

그림 몬테 카를로 계산의 등장과 전개* — 디지털과 아날로그의 사이에서

이 관 수

서울대학교 과학사 및 과학철학 협동과정

Neither Digital Nor Analog : The Case of Graphical Monte Carlo

LEE Kwan Soo

Program in History and Philosophy of Science, Seoul National University

ABSTRACT

In the first months of 1947, Stanislaw Ulam and John von Neumann conceived a way to estimate the behavior of neutrons. Their idea was to repeat many times tracing a neutron's path, using random numbers to mimic the stochastic nature of neutron reaction. This scheme had several traits inherited from the calculating activities during World War II at Los Alamos. A sphere or a circle was the shape of the modeled physical system in their scheme as was in many atomic bomb calculations. Its working procedure consisted of the numeral operations. This scheme got named "Monte Carlo" before long, underwent intricate development and diversification, and has acquired many faces. It is considered at least a (class of) widely applicable numerical method(s). Sometimes Monte Carlo simulations are practically regarded as the dealing with another Nature as Peter Galison showed recently.

What I call 'graphical Monte Carlo' was a feeble but implicative thread of Monte Carlo activities. In the summer of 1947, Enrico Fermi visualized the operational *procedure* of Monte Carlo estimation. He replaced the numeral operation with line drawing. Marvin L. Goldberger, then a recent Ph.D. at Chicago used Fermi's graphical scheme to investigate neutron and proton scattering in nucleus, which could be easily represented by a sphere or a circle. Goldberger's paper in 1948 was the first published one that used the Monte Carlo method, though he never used the term, "Monte Carlo". His paper was severely criticized. However some others defended, improved and used the line-drawing scheme presented in Goldberger's paper well into the middle of the 1950s.

* 이 글은 대우재단 96년도 장학연구 사업의 지원을 받았다.

These graphical Monte Carlo calculations did not fit into the received dichotomy between digital and analog. According to the contemporary authorities, digital calculations use numerals in various forms as the medium of calculation whereas the analog ones use continuous quantities. The lines drawn did not correspond to any numerals used in Ulam and von Neumann's scheme, the graphical Monte Carlo calculations' digital version. The length and direction of the lines corresponded to those numerals, but the length and direction of the lines were not the medium of calculation. They were the results of the working procedure.

The graphical Monte Carlo evolved largely isolated from other Monte Carlo activities then growing in number and scope. Those who used "Goldberger-type Monte Carlo" method did not cite Monte Carlo other than what Goldberger had done, and their modifications of the method were not thoroughly reasoned. Their selection of the parameters of operations that obviously might have influenced the statistics of the results was not explicitly based on statistical consideration, though their works increasingly emphasized the statistical quality of the results in various settings. On the other hand, their verbal characterization of the method was often incompatible with that of the cited literature on which their explanation was allegedly grounded. These suggest that a peculiar form of calculation method can be transported separated from that method in general or from the previously attached meanings and justifications.

1. 머리말

2차대전 직후 미국의 로스 알라모스 연구소에서 당시 막 등장하던 컴퓨터에 촉발되어 새로운 계산법이 출현하였다. '몬테 카를로 방법'(Monte Carlo methods)이라고 명명된 이 계산법은 처음에 단순한 형태로 핵폭탄 설계연구에 이용되었으나 곧 원자로 설계, OR(operations research), 화학공학, 宇宙線 연구 등 다양한 분야에서 활용되기 시작하였고, 그와 함께 계산과제의 수학적·물리적 특성을 이용하여 몬테 카를로 계산을 더 빨리 진행시키는 갖가지 정교하고 복잡한 몬테 카를로 계산기법들이 개발되었다.¹⁾ 컴퓨터의 확산과 더불어 몬테 카를로 방법의 응용 범위와 기법

1) 누가 처음 몬테 카를로 방법을 개발·사용하였는지에겐 약간의 논란이 있다. 18세기 파리의 뷔퐁 (G.-L. L. Buffon)이 정사각형에 내접하는 원을 그리고 거기에 바늘을 여러 번 던져 바늘이 원에 닿거나 원 안에 떨어진 회수를 세어 원주율 값을 실험적으로 구해 본 것이 처음이었다는 주장, 20세기 초 런던에서 스튜던트 (Student)란 가명으로 활동한 고셋(W. S. Gosset)가 자신이 추정한 특정 확률 분포를 무작위 추출 실험을 통하여 확인한 것이 효시라는 주장, 그리고 울람(S. M. Ulam)과 노이만 (J. von Neumann)이 2차대전 중 또는 직후에 처음 몬테 카를로 방법을 만들었다는 주장 등이 있다. J. M. Hammersley and D. C. Handscomb, *Monte Carlo Methods* (London: Methuen & Co.; New York: John Wiley & Sons, 1964), pp. 6-8을 참조. 울람과 노이만의 작업이 이루어진 시기에 대해서는 1942년 (Robert Lattès, *Methods of Resolution for Selected Boundary Problems in Mathematical Physics* (Gordon and Breach, 1969)), 1944년 (Hammersley and Handscomb, 앞의 책) 등의 언급이 있으나, 3절에서 보듯이 1947년으로 보는 것이 옳다. 이 해 울람과 노이만의 작업이 계기가 되어 "몬테 카를로"라는 명칭이 생겼고, 그들의 연구가 오늘날 행해지는 몬테 카를로 계산들의 직접적인 효시가 되었다. 몬테 카를로 방법의 시초에 대

들도 계속 늘어나 현재 과학기술 활동은 물론 경영, 군사, 공공정책 등 수와 양을 다루는 모든 분야에서 계산 또는 모의실험(simulation) 방법으로 활용되고 있다.

사전에 따르면 몬테 카를로 방법은 “인위적 표본추출 실험을 이용하여 수치적 수학 문제의 해를 어렵잡는 기법”이라고 할 수 있는데,²⁾ 이를 입문서적인 예를 들어 살펴보면 다음과 같다. 그림 1과 같이 면적이 A인 사각형 내에 $y=f(x)$ 로 주어지는 곡선(굵은 선) 아래의 면적(빛금친 영역)을 구하는 문제가 주어졌을 때, 전통적인 방식으로는 $f(x)$ 를 적분하여 답을 구한다. 하지만 몬테 카를로 방법을 사용할 때에는 사각형 내에 임의로 N개의 점을 찍고(표본을 추출하고), 그 중에서 빛금친 영역에 포함되는 점의 개수 n을 세어 $A \cdot n/N$ 을 적분값으로 삼는다. 이 값은 당연히 정확한 적분값이 아니라 그것에 가까운 값일 뿐이다. 이 예만 보면 간단한 문제에 불필요하게 번잡한 방법을 적용하여 불확실한 값을 얻었다고 할 수 있다. 하지만 이 경우는 단순한 과제를 가장 비능률적인 “무작정 몬테 카를로”(hit-or-miss Monte Carlo)로 풀어 본 것이며 실제 활용에서는 훨씬 더 정교하고 능률적인 기법들이 사용된다.³⁾ 실제 수치 계산에서는 통상적인 계산법으로도 근사값밖에 구할 수 없는 경우가 많으며,⁴⁾ 계산 과제에 따라서는 몬테 카를로 방법을 사용한 계산과정이 더 간단하기도 하다. 더욱이 매우 복잡한 계산 과제나 본질적으로 확률적인 현상들을 다룰 때에는 종종 몬테 카를로 방법이 가장 유용하거나 때로는 실질적으로 유일하게 사용가능한 계산법인 경우도 있다.

앞서 인용한 사전의 정의에서 미루어 볼 수 있듯이 원칙적으로 몬테 카를로 방법에 컴퓨터가 필수적인 것은 아니지만, 오늘날 대개의 경우 ‘몬테 카를로’는 컴퓨터 상에서 대량의 표본 추출을 통해서 실행되는 계산 또는 컴퓨터 모의실험(simulation)을 뜻한다.⁵⁾ 이는 현실적으로 대부분의

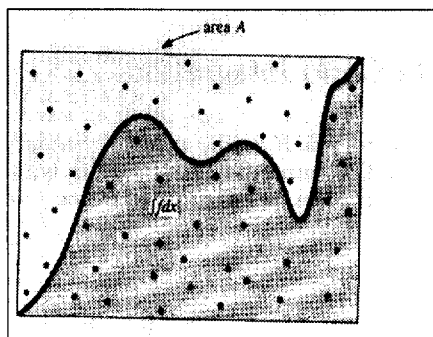


그림 1. 간단한 몬테 카를로 계산의 예. 출전: W. H. Press et al., *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing* (Cambridge University Press, 1986), p. 222.

한 논란에는 무엇을 몬테 카를로 방법으로 보느냐와 관련이 있다. A. W. Marshall, "Introductory Note," in H. A. Meyer, ed., *Symposium on Monte Carlo Methods, Held at the University of Florida, March 16 and 17, 1954* (New York: John Wiley & Sons, 1956), pp. 1-14 중 pp. 6-7을 참조할 것. 한편 1940년대 말 및 1950년대 중반의 몬테 카를로 방법의 상황에 대해서는 A. S. Householder et al. eds., *Monte Carlo Method: Proceedings of a symposium held June 29, 30, and July 1, 1949, Los Angeles* (National Bureau of Standards, 1951) Applied Mathematics Series 12 및 H. A. Meyer, ed., 앞의 책 그리고 D. D. McCracken, "The Monte Carlo Method," *Scientific American* 192: 5 (May, 1955), pp. 90-97 등을 볼 것.

- 2) Irving J. Good, "Monte Carlo method," *Encyclopedia of Science and Technology*, 17th edn. vol. VII (McGraw-Hill, 1992), pp. 414-416. 인용은 414쪽에서. 필자 번역.
- 3) "hit-or-miss Monte Carlo"는 J. M. Hammersley and D. C. Handscomb가 사용한 용어이다(앞의 책, pp. 53-54). 김재삼, 「몬테카를로 방법의 물리학적 응용」(민음사, 1997)에서는 "직설적 방법"을 사용하였다. 실제로 활용되는 몬테 카를로 기법들에 대해서는 이들을 참조할 것.
- 4) 잘 알려져 있듯이 과학 기술 활동에서 다루는 "거의 모든 수치 계산은 대부분 어렵셈(approximation)"이다. J. B. Scarborough, *Numerical Mathematical Analysis* (Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1930) p. 1.
- 5) 예를 들어 다음의 구절을 보라. "The 'Monte Carlo method' is a method of computer simulation" K. Binder, ed., *Monte Carlo Methods in Statistical Physics* (Springer-Verlag, 1979) p. v (필자 강조).

몬테 카를로 계산이 컴퓨터 상에서 실행될 뿐만 아니라 역사적으로도 컴퓨터와 몬테 카를로 방법이 밀접한 관계를 맺어 왔기 때문이다. 1946년 스타니스라브 울람(Stanislaw Ulam)이 몬테 카를로 방법의 초기 형태를 착상하고 다음 해 초 존 폰 노이만(John von Neumann)이 그 착상을 구체화시킬 때 그들은 모두 최초의 컴퓨터로 일컬어지는 ENIAC을 염두에 두고 작업하였고,⁶⁾ 노이만 외에도 여러 사람들이 컴퓨터와 몬테 카를로 방법의 발달에 동시에 기여하였다. 또한 1950년대 중반의 기념비적인 STRECH 컴퓨터의 경우처럼 몬테 카를로 계산 능력 증대를 목적으로 당대 최고의 슈퍼 컴퓨터가 개발되기도 하였다.⁷⁾ 하지만 양자의 관계가 긍정적인 되먹임으로만 일관되지는 않았다. 몬테 카를로 방법이 일반적인 컴퓨터 수치 계산의 한계를 예증하고 그것을 극복할 방안으로 보여주는 것으로 제시되기도 하였고,⁸⁾ 컴퓨터와 그 사용법의 발달이 몬테 카를로 방법의 필요성을 격감시킨 것으로 여겨지거나⁹⁾ 컴퓨터 계산의 본질적인 특성이 몬테 카를로 계산에 가하는 제약도 지적되기도 하였다.¹⁰⁾ 또한 컴퓨터를 이용하지 않고 몬테 카를로 방법을 사용한 사례들과 그러한 응용을 확산시키려는 노력이 1960년대까지도 다양한 형태로 거듭 발생하였다.¹¹⁾ 즉 몬테 카를로 방법은 컴퓨터 계산과 불가분의 관계에 있으면서도 그것에 완전히 포함되지는 않는 것이다.

이런 면에서 전통적인 계산기법과 궤를 달리하는 몬테 카를로 방법이 등장·정착하는 과정에 대한 연구는 그 자체로서도 흥미있는 주제인 동시에, 컴퓨터에 기반한 계산과 그렇지 않은 계산

6) 정확히 말하면 1945년 초 작동 상태에 도달한 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer)은 최초의 全電子式 자동제어 汎用 계산기이다. 오늘날 “컴퓨터”가 뜻하는 전자식 프로그램 내장형 디지털 계산기로써는 펜실베이니아 대학에서 EDVAC이 최초로 고안되었고(1945년), 영국 케임브리지 대학의 EDSAC이 최초로 완성되었다(1949년 5월). 하지만 단순한 기계식 계산기와 “컴퓨터”의 차이를 무엇으로 보느냐에 따라 독일의 콘라드 주체의 Z3(1941년 3월), 아리조나 주립 대학의 아타나조프-베리 계산기(1942년), 하버드의 마크 I 및 영국 우정성의 콜로서스 암호 해독기(1943년), 벨 연구소의 모델 III 릴레이 계산기(1944년) 및 기타 여러 경우들을 나름대로 각기 최초의 컴퓨터라고 주장할 수 있다. N. Metropolis and J. Worlton, “A Trilogy on Errors in the History of Computing,” *Proceedings of USA-Japan Computer Conference, 1st, Tokyo, October 3-5, 1972* (Montvale, NJ: American Federation of Information Processing Societies, 1972), pp. 683-691 (*Annals of the History of Computing* 2: 1 (1980), pp. 49-59에 재수록됨) 및 Michael R. Williams, *A History of Computing Technology* (Prentice-Hall, 1985), pp. 213-381을 참조할 것. 하지만 바로 ENIAC은 당시까지 주로 여자 計算員을 뜻했던 ‘computer’라는 명칭을 처음 사용하고, 최초로 대중에게 공개된 전전자식 대형 계산기로써 당시 많은 이목을 끌어 ‘computer’가 오늘날과 같은 의미를 지니게 되는 계기를 만들었다. 이후 따로 밝히지 않는 한 이 글에서 쓰는 ‘컴퓨터’는 프로그램 내장형과 외장형을 모두 포함하여 전자식 디지털 계산기를 뜻한다.

