

탄성 핵-핵 산란의 반고전적 시뮬내기

차문화*

강원대학교 물리학과, 춘천 200-701

김용주

제주대학교 물리학과, 제주 690-756

김문원 · 이수철 · 임해완

공주대학교 응용물리학과, 공주 314-701

(2001년 12월 4일 받음)

컴퓨터 언어 자바를 이용하여 탄성 핵-핵 산란의 반고전적 시뮬내기 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 이용하면 글라우버 모형에서 탄성 핵-핵 산란의 각분포 자료에 대한 χ^2 -맞추기와 계산결과와 여러가지 그래픽 표현으로 각분포, 율립함수, 반응자름넓이, 산란행렬, 최접근거리, 분석 결과의 시뮬내기가 가능하다. 이 프로그램은 $E_{lab}=360$ MeV에서 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 계의 탄성산란에 적용되었다. 핵-수정된 글라우버 모형의 탄성 미분자름넓이의 계산결과를 쿨롱-수정된 글라우버 모형의 결과보다 22% 정도 개선되었다.

PACS numbers: 01.50.Ht, 25.70.Bc

Keywords: 반고전적 시뮬내기, 탄성 핵-핵 산란, 글라우버 모형, 자바 애플릿

I. 서 론

근래에 컴퓨터를 이용한 물리문제의 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그래픽 프로그램 언어인 LabView [1]를 이용한 기초물리학 교육용 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램의 개발 [2], 컴퓨터 언어 Visual C++ 6.0 [3]을 이용한 뉴턴의 제2법칙 재발견 교육 보조용 프로그램을 개발하고 이것을 이용한 낙하 운동, 단진동 운동과 단진자 운동의 흉내내기 [4], Mathematica [5]를 이용한 비관성 좌표계 운동의 추상적 물리개념의 가시화 표현 [6] 등이 발표되었다. 이 프로그램들의 주안점은 윈도우 환경에서 물리문제의 수치계산 결과를 그래픽으로 시각화하거나 대화형으로 시뮬레이션을 실행시킨다는 데 있다.

이전의 연구에서 물리문제의 컴퓨터 시뮬내기와 관련하여 알파-붕괴 과정의 그래픽 표현 [7]과 자바 애플릿을 이용한 러더퍼드 산란의 컴퓨터 시뮬내기 [8]를 발표하였고, 핵-핵 탄성산란의 반고전적 이론과 관련하여 ^{40}Ca 와 ^{90}Zr 핵에 대한 $E_{lab}=1503$ MeV의 ^{16}O 핵 탄성산란의 반고전적인 위상이동 분석 [9]과 굴절성 중핵 탄성산란의 위상이동 분석 [10]을 수행하였다.

Sun Microsystems Inc.에 의해 발표된 컴퓨터 언어 Java 2 SDK [11]는 아마도 물리문제의 그래픽 표현과 대화형 시뮬레이션 처리에 가장 뛰어난 컴퓨터 언어의 하나로 생각된다. 이 연구에서는 자바 애플릿을 이용하여 탄성 핵-핵 산란과정에 대한 반고전적인 계산결과와 그래픽 표현과 대화형 시뮬레이션을 통해 이 현상의 다양한 시각적인 이해를 돕고자 한다. 먼저 II절에서는 탄성 핵-핵 산란에 대한 글라우버 모형의 수식체계를 기술한다. 끝으로 III절에서는 결과 및 고찰이 이루어질 것이다.

II. 반고전적 산란 이론

핵-핵 반응자름넓이 σ_R 는 입사체가 과녁핵과 상호작용하지 않고 충격뱃음변수 b 로 투과할 확률인 투명함수(transparency function)로부터 다음과 같은 적분식에 의해 표현된다 [12].

$$\sigma_R = 2\pi \int_0^\infty [1 - T(b)] b db. \quad (1)$$

유한한 상호작용에 대해 쿨롱힘이 작용하지 않을 때 투명함수 $T(b)$ 는 글라우버 모형에서

*E-mail: mhcha@cc.kangwon.ac.kr

$$T(b) = \exp \left[-\sigma_{NN} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 b_1 \int_{-\infty}^{\infty} d^2 b_2 f \right. \\ \left. \times (|b_1 - b_2|) \rho_{1z}(b_1) \rho_{2z}(|b_2 - b|) \right] \\ = \exp[-\sigma_{NN} \Omega(b)] \quad (2)$$

