



การจำลองแบบการกำบังรังสีแกมมาโดยวิธีมอนติคาร์โล

ปวีรรต เสียงสนั่น วันชัย ธรรมวานิช และ สมพร จองคำ

กองฟิสิกส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ โทรศัพท์ 5614080 โทรสาร 5613013

บทคัดย่อ

ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมจำลองแบบการกำบังรังสีแกมมาด้วยหลักการง่าย ๆ และไม่ซับซ้อนโดยอาศัยวิธีการคำนวณแบบมอนติคาร์โล และเพิ่มค่าภาคตัดขวางของการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาจากโปรแกรม MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code System) และได้เปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองจริง โดยการใช้นกัมเนตรังสีแกมมา ^{241}Am พลังงาน 60 keV และใช้อลูมิเนียมเป็นเครื่องกำบังรังสี และเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณแบบ deterministic ได้ผลเป็นที่ใกล้เคียงกันเป็นที่น่าเชื่อถือ

The Monte Carlo Simulation of Gamma Ray Shieldings

Pariwat Siangsanon, Wanchai Dharmavanij and Somporn Chongkum

Physics Division, Office of Atomic Energy for Peace, Tel. 5614080 Fax. 5613013

ABSTRACT

The gamma-ray shielding simulation computer program, using the fundamental concept of the Monte Carlo procedure, was developed. The calculation is accomplished by virtue of the cross section file from MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code System). The comparison among the calculations of this program, the experiment and the deterministic method was made by applying 60 keV gamma source from ^{241}Am and aluminum as shieldings. The result showed good consistency among these methods.

1. บทนำ

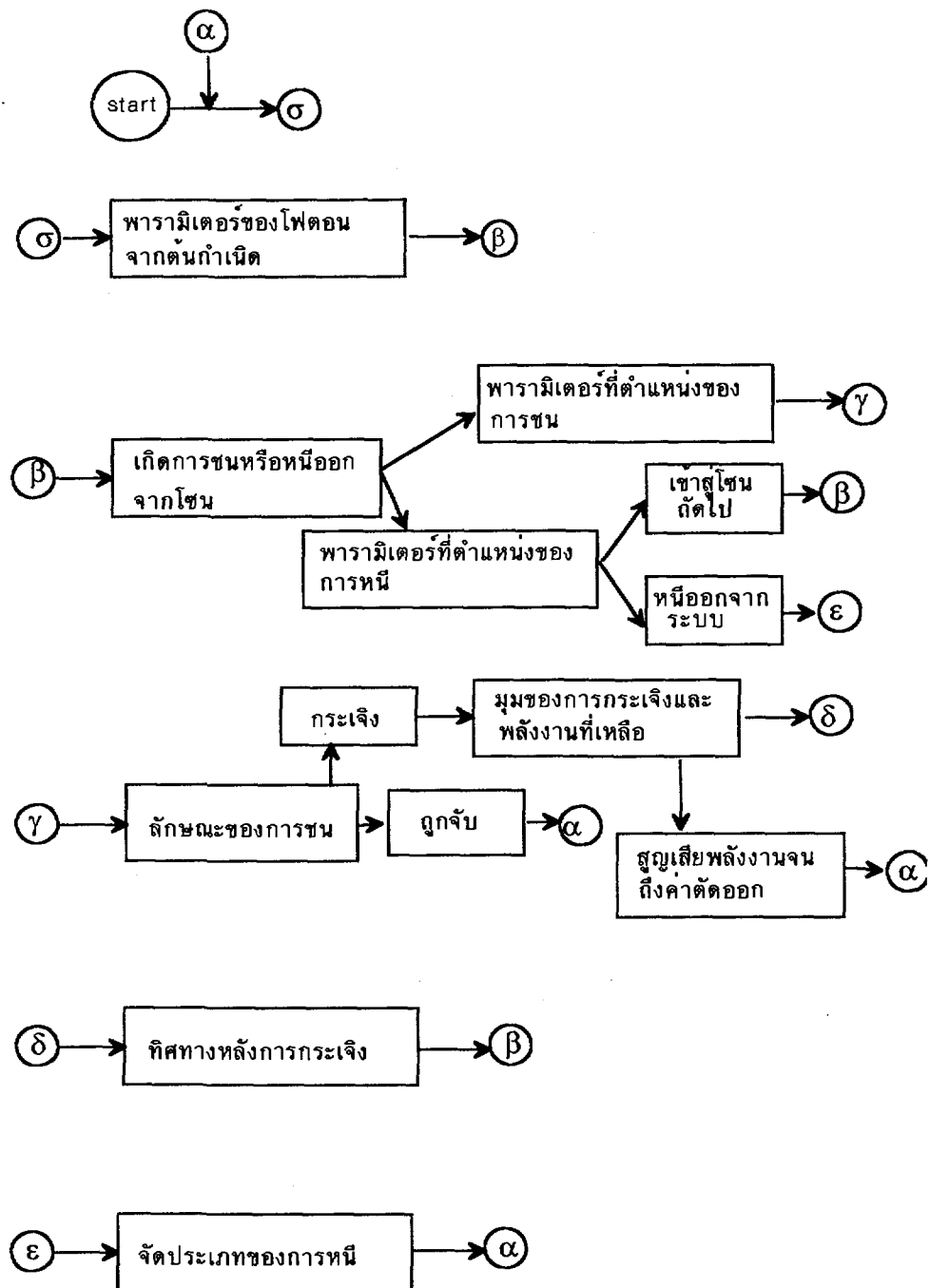
วิธีการคำนวณแบบมอนติคาร์โลมีผู้ใช้อย่างกว้างขวางในแทบทุกสาขา และในงานคำนวณทางฟิสิกส์ก็เป็นที่นิยมใช้กันมาก เช่น ในสาขาฟิสิกส์สถิติ ฟิสิกส์นิวเคลียร์ เป็นต้น ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติทั้งหลายมักจะเกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็นเสมอ เช่น การทอดลูกเต๋ามักจะมีคำถามเกิดขึ้นว่าจะมีโอกาสที่จะปรากฏหน้าต่าง ๆ เท่าไร เนื่องจากลูกเต๋ามีหกหน้าดังนั้น โอกาสที่จะปรากฏหน้าใด ๆ จึงเท่ากับหนึ่งในหก หรือในการโยนหัวก้อยก็จะมีโอกาสเท่ากับหนึ่งในสองที่จะปรากฏหัวหรือก้อย ถ้าหากสามารถรู้ผลลัพธ์ทั้งหมดที่เป็นไปได้ก็สามารถหาความน่าจะเป็นที่จะเกิดผลลัพธ์ในแต่ละอย่างได้

