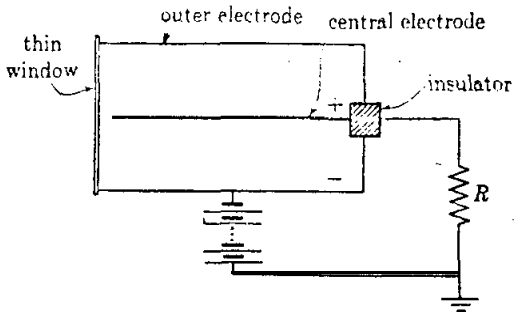
บทที่ 2
อุปกรณ์ที่ใช้วัดรังสีคอสมิคและเทคนิคเบื้องต้น

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษารังสีคอสมิคมีมากมายหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งแต่ละชนิดก็ใช้ศึกษาได้ดีสะดวกในบางเรื่อง และมีบางครั้งก็ต้องใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้ผลตามจุดมุ่งหมายต่าง ๆ ในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่เคยนิยมใช้กันมาและเทคนิคในการวัดเบื้องต้น ส่วนเครื่องมือแบบอื่นที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ซึ่งยังมีอีกมากมายหลายชนิดนักศึกษาอาจศึกษาเพิ่มเติมได้จากหนังสือเกี่ยวกับรังสีคอสมิค

2.1 Ionization Chambers

เป็นเครื่องมือประเภท gas - filled detector แบบหนึ่ง ซึ่งในสมัยก่อน ๆ นักวิทยาศาสตร์ใช้ศึกษารังสีคอสมิค ลักษณะเครื่องมือมีกล่องใส่ก๊าซ มีขั้ว 2 ขั้วอยู่ตรงกันข้าม มีที่ป้อนพลังงานศักย์ที่เพียงพอให้ไอออนเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าก่อนที่ไอออนเหล่านั้นจะรวมตัวกันอีก ดูรูปที่ 2-1 กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ion pairs ก่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาทีที่เกิดในถังเครื่องวัด

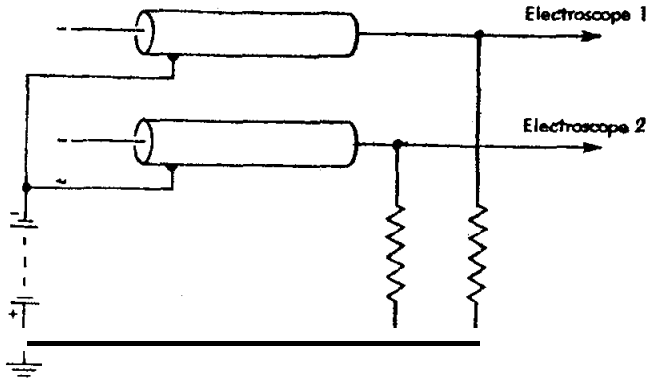


รูปที่ 2-1 แสดงเครื่องวัดแบบ gas - filled.

ปกติแล้วอนุภาคตัวหนึ่ง ๆ ไม่พอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรให้สังเกตได้ ดังนั้นในวงจรจึงต้องออกแบบให้มีเครื่องวัดกระแสที่มี relaxation time นานพอ เช่น ใช้ galvanometer เครื่องวัดแบบ ionization chamber นี้ไม่สามารถแยกชนิดของอนุภาค แต่จะวัด Total ionization ซึ่งเกิดจากการแผ่รังสีชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านเข้ามา

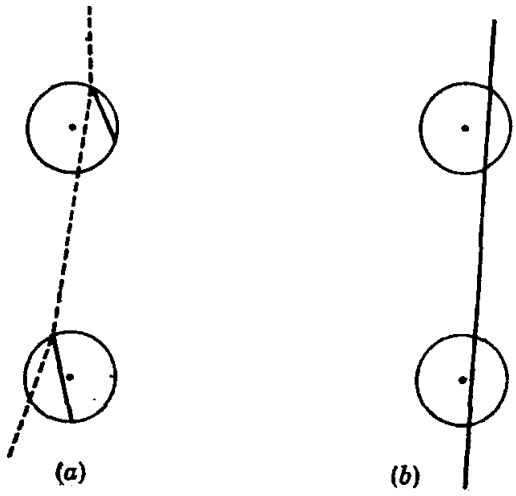
2.2 The Geiger - Müller Counters

มีลักษณะคล้ายแบบ ionization chamber คือมีถังบรรจุก๊าซภายในมีขั้ว 2 ขั้ว ต่างกันตรงที่แบบนี้มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วสูงมาก ปกติประมาณ 1000 – 1500 โวลท์ ทำให้อิเลคตรอนที่เกิดขึ้นจากไอออนวิ่งไปชนกับอะตอมอื่น ๆในอะตอมของก๊าซทำให้เกิดไอออนคู่ใหม่ขึ้นเรื่อย ๆ ยิ่งมีความต่างศักย์มากก็ยิ่งทำให้เกิดไอออนมากขึ้น อิเลคตรอนเหล่านี้วิ่งไปยังขั้วบวก (anode) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า electron avalenche โดยมีอิเลคตรอนตัวแรกเป็นตัวกระตุ้น การที่เกิดกระแสผ่านขั้วมาก ๆ จะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกลงคร่อมความต้านทาน R ที่ต่ออยู่ภายนอกขั้วขณะเป็นช่วง ๆ ตามที่มีอนุภาคเข้ามาทำให้เกิดไอออน จึงทำให้เกิด voltage pulse ผ่านไปยังเครื่องขยาย (amplifier) เพื่อขยายขนาดส่งต่อเข้าเครื่องนับหรือเข้าเครื่องออสซิลโลสโคป (oesciloscope) เพื่อดูลักษณะของ pulse ดังนั้นเครื่องมือนี้จึงสามารถวัดได้แม้มีอนุภาคเข้ามาทีเดียว เครื่องมือนี้มี relaxation time สั้น ดังนั้นจึงแยกอนุภาคที่เข้ามาได้ว่าเข้ามาเมื่อใด จึงเหมาะในการใช้นับจำนวนอนุภาคที่เข้ามา ในช่วงเวลาที่มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านนั้น กระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเกิด ionization จากอนุภาคที่เข้ามา เครื่องมือที่มีหลักการวัดแบบนี้เรียกว่า proportional counter สามารถแยกอนุภาคพลังงานต่าง ๆ และประจุต่าง ๆ ได้ เนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานจลน์ของรังสีที่เข้ามาและรังสีต่างกันมี ionizing power ต่างกัน เครื่องนับ (counters) จะต่ออยู่ในวงจรเพื่อบันทึกข้อมูล การใช้เครื่องวัดแบบนี้กว้างขวางมากแล้วแต่จุดมุ่งหมายซึ่งอาจใช้ประกอบกับเครื่องมือแบบอื่น เช่น Cloud chamber ด้วยก็ได้ เราลองมาพิจารณา G.M. counter 2 ตัว โดยดูรูปที่ 2–2 และ 2–3 ประกอบ การที่เครื่องนับจะนับการผ่านมาของอนุภาคหรืออิเลคโตรสโคปจะ discharge พร้อม ๆ กันแบบ coincidences นี้อาจเกิดจากอนุภาคตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้ ดังรูปที่ 2–3 ประกอบ เมื่อมีโฟตอนตัวหนึ่งผ่านเข้ามาในเครื่อง ในรูป 2–3a โฟตอนทำให้เกิด Compton electron ในเครื่องนับ (counter) อันบนและท่อมาอันล่างซึ่งโอกาสที่จะเกิดปรากฏการณ์นี้มีประมาณ 5 % ซึ่งหมายถึงว่า



รูปที่ 2-2 G.M. counter 2 หัว หัวหนึ่งวางไว้ข้างบน หัวหนึ่งวางไว้ข้างล่าง และต่อวงจรเข้ากับอีเลคโทรสโคป 2 หัว เมื่อแผ่นอีเลคโทรสโคปเกิด discharge พร้อม ๆ กัน แสดงว่ามีอนุภาคเข้ามาและผ่านเครื่องวัดทั้งสอง เรียกการต่อวงจรแบบนี้ว่า coincidence circuit.

