



การชนของอนุภาคพลังงานสูงกับนิวเคลียส

(Collisions of High-Energy Particles with Nuclei)

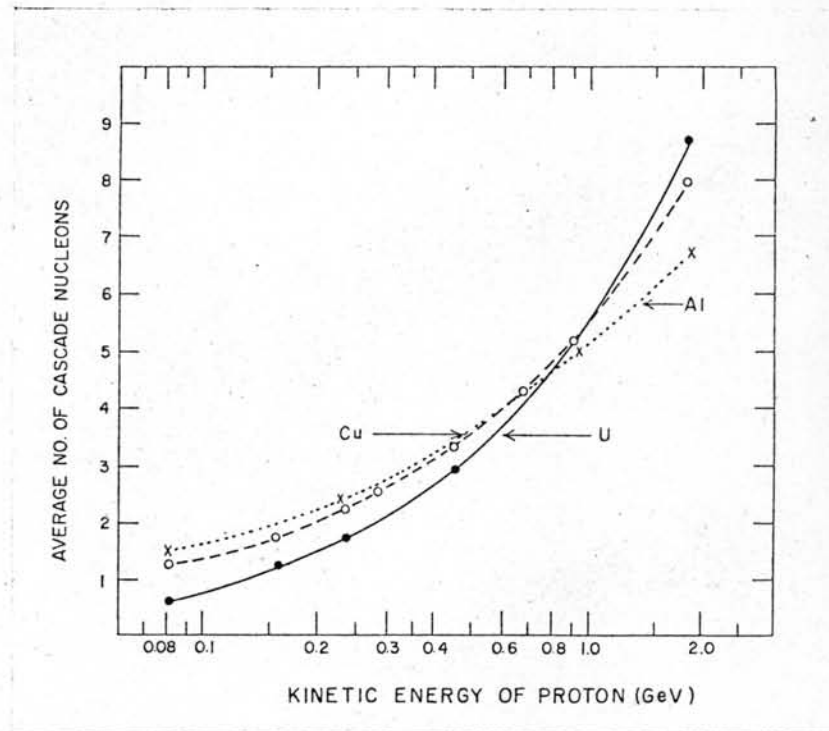
การชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูงกับนิวเคลียส อาจถือว่า เริ่มต้นด้วยการชนของอนุภาคที่วิ่งเข้ากระทก (impinging particle) กับนิวคลีออน (nucleon) ตัวใดตัวหนึ่งในนิวเคลียสก่อน จากนั้นก็ตามด้วยการชนแบบต่อเนื่องของอนุภาคที่กระเจิง (scattered particle) อนุภาคถดถอย (recoil particles) และอนุภาคที่ถูกสร้างขึ้นมา (produced particles) ถ้ามี กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ สามารถอธิบายในเทอมของนิวเคลียร์ คาสเคด (nuclear cascade) ภายในนิวเคลียส ซึ่งใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 10^{-22} วินาที หลังจากถูกชนด้วยอนุภาคตกกระทบ อนุภาคพลังงานต่ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการคาสเคดนั้น ไม่อาจไปทำให้เกิดคาสเคดต่อไปได้ แต่สามารถกระตุ้นนิวเคลียสให้อยู่ในสถานะไอโซต ซึ่งทำให้นิวเคลียสนั้นเกิดการระเหย (evaporation) ปล่อยอนุภาคพลังงานต่ำออกมา

2.1 กระบวนการนิวเคลียร์คาสเคด (Nuclear Cascade Processes)

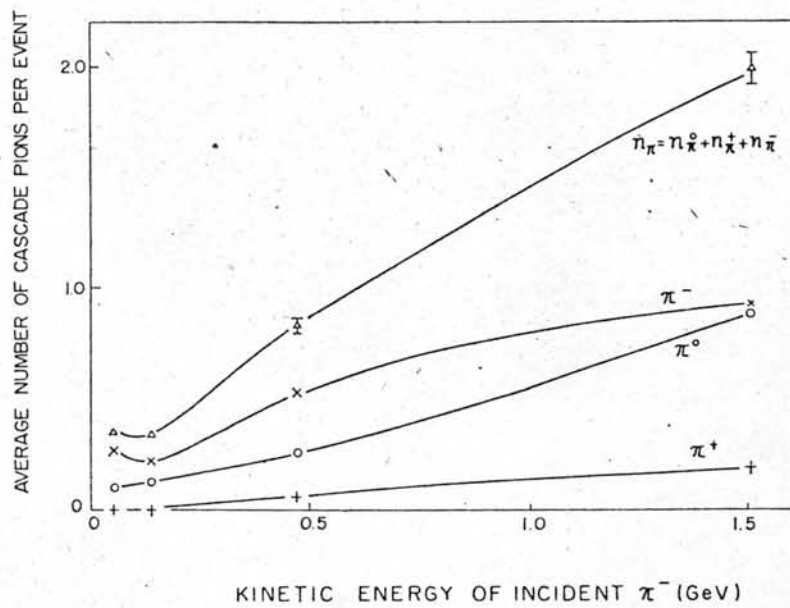
เมื่อนิวเคลียสถูกชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูงพอ ซึ่งอาจเป็นอนุภาค นิวคลีออน, พายออน, หรือโฟตอน จะทำให้เกิดกระบวนการคาสเคดขึ้นภายในนิวเคลียส อนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาจากนิวเคลียส จะมีทั้งนิวคลีออน, พายออน, และอาจมีแฟรกเมนต์ (fragment) ซึ่งหนักกว่าอนุภาคอัลฟาออกมาบ้าง อนุภาคที่ออกมาเหล่านี้เรียกว่า อนุภาคคาสเคด (cascade particles)

2.1.1 จำนวนของอนุภาคคาสเคด จำนวนเฉลี่ยของอนุภาคคาสเคดที่ออกมาจากนิวเคลียส เมื่อถูกอนุภาคที่มีพลังงานสูง รั้งเข้าชนแบบไม่ยืดหยุ่น จะเพิ่มขึ้น เมื่ออนุภาคที่รั้งเข้าชนมีพลังงานเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สำหรับนิวคลีออน ซึ่งถูกปล่อยออกมาจากนิวเคลียสของธาตุ ยูเรเนียม , ทองแดง , และอะลูมิเนียม เมื่อถูกยิงด้วยโปรตอน จะเห็นว่าที่พลังงานต่ำ จำนวนนิวคลีออนจะลดลง เมื่อขนาดของนิวเคลียสเพิ่มขึ้น แต่ที่พลังงานสูง ๆ จำนวนนิวคลีออนกลับเพิ่มขึ้นตามขนาดของนิวเคลียส