การส่งผ่านอนุภาค (particle transport) ก็เช่นเดียวกัน ถ้าหากรู้อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับตัวกลางที่มันวิ่งผ่าน ไปทั้งหมด ก็จะสามารถคำนวณทางเดิน (path or track) ของอนุภาคได้ ซึ่งทำให้รู้ถึงความเป็นไป (history) ของอนุภาคแต่ละตัว และสามารถสกัดข้อมูลจากมันเพื่อหาปริมาณทางฟิสิกส์ที่ต้องการ

2. วัตถุประสงค์และวิธีการ

ปัญหาที่ต้องการศึกษาคือการส่งผ่านรังสีแกมมาในตัวกลางชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นการศึกษาแบบพื้นฐานง่าย ๆ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาการคำนวณระบบที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น โดยมีการตรวจสอบเทียบเคียงกับโปรแกรม MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code) ที่พัฒนาขึ้นโดย Oak Ridge National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา กับการคำนวณแบบกำหนดค่าได้ (deterministic calculation) และจากการทดลองจริง

ได้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Monte Carlo Photon Simulation (MCPS) โดยใช้ภาษา C++ เพื่อใช้คำนวณในงานนี้ ผังงานการคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 1



*รูปที่ 1 ฟังงานแสดงการคำนวณโดย MCPS

* จาก Cashwell, E.D. and C.J. Everett. 1959. Monte Carlo Method for Random Walk Problems. Pergamon Press, London. หน้า 2

2.1 ปัญหา

ปัญหาที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบเทียบเคียงคือ การคำนวณหาค่า I/I_0

