่งซึ่งท้าทายนักวิทยาศาสตร์ก็คือว่าจะทำธาตุที่ ๙๔ เป็นปริมาณมาก ๆ ได้หรือไม่ ถึงแม้จะไม่มีใครรู้จำนวนพลูโตเนียมที่ต้องการอย่างแน่นอน แต่ก็รู้กันว่าแม้จะทำลูกระเบิดเป็นจำนวนน้อยที่สุดแล้ว ก็ยังคงต้องใช้พลูโตเนียมเป็นร้อย ๆ ปอนด์ทีเดียว

คำตอบปัญหานี้อาจสรุปได้ง่าย ๆ ว่า จำเป็นต้องมีเครื่องมือซึ่งจะผลิตนิวตรอนเป็นจำนวนมาก ๆ ถ้าสามารถทำให้ยูเรเนียม ๒๓๘ ถูกนิวตรอนกระแทกอย่างทั่วถึง ก็อาจใช้วิธีการทางเคมีแยกเอาพลูโตเนียมที่เกิดขึ้นมาได้ ปฏิกิริยาลูกโซ่ภายใต้การควบคุมที่เฟอร์มีกำลังทดลองอยู่ มีท่าทีว่าจะใช้เป็นแหล่งนิวตรอนจำนวน

มากได้ ในบทที่แล้วมาได้กล่าวถึงเครื่องมือขนาดมหึมาหลายเครื่องซึ่งสร้างไว้ใกล้ ๆ แม่น้ำโคลัมเบีย วัตถุประสงค์ของเครื่องมือเหล่านี้เพื่อผลิตพลูโตเนียม

หลังสงคราม นักวิทยาศาสตร์มีเวลาพอที่จะให้ความสนใจแก่ธาตุหลังยูเรเนียมได้อย่างเต็มที่ ดร. ซีบอร์ก เป็นหัวหน้านักวิทยาศาสตร์กลุ่มหนึ่งที่ห้องปฏิบัติการรังสี ที่ เบิร์กเลย์ แคลิฟอร์เนีย คราวนี้บรรดานายพรานปรมาณูตัดสินใจใช้กระสุนขนาดใหญ่ขึ้นในการยิงยูเรเนียม คือใช้อนุภาคแอลฟาพลังงานสูงซึ่งได้จากเครื่องไซโคลตรอน และก็ได้พบไอโซโทปใหม่ของพลูโตเนียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

$$_{92}U^{233} + {}_{2}He^{4} = {}_{94}Pu^{241} + {}_{0}n^{1}$$

ยูเรเนียม + อนุภาคแอลฟา = พลูโตเนียม + นิวตรอน

พลูโตเนียม ๒๔๑ นี้มีครึ่งชีวิตสิบปี และปล่อยอนุภาคเบตาในการสลายตัว ซึ่งหมายความว่า Pu^{241} เลื่อนขึ้นไปในตารางธาตุอีกหนึ่งที่ กลายเป็นไอโซโทปของธาตุที่ ๙๕ ธาตุใหม่นี้ถูกตั้งชื่อว่าอเมริเซียม (Am) เพื่อเป็นเกียรติแก่ประเทศที่มันถือกำเนิดขึ้นมา Am^{241} นี้เป็นธาตุที่ถาวรพอดู มีครึ่งชีวิตห้าร้อยปี เนื่องจากธาตุใหม่นี้มีอยู่เพียงนิดเดียว จึงต้องใช้กรรมวิธีพิเศษในการจับต้อง ในภาพแสดงธาตุอเมริเซียมบรรจุอยู่ในหลอดทดลองขนาดจิ๋ว วางเทียบกับรูเข็ม เพื่อให้พอจะนึกเห็นภาพขนาดของมันออก





รูปที่ ๓๒ ภาพถ่ายของหลอดทดลองขนาดจิ๋ว ซึ่งมีธาตุอเมริเซียมข้างในเล็กน้อย ข้างใต้หลอดมีโคนเข็มอย่างเล่มหนึ่งเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นขนาดของหลอด (Courtesy the University of California Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley.)

รูปที่ ๓๓ แสดงธาตุที่ ๙๖ คูเรียม ซึ่งมีปริมาณนิดเดียวเปล่งแสงออกมาทำให้สามารถถ่ายรูปในห้องมืดได้ (Courtesy the University of California Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley.)

ในการไต่ตามตารางธาตุสูงขึ้นไปนั้นจำเป็นต้องใช้ "*ยกพื้น*" ใหม่เสียแล้ว นักวิทยาศาสตร์ที่เบิร์กเลย์ เลือกที่มั่นซึ่งล้ำหน้าออกไปสำหรับโจมตี แทนที่จะใช้ยูเรเนียมเป็นจุดเริ่มต้นในการทดลอง เขาใช้อนุภาคแอลฟายิงพลูโตเนียม ๒๓๙ ได้ไอโซโทปซึ่งมีแมสนัมเบอร์ ๒๔๒ และอะตอมมิกนัมเบอร์ ๙๖ ปฏิกิริยานี้ทำได้สำเร็จระหว่างสงคราม แต่เนื่องจากทุกสิ่งทุกอย่างเป็น

ความลับ จึงไม่มีการเปิดเผยถึงเรื่องธาตุใหม่นั้น จนกระทั่งเวลาต่อมา ธาตุที่ ๙๖ ได้รับการตั้งชื่อว่า คูเรียม (Cm) เพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้ค้นพบธาตุเรเดียม ไอโซโทปของคูเรียมถูกผลิตขึ้นมาหลายชนิดด้วยกัน บางชนิดมีกัมมันตภาพรังสีรุนแรงมาก ความร้อนที่เกิดจากรังสีถึงกับทำให้สารละลายของธาตุนี้เดือดได้ ในรูปแสดงให้เห็นสารละลายคูเรียม ซึ่งปล่อยแสงออกมามากพอที่จะถ่ายรูปในความมืดได้

ธาตุที่ ๙๗ ถูกประกาศออกมาในปลายปี ๑๙๔๙ มีชื่อว่า เบิร์กเลียม ตามชื่อเมืองที่มีการวิจัยค้นคว้ากัน ในการทำธาตุนี้ใช้ธาตุอเมริเซียมเป็นเป้าสำหรับอนุภาคแอลฟา ซึ่งมีพลังงานสูง ไอโซโทปต่าง ๆ ของเบิร์กเลียมมีครึ่งชีวิตต่างๆกัน จาก ๔ พันถึง ๗ พันปี

การพบธาตุเหนือขึ้นไปจากเบิร์กเลียม ได้จากการใช้กระสุนนิวเคลียร์ขนาดใหญ่ขึ้นไปอีก คือใช้เครื่องไซโคลตรอนเร่งคาร์บอน ๑๒ ซึ่งหนักกว่าอนุภาคแอลฟาสามเท่าให้มีความเร็วสูงแล้วให้ไปกระทบเป้ายูเรเนียม ๒๓๘ บางการทดลองก็ใช้อนุภาคแอลฟายิงคูเรียม โดยวิธีเหล่านี้ทำให้ได้ไอโซโทปของธาตุที่ ๙๘ ธาตุใหม่นี้มีชื่อว่า แคลิฟอร์เนียม (Cf) ซึ่งได้มีการประกาศการค้นพบเมื่อเดือนมีนาคม ๑๙๕๐

การทำธาตุถัดไปจากแคลิฟอร์เนียมอีกสองธาตุ เกิดขึ้นนอกห้องทดลอง ร่องรอยของธาตุทั้งสองมีอยู่ในบริเวณที่ทำการทดลองลูกระเบิดแบบ "ซูเปอร์" ที่สนามทดลองระเบิดปรมาณูของสหรัฐ ฯ ที่หมู่เกาะมาร์แชล เศษหินปะการังจำนวนหลายร้อยปอนด์ถูกรวบรวมมาจากบริเวณที่มีการทดลองระเบิด เมื่อวันที่ ๑ พฤศจิกายน ๑๙๕๒ หินเหล่านี้ถูกนำไปแยกแยะทางเคมีที่ห้องทดลองของสำนักงานพลังงานปรมาณูหลายแห่ง ด้วยความหวังว่าจะได้พบร่องรอยของธาตุที่ ๙๙ หรือที่ ๑๐๐ อันเกิดจากการที่ยูเรเนียม ๒๓๘ จับนิวตรอนหลาย ๆ ครั้งติดต่อกันไปบ้าง จำนวนอะตอมของธาตุที่ ๙๙ ที่ได้พบนั้นมีน้อยอย่างแทบไม่น่าเชื่อ คือเป็นกลุ่มอะตอมประมาณ ๒๐๐ อะตอม ธาตุนี้ถูกตั้งชื่อว่า เฟอร์เมียม (Fm) เป็นเกียรติแก่ เอนริโค เฟอร์มิ ธาตุที่ ๑๐๐ มีชื่อว่า ธาตุไอน์สไตเนียม (E) ตามชื่อของ อัลเบิต ไอน์สไตน์ การค้นพบเหล่านี้ทำให้ธาตุซึ่งเรารู้จักมีจำนวนครบ ๑๐๐ พอดี ถึงแม้นักวิทยาศาสตร์จะเชื่อกันว่า อาจจะพบธาตุอื่น ๆ เพิ่มเติมอีก แต่ก็รู้ว่าจะทำแต่ละธาตุขึ้นมาได้เป็นจำนวนน้อย ๆ เท่านั้น ฉะนั้นกลวิธีในการวิเคราะห์เพื่อให้รู้ว่าเป็นอะไรจึงต้องเป็นวิธีซึ่งละเอียดถี่ถ้วนอย่างสุดยอด

มีการทดลองอันแยบคายหลายการทดลองที่เดียวที่ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อที่จะให้สามารถหาอะตอมได้พบ แม้ว่าจะมีอยู่เพียง

สองสามอะตอมก็ตาม ในปี ๑๙๕๕ นักวิทยาศาสตร์ที่เบิร์กเลย์พบธาตุที่ ๑๐๑ โดยอาศัยการทดลอง ซึ่งเดิมทีเดียวจะมีอะตอมของธาตุไอน์สไตเนียมเพียง ๑ พันล้านอะตอม ถูกยิงด้วยอนุภาคแอลฟา นักวิทยาศาสตร์เหล่านั้นได้เสนอให้เรียกชื่อธาตุที่พบใหม่นี้ว่า เมนเดลีเรียม (Mv) เพื่อเป็นเกียรติแก่ ดมิตริ เมนเดลีฟ นักวิทยาศาสตร์รัสเซียผู้มีชื่อเสียง

ในเดือนกรกฎาคม ๑๙๕๗ ก็ยังมีการพบธาตุใหม่อีกธาตุหนึ่ง คือธาตุที่ ๑๐๒ และถูกเรียกชื่อว่า โนเบลเลียม (No) ตามชื่อของ อัลเฟร็ด โนเบล และชื่อสถาบันอันมีชื่อเสียงของเขาที่สวีเดน ในอนาคตก็คงจะมีการค้นพบธาตุอื่น ๆ อีก ปัจจุบันนี้ อะตอมใหม่ ๆ เหนือยูเรเนียมขึ้นไปมีจำนวนราว ๆ ๕๐ ชนิด เบ็ดเสร็จด้วยกัน นับจากไฮโดรเจน จนถึงอะตอมที่หนักที่สุด มีอะตอมชนิดต่าง ๆ รวมกันประมาณ ๑,๒๐๐ ชนิด แต่ละชนิดมีองค์ประกอบขั้นมูลฐานแตกต่างกันไป นับว่าเป็นเครืออะตอมเครือใหญ่ ซึ่งเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะสามสิบปีที่ผ่านมา เนื่องจากนักวิทยาศาสตร์มีกลวิธีและเครื่องไม้เครื่องมือดีขึ้น

๑๓

พลังงานจากดวงดาว

บรรดาดาวฤกษ์เป็นจำนวนมิรู้กี่ล้านล้านดวงในจักรวาลอันกว้างใหญ่ไพศาลนั้น ต่างก็มีคุณสมบัติอย่างหนึ่งเหมือนกัน คือทุกดวงเป็นกลุ่มก๊าซที่กำลังลุกเป็นไฟ ความร้อนซึ่งผุดออกมาจากภายในดวงดาวอันร้อนจัดนี้ทำให้เกิดแสงสว่างจ้า และแสงนี้เองที่ทำให้เราเห็นดาวต่าง ๆ ได้ ดาวที่อยู่ใกล้ที่สุด คือดวงอาทิตย์ของเรา เป็นต้นตอของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ บนพื้นโลก แสงอาทิตย์ทำให้โลกเราอบอุ่น น้ำในมหาสมุทรไม่แข็งตัว และทำให้พืชเจริญงอกงาม

โลกเราเป็นแต่เพียงลูกกลมเล็ก ๆ ลูกหนึ่ง เส้นผ่าศูนย์กลางราว ๆ ๘,๐๐๐ ไมล์ ล่องลอยไปในวงโคจรอย่างมิรู้จักหยุดหย่อนภายใต้แรงโน้มถ่วงของดวงอาทิตย์ ระยะทางเฉลี่ยจากโลกถึงดวงอาทิตย์ราว ๆ ๙๓ ล้านไมล์ เนื่องจากอยู่ห่างเช่นนี้ โลกจึงได้รับความร้อนและแสงที่ออกมาจากดวงอาทิตย์ แต่เพียงส่วนน้อยเท่านั้น ความร้อนที่แผ่ออกไปในอวกาศมากกว่าที่มาถึงโลกเราตั้งสองพันล้านเท่า

ปัญหามีอยู่ว่าความร้อนในดวงอาทิตย์ของเรา ดำรงอยู่ได้อย่างไร ทำไมจึงส่งความร้อนออกมาได้โดยสม่ำเสมอเป็นเวลาตั้งห้าพันล้านปีมาแล้ว เป็นไปได้ไหมว่าดวงอาทิตย์จะเย็นลงในที่สุด