7) Robert W. Seidel, “From Mars to Minerva: The Origins of Scientific Computing in the AEC Labs,” *Physics Today* 49: 10 (1996), pp. 33-41 중 p. 36 및 Charles J. Bashe et al., *IBM's Early Computers* (MIT Press, 1986) pp. 415-459를 참조할 것. STRETCH 컴퓨터는 유명한 IBM/360의 기본이 되었다.

8) S. M. Ulam, “The Monte Carlo Method,” June 29, 1949, Stanislaw Marcin Ulam Papers, American Philosophical Society Library. 이것은 1949년 로스 맨렐레스 몬테 카를로 심포지엄에서 울람이 발표한 원고이지만, 주1의 논문집에는 실리지 않았다.

9) Hammersley and Handscomb, 앞의 책, p. 9.

10) Alston S. Householder, *Principles of Numerical Analysis* (McGraw-Hill, 1953), p. 243.

11) 주1 및 Granino A. Korn, “Hybrid Computer Monte Carlo Techniques,” John McLeod, ed., *Simulation: The Dynamical Modeling of Ideas and Systems with Computers* (McGraw-Hill, 1968), pp. 223-234를 참조할 것. 매클레오드의 책은 모의실험(simulation) 엔지니어들의 업계 잡지인 *Simulation*지(1963년 시작)의 기사 모음인데, 이 책이 말하는 컴퓨터는 아날로그 컴퓨터이고 디지털 컴퓨터는 거의 다루지 않았다. 이 책에 따르면 디지털 컴퓨터가 모의실험에 사용되기 시작한 것은 “최근”의 일이었다(3쪽).

의 차이를 규명하고, 궁극적으로는 컴퓨터를 광범위하게 사용하는 현대 과학활동의 특질을 살펴볼 수 있게 할 것으로 기대된다. 하지만 몬테 카를로 방법에 대한 과학사학계의 연구로는 최근에 발표된 갈리슨의 것이 유일하며, 컴퓨터 계산에 대한 과학사적 연구는 더욱 찾아보기 어렵다.¹²⁾

이 분야의 연구가 드문 이유로는 컴퓨터사 연구 동향이 최근에야 기기발달사를 벗어나기 시작했다는 점,¹³⁾ 컴퓨터와 몬테 카를로 방법의 발달이 모두 핵 개발 및 기타 군사기술과 밀접하게 관련되었기 때문에 아직도 비밀해제가 되지 않은 자료가 상당수라는 점,¹⁴⁾ 그리고 과거의 컴퓨터 사용에 관한 자료들이 상대적으로 많지 않고 상세한 경우도 별로 없다는 점등을 들 수 있다. 그럼에도 불구하고 몬테 카를로 방법의 초기 역사에 대한 의미있는 과학사적 연구는 가능하고 필요하다. 이는 몬테 카를로 방법이 일찍부터 워낙 여러 분야에서 다양하게 사용되었기 때문에 이제 는 비밀이 아닌 자료의 절대량이 많고, 이 방법이 공개적으로 전파된 영역들의 사례에 대한 연구는 구태여 비밀 자료의 공개를 기다릴 필요가 없으며, 그러한 연구가 장차 공개된 영역에서의 몬테 카를로 계산과 그렇지 않은 영역의 몬테 카를로 계산의 차이를 규명하는 작업에도 유용할 것이기 때문이다.

이 글에서는 몬테 카를로 방법 개발의 배경이 되는 2차대전 중 로스 알라모스 연구소의 계산 활동을 살펴보고, 몬테 카를로 방법의 등장 과정을 서술한 다음 여기서 “그림(graphical) 몬테 카를로 계산”이라고 이름 붙인 사례들을 살펴볼 것이다. 이 사례들에서 계산은 미리 준비된 그림에 선분을 긋는 방식으로 진행되었다. 이는 도형을 계산 결과의 표현 수단으로 삼는 일반적인 경우와 큰 차이를 보인다. 그림 몬테 카를로 계산들에 대한 서술은 계산 방법이 등장·변모하는 모습과 그간 계산기술에 대한 역사 서술들이 강조해 온 디지털과 아날로그의 이분법으로는 포괄되지 않는 영역이 있음을 보일 것이다. 아울러 몬테 카를로 방법의 공동 발명자로 회자되는 울람, 노이만, 엔리코 페르미의 역할이 자연스럽게 구분될 것이다.

2. 로스 알라모스에서의 계산

1943년 초에 세워진 로스 알라모스 연구소에서 진행된 연구들의 궁극적인 목적은 폭탄으로 쓸 핵분열 장치를 설계·조립하는 것이었다.¹⁵⁾ 그러므로 연구 결과는 최종적으로 실제 물체 — 원자

12) Peter Galison, “Computer Simulations and the Trading Zone,” Peter Galison and David J. Stump, eds., *The Disunity of Science, Boundaries, Contexts, and Power* (Stanford University Press, 1996), pp. 118-157. 그는 몬테 카를로 방법 및 모의 실험에 대한 깊이 있는 통찰들을 제시하였다. 하지만 그는 이 글에서 몬테 카를로 방법의 역사를 체계적으로 서술하기보다는 여러 주제들을 거론하면서 자신의 ‘교역지대론(trading zone)’을 지지하는 데 주안점을 두었다. 과학활동과 관련된 기계 계산에 대한 것으로는 Andrew Warwick, “The Laboratory of Theory or What’s Exact about the Exact Science?”, M. Norton Wise, ed., *The Values of Precision* (Princeton University Press, 1995), pp. 311-351이 있다.

13) R. W. Seidel, “CBI Director’s Column,” *IEEE Annals of the History of Computing* 17: 4 (1995), p. 5.

14) Seidel, “From Mars to Minerva” 및 Kenneth Flam, *Creating the Computer: Government, Industry, and High Technology* (Washington D.C.: The Brookings Institution, 1988), pp. 29-79, 그리고 Donald MacKenzie, “The Influence of the Los Alamos and Livermore National Laboratories on the Development of Supercomputing,” *IEEE Annals of the History of Computing* 13: 2 (1991), pp. 179-202 등을 참조할 것.

15) 1943년 4월 5, 7, 9, 12, 14일에 서버(Robert Serber)는 로스 알라모스에 모인 과학자들에게 그 때까지의 진전을 총정리하는 강의를 하였는데, 그는 프로젝트의 목적을 “to produce a practical military weapon in

폭탄 구성 부품 —의 규격으로 변환되어야 했고, 종종 설계의 준비에 해당하는 기본적인 연구들도 자연스럽게 처음부터 원자폭탄의 폭심(core)의 모양인 球體를 대상으로 진행되었다.¹⁶⁾

원자폭탄 구성부품의 규격을 정하는 것은 결국 각종 수치를 확정하는 것인 만큼 로스 알라모스에서 계산은 중요한 활동이었다. 하지만 단순한 형태인 구체를 대상으로도 원자폭탄 설계에 필요한 계산은 쉽지 않았다. 특히 곤란하였던 과제들은 고온·고압 기체 내에서 고속 충격파의 전파나 그러한 상태에서 진행되는 연쇄 핵분열 반응 및 거기서 나오는 중성자들의 행동을 계산하는 것들이었다. 충격파의 진행은 원자폭탄의 기폭과 폭발 과정 모두에서 매우 중요한 현상이었는데, 그것을 기술하는 유체역학 방정식들은 고차 편미분방정식들이어서 해석적으로 풀 수 없는 것들이었다.

이러한 문제들을 해결하기 위해 로스 알라모스의 과학자들은 1943년 9월부터 수시로 로스 알라모스를 드나든 노이만이니¹⁷⁾ 1944년 2월에 방문한 파이얼스(R. E. Peierls)¹⁸⁾ 등의 도움을 받아 여러 가지 단순화된 모형들과 계산 절차들을 고안하였다. 노이만이 초빙된 것은 당시 여러 전쟁 프로젝트들이 다투어 그의 자문을 구할 정도로 전설적인 문제 해결 능력으로 명성이 높았던 탓도 있지만 보다 구체적으로는 그가 충격파 계산의 대가였기 때문이었다. 그는 이미 1930년대 말부터 전쟁을 예상하고 유체역학 계산에 많은 노력을 기울였고, 개전 후에는 미해군을 위해 성형작약(成形炸藥)의 충격파를 수치계산하는 등 충격파 계산에 선도적인 인물이었다.¹⁹⁾ 파이얼스도 편미분방정식의 수치해를 구하는 계산기법에 능한 사람이었다.

계산에 필요한 시간과 노력을 줄이는 여러 가지 기법과 절차들을 채용한다 할지라도 그들은 전례없는 고압·고온·고속의 상황을 다루어야 했기 때문에 3차원 공간상에서 시간에 따른 충격파의 진행을 계산하는 데 필요한 연산의 양은 여전히 방대하였다. 자연히 로스 알라모스에서는 일찍부터 계산기기들을 사용하였는데, 그것들은 해석적으로 표현된 방정식을 숫자로 변환한 후 숫자에 대한 연산으로 문제를 해결하는 디지털 계산기들이었다.²⁰⁾ 2차대전 이전에 계산기기 기술의 발달은 부시의 미분 분석기(differential analyzer)처럼 방정식의 변수들에 일대일 대응하는 물리량들을 이용하여 계산 과제를 해결하는 아날로그 계산기들이 주도하였지만, 그러한 계산기들은 전기(전력)공학 분야에서 주로 사용되었고, 물리학자들과는 거리가 멀었다.²¹⁾ 물리학자들은 디지털

the form of a bomb"으로 정의하면서 강의를 시작하였다. 이 강의는 R. Serber, *The Los Alamos Primer: The First Lectures on How to Build an Atomic Bomb* (Berkeley: University of California Press, 1992)로 출판되었다. 인용구는 Lillian Hoddeson et al., *Critical Assembly: A Technical History of Los Alamos during the Oppenheimer Years, 1943-1945* (Cambridge University Press, 1993)의 p.69에 인용된 *Los Alamos Primer*, p.3의 구절을 재인용하였다.

16) Lillian Hoddeson et al., *Critical Assembly*, p. 71 등.

17) Lillian Hoddeson et al., *Critical Assembly*, p. 130 등.

18) Lillian Hoddeson et al., *Critical Assembly*, p. 159-160.

19) Lillian Hoddeson et al., *Critical Assembly*, p. 131 및 Stanislaw Ulam, interview by Christopher R. Evans, circa 1976, *Charles Babbage Institute Oral History* 87.

20) N. Metropolis and E. C. Nelson, "Early Computing at Los Alamos," *Annals of the History of Computing* 4: 4 (Oct., 1982), pp. 348-357 중 pp. 348-349. 메트로폴리스와 넬슨은 탁상용 계산기를 사용한 계산을 "Hand Computing"으로 부르고 있다.

21) 부시의 미분 분석기에 대해서는 M. R. Williams, 앞의 책, pp.206-212 및 Thomas P. Hughes, *Network of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930* (The Johns Hopkins University Press, 1983), pp. 376-379, 그리고 Susan Puchta, "On the Role of Mathematics and Mathematical Knowledge in the Invention of Vannevar Bush's Early Analog Computers," *IEEE Annals of the History of Computing*, 18: 4 (Winter 1996), pp. 49-59 등을 볼 것. 아날로그 계산기와 전력 공학에 대해서는 위의 글들과 함께

식인 탁상용 계산기, 그 중에서도 Marchant사의 탁상 계산기처럼 곱셈을 위주로 제작된 기계들을 과학기술용 계산기로 여겨 주로 사용하였고, 천문 관측 자료를 정리하던 콜롬비아 대학 천문 계산국같이 많은 양의 데이터를 비교적 단순한 방식으로 처리하는 경우에 예외적으로 상업용으로 여겨지던 IBM사의 펀치카드 계산기를 사용하였다.²²⁾ 로스 알라모스에서도 처음에는 Marchant사 등의 탁상 계산기를 사용하였는데, 계산 부하가 밀리면서 콜롬비아 대학에서 근무했던 보급 관리자의 제안으로 IBM 펀치카드 계산기 사용 가능성이 타진되고, 1944년 초에 도입이 결정되었다. 4월에 10대 들어온 IBM 펀치카드 계산기들은 로스 알라모스의 물리학자들에게는 낯선 기계여서 여러 사람의 관심을 끌었다. 일부는 계산기와 그것의 작동 자체에 너무 매혹되어 맡은 임무를 소홀히 하는 등 문제를 일으키기도 하였다.²³⁾

새로운 계산기들이 도입되어 연산속도가 빨라졌지만, 그것만으로 계산 과제를 해결할 수 있었던 것은 아니었다. 계산의 대상이 복잡하면 할수록 무엇을 어떻게 계산할 것인지 자체가 문제였다. 그 중에서도 증성자 “증식 과정(multiplicative process)”에 대한 계산은 계속 골칫거리였다.²⁴⁾ 증성자 증식 과정을 계산하는 것은 곧 연쇄 핵분열 과정을 계산하는 것이었기 때문에 원자폭탄의 효율을 좌우하는 중요한 문제였다. 만일 증식 과정에서 증성자들의 분포가 일그러진다면 핵분열

Aristotle Tympas, “From Digital to Analog and Back: The Ideology of Intelligent Machines in the History of the Electrical Analyzer, 1870s-1960s,” *IEEE Annals of the History of Computing*, 18: 4 (Winter 1996), pp. 42-47을 참조할 것.

