หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

รังสีคอสมิค คืออนุภาคที่มีพลังงานสูงมากจากนอกโลกที่พุ่งเข้ามาในบรรยากาศของโลกทุกทิศทุกทาง ต้นกำเนิดของรังสีคอสมิคยังไม่เป็นที่ทราบกันแน่ชัด เพียงแต่สันนิษฐานจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับความเข้มของรังสีที่วัดได้มีค่าต่างๆกัน แล้วสรุปเป็นทฤษฎีของต้นกำเนิดรังสีและการเพิ่มจำนวนขึ้นของอนุภาค ที่น่าจะเป็นไปได้มี 3 ทฤษฎี(1a)* คือ กำเนิดจากดวงอาทิตย์และถูกกักอยู่ในระบบสุริยะ กำเนิดในระบบดาวของเราและถูกกักอยู่ในระบบ และกำเนิดในหรือระหว่างระบบดาวอื่นๆแต่ไม่ถูกกักอยู่ในระบบดาวนั้นๆ รังสีคอสมิคจึงเป็นสิ่งหนึ่งจากนอกโลกที่จะสังเกตและวัดได้โดยตรง การศึกษาถึงส่วนประกอบของมันทำให้ทราบถึงธรรมชาติที่แท้จริงของจักรวาลได้ รังสีคอสมิคที่พุ่งเข้ามาในบรรยากาศของโลกนั้นเรียกว่า "รังสีคอสมิคปฐมภูมิ (primary cosmic radiation)" เมื่อพุ่งเข้าชนอะตอมของอากาศที่หอหุ้มโลก ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของออคซิเจน ไนโตรเจน และคาร์บอน ทำให้มันสูญเสียพลังงานไปและทำให้เกิดอนุภาคชนิดใหม่ซึ่งมีธรรมชาติ คุณสมบัติ และพลังงานต่างไปจากเดิม เรียกว่า"รังสีคอสมิคทุติยภูมิ (secondary cosmic radiation)" รังสีทุติยภูมิเหล่านี้ถ้ามีพลังงานสูงก็จะชนอะตอมของอากาศต่อไปอีก ทำให้เกิดอนุภาคทุติยภูมิเพิ่มมากขึ้นที่บริเวณนั้น ซึ่งส่วนมากเป็นอิเลคตรอน (electron) โฟตอน (photon) และเมซอน (meson) เรียกว่าเกิด"เชาว์เวอร์ (showers)" ขึ้น เมื่อระยะใกล้ผิวโลกเข้ามา จำนวนอนุภาคปฐมภูมิจะลดลงแต่จำนวนอนุภาคทุติยภูมิเพิ่มขึ้น ฉะนั้นเมื่อเรานำเครื่องมือชนิดใดชนิดหนึ่งไปวัดรังสีคอสมิคที่จุดหนึ่งในบรรยากาศของโลก จะวัดได้ทั้งรังสีคอสมิคปฐมภูมิที่มีพลังงานสูง และรังสีทุติยภูมิพร้อมๆกัน เรียกว่าเป็น

---

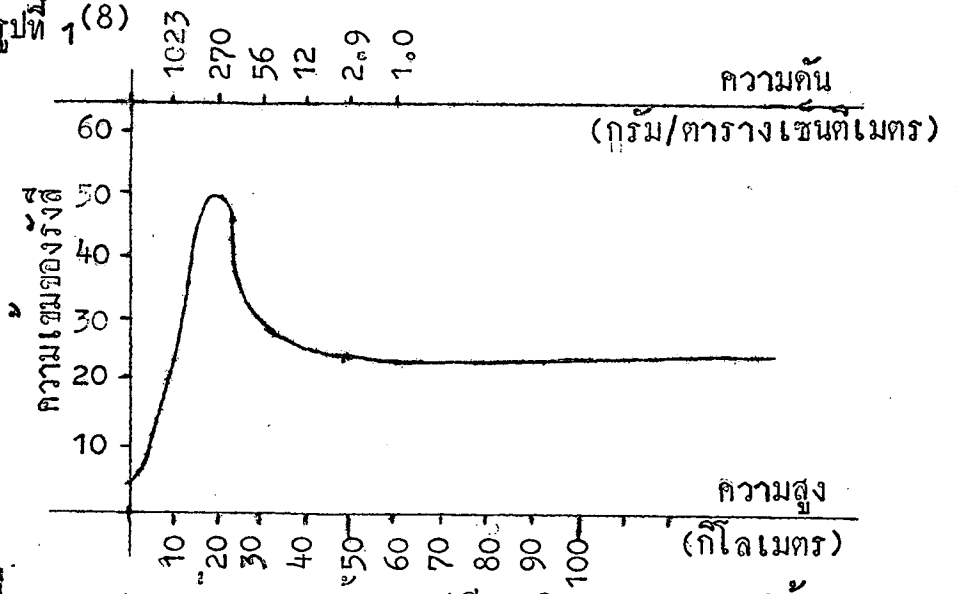
* รายละเอียดของค่าต่างๆที่วัดได้ ชนิดของอนุภาคที่น่าจะเกิดจากแต่ละทฤษฎี และเหตุผลที่จะสรุปเป็นทฤษฎีทั้ง 3 นี้ ดูจากหนังสืออ้างอิง (1) หน้า 170 - 174