จาก

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

โดย I_0 คือ ความเข้มของรังสีแกมมาก่อนผ่านตัวกลาง

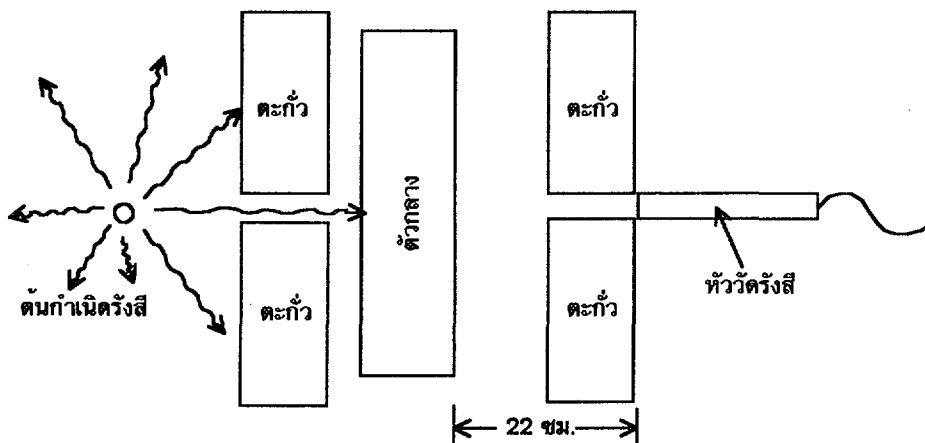
I คือ ความเข้มของรังสีแกมมาหลังจากผ่านตัวกลาง

μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น

และ x คือ ความหนาของตัวกลาง

2.2 เรขาคณิตของระบบ

รูปทรงของระบบที่ใช้คำนวณและทดลองดังแสดงในรูปที่ 2



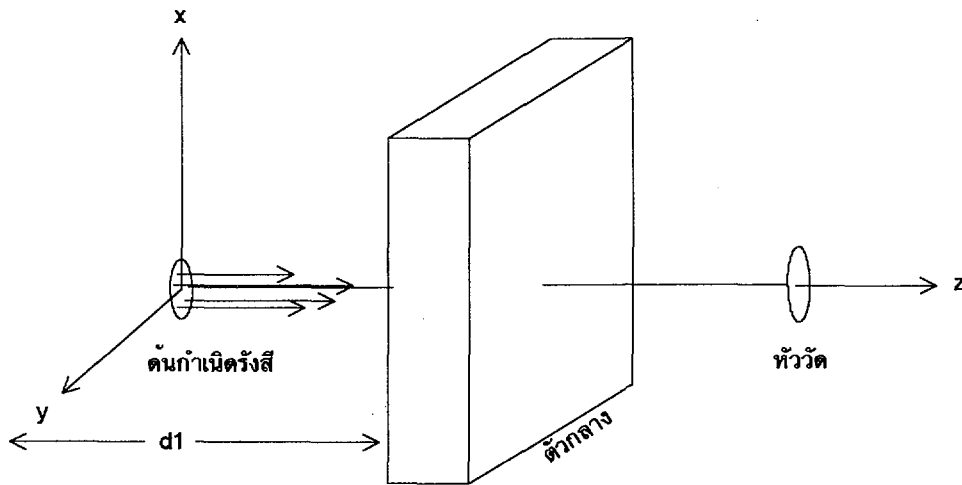
รูปที่ 2 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัด

2.3 ขั้นตอนวิธีการคำนวณ

สิ่งสำคัญที่สุดคือจะต้องรู้อันตรกิริยาทั้งหมดระหว่างรังสีแกมมากับตัวกลาง ซึ่งหาได้จาก ENDF (Evaluated Nuclear Data File) ซึ่งมีหลายรูปแบบให้เลือก สำหรับงานนี้ได้เลือกห้องสมุดข้อมูลของโปรแกรม MCNP ที่ได้แปลงจาก ENDF อีกทอดหนึ่ง

2.3.1 พารามิเตอร์ของต้นกำเนิดรังสีแกมมา

กำหนดให้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาเป็นลำทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 ซม. มีทิศทางในแนวแกน +z ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3

ดังนั้นตัวแปรของรังสีแกมมาที่กำหนดมีดังนี้

E คือ พลังงาน (MeV) กำหนดโดยผู้ทดลอง

x, y, z คือ พิกัดตำแหน่ง (cm)

u, v, w คือ ไดรেকชันโคซายน์

ที่จุดเริ่มต้นให้ $z=d_1$ ส่วน x และ y สุ่มเอาจากตัวเลขสุ่ม r ($0 < r \leq 1$) ดังนี้

$$x = 0.5r - 0.25 \quad (2)$$

$$y = \sqrt{0.25^2 - x^2} \quad (3)$$

$$u = 0$$

$$v = 0$$

$$w = 1.0$$

2.3.2 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับตัวกลาง

อันตรกิริยาสำคัญที่นำมาใช้คำนวณในงานนี้คือ

2.3.2.1 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่โฟตอนถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนในอะตอมของตัวกลาง อันตรกิริยานี้ถือว่าการดูดกลืน เนื่องจากโฟตอนจะหายไปที่จุดเกิดเหตุ และถ้าหากมีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นจากอันตรกิริยานี้จะถือว่าอิเล็กตรอนนี้ถูกดูดกลืนที่จุดเกิดเหตุและไม่มีรังสี bremsstrahlung หรือ fluorescent เกิดขึ้น

