



นิวตรอนในบรรยากาศ
(Neutrons in the Atmosphere)

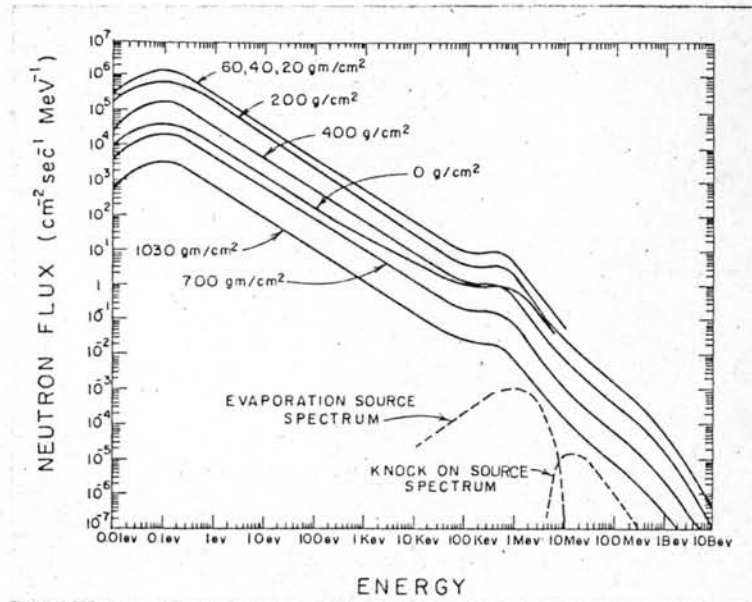
นิวตรอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งของรังสีคอสมิกทุติยภูมิ (secondary cosmic rays) นิวตรอนบางส่วนที่เกิดขึ้นบริเวณบรรยากาศเบื้องบน จะหลุดหนีออกสู่อวกาศได้บ้าง ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะสูญเสียพลังงาน โดยการชนกับนิวเคลียสของธาตุดอกซีเจนและไนโตรเจนในบรรยากาศ ปฏิกิริยาที่สำคัญในการจับนิวตรอนคือ $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$, ทำให้เกิด ^{14}C ซึ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี (radioactive nuclides)

นิวตรอนในบรรยากาศส่วนใหญ่เกิด เนื่องจากกระบวนการระเหยของนิวเคลียสที่ถูกกระตุ้น (excited nuclei) ซึ่งจะให้นิวตรอนออกมามีพลังงานต่ำกว่า 10 MeV สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนเหล่านี้สามารถแสดงโดย

$$S(E) dE \propto E \exp\left(\frac{-E}{T}\right) dE \quad (3.1)$$

ส่วนนิวตรอนที่เกิดเนื่องจากกระบวนการน็อคเอาต์ (knock - out processes) จะมีพลังงานสูงประมาณ 10 MeV ขึ้นไป แต่มีจำนวนน้อยกว่าที่เกิดเนื่องจากกระบวนการระเหย

สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของบรรยากาศได้แสดงดังรูปที่ 3.1 จากรูปจะเห็นสเปกตรัมของนิวตรอนที่ออกมาจาก evaporation source และ knock - on source ด้วย

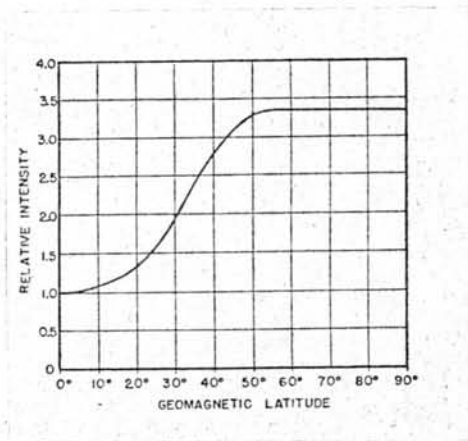


รูปที่ 3.1 (19) สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในบรรยากาศ สำหรับเส้นละติจูดแม่เหล็ก 44°N สเปกตรัมพลังงานสำหรับ 200 ถึง 1030 g/cm^2 เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง, สำหรับ ความลึกน้อยกว่า 200 g/cm^2 สเปกตรัมได้จากการคำนวณ