으로 주어진다 [13]. 이 식에서 σ_{NN} 는 평균 핵자-핵자(N-N) 온자름넓이 그리고 $f(|b_1 - b_2|)$ 는 $\int f(b) d^2 b = 1$ 로 규격화되는 범위함수이다. 두께함수(thickness function) $\rho_{iz}(b)$ 는

$$\rho_{iz}(b) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_i((b^2 + z^2)^{1/2}) dz, \quad (i = 1, 2), \quad (3)$$

으로 주어진다. 이 식에서 $\rho_i(r)$ 핵밀도이다. 핵밀도를 다음과 같은 가우스 밀도분포 형태

$$\rho_i(r) = \rho_i(0) \exp \left(-\frac{r^2}{a_i^2} \right), \quad (i = 1, 2), \quad (4)$$

로 가정하면 겹치기 적분에 대한 간단한 해석적 표현을 얻을 수 있다.

$$\Omega(b) = \pi^2 \rho_1(0) \rho_2(0) \frac{a_1^3 a_2^3}{a_1^2 + a_2^2} \exp \left(-\frac{b^2}{a_1^2 + a_2^2} \right) \quad (5)$$

표준적인 글라우버 모형에서 가우스밀도 맺음변수 a_i 와 $\rho_i(0)$ 는

$$a_i = \frac{\langle r^2 \rangle^{1/2}}{\sqrt{1.5}}, \quad \rho_i(0) = \frac{A_i}{a_i \sqrt{\pi}}. \quad (6)$$

으로 주어진다 [14]. 식 (4)와 (5)에서 가우스밀도 맺음변수 $\rho_i(0)$ 와 a_i 는 실험적으로 결정되는 핵표면 구조를 재현할 수 있도록 조정된다.

표준 글라우버 모형에서 충격맺음변수 $b = (L + 1/2)/k$ 이므로 식 (5)의 겹치기 적분 $\Omega(b)$ 는 L 의 함수로 표현된 Ω_L 로 대체될 수 있다. 쿨롱-수정된 글라우버 모형에서 충격맺음변수 b 는 최접근거리 b_c 로 대체된다:

$$b_c = \frac{1}{k} \left\{ \eta + \left[\eta^2 + \left(L + \frac{1}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (7)$$

여기서 η 는 좀머펠트 맺음변수이다. 쿨롱마당과 핵마당이 모두 존재하는 경우, 최접근거리 b_c 는 방정식

$$1 - \frac{2\eta}{kr} - \frac{b^2}{r^2} - \frac{V_n(r)}{E} = 0 \quad (8)$$

을 만족하는 해 r_n 가 된다. 여기서 $V_n(r)$ 은 광학퍼텐셜의 실수부분이다:

$$V_n(r) = -\frac{V_0}{1 + e^{[r-r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})]/a}}. \quad (9)$$

Gupta와 Shukla [15]에 의해 제안된 바와 같이, $V_n(r_c) = \text{constant}$ 로 가정하면 핵-수정된 글라우버 모형에서 r_n 의 표현은

$$r_n = \frac{1}{k'} \left\{ \eta + \sqrt{\eta^2 + (k'b')^2} \right\} \quad (10)$$

으로 놓을 수 있다. 이 식에서

$$b' = \frac{b}{\sqrt{1 - V_n(r_c)/E}}, \quad (11)$$

$$k' = \left[1 - \frac{V_n(r_c)}{E} \right] k. \quad (12)$$

쿨롱힘과 단거리 중심력을 받는 스핀-0인 입자에 대한 탄성 산란진폭은 다음과 같이 표현된다.

$$f(\theta) = f_R(\theta) + \frac{1}{ik} \sum_{L=0}^{\infty} \left(L + \frac{1}{2} \right) \exp(2i\sigma_L) (S_L - 1) P_L(\cos \theta), \quad (13)$$