"รังสีคอสมิคประจำถิ่น (local cosmic radiation) ถ้าต้องการศึกษาแต่อนุภาคปฐมภูมิ ต้องนำเครื่องมือไปวัดณ ที่ซึ่งไม่มีอากาศ หรือมีน้อยมากคือที่ที่มีระดับสูงมากๆ เหนือบรรยากาศของโลกขึ้นไป

การศึกษารังสีคอสมิคปฐมภูมิสมัยเริ่มแรกนั้นใช้บอลลูนเป็นส่วนใหญ่ เมื่อปี 1899-1900 Elster กับ Geitel[2] และ C.T.R Wilson[3] ต่างก็ใช้อิเลคโตรสโคปแผ่นทองคำเปลวใส่ไว้ในภาชนะปิดซึ่งเป็นฉนวนบรรทุกบอลลูนขึ้นไป และสังเกตเห็นว่าอิเลคโตรสโคปซึ่งใส่ประจุไฟฟ้าไว้หุบลง ต่อมาปี 1910 Gockel[4] ได้ส่งบอลลูนขึ้นไปแล้วสังเกตอัตราการหุบของอิเลคโตรสโคปที่ระดับต่างๆ พบว่าอัตราการหุบของอิเลคโตรสโคปค่อยๆลดลงเล็กน้อย ในปี 1911-1914 Hess[5] และ Kolhorster[6] ได้ส่งบอลลูนขึ้นไปอีกโดยใช้อิเลคโตรสโคปแบบของ Wuff[7a] พบว่าที่ระดับสูงกว่า 300 เมตรขึ้นไป การหุบของอิเลคโตรสโคปจะเพิ่มขึ้นอีกและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงระดับ 9200เมตร อัตราการหุบจะเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่าเมื่อเทียบกับการวัดที่ระดับน้ำทะเล และ Hessเป็นคนแรกที่อธิบายว่ามีอนุภาคที่มีพลังงานสูงมากจากนอกโลกเข้ามาในบรรยากาศของโลก ในปี 1923 และ 1926 Millikan ได้ส่งบอลลูนขึ้นไปสูงถึง 15500 เมตร และขณะเดียวกันเขาพบรังสีชนิดนี้ในที่ลึกลงไปใต้น้ำ ต่อมา Millikan จึงตั้งชื่อรังสีนี้ว่า รังสีคอสมิค

การใช้บอลลูนส่งขึ้นไปนั้นจะสามารถวัดรังสีคอสมิคได้สูงเพียง 30 กิโลเมตรเท่านั้น สมัยต่อมาโดยเฉพาะหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้ใช้จรวดและดาวเทียมส่งขึ้นไปเพื่อให้ได้ระยะสูงยิ่งขึ้น และเครื่องมือวัดได้เปลี่ยนให้ดีขึ้นเป็น ไกเกอร์มูลเลอร์เคาน์เตอร์ (Geiger Muller counter) วิลสันคลาวด์แชมเบอร์ (Wilson cloud chamber) บับเบิลแชมเบอร์ (bubble chamber) และที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันนี้คือ โฟโตกราฟฟิค นิวเคลียร์อิมัลชั่น (photographic nuclear emulsion) เพราะเป็นเครื่องมือที่มีขนาดเล็ก เบา และใช้สะดวก นอกจากนี้ยังจะได้รายละเอียดเกี่ยวกับน้ำหนัก พลังงาน ปฏิกริยานิวเคลียร์ และการสลายตัวเป็นอนุภาคอื่น (decay) ของอนุภาคที่เข้ามาอีกด้วย ในที่นี้การศึกษารังสีคอสมิคปฐมภูมิที่ระยะสูง 158กิโลเมตร ได้ใช้นิวเคลียร์อิมัลชั่นเช่นเดียวกัน

โดยการใช้อุปกรณ์ที่ดีดังกล่าวแล้วในการวัดรังสีคอสมิค ปัจจุบันนี้เราจึงทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่พุ่งมาในแนวดิ่งกับความสูงจากระดับน้ำทะเล ตามกราฟในรูปที่ 1(8)



รูปที่ 1 กราฟระหว่างความเข้มของรังสีคอสมิคกับความสูง ได้จากการยิงจรวดขึ้นไปเหนือบรรยากาศของโลก

จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ระดับสูงประมาณ 20 กิโลเมตร ความเข้มของรังสีคอสมิคจะมีค่าสูงที่สุดแล้วลดลงจนถึงที่ความสูงตั้งแต่ 50 กิโลเมตรขึ้นไป ความเข้มของรังสีจะคงที่ และในตำแหน่งนั้น ความดันของบรรยากาศมีค่าน้อยกว่า 1 กรัมต่อตารางเซ็นติเมตร ซึ่งเป็นค่าที่น้อย ฉะนั้นที่ระดับสูงกว่า 50 กิโลเมตรขึ้นไปจึงเชื่อได้ว่า รังสีที่วัดได้เป็นรังสีปฐมภูมิเกือบทั้งหมด