เราสามารถให้คำตอบแก่ปัญหาเหล่านี้ได้ เมื่อไม่นานมานี้เอง โดยอาศัยข้อมูลจากการวิจัยค้นคว้าทางนิวเคลียร์ ตลอดเวลาที่ผ่านมา ตั้งแต่มนุษย์ยังอาศัยอยู่ในถ้ำนั้น มนุษย์เรามีข้อสงสัยกังขาเกี่ยวกับดวงอาทิตย์อยู่เสมอ บ้างก็เคารพบูชาพระอาทิตย์ ชีวิตมนุษย์นับไม่ถ้วนสูญเสียไปบนแท่นบูชา เพื่อเป็นการเอาใจเทพเจ้าผู้ทรงพิโรธ

ในสมัยปัจจุบัน นั้นความสงสัยเปลี่ยนเป็นความ อยากรู้อยากเห็น ซึ่งกลายเป็นการทดลองสืบสวนเรื่องราวอย่างมีระบบแบบแผนอีกต่อหนึ่ง นักดาราศาสตร์พบว่าดวงอาทิตย์โตกว่าโลกล้านเท่า อุณหภูมิที่ผิวดวงอาทิตย์สูงราวหกพันองศาเซนติเกรด และในใจกลางจะต้องร้อนถึงสิบห้าล้านองศาเซนติเกรดทีเดียว นักแอสโตรฟิสิกส์พิสูจน์ได้ว่าไม่มีการเผาไหม้ธรรมดา หรือการเผาไหม้ทางเคมีใด ๆ ที่อาจให้ความร้อนเช่นที่มาจากดวงอาทิตย์ได้ เพราะไม่มีออกซิเจนมากพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้เช่นนั้น ความพยายามทั้งหลายแหล่ที่จะอธิบายพลังงานของดวงอาทิตย์ต้องล้มเหลว ไม่มีแหล่งพลังงานใดที่อาจจะให้ความร้อนสูงเช่นนั้นได้เป็นเวลานานถึงห้าพันล้านปี เท่าที่รู้กันนั้นพลังงานของดวงอาทิตย์ควรจะหมดสิ้นไปนานแล้ว ดวงอาทิตย์ควรจะเป็นแต่ลูกไฟที่มอดแล้วในท้องฟ้า แวดล้อมไปด้วยดาวเคราะห์อันเย็นเยือกปราศจากสิ่งมีชีวิตมืดสนิทอยู่ในจักรวาล

เซอร์ อาร์เธอร์ เอ็ดดิงตัน (Arthur Eddington) เป็นนักวิทยาศาสตร์คนแรกที่ตั้งข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับพลังงานของดวงอาทิตย์ได้ถูกต้อง ในปี ๑๙๒๐ เขาเสนอว่าพลังงานของดาวฤกษ์ทั้งหลาย อาจเกิดจากการรวมตัวหรือฟิวชั่นของอะตอมของไฮโดรเจน เพื่อกลายเป็นอะตอมชนิดใหม่ที่สลับซับซ้อนยิ่งขึ้น การ *"เผาไหม้"* นิวเคลียสของแต่ละอะตอมน่าจะให้พลังงานมากกว่ากระบวนการทางเคมีทั้งหลายที่รู้จักกันถึงล้านเท่า หลังจากนั้นแปดปี เฟรดเดอริก ฮูเตอร์มันส์ กับโรเบิร์ต แอ็ตคินสัน ได้ทำให้ข้อสันนิษฐานกลายเป็นทฤษฎี ทั้งสองได้คำนวณว่าอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ที่ใจกลางดวงอาทิตย์นั้นมีความเร็วสูงมาก (เนื่องจากความร้อนและความดัน) ดังนั้นในการกระทบกันบางครั้งจะเกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ ทำให้เกิดความร้อนขึ้น เราเรียกความร้อนนี้ว่าพลังงานเทอร์โมนิวเคลียร์ เนื่องจากเป็นพลังงานที่เกิดจากอะตอมซึ่งมีอุณหภูมิสูงมาก

ฮูเตอร์มันส์และแอ็ตคินสัน แทบจะไม่มีข้อมูลการทดลองเกี่ยวกับความเป็นไปของอะตอมของไฮโดรเจนเลย ทั้งสองจำเป็นต้องดำเนินงานไปในทางทฤษฎีเท่านั้น เขารู้ว่าอุณหภูมิซึ่งสูงมากที่ใจกลางดวงอาทิตย์นั้น อีเล็กตรอนจะหลุดไปจากอะตอมของไฮโดรเจน และความดันอันมหาศาลเนื่องมาจากขนาดอันใหญ่โตของดวงอาทิตย์ จะบีบนิวเคลียร์ของไฮโดรเจน (โปรตอน) เข้าชิด

กัน ผลก็คือเกิดโปรตอนซึ่งหลอมเหลว มีความแน่นมากกว่าตะกั่วถึงแปดเท่า ฮูเตอร์มันส์และแอ็ตคินสัน คำนวณแล้วพบว่าการรวมตัวหรือฟิวชั่นของไฮโดรเจน อาจใช้อธิบายความร้อนของดวงอาทิตย์ได้ อย่างไรก็ตามทั้งสองไม่สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าโปรตอนหลอมเหลวอันร้อนจัดในใจกลางของดวงอาทิตย์นั้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ขึ้นได้จริงหรือไม่ เพราะยังขาดข้อมูลสำคัญ ๆ ที่จะใช้ในการทำนายความเป็นไปของโปรตอน ณ อุณหภูมิซึ่งมีอยู่ภายในดวงอาทิตย์

ถึงตอนนี้ต้องขออธิบายว่า อุณหภูมิและพลังงานของโปรตอน หรือของอนุภาคใด ๆ ก็ตามมีความสัมพันธ์กัน เรื่องนี้สำคัญอย่างยิ่งเพราะความเป็นไปของอนุภาคใด ๆ จะขึ้นอยู่กับพลังงาน (หรือความเร็ว) ของมันอย่างมากทีเดียว

ตามธรรมดานั้นเราวัดอุณหภูมิได้ง่าย เช่น วัดอุณหภูมิของน้ำในถ้วยแก้วโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้กันตามบ้าน วัดอุณหภูมิของวัตถุที่กำลังร้อนจัด เช่น ไส้หลอดไฟฟ้า หรือเหล็กสำหรับเขี่ยถ่านได้ โดยใช้เครื่องมือซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสีของวัตถุที่ร้อนจัดนั้นกับอุณหภูมิของมัน ที่อุณหภูมิของห้องเหล็กเขี่ยถ่านจะไม่มีแสงออกมาเลย แต่ถ้าเผาให้ร้อนขึ้นทุกที ๆ สีก็จะเปลี่ยนจากแดงสลัว ๆ แทบมองไม่เห็นเป็นขาวโชติช่วง อย่างที่กล่าวกันว่า

เหล็กร้อนจนขาว เราวัดอุณหภูมิของของเหลวและของแข็งได้โดยวิธีดังกล่าวมานี้

แต่ว่าเราจะวัดอุณหภูมิของก๊าซได้อย่างไร ตอนแรกก็ดูเหมือนจะง่าย เพราะเพียงแต่มองดูเทอร์โมมิเตอร์ที่ติดไว้นอกบ้านก็รู้ว่าอุณหภูมิของอากาศเท่านั้นเท่านี้ เช่น ๘๐ องศา เป็นต้น แต่ถ้าจะวัดอุณหภูมิของก๊าซ ซึ่งกลายเป็นไอออนที่อยู่ในหลอดนีออนที่กำลังลุกสว่างเล่าจะทำอย่างไร ถ้าจับหลอดดูจะรู้สึกว่าเย็น แต่ข้างในหลอดนั้นอะตอมของนีออนกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงอย่างน่าประหลาดใจคือสูงกว่าความเร็วของโมเลกุล ซึ่งอยู่กันอย่างหนาแน่นในเหล็กเชียดถ่านที่ร้อนจนขาวมากทีเดียว แล้วอุณหภูมิของโปรตอนที่พุ่งออกมาเป็นลำจากเครื่องไซโคลตรอนเล่าจะวัดได้อย่างไร นักวิทยาศาสตร์จะบอกค่าพลังงานของอะตอมที่กลายเป็นไอออนซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วขนาดหนึ่ง ว่ามีค่าเท่ากับกี่อีเล็กตรอนโวลต์ พลังงานนี้อาจจะวัดออกมาในรูปของอุณหภูมิก็ได้ เมื่อคิดแบบนี้ ๑ อีเล็กตรอนโวลต์ จะมีค่าโดยประมาณเทียบเท่ากับอุณหภูมิ ๑ หมื่นองศาเซนติเกรด ตามสเกลนั้นนั้นโปรตอนซึ่งมีพลังงาน ๑ MeV (ล้านอีเล็กตรอนโวลต์) จะเทียบเท่ากับอุณหภูมิ ๑ หมื่นล้านองศาเซนติเกรด ในบทต่อไปเราจะเห็นได้ว่าเครื่องไซโคลตรอน อาจจะเร่งโปรตอนให้มีพลังงาน ๑๐ ล้านอีเล็กตรอนโวลต์อย่างง่ายดาย โปรตอนซึ่งมีพลังงานเท่านี้

เทียบเท่ากับโปรตอนซึ่งมีอุณหภูมิ ๑ แสนล้านองศาเซนติเกรด ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิของโปรตอนในใจกลางของดวงอาทิตย์มาก

ดร. ฮันส์ เบเทอะ (Hans Bethe) ศาสตราจารย์วิชาฟิสิกส์ที่มหาวิทยาลัยคอร์เนลได้ศึกษาปัญหาเพื่อที่จะอธิบายแหล่งพลังงานอันไม่รู้จักหมดสิ้นของดวงอาทิตย์ ในปี ๑๙๓๘ นั้น เบเทอะอยู่ในฐานะที่จะทำการคำนวณต่างๆได้ดีกว่า ฮูเตอร์มันส์ และแอ็ตคินสัน ซึ่งทำมาเมื่อสิบปีก่อน เพราะในช่วงระยะเวลานั้นบรรดานักวิทยาศาสตร์ได้ข้อมูลเกี่ยวกับปฏิกิริยานิวเคลียร์จากการทดลองไว้มาก ด้วยเหตุนี้ เบเทอะจึงสามารถคำนวณได้ว่าภายใต้สภาพซึ่งเป็นอยู่ภายในดวงอาทิตย์นั้น โปรตอนจะรวมตัวกันได้ช้าหรือเร็วเพียงใด

ดร. เบเทอะ ได้ตั้งทฤษฎีขึ้นมาว่า โปรตอนสี่ตัวรวมกันเป็นขั้น ๆ เกิดเป็นฮีเลียมหนึ่งอะตอม การรวมนี้ไม่ใช่ว่าจะเกิดขึ้นรวดเดียว แต่เป็นกระบวนการซึ่งมีหลายตอน แรกทีเดียวโปรตอนจากไฮโดรเจนสองตัวกระทบกันและยึดกันไว้ กลายเป็นไฮโดรเจนชนิดหนักหรือดิวทีเรียม แล้วอะตอมนี้ถูกกระทบโดยโปรตอนอีกตัวหนึ่งเกิดเป็นฮีเลียม ๓ ขึ้น ท้ายที่สุดเกิดการกระทบกับโปรตอนอีกตัวหนึ่งได้เป็นนิวเคลียสของฮีเลียม ๔ กระบวนการตามแนวของเบเทอะนี้มีทางเป็นไปได้สองทาง แต่

ละทางให้ผลเช่นเดียวกันในสุดท้าย คือ มีการรวมตัวหรือเกิดพีวชั่นของโปรตอนสี่ตัว และพลังงานถูกปล่อยออกมาราว ๆ ๒๗ MeV พลังงานนี้ได้มาจากการที่มวลสาร "*หาย*" ไป คือเมื่อไฮโดรเจนสี่อะตอมรวมกันเข้า เกิดเป็นนิวเคลียสใหม่ซึ่งมีมวลสารน้อยกว่าผลบวกของมวลสารของแต่ละอะตอมของไฮโดรเจนทั้งสี่ มวลสารที่ "*หาย*" ไปหรือพลังงานที่ได้ออกมาจากพีวชั่นเพียงครั้งเดียวนั้นไม่มาก แต่เนื่องจากใน ดวง อาทิตย์มีไฮโดรเจนอยู่เป็นจำนวนมหาศาล กระบวนการนี้จึงเกิดขึ้นบ่อยมากพอที่จะทำให้ดวงอาทิตย์ร้อนจ้าอยู่ตลอดเวลา ทุก ๆ วินาที ไฮโดรเจนราว ๆ หนึ่งพันล้านตันจะเกิดพีวชั่น ดังนั้น "*มวลสารของไอน์สไตน์*" ประมาณหนึ่งล้านตันจะถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานโดยสิ้นเชิงทุกวินาที

ปริมาณไฮโดรเจนซึ่งมากจนแทบไม่น่าเชื่อนี้ ยังนับว่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณทั้งหมดที่มีอยู่ในดวงอาทิตย์ ดวงอาทิตย์จะยังคงส่องแสงต่อไปในอัตราปัจจุบันเป็นเวลาหลาย ๆ พันล้านปี ก่อนที่จะหมดสิ้นเชื้อเพลิง

ถ้าเราพิจารณาความร้อนซึ่งออกมา โดยคิดต่อน้ำหนักจำนวนหนึ่งของดวงอาทิตย์ แทนที่จะคิดความร้อนทั้งหมด เราจะพบสิ่งที่น่าประหลาดใจมาก คือเฉลี่ยแล้วเนื้อสารของดวงอาทิตย์ห้าร้อยตันจะให้ความร้อนเทียบเท่ากับหนึ่งร้อยวัตต์ อันเป็นความร้อนที่ได้จากหลอดไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ตามบ้าน และถึงแม้จะ