여기서 $f_R(\theta)$ 는 러더포드 산란진폭, σ_L 는 쿨롱 위상이동이다. 그리고 S_L 는 핵 위상이동 δ_L 에 의해 다음 식으로 주어지는 핵 산란행렬이다.

$$S_L = \exp(2i\delta_L) \quad (14)$$

쿨롱 위상이동과 핵 위상이동의 함수로 쏘림함수 θ_L 은

$$\theta_L = 2 \frac{d}{dL} (\sigma_L + \delta_L) \\ = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\eta}{L + 1/2} \right) - \sigma_{NN} \alpha_{NN} \pi^2 \rho_o^P(0) \rho_o^T(0) \\ \times \frac{a_P^3 a_T^3}{k^2 (a_P^2 + a_T^2)^2} \frac{(L + 1/2) \{ \eta + [\eta^2 + (L + 1/2)^2]^{1/2} \}}{[\eta^2 + (L + 1/2)^2]^{1/2}} \\ \times \exp \left[\frac{-\{ \eta + [\eta^2 + (L + 1/2)^2]^{1/2} \}^2}{k^2 (a_P^2 + a_T^2)} \right] \quad (15)$$

으로 주어진다. 이 함수는 굴절현상이 존재하는 경우에 음수가 되고 $L = L_{nr}$ 에서 최소값이 존재하는 데 이것을 핵무지개각이라고 하고, L 이 이보다 큰 값 $L = L_{cr}$ 에서 최대값이 존재하는 데 이것을 쿨롱무지개각이라고 한다.

이제 투명함수로부터 유도되는 산란행렬 S_L 의 표현을 생각하자. 양자적 표현과 반고전적 표현사이의 대응관계 $T(b) = |S_L|^2$ 의 성립을 가정하면 [1], 식 (1)은 양자 표현으로 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$\sigma_R = \frac{\pi}{k^2} \sum_{L=0}^{\infty} (2L + 1) (1 - |S_L|^2) \quad (16)$$

그러면 식 (2)와 (14)로부터

$$\ln T(b) = -4 \text{Im}(\delta_L) \quad (17)$$

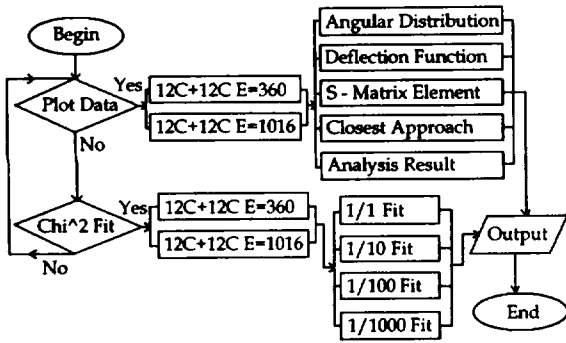


그림 1. 프로그램 GlauberModelApplet의 플로우 차트.

을 얻는다. 이 식에서

$$\text{Im}(\delta_L) = \frac{1}{4} \sigma_{NN} \Omega_L \quad (18)$$

핵자-핵자 산란에 대한 광학정리를 이용하여 σ_{NN} 을 다음 식으로 대신할 수 있다.

$$\sigma_{NN} = \frac{4\pi}{k_{NN}} \text{Im}[f_{NN}(0)] \quad (19)$$

그러면 위상이동의 허수부분은

$$\text{Im}(\delta_L) = \frac{\pi}{k_{NN}} \Omega_L \text{Im}[f_{NN}(0)] \quad (20)$$

가 된다. 위상이동의 실수부분에 대해서도 식 (20)은 성립하므로, 핵-핵 산란행렬 S_L 는 핵자-핵자 산란진폭의

함수로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_L = \exp \left[\frac{2\pi i}{k_{NN}} \Omega_L f_{NN}(0) \right] \quad (21)$$

이 식에서

$$f_{NN}(0) = \frac{k_{NN}}{4\pi} \sigma_{NN} (\alpha_{NN} + i) \quad (22)$$

이다. 식 (22)에서 α_{NN} 은 전방 핵자-핵자 산란진폭의 허수부분에 대한 실수부분의 비율로서 χ^2 -맞추기에 의해 결정되는 맺음변수이다.