- 22) 2차대전 전의 상황에 대해서는 Paul A. Medwick, “Douglas Hartree and Early Computation in Quantum Mechanics,” *Annals of the History of Computing*, 10:2 (Winter 1989), 105-112 및 Maurice V. Wilkes, “Introduction” in Douglas R. Hartree, *Calculating Instruments and Machines* (1949), Charles Babbage Institute Reprint Series in the History of Information Processing, vol. 6 (Thomash Publishers, 1984), pp. ix-xvi 중 pp. ix-x를 참고할 것. James Gleick, *Genius: The Life and Science of Richard Feynman* (New York: Random, 1992), pp. 76-77에서와 같이 몇몇 전기에서 당시 물리학자들의 계산 활동에 대한 묘사를 볼 수 있다. 한편 IBM사에서 곱셈이 가능한 펀치카드 계산기가 나온 것은 1931년의 일이다. Charles J. Bashe et al., *IBM's Early Computers* (MIT Press, 1986) pp. 14-15. 하지만 1930년대 후반까지도 “몇몇 과학자들의 열광에도 불구하고, 1930년대에 기술 계산은 경제적으로 별 영향이 없었다. 대학이나 산업체 연구소들은 과학자들용으로 펀치카드 장비들을 거의 사지 않았다. ... 한편 대부분의 기술자들에게 펀치카드 장비들은 이질적인 것이었다.” 같은 책, p. 24. 칼럼비아 대학의 토마스 왓슨 천문 계산국에 대해서는 같은 책, pp. 22-24 및 W. J. Eckert, *Punched Card Methods in Scientific Computation* (Thomas J. Watson Astronomical Computing Bureau, Columbia University, 1940), Charles Babbage Institute Reprint Series, vol. 5 (Thomash Publishers, 1984)를 참조할 것. 에커트는 “곱셈은 가장 비싼 연산이다. ... 따라서 할 수 있을 때마다 그것을 피할 방법을 찾는 것이 바람직하다” 라고 썼다. 같은 책, p. 29 (필자 강조). 1930년대 들어 각종 함수표 등을 만들 때에도 펀치 카드 계산기가 사용되었다. John Todd, “The Prehistory and Early History of Computation at the U.S. National Bureau of Standards,” Stephen G. Nash, ed., *A History of Scientific Computing* (ACM Press, 1990), pp. 251-268 및 M. R. Williams, 앞의 책, p. 254 등을 참조.

- 23) IBM 계산기 도입에 대해서는 Lillian Hoddeson et al., *Critical Assembly*, p. 159-160 및 N. Metropolis and E. C. Nelson, 앞의 글, p. 350을 참조. 파인만은 베테가 한 때 그에게 계산기 접근 금지령을 내릴 정도로 계산기의 메커니즘에 빠졌고, 스탠리 프랑켈은 계산기에 극도로 매료되어 동작하는 계산기를 하릴 없이 바라만 보는 “computer disease”를 앓아 다른 부서로 전보되었다. Richard Feynman, “Los Alamos from Below,” in Lawrence Badash et al., eds., *Reminiscence of Los Alamos, 1943-1945* (Dordrecht: D. Reidel, 1980), pp. 125-6, *Annals of the History of Computing* 4: 1 (1982), pp. 62-63. R. P. Feynman, *Surely You're Joking, Mr. Feynman* (New York: W. W. Norton, 1985), pp. 108-111. 노이만이 펀치 카드 계산기에 대해 배운 것도 1944년 4월의 일이었다. N. Metropolis and E. C. Nelson, 앞의 글, p. 351.

- 24) Lillian Hoddeson et al., *Critical Assembly*, pp. 339-345 등.

물질의 일부만 연쇄 핵반응을 일으켜 원자폭탄이 어이없게 작은 폭발만 일으킬 수도 있었다. 또 한 그 과정은 이론적으로 논의되고 있었던 열핵폭탄의 실현 가능성에도 중요한 문제였다. 당연히 초기부터 이 계산을 위해 많은 노력이 경주되었고, 리처드 파인만, 니콜라스 메트로폴리스, 로버트 서버(Robert Serber)등 많은 사람들의 노력에 의해 여러 근사식과 계산 방법들이 만들어졌다. 1944년 12월까지의 실험값과 대체적으로 부합하는 결과를 산출하는 계산법이 완성되어 일단락되었지만 문제가 완전히 해결되었다고 보기는 힘들었다. 그들의 근사식은 중성자 개수를 연속량으로 취급하는 것이었는데, 원칙적으로 중성자 개수는 정수이기도 했다.²⁵⁾ 중성자 개수를 정수로 놓고 중성자 증식 문제를 분석하는, 일종의 예비 보완 작업을 담당한 사람이 폴란드 출신 수학자인 스타니슬라브 울람이었다. 1943년 12월에 노이만의 추천으로 로스 알라모스에 합류한 그는 다음 해 이 문제를 맡아 철학자인 호킨스와 같이 작업하였는데, 중성자 증식 과정이 그때까지 알려져 있던 확률 이론에 잘 들어맞지 않았기 때문에 문제 풀이 자체에는 큰 진전은 없었다.²⁶⁾ 그들은 그해 11월까지 연쇄 핵 반응시 폭심으로부터 퍼져 나오는 중성자의 공간적·시간적 분포에 생각보다 큰 요동이 있을 수 있음을 증명하였다. 이미 쓸 만한 근사식들이 있었고, 다른 시급한 문제들도 등장하였기 때문에 이 방향의 작업은 더 이상 진행되지 않았다.²⁷⁾ 하지만 중성자 증식 과정 계산은 되풀이하여 골치거리가 되었다. 1945년 봄에 다시 이 과정에 대한 실험값과 계산값이 들어맞지 않는 경우들이 등장하였는데, 1945년 7월 16일 최초의 핵폭발 실험이 성공할 때까지도 이 문제에 대한 해결책은 발견되지 못했다.²⁸⁾

이렇듯 로스 알라모스에서 계산은 계속 문제가 되었기 때문에 1944년 초부터 노이만은 로스 알라모스의 작업에 동원할 더 강력한 계산 수단을 찾아 나섰다. 그는 그해 8월에 우연히 펜실베이니아 대학의 ENIAC 개발 계획을 접했다.²⁹⁾ 잘 알려진 대로 그는 곧 ENIAC 프로젝트에도 깊숙이

25) David Hawkins, S. Ulam, "Theory of Multiplicative Process" LA-171 (Nov. 14, 1944) Unclassified on Nov. 13, 1956. S. M. Ulam, *Analogies between Analogies: The Mathematical Reports of S. M. Ulam and His Los Alamos Collaborators* (University of California Press, 1990), A. R. Bednarek and Françoise Ulam eds., pp. 1-15에 재록되었다. 재록본의 p. 2를 볼 것.

26) 울람과 노이만은 1935년말 처음 만난 이래 절친한 친구였다. 호킨스에 따르면 울람이 로스 알라모스에 합류한 것은 오로지 노이만의 요구 때문이었다. 이 시기에 대한 울람의 회상은 S. M. Ulam, *Adventures of a Mathematician* (Berkeley: University of California Press, 1991), pp. 141-171을 볼 것. 그 중 호킨스와의 공동 작업에 대한 내용은 pp. 158-161에 있다. 호킨스의 회상은 David Hawkins, "The Spirit of Play, a Memoir for Stan Ulam," *Los Alamos Science* 15 Special Issue (1987), pp. 39-50을 볼 것. 울람은 자신이 수학적 관점에서 이 문제를 다루었다고 회상하였고, 호킨스의 회상도 유사하다. 이들의 작업은 우선 순위가 높지 않았을 것으로 추정되는데, 그것은 "로스 알라모스 유일의 상주 수학자"였던 울람이 "행정 업무 면에서 오픈하이머를 보좌하기 위해" 캘리포니아 대학으로부터 파견된 "철학자"인 호킨스에 제 수학을 가르쳐 가며 단 둘이서 작업을 진행하였기 때문이다(로스 알라모스는 형식상 캘리포니아 대학 산하였다). 인용구는 호킨스의 회상에서.

27) 로스 알라모스에서는 1944년 여름부터 1945년 봄까지 심각한 "플루토늄 위기"가 있었다. 이에 대해서는 Hoddeson et al., 앞의 책 및 Lillian Hoddeson, "The Discovery of Spontaneous Fission in Plutonium during World War II," *Historical Studies in Physical and Biological Sciences* 23 (1993), pp. 279-300을 볼 것.

28) Lillian Hoddeson et al., *Critical Assembly*, p. 345.

29) 노이만은 1월 14일 과학연구개발국 (Office of Scientific Research and Development)의 응용수학부 (Applied Mathematics Panel)의 장인 위렌 위버에게 문의 편지를 보냈다. 위버는 하버드 대학의 하워드 아이켄(Harvard Mark I 계산기를 막 완성하고 있었다), 벨연구소의 조지 스티비츠(릴레이 계산기 개발 중이었다), 칼럼비아 대학 천문 계산국 등을 소개했으나 펜실베이니아 대학의 ENIAC은 제외하였다. 노이만은 8월 ENIAC의 발주처인 애버딘 탄도학 연구 실험소 (Aberdeen Ballistics Research Laboratory)에서

개입하였고, 이후 컴퓨터 발달 과정에서 중요한 역할을 하였다. 주목할 것은 노이만이 처음 제안한 ENIAC의 중요한 용도가 바로 중성자 증식 과정을 계산하는 것이었다는 점이다. 노이만은 1945년 초 로스 알라모스의 메트로폴리스와 스탠리 프랑켈에게 열핵반응의 진행 과정 — 중성자를 매개로 한 연쇄반응 — 을 ENIAC 상에서 해볼 것을 제안하고, 3월에 ENIAC의 발주처인 미 육군 애버딘 탄도학 연구 실험소(Aberdeen Ballistics Research Laboratory)를 설득하여 로스 알라모스 측의 계산 문제를 ENIAC의 성능 시험 시운전(shake-down test) 과제로 채택하게 하였다. 하지만 이 계산은 전쟁이 끝날 때까지 준비 단계에 머물러 있었다.³⁰⁾

3. 몬테 카를로 방법의 등장

1945년 가을 로스 알라모스의 과학자들은 대거 대학 사회로 돌아갔다. 9월에 남 캘리포니아 대학 로스 엔젤레스 캠퍼스로 간 올람처럼 로스 알라모스와 공식적인 관계를 맺지 않은 사람도 있었지만, 상당수는 시카고 대학으로 간 페르미나 메트로폴리스처럼 계속 로스 알라모스 연구소와 공식적인 관계를 유지하였다. 페르미는 여름방학 동안 자문역으로 로스 알라모스에 상주하기로 하였고, 메트로폴리스는 노이만이 제안했던 계산 프로젝트를 계속 맡았다.³¹⁾

메트로폴리스 등이 ENIAC 상에서 열핵반응 계산을 실행한 것은 1945년 11월에 들어서였다. 봄에 계획된 이 계산이 실행에 이르기까지 6개월 이상 걸린 것은 이것에 50만장의 펀치카드와 12월 말까지 6주간의 실행시간이 필요할 정도로 거대하고 복잡한 탓도 있었지만 한편으로는 그 계산의 내용이 엄중한 비밀로 간주되었기 때문이었다. 복잡한 계산 절차를 정하는 가장 효율적인 방법으로는 로스 알라모스의 물리학자들이 ENIAC의 엔지니어들과 터놓고 의논하는 것이었을 터이지만, 보안 규정 때문에 그렇게 할 수 없었던 메트로폴리스 등은 ENIAC의 원리에서부터 세세한 배선까지 직접 배워서 계산을 준비하였던 것이다.³²⁾

한편 올람은 로스 엔젤레스에서 어려움을 겪고 있었다. 당시의 남 캘리포니아 대학에서는 그가 로스 알라모스에서 느꼈던 지적 흥분과 보람을 찾아보기 힘들었다. 더욱이 올람은 그해 초겨울 일종의 급성 뇌염에 걸려 갑자기 혼수 상태에 빠진 끝에 뇌수술을 받았다.³³⁾ 병상에서 올람은 마침 ENIAC계산을 끝내고 로스 알라모스로 가던 메트로폴리스의 방문을 받았다.³⁴⁾ 메트로폴리스는

열린 한 자문회의에 참석한 후 역에서 기차를 기다리다 우연히 애버딘 측과 펜실베이니아 대학 간의 연락 업무를 담당하고 있던 허먼 골드스타인과 대화를 나누면서 ENIAC의 존재를 알았다. Nancy Stern, *From ENIAC to UNIVAC: An Appraisal of the Eckert-Mauchly Computers* (Bedford, Mass.: Digital Press, 1981), pp. 71-72. 한편 올람은 1944년 초 노이만과 몇 시간 동안 이와 관련하여 대화하면서 “더 현실적이고 더 대규모의 수치계산”을 주장하기도 했다. S. M. Ulam, 앞의 책, p. 155.

30) Metropolis and Nelson, 앞의 글, 352 및 William Aspray, *John von Neumann and the Origins of Modern Computing* (MIT Press, 1990), p. 47 그리고 Stern, 앞의 책, pp. 62-63. 이 계산이 완료된 것은 1945년 12월의 일이었다. 한편 이 계산은 1970년대 있었던 특허 소송에서 ENIAC에 대한 특허가 신청된 1947년 6월 16일 이전에 이미 1년 이상 ENIAC이 실제로 공적인 영역에서 업무에 적용되었기 때문에 ENIAC에 대한 특허는 무효라고 선고된 근거가 되었다.