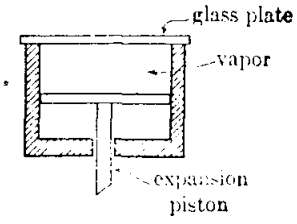
จำนวนของ pulses (ที่จะนับ Compton electron) ในแต่ละเครื่องนับมีค่าประมาณ $\frac{1}{20}$ ของจำนวนโฟตอนที่ผ่านเข้ามาในเครื่องนับ ถ้าจะเกิดขึ้นทั้งสองเครื่องนับก็มีโอกาส 0.25 % ($\frac{1}{20} \times \frac{1}{20}$) ของจำนวนโฟตอนที่ผ่านเครื่องนับทั้งสอง ส่วนรูป 2-3 b นั้น เมื่อมีอนุภาคใด ๆ ผ่านเครื่องนับทั้งสองจะทำให้เกิด a coincidence ขึ้น



รูปที่ 2-3 Photon and charged - particle coincidenoee

2.2 Cloud Chambers

เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาทางเดินของไอออน (ions trail) ทำให้เรามองเห็นได้ ผู้ที่ประดิษฐ์เครื่องมือนี้ขึ้นเป็นคนแรกคือ C.T.R. Wilson ในปี 1907 ซึ่งเป็นแบบ expansion chamber มีรูปร่างเป็นกล่องทำด้วยแก้วและมีลูกสูบที่เลื่อนเข้าออกได้เพื่อเปลี่ยนปริมาตร ดังรูปที่ 2-4 ขนาดของเครื่องมือประมาณ 1 ลูกบาศก์ฟุต เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาร่องรอยการเคลื่อนที่ของอนุภาค ในถังมักจะบรรจุด้วยไอผสมของอัลกอฮอล์ (alchohol vapor) กับอากาศหรือก๊าซบางอย่าง เช่นอาร์กอน (argon) หลักการก็อาศัยคุณสมบัติของไออิ่มตัวอย่างยิ่งยวด (supersaturated vapor) ซึ่งทำให้เกิดขึ้นในถังโดยอาศัยหลักการของ adiabatic expasion เมื่อมีอนุภาคที่สามารถทำให้เกิดการแตกตัวผ่านเข้ามาในถัง ก๊าซซึ่งอยู่ในสภาวะเป็นไออิ่มตัวยิ่งยวดนี้ก็จะกลายเป็นหยดน้ำขึ้นรอย ๆ ไอออนที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นทางเดินของอนุภาคที่เข้ามา เส้นรัศมีของหยดน้ำประมาณ 10^{-5} เมตร ซึ่งก็สามารถสังเกตเห็นได้และเราก็ถ่ายรูปไว้ได้ ในการศึกษามักจะใช้กล้องหลาย ๆ อันเพื่อถ่ายภาพให้ได้แบบ 3 มิติ เพื่อประโยชน์ในการวิจัย เมื่ออนุภาคผ่านเข้าไปในถัง (chamber) สิ่งที่จะเกิดขึ้นตามมา



รูปที่ 2-4 แสดงส่วนประกอบง่าย ๆ ของ cloud chamber

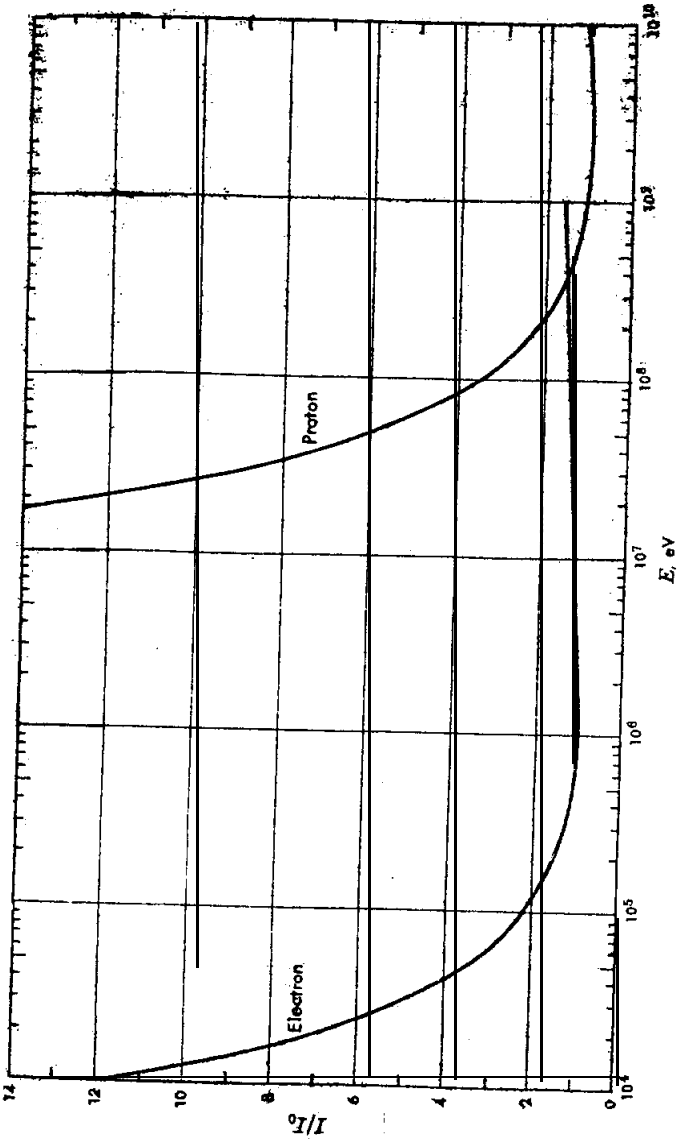
คือปรากฏการณ์ทางนิวเคลียส กล่าวคือ เมื่ออนุภาคที่เข้ามาตัวหนึ่ง (incident particle) ชนกับอนุภาคหลายตัวในถัง อาจทำให้เกิดอนุภาคตัวใหม่หลาย ๆ ตัว เกิดการสลายตัวหรือการแตกกระจายของนิวเคลียสและทำให้เกิดอนุภาคใหม่ขึ้นมาก็ได้ จึงทำให้เรามองเห็นแนวทางเดินที่เกิดขึ้นตามมามากมายปรากฏขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากเป็นโฟตอนหรืออนุภาคที่ไม่มีประจุซึ่งไม่ทำให้เกิดไอออนเราจะมองไม่เห็น (no tracks) เราอาจศึกษาหาพลังงานและโมเมนตัมและชนิดของอนุภาคได้โดยการผ่านสนามแม่เหล็ก B เข้าไป โดยการวัดรัศมี r ของการเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก B จากความสัมพันธ์ $p = mv = q\,r\,B$ และทิศทางการเคลื่อนที่จากแนวทางการเคลื่อนที่เข้ามา อนุภาคที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมีประจุต่างกันและมีความเร็วต่างกันจะทำให้เกิด ion trails ที่มีความหนาแน่นต่างกันในก๊าซหนึ่ง ๆ ที่ความเร็วระดับหนึ่งอนุภาคที่มีประจุมากจะทำให้เกิดความหนาแน่นของจำนวนไอออนต่อความยาวมากกว่าอนุภาคที่มีประจุน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะอนุภาคที่มีประจุมากจะมีแรงทางไฟฟ้าที่จะไปรบกวนอิเลคตรอนในโมเลกุลของสารที่มันผ่านไปใกล้ ๆ ได้มากกว่า และสามารถทำให้เกิดการแตกตัวได้มากในระยะทางเท่า ๆ กัน หรือถ้าอนุภาคที่มีประจุเท่า ๆ กัน ตัวใดที่มีความเร็วมากกว่าจะทำให้ความหนาแน่นของไอออนลดลง ทั้งนี้เพราะการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนนั้นเนื่องมาจากอนุภาคที่เข้ามารบกวนโมเลกุลของสารในระยะเวลาอันสั้น การรบกวน (หรือปฏิกิริยา) นานย่อมทำให้เกิดเล

มากกว่า ดังนั้นอนุภาคที่เคลื่อนที่ช้าจะทำให้เกิดไอออนได้มากกว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่เร็ว