ความเข้มของนิวตรอนในบรรยากาศมีได้คงที่ตลอดไปทุกแห่ง แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกหรือความดันของบรรยากาศ และยังเปลี่ยนไปตามเส้นละติจูดแม่เหล็กอีกด้วย ซึ่งจะได้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของนิวตรอนในบรรยากาศ ดังหัวข้อต่อไปนี้, (a) การเปลี่ยนแปลงความเข้ม ไปด้วยเส้นละติจูดแม่เหล็กโลกเมื่อความดันคงที่ ; (b) การเปลี่ยนแปลงความเข้ม ไปด้วยระดับความสูงหรือความดันของบรรยากาศ ; (c) การเปลี่ยนแปลงความยาวของการดูดกลืนเฉลี่ย (mean absorption length) ไปด้วยเส้นละติจูดแม่เหล็กโลก ; (d) การเปลี่ยนตำแหน่งความเข้มสูงสุดกับเส้นละติจูดแม่เหล็กโลก

3.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มของนิวตรอนกับเส้นละติจูดแม่เหล็กโลกเมื่อความดันบรรยากาศคงที่

ซิมป์สัน⁽³⁾ (Simpson) ได้ทำการวัดความเข้มของนิวตรอนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเส้นละติจูดแม่เหล็กโลกเมื่อกำหนดให้ความดันบรรยากาศคงที่ โดยการใช้หลอดวัด BF_3 บรรทุกไปกับเครื่องบิน B29 ได้ผลการทดลองออกมา ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งรูปแบบทั่วไปของการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับการทดลองของผู้อื่น



รูปที่ 3.2⁽³⁾ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัมพัทธ์ของนิวตรอนกับเส้นละติจูดแม่เหล็กโลก เมื่อความดันบรรยากาศคงที่ 312 g/cm^2 (306 mb).

จากการทดลองยังพบว่า สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนในบรรยากาศบริเวณที่ต่ำกว่าระดับความเข้มสูงสุดลงมานั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความสูงหรือเส้นละติจูด ซึ่งเป็นการสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า การกระจายพลังงานของนิวตรอนในบรรยากาศเกิดขึ้นจากการกระเจิง, การลดความเร็ว, และการจับของนิวตรอนโดยไนโตรเจน และออกซิเจน และขึ้นกับพลังงานจลน์แรกเริ่มของนิวตรอนน้อยมาก⁽²⁾ ดังนั้นในบริเวณส่วนสมดุขยของบรรยากาศ

ซึ่งอยู่ระหว่างความดัน 200 ถึง 700 มิลลิบาร์ การกระจายความเข้มของนิวตรอนที่มีพลังงานสูงจะเป็นแบบเดียวกับการกระจายความเข้มของนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ

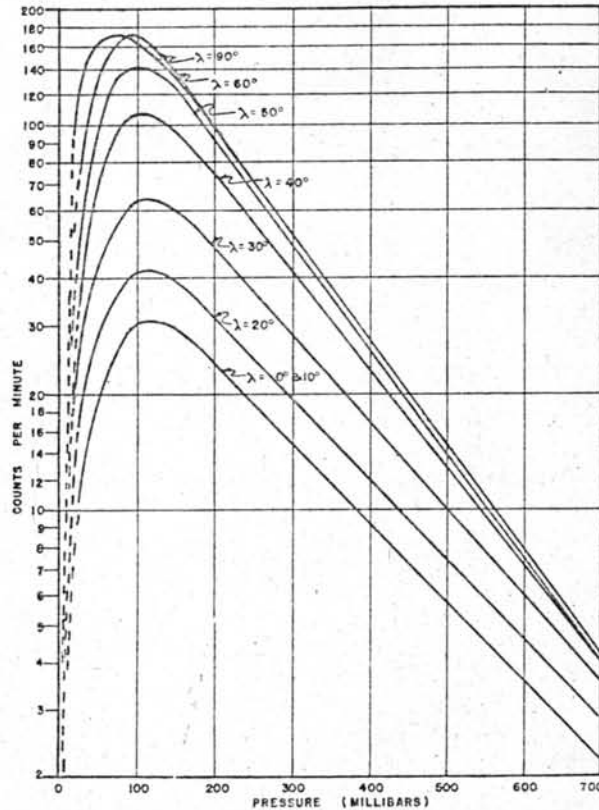
3.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มของนิวตรอนกับความดันบรรยากาศ

ความเข้มของนิวตรอนในบรรยากาศมีได้คงที่ตลอด แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามความสูงหรือความดันบรรยากาศ จากการทดลองพบว่า ความเข้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นหรือเมื่อความดันบรรยากาศลดลงนั่นเอง และในช่วงความดันบรรยากาศจาก 200 ถึง 700 มิลลิบาร์ ความเข้มของนิวตรอนจะแปรเปลี่ยนตามความดันแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังสูตรต่อไปนี้⁽³⁾

$$N = N_0 e^{-\mu p} \quad (3.2)$$

เมื่อ p เป็นความดันบรรยากาศ , μ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเฉลี่ยในหน่วยส่วนกลับของความดัน