III. 결과 및 고찰

Sun Microsystem Inc.의 컴퓨터 언어 Java 2 SDK를 이용하여 탄성 핵-핵 산란의 컴퓨터 시뮬내기를 위한 자바 애플릿 프로그램 'GlauberModelApplet'을 개발하였다. 이 프로그램은 applet viewer Realj 3.51 [16], Microsoft Internet Explorer v6.0 [17]과 Netscape v6.2 [18]에서 시험되었다. 다음은 Internet Explorer와 Netscape에서 자바 애플릿 프로그램 'GlauberModelApplet.java'를 실행 시키기 위한 HTML 문서 'GlauberModelApplet.html'이다.

```
<html>
<head><title>GlauberModelApplet</title></head>
<body bgcolor="#c4cda2">
<OBJECT classid="clsid:8AD9C840-044E-11D1-B3E9-00805F499D93" WIDTH=540 HEIGHT=460>
  <PARAM NAME="code" VALUE="GlauberModelApplet.class">
  <PARAM NAME="type" VALUE="application/x-java-applet;version=1.3">
<COMMENT>
  <EMBED type="application/x-java-applet;version=1.3" width="540" height="460"
    code="GlauberModelApplet.class">
  <NOEMBED> You need JDK 1.3 and its plugin to excute this APPLET!! </NOEMBED>
</EMBED>
</COMMENT>
</OBJECT>
</body>
</html>
```

그림 1은 이 프로그램의 플로우 차트를 나타낸다. 이 그림에서 프로그램이 'Chi^2 Fit'와 'Plot Data'의 두 가

지 항목 가운데 하나가 선택적으로 실행됨을 보여준다.

표 1. $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 계의 $E_{\text{lab}}=360$ MeV에 대한 쿨롱-수정된 글라우버 모형과 핵-수정된 글라우버 모형의 입력값과 χ^2/N . 핵밀도의 가우스 밀도의 계산에서 $\langle r^2 \rangle^{1/2} (^{12}\text{C})=2.442$ fm [13]를 사용하였다.

쿨롱-수정된 글라우버 모형		핵-수정된 글라우버 모형				
α_{NN}	χ^2/N	α_{NN}	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	a (fm)	χ^2/N
0.541	23.8	0.505	16.0	1.25 ^a	0.524 ^b	18.5

^a참고문헌 [19]의 r_0 값.

^b참고문헌 [19]의 a 값.

일단 'Chi^2 Fit'를 선택하면 여기에는 두 개의 실험데이터 '12C+12C E=360'과 '12C+12C E=1016' 가운데 하나를 선택하고 다시 α_{NN} 값의 χ^2 -맞추기를 할 크기 '1/1 Fit', '1/10 Fit', '1/100 Fit', '1/1000 Fit'를 선택하도록 되어있다.

마찬가지로 'Plot Data'를 선택하면 여기에는 두 개의 실험데이터 '12C+12C E=360'과 '12C+12C E=1016' 가운데 하나를 선택하고 다시 'Angular Distribution', 'Deflection Function', 'S-Matrix Element', 'Closest Approach', 'Analysis Result'의 다섯가지 가운데 하나를 선택하여 계산결과를 시뮬내기하도록 되어있다.

이제 이 프로그램의 응용으로 $E_{\text{lab}}=360$ MeV의 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 탄성산란에 적용시켜보기로 한다. 그림 2의 아래부분에 있는 콘트롤 패널에서 마우스로 스크롤바를 움직여 $\alpha_{\text{NN}} = 0.5$ 로 맞추고 텍스트필드에 V_0 의 값을 16.0으로 입력한다. 그리고 'Chi^2 Fit' - 'C12+C12 E=360' - '1/1000 Fit'를 선택한다음 프로그램을 실행시키면 그림 2와 같이 된다. 콘트롤 패널에는 보이지 않지만 ^{12}C 핵에 대해서 $\langle r^2 \rangle^{1/2} = 2.442$ fm, $r_0 = 1.25$ fm, $a =$