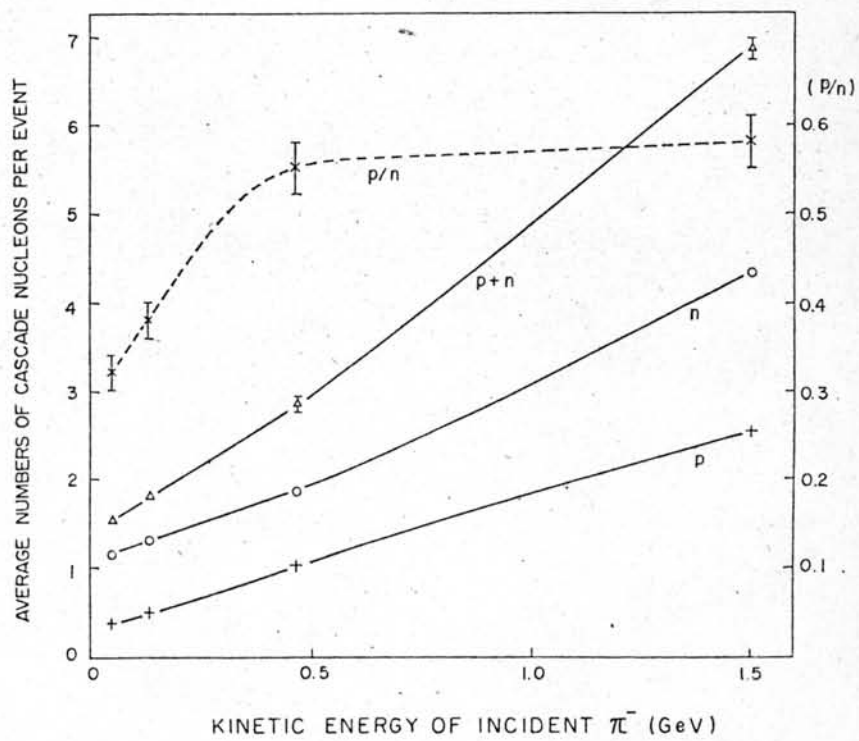
อัตราส่วนของจำนวนนิวตรอนต่อโปรตอนที่ออกมา จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของนิวเคลียส



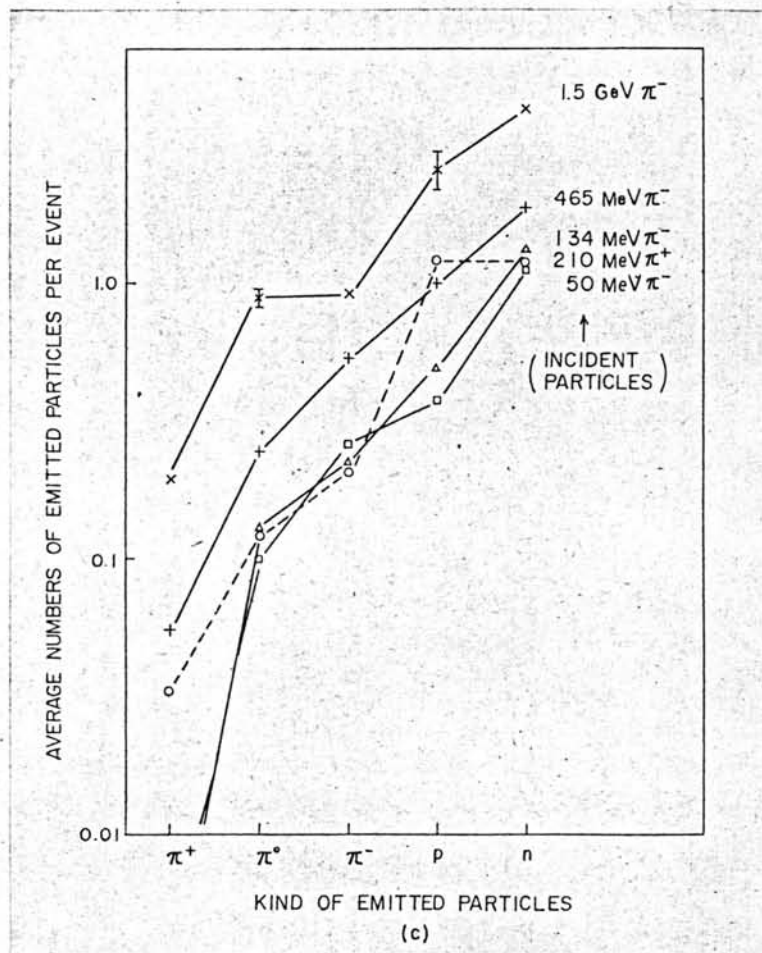
รูปที่ 2.1 (8) จำนวนเฉลี่ยของนิวคลีออนที่ออกมาจากนิวเคลียสของธาตุยูเรเนียม, ทองแดง , และอะลูมิเนียม เมื่อถูกยิงด้วยโปรตอน



(a)



(b)



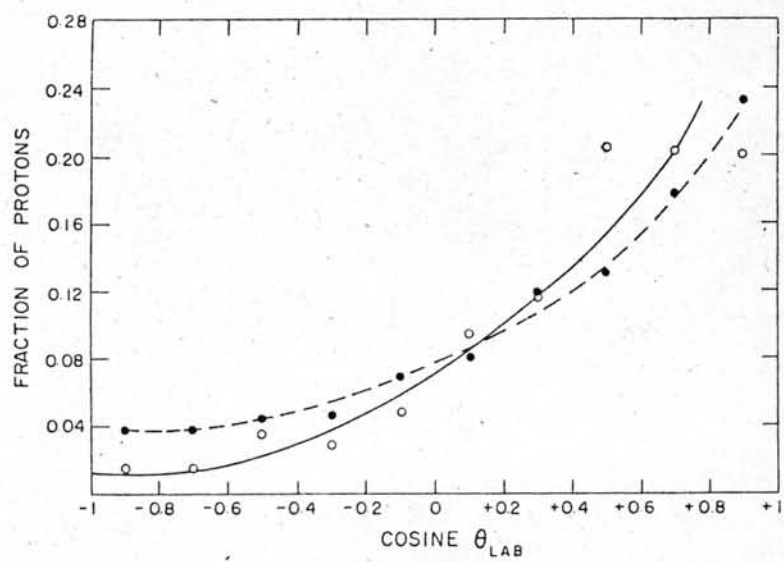
รูปที่ 2.2⁽⁹⁾ จำนวนเฉลี่ยของอนุภาคคาสเคดที่ออกมาจาก ^{100}Ru : π^+ , π^- , และ π^0 เมื่ออนุภาคตกกระทบเป็น π^- , (a) ; p และ n เมื่ออนุภาคตกกระทบเป็น π^- , (b) ; การเปรียบเทียบปริมาณของ π^+ , π^0 , π^- , p, และ n เมื่ออนุภาคตกกระทบเป็น π^+ และ π^- , (c) .