ถ้าอนุภาคมีพลังงานจลน์มาก ๆ และมีความเร็วเข้าใกล้แสง ความหนาแน่นของไอออนตามทางที่ผ่านในตอนแรกจะลดลง เมื่อพลังงานเพิ่ม แต่ในที่สุดก็จะมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้แสงนั้น ให้ดูรูปที่ 2-5 ดังนั้นจะมีลิมิตของความหนาแน่นของไอออนต่ำสุดค่าหนึ่ง กล่าวโดยสรุปได้ว่าความหนาแน่นของประจุจะเข้าสู่จุดต่ำสุดเมื่อพลังงานจลน์ของอนุภาคนั้นมีค่าเข้าใกล้ rest energy ของมันเอง จากนั้นก็จะค่อยเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เราเรียกอนุภาคใด ๆ ที่เคลื่อนที่เข้าใกล้ความเร็วแสงแล้วทำให้เกิดไอออนต่ำสุดตามแนวทางเดินของมันนั้นว่า a minimum - ionizing particle ยกตัวอย่าง เช่น อนุภาคเบตา (β - rays) ซึ่งมีพลังงานจลน์ขนาด 1 MeV (ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุอยู่ 1 ตัว เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 94 % ของความเร็วแสง) จะประพฤติตัวคล้ายเป็น minimum - ionizing paritcles ถ้าเคลื่อนที่ผ่านอากาศที่ S.T.P. จะทำให้เกิดอิเลคตรอนและโปซิตรอน 50 คู่ต่อเซนติเมตรของทางที่มันเคลื่อนที่ผ่านไปในทางตรงข้ามถ้าเป็นอนุภาคแอลฟ่า (α - particles) ซึ่งสลายตัวจากสารกัมมันตภาพรังสี (polonium) มีพลังงานประมาณ 5.3 MeV และมีความเร็วเพียง 5.4 % ของความเร็วแสง (อนุภาคแอลฟ่าคือนิวเคลียสของฮีเลี่ยมมีประจุบวก 2 ตัว) จะทำให้เกิดไอออนประมาณ 24,000 คู่ต่อเซนติเมตรของทางที่มันผ่านไปในอากาศ (เป็นความหนาแน่นของไอออนที่เกิดจากทั้งประจุปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ทางเดินของประจุปฐมภูมิ)

Cloud chamber มีข้อบกพร่อง เนื่องจากความหนาแน่นของก๊าซในถังค่อนข้างต่ำ ดังนั้นโอกาสที่อนุภาคที่เข้ามาจะทำปฏิกิริยาจึงค่อนข้างต่ำด้วย และเวลาจะใช้อีกครั้งต้องใช้เวลาคือหลังจากเลื่อนลูกสูบแต่ละครั้งแล้วต้องใช้เวลาประมาณ 1 นาทีกว่าจะให้หยดน้ำหายไป (โดยการผ่านสนามไฟฟ้าเข้าไป) และพร้อมที่จะใช้ต่อไป

จึงมีการสร้าง cloud chamber อีกแบบหนึ่งคือแบบที่เรียกว่า diffusion cloud chamber ทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องเลื่อนลูกสูบ วิธีการก็ให้ข้างล่างของถังเย็นกว่าข้างบน ก๊าซจำนวนมากจะมาแออัดกันที่ข้างล่าง ข้างบนจะเบากว่า ขณะที่ไอแพร่ (diffuse) ลงมาข้างล่างมันจะเย็นและเข้าสู่ภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด ดังนั้นถังจะมีความไวตลอดเวลาในบริเวณที่ไออยู่ในภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด

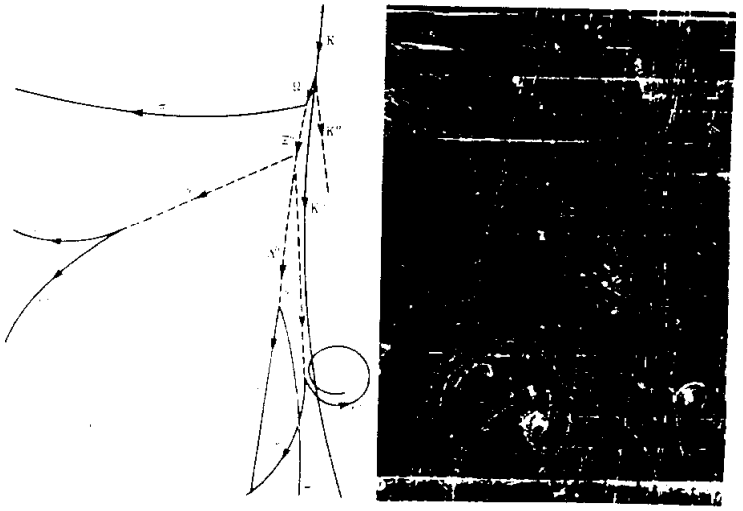


รูปที่ 2-5 ความหนาแน่นของไอออนตามแนวทางเดินของอีเลคตรอนหรือโปรตอน เป็นฟังก์ชั่นกับพลังงานจลน์ พลังงาน E วัดในหน่วยอีเลคตรอนโวลท์ (eV) ทั้งอีเลคตรอนและโปรตอนในตอนแรกเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดความหนาแน่นของไอออนลดลง แต่ในที่สุดจะมีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ระดับหนึ่ง แกน y เป็นปริมาณของความหนาแน่นของไอออนที่เกิดขึ้นจริง I ต่อความหนาแน่นต่ำสุด I_o

2.4 The Bubble Chambers

ได้มีการแก้ปัญหาของ cloud chamber โดยสร้าง the bubble chamber ขึ้นมา โดย D.A. Glaser ในปี 1952 และนักฟิสิกส์มักใช้แทน cloud chamber ในการศึกษาทดลอง ใน high - energy physics

หลักการก็ใช้ superheated liquid ที่มีความหนาแน่นมากกว่า แทน supersaturated gas ดังที่ใช้ใน cloud chamber โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาจึงสูงกว่า ของเหลวที่ใช้มักนิยมใช้ไฮโดรเจนเหลว เมื่อมีอนุภาคผ่านเข้ามาก็จะเกิดเป็นฟอง (bubble) ตามแนวทางที่ผ่าน ในการใช้อุปกรณ์นี้เขามักจะใช้รวมกับเครื่องวัดแบบอื่น ๆ เพื่อให้การถ่ายรูปได้ในจังหวะเดียวกันกับการเกิดปฏิกิริยา สำหรับตัวอย่างรูปที่ถ่ายออกมาได้ให้ดูรูปที่ 2–6

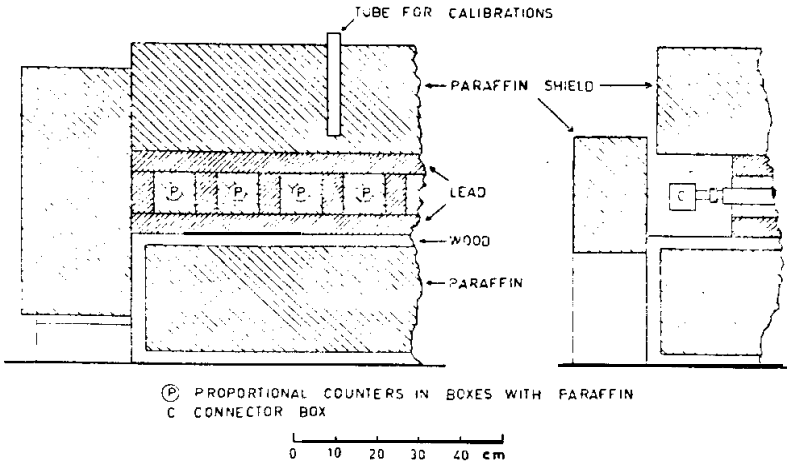


รูปที่ 2–6 รูปถ่ายใน the 80 – inch liquid - hydrogen bubble chamber ที่ Brookhaven National Laboratory แสดงแนวทางเดินของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากอนุภาคโอเมก้าลบ (Ω^-) ซึ่งสลายตัวหลังจากเกิดประมาณ 10^{-10} วินาที เป็นอนุภาค Ξ° และ π^- จะสังเกตเห็นเป็นฟองตามแนวที่ผ่านไป ส่วนอนุภาคที่ไม่มีประจุจะไม่ทำให้เกิดฟองให้เห็นในไฮโดรเจนเหลว ดังนั้นจึงไม่มีแนวทางเดินจึงแสดงไว้ด้วยเส้นขาด