0.524 fm으로 설정되어 있다. 또한 이 그림은 $\alpha_{\text{NN}} = 0.505$ $V_0 = 16.0$ MeV일 때, χ^2/N 값이 최소가 되고 그 값은 18.515가 됨을 보여준다. 표 1은 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 계의 $E_{\text{lab}}=360$ MeV에 대한 쿨롱-수정된 글라우버 모형과 핵-수정된 글라우버 모형의 입력값과 χ^2/N 값이다. 이 표에서 표준 글라우버 모형의 충격뱃뎀변수 b 대신 식(7)을 사용한 쿨롱-수정된 글라우버 모형의 $\chi^2/N = 23.8$ 에 비해 식(10)을 사용한 핵-수정된 글라우버 모형에서는 $\chi^2/N = 18.5$ 으로 22% 정도 개선된 것을 알 수 있다.

그림 3은 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'Angular Distribution'을 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습이다. 이 그림에서 검은 색으로 채워진 작은 원과 짧은 검은 선은 각각 $E_{\text{lab}}=360$ MeV $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 탄성산란 각분포의 실험값과 오차를 나타낸다 [20]. 적색 실선은 계산결과를 보여준다. 이 계산결과는 모든 각에 걸쳐서 실험적으로 관측된 미분 자름넓이의 특징적인 진동모양을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'Deflection Function'을 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습이

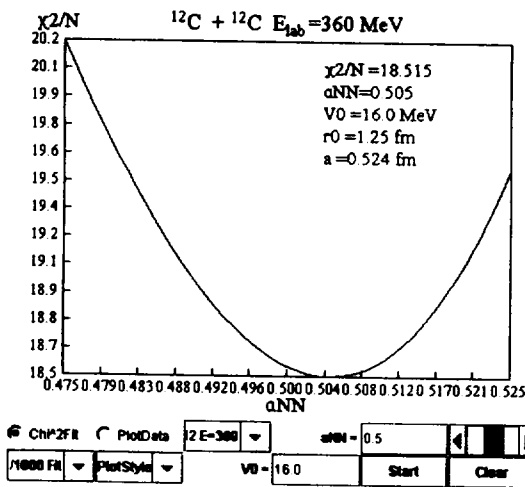


그림 2. 'Chi^2 Fit' - 'C12+C12 E=360' - '1/1000 Fit'를 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습.

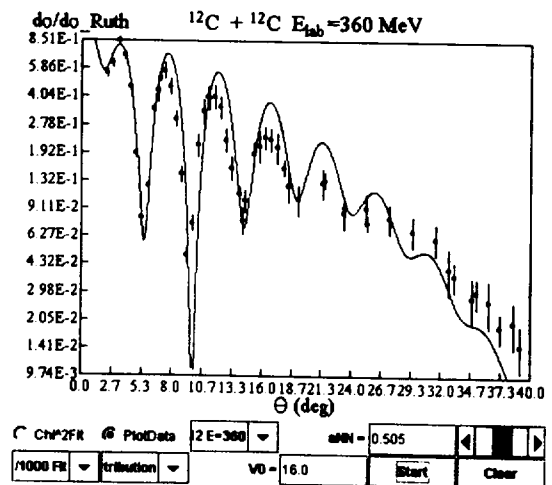


그림 3. 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'Angular Distribution'을 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습.

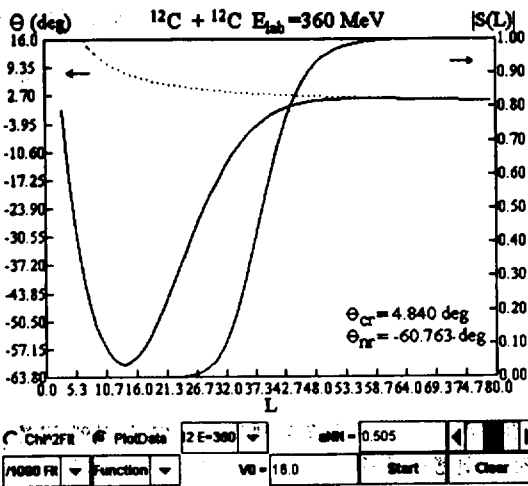


그림 4. 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'Deflection Function'을 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습.