ได้มีการหาพลังงานในช่วงต่างๆ หรือสเปคตรัมของพลังงาน (energy spectrum)* ของรังสีคอสมิคปฐมภูมิซึ่งแบ่งออกเป็นสองวิธีการคือ ดูในช่วงพลังงานต่ำขึ้นไปจนถึง 10 Gev

---

* รายละเอียดของการหาพลังงาน ดูได้จากหนังสืออ้างอิงที่ (9a) หน้า 57-58 และหนังสืออ้างอิงที่ (13) บทที่ 1, 2

ต่ออนุภาค พลังงานของรังสีที่เข้ามาอาจหาได้โดยตรงจากการเบนไปของอนุภาค (by scattering measurement) เนื่องจากการชนกับอะตอมของนิวเคลียร์อิมัลชั่น ซึ่งส่งขึ้นไปที่ระดับสูงๆ สำหรับช่วงพลังงานที่สูงขึ้นไป การวัดโดยตรงจะทำไม่สะดวก ต้องใช้วิธีอื่น เช่น ในช่วงพลังงานสูงขึ้นไปถึง15 Gev ต่ออนุภาค อาจใช้ปรากฏการณ์ที่ว่า ณเส้นรุ้งต่างกันจะวัดรังสีได้ไม่เท่ากัน (geomagnetic latitude effect) หาชนิดของประจุของอนุภาคที่เข้ามา ในช่วงพลังงานสูงกว่า 15 Gevต่ออนุภาคขึ้นไป หาได้จากปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคชนนิวเคลียร์อิมัลชั่นซึ่งส่งขึ้นไปที่ระดับสูงๆ ถ้ารังสีที่เข้ามาเป็นโปรตอนที่มีพลังงานสูงชนกับโปรตอนด้วยกันในอิมัลชั่น จะเกิดเชาว์เวอร์ขึ้นตามปฏิกริยา

$$p + p \longrightarrow p + p + \pi^{\circ}$$

ซึ่งอาจนำเอาค่าครึ่งหนึ่งของมุมระหว่างแนวของอนุภาคทุติยภูมิของเชาว์เวอร์นั้นมาคำนวนหาพลังงานของโปรตอนที่เข้ามาได้ แต่ถ้าโปรตอนที่เข้ามาชนกับนิวเคลียสของธาตุในอิมัลชั่น มุมของเชาว์เวอร์จะแผ่กว้างออกไป ค่าพลังงานที่คำนวนได้จะผิดความจริงไปมาก ถ้าอนุภาคที่เข้ามาเป็นอนุภาคหนัก การคำนวนหาพลังงานของมันจะง่าย เพราะเราใช้หลักการที่ว่า นิวเคลียสที่ถูกชนจะแตกออกและกระจายไปรอบตัวด้วยพลังงานไม่เกิน 2-3 Mev ในทิศทางที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของอนุภาคที่เข้ามาด้วย และอนุภาคปฐมภูมิที่เข้ามานั้น นอกจากจะทำให้เกิดเชาว์เวอร์ของพวกเมซอนแล้ว ยังได้เชาว์เวอร์ของโปรตอนและอนุภาคอัลฟ่า (α-particle)ที่มีมุมแคบๆอีกด้วย โปรตอนและสวนต่างๆของแกนกลางอะตอมที่แตกออกไป (fragments) จะมีความเร็วใกล้เคียงกับรังสีนั้น โดยการศึกษามุมที่เบนไปจากแนวเดิมของอนุภาคหนักเหล่านี้ อาจคำนวนหาพลังงานของอนุภาคได้ผลใกล้เคียงกับความจริงมาก

Peter[9a,9b] ได้รวบรวมรายการทดลองหาสเปคตรัมของพลังงานของรังสีคอสมิคปฐมภูมิแล้วสร้างสูตรสำหรับคำนวณไว้ดังนี้

$$\int_{E}^{\infty} N(E)dE = \frac{\text{const}}{(1+E)^{n}}$$

$$N(E) = \frac{K}{(1+E)^{n}}$$

เมื่อ N(E) = จำนวนอนุภาคที่เข้ามาที่มีพลังงานสูงกว่า E Gev/เมตร^2.วินาที มุมตัน (E Gev/m^2. s. st)

E (Gev) = พลังงานจลน์ต่ำที่สุด (energy cut off) ของอนุภาคที่เข้ามาได้ ณ ตำแหน่งที่วัด ค่า E ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาค ตำแหน่งเส้นรุ้ง และทิศที่อนุภาคพุ่งเข้ามา

n = เลขดรรชนีมีค่าขึ้นอยู่กับ E คือ ถ้า E อยู่ในระหว่าง 2 ถึง 15 Gev ค่า n=1.1 ถ้า Eมากกว่า 15 Gev ขึ้นไป ค่า n=1.5

K = ค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคที่เข้ามามีค่าตามตารางที่ 1