31) Ulam, 앞의 책, pp. 172-173.

32) 주 30을 참조.

33) Ulam, 앞의 책, pp. 174-175.

34) 올람의 회상에 따르면, 나중에 그가 들은 바로는 메트로폴리스의 방문은 혹시 올람이 혼수 상태에서 비밀 정보를 지껄이지 않았는지 살펴보기 위한 것이었다고 한다. 실제로 그는 의식을 회복하였을 때, 중성

자신의 계산에 대해서는 일체 언급하지 않았으나 올람은 로스 알라모스 동료의 방문 자체를 기뻐하였다. 퇴원 후 올람은 자기가 수학적 사고 능력을 잃지나 않았는지 걱정하여 일부러 갖가지 계산과 추론을 해보기 시작하였다. 그러던 중 그는 로스 알라모스로부터 1946년 4월에 있는 극비회의에 참석해 달라는 요청을 받고 이를 자신이 회복되었다고 인정받은 증표로 여겼다.

1946년 4월 18-20일에 걸쳐 로스 알라모스에서 열린 비밀회의는 전후 진행된 핵무기 연구들을 총점검하는 자리였는데, 논의의 초점은 소위 “Super(에드워드 텔러가 주창한 초기 열핵폭탄 디자인)” 문제에 맞추어 졌다.³⁵⁾ 19일에는 메트로폴리스 등이 1945년 말에 행한 열핵반응 계산 결과가 본격적으로 논의되었다. 여기서 올람은 처음으로 ENIAC의 가능성과 한계에 구체적으로 접하였다. 텔러 등 열핵폭탄 개발 지지자들은 그 계산 결과를 “Super”가 유망하다는 뜻으로 해석하였으나 회의 참석자들의 중론은 계산 과정에 도입된 여러 가지 단순화 가정들 때문에 그렇게 볼 수만은 없다는 것이었다. 회의의 결론은 역컴프톤 산란을 고려하는 등 보다 더 현실적인 계산이 필요하다는 것이었는데, 이는 6개월의 준비와 50만장의 펀치카드 그리고 당대 최고속 계산기 상에서 6주에 걸친 연산을 소요한 계산보다 훨씬 더 복잡한 계산을 뜻했다. ENIAC으로 이 계산을 할 수 있을지 회의 참석자들은 확신할 수 없었다. 회의 후 올람은 당시 재정비 중이었던 로스 알라모스 연구소로 돌아와 달라는 요청에 기꺼이 응했다.

로스 알라모스 복귀 후 올람은 다시 앓아 누웠다. 카드 게임광이었던 올람은 병상에서 평소의 습관대로 솔리테어(혼자 하는 카드 게임)를 하다가 주어진 카드 배열을 성공적으로 풀어 낼 확률에 관심이 생겼다. 그는 처음에 순열 조합을 이용하여 경우의 수를 계산하는 방법을 시도하였다 포기하였는데, 그것은 계산 과정에 수십 계승(階乘, $N!$) 같이 현실적으로 계산할 수 없는 숫자들이 등장하였기 때문이었다. 하지만 별달리 할 일이 없었던 올람은 계속 솔리테어를 하다가 게임이 풀리는 경우와 풀리지 않는 카드 배열의 수를 세면 경험적으로 게임을 풀 확률을 추정할 수 있음을 깨달았다. 그런 방법으로 정확한 확률값을 구할 수는 없었지만 적어도 그의 호기심을 충족시킬 수 있을 정도로는 가능하였다. 그는 그와 같은 방식을 비슷한 다른 확률 계산 문제에도 적용할 수 있을 것이라고 생각하였다.³⁶⁾ 즉 이 시점에서 올람의 착상은 미지의 확률값을 통계적 오차를 감수하면서 경험적으로 추정하는 것이었다.

올람은 이 착상이 어떻게 몬테 카를로 방법으로 발전했는지 명확한 기록을 남기지 않았다. 하지만 그가 1946년 중에 절친한 친구였던 노이만에게 자신의 착상을 이야기했다는 것만은 분명하다.

… 나는 1946년에 조니(노이만)와 대화하다가 그런 확률적 방안이 가능하다고 제안하였다. 그것은 우리가 정부의 차를 타고 로스 알라모스에서 레미로 갈 때 있었던 아주 긴 토론 중에서 였다. … 그런데 나는 그 길 어느 모퉁이 어느 바위 근처에서 내가 무슨 이야기를 했는지 오늘날까지 기억한다. … 이 대화 이후 우리는 그 방법의 수학을 함께 개발했다. 내 생각에는 몬테 카를로라는 이름이 이 방법을 유행시

자의 평균자유거리가 생각났었다고 한다. Ulam, 앞의 책, p. 177.

35) Peter Galison and Barton Bernstein, “In Any Light: Scientists and the Decision to Build the Superbomb, 1952-1954,” *Historical Studies in Physical and Biological Sciences* 19 (1989), pp. 267-347 중 pp. 279-280. 좀 더 자세한 기술은 Richard Rhodes, *Dark Sun: The Making of the Hydrogen Bomb* (Simon & Schuster, 1995), pp. 251-255를 볼 것.

36) Ulam, 앞의 책, pp. 196-197. 솔리테어는 주어진 카드 배열이 풀릴 확률이 게임하는 사람의 기술에 무관한 종류와 그렇지 않은 종류가 있는데, 올람이 언급한 것은 전자이다.

키는 데 큰 기여를 한 것 같은데, ...

조니는 이야기 시작한 지 한 시간 정도 좀 회의적이었지만 곧 그것(몬테 카를로)이 큰 영역을 [포괄한다는 것을] 깨달았다. 내가 이런 저런 확률로 개략적인 결과를 얻기 위해 필요한 연산(computation)이 얼마나 되는지에 대한 통계적 추정을 언급하면서 좀 더 설득력있게 말하자, 그는 동의하고 마침내 아주 창의적으로 이 기법들을 실현하고 가속시킬 놀라운 기술적 제책들을 발견하기 시작했다.³⁷⁾

이 대화가 전환점이었다고 단언할 수는 없지만, 노이만의 개입이 방향전환을 가져온 것은 확실하다. 1947년 초 울람과 노이만이 로스 알라모스의 다른 동료들에게 주창한 것은 미지의 확률값을 구하는 방법이 아니라 알려진(또는 추정한) 확률값을 이용하여 문제 풀이 계산을 진행하는 기법이었다. 1947년 3월 7일 프린스턴의 노이만은 로스 알라모스의 리히트마이어(이론 부분 책임자)와 그 얼마전 전 로스 알라모스에서 열린 세미나에 대해 장거리 통화하면서 자기 생각을 정리한 편지를 약속하였다.³⁸⁾ 4일후 발송된 편지에서 노이만은 자기가 울람이 제안한 원리에 따라 “중성자 확산 및 증식 문제를 풀기 위해 통계적 방법을 사용할 가능성에 대해 많이(good deal) 생각해 보았는데,” “생각하면 생각할수록 이 착상이 엄청난 장점이 있다고 확신하게 되었다”고 단언하였다.

이 편지의 대부분은 구체적인 계산 모형과 절차를 기술한 것이었다. 그는 동심구각들로 나누어진 구체를 상정하고 자신이 고안한 계산 절차를 기술하기 시작하였는데, 그러한 구체는 핵분열 장치의 형태를 추상화시킨 것이었다. 각각의 동심구각에는 “활성재”(active material: 핵분열 물질), “조절재”(temper material), 그리고 “감속재”가 일정한 비율로 섞여 있었다. 그가 생각한 구도는 구체의 중심에서 중성자가 일정한 속도 V_0 로 튀어나온 후 겪는 과정을 일일이 추적해 보는 것이었다. 그 중성자는 직선으로 날아가 운동 종점에서 매질과 ‘충돌’하여 핵분열을 일으키거나 산란되거나 흡수되었다. 충돌 후 운동방향과 속도는 매질에 무관하게 확률적으로 결정되지만, 충돌할 때까지의 비거리 및 종점에서 겪는 반응의 종류와 결과를 지배하는 확률들은 각각의 구각을 형성하는 물질들의 성질과 비율에 좌우되었다. 이런 확률적 사건들을 결정하기 위해 노이만은 한 중성자의 1회 비행에 7개의 난수를 할당하였다.

구체적으로 그는 5개의 변수와 7개의 난수가 찍힌 편지카드 한 장을 중성자 하나로 놓았다. 5개의 변수는 중성자가 위치한 구각의 번호, 구심과 중성자 사이의 거리, 중성자의 운동방향, 속도 그리고 구심에서 출발한 후 흐른 시간들이었다. 이 숫자들을 기초로 그 중성자의 다음 상태(5개의 변수)를 계산하여 구체를 벗어나거나 속도가 0이 된 중성자(편지카드)를 제외하고, 그 값들을 새 편지카드에 찍은 후, 표에서 읽어들이거나 계산한 7개의 난수 값을 그 편지카드에 찍으면 1회의 계산이 완료되는 구도였다. 이와 같은 절차로 100개의 중성자들이 각각 겪는 100회의 반응을 추

37) Ulam, 앞의 책, p. 199.

38) John von Neumann, Letter to R. Richtmyer, March 11, 1947. 이 편지가 그대로 “Statistical Methods in Neutron Diffusion” LAMS-551 (April, 9, 1947), work done by S. Ulam & J. von Neumann, written by J. von Neumann & R. D. Richtmyer의 앞부분이 되었고, 이 보고서는 S. M. Ulam, *Analogies between Analogies*, pp. 17-36에 재록되었다(참조는 재록본에서). 울람은 근 30년 후 단지 로스 알라모스에 돌아온 지 얼마 안돼 서 두 번 세미나 발표를 했는데, 그 중 나중 것이 장차 몬테 카를로라고 불리게 될 그의 착상에 대한 것이었다고 하였을 뿐이다. Ulam, 앞의 책, p. 195. 회상의 문맥상 그의 두 번째 세미나가 노이만이 리히트마이어에게 언급한 그 세미나로 추측되지만 단언할 수는 없다. 울람이 말한 세미나는 당시 로스 알라모스에서 매주 토요일에 열렸던 ‘비공식적’ 세미나였을 것으로 추측된다.

적해 보면 중성자 확산 및 증식 문제를 해결할 수 있을 것이라고 노이만은 추정하였다.

노이만은 자기가 기술한 절차로부터 計算員(computer)에게 줄 작업 지시서를 어렵지 않게 작성해 낼 수 있을 것이라고 언급하였지만, 자신은 그 계산을 ENIAC 상에서 수행할 작정이었다. 사실 설정된 계산 모형 자체가 ENIAC의 특성을 염두에 둔 것이었다. ENIAC은 시간이 오래 걸리는 초월 함수(삼각 함수, 로그함수 등등)의 값 계산을 직접 하지 않고, 미리 준비된 함수값들을 “함수표”(function table)라고 불린 판 모양의 장치에 저장한 다음 필요한 값을 읽어 들이는 구조였다.³⁹⁾ 만일 미리 준비하지 않은 값이 필요하다면 “함수표”에 저장된 인접 값들을 내삽하여 그 값을 구하였다. 노이만은 이 “함수표”에 구체를 이루는 물질들의 분열·산란·흡수 단면적과 각 구각에 그 물질들이 섞인 비율, 그리고 구각들의 직경을 저장할 수 있다고 생각하였다. 이렇게 되면 동일한 계산 절차 즉 같은 배선으로도, 단지 다른 값들이 저장된 “함수표”를 바꾸어 끼움으로서 금방 새로운 문제(즉 새로운 원자폭탄에서의 중성자 확산)를 계산할 수 있었다. 중성자 산란 계산 문제는 워낙 복잡하기 때문에 노이만은 과연 자기 구도대로 ENIAC을 설정할 수 있는지는 좀 더 따져 보아야 하지만 아마도 별 문제 없을 것이고 일단 설정되면 100개의 중성자가 100회씩 겪는 1만회의 반응을 계산하는 데 약 5시간 정도가 걸릴 것이라고 짐작하였다. 계산이 끝난 후 펀치카드들을 펀치카드 분류기에 걸어 특정한 조건을 만족하는 펀치카드의 수를 세면 중성자 분포에 대한 다양한 정보를 얻을 수 있다고 노이만은 생각하였다.

노이만은 이런 식으로 문제를 해결할 수 있다고는 언급하였지만, 그가 생각하는 문제는 중성자 증식 및 확산을 정확하게 계산해 내는 것이 아니었다. 그는 중성자의 행동을 정밀하게 흉내냄으로써 얻으려고 하였던 것은 보다 정확한 문제 풀이 방법을 찾기 위한 단서들이었다.⁴⁰⁾ 또 그는 자신이 제안한 모형이 제한적임을 분명히 하였다. 펀치카드에는 80개의 숫자를 표시할 수 있는데, 노이만의 계산 방법은 7자리 수인 변수 5개, 5자리 수인 난수 7개를 사용하였으므로 모두 70자리를 사용하였다. 그는 나머지 10자리를 장치 각 입자를 더 자세히 구별하기 위한 추가 색인으로 이용할 수 있다고 하였다. 그가 어떤 종류의 색인이 필요하게 될지 확신하지는 못했지만 계산 구도를 조금만 바꾸면 핵분열 반응을 통해 생긴 2차 중성자를 쉽게 구별할 수도 있고, 광자를 다른 종류의 입자로 설정하면 광자의 생성과 중성자와의 충돌—컴프턴 및 역컴프턴 산란—도 하여 어렵지 않게 포함시킬 수 있다고 언급하였다.