คิดที่ใจกลางของดวงอาทิตย์ ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนมากกว่านี้ก็ยังต้องใช้เนื้อสารหลายตัน จึงจะให้ความร้อน ๑๐๐ วัตต์ แต่ร่างกายมนุษย์เรานั้น ร่างกายของ ด็กวัยรุ่นนั้นจะให้ความร้อนมากกว่าที่ได้จากไฮโดรเจนในดวงอาทิตย์ที่หนักเท่ากัน ถึง ร้อยเท่า เราอธิบายเรื่องนี้ได้ไม่ยาก ประการแรกคือเราไม่ได้เปรียบเทียบอุณหภูมิของร่างกายเรากับอุณหภูมิภายในดวงอาทิตย์ แต่เราเปรียบเทียบอัตราการผลิตความร้อนของแต่ละสิ่ง ดวงอาทิตย์นั้นถูกห้อมล้อมบีดกันโดยก๊าซชั้นนอก ๆ เป็นอย่างดี ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้น ที่ ใจ กลาง แม้จะน้อยและเกิดขึ้นช้ากว่าความร้อนจากร่างกายของมนุษย์มากก็ยังจะคงอยู่ที่นั่น พูดอีกอย่างหนึ่งก็คือความร้อนของดวงอาทิตย์ ถูกกักเก็บไว้ภายในมวลสารอันมหึมา และซึมซาบออกมาสู่พื้นผิวอย่างเชื่องช้ามาก ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิของดวงอาทิตย์จึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนร่างกายมนุษย์นั้นมีฉนวนความร้อนห่อหุ้มไม่ดีนัก เสียความร้อนได้ง่าย เพียงแต่ตากลม เพียงเล็กน้อยก็รู้สึกหนาว เราอาจมองปัญหานี้อีกแง่หนึ่งโดยลองนึกถึงภาพมวลสารมหึมาขนาดเท่าของดวงอาทิตย์ แต่ประกอบขึ้นด้วยคนเบียดเสียดยัดเยียดกันแบบคนในรถใต้ดิน นั่นคือมีมวลสารซึ่งมีความสามารถในการผลิตความร้อนเทียบเท่ากับคนจำนวนเท่ากัน ความร้อนจะเกิดขึ้นมากมายจนกระทั่งเพียงชั่วครู่เดียวจะเกิดการลุกไหม้อย่างมโหฬาร

เหตุที่ความร้อนเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ แม้ที่ใจกลางของดวงอาทิตย์ก็ตาม เป็นเพราะอะตอมของไฮโดรเจนมีอุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิประมาณสองหมื่นองศาเซนติเกรดอาจจะดูมาก แต่เมื่อมองในแง่ของปฏิกิริยานิวเคลียร์แล้ว โปรตอนที่ใจกลางของดวงอาทิตย์มีพลังงานราว ๑,๗๐๐ อีเล็กตรอนโวลต์เท่านั้น อุณหภูมิเท่านี้นับว่าต่ำมากสำหรับปฏิกิริยานิวเคลียร์ ปฏิกิริยาส่วนมากที่ศึกษากันโดยอาศัยเครื่องไซโคลตรอนนั้นวัดพลังงานกันได้เป็นล้านโวลต์ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทอร์โมนิวเคลียร์จะเกิดขึ้นรวดเร็วที่พลังงานสูง ๆ ภายในใจกลางดวงอาทิตย์นั้นโปรตอนพลังงานต่ำมาก รวมตัวกันอย่างช้าๆ ใช้เวลาหลายล้านปีในการที่ไฮโดรเจนจะหมุนเวียนเปลี่ยนไปเป็นฮีเลียมครบหนึ่งรอบ ด้วยเหตุนี้เองดวงอาทิตย์จึงไม่เกิดการระเบิดเหมือนลูกระเบิดไฮโดรเจน

ระเบิดไฮโดรเจนใช้เวลาปล่อยพลังงานออกมาน้อยกว่าหนึ่งในล้านวินาที สาเหตุใหญ่ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเช่นนั้นก็คือ ปฏิกิริยาในลูกระเบิดเกิดจากการรวมตัวของไฮโดรเจนชนิดหนัก ๆ ดิวทีเรียม (หนักสองเท่าของไฮโดรเจนธรรมดา) และทริเทียม (หนักสามเท่าของไฮโดรเจนธรรมดา) ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรง ตรงข้ามกับการรวมอย่างเชื่องช้าของไฮโดรเจนแบบธรรมดา

ในการทำระเบิดไฮโดรเจนนั้น มีปัญหาเรื่องทริเทียมมีราคาแพง การเอาลิเธียม ๖ ไปหุ้มไว้ถัดจากใจกลางของลูกระเบิดได้สำเร็จ จึงนับเป็นความก้าวหน้าที่แท้จริงอีกขั้นหนึ่ง นิวตรอนซึ่งออกมาเป็นจำนวนมากจากการระเบิดของระเบิดปรมาณูซึ่งทำหน้าที่ "ลั่นไก" ไปชนลิเธียม ทำให้เกิดทริเทียมมากมาย ระเบิดปรมาณูนี้ทำให้เกิดความร้อนสูงมากด้วย

การใช้ลิเธียม ในรูปของสารประกอบทางเคมีที่ชื่อลิเธียมดิวทีไรด์ ซึ่งเป็นสารประกอบของลิเธียมกับไฮโดรเจนชนิดหนัก นับได้ว่าเป็นการยิงปืนนัดเดียวได้นกสองตัว ทำให้เกิดฟิวชั่นระหว่างดิวทีเรียมกับทริเทียมขึ้นได้ ได้เห็นกันมาแล้วว่ากระบวนการรวมตัวทำให้เกิดพลังงาน ในที่นี้แต่ละฟิวชั่นจะให้พลังงาน ๑๗.๖ MeV พลังงานนี้น้อยกว่าพลังงานที่ได้จากฟิชชั่น แต่เราต้องไม่ลืมว่าธาตุเบา ๆ เช่น ลิเธียมหนึ่งปอนด์นั้นมีจำนวนอะตอมมากกว่าธาตุหนัก เช่น ยูเรเนียม ๑ ปอนด์มาก จึงให้พลังงานได้มากกว่า

พลังงานที่ได้จากการรวมตัวของไฮโดรเจนออกมาในรูปของอนุภาค ซึ่งมีความเร็วสูงมากเช่นเดียวกับในกรณีของฟิชชั่น แต่ก็มีข้อแตกต่างที่สำคัญอยู่ข้อหนึ่ง คือพลังงานแทบทั้งหมดอยู่กับนิวตรอน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยานั้น นิวตรอนนี้เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วพาเอาพลังงานส่วนใหญ่ของปฏิกิริยาฟิวชั่นไป ความเร็วของ

มันสูงมาก จนกระทั่งแทบจะหลุดหายไปในอากาศเสียหมด และจะไม่มีการระเบิดอย่างรุนแรงขึ้นได้ ถ้าหากว่านักออกแบบลูกระเบิดไม่เกิดมีความคิดอันหลักแหลมขึ้นมา

นักออกแบบเหล่านี้ใช้นิวตรอนที่จะหนีหายไปให้เป็นประโยชน์ในลูกระเบิด คือเอายูเรเนียมธรรมดาจำนวนมากหุ้มไว้รอบลิเธียมอีกชั้นหนึ่ง นิวตรอนความเร็วสูงเหล่านี้จึงถูกกักอยู่ภายในยูเรเนียมที่หุ้มไว้นี้ และทำให้อะตอมของยูเรเนียมเกิดฟิชชั่น ผู้อ่านคงจะจำได้ว่านิวตรอนที่เกิดจากฟิชชั่นนั้นไม่ค่อยทำให้ U^{238} เกิดฟิชชั่น แต่ทำให้ U^{235} เกิดฟิชชั่นได้ดีกว่า เพราะ U^{235} จะเกิดฟิชชั่นกับนิวตรอนความเร็วต่ำ แต่ U^{238} ไม่เกิด นิวตรอนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาลูกโซ่นั้นส่วนมากไม่เร็วพอที่จะทำให้ U^{238} เกิดฟิชชั่น แต่นิวตรอนที่ได้จากฟิวชั่นของไฮโดรเจนเร็วพอที่จะทำให้ U^{238} เกิดฟิชชั่น ความจริงข้อนี้นับว่ามีความสำคัญมาก

เมื่อเป็นเช่นนี้ย่อมหมายความว่า ซูเปอร์บอมบ์นั้นมีสามขั้น ขั้นแรกเป็นการทำให้ระเบิดปรมาณูระเบิดขึ้น นับเป็นการ "*ลั่นไก*" ซูเปอร์บอมบ์ ขั้นที่สองเกิดทริเทียมจากลิเธียม และทริเทียมเกิดฟิวชั่นกับไฮโดรเจนหนัก ขั้นที่สามนิวตรอนความเร็วสูงที่เกิดจากขั้นที่สองทำให้ยูเรเนียมธรรมดาเกิดฟิชชั่น

ขั้นทั้งสามนี้เกี่ยวเนื่องกันโดยมีนิวตรอนเป็นตัวเชื่อมโยงอย่างสลับซับซ้อน ตัวอย่างเช่นเมื่อ U^{238} เกิดฟิชชั่นในขั้นที่สาม นิวตรอนซึ่งเกิดขึ้นถูกบีบกลับไปใจกลางของลูกระเบิด

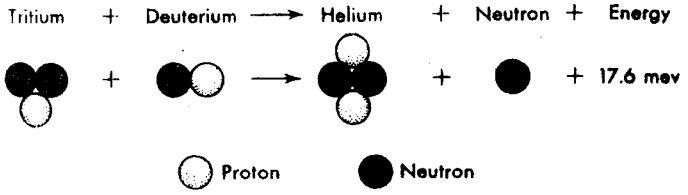
ทำให้ระเบิดปรมาณูเกิดพีชชั่นขึ้นอีก และเกิดทริเทียมมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นการระเบิดของขั้นที่สาม ทำให้เกิดความร้อนมากขึ้นอีกด้วย ปฏิกิริยาทั้งหลายที่เกิดขึ้นสลับซับซ้อนและรวดเร็วมาก คือเกิดขึ้นในเวลาเศษหนึ่งส่วนล้านวินาทีเท่านั้น การคำนวณอำนาจการระเบิด จึงยุ่งยากมากจนต้องยกให้เป็นหน้าที่ของเครื่องคอมพิวเตอร์ สมองอีเล็กโตรนิกนี้สามารถคำนวณได้รวดเร็วราวฟ้าแลบ ทำให้ผู้สร้างลูกระเบิดรู้ได้ล่วงหน้าก่อนทดลองจริง ๆ ว่าจะเกิดผลอย่างไร

เมื่อได้เรียนรู้จากระเบิดไฮโดรเจนว่า ไฮโดรเจนมีประโยชน์ในปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ ซึ่งทำให้เกิดการระเบิดขึ้นเช่นนี้ ย่อมเป็นของธรรมดาที่จะเกิดคำถามขึ้นมาว่า เราจะควบคุมพีวชั่นของไฮโดรเจนเพื่อให้ได้พลังงานที่เป็นประโยชน์ต่อมนุษย์ได้หรือไม่ มนุษย์จะเลียนแบบและผลิตพลังงานให้ได้มากกว่าดวงอาทิตย์ได้หรือไม่

ก่อนที่จะดูต่อไปว่าเรื่องนี้เป็นไปได้หรือไม่ เราต้องเข้าใจว่า ทำไมนักวิทยาศาสตร์จึงมุ่งที่จะใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง แทนที่จะใช้ธาตุอื่น ถ้าย้อนกลับไปดูการทดลองของรัทเธอฟอร์ดเกี่ยวกับการกระจัดกระจายของอนุภาคแอลฟา คงจะจำได้ว่ามีอนุภาคแอลฟาจำนวนน้อยมาก ที่สามารถแทรกเข้าไปใกล้นิวเคลียสของอะตอมซึ่งใช้เป็นเป้า เพราะเมื่ออนุภาคแอลฟาซึ่งมีประจุบวกพุ่ง

ตรงไปยังนิวเคลียสของอะตอมซึ่งมีประจุบวกนั้น จะถูกผลักโดยแรงระหว่างประจุชนิดเดียวกันอย่างแรง เมื่อเราพยายามเอาอนุภาคแอลฟาสองอนุภาค หรือเอานิวเคลียสของไฮโดรเจนหรือนิวเคลียสอะไรก็ตามสองนิวเคลียสมารวมกัน ก็จะเกิดผลอย่างเดียวกัน คือ นิวเคลียสทั้งสองจะต่อต้านการรวมตัว เพราะประจุบวกของนิวเคลียสทั้งสองมีแรงผลักกัน ยิ่งนิวเคลียสของอะตอมมีประจุไฟฟ้ามากแรงผลักก็ยิ่งสูง และการรวมกันก็ยิ่งลำบาก นี่หมายความว่าธาตุเบา ๆ เกิดพิวชั่นได้ง่ายที่สุด และไฮโดรเจนนั้นมีโปรตอนอยู่ในนิวเคลียสเพียงตัวเดียว เป็นอะตอมที่เบาที่สุดในบรรดาอะตอมทั้งหลาย