2.3.2.2 การกระเจิงคอมป์ตัน (Compton Scattering)

เป็นปรากฏการณ์ที่โฟตอนเปลี่ยนทิศทางและพลังงานหลังจากชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมในตัวกลาง ทิศทางและพลังงานหลังจากการชนคำนวณได้จากสมการ

$$E' = \frac{E}{1 + sr + (2E - s)r^3} \quad (4)$$

โดย $s = E/(1 + 0.5625E)$ เมื่อ $E \leq 4$ (ในหน่วย 0.511 MeV)

$$0 < r \leq 1$$

และ

$$E' = \frac{E}{1 + sr + (2E - s)r^3} + \frac{1}{2}(E - 4)r^2(1 - r)^2 \quad (5)$$

เมื่อ $4 < E \leq 10$

และ

$$\cos \Psi = 1 + \frac{1}{E} - \frac{1}{E'} \quad (6)$$

เมื่อ y เป็นมุมของการกระเจิง

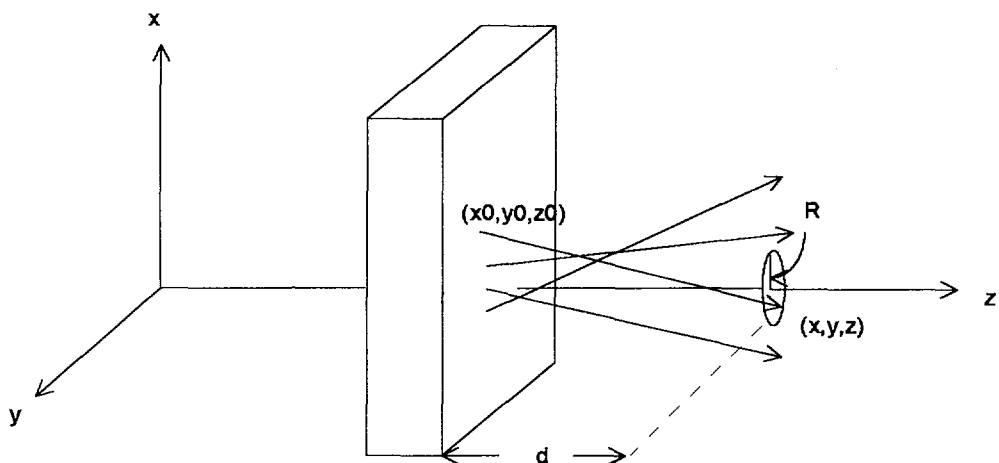
2.3.2.3 การเกิดอิเล็กตรอนคู่ (Pair Production)

เป็นปรากฏการณ์ที่โฟตอนสลายตัวกลายเป็นอิเล็กตรอนกับโพสิตรอนเมื่อมันเข้าไปอยู่ใกล้สนามคูลอมบ์ของอิเล็กตรอนหรือนิวเคลียสในอะตอมของตัวกลาง เช่นเดียวกันจะถือว่าอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกดูดกลืนทันที ส่วนโพสิตรอนเมื่อเคลื่อนที่ไปใกล้กับอิเล็กตรอน(เกิดขึ้นที่จุดเกิดเหตุเช่นกัน) ก็จะทำลายล้างซึ่งกันและกันกลายเป็นโฟตอนพลังงาน 0.511 MeV สองตัว และโฟตอนสองตัวนี้จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณต่อไป ปรากฏการณ์เกิดอิเล็กตรอนคู่จะเกิดขึ้นได้เมื่อโฟตอนมีพลังงานตั้งแต่ 1.022 MeV ขึ้นไป

อันตรกิริยาอื่น ๆ เช่น โฟโตคิสอินทิเกรชัน จะไม่นำมาใช้ในงานนี้ ดังนั้นชะตากรรมของโฟตอนจึงถูกกำหนดโดยอันตรกิริยาทั้งสามนี้

2.3.2.4 การบันทึกแตรัมที่หัววัด

หัววัดมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมดังรูปที่ 2 ถ้าหากโฟตอนตัวใดสามารถผ่านเข้ามาในพื้นที่นี้ได้ก็จะถูกบันทึกเอาไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4