노이만의 편지는 로스 알라모스에서 “상당한 관심”과 토론을 불러 일으켰고, 그의 구도에 따른 계산을 시작한 사람도 있었다.⁴¹⁾ 4월 2일에는 리히트마이어가 대표로 노이만에게 답장을 하였는데, 이 답장은 로스 알라모스 측에서 노이만의 구도보다 좀 더 실용적인 계산을 고려하였음을 보여준다. 리히트마이어는 복잡하게 각 구각들에 “활성재,” “조절재,” “감속재”를 모두 포함시킬 것이 아니라 한 구각이 한 종류의 물질로 이루어져 있다고 설정할 것을 제안하였다. 특히 플루토늄으로 이루어진 “활성재” 구체가 우라늄 239로 이루어진 “조절재” 구각에 싸여 있는 모형을 언급

39) ENIAC은 3개의 “함수표”를 갖고 있었고, 각각의 “함수표”는 104개의 12자리 숫자를 저장할 수 있었다. ENIAC의 구조에 대한 기술은 여러 가지가 있으나 H. H. Goldstein and Adele Goldstein, “The Electronic Numerical Integrator and Computer”, *Mathematical Tables and other Aids to Computation* 2 (1946) (*IEEE Annals of the History of Computing* 18: 1 (Spring 1996), pp. 10-16에 재록)이 표준이다.

40) John von Neumann, Letter to R. Richtmyer, March 11, 1947. S. M. Ulam, *Analogies between Analogies*, pp. 20-21.

41) R. Richtmyer, Letter to John von Neumann, April 2, 1947. 이 편지가 그대로 “Statistical Methods in Neutron Diffusion” LAMS-551 (April, 9, 1947)의 뒷부분이다.

하였는데, 이는 당시 고려되던 개량형 원자폭탄 안이었다. 또 리히트마이어는 한 중성자가 거둬하는 충돌을 각각의 중성자에 대해 따라가 볼 것이 아니라, 구심에서 동시에 출발한 중성자들이 겪는 상황들을 일정한 시간 간격 Δt 를 단위로 계산해 나가면 어떻겠느냐고 제안하였다. 이렇게 하면 계산 과정이 좀 더 복잡해지고 시간도 오래 걸리겠지만, 폭발 시작 후 진행되는 핵분열 반응의 공간적 분포를 쉽게 알 수 있는 장점이 있다고 지적하였다. 리히트마이어들이 제안한 계산 절차는 마치 핵폭발 과정을 Δt 간격으로 시각화하려는 것과 마찬가지였다.

노이만의 편지와 리히트마이어의 답장은 일주일 후 “중성자 확산에 관한 통계적 방법”이란 제목으로 묶여 로스 알라모스에서 정식 보고서로 간행되었다. “몬테 카를로 방법에 대해 처음 인쇄된 착상이자 제안”이었던 이 보고서는 단지 8부만 인쇄될 정도로 비밀로 취급받았지만, 로스 알라모스 안에서만큼은 많은 사람의 주목을 받았다.⁴²⁾ 메트로폴리스가 올람의 친척 중에 몬테 카를로 도박장에 열성인 사람이 있는 것을 빗대어 올람과 노이만의 제안 즉, 난수를 사용하여 중성자 운송현상(transport phenomena)을 흉내내는 것에 “몬테 카를로”라는 이름을 붙인 것도 이 무렵이었다.⁴³⁾

올람과 노이만은 1947년 상반기에 걸쳐 원하는 분포를 따르는 난수들을 계산해 낼 방법을 의논하는 등 몬테 카를로 계산을 구현할 준비를 진행하였지만, 그 계산은 바로 실현될 수 없었다. 완성된 ENIAC을 발주처인 애버딘의 육군 탄도학 연구 실험소(Aberdeen Ballistics Research Lab.)로 옮기기도 결정이 나서 이미 1946년 11월 9일에 ENIAC 해체가 시작되었기 때문이다.⁴⁴⁾ 애버딘에서 ENIAC은 간신히 재조립되어 1947년 7월 29일부터 작동 상태에 들어갔지만, 바로 이용할 수 없었다. ENIAC이 애버딘의 계산 연구실 측의 제안으로 제한적이거나 프로그램 내장형 컴퓨터로 개조되기 시작한 것이었다.⁴⁵⁾ 메트로폴리스와 클라리 노이만(존의 부인)이 실행한 이 작업은 1948년 초에야 완결되었다. 그제야 노이만과 메트로폴리스는 새 ENIAC을 사용하여 후일 메트로폴리스가 “원래의 몬테 카를로”라고 부른 계산들을 시작할 수 있었다. 총 9개의 이 계산 문제들은 1947년 봄에 고려된 핵분열 문제들이 아니라 핵융합 반응 문제들이었다. 그 계산 결과들은 통계적 오차 범위 내에서 당시까지의 실험 결과들과 어긋나지 않는 것이어서, 몬테 카를로가 상당히 효율적인 계산법임이 입증된 것으로 여겨졌다.⁴⁶⁾

한편 몬테 카를로의 효율성이 입증되기 이전에 이미 올람과 노이만은 자신들의 방법을 일반화하고 전파하기 시작하였다. 그들은 1947년 9월 2-5일간 예일 대학에서 열린 미국 수학회 여름 모임에 참석하여 3일에 자신들의 고안에 대한 간결하지만 요점을 빠뜨리지 않은 초록을 제출하고 5일에 해석학 분과에서 구두로 발표하였는데,⁴⁷⁾ 초록은 입자나 중성자를 전혀 언급하지 않고 미분

42) 인용구는 Ulam, *Analogies between Analogies*, p. 17의 올람 자신의 주석에서. 또한 같은 책 p. 16의 LAMS-551 표지 사진을 참조할 것.

43) N. Metropolis, “The Beginning of the Monte Carlo Method,” *Los Alamos Science Special Issue* (Los Alamos, NM: Los Alamos National Lab., 1987), pp. 125-130 중 p. 127. 이 시기 로스 알라모스에서 몬테 카를로 방법이 개발되는 과정에서 중요한 역할을 한 올람, 노이만, 메트로폴리스, 페르미 중 올람과 메트로폴리스만이 그에 대한 회상을 남겼다. 올람의 회상은 그의 최초 착상을 전후한 부분과 자신의 작업에만 국한되었기 때문에 전반적인 상황에 대한 회상으로는 메트로폴리스의 것이 유일하다. 그런데 그의 회상은 디지털 계산기기를 사용한 대규모 작업만을 몬테 카를로 방법의 주류로 여기는 경향이 농후하다.

44) Stern, 앞의 책, p. 62.

45) N. Metropolis and J. Worlton, “A Trilogy on Errors in the History of Computing,” *Annals of the History of Computing* 2: 1 (1980), p. 54.

46) N. Metropolis, “The Beginning of the Monte Carlo Method,” p. 128.

47) “The Summer Meeting in New Haven,” *Bull. Amer. Math. Soc.* 53: 11 (1947), pp. 1100-1133. 올람과

방정식 풀이에 초점을 맞춘 것이었다. 그 후로도 올람과 노이만은 곳곳에서 몬테 카를로 방법을 “선전”(propaganda)하였다.⁴⁸⁾ 전통적인 수치해법으로는 고속 디지털 컴퓨터를 사용할지라도 다변 수 적분값을 구하기는 어렵지만 몬테 카를로 방법으로는 빨리 답을 얻을 수 있다고 주장하였다.⁴⁹⁾ 나아가 그들은 통계역학이 아주 많은 입자들로 이루어진 계만을, 역학이 불과 몇 개의 물체의 운동만을 대상으로 한다면 몬테 카를로 방법은 양자가 적절하게 다루지 못했던 중간 규모의 계를 다루기 때문에 몬테 카를로 방법이 통계역학이나 역학에 비견될 만한 것이라고까지 주장하기도 하였다.⁵⁰⁾ 이러한 노력과 선전에 힘입어 몬테 카를로 방법은 한정된 상황에 적용되는 특수한 계산법에서, 미적분 계산에서 역행렬 계산까지 광범위한 대상에 응용될 수 있는 일반적인 계산법으로 변모하기 시작하였다.⁵¹⁾

4. 그림 몬테 카를로의 등장과 전개

ENIAC이 작동 중지 상태에 있는 동안 로스 알라모스에서는 새로운 방향으로의 전개가 시작되었다. 여름방학 기간에 방문한 페르미가 노이만의 구도를 접하고 그것을 시각화하는 간단한 장치를 발명한 것이었다.⁵²⁾ 페르미는 간단한 어려셈으로 물리량의 크기를 추정하는데 뛰어난 재능을 지녔었다. 1930년대 로마에서 열중성자를 이용하여 동위원소를 대량 생산·발견하던 시절에도 그는 아침마다 상당히 정확한 실험결과 예측치를 내놓아 동료들이 경탄하곤 했었다. 불면증 때문에 새벽녘까지 잠들기 기다리는 동안 그는 브룬스비가 탁상용 계산기와 간단한 통계적 표본 추출로 어려셈을 하였던 것이다. 당시에 자신의 계산법을 진지한 것으로 여기지 않았던 페르미는 즐거움의 비밀을 상세히 설명하지 않았고, 그의 동료들도 페르미의 비결을 구태여 밝히려 들지 않았다.⁵³⁾ 하지만 1947년 여름의 로스 알라모스에서 난수를 사용하는 어려셈은 전례없이 주목받는 주제였다.

그가 만든 장치는 원통에 실린 대차와 그것에 달린 펜으로 이루어진 간단한 것이었다(그림 2)

노이만이 발표한 초록 “On the Combination of Stochastic and Deterministic Processes. Preliminary Report”는 p. 1120에 실려 있다. 이 초록은 이 모임에서 구두로 발표된 것들 중 가장 나중에 제출된 것이었다.

48) Ulam, *Adventure*, p. 200.

49) S. M. Ulam, “The Monte Carlo Method,” June 29, 1949, Stanislaw Marcin Ulam Papers, American Philosophical Society Library.

50) Nicholas Metropolis and S. Ulam, “The Monte Carlo Method,” *Journal of the American Statistical Association* 44 (Sep., 1949), pp. 335-341

51) J. H. Curtiss and E. F. Bekenbach, “Symposia on Conformal Mapping and the Monte Carlo Method,” *Science* 110 (October 7, 1949), pp. 350-351. “NBSINA,” *Mathematical Tables and other Aids to Computation* 3: 28 (1949), pp. 545-547. G. E. Forsythe & R. A. Leibler, “Matrix inversion by a Monte Carlo method,” *Mathematical Tables and other Aids to Computation* 4 (1949), pp. 127-129. 제목의 “a Monte Carlo method”라는 표현에 유의할 것. 이 무렵부터 몬테 카를로 방법에 여러 종류가 있다는 생각이 표출되기 시작하였다. 주 3 참조.

52) N Metropolis, “The Los Alamos Experience, 1943-1954,” Stephen G. Nash, ed., *A History of Scientific Computing* (ACM Press, 1990), pp. 237-250 중 p. 246.

53) Herbert L. Anderson, “Metropolis, Monte Carlo, and the MANIAC,” *Los Alamos Science* (Fall 1986), pp. 96-107 중 pp. 98-99.

54) 이 장치는 다음과 같이 사용하였다. 먼저 그림에서 볼 수 듯이 커다란 종이 위에 동심원들을 그린다. 서로 다른 빗금으로 구별된 구역들은 각기 다른 물질들로 만들어진 구각을 뜻했고, 동심원들의 지름은 핵분열 장치를 구성하는 구각들의 지름에 비례하였다. 그 다음 중심에 대차의 펜을 놓고, 우선 두 개의 난수를 써서 중성자의 운동방향과 비거리를 정하는데, 비거리는 매질의 성질(중성자 산란 단면적)과 난수에 의해 결정된다. 정해진 비거리만큼 대차를 끌면, 펜이 중성자의 궤적을 그린다. 궤적의 종점에서 다시 난수를 써서 일어나는 반응의 종류를 정하는데, 만일 중성자가 흡수되면 중심에서부터 다시 시작하고 그렇지 않으면 튀어나온 중성자들의 비거리와 방향을 또 다시 난수를 써서 결정한다. 이렇듯 단지 3개의 난수를 사용하는 과정을 반복하면 그림에서 볼 수 있듯이 몇 개의 동심 구역으로 구성된 '장치'의 중심에서 출발한 중성자의 궤적과 그것이 겪는 반응들이 그려진다.

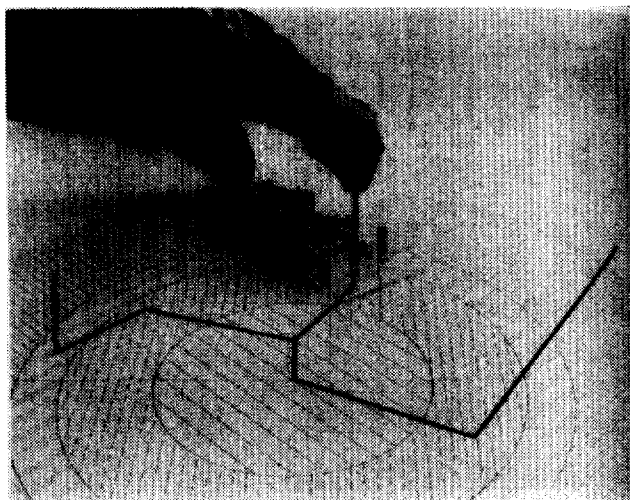


그림 2. FERMIC을 사용하는 모습. 출처: Stephen G. Nash, ed., *A History of Scientific Computing* (ACM Press, 1990), p. 246.

이와 같은 구도는 동심체들로 장치를 표상하였다는 점, 중성자가 중심에서 출발해서 바깥쪽으로 진행되는 구도라는 점, 중성자가 지나가는 매질을 연속체로 가정한다는 점 그리고 무엇보다도 중성자 하나 하나의 궤적을 추적한다는 점에서 노이만의 구도와 같은 것이었다. 하지만 두 가지 점에서 페르미의 구도는 노이만의 그것과 달랐다. 현상을 되도록 충실하게 흉내내려고 했던 노이만은 연속적인 속도 분포 함수를 이용하여 중성자의 속도를 다양하게 하였지만, 페르미는 중성자의 속도를 단지 고속과 저속 두 가지만 있다고 가정하여 계산 과정을 단순화하였다. 또한 노이만은 "구각"(shell)이라는 표현을 써서 자기 모형이 실제 장치처럼 3차원적임을 강조하였지만, 페르미는 '장치'를 종이 위에 그림으로서 그것이 실제의 제한적인 표상에 불과함을 분명히 하였다.