อย่างไรก็ตามหากมนุษย์พยายามทำให้ไฮโดรเจนธรรมดาเกิดพิวชั่น โดยเลียนแบบกระบวนการตามธรรมชาติในดวงอาทิตย์แล้วก็จะต้องพบกับความล้มเหลว เพราะตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่าไฮโดรเจนที่อยู่ภายในดวงอาทิตย์นั้น รวมตัวกันช้ามาก ไฮโดรเจนที่ใจกลางของดวงอาทิตย์หนึ่งลูกบาศก์นิ้ว จะให้พลังงานไม่ถึงวัตต์ ความจริงมีอยู่ว่าไฮโดรเจนธรรมดาไม่เหมาะที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์สำหรับกระบวนการพิวชั่นที่มนุษย์จะเป็นผู้สร้างขึ้น อย่างไรก็ดีเรารู้แล้วว่ามีไฮโดรเจนชนิดอื่น ๆ อีก คือ ไฮโดรเจนหนักหรือดิวทีเรียม และไฮโดรเจนซึ่งมีกัมมันตภาพรังสีและหนักยิ่งขึ้นไปอีกที่เรียกกันว่าทริเทียม ทริเทียมซึ่งหนัก



รูปที่ ๓๔ นิวเคลียสของไฮโดรเจนสองนิวเคลียสรวมกัน (เกิดฟิวชั่น) ได้นวเคลียสของฮีเลียมกับนิวตรอน

เป็นสามเท่าของไฮโดรเจนธรรมดา นี้เราทำขึ้นมาได้ในปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยการยิงลิเธียมด้วยนิวตรอน ดิวทีเรียมและทริเทียมทำปฏิกิริยากันเกิดฮีเลียมขึ้นอย่างรวดเร็ว ไม่ช้าเหมือนไฮโดรเจนธรรมดา ความจริงข้อนี้ทำให้การเกิดฟิวชั่นภายใต้การควบคุมเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ เป็นที่รู้กันว่าไฮโดรเจนเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$_1D^2 + {}_1D^2 = {}_1H^1 + {}_1T^3$$

$$_1D^2 + {}_1D^2 = {}_2He^3 + {}_0n^1$$

$$_1D^2 + {}_1T^3 = {}_2He^4 + ({}_0n^1)$$

$$_1T^3 + {}_1T^3 = {}_2He^4 + 2{}_0n^1$$

ปฏิกิริยาเหล่านี้ล้วนแต่ให้พลังงานออกมา สองปฏิกิริยาแรกให้พลังงาน ๔.๑๓ และ ๓.๓๗ MeV ตามลำดับ ส่วนสองปฏิกิริยาหลังให้พลังงาน ๑๗.๕๘ และ ๑๑.๓๒ MeV

ถึงแม้พลังงานที่ได้จากฟิวชั่นของไฮโดรเจนแต่ละครั้ง จะน้อยกว่าพลังงานที่ได้จากฟิชชั่นของยูเรเนียมซึ่งมีค่าถึง ๒๐๐ MeV ก็ตาม จำนวนอะตอมที่มีอยู่ในไฮโดรเจนหนึ่งปอนด์ มากกว่าจำนวนอะตอมของยูเรเนียมหนึ่งปอนด์มาก เรื่องนี้เข้าทำนองเดียวกับกรณีของลิเธียมที่ได้กล่าวถึงข้างต้น ดิวทีเรียมหนึ่งปอนด์จะให้พลังงานประมาณสามเท่าของพลังงานที่ได้จากยูเรเนียมหนึ่งปอนด์ ดิวทีเรียมซึ่งมีอยู่ในน้ำถ้วยหนึ่งนั้น เมื่อคิดเป็นพลังงานจะมีค่าเทียบเท่ากับถ่านหินห้าสิบปอนด์ เรามีไฮโดรเจนหนักไว้ใช้อย่างไม่มีขอบเขตจำกัด เนื่องจากทะเลสาบและมหาสมุทรบนโลกเรามีน้ำอยู่มากมายใช้ไม่หมด ถ้ามนุษย์เราสามารถเอาพลังงานที่เกิดจากฟิวชั่นของไฮโดรเจนออกมาใช้ได้แล้ว ก็นับว่ามีเชื้อเพลิงใหม่อันไม่รู้จักหมดสิ้นอยู่ในกำมือทีเดียว

นอกจากที่กล่าวมาข้างบนนี้แล้วยังมีเหตุผลอย่างอื่นอีก ที่ทำให้น่าเอาพลังงานจากไฮโดรเจนมาใช้ ฟิวชั่นของไฮโดรเจนนั้นไม่มีกากกัมมันตภาพ ดังนั้นแหล่งพลังงานใหม่นี้จึงไม่มีรังสีอันเป็นอันตราย เช่น รังสีจากฟิวชั่นของยูเรเนียม ยิ่งไปกว่านั้นแบบปฏิกรณ์ซึ่งอาจจะใช้ในการผลิตพลังงานฟิวชั่น จะไม่มีอันตรายจากการระเบิดอันอาจเกิดขึ้นได้ ในโรงงานผลิตพลังงานบางแบบที่ใช้ยูเรเนียม นอกจากนี้ยังมีลู่ทางที่จะได้พลังงานจากปฏิกรณ์ฟิวชั่นโดยตรง ในรูปของพลังงานไฟฟ้าอีกด้วย

ถึงแม้จะมีข้อน่าชื่นชมทั้งหลายเหล่านี้ก็ตาม เราต้องหันมาพิจารณาอุปสรรคซึ่งขัดขวางการเอาพลังงานจากฟิวชั่นมาใช้อยู่ เรื่องเชื้อเพลิงที่ใช้คือ ดิวทีเรียมนั้นไม่มีปัญหา เพราะน้ำชนิดหนัก (heavy water) นั้นผลิตกันได้เป็นร้อย ๆ ตัน ขายเป็นสินค้าปอนด์ละ ๒๘ ดอลลาร์ การทำก๊าซดิวทีเรียมบริสุทธิ์จากน้ำชนิดหนักก็ไม่เป็นเรื่องยุ่งยาก ปัญหาสำคัญก็คือจะต้องออกแบบปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถทำให้ดิวทีเรียมซึ่งกลายเป็นไอออนแล้ว หรือที่เรียกกันว่า ไฮโดรเจนปลาสมา มีความเร็วสูงมาก พอที่จะเกิดฟิวชั่นได้ ทั้งนี้หมายความว่าจะต้องทำให้เกิดอุณหภูมิสูงถึงกว่าหนึ่งร้อยล้านองศาเซนติเกรด

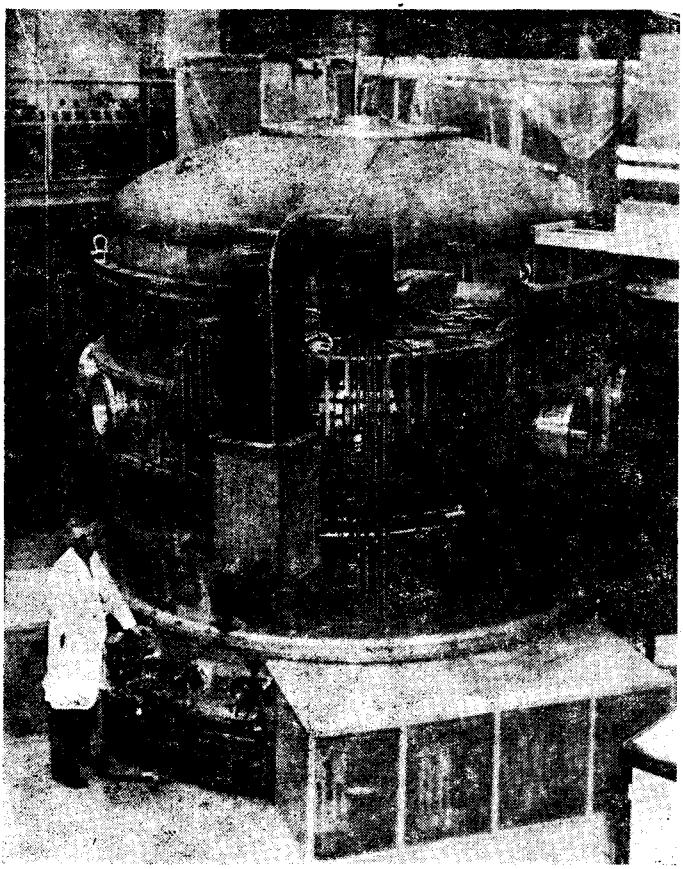
นักวิทยาศาสตร์ในหลายประเทศ กำลังทำงานกันอย่างขยันขันแข็ง ออกแบบเครื่องมือซึ่งใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับบีบหรือ *"พินช์"* ไฮโดรเจนปลาสมาเข้าด้วยกัน นักฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ ดับเบิลยู. เอช. เบ็นเน็ตต์ เป็นผู้เสนอแนะแนวความคิดนี้ในปี ๑๙๓๔ เขาเสนอว่าอนุภาคไฮโดรเจนซึ่งมีประจุไฟฟ้า ที่กำลังเคลื่อนที่เป็นสายนั้นประดุจกระแสไฟฟ้า จึงควรจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นมาได้เอง สนามแม่เหล็กนี้จะทำหน้าที่บีบปลาสมาเข้าด้วยกันอีกต่อหนึ่ง ทำให้ไอออนเกิดการกระทบกัน การกระทบยิ่งรุนแรง (เรียกกันว่าพินช์ยิ่งร้อน) และยิ่งเกิดขึ้นบ่อยเท่าใด โอกาสที่จะเกิดฟิวชั่นก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น

น่าเสียดายที่ปรากฏการณ์ซึ่งเพิ่งกล่าวมานั้น เป็นสิ่งที่ควบคุมหรือทำให้ทรงตัวอยู่ได้ลำบาก ในสหรัฐอเมริกานั้นองค์การพลังงานปรมาณูได้ตั้งโครงการเซอร์วูดขึ้นมา โดยมีจุดประสงค์ที่จะหาวิธีควบคุมพลังงานซึ่งได้จากพีวชั่น งานวิจัยซึ่งเริ่มด้วยงบประมาณไม่มากนักในปี ๑๙๕๑ นั้น ได้ขยายออกไปอย่างกว้างขวางในปี ๑๙๕๙ โดยมีงบประมาณประจำปีถึงสี่สิบล้านดอลลาร์ เครื่องมือซึ่งทดลองประดิษฐ์ขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ลอส อลาโมส เพื่อศึกษาผลของการ *"พินช์"* มีหลายอย่าง ตัวอย่าง เช่นเครื่องมือที่มีชื่อว่า เพอร์แซบสตรอน ในเครื่องมือนี้ไฮโดรเจนไอออนวนเวียนอยู่ในสูญญากาศรูปร่างเหมือนโดนัท และถูกบีบด้วยกระแสไฟฟ้าให้รวมตัวเป็นลำเล็กๆ

นักวิทยาศาสตร์ที่ห้องทดลองลิเวอร์มอร์ แห่งมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ศึกษาปัญหาเกี่ยวกับพีวชั่นโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า *"กระจกแม่เหล็ก"* ซึ่งอาศัยวิธีการอันแตกต่างออกไป คือใช้ท่อตรงแทนที่จะเป็นรูปโดนัท ไฮโดรเจนปลาสมา ถูกสนามแม่เหล็กซึ่งมีความเข้มสูงมาก *"จับ"* ไว้ แล้ว *"สะท้อน"* จากปลายท่อข้างหนึ่งกลับไปยังกลางท่อ ส่วนในรูปถัดไปก็เป็นวิธีการที่แตกต่างออกไปอีกวิธีหนึ่งที่ โอ๊ค ริดจ์ นักวิทยาศาสตร์กำลังศึกษาลู่ทางที่จะทำให้เกิดพีวชั่น โดยให้ไฮโดรเจนหนักพุ่งเข้าไปในห้องปฏิกิริยา ในห้องนี้มีอาร์คไฟฟ้าที่จะทำไฮโดรเจน

ให้เป็นไอออนแล้วจึงให้ไอออนเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็กซึ่งมีความเข้มสูง ที่มหาวิทยาลัยปรินซ์ตัน การค้นคว้าเกี่ยวกับพลังงานโดยพีวชั่นทำกันอย่างใหญ่โตและก้าวหน้าขึ้นไปอีก เครื่องมือชื่อสเตลเลอเรเตอร์กำลังอยู่ในระหว่างการก่อสร้าง มีกล่องสูญญากาศรูปร่างเหมือนเลข 8 ซึ่งมีขดลวดที่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กพันอยู่รอบ ๆ แรงจากสนามแม่เหล็กนี้จะบังคับให้ไอออนอยู่ตรงกลางกล่อง เครื่องมือนี้ได้รับการออกแบบไม่ให้ไฮโดรเจนไอออนเฉไปกระทบกับผนังกล่องอันจะทำให้เสียพลังงานไป จะเอาพลังงานจากพีวชั่นมาได้ก็ต่อเมื่อสามารถบังคับไม่ให้ปลาสมาไปสัมผัสกับผนังกล่องได้เท่านั้น

เห็นได้ชัดว่าไม่มีภาชนะใด ๆ ที่อาจบรรจุปลาสมาอันร้อนแรงนี้ได้ นักวิทยาศาสตร์จึงเสนอให้เก็บปลาสมาโดยใช้สนามแม่เหล็กบังคับไอออนให้อยู่ภายในบริเวณจำกัด เรียกกันว่าเก็บไว้ใน *"ขวดแม่เหล็ก"* อย่างไรก็ตามการสร้าง *"ภาชนะ"* แม่เหล็กเช่นนี้โดยไม่ให้มีทางรั่วไหลได้เลยก็เป็นปัญหาใหญ่ เพราะถ้าซึมออกได้แต่เพียงเล็กน้อย ปลาสมาก็จะกระเด็นไปถูกผนังกล่องทำให้เย็นลง ไม่มีโอกาสให้มีอุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้เกิดพีวชั่นได้ การทดลองต่าง ๆ ที่ทำกันอยู่ในสหรัฐอเมริกาสามารถผลิตปลาสมา ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณสิบล้านองศาเซนติเกรด



รูปที่ ๓๕ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยเกี่ยวกับพีวชั่นของไฮโดรเจนที่โอ๊คริดจ์
(Courtesy Oak Ridge National Laboratory.)