นิวเคลียสของอนุภาคที่เข้ามา	p	He	Li, Be, B	C, N, O	Z $\geq$ 9
K	3800	380	19	20	6

ตารางที่ 1 แสดงค่า K ซึ่ง Peter ใช้คำนวณจากสูตรของเขา

จากจำนวนของรังสีที่นับได้สามารถหาสเปคตรัมของพลังงานได้ ทำนองเดียวกันที่พลังงานจำกัดค่าหนึ่ง อาจหาปริมาณของรังสีได้จากสูตรเช่นกัน และโดยการแทนค่า จะเห็นได้ว่าที่พลังงานค่าหนึ่ง จำนวนอนุภาคโปรตอนจะมากที่สุด และรองลงไปคืออนุภาคอัลฟ่า นอกนั้นมีน้อย โดยเฉพาะพวกธาตุหนักที่มีเลขอะตอมมากกว่า 9 ขึ้นไป S.F Singer[10] ได้รวบรวมผลของการคำนวณหาจำนวนอนุภาคเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงปริมาณของธาตุตั้งแต่เลขอะตอม 1 ถึง 26 ตามตารางที่ 2

Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	14	18	20	26
ชื่อ	H_2	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Si	A	Ca	Fe
จำนวน (อนุภาค/เวลา)	4×10^{10}	3×10^{9}	100	20	24	3.5×10^{6}	6.6×10^{6}	2.15×10^{7}	1600	8.6×10^{6}	1×10^{6}	1.5×10^{5}	4.9×10^{4}	6×10^{5}

ตารางที่2 แสดงถึงจำนวนธาตุตั้งแต่ Z=1 ถึง 26 ธาตุที่มี Z มากกว่า 10 ขึ้นไปแสดงไว้บางธาตุที่มีปริมาณมากพอที่จะเปรียบเทียบได้เท่านั้น ตามตารางนี้เทียบให้ Si เป็น 1×10^{6}

สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 10 ขึ้นไปมีจำนวนน้อย Otis B. Young และ Fred E. Harvey[11] ได้หาปริมาณไว้คิดเป็นร้อยละโดยให้ปริมาณธาตุทั้งหมดตั้งแต่ Z เท่ากับ 10 ถึง 26 เป็น 100% เพื่อแสดงเปรียบเทียบให้เห็นเป็นตัวเลขว่า ธาตุตั้งแต่ Z=10 ถึง Z=26 ธาตุใดมีปริมาณมากน้อยเท่าใดตามตารางที่ 3

Z	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
ชื่อ	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	A	K	Ca	Se	Ti	V	Cr	Mn	Fe
ปริมาณ	23.0	14.4	16.4	12.0	8.0	5.3	2.3	3.1	2.3	3.1	1.9	1.7	2.1	1.3	1.6	0.5	1.4

ตารางที่ 3 แสดงจำนวนของอนุภาคหนักของรังสีคอสมิคปฐมภูมิ โดยหาจากอนุภาคทั้งหมด 1082 ตัว และเทียบให้ปริมาณนี้เป็น 100 %

มีปรากฏการณ์ธรรมชาติเกี่ยวกับความเข้มของรังสีคอสมิคที่วัด ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโลกได้ไม่เท่ากัน เช่น การที่มีสนามแม่เหล็กโลกกั้นจะช่วยเบนทิศทางของอนุภาคที่เข้ามาเป็นผลให้วัดปริมาณรังสีที่เข้ามายังบริเวณต่างๆของโลกได้ต่างกัน เช่น แถบเส้นศูนย์สูตรเส้นแรงแม่เหล็กโลกเกือบขนานกับผิวโลก จะเบนทิศทางของรังสีคอสมิคได้มากที่สุด ทำให้บริเวณนั้นวัดรังสีได้น้อย และจะวัดได้มากขึ้นเมื่ออยู่ในตำแหน่งเส้นรุ้งสูงขึ้นไป ที่บริเวณขั้วโลกทั้งสองจะวัดรังสีได้มากที่สุด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "ปรากฏการณ์เกี่ยวกับเส้นรุ้ง (latitude effect)" และยังมีปรากฏการณ์อื่นๆอีก คือ "ปรากฏการณ์ตะวันออก - ตะวันตก (east-West effect)" ทำให้วัดรังสีที่เข้ามาทางทิศตะวันออกและตะวันตกได้ไม่เท่ากัน และปรากฏการณ์เกี่ยวกับเส้นแวง (longitude effect)"คือปริมาณรังสีเปลี่ยนตามเส้นแวงเป็นต้น การศึกษาเกี่ยวกับชนิดและปริมาณของรังสีคอสมิคนั้น ถ้าได้คำนึงถึงปรากฏการณ์เหล่านี้ด้วย จะทำให้ผลของการวิเคราะห์ถูกต้องยิ่งขึ้น

การที่จะทราบว่ารังสีคอสมิคปฐมภูมิมีประจุเป็นบวกหรือลบ หาได้จากปรากฏการณ์ตะวันออกตะวันตก โดยวัดจำนวนรังสีที่พุ่งมาตามแนวราบ ถ้าอนุภาคมาจากทิศตะวันตกจะมีประจุเป็นบวกและมีโมเมนต์น้อยกว่าพวกที่มาจากทิศตะวันออกซึ่งมีประจุเป็นลบ การใช้