2.5 Neutron Pile Monitors

อนุภาค 2 ชนิดคือนิวตรอนและโปรตอน เป็นส่วนหนึ่งของ รังสีคอสมิคในส่วนนิวคลีออน (nucleon component) ที่ทำให้ความเข้มรวมของ รังสีคอสมิค เปลี่ยนแปลงไปได้ โดยทั่วไปนิวตรอนอยู่ในจำพวก รังสีคอสมิคทุติยภูมิ ในรังสีคอสมิคปฐมภูมินี้มีอยู่บ้าง แต่ไม่มากนัก การเกิดนิวตรอนในอากาศขึ้นอยู่กับสภาพของบรรยากาศ ดังนั้นการวัดรังสีคอสมิคส่วนที่เป็นนิวคลีออนที่ใกล้ ๆ โลกจึงทำให้ได้ค่าแปรปรวน แต่อย่างไรก็ตามถ้าจะให้การวัดไม่แปรปรวนมากก็ต้องไปวัดที่ระดับสูง ๆ นั้น เป็นการศึกษารังสีคอสมิคส่วนที่เป็นนิวคลีออน

ในการศึกษาความเข้มของนิวคลีออนดังกล่าวทางอ้อม ศึกษาได้โดยการวัดค่าเฉลี่ยของนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโปรตอนกับนิวเคลียสของตะกั่วที่ผิวโลก และหาทางกั้นนิวตรอนที่เกิดในบรรยากาศซึ่งมักจะแปรปรวนออกไป โดยการหาสารที่สามารถขวางกั้นนิวตรอนไว้ได้ดี ทั้งนี้ก็เพื่อศึกษาส่วนของนิวคลีออนในรังสีคอสมิคปฐมภูมิ จึงต้องกั้นส่วนที่เกิดเป็นทุติยภูมิจากภายนอกเครื่องมือไว้ ซึ่งหลักการอันนี้เป็นของเครื่องมือที่มีชื่อว่า neutron pile monitor ซึ่งสร้างโดย J.A. Simpson เรียกชื่อย่อ ๆ ของเครื่องมือนี้ว่า neutron monitor รูปแบบมาตรฐานมีลักษณะดังรูป 2-7



รูปที่ 2-7 รูปแสดง neutron pile nonitor แบบมาตรฐาน ความยาวทั้งหมดของเครื่องวัดแบบสัดส่วนยาวประมาณ 1 เมตร

แต่อย่างไรก็ตามนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ดังนั้นในการวัดนิวตรอนจึงต้องใช้ผลที่เกิดจากนิวตรอนอีกที่ ทำได้โดยให้นิวตรอนทำปฏิกิริยานิวเคลียกับธาตุบางอย่าง แล้วให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าออกมา เช่น (n , α), (n ,p), (n ,γ) ซึ่งอนุภาคที่ออกมานี้ควรจะวัดได้ง่ายหรือแบบทำปฏิกิริยากับธาตุบางธาตุให้ธาตุนั้นกลายเป็นสารกัมมันตภาพรังสีแล้ว เราวัดรังสีที่เกิดจากสารกัมมันตภาพรังสีนั้น ในปี ค.ศ. 1939 S.A. Korff และ W.E. Danforth ได้เสนอแนะให้ใช้ก๊าซโบรอน-ไตรฟลูออไรด์ (BF_3 = Boron trifluoride) ในหลอดวัดรังสี เพราะครอสเสคชั่นในการทำปฏิกิริยาของก๊าซนี้กับนิวตรอนมีค่าสูง ดังนั้นจึงใช้หลอดวัดรังสีบรรจุก๊าซ BF_3 ในเครื่องวัดรังสีแบบสัดส่วน (propoetional counters) เพื่อให้นิวตรอนช้าที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยาตามสมการ

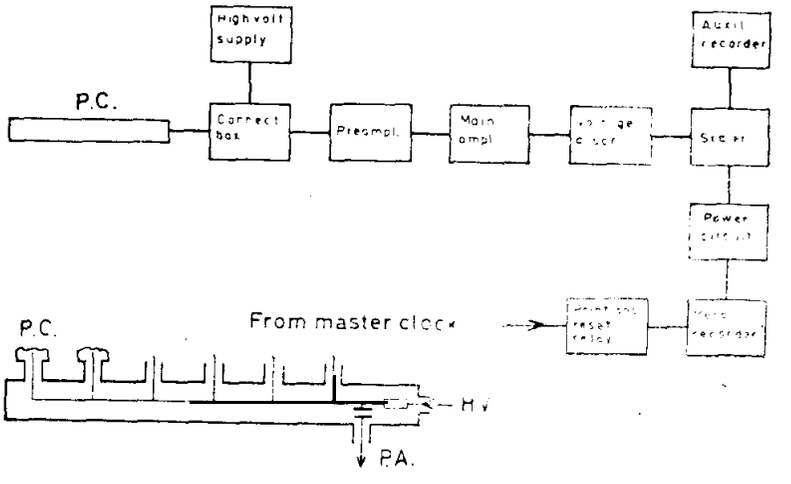
$$^{10}B\ (n, \alpha)\ ^{7}L_i + 2\ MeV$$ (เป็นพลังงานจลน์ของ the products)

ในพาราฟิน (paraffin) หรือโพลีเอธีลีน (polyethylene) เกิดรังสีแอลฟา ($_2He^4$) ออกมา ซึ่งมีประจุไฟฟ้าทำให้เราสามารถวัดได้ง่ายแล้วจึงคำนวณกลับไปเป็นของนิวตรอน ค่าของครอสเสคชั่นของปฏิกิริยาจะมากเมื่อพลังงานของนิวตรอนลดลง ดังนั้นในเครื่องมือ Neutron monitor จึงต้องบรรจุสารที่ลดพลังงานของนิวตรอนให้น้อยลง เรียกว่า moderator ส่วนหลอดวัดรังสีแบบสัดส่วนซึ่งบรรจุก๊าซ BF_3 ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่อง Neutron monitor มีหลายแบบ โดยทั่วไปก็เป็นรูปทรงกระบอกโลหะมีความยาวต่าง ๆ กันตั้งแต่ครึ่ง เมตรจนถึงสอง เมตรครึ่ง มีขั้วไฟฟ้าทำด้วยลวดยาวตลอดแกนกลางของกระบอกดังกล่าว ภายในบรรจุก๊าซ BF_3 ส่วนโวลเทจที่ใช้งานมีค่าประมาณ 1,300 โวลท์ ถึง 4,000 โวลท์

ตามรูปที่ 2-7 แกนตะกั่วนั้นล้อมรอบด้วยพาราฟินเพื่อกั้นนิวตรอนจากภายนอกแกนตะกั่วกับพื้นที่ในแนวราบประมาณ 2 ตารางเมตร มีเครื่องวัดแบบสัดส่วนที่บรรจุ BF_3 ประมาณ 93 – 97 % อยู่ภายในบรรจุอยู่ล้อมรอบด้วยพาราฟินชั้นในหนาอย่างน้อย 25 มิลลิเมตร นิวตรอนที่เกิดภายในแท่งตะกั่วเนื่องจากการชนของโปรตอนจะกระจัดกระจายไปทุกทิศทางด้วยความเร็วต่าง ๆ และจะกลายเป็น thermal neutrons จากการชนแบบอีลาสติคกับนิวเคลียส (โปรตอน) ในพาราฟิน ตัวกั้นภายนอก (พาราฟินอันนอก) จะเป็นตัวสะท้อนเพื่อให้โอกาสแก่นิวตรอนในการทำปฏิกิริยากับเครื่องวัดแบบสัดส่วน ส่วนหลอดที่อยู่ข้างบนของเครื่อง (tube for calibration) มีไว้สำหรับหาประสิทธิภาพของเครื่อง

และหาข้อผิดพลาดเพื่อแก้ไขในการทดสอบก็ใช้สารกัมมันตภาพรังสีที่ให้นิวตรอนออกมา (artificial source ต้องหักปฏิกิริยาของเครื่องวัดอันเกิดจากโปรตอนในรังสีคอสมิคออกด้วย