กำหนดให้ x_0, y_0, z_0 คือจุดที่โฟตอนหลุดออกจากตัวกลาง

u, v, w คือทิศทางที่หลุดออกมา

x, y, z คือจุดที่โฟตอนตัดกับระนาบของหัววัด

ดังนั้น

$$x = x_0 + ut \tag{7}$$

$$y = y_0 + vt \tag{8}$$

$$z = z_0 + wt \tag{9}$$

แต่ $z = d$ ดังนั้น $t = (d - z_0)/w$ (10)

และ

$$x = x_0 + (d - z_0)u/w \tag{11}$$

$$y = y_0 + (d - z_0)v/w \tag{12}$$

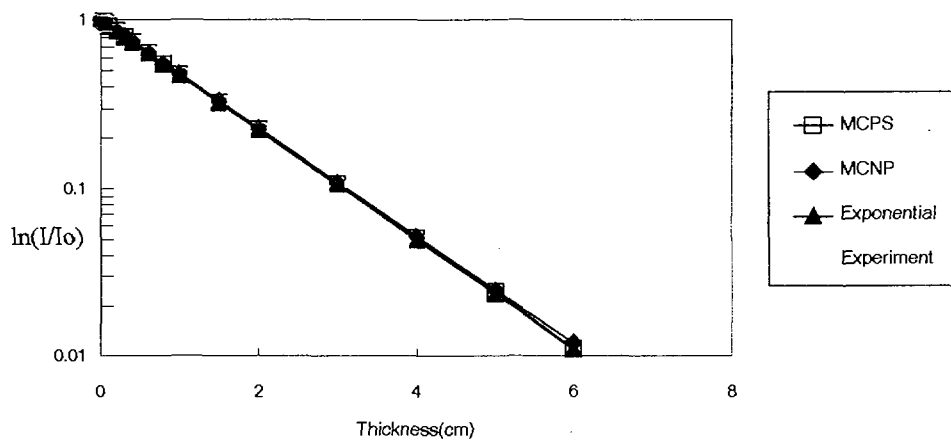
และถ้าหาก $x^2 + y^2 \leq R^2$ แล้วแสดงว่าโฟตอนผ่านเข้าไปภายในหัววัด

3. ผลการศึกษาวิจัย

ผลการศึกษาได้แสดงเป็นตารางแสดงการคำนวณเทียบกับโปรแกรม MCNP MCPS การคำนวณกำหนดค่าได้ ฟังก์ชัน $e^{-\mu x}$ และการทดลองจริง เมื่อใช้ตัวกลางเป็นแผ่นอลูมิเนียมและต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 และรูปที่ 5

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่า I/I_0 ของอลูมิเนียมที่พลังงาน 60 KeV

ความหนา(cm)	MCPS	MCNP	$e^{-\mu x} (\mu=0.7496)$	จากการทดลอง
0.03	0.9772	0.9788	0.9778	0.9693
0.06	0.9557	0.9562	0.9560	0.9387
0.1	0.9279	0.9275	0.9278	
0.2	0.8614	0.8619	0.8608	0.8497
0.3	0.7983	0.8020	0.7986	
0.4	0.7418	0.7442	0.7409	0.7338
0.6	0.6366	0.6396	0.6378	0.6301
0.8	0.5496	0.5512	0.5490	
1	0.4689	0.4763	0.4725	0.4618
1.5	0.3250	0.3288	0.3248	0.3193
2	0.2241	0.2263	0.2233	0.2174
3	0.1060	0.1091	0.1055	0.1007
4	0.05102	0.0522	0.0499	0.0472
5	0.0242	0.0248	0.0236	
6	0.0110	0.01214	0.0111	



รูปที่ 5 แสดงกราฟจากผลในตารางที่ 1

ตารางที่ 2 แสดงค่า I/I_0 ของตะกั่วที่พลังงาน 10 MeV

ความหนา(cm)	MCPS($\chi^2=5.74$)	$e^{-\mu x}$ ($\mu=0.5575154$)
0	1	1
0.1	0.9466	0.9458
0.2	0.8943	0.8945
0.4	0.8005	0.8001
0.8	0.6375	0.6402
1.6	0.4114	0.4098
3.2	0.1705	0.1680
6.4	0.0269	0.0282

ตารางที่ 3 แสดงค่า I/I_0 ของตะกั่วที่พลังงาน 100 MeV

ความหนา(cm)	MCPS($\chi^2=3.95$)	$e^{-\mu x}$ ($\mu=1.071127$)
0	1	1
0.1	0.9013	0.8984
0.2	0.8073	0.8072
0.4	0.6491	0.6515
0.8	0.4246	0.4245
1.6	0.1809	0.1802
3.2	0.0311	0.0325
6.4	0.0010	0.0011