เครื่องมือที่เรียกว่า กล้องโทรทัศน์ที่ใช้นับรังสีในทิศทางที่ต้องการ (directional counter telescope) พบว่า รังสีคอสมิคปฐมภูมิมาจากทิศตะวันตกมากกว่าทางทิศตะวันออก จึงสรุปว่า อนุภาคคอสมิคปฐมภูมิมีประจุเป็นบวกเป็นส่วนใหญ่

รังสีคอสมิคปฐมภูมิที่พุ่งมาในบรรยากาศของโลกแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) พวกมีประจุที่มีน้ำหนักมาก (Charged heavy particles)
2) พวกอิเลคตรอนหรือรังสีเบต้า (Electron or Beta-rays)
3) พวกที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiations)

1. <u>พวกมีประจุที่มีน้ำหนักมาก</u> ได้แก่พวกนิวเคลียสของธาตุตั้งแต่ไฮโดรเจนขึ้นไป อนุภาคพวกนี้เมื่อผ่านวัตถุใดไป จะเสียพลังงานให้กับวัตถุนั้นแล้วหยุดที่ระยะหนึ่ง ระยะทางวิ่งของอนุภาคในวัตถุตั้งแต่เริ่มเข้าจนกระทั่งหยุดเรียกว่า "ระยะทาง (range)" ซึ่งวัดความยาวเป็นไมครอน (micron เขียนแทนด้วยตัว μ, 1 ไมครอน $=10^{-6}$ เมตร) หรือวัดเป็นน้ำหนักของตัวกลางที่ผ่านเป็นกรัมต่อตารางเซ็นติเมตรก็ได้ แล้วนำมาหาอนุภาคตัวที่เข้ามา

เนื่องจากโลกมีสนามแม่เหล็กกั้นอยู่โดยรอบ ทำให้รังสีคอสมิคที่จะพุ่งเข้ามาได้ต้องมีพลังงานสูงพอ และต้องสูงกว่าพลังงานจำกัด (cut off energy หรือ minimum rigidity) ค่าหนึ่งที่ตำแหน่งนั้นๆ อนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าค่าจำกัดเฉพาะแห่งนี้ จะถูกกักอยู่ในสนามแม่เหล็กโลก ค่าพลังงานจำกัดนี้เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งเส้นรุ้ง สำหรับอนุภาคที่พุ่งมาในแนวดิ่งต้องมีพลังงานอย่างน้อยที่สุดประมาณ 16 Gev[1b] ที่เส้นศูนย์สูตร และน้อยลงตามลำดับจนเป็นศูนย์ที่ขั้วโลก ปัจจุบันนี้การหาชนิดของอนุภาคคอสมิคปฐมภูมิพบว่าค่าต่ำสุดของพลังงานของอนุภาคที่เข้ามาต้องมีค่าตั้งแต่ 4.5 Gev[1c] ต่ออนุภาคขึ้นไป และจะมีเพียง 10% เท่านั้นที่มีพลังงานเกิน 22 Gev อนุภาคเท่าที่หาได้จะมีพลังงานอยู่ระหว่าง 2 ค่านี้ ที่พลังงาน 4.5 Gevนั้น อนุภาคจะมีความเร็วเท่าแสง คือ ค่า $\beta = \frac{v}{c} = 1$ และการทำให้ตัวกลางที่มันผ่านแตกตัวเป็นอิออน (ionization) จะเป็นสัดส่วนกับ Z^2 (เมื่อ Z= เลขอะตอม) ซึ่งทำให้การคำนวณหาประจุของอนุภาคปฐมภูมิง่ายเข้า

อนุภาคคอสมิคปฐมภูมิที่พุ่งเข้ามาในบรรยากาศของโลกนั้น จะชนกับอะตอมของบรรยากาศรอบนอกเกิดเป็นอนุภาคทุติยภูมิเดี่ยว (single charge particles) และถูกกักอยู่ในสนามแม่เหล็กโลก อนุภาคทุติยภูมินี้เรียกว่า อนุภาคอัลเบโด (albedo particles) ซึ่งอาจจะพุ่งกลับเข้ามาในบรรยากาศของโลกอีกพร้อมกับอนุภาคปฐมภูมิขณะที่ผ่านเข้ามา อนุภาคอัลเบโดจะชนกับอะตอมของอากาศเกิดเป็นอนุภาคทุติยภูมิเพิ่มขึ้น อนุภาคที่เกิดขึ้นใหม่นี้ บางตัวจะพุ่งออกไปนอกบรรยากาศของโลกและชนกับอะตอมของอากาศทำให้เกิดอนุภาคทุติยภูมิเพิ่มมากขึ้นเรียกว่า "splash albedo particles" และถูกกักอยู่ในสนามแม่เหล็กโลกอีก ซึ่งบางตัวจะกลับพุ่งเข้ามาในบรรยากาศของโลกอีกครั้งหนึ่ง เรียกว่า "re-entrant albedo particles" รังสีคอสมิคที่วัดกันได้นั้นอาจจะเป็นอนุภาคอัลเบโดเหล่านี้ก็ได้