หลอดวัดรังสีแบบสัดส่วนที่เป็น ส่วนประกอบของ neutron monitor นั้นจัดเป็นชุด ๆ เชื่อมโยงกันที่ conector boxes ดังรูปที่ 2-8 ในรูปจะเห็นหลอดวัดรังสีแบบสัดส่วน (P.C.) ชุดหนึ่ง 6 ตัวต่อในวงจรไฟฟ้า และมีไฟฟ้าแรงสูงป้อนมายัง conector box ฉนวนไฟฟ้าของไฟแรงสูงที่ป้อนแก่หลอดวัดรังสีโดยผ่าน counector box จะต้องทำให้ดีเพื่อป้องกันการรั่วไหลของไฟฟ้าที่จะก่อให้เกิด pulses เข้าเครื่องนับ ซึ่งอาจมีขนาดเท่าหรือโตกว่า pulses อันเกิดจากอนุภาคเข้าไปทำปฏิกิริยาเสียอีก



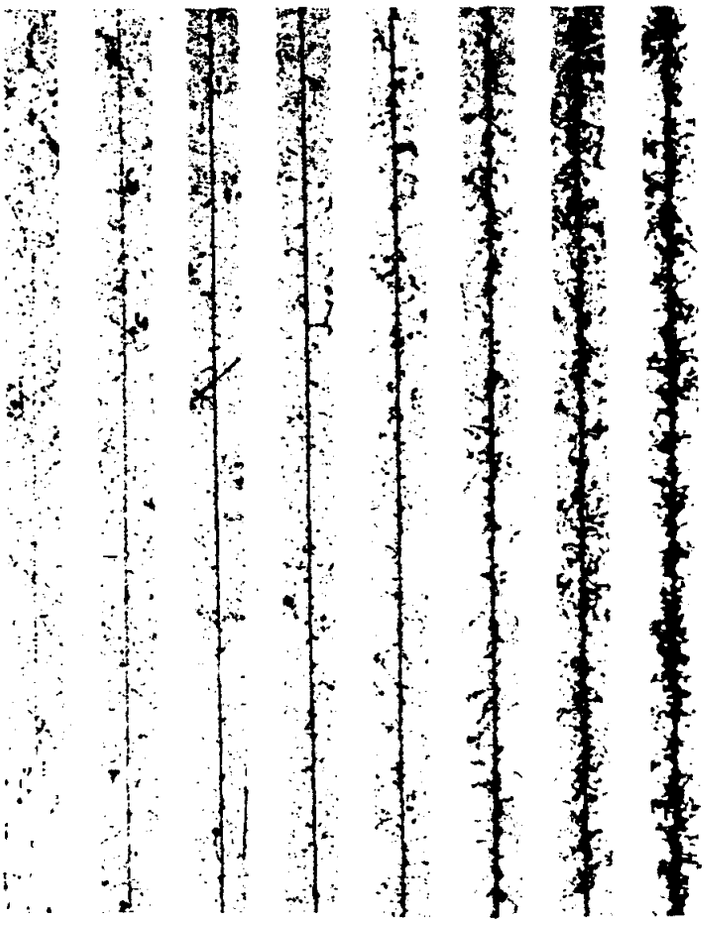
รูปที่ 2-8 แสดงไดอะแกรมแสดงวงจรอิเลคโทรนิคส์สำหรับ neutron pile monitors, P.C. คือเครื่องวัดแบบสัดส่วน, P.A คือ preamplifier, HV คือ hight voltage

นอกจากที่กล่าวแล้วยังมีรายละเอียดอื่น ๆ เกี่ยวกับการใช้เครื่องนิวตรอนมอนิเตอร์ การวัดแบคกราวน์ (background), , การหาประสิทธิภาพและเกี่ยวกับการแก้ไขข้อผิดพลาดอันเกิดจากนิวตรอนทวีคูณ (การหา multiplicity factor) ที่เกิดในแกนตะกั่ว ซึ่งรายละเอียดเหล่านี้อาจศึกษาได้จากหนังสืออ้างอิงและตำราที่เขียนเกี่ยวกับการใช้เครื่องนิวตรอนมอนิเตอร์

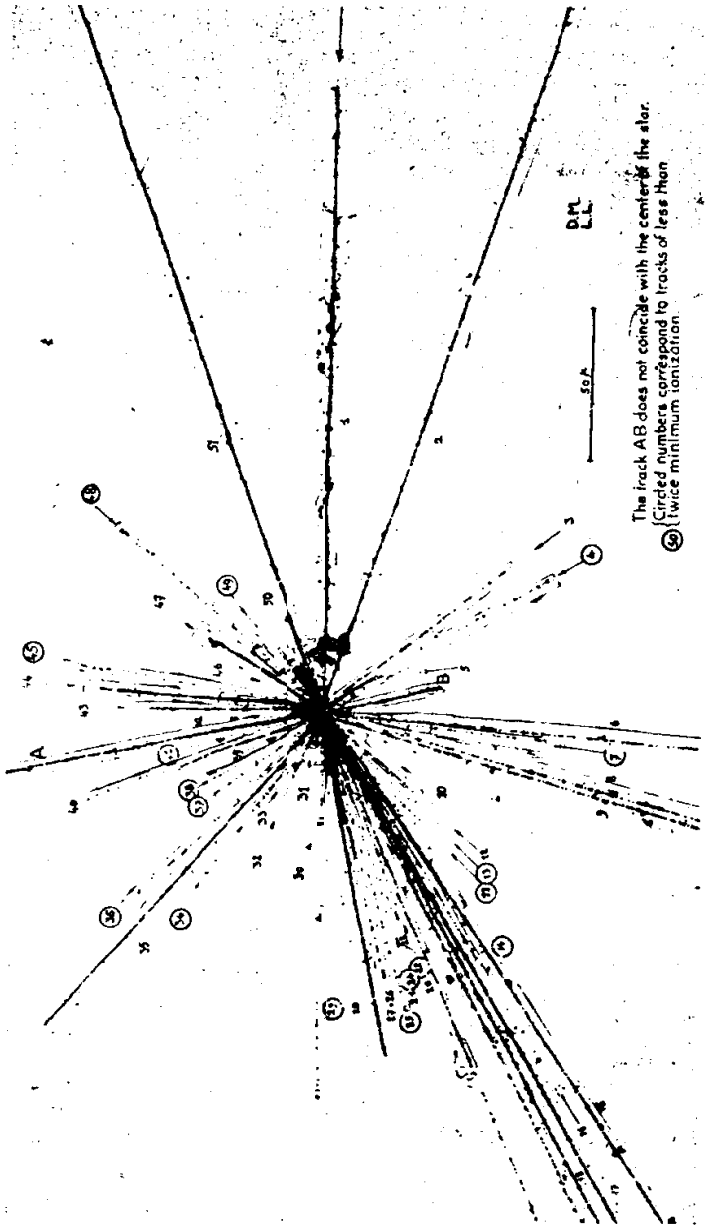
2.6 นิวเคลียร์อิมัลชั่น (Nuclear Emulsion)

เนื่องจาก cloud chamber ไม่สะดวกในการใช้และอนุภาคมักไม่หยุดใน chamber (แม้จะใช้หลาย ๆ ตัว) ในกลางปี 1940 นักฟิสิกส์มีความรู้ ในการทำโฟโตกราฟิคอิมัลชั่น (photographic emulsion) ที่ใช้บันทึกแนวทางเดินของรังสีคอสมิคเรียกว่านิวเคลียร์อิมัลชั่น ส่วนประกอบมักทำด้วยส่วนผสมของ silver halides (ส่วนใหญ่จะเป็น silver bromide) ผสมกาวแล้วทำเป็นแผ่นบาง ๆ เคลือบทิคกับแผ่นแก้วหรือ cellulose acetate โดยที่ halide ดังกล่าวจะอยู่ในรูปของเมล็คเล็ก ๆ (grains) ซึ่งมีขนาด 0.3 – 1.0 ไมครอน (microns) โดยแต่ละเมล็คจะมีโมเลกุลของ halide อยู่เป็นจำนวนมาก อิมัลชั่นที่มีความไวธรรมดามักจะมีความหนาประมาณ 10 – 20 ไมครอน และมี silver halide อยู่ประมาณ 40 % ส่วนในงานพิเศษอาจทำให้หนาถึง 500 ไมครอนและมี silve halide ประมาณ 80 % และปัจจุบันมีการปรับปรุงให้เป็นฟิลม์โดยไม่ต้องมีแผ่นแก้วเรียกว่า stripped emulsion ซึ่งสามารถเอามาเรียงซ้อนกันเป็น emulsion chamber ได้