จำนวนเฉลี่ยของนิวคลีออนและพายออนที่ออกมาจากธาตุรูทีเนียม ซึ่งถูกยิงด้วยพายออนลบ (negative pions) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 พายออนบวก (positive pions) มีจำนวนน้อยกว่าอนุภาคชนิดอื่น เนื่องจากผลของคูลอมบ์ (coulomb effects) นิวคลีออนมีจำนวนมากกว่าพายออนเกิน 3 เท่า และเพิ่มจำนวนเร็วกว่าพายออนมาก ดังแสดงในรูปที่

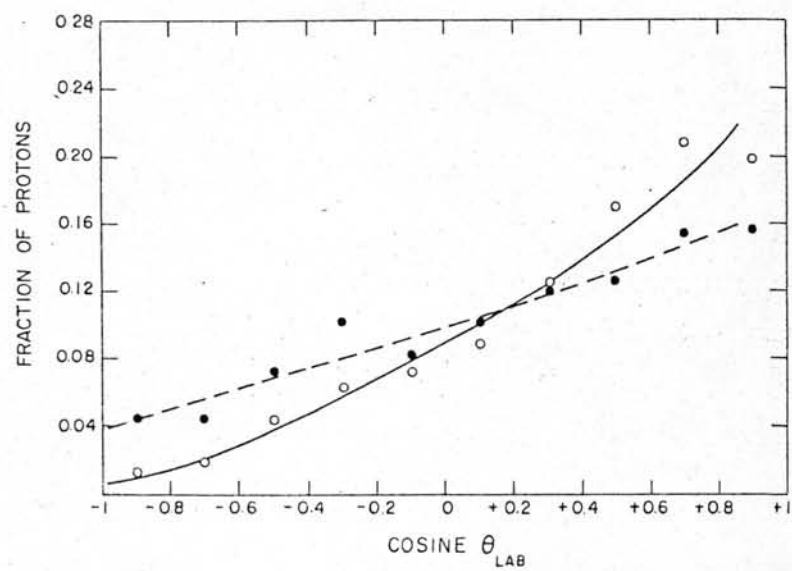
2.2 b. การเปรียบเทียบปริมาณของอนุภาคชนิดต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 c การที่พายออนมีจำนวนน้อยอาจพิจารณาได้ว่าเป็นผลเนื่องมาจากพายออนที่เกิดขึ้นได้ถูกดูดกลืนภายในนิวเคลียสอีกครั้งหนึ่ง

2.1.2 การกระจายเชิงมุม การกระจายเชิงมุมของอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมา จะขึ้นกับพลังงานของตัวอนุภาคเองมากกว่าที่จะขึ้นกับพลังงานของอนุภาคที่วิ่งเข้าชนนิวเคลียส เมื่ออนุภาคที่ออกมามีพลังงานสูงขึ้น มันจะมีทิศทางไปข้างหน้า (forward direction) มากขึ้น นอกจากนี้ยังขึ้นกับขนาดของนิวเคลียสที่ใช้เป็นเป้าบ้างเล็กน้อย คุณสมบัติต่าง ๆ ของการกระจายเชิงมุมของอนุภาคที่ออกมาจากนิวเคลียสเนื่องจากกระบวนการคาสเคดที่กล่าวมานี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นการกระจายเชิงมุมของโปรตอน ที่มีพลังงานระหว่าง 30 ถึง 90 MeV และที่เกิน 90 MeV โดยมีอะลูมิเนียมและยูเรเนียมเป็นเป้า

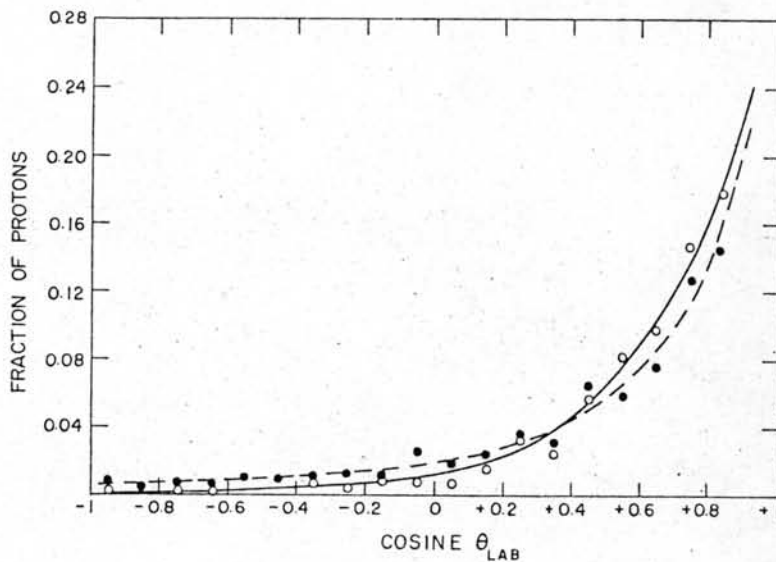
พายออนที่ถูกปล่อยออกมาจะมีความสมมาตร (isotropic) มากกว่านิวคลีออน โดยเหตุที่ ค่าทวีคูณของการชน (multiplicity of collisions) เพิ่มขึ้นในขณะที่นิวเคลียสของเป้าหนักขึ้น จึงทำให้การกระจายเชิงมุมมีความสมมาตรมากขึ้นเมื่อมวลของเป้าเพิ่มขึ้น ลักษณะการกระจายไปด้านหน้า (forward peak) สำหรับอนุภาคตกกระทบที่มีพลังงานสูงนั้น เป็นผลเนื่องมาจากพายออนที่เกิดมาจากการชนครั้งแรกได้ถูกรวมทิศทาง (collimated) ให้มีทิศทางไปด้านหน้า ลักษณะเหล่านี้สามารถเห็นได้จากรูปที่ 2.4



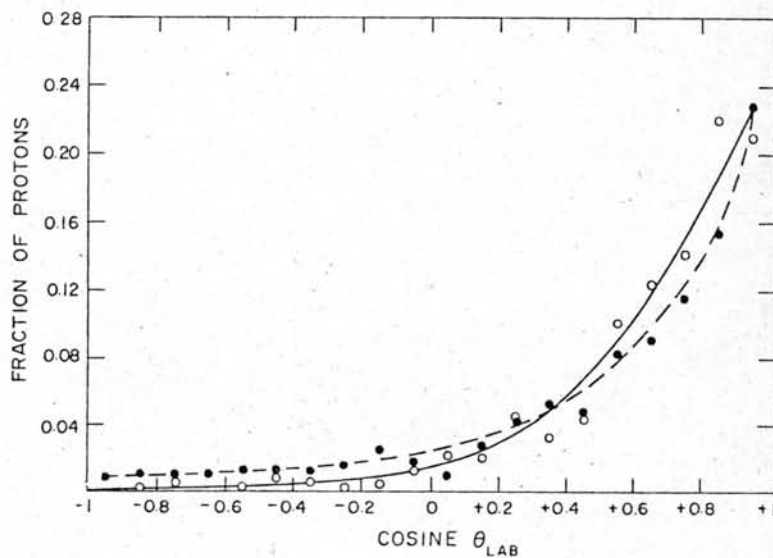
(a)



(b)