พวกมีประจุที่มีน้ำหนักมากนี้อาจแบ่งออกได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆดังนี้

(1) พวกที่มีเลขอะตอมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 ($Z \leq 2$) ซึ่งได้แก่ โปรตอน ดิวทีรอน ตริตอน และอนุภาคอัลฟ่า

พวกที่มีเลขอะตอมเป็น 1 ($Z=1$) นั้น เป็นโปรตอน (proton) มากที่สุด โดยมีถึงประมาณ 90% ของปริมาณรังสีคอสมิคทั้งหมด การใช้นิวเคลียร์อิมัลชั่นวัดปริมาณของอนุภาคนี้ที่มาจากนอกโลกจริงๆนั้นทำได้ยาก เพราะค่าที่วัดได้เป็นผลรวมของอนุภาคปฐมภูมิกับอนุภาคอัลเบโดที่พุ่งเข้ามา และทาง (track) ที่ปรากฏในนิวเคลียร์อิมัลชั่นก็ไม่ชัดทุกทาง เขาจึงนิยมใช้นิวเคลียร์อิมัลชั่นคู่กับเครื่องวัดชนิดอื่นที่ระดับสูงๆ

สำหรับอนุภาคปฐมภูมิดิวทีรอน (deuteron) นั้น จะถูกทำลายไปเสียแต่แรก ณ อุณหภูมิหนึ่งที่ดวงดาวอันเป็นต้นกำเนิดของอนุภาคปฐมภูมิตามปฏิกริยาดังนี้

$$H^2 + d \longrightarrow H^3 + p \qquad \text{และ} \qquad H^2 + d \longrightarrow He^3 + n$$

$$\downarrow$$

$$He^3 + \beta$$

ดิวทีรอนปฐมภูมิจึงเหลือมายังโลกน้อยมาก Suess และ Urey (1955) และ

Cameron (1959)[13a]ได้หาอัตราส่วนของดิวทีรอนกับโปรตอนได้เพียง $1.4 \times 10^{-4}/1$ และ Kinman (1956)[13a]พบว่ามีดิวทีรอนในบรรยากาศของดวงอาทิตย์ประมาณ 4×10^{-5} เท่าของโปรตอน จึงเท่ากับว่าดวงอาทิตย์ให้ดิวทีรอนออกมาเป็น1% ของโปรตอนเท่านั้น ฉะนั้นดิวทีรอนปฐมภูมิที่มาถึงโลกจึงมีปริมาณน้อยมาก ปริมาณที่วัดได้ในบรรยากาศก็เป็นอนุภาคทุติยภูมิซึ่งเกิดจากอนุภาคปฐมภูมิที่มีน้ำหนักมากแตกออก ทั้งนี้เป็นไปตามสมมุติฐานที่ว่า รังสีคอสมิคเกิดจากแกนกลางอะตอมของธาตุเหล็กแตกออกไปเป็นธาตุเบาๆรวมทั้งดิวทีรอนด้วย

ส่วนตริตอน (triton) มีคุณสมบัติที่ไม่อยู่ตัว และมีเวลาครึ่งชีวิต(half-life)12.3 ปี Singer(1958)[13a]ได้ใช้สมมุติฐานที่กล่าวข้างบนนั้นคำนวณหาปริมาณของตริตอนเทียบกับโปรตอน ได้อัตราส่วนประมาณ $10^{-5}\rho/1$ เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของอนุภาคเฉลี่ย มีหน่วยเป็น อนุภาคต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตรของรังสีคอสมิคที่พุ่งเข้ามาในบรรยากาศขณะนั้น

อนุภาคอัลฟ่า (α-particle) คือแกนกลางอะตอมของธาตุฮีเลี่ยม (helium nucleus)มีปริมาณมากเป็นที่สองรองจากโปรตอน คือมีประมาณ9% ของอนุภาคทั้งหมด เราทราบรายละเอียดของอนุภาคอัลฟ่ามากกว่าอื่น เพราะคุณสมบัติของมันทำให้ศึกษาง่าย คือ อนุภาคอัลฟ่าที่มีพลังงานสูงจะไม่สลายตัวเป็นธาตุอื่น ทั้งไม่ทำให้เกิดอนุภาคอัลเบโดด้วย อนุภาคอัลฟ่าทุติยภูมิที่เกิดจากการสลายตัวของแกนกลางอะตอมของธาตุหนักก็อยู่ในทิศทางเดียวกับที่แกนกลางอะตอมนั้นเข้ามา อีกประการหนึ่ง นิวเคลียร์อิมัลชั่นใช้วัดอนุภาคอัลฟ่าได้ดีเราจึงศึกษามันได้มากกว่าธาตุอื่น อนุภาคอัลฟ่าปฐมภูมิที่เข้ามาเมื่อวัดที่พลังงานต่ำสุด (cut off energy)ค่าต่างกันจะได้ปริมาณต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ (sun spot)ด้วย