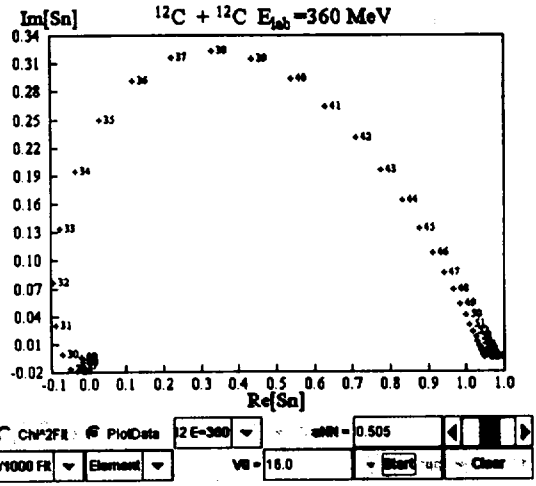


그림 6. 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'S-Matrix Element'를 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습.

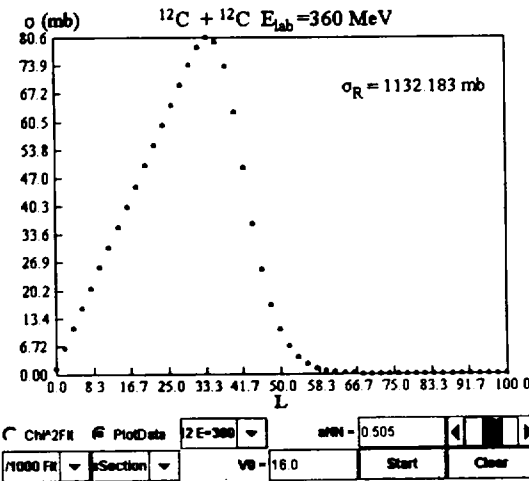


그림 5. 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'Reaction CrossSection'을 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습.

다. 이 그림에서 적색 실선은 각운동량 양자수 L 에 대한 쏘림함수의 변화를 나타낸다. 이 함수는 그림에서 보는 바와 같이 $L = 14$ 근방에서 최소가 된다. 이와 같이 쏘림각이 음수이면서 최소가 되는 각을 핵 무지개각이라고 한다. 핵무지개각은 핵반응이 굴절성을 나타낼 때 존재하는 것으로 알려져 있다. 이 각으로부터 L 이 증가함에 따라 쏘림각도 점차 증가하다가 $L = 56$ 근방에서 최대가 된다. 이 최대각은 쿨롱 무지개각으로 알려져 있다. 그림 4에서 적색 실선은 산란행렬의 절대값을 나타낸다. 이 그림에서 대략 $L = 60$ 이상의 값에서는 $|S_L| = 1$ 이 됨을 알 수 있다. 이것은 $L = 60$ 이상의 값에서는 더 이

상 미분자름넓이와 반응자름넓이에 기여하지 않음을 의미한다.

그림 5는 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'Reaction CrossSection'을 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습이다. 이 그림은 부분 반응자름넓이의 각운동량 양자수 L 에 따른 변화를 보여준다. $L = 0$ 부터 40 근방까지는 1차적으로 증가하여 $L = 34$ 근방에서 피크를 이룬 후 급격하게 지수적으로 감소하여 $L = 70$ 근방에서 0가 됨을 볼 수 있다. 이것은 그림 4의 산란행렬 절대값 $|S_L|$ 의 그래프와 일치한다.

그림 6은 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'S-Matrix Element'를 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습이다. 이 그림에서 가로축은 산란행렬의 실수부분이고 세로축은 허수부분이다. $L = 0$ 부터 30까지는 산란행렬의 실수부분과 허수부분이 모두 거의 0 근방의 값을 가지다가 실수부분은 1을 향해 증가하지만 허수부분은 $L = 38$ 에서 피크를 이룬 후 다시 감소하여 0에 이르는 멋진 반원모양을 나타내고 있다. 이것은 컴퓨터 시뮬네이션이 아니고는 볼 수 없는 현상이다.