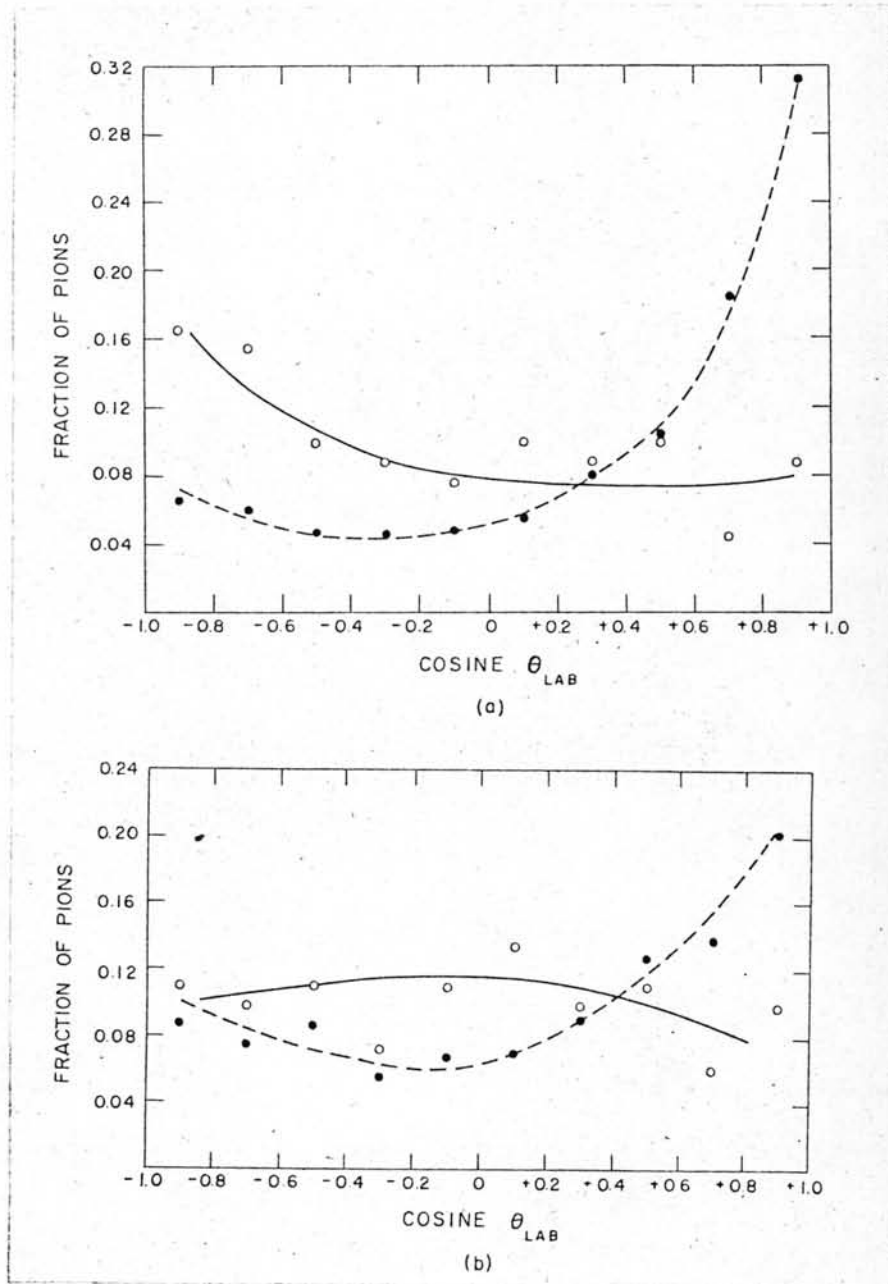
(c)



(d)