4. บทวิจารณ์และสรุปผล

จากข้อมูลในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จาก MCPS MCNP ฟังก์ชัน $e^{-\mu x}$ และการทดลองมีความใกล้เคียงกันอย่างมากจึงต้องอาศัยการทดสอบไคสแควร์ (χ^2) ช่วยในการตัดสินใจว่าข้อมูลจากแหล่งใดจะมีความพอดีกับฟังก์ชัน $e^{-\mu x}$ มากที่สุด

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่า χ^2 จากข้อมูลในตารางที่ 1

วิธีการ	χ^2	$\chi^2_{0.95}$	$\chi^2_{0.90}$	$\chi^2_{0.05}$	$\chi^2_{0.10}$
MCPS	4.27	25	22.3	7.26	8.55
MCNP	27.28	25	22.3	7.26	8.55
ทดลองจริง	77.25	18.3	16	3.94	4.87

เมื่อใช้ฟังก์ชัน $e^{-\mu x}$ เป็นหลักจะสามารถคำนวณหาค่า χ^2 ได้ดังนี้คือ 4.27 สำหรับ MCPS 27.28 สำหรับ MCNP และ 77.25 สำหรับผลจากการทดลอง (แสดงในตารางที่ 4 สมมติที่ 2) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่า $\chi^2_{0.95} = 25$ (ที่ 15 degree of freedom สำหรับค่า จาก MCPS และ MCNP) จะเห็นว่า $\chi^2_{MCPS} < \chi^2_{0.90} < \chi^2_{0.95}$ แต่ $\chi^2_{MCNP} > \chi^2_{0.95} > \chi^2_{0.90}$ แสดงว่าผลจากการคำนวณของ MCPS สอดคล้องกับฟังก์ชัน $e^{-\mu x}$ มากกว่าการคำนวณจาก MCNP อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า

$\chi^2_{MCPS} < \chi^2_{0.05} < \chi^2_{0.10}$ ซึ่งในการทดสอบทางสถิติถือว่าดีเกิน ไป แต่สำหรับงานนี้ไม่ถือเช่นนั้นเนื่องจากไขว่หน้ามาถึง 50000 ตัว ซึ่งถือได้ว่าเป็นตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่สามารถเป็นตัวแทนประชากรได้เป็นอย่างดี สังเกตว่าค่า χ^2 จากการทดลองจริงสูงมากทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความไม่บริสุทธิ์ของแผ่นอลูมิเนียม

จากการคำนวณที่ 10 และ 100 MeV โดยใช้ตะกั่วเป็นตัวกลาง จะเห็นว่า $\chi^2 < \chi^2_{0.90} < \chi^2_{0.95}$ แสดงว่าที่พลังงานนี้ โปรแกรม MCPS ยังมาสามารถคำนวณเป็นที่เชื่อถือได้ และเนื่องจากไม่สามารถหาต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงขนาดนี้ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับการทดลองจริงได้ สรุปได้ว่าการคำนวณโดย MCPS ใช้ได้ดีกับปัญหาการส่งผ่านรังสีแกมมาในช่วงตั้งแต่ 100 MeV ลงมา

5. เอกสารอ้างอิง

1. Cashwell, E.D. and C.J. Everett. 1959. Monte Carlo Method for Random Walk Problems. Pergamon Press, London. 153 p.
2. Chilton, A.B., J.K. Shultis and R.E. Faw. 1984. Principle of Radiation Shielding. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 488 p.
3. Hammersley, J.M. and D.C. Handscomb. 1992. Monte Carlo Methods. Chapman & Hall, London. 178 p.
4. Los Alamos National Laboratory. 1994. RSIC Computer Code Collection, MCNP 4A Monte Carlo N-Particle Transport Code System. Radiation Shielding Information Center, Oak Ridge, Tennessee. 701 p.
5. Lux, I. and L. Koblinger. 1991. Monte Carlo Particle Transport Method: Neutron and Photon Calculations. CRC Press, Inc., Florida. 517 p.
6. Rubinstein, R.Y. 1981. Simulation and the Monte Carlo Method. John Wiley & Sons, Inc., New York. 278 p.
7. Sobol, I.M. 1975. The Monte Carlo Method (English translation from Russian). Mir Publisher, Moscow. 72 p.