ในประเทศรัสเซีย อังกฤษ สวีเดน เยอรมัน ญี่ปุ่น และอื่น ๆ อีกหลายประเทศก็มีการวิจัยเกี่ยวกับปลาสมาเช่นเดียวกัน นักวิทยาศาสตร์อังกฤษนับว่าเป็นผู้บุกเบิกในงานวิจัยแขนงใหม่นี้ และได้สร้างเครื่องมือขนาดค่อนข้างใหญ่หลายเครื่อง เครื่องมือทุกเครื่องมุ่งใช้ดิวทีเรียมเป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา แม้ว่าการทดลองในตอนหลัง ๆ จะใช้ทริเทียมบ้างก็ตาม การใช้ทริเทียมทดลองนั้นยุ่งยากกว่า เพราะมีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี ทั้งเครื่องมือก็จะพลอยได้รับรังสีไปด้วย

ถ้าเราใช้ดิวทีเรียมบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ สำหรับผลิตพลังงานโดยฟิวชั่นแล้ว พลังงานสองส่วนในสามส่วนจะออกมาในรูปของอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้า จึงมีลู่ทางที่จะเปลี่ยนพลังงานนี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ลองนึกถึงภาพการทำงานของลูกสูบในเครื่องจักรไอน้ำดู เราอาจจะเห็นในทำนองที่ว่าปลาสมา ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ปะทะกับสนามแม่เหล็กและเกิดพลังงานซึ่งเอาออกมาได้ทางวงจรไฟฟ้า แต่ถ้าเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เป็นดิวทีเรียมผสมกับทริเทียม พลังงานส่วนใหญ่จะอยู่กับนิวตรอน เราอาจใช้ลิเธียมเหลวดูดกลืนนิวตรอน ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานของนิวตรอนให้เป็นความร้อน และในขณะเดียวกันเมื่ออะตอมของลิเธียมเกิดฟิชชั่น ก็จะเกิดทริเทียมซึ่งใช้เป็นประโยชน์ได้ด้วย ฉะนั้นพลังงานจากฟิวชั่นจึงทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายนอกปลาสมาและความร้อนนี้ถูกใช้ในการทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า

การพยายามหาทางเอาพลังงาน จากพีวชั่นมาใช้เกิดขึ้นตอนที่กำลังมีการปรับปรุงโรงงานผลิตไฟฟ้าซึ่งใช้ยูเรเนียม ให้สู้กับโรงงานที่ใช้เชื้อเพลิงสามัญได้ ราคาถ่านหินซึ่งสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในประเทศอังกฤษ เป็นสิ่งจูงใจให้ใช้ยูเรเนียมแทนถ่านหิน ชาวอังกฤษจึงได้ทุ่มเทความพยายามอย่างเต็มที่ ที่จะสร้างโรงงานผลิตไฟฟ้ายูเรเนียม ตอนนี้ก็เกิดปัญหาว่าพลังงานจากยูเรเนียมอาจจะล้าสมัยไปก่อนที่จะได้รับการปรับปรุงให้ได้ผลเต็มที่เสียแล้วหรือไม่ พีวชั่นของไฮโดรเจนจะไม่เป็นแหล่งพลังงานของมนุษย์แทนพีชชั่นของยูเรเนียมหรือ ดูเหมือนเราพอจะมองเห็นได้ว่า ในที่สุดพีวชั่นของไฮโดรเจนจะได้รับการปรับปรุงจนกระทั่งอาจใช้ประโยชน์บางอย่างได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามเทคนิคในการเอาพลังงานแหล่งใหม่นี้ไปใช้ยังอยู่ในขั้นเพิ่งสอนเดินเท่านั้น ตอนนี้ยังเร็วเกินไปที่จะบอกได้ว่า เมื่อใดจึงจะได้ใช้กัน แต่ก็พอจะกล่าวได้ว่า นักวิทยาศาสตร์หลายคนที่กำลังทำงานเกี่ยวกับเชื้อเพลิงของอนาคตนี้อยู่ ต่างก็มีความหวังว่าจะสามารถแก้ปัญหายาก ๆ ซึ่งรอคอยอยู่ข้างหน้าได้ ยิ่งไปกว่านั้นพวกเขายังมีความรู้สึกว่า ในการค้นคว้าเกี่ยวกับปลาสมาซึ่งมีอุณหภูมิสูงและสนามแม่เหล็กซึ่งมีความแรงมากนี้ จะทำให้ได้เรียนรู้ความจริงใหม่ ๆ เกี่ยวกับอะตอมและจักรวาลหลายต่อหลายอย่างทีเดียว นักวิทยาศาสตร์บางคนถึงกับเชื่อว่าแม้จะไม่ประสบความสำเร็จในการเอาพลังงาน

จากไฮโดรเจนมาใช้ แม้จะเอาชนะดวงอาทิตย์ไม่ได้ แต่มนุษย์ก็จะได้รับผลประโยชน์ในแง่ของความรู้ขั้นมูลฐานอย่างมากมาย และการวิจัยค้นคว้าก็ต้องนับว่าได้ผลตอบแทนคุ้มค่า อย่างไรก็ดี ความหวังมีอยู่ว่าการเสาะหาพลังงานจากฟิวชั่น จะทำให้มนุษยชาติมีแหล่งพลังงานอันไม่มีขอบเขตจำกัด ไว้สำหรับทำให้บ้านเรือนอบอุ่น บ้านเมืองสว่างไสวและสำหรับใช้ในโรงงานต่าง ๆ ได้นับเป็นล้านปี

๑๔

การเสาะแสวงหาอย่างไม่หยุดยั้ง

ถ้า ริป แวน วิงเคิล นอนหลับไปสักหกสิบปีแล้วตื่นขึ้นมาวันนี้ เขาจะต้องงุนงงที่ได้เห็นความเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย อันเป็นผลมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ตึกระฟ้า ยวดยานเป็นทิวแถว ถนนหนทางอันสลับซับซ้อน เครื่องบินไอพ่น และผลงานอื่นๆ ทางวิศวกรรม ล้วนแต่จะทำให้เขาต้องแลตะลึงทั้งสิ้น และถ้าเขามองเข้าไปในบ้านทันสมัยสักหลังหนึ่ง สิ่งประดิษฐ์ใหม่ ๆ ซึ่งเทคโนโลยีผลิตขึ้นมาก็จะทำให้เขาแปลกใจไม่ยิ่งหย่อนกว่ากัน โทรทัศน์ วิทยุ ตู้เย็น เครื่องซักผ้าอัตโนมัติและเครื่องอีเล็กโตรนิกต่างๆ ล้วนแล้วแต่เป็นสิ่งที่บรรดาแม่บ้านถือว่าจำเป็นทั้งนั้น สรรพสิ่งเหล่านี้ดูประหนึ่งเป็นสิ่งมหัศจรรย์ย่อยๆ ทีเดียว

ถ้า ริป แวน วิงเคิล เป็นนักวิทยาศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงในช่วงหกสิบปีที่ผ่านมา จะยิ่งทำให้เขาประหลาดใจมากขึ้นไปอีก ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทั้งหลายนั้น เป็นสิ่งที่เขายอมรับได้ บางทีเขาอาจจะพูดได้เสียด้วยซ้ำไปว่า สิ่งเหล่านั้นเขาคาดคิดไว้แล้วบ้างเหมือนกัน แต่ลองวาดภาพดูเอาก็แล้วกันว่าวิทยาศาสตร์สมัยใหม่จะเป็นสิ่งที่แปลกหูแปลกตาสำหรับเขาเพียงใด

ปัจจุบันนี้เราอยู่ในยุคแห่งวิทยาศาสตร์ แต่คนที่รู้เรื่องเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์ขั้นมูลฐานนั้นมีจำนวนไม่มากเลย ส่วนมากจะคุ้น

เคยและรู้สึกประทับใจต่อความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี อันเป็นสิ่งที่มองเห็นได้ การที่จะมีความซาบซึ้งต่อวิทยาศาสตร์ได้แม้แต่เพียงผิวเผินนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งที่เรามองไม่เห็นมากทีเดียว เทคโนโลยีล้าหลังกว่าวิทยาศาสตร์มากนัก แม้ว่าจะกำลังตามติดใกล้เข้ามาทุกปี ๆ ก็ตาม เทคโนโลยีทุกวันนี้เอาแต่เพียงส่วนน้อยนิดของวิทยาศาสตร์มาใช้ให้เป็นประโยชน์เท่านั้น

นักวิทยาศาสตร์เป็นผู้มีความอยากรู้อยากเห็น อย่างแรงกล้า เป็นผู้มองหาความรู้ใหม่ ๆ เขากำลังสืบเสาะแสวงเข้าไปในความลับอันยิ่งใหญ่ ความลับของทรงกลมเล็กกระจ้อยร่อยซึ่งอยู่ลึกเข้าไปภายในอะตอม และความลับของห้วงอวกาศอันกว้างใหญ่ไพศาลสุดที่จะประมาณได้ นักวิทยาศาสตร์ที่แท้จริงแทบจะไม่คำนึงว่าการค้นคว้าของเขานั้น อาจนำเอาไปใช้ประโยชน์ได้หรือไม่ แต่แน่นอนละการค้นคว้าเกี่ยวกับอะตอมทำให้ได้สิ่งที่ใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง แม้แต่ทฤษฎีที่ยาก ๆ ซึ่งดูผิวเผินเหมือนจะไม่ให้ประโยชน์อะไรเลย เช่น ทฤษฎีของไอน์สไตน์ ก็ยังมีผลสะท้อนต่อโลกอย่างรุนแรง

เนื้อหาของหนังสือเล่มนี้ เป็นวิทยาศาสตร์ของอะตอมเกี่ยวกับโครงสร้างชั้นในของอะตอม แต่ความรู้ซึ่งได้มาจากการศึกษาจักรวาลขนาดจิ๋วนี้ก็ช่วยให้เข้าใจเกี่ยวกับดวงดาวทั้งหลาย ช่วยให้รู้ว่ามันส่องแสงสว่างอยู่ได้อย่างไร ถ้าเรายอนไปสืบหาจุดเริ่มต้น

ของวิทยาศาสตร์แห่งอะตอม จะพบว่าต้นกำเนิดแผ่กระจายอยู่ทั่วไปในหลาย ๆ ศตวรรษมาแล้ว แต่ก็ดูเหมือนว่าการที่เรินท์เกนพบรังสีเอกซ์ จะเป็นการจุดชนวนการค้นคว้าวิจัยซึ่งรัทเธอฟอร์ดเป็นผู้เริ่ม และเฟอร์มิเป็นผู้ที่มีส่วนร่วมอยู่ด้วยเป็นอย่างมาก

แต่ละครั้งที่ความลับของธรรมชาติถูกเผยออกมา โดยการค้นพบใหม่ ๆ นักวิทยาศาสตร์จะรู้สึกเหมือนกับได้ส่องลำแสงน้อย ๆ เข้าไปในถ้ำอันใหญ่โตที่มืดสนิท แต่ความรู้ใหม่อันน้อยนิดประดุจแสงเทียนนี่แหละ เผยให้เห็นลู่ทางใหม่ที่จะค้นคว้าต่อไปได้ ฉะนั้น นักสำรวจผู้กล้าหาญก็กระโจนเข้าสู่ความลึกลับข้างหน้าต่อไป คนธรรมดามักจะไม่เข้าใจถึงจุดประสงค์อันไม่มีวันเปลี่ยนแปลง ความตั้งใจอันแน่วแน่ และการอุทิศชีวิตจิตใจของนักวิทยาศาสตร์ในการค้นคว้านั้น นักวิทยาศาสตร์เกิดความตื่นเต้น อยากได้ความรู้ใหม่ ๆ สิ่งเหล่านี้นับว่าเป็นเครื่องกระตุ้นและรางวัลพร้อมไปในตัว

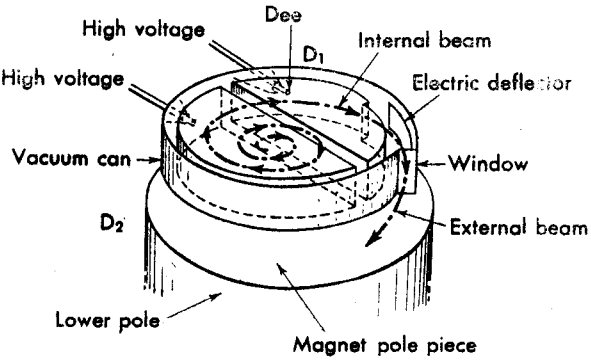
เซอร์ ริชาร์ด เกรกอรี เคยเขียนไว้อย่างตรงเป้าหมายว่า *"วิทยาศาสตร์ ไม่ใช่เป็นแต่เพียงที่สำหรับสะสมความจริง ๆ ต่าง ๆ ไว้ใช้ประโยชน์เท่านั้น หากเป็นความอุตสาหะวิริยะอันยิ่งใหญ่ของมนุษยชาติ เป็นการแสวงหาความจริงอย่างไม่หวาดหวั่น เทียบเท่ากับศิลปะและศาสนาทีเดียว"*

ในการสืบสาวเข้าไปยังส่วนลึกที่สุดของอะตอมนั้น นักวิทยาศาสตร์รุ่นแรก ๆ คืบหน้าไปอย่างตะกุกตะกักไม่ค่อยมั่นใจนัก