현상의 재현이라는 측면에서 페르미의 구도는 후퇴라고 할 수 있지만, 계산의 목적을 생각하면 오히려 발전이라고 할 수 있었다. 노이만의 구도도 목적은 주어진 조건 아래서 중성자들의 행동 양상의 특징을 파악함으로써 만족할 만한 문제 풀이 방법을 찾아내는 것이었다. 그렇다면 핵분열 과정에서 뚜렷한 차이를 보이는 저속 중성자와 고속 중성자의 차이에 주목하는 것이 비슷한 속도의 두 중성자가 보이는 미세한 차이까지 공들여 살펴보는 것보다 더 효율적이었다. 작업 대상을 입체에서 평면으로 바꾼 것도 별다른 문제를 일으키지 않았다. 노이만도 실제 계산 절차를 기술할 때에는 중성자가 마치 평면상에서 운동하는 것처럼 중성자의 위치를 두 개의 변수만으로 표현했던 것이다. 오히려 '장치'를 평면상에 그림으로써 페르미의 구도는 새로운 장점과 특성을 지니게 되었다.

현상의 재현이라는 측면에서 페르미의 구도는 후퇴라고 할 수 있지만, 계산의 목적을 생각하면 오히려 발전이라고 할 수 있었다. 노이만의 구도도 목적은 주어진 조건 아래서 중성자들의 행동 양상의 특징을 파악함으로써 만족할 만한 문제 풀이 방법을 찾아내는 것이었다. 그렇다면 핵분열 과정에서 뚜렷한 차이를 보이는 저속 중성자와 고속 중성자의 차이에 주목하는 것이 비슷한 속도의 두 중성자가 보이는 미세한 차이까지 공들여 살펴보는 것보다 더 효율적이었다. 작업 대상을 입체에서 평면으로 바꾼 것도 별다른 문제를 일으키지 않았다. 노이만도 실제 계산 절차를 기술할 때에는 중성자가 마치 평면상에서 운동하는 것처럼 중성자의 위치를 두 개의 변수만으로 표현했던 것이다. 오히려 '장치'를 평면상에 그림으로써 페르미의 구도는 새로운 장점과 특성을 지니게 되었다.

노이만의 구도에서는 기계가 처음 설정된 일관작업을 모두 마친 후에 펀치카드에 찍힌 구멍들을 검사할 때에서야 목적하는 바 중성자들의 행동 양상의 특징을 파악할 수 있었다. 반면에 페르

54) N. Metropolis, "The Beginning of the Monte Carlo Method," pp. 128-129.

미의 구도는 중성자의 궤적을 시각적으로 확인하며 직접 그려 나가는 식으로 진행되기 때문에 작업 도중에 중성자들의 행동을 직관적으로 이해할 수 있었다. 더욱이 처음에 설정한 모든 중성자에 대해 계산을 일률적으로 진행할 필요도 없었다. 계산 도중 원하는 결과가 얻어졌다고 판단되면 언제든지 중지할 수도 있었고, 예상과 다른 행동을 보이거나 유난히 관심을 끄는 중성자들이 등장하면 그들의 경로만을 집중적으로 추적할 수도 있었다. 게다가 작업 도중에 내리는 이런 판단과 결정은 목적하는 이해의 일부분이기도 하였다. 페르미 구도의 또 다른 이점은 그것이 더 유연하게 변형될 수 있다는 점이었다. 컴퓨터 상에서 계산하기 위해서는 핵반응 장치를 구성하는 각 요소의 형태를 수식으로 표현해야 했다. 대상물이 원 또는 구 같이 단순한 모양이 아니라면 그것을 수식으로 표현하는 것도 문제였고, 만들어 낸 수식을 용량이 제한된 기억장치에 제대로 입력할 수 있는지는 또 다른 문제였다. 하지만 페르미 구도에서는 도면에 ‘장치’를 그리는 것으로 준비가 끝났다. 즉 ENIAC 상의 작업은 단위 연산은 빨리 진행되지만 작업 준비에 많은 노력이 필요하고, 전체 작업이 끝날 때까지 기다려야 원하는 결과를 얻을 수 있지만 페르미의 장치를 사용하면 연산속도는 느릴지라도 적은 준비로 작업을 해 나가며 중성자들의 행동 양상을 관찰할 수 있었다.

이러한 점들 덕분에 페르미의 구도는 노이만이 준비하고 있던 ENIAC 계산과 닮으면서도 훨씬 적은 노력과 자원으로 그것을 어느 정도 대신할 수 있는 것이었다. 로스 알라모스의 일부에서는 페르미의 발명을 ENIAC에 빗대어 Fermiac이라고 부르기 시작하였는데, 한 2년간 Fermiac은 원자폭탄보다 내부 구조가 훨씬 더 복잡한 원자료를 설계할 때에도 “광범위하게” 사용되었다.⁵⁵⁾ 그런데 페르미의 구도는 도형으로 표현될 수만 있다면 어떤 물체에 대해서도 중성자의 행동을 따져 볼 수 있었다. 페르미는 이 점을 놓치지 않았다.

1948년 7월 시카고 대학에서 그해 학위를 받은 골드버거가 “무거운 핵과 고에너지 중성자의 상호작용”라는 논문을 제출하였다.⁵⁶⁾ “페르미의 제안과 조언에 따라” 씌여졌다고 밝힌 이 논문은 학술지에 게재된 논문으로는 최초로 몬테 카를로 방법을 사용한 것이었다.⁵⁷⁾ 이 논문에서 골드버거는 1947년에 버클리 방사 연구소(Radiation Laboratory)의 서버가 제안한 모형에 기초해서 핵에 입사하여 산란된 중성자들의 각 분포와 에너지 분포를 계산하였다.⁵⁸⁾ 2차대전 전에는 핵에 입사한 중성자의 에너지가 중성자와 양성자들로 이루어진 유체인 핵 전체에 일단 흡수된 후 열역학적 증발 과정에 의해 핵에서 중성자가 튀어나온다고 보았는데, 전후 이 모형이 고속 중성자의 경우에는 잘 맞지 않는다는 것이 알려졌다. 이에 서버는 핵에 입사한 중성자가 핵 내부의 양성자 또는 중성자와, 에너지 손실이 적은 일대일 충돌을 여러 번 겪는다고 가정하는 모형을 제안하였다. 골드버거는 서버의 모형에 따라 입사 중성자가 단 1회의 충돌만 겪는다는 가정 아래 산란된 중성자의 분포를 해석적으로 계산하고, 입사 중성자가 여러 번 충돌을 겪을 수 있다는 조건하에서는 자신이 “울람과 노이만에 의해 개발된 방법”이라고 부른 통계적 방법을 이용하여 계산하였다.

골드버거가 상정한 계산 모형은 노이만과 페르미의 선례를 약간만 변조한 것이었다. 차이점은 중성자가 원의 중심에서 출발하지 않고 원의 외부에서 입사한다는 점 뿐이었다. 하지만 원이 표상하는 대상이 거시적인 핵분열 장치에서 미시적인 핵으로 바뀌었기 때문에 계산 모형을 정당화

55) N. Metropolis, 앞의 글, p. 129.

56) M. L. Goldberger, “The Interaction of High Energy Neutrons and Heavy Nuclei,” *Physics Review* 74: 10 (Nov. 15, 1948), pp. 1269–1277 (Received July 20, 1948).

57) M. L. Goldberger, 앞의 글, p. 1277.

58) R. Serber, “Nuclear Reactions at High Energies,” *Physical Review* 72 (Dec. 1, 1947), pp. 1114–1115 (Received on Oct. 13, 1947).

하는 데 약간의 문제가 발생하였다. 핵 내부에서 입사 중성자와 핵자가 입자로서 일대일 충돌한다고 보는 것은 명백히 고전적인 관점이었던 것이다. 그는 핵에 입사한다고 상정한 90MeV 중성자의 파장이 핵의 지름보다 충분히 작기 때문에 일단 고전적 모형을 정당화할 수 있다고 하였다. 핵 내부에서 중성자 대 중성자 및 양성자 대 중성자의 산란 단면적의 비율도 확실하지 않았는데, 그는 서버의私信을 인용하여 전자가 후자의 1/4 정도라고 놓았다. 여기에 파울리 배타원리에 위배되지 않는 충돌만 일어나고 충돌시 일어나는 반응의 종류가 확률적으로 결정된다는 조건을 적용함으로써 골드버거는 반은 고전적이고 반은 양자적인 계산 모형을 만들었다.

골드버거가 울람과 노이만의 이름을 밝히고 그들의 1947년 미국 수학회 발표를 각주에 인용하였지만 정작 그가 사용한 방법은 울람과 노이만의 발표와는 달랐다. 울람과 노이만의 발표문에는 “입자”나 “중성자”는 전혀 언급되지 않았지만 골드버거는 많은 중성자들이 겪는 과정을 세세하게 추적하는 것을 그 방법의 요체로 제시하였다. 또한 울람과 노이만은 특정한 물리적 상황에서 나타나는 분포를 따르는 난수열을 만드는 방법들에 대해 언급하였지만, 골드버거는 선택할 물리량의 분포를 같은 확률을 지닌 구간들로 나누어 그 중 한 구간을 균일한 분포를 지닌 난수열에 따라 선택하는 방법을 사용하였다. 이러한 차이점에도 불구하고 골드버거는 “명백하게, [입자들의] 수가 충분히 많게 하면, 그 문제의 정확한 해가 얻어질 것이다”라고 주장할 정도로 자신이 사용한 방법을 대단히 신뢰하였다.⁵⁹⁾ 골드버거의 계산 절차와 방법을 보면 그가 페르미의 구도에 따라 작업하였음을 알 수 있는데, 그러한 정확성에 대한 강조는 페르미의 구도와도 어울리지 않는 것이었다.

골드버거의 계산은 다음과 같이 진행되었다. 첫 번째 단계로 중성자가 핵 안으로 충돌 없이 입사해 들어가는 거리를 구하고, 두 번째로 중성자와 충돌하는 핵자가 지니고 있는 운동량을 결정하고, 세 번째는 중성자가 그 입자에 부딪혀 산란되는 각도를 정하는 것이었다. 이렇게 정한 각도 값에 에너지 및 운동량 보존 법칙을 적용하면 충돌 후 두 입자의 운동량이 결정되었다. 네 번째 단계에서는 계산된 충돌이 파울리 배타원리에 위배되는지 따져 본다. 문제가 없으면 그 두 입자 각각에 대하여 그들이 핵 내에 흡수되거나 튀어 나갈 때까지 앞의 4단계를 반복하며 추적하고, 만일 위배되면 첫 번째 단계로 돌아가서 입자의 운동거리를 다시 구하였다.

골드버거는 100개의 입사 중성자에 대하여 1948년에 시카고에서 학위를 받은 추와 함께 꼬박 2주일 동안 “그림을 도구로 사용하여” 그러한 계산을 하였다. 그는 정확한 해를 얻기 위해서는 입사 입자 수가 더 많아야 할 것이지만 그리되면 “기계”를 사용하여야 할 뿐만 아니라 100개 정도로도 계산 결과에 “확실한 경향”이 나타났다고 언급하고, 해석적 방법으로 계산을 진행한다면 엄청난 시간이 걸릴 것이라는 이유를 들어 그림을 계산 도구로 사용하는 것을 간단히 정당화하였다.⁶⁰⁾

계산의 첫 세 단계는 확률적 사건의 결과를 정하는 것들이었는데, 이를 위해 골드버거 등은 대상 물리량들을 동등한 확률을 지니지만 각각의 폭은 다른 구간들로 나누었다. 핵 안에서 입자가 충돌할 때까지 이동하는 거리는 1000개의 구간으로, 충돌당하는 입자의 운동량을 20개의 구간으로, 마지막으로 산란각은 실험값들에 근거해서 5개의 구간으로 나누었다. 그런데 아무리 계산에 사용된 방법이 원칙적으로 정확한 결과를 낼 수 있다고 하여도, 산란각과 운동량이 5개와 20개의 값 중 하나씩만 갖는다는 가정 아래 진행된 작업의 결과를 정확하다고 주장하기는 힘들었다. 다행히 입사 중성자가 핵 내에서 1회의 충돌만 겪는다는 가정에 행해진 해석적 계산과, 여러 번

59) M. L. Goldberger, 앞의 글, p. 1274 (필자 강조).

60) M. L. Goldberger, 앞의 글, p. 1275.

의 충돌을 겪을 수도 있다는 조건하에서 통계적으로 진행된 계산은 비슷한 결과를 내었다. 두 계산이 산출한 출사 입자들의 에너지 분포 및 각 분포에 별 차이가 없었던 것이다. 골드버거는 이를 통계적 계산법으로 계산해 보아도 1회의 충돌만 겪은 출사 입자들이 많기 때문이라고 풀이하였다. 즉 새로운 계산법의 결과가 옛 계산법의 전제조건을 정당화한다는 것이었다. 하지만 이는 새 방법의 매력을 감소시킬 수도 있었다. 두 방법이 서로 비슷한 결과를 내놓는다면, 단순히 보이는 수작업을 오랜 시간 동안 반복할 필요가 무엇인지 분명하지 않았다.