그림 7은 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'Closest Approach'를 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습이다. 이 그림은 충격뎀변수 b 의 함수로 나타낸 최적근거리이다. $E_{lab}=360$ MeV의 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 탄성산란에서 최적근거리는 $b = 0.1$ 일 때 0.3 fm로부터 L 이 증가함에 따라 1차적으로 증가하여 $b = 10$ 에서 대략 10 fm에 이르는 것을 알 수 있다.

그림 8은 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'Analysis Result'를 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습이다. 이

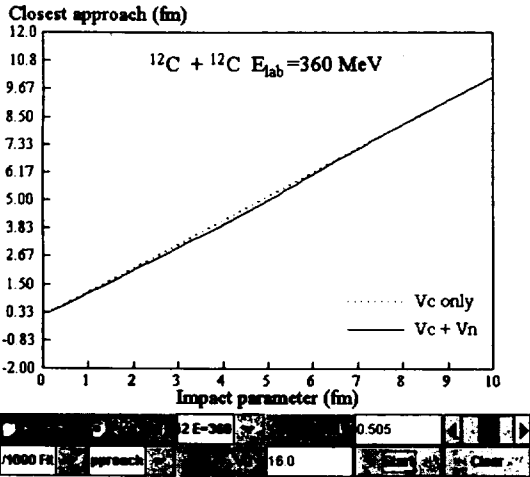


그림 7. 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'Closest Approach'를 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습.

Analysis results for the 12C+12C system at Elab=360 MeV

Title	Value	Remark
η	1.035	Sommerfeld parameter
k	7.188 /fm	Wave number
R_s	6.514 fm	Strong absorption radius
L_g	45.775	Grazing angular momentum
L_{nr}	14	Nuclear rainbow angular momentum
L_{cr}	56	Coulomb rainbow angular momentum
σ_R	1132.183 mb	Reaction cross section
θ_g	2.591 deg	Grazing angle
θ_{cr}	1.954 deg	Coulomb rainbow angle
θ_{nr}	-60.763 deg	Nuclear rainbow angle
χ^2/N	18.515	Chi-squared (10% error bars)



그림 8. 'Plot Data' - 'C12+C12 E=360' - 'Analysis Result'를 선택하고 프로그램을 실행시킨 모습.

그림은 프로그램 'GlauberModelApplet'의 전체적인 분석결과를 표의 형태로 보여준다. 이 그림에서 강한 흡수 반지름 R_s 는 투과함수($T_L = 1 - |S_L|^2$)가 1/2이 되는 값이고, 스침각운동량(grazing angular momentum) L_g 은 강한 흡수반지름 R_s 와 $L_g = kR_s(1 - 2\eta/kR_s)$ 의 반고전적 관계를 갖는다. 주목할 점은 $L_{nr} = 14$ 에서 핵무지각 $\theta_{nr} = -60.763^\circ$ 으로 이 산란이 굴절성임을 보여주고 있다는 것이다.

요약하면, 이 연구에서 우리는 컴퓨터 언어 Java 2 SDK를 이용하여 탄성 핵-핵 산란의 컴퓨터 시뮬네기를 위한 자바 애플릿 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램

을 이용하면 글라우버 모형에서 탄성 핵-핵 산란의 각분포 자료에 대한 χ^2 -맞추기와 계산결과의 여러가지 그래픽 표현으로 각분포, 쏠림함수와 산란행렬의 절대값, 반응자름넓이, 산란행렬, 최근접거리, 분석 결과의 시뮬네기가 가능하다. 이 프로그램의 응용으로 $E_{lab}=360$ MeV에서 $^{12}C + ^{12}C$ 계의 탄성산란 각분포 자료에 대한 컴퓨터 시뮬네기를 하였다. 핵-수정된 글라우버 모형의 탄성 미분자름넓이의 계산결과는 쿨롱-수정된 글라우버 모형의 결과보다 χ^2/N 값에서 22% 정도 개선되었다.