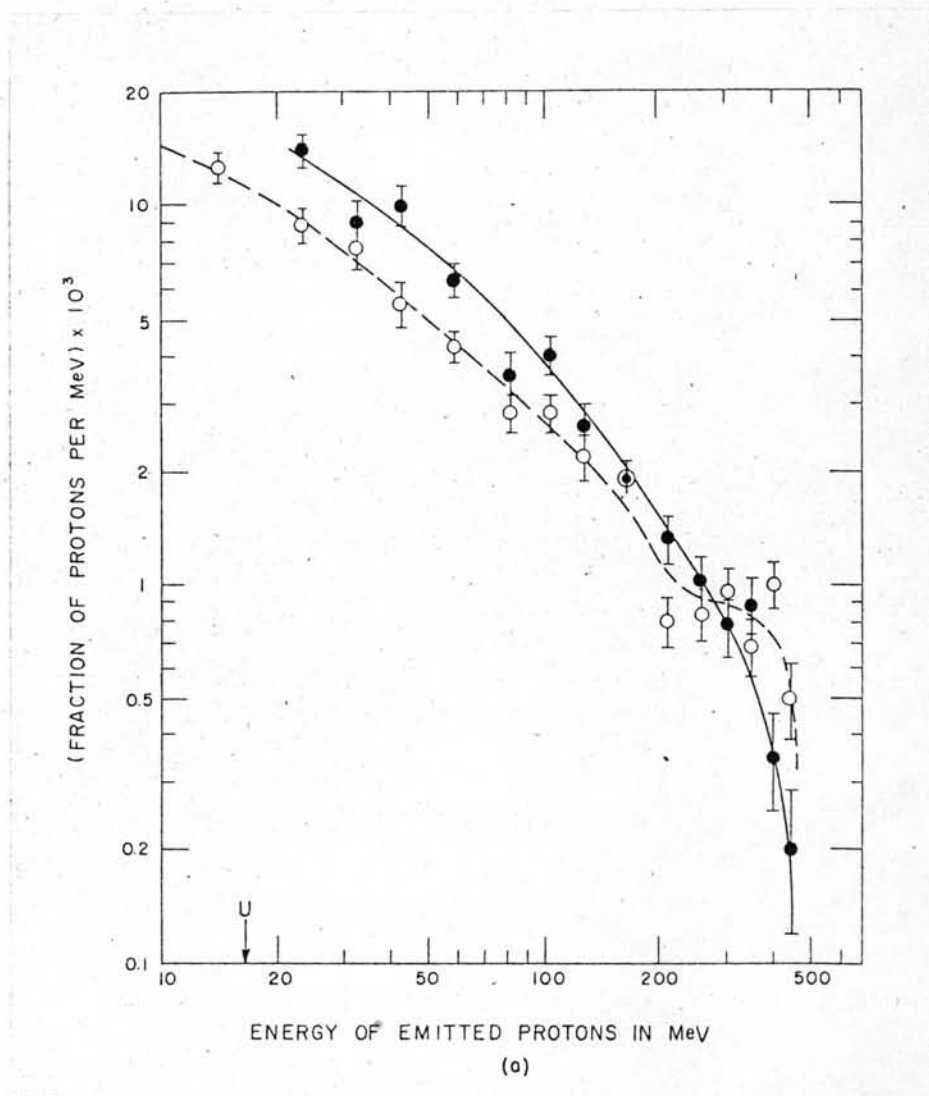
รูปที่ 2.3⁽¹⁰⁾

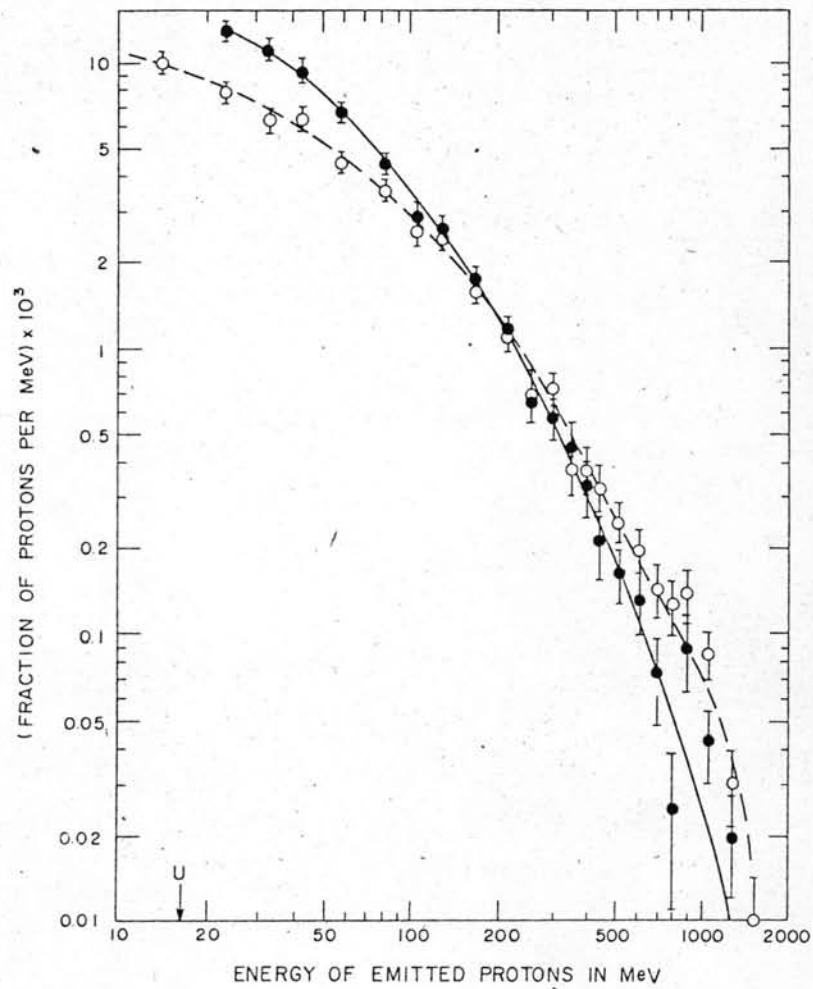
การกระจายเชิงมุมของโปรตอน จากปฏิกิริยาซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดย
 โปรตอนที่มีพลังงานจลน์ 460 MeV (—○—) และ 1840 MeV (---●---)
 พลังงานจลน์ของโปรตอนที่ออกมาและเป้า : 30 ถึง 90 MeV,
 อะลูมิเนียม, (a); 30 ถึง 90 MeV, ยูเรเนียม, (b);
 >90 MeV, อะลูมิเนียม, (c); > 90 MeV, ยูเรเนียม, (d).



รูปที่ 2.4 (11) การกระจายเชิงมุมของพายออน (ทุกประจุและทุกพลังงาน) ที่ออกมาจากอันตรกิริยาซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยโปรตอนที่มีพลังงานจลน์ 460 MeV (—○—) และ 1840 MeV (---●---) สำหรับเป้าอะลูมิเนียม, (a); สำหรับเป้ายูเรเนียม, (b).

2.1.3 การกระจายพลังงาน สเปกตรัมของพลังงาน (energy spectrum) ของนิวคลีออนที่ถูกปล่อยออกมา จะขึ้นกับพลังงานตกกระทบ (incident energy) และ นิวเคลียสของเป้าเล็กน้อย เมื่อพลังงานตกกระทบสูงขึ้นจะมีผลทำให้สเปกตรัมยืดขยายออกไปทางด้านพลังงานสูง จะเห็นได้ว่า สเปกตรัมของอนุภาคที่ออกมาจากนิวเคลียสที่หนักกว่า จะมีความชันมากกว่า เมื่อพลังงานตกกระทบเท่ากัน สเปกตรัมของโปรตอนได้ แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 เมื่ออนุภาคตกกระทบเป็นโปรตอน





(b)

รูปที่ 2.5⁽¹²⁾

สเปกตรัมพลังงานของโปรตอน ที่ถูกปล่อยออกมาจากอะลูมิเนียม

($\text{---}\circ\text{---}$) และยูเรเนียม ($\text{---}\bullet\text{---}$) เครื่องหมายลูกศรใต้อักษร U

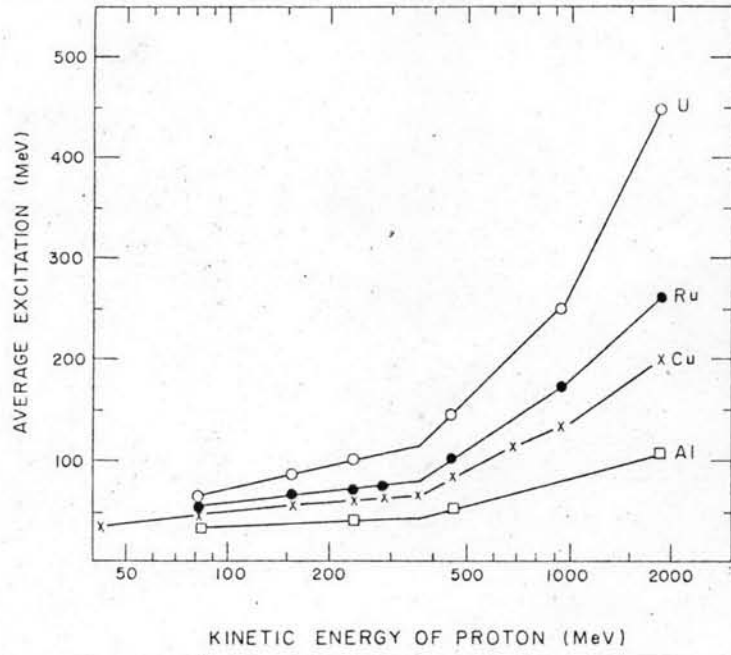
บ่งถึงพลังงานจลน์ต่ำสุดของโปรตอน ที่สามารถออกมาจากนิวเคลียส
ของธาตุนั้นๆ พลังงานจลน์ของโปรตอนที่ตกกระทบ :

460 MeV, (a) ; 1840 MeV, (b).

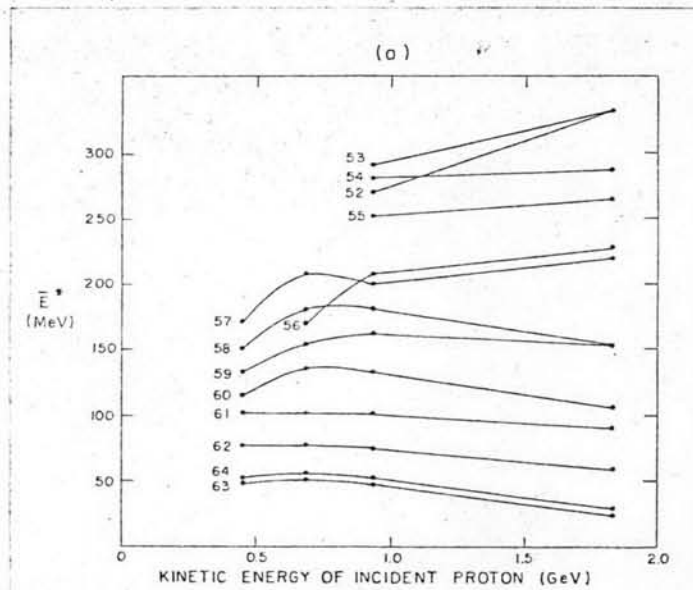
2.1.4 พลังงานโลด พลังงานที่เหลืออยู่ภายหลังจากการปล่อยอนุภาคคาสเคดถือว่าเป็นพลังงานโลด (excitation energy) ในนิวเคลียสที่เหลือ (residual nucleus) พลังงานโลดขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบและเลขมวล (mass number) ของนิวเคลียสที่เป็นเป้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จากรูปจะเห็นว่า พลังงานโลดจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของเป้าเพิ่มขึ้น และจะขึ้นกับพลังงานของอนุภาคตกกระทบน้อยมาก ในช่วงพลังงานต่ำ ๆ จนถึง 350 MeV แต่พอสูงกว่า 350 MeV ขึ้นไป พลังงานโลดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีพายออนเกิดขึ้น โดยที่พลังงานตกกระทบจะถูกแบ่งไปกับนิวคลีออนถดถอยและพายออนซึ่งอาจถูกดูดกลืนอีกครั้งหนึ่งภายในนิวเคลียส ส่วนพลังงานโลดที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อสูงกว่า 1 GeV นั้นเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดพายออนคู่ (double-pion production) ซึ่งสำคัญในช่วงพลังงานนี้