골드버거는 명시적으로 이 문제를 고려하지는 않았지만 그가 제시한 출사 입자들의 에너지 분포 다이어그램이 간접적인 답이 되었다. 골드버거의 해석적 계산으로는 출사 입자의 에너지는 출사각의 함수로만 주어졌지만, 통계적 방법으로는 출사 입자 전부의 에너지 분포를 쉽게 얻을 수 있었다. 그 분포를 표현한 다이어그램의 고 에너지 영역에서 갑작스런 봉우리가 나타나는데, 골드버거는 그 봉우리가 “진짜(real)인 것으로 믿어진다; 그것은 핵에서 탈출하기 이전에 단지 1번의 충돌만 겪는 많은 입자들에 대응한다”고 지적하였다.⁶¹⁾ 즉 새 방법은 옛 방법으로는 찾기 힘든 특징적 현상들을 쉽게 보여준다는 것이었다. 하지만 여기에도 문제가 있었다. 골드버거는 표본의 수가 많지 않다는 이유로 출사입자들을 10개 내지 15개 썩 7개의 집단으로 적당히 묶어 다이어그램을 그렸던 것이다. 그는 “다이어그램의 구간들은 적절히(reasonably) 매끄러운 곡선을 주기 위해 선택된 것이므로 관련된 통계적 정밀도의 척도를 보여주는 것으로 간주되어서는 안 된다”고 할 수밖에 없었다.⁶²⁾ 즉 골드버거는 원칙적으로 정확할 수 있다고 주장한 방법을 임의적으로 구성된 다이어그램의 형태로써 옹호하였던 것이다.

전쟁 중에 로스 알라모스에서 중성자 수를 연속량으로 취급하였던 서버가 이끄는 버클리 그룹은 골드버거가 소개한 통계적 계산법에 관심을 표현하지 않았다. 그들은 1949년 초에 발표한 논문에서 골드버거의 논문을 인용하였지만, 인용된 내용은 핵 내에서 파울리 배타원리의 효과를 감안한 중성자-양성자 산란 단면적이 자유로운 중성자-양성자 산란 단면적의 2/3에 불과하고 중성자-중성자 산란 단면적은 다시 중성자-양성자 산란 단면적의 1/4에 불과하다는 추정이었다.⁶³⁾ 사실 골드버거는 서버의 사신을 인용하여 그러한 추정을 정당화하였지만 정작 서버 등은 그 점을 전혀 언급하지 않았다. 그들은 골드버거의 것과 유사하게 설정된 문제를 해석적인 방법으로 풀었고, 골드버거가 제시한 새로운 방법에 대해서는 전혀 언급하지 않았다. 골드버거와 추도 더 이상 통계적인 방법을 사용하지 않았다. 그들은 1949년 버클리에서 머무르면서 버클리 방사 연구소의 184인치 사이클로트론에서 나오는, 그들의 예상과 다르거나 예상하지 못했던 실험 결과들을 설명하기 위해 논문을 쓰기도 했지만 더 이상 통계적 방법을 사용하지는 않았다.⁶⁴⁾ 게다가 1950년 초 버클리의 해들리와 요크는 당시까지 버클리 184인치 사이클로트론에서 행해진 90MeV급 중성자 산란 실험을 총괄하면서 “관찰된 [2차 입자들의] 각분포와 에너지분포는 골드버거의 예측과 맞지 않는다”라고 단언하였다.⁶⁵⁾ 또한 그들은 핵에서 튀어나오는 입자가 회절을 겪을 것이라는 서버의 지적을 소개하면서 골드버거의 계산 모형을 비판하였다. 즉 깊은 바다에서 해변으로 진행되는 파

61) M. L. Goldberger, 앞의 글, p. 1277.

62) M. L. Goldberger, 앞의 글, p. 1276 (필자 강조).

63) S. Fernbach, R. Serber, T. B. Taylor, “The Scattering of High Energy Neutron by Nuclei,” *Physical Review* 75: 9 (1949. 5. 1), pp. 1352-1355 (Received 1949. 1. 19).

64) G. F. Chew and M. L. Goldberger, “The Production of Fast Deutrons in High Energy Nuclear Reactions,” *Physical Review* 77 (Feb. 15, 1950), pp. 470-475 (Received on Oct. 11, 1949).

65) James Hadley and Herbert York, “Protons and Deutrons Ejected from Nuclei by 90-MeV Neutrons,” *Physical Review* 80 (Nov. 1, 1950), pp. 345-354 (Received on Feb. 16, 1950).

도가 해변에 가까워지면서 꺾이는 바와 마찬가지로 핵 내부의 위치 에너지 우물 속에 있다가 핵 바깥으로 나오는 양성자의 물질과는 핵 내·외부의 경계에서 굽어 진행할 것이라는 것이었다. 이는 핵의 지름이 충분히 크기 때문에 핵에 입·출사하는 중성자와 양성자를 고전적인 입자로 다룰 수 있다는 골드버거의 1948년 가정을 부인하는 것이었다. 더욱이 그들 논문의 이론적 부분들은 서버, 골드버거, 추와 논의를 거친 것이었다. 서버의 권위와 버클리 184인치 사이클로트론의 실험 결과들은 골드버거의 1948년 논문에 최종 판결을 내린 것으로 보였다.

1951년 10월 콜롬비아 대학의 베르나르디니, 부스 그리고 브룩헤이븐 연구소의 린덴바움 등이 서두에서 소위 “골드버거식 몬테 카를로 계산”을 옹호한다고 선언한 논문을 제출하였다.⁶⁶⁾ 그들은 골드버거의 1948년 예측들이 해들리와 요크의 실험과 “기껏해야 단지 부분적으로만 정성적 일치”를 보인다고 인정하면서도 골드버거의 방법은 서버들이 성공적으로 사용한 개념들의 확장판에 기반하고 있다고 주장하였다.⁶⁷⁾ 나아가 그들은 골드버거 모형이 부적절한 이유들로 해들리와 요크가 거론하였던 부수적인 효과들의 영향이 입사 입자의 에너지가 높아지면 상대적으로 작아질 것이라고 지적하였다. 그러므로, 베르나르디니 등이 보기에, 골드버거 모형은 버클리 184인치 사이클로트론의 에너지 수준(90MeV) 보다 “더 높은 에너지 수준”에서 재검토될 필요가 있었다. 그들의 “더 높은 에너지 수준”이란 바로 콜롬비아의 네비스 사이클로트론에서 생산되는 중성자들의 3-400 MeV 였다. 이런 면에서 그들의 논문은 골드버거식 몬테 카를로 계산법을 옹호하는 동시에 버클리 184인치 사이클로트론보다 더 강력한 네비스 사이클로트론의 차별성을 부각시키는 것이기도 하였다. 네비스 사이클로트론을 이용한 실험결과가 바로 1951년 10월 논문의 주요 내용이었고, 두 학생의 도움을 빌어 진행된 골드버거식 몬테 카를로 계산 결과는 10개월 후인 52년 8월에 제출되었다.⁶⁸⁾

계산 방법을 옹호하겠다고 선언한 만큼 베르나르디니 등의 논문이 제시한 계산 방법은 골드버거의 것보다 세부적으로 훨씬 정교해졌다.⁶⁹⁾ 그들은 첫 번째 단계에서 입자들의 운동거리를 정할 때 사용한 구간수는 골드버거와 마찬가지로 1000개였지만, 입자의 운동 에너지에 따라 구간 나누는 법을 달리 하였다. 또 골드버거는 모든 입사 중성자가 핵의 중심을 향해 입사하는 것으로 놓았지만 그들은 중성자가 핵에 비스듬히 입사하는 경우도 감안하여 핵에 입사하는 위치에 따라 입사 중성자를 10개의 그룹으로 나누었다(그림3).⁷⁰⁾ 둘째 단계에서 충돌을 당하는 입자의 운동량을 선택할 때에도 구간을 1000개로 늘렸다(그림4).⁷¹⁾ 세 번째 단계에서 산란각을 선택할 때는 무작위로 산란각 값을 택하였고, 네 번째 단계에서 계산된 충돌이 배타원리에 의해 금지당한다는 결론이 나왔을 때에는 그 입자를 버리고 처음부터 다시 계산하는 것이 아니라 그 지점에서부터 입자가 원래의 방향으로 계속 진행한다고 보고 새로운 운동거리를 구하였다.⁷²⁾ 실제 계산을 진행할

66) G. Bernardini, E. T. Booth, and S. J. Lindenbaum, "Interactions of High Energy Nucleons with Nuclei. Part I," *Physical Review* 85: 5 (1952. 3. 1), pp. 826-834 (Received Oct. 23, 1951).

67) G. Bernardini, E. T. Booth, and S. J. Lindenbaum, 앞의 글, p. 826.

68) G. Bernardini, E. T. Booth, and S. J. Lindenbaum, "Interactions of High Energy Nucleons with Nuclei. Part II," *Physical Review* 88: 5 (1952. 10. 1), pp. 1017-1026 (Received Aug. 1, 1952).

69) G. Bernardini, E. T. Booth, and S. J. Lindenbaum, 앞의 글, 1020-1022.

70) 핵에 비스듬히 입사하는 중성자를 각도를 틀어 그리면 그림 3과 같이 중성자가 핵의 수평축에 평행하게 입사하는 모양이 되고, 입사각의 차이는 입사 위치의 차이로 바뀌게 된다. 베르나르디니들은 핵을, 중성자의 입사 방향에서 볼 때, 동등한 면적을 지닌 10개의 동심 구역으로 나누었다.

71) 그림 4는 편의상 80개의 구간만 표시한 그림이다.

72) 그림 3의 케적 중 작은 원으로 표시된 지점이 배타원리에 의해 충돌이 금지되어 운동입자가 계속 진행한 지점이다.

때에도 자신들이 3차원 현상을 2차원 평면상에서 표현하는 것임을 감안하여 작도하였다.

베르나르디니 등은 자신들이 “골드버거식 몬테 카를로” 계산법을 옹호한다고 하였지만 그들이 파악한 계산 방법의 특질은 골드버거가 제시한 것과는 판이하게 달랐다.⁷³⁾ 그들의 주장에 따르면 몬테 카를로 계산은 확률 구간들을 “충분히 세밀하게” 나눌 때, 확률적 과정을 자연스럽게 재현하였다.⁷⁴⁾ 그렇다고 해서 그들이 골드버거처럼 몬테 카를로 계산을 통해 정확한 해를 얻을 수 있다고 본 것은 결코 아니었다. 계산 결과의 통계적 정밀도에 유보적인 태도를 취한 골드버거와 달리 베르나르디니 등이 중시한 것은 계산 결과의 통계적 특성이었다. 그들은 실험과 몬테 카를로 계산에 사용된 표본의 수가 같으면 실험 결과와 계산 결과가 보이는 통계적 요동의 크기가 같을 것이라고 주장하였다. 나아가 그들은 골드버거가 “복잡한 연쇄반응(cascade)을 취급하고 자연적인 통계적 요동을 보존하기 위해” 몬테 카를로 방법을 사용하였다고 그를 옹호하기도 하였는데 이는 정작 골드버거의 입장과는 양립하기 어려운 것이었다.⁷⁵⁾ 골드버거는 앞에서 보았듯이 충분히 많은 수의 입자를 사용한다면 몬테 카를로 방법이 원칙적으로 정확한 해를 내놓을 수 있다고 하였는데, 이는 표본수를 충분히 많게 하여 계산결과와 통계적 오차를 줄이는 것이 바람직하다는 것을 함축하였다.

계산 방법이 정교해지고, 정당화의 근거가 달라졌지만 그들은 자신들의 계산이 거친 것이라고 자인할 수밖에 없었다. 실험결과와 통계적 오차보다 계산결과와 통계적 오차가 컸던 것이었다. 하지만 다행히도 계산 결과의 통계적 오차 범위 안에 대체적으로 실험결과 값이 포함되었다.⁷⁶⁾ 덕분에 그들은 그들의 “골드버거식 몬테 카를로” 계산 방법이 400MeV급에서는 유용한 계산 도구라고 결론 내리고, 150MeV급과 GeV급에서도 이 방법에 대한 추가 검토가 필요하다고 주장할 수 있었다.

세련된 계산 방법을 제시한 베르나르디니 등의

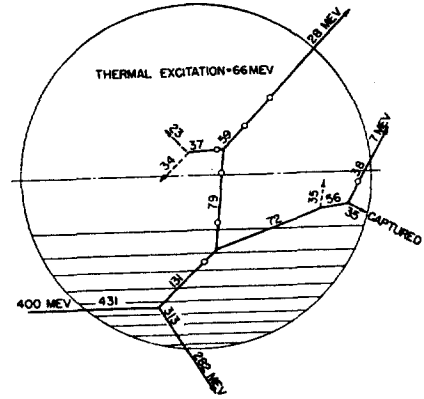


그림 3. 베르나르디니 등의 작업도. 출처: G. Bernardini, et al., "Interactions of High Energy Nucleons with Nuclei. Part II," *Physical Review* 88 (1952), p. 1020.

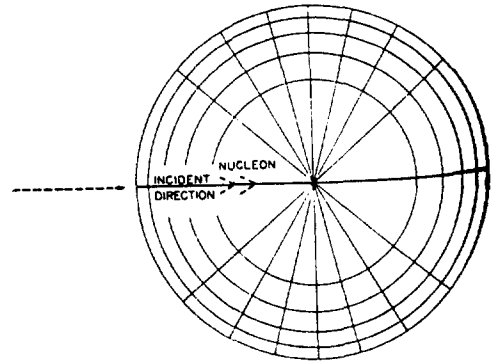


그림 4. 베르나르디니 등이 사용한 운동량 구간도. 출처: G. Bernardini et al., "Interactions of High Energy Nucleons with Nuclei. Part II," *Physical Review* 88 (1952), p. 1020.

73) G. Bernardini, E. T. Booth, and S. J. Lindenbaum, 앞의 글, p.1017. "[the] Goldberger-type Monte Carlo"라는 표현은 그들의 첫 번째 논문에서는 등장하지 않는다. 첫 논문에서는 골드버거가 몬테 카를로 계산을 하였다고만 지적하였다.