เพราะมีเครื่องมือเพียงไม่กี่อย่างสำหรับสำรวจอะตอม เครื่องมืออันละเอียดอ่อน สำหรับใช้ในกรณีที่หูหรือตาคนไม่มีความไวพอที่จะรับนั้นค่อย ๆ มีเพิ่มขึ้นมาเรื่อย ๆ เครื่องนับอีเล็กตรอนิกซึ่งมีผู้คิดขึ้นได้ มีความไวมากถึงกับสามารถรับรู้อนุภาคนิวเคลียร์ที่ผ่านเข้ามาแม้เพียงตัวเดียวได้ ห้องเมฆซึ่งสร้างกันขึ้นมานั้นทำให้ได้เห็นว่าอะตอมของเรเดียมสลายตัวอย่างไร ปฏิกิริยานิวเคลียร์เกิดขึ้นอย่างไร ฟิล์มถ่ายรูปก็ได้รับการปรับปรุงให้สมบูรณ์จนไวพอที่จะบันทึกอนุภาคที่ผ่านไปได้ คนจำนวนไม่น้อยอุทิศชีวิตให้แก่การประดิษฐ์เครื่องมือ สำหรับใช้ในการวิจัยทางนิวเคลียร์

นักวิทยาศาสตร์รุ่นบุกเบิก เช่น รัทเธอฟอร์ด ทำการทดลองที่สำคัญ ๆ โดยใช้อนุภาคที่ได้จากสารกัมมันตภาพตามธรรมชาติ เป็นอนุภาคสำหรับยิง การที่ต้องอาศัยสารกัมมันตภาพตามธรรมชาติเช่นนี้ ทำให้เกิดความยุ่งยากหลายอย่าง ทั้งยังมีผลให้ขอบเขตของการทดลองต้องถูกจำกัดลงอย่างมากด้วย อนุภาคซึ่งออกจากธาตุกัมมันตภาพตามธรรมชาตินั้นออกไปรอบ ๆ ทุกทาง และจำนวนอนุภาคก็ไม่มากนัก เนื่องจากในการทดลองนั้นต้องการอนุภาคในทางใดทางหนึ่งเท่านั้น จึงจำเป็นต้องกันอนุภาคส่วนมากไว้ พลังงานของอนุภาคเหล่านี้เราก็เปลี่ยนแปลงไม่ได้ ดังนั้นจึงได้ผลไม่ค่อยเป็นที่น่าพอใจนัก นักวิทยาศาสตร์ต้องการ

ใช้อนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นจำนวนมากที่พุ่งออกไปเป็นลำ ตามทิศทางที่ต้องการและเปลี่ยนแปลงพลังงานได้ตามชอบใจ ในราว ๆ ปี ๑๙๓๐ มีผู้ประดิษฐ์เครื่องมือขึ้นหลายอย่างซึ่งมีท่าทีว่าจะเป็นประโยชน์มากในการยิงอะตอม ในบรรดาเครื่องมือเหล่านี้ เครื่องไซโคลตรอนนับว่ามีชื่อเสียงที่สุด

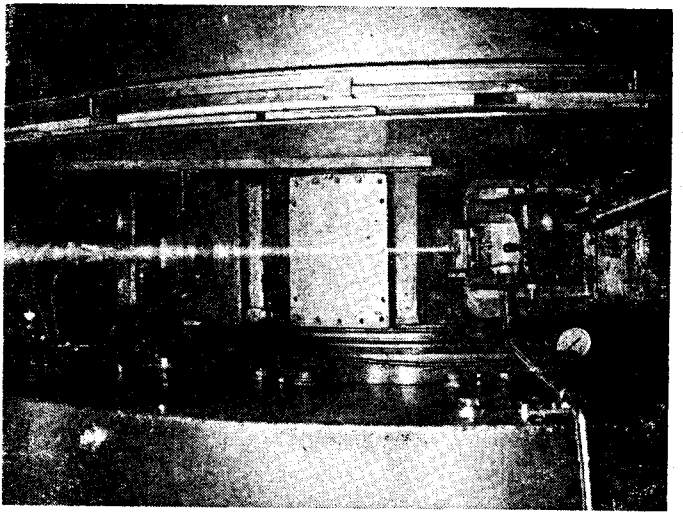


รูปที่ ๓๖ ภาพร่างแสดงหลักการของเครื่องไซโคลตรอน ในภาพแสดงแต่ขั้วล่างของแม่เหล็กไฟฟ้า ไอออนซึ่งถูกผลิตขึ้นตรงกลางกล่องสุญญากาศ เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่แสดงในรูป

เครื่องไซโคลนตรอนเครื่องแรก ซึ่ง อี. โอ. ลอว์เรนซ์ (E.O. Lawrence) และเอ็ม. แสตนลีย์ ลิฟวิงสตัน (M.Stanley Livingston) สร้างขึ้นนั้น โปรตอนถูกผลิตขึ้นข้างในกล่องสุญญากาศ และโปรตอนนี้ถูกเร่งเป็นระยะ ๆ ขณะที่เคลื่อนที่ไปรอบ ๆ เป็นวงกลม จนกระทั่งมีพลังงานสูงถึง

๘๐,๐๐๐ อีเล็กตวอนโวลต์(eV) โปรตอนซึ่งเป็นอนุภาคมีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่เป็นวงกลมได้ โดยการกระทำของสนามแม่เหล็กซึ่งมีความเข้มสูง สนามแม่เหล็กนี้เกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความแรงมาก ความจริงเรื่องนี้ก็เป็นที่รู้กันทั่ว ๆ ไปอยู่แล้ว สิ่งที่นับว่าเป็นเรื่องใหม่ในการออกแบบเครื่องไซโคลตรอน คือวิธีเร่งโปรตอนขณะที่มันเคลื่อนที่เป็นวงกลม ภายในกล่องสูญญากาศนั้นจะมีกล่องโลหะผ่าครึ่ง (รูปร่างเหมือนตัวอักษร D สองตัวหันหน้าชนกัน) สองกล่องวางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก กล่องทั้งสองต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้มีแรงไฟฟ้าไปกระตุ้นโปรตอน ขณะที่โปรธอนเคลื่อนที่อยู่ในช่องระหว่างดี (กล่องรูปตัว D) ทั้งสองอัน ในการทำเช่นนี้ต้องกะระยะเวลาให้พอเหมาะ เพราะโปรตอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ระยะทางครึ่งวงกลมน้อยมาก เมื่อโปรตอนออกมาจากดี (D) ข้างหนึ่งโวลเตจที่ดี (D) ข้างตรงกันข้ามจะต้องพอดี ทำให้โปรตอนถูกดูดเข้าไป ในการนี้ต้องใช้โวลเตจซึ่งมีความถี่สูงมากต่อเข้ากับดี (D) ทั้งคู่ เครื่องไซโคลตรอนซึ่งสร้างขึ้นที่มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ในปี ๑๙๓๐ เศษ ๆ อาศัยวิธีนี้เร่งไอออนของไฮโดรเจนชนิดหนักจนมีพลังงานถึง ๖๐ ล้านอีเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ได้ ในภาพจะเห็นลำอนุภาคซึ่งใช้สำหรับยิงอะตอม พุ่งออกมาจากเครื่องไซโคลตรอน ขอให้สังเกตว่าลำอนุภาคซึ่งเรามองเห็นเพราะอากาศ

ถูกทำให้เป็นไอออนนั้น เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงหลังจากออกจากเครื่องไซโคลตรอน ที่เป็นเช่นนี้เพราะอนุภาคทำให้เบี่ยงเบนออกจากทางเดินซึ่งเป็นวงกลม จึงหลุดพ้นจากอำนาจของสนามแม่เหล็ก พุ่งออกไปเป็นเส้นตรง เหมือนหยดน้ำที่หลุดจากล้อ ซึ่งกำลังหมุนอย่างรวดเร็ว



รูปที่ ๓๗ อนุภาคดิวทีรอนซึ่งมีพลังงาน ๖๐ MeV กำลังพุ่งออกมาจากเครื่องไซโคลตรอน ขนาด ๖๐ นิ้ว ที่มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย (Courtesy the University of California Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley.)

ในการศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ของธาตุหลายธาตุ นักฟิสิกส์ใช้ลำอนุภาคซึ่งมีพลังงานสูงจากเครื่องไซโคลตรอน ขนาด ๖๐ นิ้ว (เส้นผ่าศูนย์กลางของขั้วแม่เหล็กในเครื่องไซโคลตรอน) ที่มหา-

วิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย์ และเนื่องจากทำให้พลังงานของอนุภาคเปลี่ยนแปลงได้ไม่ยาก จึงได้ความรู้เกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคความเร็วสูง ซึ่งมีประจุไฟฟ้ากับอะตอมต่าง ๆ ออกมาเป็นตัวเลขได้กล่าวมาในตอนต้น ๆ แล้วว่า มีการค้นพบอะตอมกัมมันตภาพกันหลายชนิด และบางชนิดได้จากการยิงอะตอมด้วยอนุภาคจากเครื่องไซโคลตรอนนี่เอง อะตอมกัมมันตภาพเหล่านี้ถูกใช้ประโยชน์ในการวิจัยทางแพทย์และทางชีววิทยา เครื่องไซโคลตรอนเป็นจำนวนไม่น้อย ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อผลิตไอโซโทปกัมมันตภาพโดยเฉพาะ

อย่างไรก็ตามจุดประสงค์สำคัญของนักฟิสิกส์ ในการเสาะหาอนุภาคซึ่งมีพลังงานสูง ๆ ยิ่งขึ้นไป ก็เพื่อจะใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายในของนิวเคลียส เพื่อให้รู้ว่าอะไรเป็นแรงภายในยึดเหนี่ยวนิวเคลียสไว้ แรงนิวเคลียร์นี้มีอำนาจออกไปนอกนิวเคลียสได้ไกลสักเท่าใด และยังมีอนุภาคอื่นในนิวเคลียสอีกหรือไม่ นอกเหนือไปจากนิวตรอนและโปรตอนที่รู้จักกันดีอยู่แล้ว

ความจริงนักฟิสิกส์นิวเคลียร์ก็ไม่ใช่จะดำเนินการค้นคว้าไปโดยไม่รู้อะไรเลย เพราะการวิจัยเรื่องรังสีคอสมิกทำให้ได้พบปรากฏการณ์ที่น่าทึ่งหลายอย่างเกี่ยวกับอนุภาคในนิวเคลียส รังสีคอสมิกนั้นประกอบด้วยอนุภาคพลังงานสูงซึ่งมีประจุไฟฟ้า เข้ามายังโลกจากห้วงอวกาศ ปัจจุบันนี้เรารู้แล้วว่าอนุภาคพวกนี้ส่วน

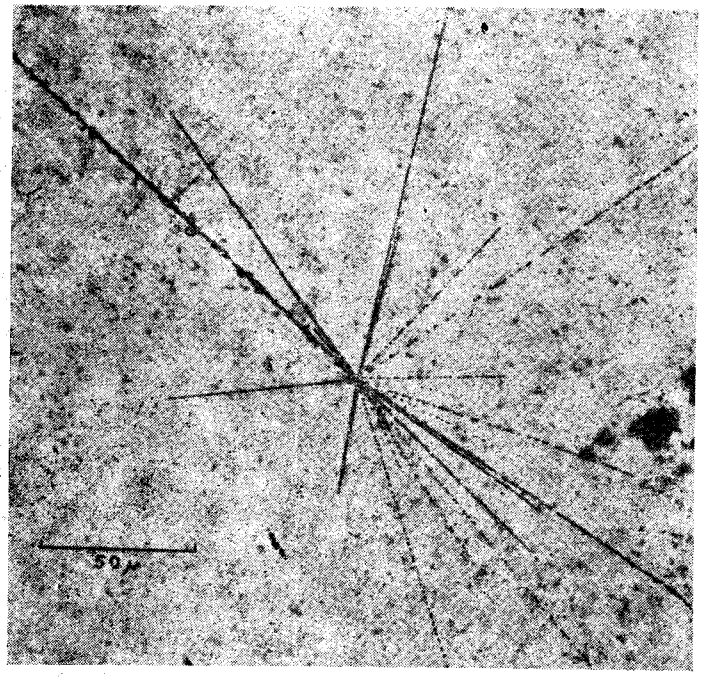
มากคือโปรตอน ซึ่งมีพลังงานวัดได้เป็นพันล้านอีเล็กตรอนโวลต์ ยังไม่เป็นที่ทราบชัดว่าอนุภาคความเร็วสูงเหล่านี้เกิดขึ้นได้อย่างไร แต่เมื่อเข้ามาในบรรยากาศของโลกแล้ว เราก็รู้ความเป็นไปของมันไม่น้อย มีการทดลองใช้ไกเกอร์ เคาน์เตอร์ หลาย ๆ เครื่องให้ทำงานประสานกัน เครื่องมือนี้ถูกนำขึ้นไปไว้บนภูเขาสูง ๆ เพื่อวัดรังสีคอสมิก เครื่องมือที่เรียกว่าห้องเมฆก็ถูกใช้ในการถ่ายภาพอนุภาคคอสมิกด้วย เนื่องจากนาน ๆ ครั้งจึงจะมีรังสีคอสมิกผ่านเข้าไปในห้องเมฆ การถ่ายภาพจึงใช้วิธีจัดให้มีไกเกอร์ เคาน์-เตอร์ อยู่เหนือและใต้ห้องเมฆ มีวงจรอีเล็กโตรนิก ซึ่งจะทำให้ห้องเมฆทำงานโดยอัตโนมัติ ในเมื่อมีรังสีคอสมิกผ่านเคาน์เตอร์ทั้งข้างบนและล่าง นับเป็นการใช้รังสีคอสมิกให้ "*ลั่นไก*" เครื่องมือเพื่อถ่ายภาพตัวเอง