Suess และ Urey (1956) และ Cameron (1959) ได้คำนวณปริมาณของ He^4 ในรังสีคอสมิคได้ 13-15 %ของโปรตอน[13b] ส่วน He^3 มีจำนวนน้อยกว่า 1%ของ He^4 ในดวงอาทิตย์ Cameron ยังได้หาอัตราส่วนของ He^4/He^3 ได้ $3.8 \times 10^3/1$ โดยประมาณ He^3 อาจเกิดจากการสลายตัวของอนุภาคหนักในรังสีคอสมิคปฐมภูมิก็ได้ หรือ He^4อาจเกิด

ปฏิกริยากับนิวเคลียร์อิมัลชั่นได้ He^3 ที่ชั้นบนสุดของบรรยากาศรอบโลก Singer (1958) คำนวณอัตราส่วนของ He^3/He^4 ได้ 0.45/1[13b] โดยใช้สมมุติฐานที่ว่า He^3 และ He^4 เกิดจากการสลายตัวของธาตุเหล็ก Hayakawa (1958)[13b] ได้หาอัตราส่วนของ He^3/He^4 ได้ $5\times10^{-2}x/1$ บนโลก เมื่อ x เป็นความหนาของบรรยากาศมีค่าประมาณ 3 กรัม/ตารางเซ็นติเมตร ทั้งหมดนี้ทำให้ทราบว่ามีแกนกลางอะตอมของ He^3 อยู่ด้วยใน He ทั้งหมดในรังสีคอสมิค ถ้าใช้นิวเคลียร์อิมัลชั่นวัดปริมาณ He จะได้ประมาณ 10% ของรังสีคอสมิคทั้งหมดเท่านั้น

(2) พวกที่มีเลขอะตอมมากกว่า 2 ขึ้นไป ($Z>2$) แบ่งออกได้เป็น 3 พวกใหญ่ๆคือ

ก. พวกเบา (Light Heavy nuclei หรือ L-H nuclei) คือพวกที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 3 ถึง 5 ได้แก่แกนกลางของธาตุ Li, Be และ B

ในดวงดาวที่มีความร้อนสูงมากๆ พวกเบาเหล่านี้จะถูกทำลายไปโดยเกิดปฏิกริยาเนื่องจาก H_2 ถูกเผาผลาญดังนี้

$$Li^6 + p \longrightarrow He^3 + \alpha$$

$$Li^7 + p \longrightarrow He^4 + \alpha$$

$$Be^9 + p \longrightarrow d + Be^8 \downarrow 2\,He^4$$

$$Be^9 + p \longrightarrow Li^6 + \alpha$$

$$Li^6 \downarrow + p \longrightarrow He^3 + \alpha$$

$$B^{10} + p \longrightarrow Be^7 + \alpha$$

$$B^{11} + p \longrightarrow Be^8 + \alpha \downarrow 2\,He^4$$

อัตราการเกิดปฏิกริยาเหล่านี้เป็นไปช้ามากภายในดวงดาวจนกระทั่งหมดไป แต่เรายังวัดแกนกลางอะตอมพวกนี้บนพื้นโลกได้ ทำให้คิดกันว่าอนุภาคที่วัดได้ไม่ใช่รังสีคอสมิคปฐมภูมิ

ข. พวกกลาง (Medium heavy nuclei หรือ M-H nuclei) คือ พวกที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 6 ถึง 9 ได้แก่แกนกลางอะตอมของธาตุ C,N,O และ F แต่ C,N และ O มีปริมาณมากที่สุด พวกนี้เกิดจากการเผาไหม้ของ He ภายในดวงดาวต่างๆ และมีปรากฏในรังสีคอสมิคปฐมภูมิเช่นเดียวกัน Suess และ Urey (1956)[13b] ได้หาอัตราส่วนของพวกเบาต่อพวกกลางได้ $4.5\times10^{-6}/1$ และ Cameron (1959) หาได้ $3.4\times10^{-6}/1$[13b] จะเห็นได้ว่าปริมาณของพวกเบามีน้อยมากเมื่อเทียบกับพวกกลาง ทำให้ได้ข้อสรุปว่า พวกเบาที่พบในรังสีคอสมิคนั้น เป็นผลจากการแตกออกของธาตุหนักเมื่อเมื่อชนกับวัตถุในอากาศตามทางที่ผ่านมามากกว่าที่จะเกิดจากแหล่งกำเนิดเดิมของมัน คือที่ดวงดาวต่างๆ

ค. พวกหนักมาก (Very heavy nuclei หรือ V-H nuclei) คือธาตุตั้งแต่ Ne ขึ้นไปมี $Z \geqslant 10$ อาจจะแบ่งย่อยต่อไปอีกเป็น2 พวกคือ พวกแกนกลางอะตอม $\mathcal{H}$ ($\mathcal{H}$-nuclei) คือธาตุที่เรียงอยู่ระหว่าง Ne ถึง K มี $10 \leqslant Z \leqslant 19$ และพวกแกนกลาง $\mathcal{VH}$ ($\mathcal{V}$-$\mathcal{H}$-nuclei) คือธาตุระหว่าง Ca ถึง Ni มี $20 \leqslant Z \leqslant 28$ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการค้นหา บางทานแบ่งย่อยต่อไปอีกโดยแยกเอาพวก $23 \leqslant Z \leqslant 30$ ไว้ต่างหากเรียกว่า "กลุ่มของธาตุเหล็ก (iron group)" เพราะถือว่าเป็นกลุ่มธาตุที่เป็นส่วนประกอบสำคัญ (core) ของดวงดาวที่มีความร้อนมากที่สุด