74) G. Bernardini, E. T. Booth, and S. J. Lindenbaum, 앞의 글, p.1018.

75) G. Bernardini, E. T. Booth, and S. J. Lindenbaum, 앞의 글, p. 1018 (필자 강조).

76) G. Bernardini, E. T. Booth, and S. J. Lindenbaum, 앞의 글, pp. 1023-1024.

논문은 호의적으로 받아들여져, 후속 작업들은 그들의 논문을 주로 인용하였다. 1953년 캐나다의 맥마누스 등은 베르나르디니의 계산 모형에 따라 몬트리올의 페란티 컴퓨터 상에서 90MeV 및 700MeV급 중성자의 산란을 계산하였다.⁷⁷⁾ 1955년 하버드의 메도우즈는 베르나르디니 모형을 손보아 100 MeV급 양성자의 산란 단면적값을 계산하였다.⁷⁸⁾ 3명의 보조원이 작도 작업을 담당한 이 논문에 가장 큰 특징은 계산 방법에 대한 태도에 있었다. 그는 골드버거나 베르나르디니 등과 달리 굳이 계산 방법의 정당성을 주장하거나 옹호하려 들지 않았다. 메도우즈는 출사입자의 종류와 개수에 따라 여러 경우를 나누고, 각 경우에 대해 산란 단면적 실험값들과 계산값들을 표로 제시하였는데, 맥마누스 등과 마찬가지로 메도우즈는 계산 결과로 평균값만을 제시하였고, 베르나르디니 등이 공들여 논의한 통계적 오차 문제는 전혀 언급되지 않았다. 메도우즈의 계산결과로는 두 개의 중성자 또는 양성자가 출사하는 경우에 실험값과 계산값이 비슷하였고, 중성자와 양성자가 각각 한 개씩 튀어나오는 경우에는 계산값이 실험값의 절반도 안되었다. 그는 앞의 경우에 대하여 “놀라울 정도로 잘 일치”하였다고만 평가하고, 뒤의 경우에 대해서는 최종적으로 “아마도 ... 계산 과정에 도입된 단순화 가정들 ..” 때문일 것이라고 언급하였다.⁷⁹⁾ 1950년대 중엽이면 골드버거식 몬테 카를로 계산법은 원칙적인 결과의 진정성(reality)을 주장하거나 방법의 정당성을 열심히 옹호할 대상도, 실험값과 계산값의 차이를 이유로 해들리와 요크처럼 불신할 대상도 아닌 단지 계산값을 산출하는 도구일 뿐이게 되었던 것이다.

5. 맺음말

몬테 카를로 방법의 역사는 거의 알려지지 않았기 때문에 어느 흐름이 주류였는지 혹은 주류라고 할 만한 흐름이 있었는지도 아직은 명확하지 않다. 다만 1950년대 전반에 이미 몬테 카를로 방법은 매우 다양한 모습을 지니고 있었다는 것만은 확실하다. 그것은 해석적 해를 구하기 불가능하거나 매우 어려운 계산 문제 — 확률이 개입하지 않는 문제를 포함하여 — 의 해법으로, 통계학의 새로운 응용분야로, 미분 방정식과 불연속 과정을 연결하는 수학적 연구 주제로 간주되었다. 때로는 “몬테 카를로”가 새로운 기법인지 아니면 오래된 통계학 기법(무작위 추출법)의 새로운 이름에 불과한지 논쟁도 있었고, 오로지 몬테 카를로 계산을 빨리 하기 위해 당시로서는 거대하고 획기적인 컴퓨터 개발 프로젝트가 시작되고 있었다. 몬테 카를로 방법을 주제로 1949년과 1954년에 열린 두 번의 회의나 여러 학술지에 발표된 논문들은 더 적은 노력으로 더 빨리 몬테 카를로 계산을 수행하는 방법, 즉 결과값의 오차를 더 적은 연산으로 최소화하거나 원하는 정밀도에 도달하기 위해 필요한 계산의 양을 구하는 기법들을 다루었는데, 종종 그 기법들은 전문적인 통계학 기법이나 수학적 계교에 의지하였다. 또한 몬테 카를로 방법의 확산은 난수의 정의들

77) H. MacManus *et al.*, “Nuclear Interactions of High-Energy Nucleons,” *Physical Review* 93: 4 (1954. 2. 15), p. 924 (Read at APS meeting on 1953. 11. 28).

78) J. W. Meadows, “(p, a) and (p, ab) Reactions at 100MeV,” *Physical Review* 98: 3 (1955. 5. 1), pp. 744-9 (Received 1954. 7. 8). 그는 운동량 공간의 구간 수를 640으로 줄인 대신 추적하는 입자의 수를 200개로 늘렸다. 양성자가 핵에 입사해 들어가는 거리를 구할 때에는 비행거리를 평균자유거리의 1/10을 단위로 구간을 나누고, 각 구간에 확률에 따라 가중치를 부여하고 그 가중치에 따라 구간을 임의로 선택하여 비행거리 값을 결정하였다. 이는 각 구간이 동등한 확률을 지니도록 구간을 나누는 골드버거 이래의 방식에서 탈피하는 것이었다.

79) J. W. Meadows, 앞의 글, pp. 748-9.

실질적으로 바꾸고 난수 발생에 대한 난수 발생에 대한 새로운 연구들을 촉발시켰다.⁸⁰⁾

골드버거에서 메도우즈에 이르는 일련의 작업은 이러한 몬테 카를로 방법의 발전의 전반적인 양상과 독립적으로 진행되었다. 당시 몬테 카를로 방법의 개량을 논한 여러 논문들이 발표되었음에도, 그들이 방법과 관련하여 인용한 것은 울람과 노이만의 1947년 초록이 아니면 바로 선행 연구자의 논문 뿐이었다. 게다가 그들의 작업 방식, 즉 선분긋기를 통해서 입자들이 겪는 확률적 충돌 과정을 자세하게 추적하는 것은 인용된 초록의 내용과는 무관하게 페르미의 구도에서 비롯된 것이다. 페르미의 구도는, Fermiac과 로스 알라모스를 떠나서도, 세부적인 방법들의 변화를 겪으며 끈질기게 유지되었다. 이들 그림 몬테 카를로 계산들은 몬테 카를로 방법이 그 방법의 전반적인 발달·전파와 무관하게 그것의 특수한 형태만이 국소적·고립적으로 전파되어 퍼지게 되었음을 보여준다. 이는 다시 몬테 카를로 방법 전반에 대한 역사적 통찰을 위해서는 구체적인 사례 연구들이 더욱 필요함을 함축한다.

그림 몬테 카를로의 형태는 끈질기게 유지되었고, 원 또는 구 내부의 선분이라는 중심 이미지는 2차대전 중으로까지 거슬러 올라가지만, 그러한 계산에 부여된 의의와 걸린 기대는 계속 변하였다. 확률값 계산을 목적으로 하는 울람의 최초 착상은 논외로 하더라도, 노이만의 구도는 현상을 그대로 흉내내기를 중시하였지만 페르미의 그것은 계산이 현상의 재현이 아니라 비유적 표현임을 분명히 하였다. 두 구도 모두 다루는 문제에 대한 보다 나은 해법을 찾기 위한 목적을 지닌 것이었지만, 골드버거부터는 그림 몬테 카를로 작업을 통해 계산 결과를 얻는 데 그쳤다. 골드버거는 얻어낸 분포와 그것의 특징 즉 딱히 수치로 표현되지 않는 것들을 작업의 결과로 제시하였지만, 베르나르디니 등은 계산 수치와 그 값의 통계적 특성을 중시하였고, 메도우즈는 계산된 수치 자체만을 작업 결과로 여겼다. 이러한 변화와 함께 그림 몬테 카를로는 작업자의 전문적 식견이 있어야 가능한, 현상에 대한 직관적 이해를 목적으로 하는 것에서 일단 설정된 작업의 수행은 보조원들에게 넘길 수 있는 수치 산출도구로 바뀌어 갔다.

강조점이 정성적 이해에서 정확한 수치로 옮겨갈수록 계산 방법은 좀 더 정교해졌다. 하지만 그럴수록 그 계산들이 전례를 답습하는 면 또한 뚜렷해졌다. 노이만이 짐작으로 제시한 표본수 100은 별다른 검토없이 관행적으로 사용되었다. 메도우즈가 표본수를 늘렸지만 그 수가 단순히 두 배인 200이라는 점 자체가 통계 작업에서 결과의 신뢰도에 중요한 영향을 미치는 표본수 선정이 별다른 통계적 분석없이 이루어졌음을 보여준다. 이와 함께 그들이 그림 몬테 카를로 방법의 핵심으로 여긴 것이 진정성, 통계적 오차의 보존, 수치의 산출 등으로 자신들의 인용한 선행 연구자의 입장을 왜곡하거나 별 다른 논의없이 무시하였다는 사실은 새로운 계산기법이 수용될 때 그 기법의 인식론적·존재론적 함축 등 이모저모가 면밀히 검토되는 것이 아니라, 수용자들이 일단 전례 따라 계산 절차를 답습한 후에 자신들이 처한 맥락에 따라 전례의 경우에 구애받지 않고 의미부여를 하는 경향이 있음을 보여준다.

몬테 카를로 방법의 발달에 초기부터 중요한 기여를 한 메트로폴리스는 근 30년 지난 후 자신이 1948년 초 노이만과 함께 새 ENIAC 상에서 한 계산이 “최초의(original) 몬테 카를로”였다고 회상하면서 Fermiac을 간단히 아날로그 장치라고 못박았다.⁸¹⁾ ENIAC 이래의 컴퓨터로 대표되는 디지털 계산장치들과 나머지 아날로그 장치들의 구별이 한 컴퓨터 사가의 언급대로 명백한 것으

80) 주 1 참조.

81) N. Metropolis, “The Beginning of the Monte Carlo Method,” p.128. 몬테 카를로 방법 및 컴퓨터 발달에 대한 메트로폴리스의 기여에 대해서는 Herbert L. Anderson, “Metropolis, Monte Carlo, and the MANIAC,” *Los Alamos Science* (Fall 1986), 96-107을 참조할 것.

로 자리잡은 후여서 메트로폴리스로서는 ENIAC같은 컴퓨터가 아닌 Fermiac을 아날로그 장치로 보는 것이 당연했을 것이다. 그러나 그림 몬테 카를로 계산들은 표준적인 아날로그 대 디지털의 대립 구도에 쉽게 포함되지 않는다. 초창기 컴퓨터 발달에 강력한 영향을 미쳤던 1950년의 한 보고서는 디지털과 아날로그 계산기를 다음과 같이 구별하였다.

계산 기계들은 디지털 또는 아날로그로 분류된다. 디지털 장치는, 이름이 암시하는 대로, 오로지 이산값(discrete value)만을 지닐 수 있는 숫자(digit)의 형태로 표현된 수에 수학적 조작을 행한다. ...

아날로그 계산기에서 수는 계산을 위해 길이, 전압, 회전각도 등 물리적으로 측정할 수 있는 양으로 변환된다.⁸²⁾

여기서 물리적으로 측정할 수 있는 양이란 모두 연속량들이었다. 계산기기들에 대한 1949년의 대표적인 개관이 열거한 아날로그 계산기들도 모두 연속적인 물리량을 계산의 매개체로 사용하는 것이었다.⁸³⁾

그림 몬테 카를로 계산들에서 계산의 방법이었던 선분긋기는 숫자 연산도, 연속적인 물리량의 조작도 아니었다. 중성자들의 궤적을 표상했던 선분은 숫자로 표현되는 중성자의 개수와 중성자의 물리량(운동거리와 방향)을 동시에 표상하였다. 선분의 길이와 방향이 계산 과정에서 중요한 역할을 한다는 점에서 분명 그림 몬테 카를로들은 아날로그 계산과 닮았다. 하지만 이산량인 선분의 개수나 연속량도 이산량도 아닌 선분들이 그려진 양상도 그림 몬테 카를로 계산에서 핵심적인 요소였다. 이러한 전체성은, 숫자를 매개로 했지만 현상의 재현에 중점을 둔 노이만의 구도와 함께, 페르미의 구도와 골드버거의 작업에서 가장 두드러지게 나타났다. 이후 실험 결과와의 정합성이 증시되면서, 그림에서 읽을 수 있는 전체적인 양상보다 중성자의 물리량들과 그 값이 더 중시되었다. 하지만 선분의 길이와 방향 같이 연속적으로 보이는 양들을 정할 때 미리 정해 놓은 구간들 중 하나를 택하는 연산 방식은 이 양들에 이산값을 부여한다는 점에서, 메트로폴리스의 회고와는 반대로, 아날로그 방식보다는 디지털 방식에 가까웠다. 메트로폴리스의 작업으로 이어지는 노이만의 구도와 그림 몬테 카를로 계산들의 차이는 표면적으로 컴퓨터 사용과 비사용의 차이이지만, 그것은 이산과 연속의 차이가 아니라 계산의 매체가 숫자(의 물리적 표현)인가 아니면 숫자나 다른 물리량으로 더욱 추상화되기 이전의 대상인가의 차이였다. 이렇듯 그림 몬테 카를로 계산들은 디지털도 아날로그도 아니었지만, 컴퓨터의 보편화는 그런 구별을 보이지 않게 하였던 것이다.

82) Engineering Research Associates, Inc., *High-Speed Computing Devices* (McGraw-Hill, 1950). Charles Babbage Institute Reprint Series in the History of Information Processing, vol. 4 (Thomash Publishers, 1984).

83) Douglas R. Hartree, *Calculating Instruments and Machines* (The University of Illinois Press, 1949) 1, pp. 4-53. Charles Babbage Institute Reprint Series in the History of Information Processing, vol. 6 (Thomash Publishers, 1984).