ภาพถ่ายที่น่าสนใจซึ่งได้มาโดยวิธีนี้ ทำให้รู้คุณสมบัติของรังสีคอสมิกหลายอย่าง ในภาพจะเห็นเส้นทางเล็ก ๆ ซึ่งโค้งเล็กน้อย เนื่องจากอำนาจของแม่เหล็กรอบ ๆ ห้องเมฆ เมื่ออนุภาคกระทบแผ่นอลูมิเนียมแล้วทะลุออกอีกข้างหนึ่ง พลังงานจะลดลง จะเห็นได้จากการที่เส้นทางเดินโค้งมากขึ้น นอกจากนี้จะเห็นว่าในรูปตอนล่างนั้นทางเดินหนากว่าเดิม เพราะอนุภาคมีอำนาจในการทำให้เกิดไอออนมากขึ้น ที่ปลายทางเดินมีสิ่งที่น่าทึ่งเกิดขึ้น คืออนุภาคหยุดลงและเกิดอนุภาคใหม่ขึ้นมา เห็นได้จากทางเดิน

ซึ่งเป็นเส้นเล็ก ๆ ต่อจากเส้นทางเดินของอนุภาคเดิม นักฟิสิกส์มีวิธีคำนวณหามวลสารของอนุภาคจากอำนาจการทำให้เกิดไอออนและจากรัศมีความโค้งของทางเดิน โดยวิธีนี้ได้พบว่ามวลสารของรังสีหรืออนุภาคคอสมิก ซึ่งผ่านแผ่นอลูมิเนียมนั้นมากกว่าของอีเล็กตรอนหลายร้อยเท่า อนุภาคนี้เรียกชื่อกันว่า มีซอน (meson) และอนุภาคซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีซอนหยุดนั้นคืออีเล็กตรอน พูดง่าย ๆ ก็คือ มีซอนเคลื่อนที่ในก๊าซซึ่งอยู่ในห้องเมฆช้าลง ๆ และในที่สุดก็หยุดนิ่ง ในการที่มีซอนมาถึงบั้นปลายแห่งชีวิตนั้นสลายตัวและปล่อยอีเล็กตรอนออกมา

อนุภาคมีซอนซึ่งพบเป็นครั้งแรก ในการวิจัยเกี่ยวกับรังสีคอสมิกนั้นไม่ใช่ว่าโผล่ขึ้นมาโดยไม่มีวี่แววล่วงหน้ามาก่อน เรื่องราวมีอยู่ว่าในปี ๑๙๓๕ นักวิทยาศาสตร์ญี่ปุ่นชื่อ ยูกาวา (Yukawa) ได้ทำนายว่า ควรจะมีอนุภาคซึ่งมีมวลสารอยู่ระหว่างอีเล็กตรอนกับโปรตอน ยูกาวา มองในแง่ที่ว่าอนุภาคซึ่งบัจจุบันเรียกกันว่า มีซอนนี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการยึดกันระหว่างนิวตรอนกับโปรตอนในนิวเคลียส ตามทฤษฎีของยูกาวานั้น อนุภาคมีซอน เป็นอนุภาคสำหรับ *"แลกเปลี่ยน"* ระหว่างนิวตรอนและโปรตอน เขาถือว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในนิวเคลียสเกิดจากการที่โปรตอนและนิวตรอน แลกเปลี่ยนอนุภาคมีซอนกันอย่างไม่หยุดหย่อน คือนิวตรอนกลายเป็นโปรตอนกลับไปกลับมา

หลายพันล้านครั้งในหนึ่งวินาที แรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากการแลกเปลี่ยนมีซอนนั้นนับว่า เป็นแนวคิดที่ผิดแผกไปจากที่เคยมีกันมามากทีเดียว อนุภาคมีซอนนั้นถ้าเป็นอิสระจากอนุภาคในนิวเคลียสแล้วจะมีชีวิตอยู่สั้นมาก เพียงหนึ่งในล้านวินาทีเท่านั้น



รูปที่ ๓๘ ภาพถ่ายแสดงอนุภาคในรังสีคอสมิกกระทบนิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสแตกกระจายไปรอบด้าน ภาพนี้ขยายจากฟิล์มถ่ายรูปซึ่งถูกส่งขึ้นไปถึงชั้นสตราโตสเฟียร์ในลูกบอลลูนที่ไม่มีคนประจำ การวิจัยทำนองนี้ทำให้ได้ความรู้เกี่ยวกับภายในของนิวเคลียส

ภาพที่ได้จากการส่งฟิล์มถ่ายรูปขึ้นไปกับลูกบอลลูนแบบไม่มีคนประจำซึ่งขึ้นไปสูงถึงชั้นสตราโตสเฟียร์ ยิ่งทำให้รู้เกี่ยวกับมีซอนมากขึ้นอีก นักวิทยาศาสตร์อังกฤษได้คิดฟิล์มถ่ายรูปซึ่งใช้น้ำยาที่มีความไวเป็นพิเศษสำหรับส่งขึ้นไปกับลูกบอลลูน เป็นจำนวนมาก บางครั้งลูกบอลลูนขึ้นไปสูงถึงยี่สิบไมล์หรือมากกว่านั้น คือไปถึงชั้นบรรยากาศซึ่งเบาบาง และมีรังสีคอสมิกอยู่มาก ผลจากการทดลองแบบนี้ ทำให้นักวิทยาศาสตร์อังกฤษพบว่ามีมีซอนอยู่สองชนิด คือชนิดหนักที่เรียกว่าพาย มีซอน (Pi-meson) ซึ่งไม่ถาวรมีอายุอยู่เพียงหนึ่งในสี่ของพันล้านวินาที พายมีซอนสลายตัวเป็นมีซอนชนิดเบา เรียกชื่อกันว่า มิว มีซอน (mu-meson) มีซอนชนิดหนักมีน้ำหนักมากกว่าอีเล็กตรอน ๒๗๓ เท่า และ มิว มีซอน หนักกว่าอีเล็กตรอน ๒๐๖ เท่า

การค้นพบที่น่าตื่นเต้นของนักวิจัยชาวอังกฤษช่วยกระตุ้นให้นักวิทยาศาสตร์ชาวสหรัฐ ฯ ที่ห้องทดลองรังสีที่เบิร์คเลย์ เพิ่มความพยายามในการสร้างเครื่องยิงอะตอมให้ใหญ่โตขึ้นไปอีก เพราะคาดว่าถ้าสามารถทำให้อนุภาคมีพลังงานสูงมากได้ ก็อาจจะทำมีซอนขึ้นมาในห้องทดลองได้ ความจริงนั้นงานนี้ได้เริ่มกันตั้งแต่ก่อนสงคราม แต่ต้องละทิ้งไปเพื่อทำงานวิจัยทางอาวุธปรมาณู ตอนนั้น ดร. อี. โอ. ลอว์เรนซ์ ได้สร้างแม่เหล็กขนาดมหึมาขึ้น ขั้วแม่เหล็กมีเส้นผ่าศูนย์กลางถึง ๑๘๔ นิ้ว และหวังว่าจะเร่ง

อนุภาคให้มีพลังงานได้สูงถึง ๑๐๐ ล้านอีเล็กตรอนโวลต์ อย่างไรก็ดีเขารู้ว่าสิ่งที่เขาพยายามจะทำด้วยเครื่องไซโคลตรอนพิเศษเครื่องนี้ แทบจะเป็นสิ่งเหลือวิสัยเอาทีเดียว การที่จะเข้าใจปัญหาที่ทำความยุ่งยากให้แก่ผู้ออกแบบเครื่องมือนี้ เราต้องรู้เรื่องความเป็นไปของอนุภาคที่มีความเร็วสูง เพิ่มเติมอีกเล็กน้อย หลักสำคัญของทฤษฎีของไอน์สไตน์มีอยู่ว่า เมื่อความเร็วของอนุภาคสูงพอ ๆ กับความเร็วของแสง มวลสารของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น ความจริงข้อนี้ได้รับการทดสอบมาแล้วโดยการทดลอง ตัวอย่างเช่นอีเล็กตรอนในหลอดรังสีเอกซ์ ซึ่งมีพลังงานถึงแสนอีเล็กตรอนโวลต์จะหนัก หรือมีมวลสารมากกว่าเมื่ออยู่นิ่ง ๆ ถึง ๒๐ เปอร์เซ็นต์ โรงพยาบาลและสถาบันบางแห่งมีเครื่องทำรังสีเอกซ์ขนาดหนึ่งล้านโวลต์ อีเล็กตรอนซึ่งเกิดขึ้นในเครื่องมือเหล่านี้จะมีมวลสารมากกว่าเมื่ออยู่นิ่งถึงสองเท่า

ได้กล่าวแล้วว่าในการทำงานของไซโคลตรอนนั้น จำเป็นต้องให้ไอออนซึ่งวนเวียนอยู่ในกล่องสูญญากาศ มาถึงช่องว่างระหว่างดี (D) อย่างเหมาะเจาะ จึงจะถูกเร่งโดยโวลเตจของดี (D) เมื่อไอออนเคลื่อนที่เร็วขึ้นทุกที ๆ มวลสารจะเพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้เวลาเคลื่อนที่อยู่ในดี (D) นานขึ้น ผลก็คือไอออนจะมาถึงช่องว่างระหว่างดี (D) ช้าลง ทำให้ไม่ได้จังหวะกับโวลเตจจึงไม่ได้รับการเร่งที่เหมาะสม ฉะนั้นจึงดูเหมือนว่าผลตามทฤษฎี

ของไอน์สไตน์จะจำกัดไม่ให้สามารถสร้างเครื่องมือที่จะเร่งอนุภาคได้เกินกว่าราว ๆ ๑๐๐ MeV การที่มวลสารของอนุภาคเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเร็วสูงนี้ ดูท่าทีว่าจะเป็นอุปสรรคที่นักออกแบบเครื่องไซโคลตรอนเอาชนะไม่ได้

นักวิทยาศาสตร์สองคนคือ เอ็ดวิน แม็คมิลแล็น ในสหรัฐฯ และ วี เวคสเลอ ในรัสเซีย ต่างก็เกิดมีความคิดที่จะหลีกเลี่ยงอุปสรรคนี้ขึ้นมา โดยที่คนหนึ่งก็ไม่รู้ว่าอีกคนหนึ่งมีความคิดเช่นเดียวกับตน การที่มวลสารของอนุภาคเพิ่มขึ้นนั้นเป็นเรื่องที่ไม่มีอะไรไปห้ามไว้ได้ แต่ก็อาจจะออกแบบเครื่องมืออันใหญ่โตนี้เสียใหม่ ให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทำงานได้จังหวะคล้องจองกัน โดยการปรับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าให้เหมาะเจาะจะทำให้อนุภาคถูกเร่งโดยสม่ำเสมอได้ ในที่สุดเครื่องขนาด ๑๘๔ นิ้ว ซึ่งมีอยู่เดิมที่เบิร์คเลย์จึงได้รับการออกแบบเสียใหม่จนกระทั่งสามารถผลิตลำอนุภาคแอลฟาซึ่งมีพลังงานถึง ๓๘๐ MeV และแล้วในปี ๑๙๔๘ นักวิทยาศาสตร์ที่เบิร์คเลย์ก็ทำอนุภาคมีซอนขึ้นได้สำเร็จ

การทำมีซอนขึ้นมาเป็นแต่เพียงจุดเริ่มต้นของการค้นพบอนุภาคพลังงานสูงอีกหลายอย่าง ซึ่งล้วนแต่เป็นการค้นพบที่น่าตื่นเต้นมาก สิ่งหนึ่งซึ่งประทับใจนักฟิสิกส์ก็คือ ความจริงที่ว่าอนุภาคนิวเคลียร์ทั้งหลายจะต้องมีคู่ซึ่งมีคุณสมบัติตรงกันข้ามเสมอ เช่น

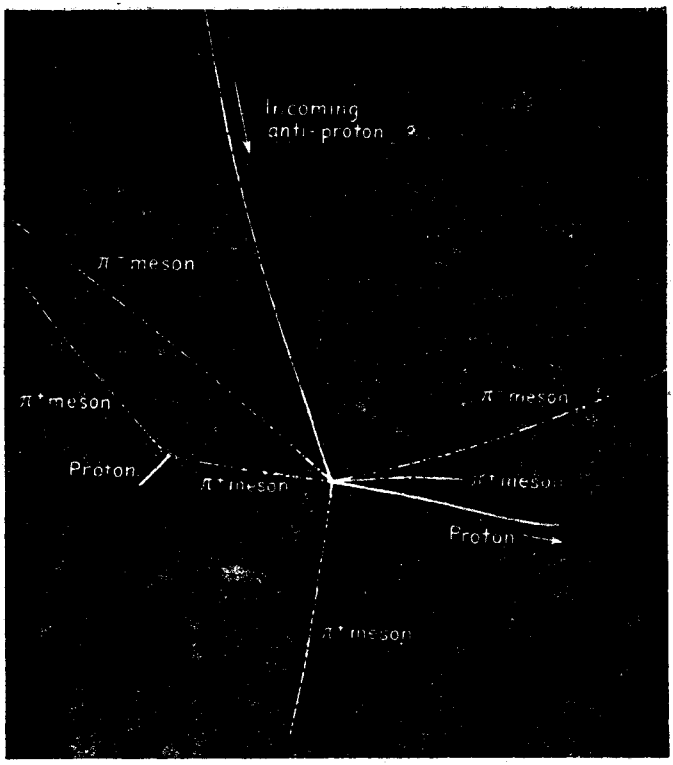
อีเล็กตรอนธรรมดาซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวก จะมีคู่ซึ่งมีประจุไฟฟ้าชนิดตรงกันข้าม อันได้แก่อนุภาคโพสิตรอน (Positron) อนุภาคมีซอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบก็มีคู่ซึ่งมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้าม ในทำนองเดียวกันนักวิทยาศาสตร์มีความรู้สึกว่าจะต้องมี แอนติโปรตอน (anti proton) ซึ่งมีมวลสารเท่ากับโปรตอน แต่มีประจุไฟฟ้าชนิดตรงกันข้าม นักวิทยาศาสตร์เหล่านี้คาดว่าจะได้พบอนุภาคนี้ ถ้ามีพลังงานมากพอที่จะสร้างโปรตอนให้เกิดขึ้นเป็นคู่ ๆ คือคู่ซึ่งประกอบด้วยโปรตอนสามัญหรือนิวเคลียสของไฮโดรเจนธรรมดา และอนุภาคแอนติ โปรตอน ซึ่งยังไม่มีผู้ค้นพบ จากการคำนวณปรากฏว่า อนุภาคที่จะใช้ในการยิงจะต้องถูกเร่งในเครื่องมือขนาดใหญ่จนมีพลังงาน ๔.๕ พันล้านอีเล็กตรอนโวลต์ (BeV) จึงจะสามารถสร้างคู่โปรตอนขึ้นมาได้