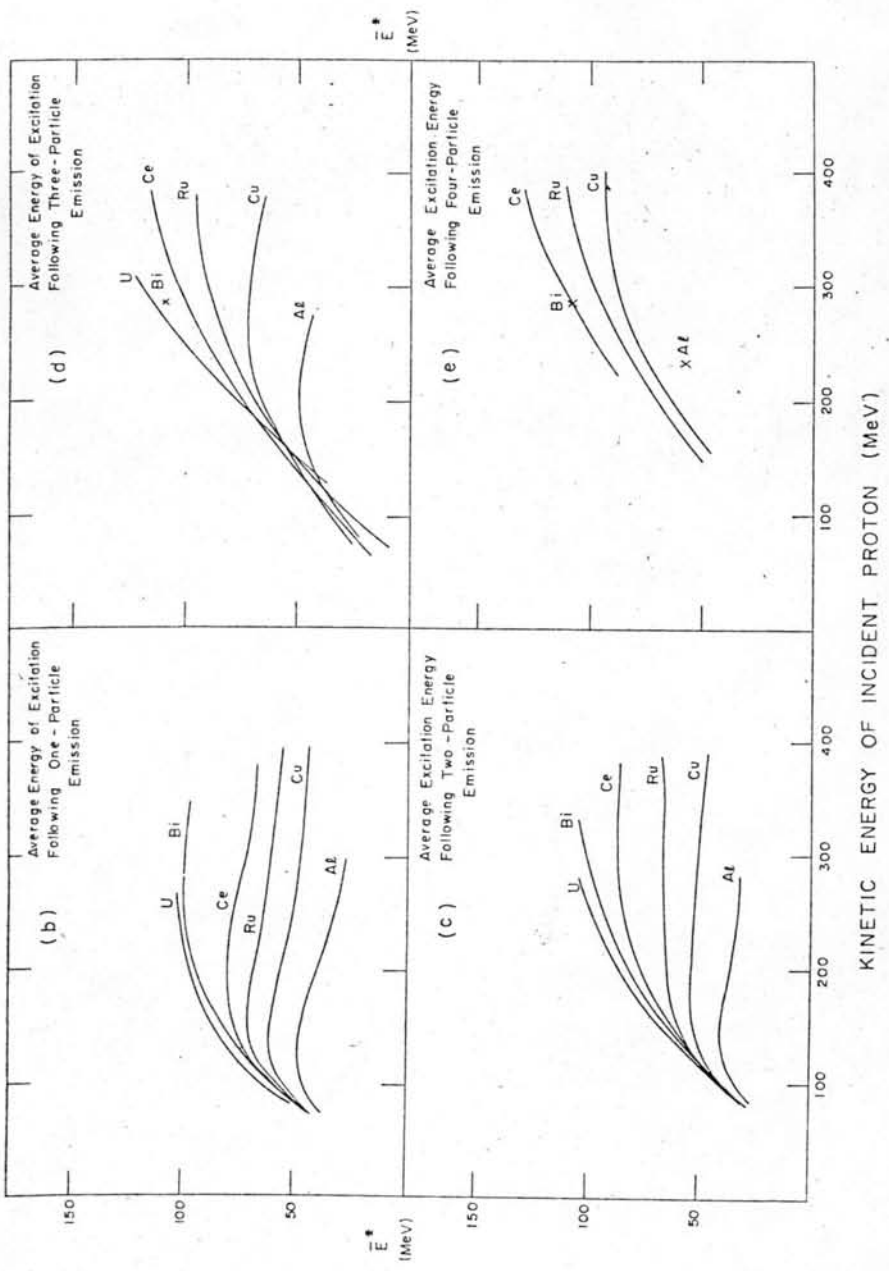
พลังงานโลดเฉลี่ยยังขึ้นกับจำนวนอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยมีทองแดงเป็นเป้า โดยทั่วไปแล้วจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนนิวคลีออนที่ออกมา ถ้ากำหนดจำนวนนิวคลีออนให้คงที่ พลังงานโลดจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานตกกระทบจนถึงจุดสูงสุดซึ่งค่อนข้างจะกว้าง (broad maximum) จากนั้นก็จะลดลงอย่างช้า ๆ และพลังงานตกกระทบที่ทำให้พลังงานโลดมีค่าสูงสุดก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของอนุภาคคาสเคด

004892



รูปที่ 2.6 (13) พลังงานไอตเฉลี่ยในนิวเคลียสที่เหลือ จากอันตรกิริยา ซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยโปรตอน





รูปที่ 2.7 (14) พลังงานนิวเคลียสเฉลี่ยภายหลังการปล่อยนิวคลีออน พลังงานนิวเคลียสเฉลี่ยในนิวเคลียสที่เหลือภายหลังจากการยิง ^{64}Cu ด้วยโปรตอน ดังแสดงในรูป (a); ตัวเลขบนเส้นกราฟแทนเลขมวลของนิวเคลียสที่เหลือ พลังงานนิวเคลียสเฉลี่ยหลังจากการปล่อยอนุภาคหนึ่งตัว, สองตัว, สามตัว, สี่ตัว แสดงในรูป (b) ถึง (e), ตามลำดับ

2.2 กระบวนการระเหย (Evaporation Process)

พลังงานโตน ที่เหลืออยู่หลังจากเกิดกระบวนการคาสเคด จะถูกแบ่งปันกันระหว่าง นิวคลีออนมากมาย จนกระทั่งสามารถกล่าวได้ว่านิวเคลียสขณะนั้นเป็นเช่นระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic system) โอกาสต่อหนึ่งหน่วยเวลาสำหรับการปล่อยอนุภาคออกมา ด้วยพลังงานจลน์ระหว่าง E และ $E + dE$ ถูกกำหนดโดย

$$P(E) dE = g_j \frac{m_j}{\pi^2 \hbar^3} \sigma E \frac{\rho_f}{\rho_i} dE, \quad (2.1)$$

เมื่อ g_j และ m_j เป็น spin weight และมวลของอนุภาค j , ตามลำดับสมการ (2.1) ได้มาโดยอาศัยหลัก detailed balance ระหว่าง ปฏิริยาการปล่อยและการจับอนุภาค j