โซเบอร์แมน⁽²⁰⁾ (Soberman) ได้ทำการวัดความเข้มของนิวตรอนที่ระดับความดันบรรยากาศต่าง ๆ ในช่วงจาก 20 ถึง 700 มิลลิบาร์ โดยใช้หลอดวัด BF_3 บรรจุไปกับบอลลูน เขาได้ทำการวัดที่เส้นละติจูดแม่เหล็กต่าง ๆ กัน คือ $10.1^\circ N$, $55.1^\circ N$, และ $88.6^\circ N$ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ รวมทั้งผลการทดลองที่ผู้อื่นได้ทำมาก่อนแล้ว นำมาสร้างเป็นกลุ่มกราฟความเข้มของนิวตรอนกับความดันบรรยากาศสำหรับเส้นละติจูดแม่เหล็กต่าง ๆ โดยห่างกันช่วงละ 10 องศา ระหว่าง $0^\circ N$ ถึง $90^\circ N$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 (20)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของนิวตรอนกับความดันบรรยากาศ สำหรับเส้นละจุดต่าง ๆ ในซีกโลกเหนือ

จากกราฟจะเห็นว่า ในช่วงความดันบรรยากาศจาก 200 ถึง 700 มิลลิบาร์ จะได้กราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับสูตรที่กล่าวตอนต้น นั่นคือ ความเข้มของนิวตรอนจะลดลงแบบเอกซโพเนนเชียลเมื่อความดันบรรยากาศเพิ่มขึ้น ในบริเวณนี้จะมีสมดุลย์เกิดขึ้นระหว่างนิวตรอนที่เกิด และนิวตรอนที่ถูกดูดกลืน (2)

3.3 การเปลี่ยนแปลงความยาวการดูดกลืนเฉลี่ยกับเส้นละติจูดแม่เหล็กโลก

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า การกระจายความเข้มของนิวตรอนในบริเวณสมตลย์ของบรรยากาศ สามารถเขียนถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$N = N_0 e^{-\mu P} = N_0 e^{-P/L} \quad (3.3)$$

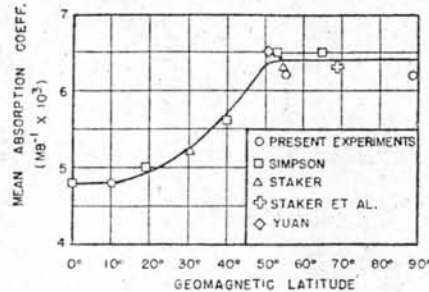
เมื่อ L เป็นความยาวการดูดกลืนเฉลี่ยในหน่วยความดัน μ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเฉลี่ยในหน่วย ส่วนกลับกับหน่วยของความดัน ค่าของ L และ μ ที่เส้นละติจูดแม่เหล็กต่าง ๆ ซึ่งได้จากการทดลอง ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 เมื่อนำค่า μ มาเขียน เป็นฟังก์ชันกับเส้นละติจูด จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะมีรูปร่างเหมือนกับกราฟความเข้มของอนุภาคปฐมภูมิมาก โดยเส้นกราฟจะหักที่เส้นละติจูดเดียวกัน แม้ว่ากราฟในรูปที่ 3.4 จะมีลักษณะหักออกมากกว่ากราฟของอนุภาคปฐมภูมิ ดังนั้นพอสรุปได้ว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเฉลี่ย (μ) จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มรวมของอนุภาคปฐมภูมิ

เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กโลกตามแนวราบ ทำให้อนุภาคปฐมภูมิที่เข้ามาบริเวณเส้นละติจูดต่ำ ๆ แถบศูนย์สูตรมีพลังงานสูงเท่านั้น จึงมีปริมาณน้อยกว่าแถบละติจูดสูง ๆ ซึ่งมีอนุภาคปฐมภูมิพลังงานต่ำอยู่มาก และอาจหวังว่าความเข้มรวมของอนุภาคปฐมภูมิจะแปรผันกับพลังงานเฉลี่ยของมัน

ขณะที่พลังงานเฉลี่ยของอนุภาคปฐมภูมิเพิ่มขึ้น จำนวนและพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคนิวคลีออนทุติยภูมิจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นคาสเคดของนิวคลีออน (nucleonic cascades) จะเชื่อมโยงลงมาลึกมากและการเกิดจุดดาว (star production) ต่อนิวคลีออนก็จะเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้น ความยาวการดูดกลืนเฉลี่ยของนิวตรอนซึ่ง เกิดจากจุดดาวเหล่านี้จะแปรผันตรงกับพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคปฐมภูมิ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเฉลี่ยก็จะแปรผันกับพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคปฐมภูมิ

ตารางที่ 3.1⁽²⁰⁾ แสดงความยาวการดูดกลืนเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเฉลี่ยกับ
เส้นละติจูดแม่เหล็กโลก

Geomagnetic latitude (λ)	Mean absorption length (L) (g/cm^2)	Mean absorption coefficient (μ) (mb^{-1})
0°	212	0.0048
10.1°	212	0.0048
19°	206	0.0050
30.4°	196	0.0052
40°	181	0.0056
51°	156	0.0065
53°	157	0.0065
54.7°	162	0.0063
55.1°	164	0.0062
65°	157	0.0065
69°	162	0.0063
88.6°	164	0.0062



รูปที่ 3.4 (20) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเฉลี่ยกับละติจูดแม่เหล็กโลก

3.4 การเปลี่ยนตำแหน่งความเข้มสูงสุดกับเส้นละติจูดแม่เหล็กโลก

จากการวัดความเข้มของนิวตรอนในบรรยากาศที่ระดับความสูงหรือความดันต่าง ๆ พบว่า ความเข้มจะเพิ่มขึ้นตามความสูง แต่จะมีตำแหน่งที่นิวตรอนมีความเข้มสูงสุด (maximum) จากนั้นความเข้มจะลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น และพบว่าตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดจะเปลี่ยนไปตามเส้นละติจูดแม่เหล็ก (4)

เมสเซล (21) (Messel) ได้ทำการคำนวณตำแหน่งที่มีจำนวนนิวคลีออนคาสเคดมากที่สุดซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานต่ำสุดของอนุภาคปฐมภูมิ เขาได้ให้ความสัมพันธ์อยู่ในรูป

$$\theta_{\max} = \alpha \ln(\beta E_{\min}) \quad (3.4)$$

เมื่อ θ_{\max} เป็นความลึกของบรรยากาศตรงตำแหน่งที่มีคาสเคดมากที่สุด

E_{\min} เป็นพลังงานต่ำสุดของอนุภาคปฐมภูมิที่ตกกระทบ α และ β เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของคาสเคดที่พิจารณา

จอห์นสัน⁽²²⁾ (Johnson) และอัลเฟอร์⁽²³⁾ (Alpher) ได้ทำการศึกษาลังงานต่ำสุดของอนุภาคปฐมภูมิชนิดต่าง ๆ ที่สามารถเข้ามาสู่บรรยากาศของโลกที่ตำแหน่งเส้นละติจูดแม่เหล็กต่าง ๆ เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งได้ความสัมพันธ์ออกมาในรูป

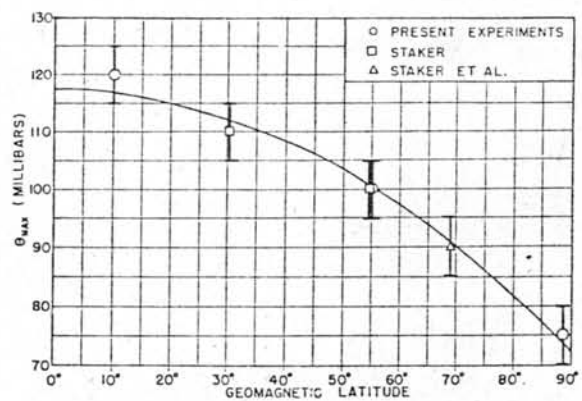
$$E_{\min} = \gamma \exp(-\delta \lambda^2) \tag{3.5}$$

เมื่อ λ เป็นเส้นละติจูดแม่เหล็ก, γ และ δ เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับชนิดของอนุภาคปฐมภูมิที่พิจารณาและยังขึ้นกับมุมตกกระทบอีกด้วย เมื่อนำ E_{\min} ใน (3.5) ไปแทนลงใน (3.4) ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของบรรยากาศตรงตำแหน่งที่มีความเสถรมากที่สุด และละติจูดแม่เหล็ก ดังนี้⁽⁴⁾

$$\theta_{\max} = C - D\lambda^2 \tag{3.6}$$

เมื่อ C และ D เป็นค่าคงที่ซึ่งหาได้จาก α, β, γ และ δ สมการนี้เป็นสมการสำหรับพาราโบลา

จากการทดลองวัดหาตำแหน่งความเข้มสูงสุดของนิวตรอนในบรรยากาศที่เส้นละติจูดต่าง ๆ พบว่าสอดคล้องกับทฤษฎี ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5⁽⁴⁾ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งความเข้มสูงสุดของนิวตรอนกับเส้นละติจูดแม่เหล็กโลก