พิจารณาแง่ปฏิบัติแล้ว เครื่องเร่งอนุภาคให้มีพลังงานเป็นพันล้านอีเล็กตรอนโวลต์นั้นจำเป็นจะต้องมีแบบแปลนแตกต่างไปจากเครื่องขนาด ๑๘๔ นิ้ว ซึ่งได้รับการตั้งชื่อว่า ซินโครไซโคลตรอน ตามแบบเดิมนั้นจะต้องใช้เหล็กมากมายในการสร้างขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใหญ่พอที่จะครอบคลุมบริเวณซึ่งโปรตอนความเร็วสูงเคลื่อนที่อยู่ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงใช้แม่เหล็กเป็นรูปวงแหวนแทนแม่เหล็กแบบธรรมดา แม่เหล็กนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางถึง ๑๐๐ ฟุต เครื่องมือนี้เรียกว่า ซินโครตรอน สามารถเร่งกลุ่ม

โปรตอนอันมีจำนวนหนึ่งหมื่นล้านอนุภาค ให้มีพลังงานสูงถึง ๖ BeV ในการนี้กลุ่มโปรตอนต้องเคลื่อนที่ทั้งหมด คิดเป็นระยะทางถึง ๓๐๐,๐๐๐ ไมล์

และแล้วในฤดูใบไม้ร่วงปี ค.ศ. ๑๙๕๕ นักวิจัยแห่งมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียกลุ่มหนึ่งก็ประสบความสำเร็จ ในการค้นหาอนุภาคใหม่ คืออนุภาคแอนติ โปรตอน การเสาะหาอนุภาคนี้เหมือนกับหาเข็มในกองฟางจริง ๆ เพราะโปรตอนซึ่งมีพลังงานถึงหกพันล้านโวลต์นั้นทำให้เกิดอนุภาคมีซอนขึ้นมากมาย มีซอนนี่เองที่ก่อให้เกิดความสับสน เพราะเป็นประตูกลุ่มควันบีดบังอนุภาคแอนติโปรตอนซึ่งนาน ๆ ครั้งจึงจะเกิดขึ้นไว้ ต้องมีการประดิษฐ์เครื่องมือ ซึ่งอาศัยอำนาจแม่เหล็กขึ้นมา เพื่อใช้ในการเลือกเฟ้นอนุภาค เครื่องมือนี้จะกั้นอนุภาคมีซอนไว้ และปล่อยให้แอนติโปรตอนผ่านไปได้ โดยวิธีนี้เองที่อนุภาคแอนติโปรตอนถูกค้นพบ

เมื่ออีเล็กตรอนกระทบกับโพสิตรอน อนุภาคทั้งสองอาจจะสลายตัวไป การกระทบของโปรตอนกับแอนติโปรตอน ก็อาจเกิดผลทำนองเดียวกัน และมีอยู่บ่อยครั้งที่เดียวที่อนุภาคแอนติโปรตอนถึงจุดจบโดยการแตกกระจายอย่างรุนแรง ในภาพถ่ายจะเห็นอนุภาคเป็นจำนวนมากออกมาจากนิวเคลียส (ซึ่งถูกแอนติโปรตอนกระทบเอา นิวเคลียสนั้นเป็นนิวเคลียสแม่ของโปรตอน)



รูปที่ ๓๕ รูปถ่ายแสดง แอนติโปรตอน เคลื่อนที่มาจากข้างบน แล้วกระทบนิวเคลียส ทำให้เกิดอนุภาคขึ้นหลายอนุภาค เส้นหนาไปทางขวามือ อาจเป็นทางเดินของโปรตอน ส่วนเส้นอื่น ๆ เป็นของอนุภาคพายมีซอน ชนิดบวกและลบ การที่แอนติโปรตอนกระทบนิวเคลียสของคาร์บอนเช่นนี้มีผลให้ตัวเองถูกทำลายไป (Courtesy the University of California Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley.)

ปัจจุบันนี้นักฟิสิกส์พยายามที่จะให้ได้อนุภาคซึ่งมีพลังงานสูงยิ่งขึ้นไปอีก โดยมองหาทางที่จะทำรังสีคอสมิกขึ้นมาในโลก เครื่องโปรตอน-ซินโครตรอนขนาดมหึมา กำลังอยู่ในระหว่างก่อสร้างที่ห้องปฏิบัติการบรู๊ค ฮาเวน ลอง ไอส์แลนด์ โปรตอนในเครื่องมือนี้เคลื่อนที่เป็นวงในกล่องสูญญากาศ ซึ่งอยู่ข้างในแม่เหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง ๘๔๐ ฟุต แท่งแม่เหล็กขนาดยักษ์นี้ผึ่งอยู่ในอุโมงค์คอนกรีต โปรตรอนจะถูกเร่งโดยเครื่องเร่งอีกเครื่องหนึ่งให้มีพลังงาน ๕๐ MeV แล้วจึงปล่อยเข้าไปในวงโคจร ต่อจากนั้นจะถูกเร่งให้มีพลังงานราว ๆ ๒๕ ถึง ๓๐ BeV เครื่องโปรตอน-ซินโครตรอนเครื่องนี้จะทำงานได้ดีกว่าเครื่องเร่งขนาด ๑๐ BeV ซึ่งตอนนี้มีอยู่ในสหภาพโซเวียต ดูเหมือนว่าปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายเท่านั้นเอง ที่ทำให้การแข่งขันกันในเรื่องผลิตพลังงานให้สูงยิ่ง ๆ ขึ้นไป ต้องอยู่ในวงจำกัด เครื่องเร่งขนาดมหึมาที่มีผู้เสนอให้สร้างขึ้นในสหรัฐ ฯ เมื่อเร็ว ๆ นี้จะมีราคาถึง ๑๐๐ ล้านดอลลาร์ การที่จะได้เงิน จำนวน มาก เช่นนั้นมา เพื่อการค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์นั้น จะต้องให้สภาผู้แทน และประชาชน ผู้เป็นเจ้าของเงินตัดสินว่า การค้นคว้าทางนิวเคลียร์จะมีประโยชน์ต่อการอยู่ดีกินดีของประเทศชาติในอนาคตหรือไม่ คงจะมีทางสำเร็จได้ยาก ถ้าจะให้เหตุผลว่า เครื่องมือใหญ่ ๆ เหล่านี้จะช่วยเพิ่มพูนความรู้ขั้นมูลฐาน จึงนับว่าเป็นประโยชน์ต่อประชาชนทั่วไป ทั้งนี้

เพราะเนื้อหาของการวิจัย ห่างไกลจากความเข้าใจของประชาชนเหลือเกิน ถ้าให้ออกเสียงเลือกกันระหว่างงานวิจัยกับสิ่งที่เป็นตัวเป็นตน เช่น เขื่อนกั้นน้ำแล้ว สมาชิกสภาผู้แทนทั่ว ๆ ไปทุกวันนี้อาจเห็นว่าไม่มีเหตุผลเพียงพอที่จะให้เงินไปสร้างเครื่องมือซึ่งอาจไม่ให้ผลอะไรที่ใช้ประโยชน์ได้เลย

ความแปลกประหลาดของ "โลก" ภายในอะตอมของนักวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ เป็นอุปสรรคที่สำคัญยิ่งอย่างหนึ่งซึ่งกีดขวางไม่ให้สภาผู้แทนและประชาชนสามารถเข้าใจวิทยาศาสตร์ได้ (ไม่เหมือนความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ซึ่งมองเห็นง่าย) ภาษาที่นักนิวเคลียร์ฟิสิกส์ ใช้กันนั้นประชาชนคนเดินถนนพึงไม่รู้เรื่องอนุภาคมูลฐานต่าง ๆ เป็นต้นว่ามีซอนนั้น ไม่มีความหมายอะไรสำหรับคนธรรมดา อย่างไรก็ตามจะต้องให้นักวิทยาศาสตร์และสามัญชนห่างเหินกันน้อยลง การที่จะทำเช่นนี้ได้ก็ต้องอาศัยการศึกษาเท่านั้นนักวิทยาศาสตร์จะต้องมีส่วนช่วยโดยทำตัวให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นและประชาชนก็ต้องร่วมมือโดยการพยายาม เรียนรู้เกี่ยวกับความเป็นไป ของโลก สมัยใหม่ ที่เราทุกคนอาศัยอยู่นี้บ้าง

คนส่วนมากไม่อยากเกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์หรือนักวิทยาศาสตร์ เพราะมีความคิดกันว่าวิทยาศาสตร์เป็นเรื่องไม่น่าตื่นเต้น ไม่มีชีวิตชีวา นักวิทยาศาสตร์เป็นประดุจหุ่นยนต์ที่ไม่มีความรู้สึก บางคน ก็คิดว่า นักวิทยาศาสตร์เป็นเพียงผู้ประดิษฐ์อาวุธสำหรับ

ประหัตประหารกันเท่านั้นเอง บุคคลเหล่านี้ขาดการสำนึกว่าแท้จริงแล้ว วิทยาศาสตร์เป็นการผจญภัยอันใหญ่ยิ่งแห่งศตวรรษที่ยี่สิบนี้ เป็นจุดมุ่งหมายสูงสุดในการกระเสือกกระสน เพื่อความอยู่ดีกินดีของมนุษยชาติ เป็นการเพิ่มพูนเกียรติคุณของมนุษย์ด้วยความรู้เกี่ยวกับความยิ่งใหญ่งดงามของจักรวาลซึ่ง เฮนรี่ ซักส์เลย์ เรียกว่า *"สิ่งซึ่งยิ่งใหญ่มหาศาล และเล็กเหลือที่จะพรรณนา อันเป็นสถานที่ซึ่งชีวิตที่แสนสั้นของเราดำเนินอยู่"*

เมื่อได้สำรวจความลึกลับของอะตอมแล้ว มนุษย์ก็จะก้าวออกไปจากโลกเพื่อไขปัญหาลึกลับของดาวเคราะห์ดวงอื่น ของดวงอาทิตย์ หรือแม้แต่ของดาวฤกษ์อื่น ๆ เขาเหล่านั้นมีความกล้าอย่างล้นเหลือ พยายามที่จะเอาชนะแรงโน้มถ่วงของโลก เดินทางไปในอวกาศเพื่อสืบเสาะสิ่งใหม่ๆ ต่อไป การสำรวจนี้จะเป็นการค้นหาความลับของสิ่งมีชีวิตเองด้วย ความคิดเห็นของเราจะแจ่มชัดเพราะจะไม่ยึดเอาโลกตัวเองเป็นหลัก หรือเป็นหนึ่งไม่มีสองในจักรวาลอีกต่อไป แต่จะเห็นว่ายังมีโลกอื่น ดาวเคราะห์อื่นอีกเป็นจำนวนล้าน และอาจจะมีอีกโลกหนึ่ง ซึ่งมีสิ่งมีชีวิตที่มีสติปัญญาอาศัยอยู่ เมื่อได้เห็นความกว้างใหญ่ไพศาลของจักรวาลเช่นนี้ ก็มีเหตุผลพอที่จะคิดว่า ณ ที่บางแห่งในอวกาศอันเวิ้งว้างนี้ยังมีหลักแหล่งของมนุษย์ซึ่งอาจจะมีอารยธรรมก้าวหน้ากว่าของเราเองตั้งล้านปี

อีกล้านปีข้างหน้า วิทยาศาสตร์จะก้าวไปไกลแค่ไหน เป็นเรื่องซึ่งเหลือที่สมองมนุษย์จะหยั่งได้ แม้เพียงระยะสิบปีก็ยังยากที่จะทาย ไม่มีใครเคยคิดมาเลยว่าจะมีทฤษฎีเช่นทฤษฎีของไอน์-สไตน์ หรือว่ามนุษย์จะแยกอะตอมออกเป็นเสี่ยง ๆ ได้ วิวัฒนาการซึ่งมีความสำคัญพอ ๆ กันรอเราอยู่ข้างหน้าในท่ามกลางอาณาเขตอันกว้างใหญ่ ซึ่งตอนนี้ก็อยู่ภายในสายตาของเราแล้ว วิทยาการวิทยาศาสตร์นับว่าเป็นการผจญภัยอันยิ่งใหญ่อย่างแท้จริง และนักวิทยาศาสตร์ก็เป็นนักสำรวจความลึกลับผู้ยิ่งใหญ่

800004

พิมพ์ที่โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว นายกำธร สถิรกุล ผู้พิมพ์และผู้โฆษณา

๒๒ กันยายน ๒๕๑๕