ใน (2.1) σ เป็นครอสเซกชันของการจับ (capture cross section) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นระดับ (level density) ของนิวเคลียสแรกเริ่ม, ρ_i ในขณะที่อัตราการปล่อยอนุภาคเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นระดับของนิวเคลียสสุดท้าย, ρ_f

โดยที่เราสนใจเฉพาะโอกาสของการปล่อยอนุภาค ผลลัพธ์สุดท้ายจึงไม่ขึ้นกับครอสเซกชันของการจับมากนัก แต่ส่วนใหญ่จะขึ้นกับความหนาแน่นของสถานะสุดท้าย (final state density) ความหนาแน่นระดับสามารถหาได้จาก

$$\rho(E_x) = C \exp \left[2(aE_x)^{1/2} \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ E_x เป็นพลังงานกระตุ้นของนิวเคลียสนั้น พลังงานกระตุ้นจะลดลงหลังจากการปล่อยอนุภาคมีพลังงาน E_j โดย

$$E_{x,i} - E_{x,f} = E_j + Q_j,$$

เมื่อ Q_j เป็นพลังงานในการแยกออก (separation energy) ของอนุภาค พลังงานสูงสุดของอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาจะเป็น $E_{x,i} - Q_j$ สำหรับนิวตรอน และเป็น $E_{x,i} - Q_j - V_j$ สำหรับอนุภาคที่มีประจุ เนื่องจากอิทธิพลของกำแพงคูลอมบ์ (Coulomb barrier) V_j ค่ายังผลของกำแพงคูลอมบ์ (effective coulomb barrier) จะต่ำกว่าค่าตามแบบฉบับ (classical value) เนื่องจากอนุภาคสามารถทะลุผ่านกำแพงคูลอมบ์ได้ a ใน (2.2) เป็นพารามิเตอร์ของความหนาแน่นระดับ (level-density parameter) ซึ่งอาจเลือกให้มีความเป็น

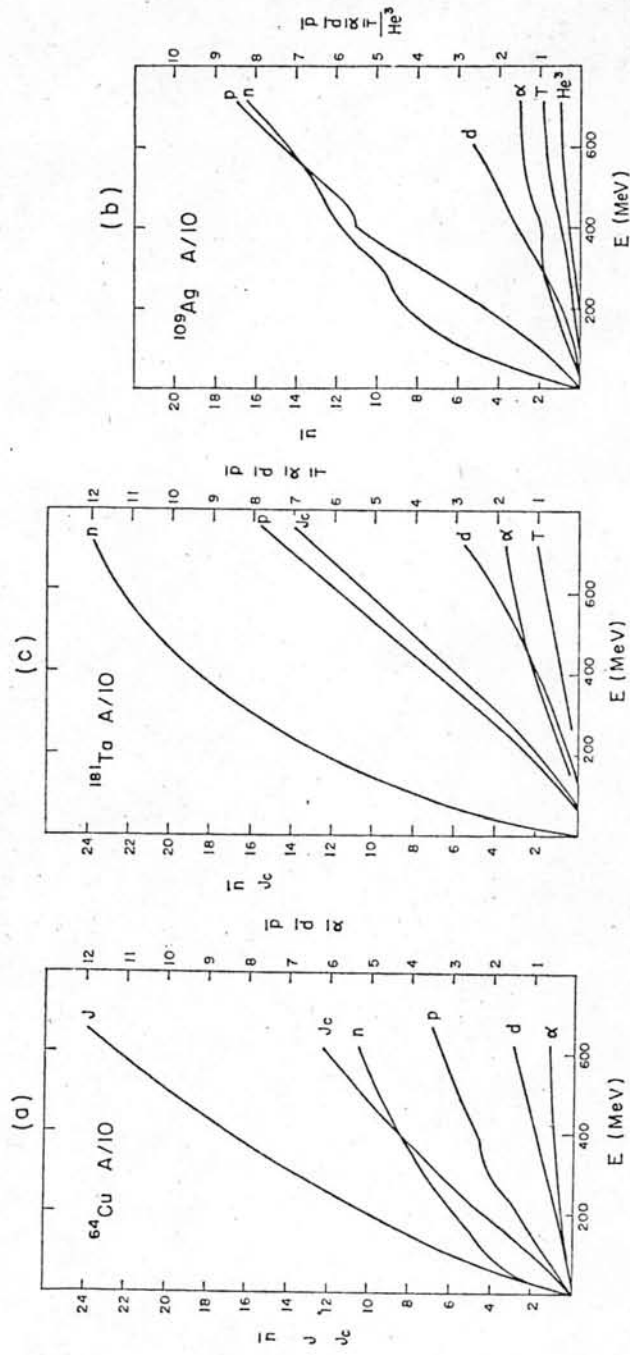
$$a = \frac{A}{10} \text{ MeV}^{-1} \quad \text{หรือ} \quad \frac{A}{20} \text{ MeV}^{-1} \quad (2.3)$$

อุณหภูมิของนิวเคลียส (nuclear temperature) ถูกกำหนดโดย

$$T = \left(\frac{E_x}{a} \right)^{1/2}$$

2.2.1 จำนวนเฉลี่ยของอนุภาคที่ระเหยออกมา อนุภาคที่ออกมาจากนิวเคลียส เนื่องจากกระบวนการระเหย มีมากมายหลายชนิด เช่น โปรตอน, นิวตรอน, ดิวทีรอน, ทริตอน, และอนุภาคอัลฟา เป็นต้น

จำนวนเฉลี่ยของอนุภาคชนิดต่าง ๆ ที่ระเหยออกมาจาก ^{64}Cu , ^{109}Ag ^{181}Ta ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าจำนวนอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานโลดแรกเริ่ม (initial excitation energy) จำนวนนิวตรอนที่ออกมาจะมีมากกว่าครึ่งหนึ่งของอนุภาคที่ออกมาทั้งหมด และในจำนวนอนุภาคที่มีประจุ จะมีโปรตอนประมาณครึ่งหนึ่ง ส่วนอนุภาคหนักตั้งแต่ดิวทีรอนขึ้นไปมีน้อยมาก และอัตราการเพิ่มจำนวนก็มีน้อยมากเมื่อเทียบกับนิวตรอน ในขณะที่มวลของเป้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนนิวตรอนซึ่งมีมากกว่าในนิวเคลียสของเป้า และเพราะว่าการปล่อยอนุภาคที่มีประจุจะถูกกีดกันโดยกำแพงคูลอมบ์ที่สูง การปล่อยนิวตรอนยังคงมีมากแม้ว่าพลังงานโลด จะลดต่ำลงมา



รูปที่ 2.8 (15)