เมื่อมีรังสีผ่านเข้ามาชนกับโมเลกุลหนึ่ง ๆ ในเมล็คเงินฮาไลค์ (silver halide grain) อีเลคตรอนตัวหนึ่งหรือหลาย ๆ ตัวจะหลุดออกมา จะทำให้เมล็คดังกล่าวเปลี่ยนแปรไปทำให้เกิด latent image ซึ่งทำให้เรามองเห็นได้เมื่อเราเอาสารนี้ไปผ่านกรรมวิธีทางเคมี (นำไปล้างคล้ายฟิลม์ถ่ายรูป) กล่าวง่าย ๆ การเกิดเมล็ค (grains) ดังกล่าวนี้ก็คล้าย ๆ กับการเกิดหยดน้ำตามแนวทางอนุภาคใน cloud chamber เนื่องจากขนาดของเมล็คนี้เล็ก และกว้างน้อยมากมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า จึงต้องใช้กล้องจุลทรรศกวาด (scan) ดูเอา ดูรูป 2-9 ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ (range) ในนิวเคลียร์อิมัลชั่นขึ้นอยู่กับพลังงานของมัน และการวัดระยะทางดังกล่าวทำให้เราทราบพลังงานของอนุภาค (ถ้าอนุภาคนั้นหยุดอยู่ในอิมัลชั่น) ตัวอย่าง เช่น ในอิมัลชั่นทั่ว ๆ ไป โปรตอนพลังงานขนาด 10 MeV จะให้ทางยาว 2.0 มิลลิเมตร ส่วนมวลของอนุภาคก็มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของ เมล็คเงินตามทางเดินของอนุภาคในอิมัลชั่น และยิ่งกว่านั้นความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคช้าลง ๆ แต่ในตอนท้าย ๆ ก็จะน้อยลง ๆ ในที่สุดก็จะเป็นเส้นทางเล็ก ๆ หยุดลงในอิมัลชั่น ดังรูปที่ 2-11 โดยปกติแล้วรังสีคอสมิกปฐมภูมิผ่านบรรยากาศเข้ามาด้วยพลังงานสูงกว่า total binding energy ของนิวเคลียสใด ๆ (ที่มันจะชนด้วย) จึงทำให้นิวเคลียสของสารที่ชนแตกสลายอย่างสมบูรณ์ที่เรียกว่า nuclear evaporation หรือ star formation ดังรูปที่ 2-10 ซึ่งบางทีเรียที่เกิดของ initial nuclear evaporation นี้



รูปที่ 2-9 แนวทางเดินในนิวเคลียร์อิมัลชั่น แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนิวเคลียสที่มี Z = 1 ถึง Z = 26 ซึ่งได้จากใส่อิมัลชั่นดังกล่าวไว้ในบอลลูนที่ปล่อยให้ลอยขึ้นไปสูง ๆ และจากดาวเทียมทำให้ทำปฏิกิริยากับรังสีคอสมิคปฐมภูมิ แต่ละรูปมีความยาวน้อยกว่า $\frac{1}{2}$ มิลลิเมตรเล็กน้อย พลังงานของอนุภาคหายไปเนื่องจากการไอไอไนซ์ ทำให้เกิดเมล็ดเงินโบรไมด์ (grains of silver bromide) ในอิมัลชั่นดังกล่าว และมีค่าแปรผันโดยตรงกับ Z^2



รูปที่ 2–10 แสดงการแตกกระจายของนิวเคลียสเงินให้ 51 - prong star จากรังสีคอสมิคปฐมภูมิ Z = 17 ขนาดนิวเคลียสเงินไนโตรเจนาฟิคดิมัลชั่น

ยังคงมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้เกิด nuclear disintegration ขึ้น ๆ ได้อีกด้วย บริเวณที่เกิดการแตกตัวอย่างหนาแน่นหรือตรงที่มี star กระจายออกมานั้นตรงกลางก็คือบริเวณนิวเคลียสเดิมแล้วกระจายให้รังสีคอสมิคทุติยภูมิออกมารอบ ๆ

นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เมซอนชาเวอร์ (meson shower) ขึ้นก็ได้ คือเมื่อรังสีปฐมภูมิชนกับนิวเคลียสของธาตุทำให้เกิดเมซอนขึ้นตามมาเป็นจำนวนมาก ๆ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดในบรรยากาศ ถ้ารังสีคอสมิคปฐมภูมินั้นผ่านนิวเคลียสมีมวลขนาดเข้ามาแต่ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์อย่างรุนแรงดังกล่าวมันจะค่อย ๆ เสียพลังงานไปเนื่องจากชนกับอะตอมไปเรื่อย ๆ และทำให้เกิดเดลต้าเรย์ (δ - rays) หมายถึงว่าอิเลคตรอนถูกชนกระเด็นกลายเป็น ion กระจายออกไปมีพลังงานหลายร้อยอีเลคตรอนโวลท์ ซึ่งอาจทำให้เกิด ion เพิ่มเติมอีกก็ได้รอบ ๆ แนวทางเดินของรังสีปฐมภูมิและความสามารถทำให้เกิดการแตกตัวของรังสีปฐมภูมิก็ค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งหมดเรียกว่า thindown track ดังรูปที่ 2-11 สรุปได้ว่าพอจะแยกประเภทของ tracks ในอิมัลชั่นได้ 3 กลุ่ม ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเม็ดสี (grain density)

รูปที่ 2-11 แสดงแนวทางเดินของ a multiply - charged ion ในอิมัลชั่น เมื่อไอออนที่เข้ามานี้ช้าลงจนหยุดจะทำให้เกิด "thindown track"

1. thin and grey tracks เมล็ดที่เกิดค่อนข้างจะแยกออกจากกันและเป็นฟอง (blobs) น้อย ๆ ความหนาแน่นของมันนับได้จากจำนวนแต่ละ เมล็ดหรือประมาณจากจำนวนเมล็ดในฟอง

2. Black tracks มีความหนาแน่นของ เมล็ดสูงมาก พลังงานของอนุภาคที่หายไปสามารถคำนวณได้จากจำนวนความยาวทั้งหมดของช่วงห่าง (gaps) หรือฟองต่อหน่วยความยาว

3. thin down track นับระยะทางตั้งแต่ตรงที่เกิดความหนาแน่นของ δ - rays สูงสุดไปจนถึงจุดที่อนุภาคหยุด ซึ่งทางเดินของอนุภาคทุกตัวจะแสดงคุณสมบัติอันนี้

การคำนวณหาความหนาแน่นของ เมล็ด (grain density) $\frac{dN}{dx}$ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่หายไปต่อหน่วยความยาว (dE / dx) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากทฤษฎี (Beth , 1933, Bloch, 1933) รูปแบบง่าย ๆ คือ

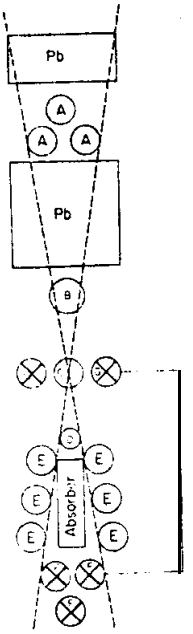
$$\frac{dN}{dx} \sim \frac{dE}{dx} = \frac{Z^2}{v^2} f(v)$$

ดังนั้นจะเห็นว่า dE / dx ไม่ขึ้นกับมวลของอนุภาค แต่ขึ้นอยู่กับการวัดประจุและความเร็วซึ่งความหนาแน่นของ เมล็ดของทางเดินอนุภาคสามารถทำให้เราวัดประจุและโมเมนตัมของอนุภาคได้ แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของเมล็ด $\frac{dN}{dx}$ ดังกล่าวไม่ขึ้นอยู่แต่เฉพาะพลังงานที่หายไป แต่ยังขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของนิวเคลียร์อิมัลชั่นด้วย

2.7 เทคนิคในการวัดรังสีคอสมิคตามจุดมุ่งหมายต่าง ๆ

2.7.1 การคำนวณหาอายุเฉลี่ยเมื่ออยู่นิ่งของมิวเมซอน (the mean rest lifetime of the μ - meson)