พวกแกนกลาง $\mathcal{H}$ นี้ ส่วนใหญ่เกิดจากขบวนการจับตัวกันของอนุภาคฮีเลี่ยม (helium capture process) สำหรับพวกที่มีประจุเป็นเลขคี่ เป็นเพราะเกิดขบวนการจับตัวกันอย่างช้าๆ (slow neutron captures) แต่พวกที่มีเลขอะตอมเป็นคู่ มีปริมาณมากกว่าพวกที่มีเลขอะตอมเป็นคี่ ปรากฏการณ์ที่เลขอะตอมเป็นคู่-คี่นี้ อาจนำมาหาอนุภาคคอสมิคที่เข้ามาได้

อัตราส่วนของปริมาณรังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาแน่นของอากาศ Waddington ได้ใช้นิวเคลียร์อิมัลชั่นคำนวณหาอัตราส่วนของพวก H/M ของรังสีคอสมิคปฐมภูมิเมื่อให้ความหนาแน่นของอากาศเป็นศูนย์ จะได้ปริมาณ H/M เท่ากับ

0.34 ±0.04/1[14] แต่ในทางปฏิบัติ การทดลองนี้จะทำได้ที่อากาศมีความหนาแน่นน้อยกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร และเขาได้อัตราส่วน γ-%/% =0.37±0.08 เมื่อใช้ความดันของบรรยากาศเป็นศูนย์เช่นเดียวกัน

2. <u>พวกอิเลคตรอนหรือรังสีเบต้า</u> เป็นประจุไฟฟ้าชนิดลบที่เบาและมีความเร็วเท่าแสง จึงมีคุณสมบัติต่างไปจากพวกที่ 1 ขณะที่ผ่านวัตถุใดไปมันจะเสียพลังงานแก่วัตถุนั้น โดยทำให้อะตอมที่มันผ่านแตกตัวเป็นอิออน (ionization) หรือจะเกิดการเบนไปเนื่องจากสนามไฟฟ้า (deflection) การเบนไปแต่ละครั้ง อิเลคตรอนจะเสียพลังงานไปในรูปของการแผ่รังสี ซึ่งเรียกว่า Bremstrahlung ฉะนั้นทางเดินของอิเลคตรอนจึงไม่ตรงเหมือนพวกมีประจุที่มีน้ำหนักมาก อนุภาคเบต้ามีในรังสีคอสมิคปฐมภูมิน้อย ค่าที่วัดได้ส่วนใหญ่เป็นอิเลคตรอนที่เกิดจากการสลายตัวหรือเกิดจากปฏิกริยาของธาตุอื่น

3. <u>พวกที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า</u> คือโฟตอน (photon) เมื่อผ่านวัตถุเข้ามาจะเกิดการดูดกลืน (absorption) ในเนื้อของวัตถุทำให้ความเข้มของรังสีลดลง นอกจากนี้ยังเกิดปรากฏการณ์เกี่ยวกับโฟตอนที่มีพลังงานต่างๆทำปฏิกริยากับอิเลคตรอนของอะตอมของตัวกลาง (atomic electron) คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเลคตริค (photoelectric effect) ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect) และการเปลี่ยนโฟตอนเป็นอิเลคตรอนกับโพสสิตรอน (pair production) ซึ่งปฏิกริยาเหล่านี้อาจเห็นได้ในเครื่องมือวัดรังสีคอสมิคปฐมภูมิ

ปริมาณของรังสีคอสมิคปฐมภูมิทั้ง 3 ประเภทนี้มีจำนวนไม่เท่ากัน จากการทดลองของ Critch field[14] และผู้รวมงานของเขาเมื่อปี 1950 โดยใช้ คลาวดแชมเบอร์วัดปริมาณรังสีคอสมิคที่ระดับสูง 28 กิโลเมตร ซึ่งอยู่เหนือระดับที่ความเข้มของรังสีคอสมิคมีค่าสูงสุดแล้ว พบว่าอิเลคตรอนและโฟตอนมีปริมาณไม่เกิน 6% ของปริมาณรังสีคอสมิคทั้งหมด และถ้าขึ้นไปวัดที่ระดับสูงขึ้นไปอีก อาจลดลงเหลือถึง 0.25 % ฉะนั้นถ้าระดับสูงถึง 158 กิโลเมตรจึงเกือบจะไม่มีโฟตอนและอิเลคตรอนเลย ที่คนพบก็มีแต่โปรตอนและแกนกลางของธาตุต่างๆที่ไม่สลายตัว (stable nuclei) เท่านั้น