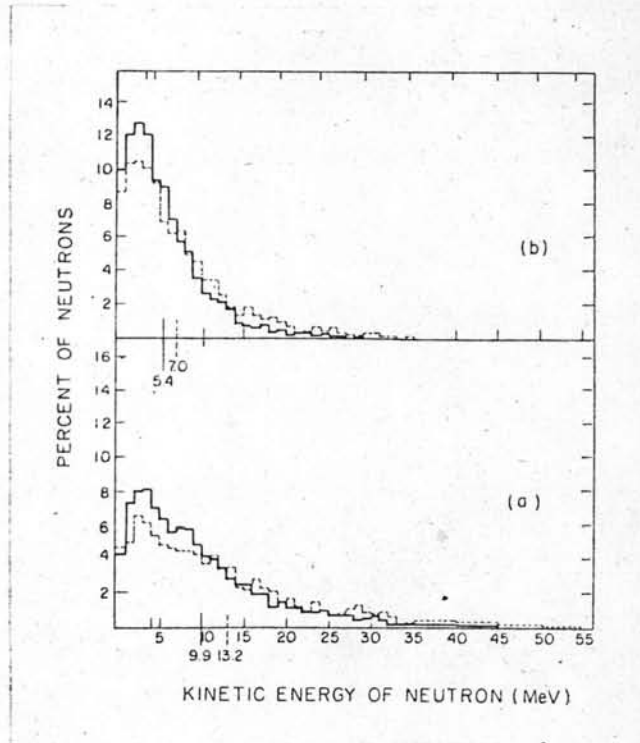
จำนวนเฉลี่ยของอนุภาคชนิดต่าง ๆ ที่ระเหยออกมาจากนิวเคลียส ชนิดของอนุภาคแสดงไว้บนเส้นกราฟ , J_C เป็นจำนวนอนุภาคที่มีประจุ J เป็นจำนวนของอนุภาคทั้งหมด ; $a = A/10$ แกนนอน : เป็นพลังงานนิวเคลียส ในหน่วย MeV; แกนตั้ง : เป็นจำนวนอนุภาคที่ระเหยออกมา นิวเคลียสที่เป็นเป้า : ^{64}Cu , (a) ; ^{109}Ag , (b) ; ^{181}Ta , (c) .

2.2.2 สเปกตรัมพลังงานของอนุภาคที่ระเหยออกมา อนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาจาก นิวเคลียสเนื่องจากกระบวนการระเหย จะมีสเปกตรัมของพลังงานอยู่ในรูป

$$S(E) dE \propto E \exp(-E/T) dE,$$

ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ T โดยเหตุที่อุณหภูมิลดลงเนื่องจากการระเหยของนิวเคลียส ดังนั้นค่าสูงสุดจึงคาดว่าควรจะปรากฏใกล้ ๆ อุณหภูมิเฉลี่ย \bar{T} ซึ่งมีค่าไม่กี่ MeV ในรูปที่ 2.9 เป็นสเปกตรัมของนิวตรอน จะเห็นว่าลักษณะของสเปกตรัมขึ้นกับพลังงานกระตุ้นแรกเริ่ม ซึ่งจะปรากฏให้เห็นชัดเจนส่วนหางของสเปกตรัมที่มีพลังงานสูง

สำหรับอนุภาคที่มีประจุ ส่วนพลังงานต่ำ ๆ ของสเปกตรัมจะถูกตัดไปเนื่องจากผลของคูลอมบ์ แบเรียร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 โดยเหตุที่อนุภาคคาสเคด ซึ่งถูกปล่อยออกมาจากนิวเคลียสมีพลังงานต่ำถึง 20 MeV ดังนั้นกระบวนการระเหยส่วนใหญ่แล้วจะปล่อยอนุภาคออกมามีพลังงานต่ำกว่า 20 MeV ซึ่งจากรูปที่แสดงจะเห็นว่าอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาด้วยพลังงานมากกว่า 30 MeV มีจำนวนน้อยมาก

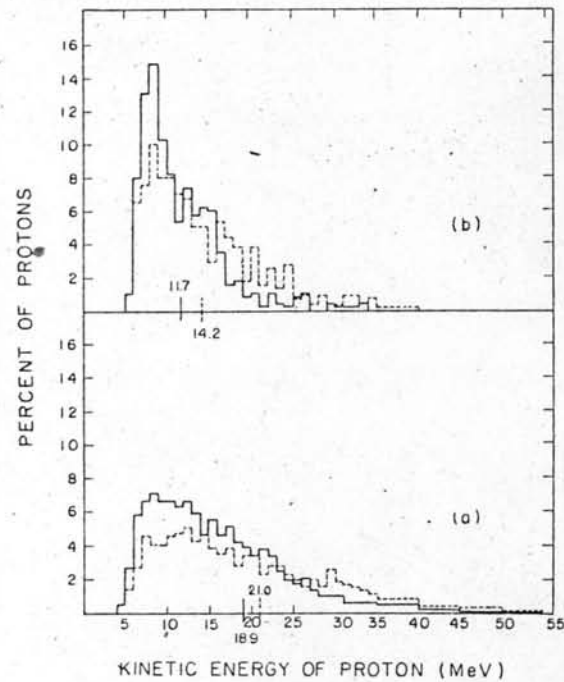


รูปที่ 2.9⁽¹⁶⁾

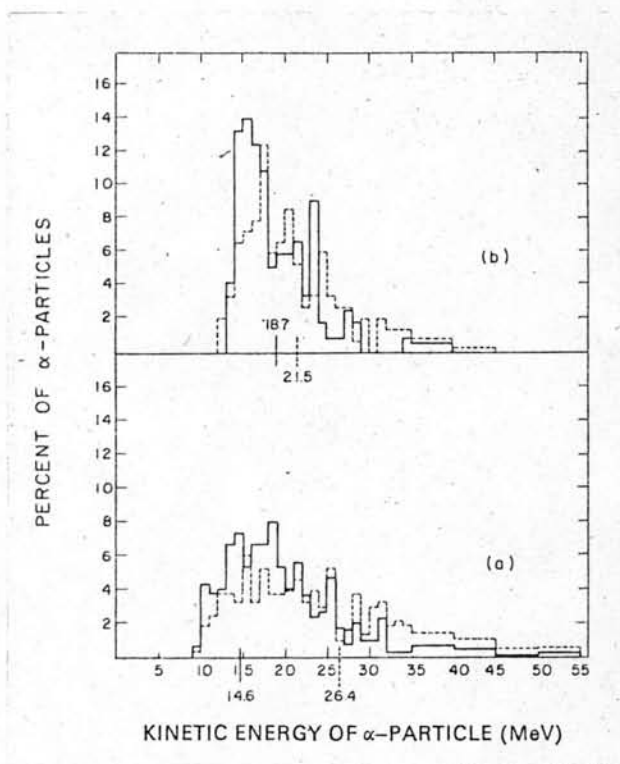
สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนที่ระเหยออกมาจาก ^{109}Ag :

เส้นประ , $a = A/20$; เส้นทึบ , $a = A/10$

พลังงานโคด แรกเริ่ม : 700 MeV, (a); 200 MeV, (b).



รูปที่ 2.10⁽¹⁷⁾ สเปกตรัมพลังงานของโปรตอนที่ระเหยออกมาจาก ^{109}Ag :
 เส้นประ , $a = A/20$; เส้นทึบ , $a = A/10$,
 พลังงานโคต แรกเริ่ม : 700 MeV, (a) ; 200 MeV, (b).



รูปที่ 2.11⁽¹⁸⁾

สเปกตรัมพลังงานของอนุภาคอัลฟาที่ระเหยออกมาจาก ^{109}Ag :

เส้นประ , $a = A/20$; เส้นทึบ , $a = A/10$.

พลังงานไอศ แรกเริ่ม : 700 MeV, (a) ; 200 MeV, (b).