จากการใช้ cloud chamber พบว่ามิวเมซอนตัวหนึ่ง เมื่อมันหยุดนิ่งจะสลายตัวให้อิเลคตรอนตัวหนึ่งออกมา จากการใช้เทคนิคของ เครื่องนับ เราก็สามารถคำนวณหาอายุเฉลี่ยเมื่ออยู่นิ่งของมิวเมซอนได้ วิธีการคำนวณทำโดย Rasetti (1941) โดยมีเครื่องมือบันทึกช่วงเวลาระหว่างทางที่มิวเมซอนเข้ามาผ่านเครื่องนับกับเมื่อมันสลายตัวให้อิเลคตรอนออกมาในเครื่องนับอีกอันหนึ่ง เพื่อให้การนี้สำเร็จได้ด้วยดีจึงต้องใช้เครื่องนับหลายตัวทำเป็นชุด ๆ จัดไว้ดังรูปที่ 2-12 ระหว่างชุดเครื่องนับ A, B และ F ใส่ตัวดูดกลืนไว้ เมื่อมีอนุภาคผ่านเครื่องนับ A และ B ทั้งสอง



รูปที่ 2-12 การจัดเครื่องมือเพื่อวัดอายุเฉลี่ยเมื่ออยู่นิ่งของมิวเมซอน ตามวิธีของ Rasetti (1941) ให้อนุภาคที่มีอำนาจทะลุทะลวงผ่าน A และ B มาอยู่นิ่งที่ตัวดูดกลืน (absorber) ระหว่าง D และ F แล้วสลายตัวให้อิเลคตรอนออกมาวัดโดยเครื่องนับ E ช่วงเวลาที่ผ่านไประหว่างเครื่องนับ A, B และ E สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการวิเคราะห์จำนวนของช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ทำให้เราสามารถประมาณหาค่าอายุเฉลี่ยเมื่ออยู่นิ่งของมิวเมซอนได้

(trigger in coincidence) จะเป็นตัวบอกว่ามีอนุภาคประจุที่มีพลังงานสูงพอเหมาะตามจำนวนผ่านตะกั่ว (Pb) ที่ 2 ออกมาแล้วจะหยุดอยู่ในตัวดูดกลืนแล้ว อย่างไรก็ตามอายุของอนุภาคดังกล่าวผ่าน

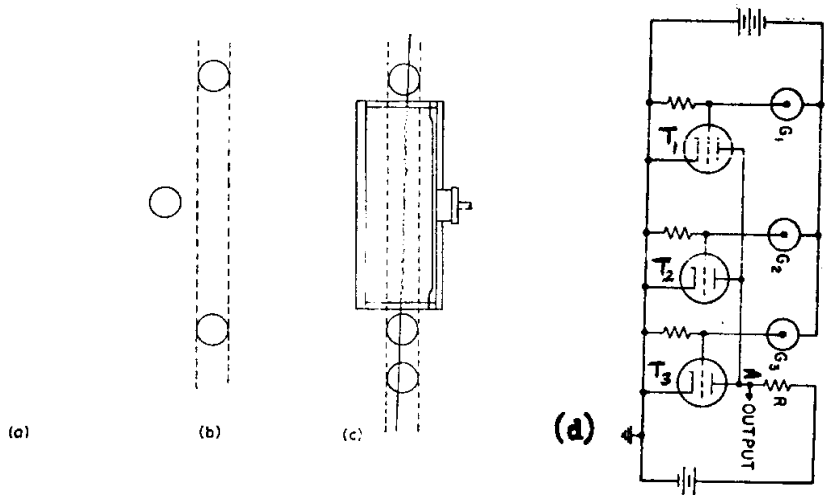
เครื่องนับในชุด F ซึ่งเราต่อไว้แบบ anticoincidence กับ A และ B หมายถึงว่าอนุภาคนั้นมีพลังงานสูงมากผ่านตัวดูดกลืนระหว่าง B และ F ออกไปแล้ว สำหรับชุดเครื่องนับ E จัดไว้รอบ ๆ ตัวดูดกลืนสำหรับวัดอนุภาคที่แตกตัวออกมา (ในที่นี้หมายถึงอิเลคตรอน) โดยจะบอกเวลาในเวลาต่อมาหลังจากที่จับเวลาไว้ในครั้งแรกที่อนุภาคผ่าน coincidence counters A และ B แล้ว ในการทดลองแบบนี้เราต้องจัด (set) ช่วงเวลาระหว่างเครื่องนับในขนาดของ 10^{-6} วินาที ทำให้เราสามารถประมาณหาค่าเฉลี่ยเมื่ออยู่นิ่งของมิวเมซอนได้ประมาณ 2×10^{-6} วินาที

2.7.2 *Counter Telescopes*

เครื่องมือชนิดนี้มีขึ้นเมื่อนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ Bothe และ Kolhörster ได้ใช้ Geiger counters วัดการแตกตัวจากการแผ่รังสีคอสมิค โดยเฉพาะการใช้เครื่องนับแบบนี้ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปที่ทำให้เกิดการ discharge พร้อม ๆ กัน เพื่อหาทางที่อนุภาคประจุตัวหนึ่ง ๆ ผ่านเครื่องนับเหล่านั้น เทคนิคอันนี้เป็นพื้นฐานของการจัดเครื่องนับซึ่งมีบทบาทสำคัญในการศึกษารังสีคอสมิคตั้งแต่โบราณถึงปัจจุบัน ดังเคยเรียกมาแล้วว่า " coincidence counting" เมื่อเราจัดวางเครื่องนับไว้ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ให้อนุภาคตัวหนึ่งที่ผ่านเข้ามาในแนวของเครื่องนับทั้งสาม เราเรียกชุดเครื่องนับนี้ว่า counter telescopes ดังรูปที่ 2–13 จัดไว้คล้ายกล้อง "telescope" ดังรูปที่ 2–13a แต่ถ้าเลื่อนตัวกลางออกจากลำกล้อง ดังรูปที่ 1–13 b ก็จะไปลดการ discharge และในปี 1932 Blackett และ Occhialini ได้นำหลักการของกล้องนี้ไปใช้เพื่อศึกษาอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านมาเป็นเส้นตรง โดยนำเอาวิธี coincident discharge ของ counter telescope ใช้ร่วมกับ cloud chamber และกล้องถ่ายรูปเพื่อถ่ายภาพทางเดินของอนุภาคเมื่อผ่านเข้ามา ดังรูปที่ 2–13c เพื่อศึกษาวงจรการใช้งานของcoincident circuit แบบมีเครื่องนับสามตัว ให้ดูรูปที่ 2–13 d

counter telescope ไม่ใช้ศึกษาเฉพาะที่พื้นดิน ยังใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุที่มาจากทิศทาง ๆ ได้ จากการวิจัยพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่มาในแนวดิ่งจากข้างบน และเมื่อให้มุมจากแนวดิ่งมากขึ้น ๆ ดังรูป 2–14 อัตรานับก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว จึงทำให้สรุปได้ว่าอนุภาคส่วนมากมาจากเบื้องบนบรรยากาศมาสู่โลกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นเพราะเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของอากาศทำให้อนุภาคลดลง

นอกจากนี้ยังนำหลักการนี้ไปศึกษา the east - vest effect โดยประมาณปี 1930 Rossi ได้ศึกษาผลอันนี้ ที่เขาสนใจเพราะคิดว่าการศึกษาผลทางแม่เหล็กจะมีต่อประจุในการเคลื่อนที่



รูปที่ 2-13 Counter telescope ในรูป

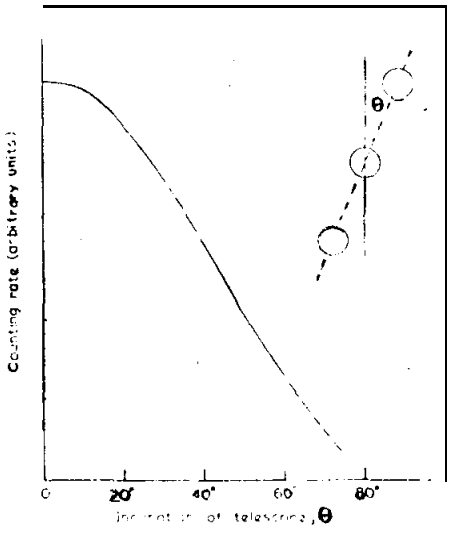
a. เครื่องนับจะ discharge พร้อม ๆ กัน

b. เมื่อให้ตัวใดเลื่อนออกจากแนวกล้อง เมื่อมีอนุภาคตัวหนึ่งผ่าน จะไม่ discharge พร้อมกัน เครื่องนับทั้งชุดก็จะไม่บอกว่ามีอนุภาคผ่านเข้ามาในแนวเส้นตรง

0. เมื่อใช้ร่วมกับ cloud chamber เพื่อใช้ศึกษาร่องรอยของอนุภาคแต่ละตัวที่ผ่านเข้ามาใน chamber

d. แสดง vacuum - tube coincidence circuit เมื่อต่อครบวงจร กระแสจะไหลจากขั้วบวกของแบตเตอรี่ผ่านความต้านทาน R และหลอดทั้ง 3 (T_1 , T_2 , T_3) ไปยังพื้น (ground) กระแสไฟฟ้านี้ทำให้หลอดความต่างศักย์คร่อมความต้านทานอย่างมาก โดยที่จุด A ความต่างศักย์มีค่าใกล้กับ ground เมื่อมีอนุภาคผ่านมาเฉพาะที่ G_1 ทำให้เกิดการ discharge ขึ้น grid ในหลอดสุญญากาศ T_1 จะกลายเป็นลบไปชั่วคราว จึงทำให้หลอดไม่นำกระแสไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีกระแสไหลผ่าน T_2 และ T_3 ถ้าความต้านทานของวงจรมีค่าสูง กระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย แต่ถ้าเกิดการ

discharge พร้อมกัน 2 หัว ก็จะทำให้กระแสลดลงไปมาก และถ้าเกิดการ discharge 3 หัว พร้อม ๆ กันจะทำให้หลอดทั้ง 3 ไม่นำไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ผ่าน R ก็จะไม่มี ความต่างศักย์ที่ A ก็จะเปลี่ยนมีค่าเท่ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ ดังนั้นความต่างศักย์กระโดดที่ A สัญญาณที่เกิดจะเป็น 3 เท่า (threefold coincidence) ซึ่งเราสามารถวัดได้โดยใช้ Voltmeter หรือต่อไปยังเครื่องบันทึกอัตโนมัติ วงจรแบบนี้สามารถนำไปใช้ได้กับเครื่องบันทึกที่ใช้กับเครื่องนับหลาย ๆ หัวได้



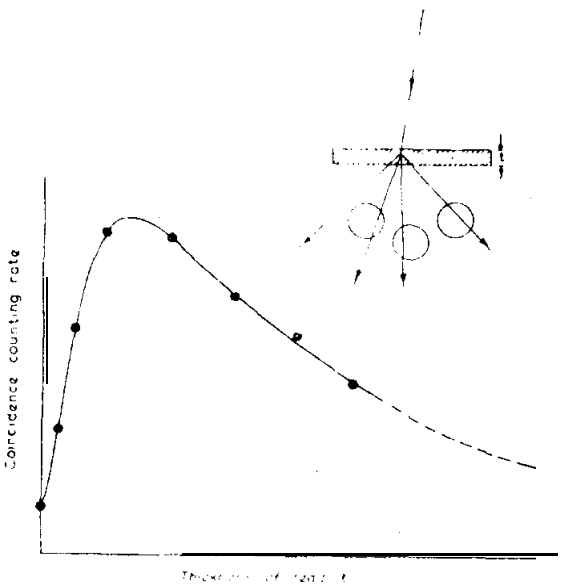
รูปที่ 2-14 การเปลี่ยนแปลงอัตรานับจาก counter telescope เมื่อเปลี่ยนมุมจากมุมซีนิท (zenith angle) เริ่ม $\theta = 0^{\circ}$ แล้วเพิ่มขึ้นถึงแนวระดับ

ในทิศทาง ๆ ได้ง่ายกว่าความสูง ไม่ต้องคำนึงถึงความเข้มของรังสีคอสมิคเปลี่ยนแปลงไปกับความสูงและการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศจากที่หนึ่งของโลกไปยังที่หนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ก็ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง the east - west asymmetry และเหตุผลอันที่สองก็คือถ้ารังสีคอสมิคเป็นประจุไฟฟ้า การศึกษา the east-west effect ก็จะทำให้ทราบชนิดของประจุด้วย เขาจึงนำเอา counter telescope มาใช้ แต่การวิจัยของเขาในระยะนั้นไม่ประสบผล เพราะไม่สามารถหาความแตกต่างที่แน่นอนใน 2 ทิศทางได้ แต่ต่อมาประมาณ 1933 มีนักฟิสิกส์คนอื่นได้พบ the east - west asymmetry เช่น Thomas H. Johnson ที่เมกซิโก (29° N geomagnetic lattitude ที่ความสูง 2,250 เมตร จากระดับน้ำทะเล) และ Luis W. Alvarez กับ A.H. Compton (สถานที่เดียวกัน)พบว่าความเข้มของรังสีคอสมิคมาจากทิศตะวันตกมากกว่ามาจากทิศตะวันออกความแตกต่างประมาณ 10 % เมื่อให้ cosmic - ray telescope ทำมุม 45° กับแนวดิ่ง และ 2 เดือนต่อมา Sergio De Benedetti และ Rossi ได้วิจัยที่เมือง Asmar, Eritrea (11° N Geomagnetic latitude, 2370 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล) พบว่าความเข้มมาจากทิศตะวันตกมากกว่ามาจากทิศตะวันออกเช่นกัน โดยได้ความแตกต่างมากกว่า 26 % โดยทำมุม 45° จากแนวดิ่ง จึงทำให้ทราบว่ารังสีคอสมิคปฐมภูมิส่วนใหญ่เป็นประจุบวก

2.7.3 การศึกษา Cosmic Ray Showers

ปัจจุบันมีวิธีการศึกษาได้หลายอย่าง อาจใช้ cloud chamber ใส่ตัวดูดกลืนไว้ อาจผ่านสนามแม่เหล็กเข้าไปด้วยก็ได้ แล้วถ่ายรูปของ showers ที่เกิดขึ้น แบบที่มีบทบาทมากในการค้นพบ showers คือการทดลองของBruno Rossi นักฟิสิกส์ชาวอิตาเลียน ~1933 โดยเขาได้ใช้ Geiger - Mueller counters หลายตัว แต่ไม่ได้จัดให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน เพื่อไม่ให้เกิดการ discharge จากอนุภาคตัวเดียวได้ เขาได้ทำการวัดตัวดูดกลืนของอนุภาคที่ตกกระทบตะกั่วซึ่งปรากฏว่ามันให้อนุภาคอื่น ๆ ออกมาและทำให้เกิดการdischarge พร้อม ๆ กันในเครื่องนับ เขาทำการวัดอัตรานับที่เกิดจาก showers เหล่านี้เมื่อเพิ่มความหนาของตะกั่วที่อยู่บนกลุ่มเครื่องนับ ผลปรากฏว่าไม่ใช่เป็นการดูดกลืนธรรมดา แต่เป็นว่าเมื่อเพิ่มความหนาของตะกั่วน้อย ๆ จากเริ่มหนา 1 - 2 เซนติเมตร อัตราการนับเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะเห็นว่าค่อนข้างจะขัดกับความรู้สึกธรรมดาของเราที่ว่าอัตราการนับน่าจะลด พอเพิ่มความหนาขึ้นอีกจากเดิมปรากฏว่าอัตราการนับเริ่มลดลง

ดูรูป 2–15 และจากการศึกษาสรุปว่าถ้าแผ่นตะกั่วหนาไม่มากนักจะทำให้เกิด showers ผ่านเครื่องนับมากขึ้น ๆ เมื่อเพิ่มความหนาขึ้นขนาดหนึ่ง แต่ถ้าหนามาก ๆ ตะกั่วก็จะดูดกลืนรังสีเหล่านั้นไว้ ทำให้



รูปที่ 2–15 the Rossi experiment(1933) จากการทดลองพบว่าอัตรานับ (coincidence counting rate)เป็นฟังก์ชั่นกับความหนา t ของแผ่นตะกั่ว ซึ่งวาง เหนือ เครื่องนับ อัตราสูงสุดอยู่ที่ความหนาของตะกั่วประมาณ 20 มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการเกิด showers เข้าเครื่องนับ

ผ่านเครื่องนับน้อยลง ๆ

นอกจากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้แล้วยังมีเทคนิคการจัดเครื่องมือเพื่อศึกษารังสีคอสมิคแบบอื่น ๆ อีกมากมาย นักศึกษาอาจค้นคว้าได้ในตำรา เกี่ยวกับรังสีคอสมิค