이 연구에서 개발한 자바 애플릿 프로그램 Glauber-ModelApplet는 글라우버 모형을 이용한 $E_{lab}=360$ MeV와 1016 MeV에서 $^{12}C + ^{12}C$ 탄성산란의 다양한 반고전적 컴퓨터 시뮬네기를 인터넷을 통하여 동시에 많은 사용자가 실행시킬 수 있으므로 교육적인 효과가 클 것으로 기대된다. 이 프로그램은 인터넷을 통하여 웹페이지 <http://cc.kangwon.ac.kr/~mhcha/JavaApplet/GlauberModelApplet.html>에 접속해서 프로그램을 실행시킬 수 있다. 이 프로그램이 정상적으로 작동되기 위해서는 Windows 95이상의 OS환경에서 Sun Microsystems Inc.가 제공하는 Java 2 SDK와 플러그인 프로그램이 컴퓨터에 설치되어 있어야 한다.

감사의 글

이 연구의 일부는 2001년도 공주대학교의 연구비 지원에 의한 것이며 이에 감사드린다.

참고 문헌

- [1] <http://www.ni.com>.
- [2] Ho-Jin Cheong and Ju-Jin Kim, Sae Mulli(New Phys.) 40, 413 (2000).
- [3] Microsoft Visual C++ 6.0 is copyrighted by Microsoft Corporation.
- [4] Sang-Jun Kang, Eui-Soon Yim and Sunggoo Cho, Sae Mulli(New Phys.) 40, 525 (2000).
- [5] Mathematica is copyrighted by Wolfram Research Inc.
- [6] Hee-Joong Yun, Sae Mulli(New Phys.) 40, 530 (2000).
- [7] M. H. Cha and Y. E. Kim, Int. J. Mod. Phys. C 10, 17 (1999).
- [8] Moon Hoc Cha and Yong Joo Kim, Sae Mulli(New Phys.) 42, 163 (2001).

- [9] M. H. Cha and Y. J. Kim, *J. Phys. G* **17**, L95 (1991).
- [10] Moon Hoe Cha and Yong Joo Kim, *Sae Mulli*(New Phys.) **40**, 183 (2000).
- [11] Java(TM) 2 SDK is copyrighted by Sun Microsystems Inc.
- [12] P. J. Karol, *Phys. Rev. C* **11**, 1203 (1975).
- [13] S. K. Charagi and S. K. Gupta, *Phys. Rev. C* **41**, 1610 (1990).
- [14] J. Chauvin, D. Lebrun, A. Lounis and M. Buenerd, *Phys. Rev. C* **28**, 1970 (1983).
- [15] S. K. Gupta and P. Shukla, *Phys. Rev. C* **52**, 3212 (1995).
- [16] Realj 3.51 is copyrighted by 2000 DM Interactive Ltd.
- [17] Microsoft Internet Explorer 6.0 is copyrighted by Microsoft Corporation.
- [18] Netscape 6.2 is copyrighted by Netscape.
- [19] K. S. Krane, *Introductory Nuclear physics* (John Wiley & Sons, New York, 1988), p. 122.
- [20] M. Buenerd, A. Lounis, J. Chauvin, D. Lebrun, P. Martin, G. Duhamel, J. C. Gondrand, and P. De Saintignon, *Nucl. Phys. A* **424**, 313 (1984).

Semiclassical Simulation of Elastic Nucleus-Nucleus Scattering

Moon Hoe CHA

Department of Physics, Kangwon National University, Chunchon 200-701

Yong Joo KIM

Department of Physics, Cheju National University, Cheju 690-756

Moon Won KIM, Soo Chul LEE and Hae Wan LIM

Department of Applied Physics, Kongju National University, Kongju 314-701

(Received 4 December 2001)

We have used the computer language Java to develop a semi-classical simulation program for elastic nucleus-nucleus scattering. Using this program, we perform a χ^2 -fit to the observed angular distribution data of the elastic nucleus-nucleus scattering and provide computer simulations of the angular distribution, the deflection function, the reaction cross-section, the scattering matrix, the distance of closest approach, and analysis results as graphical representations. The program is applied to elastic scattering of the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ system at $E_{\text{lab}}=360$ MeV. The calculated differential cross-sections of elastic scattering in the nuclear-modified Glauber model lead to improved results of about 22% compared with the ones in the Coulomb-modified Glauber model.

PACS numbers: 01.50.Ht, 25.70.Bc

Keywords: Semiclassical Simulations, Elastic Nucleus-Nucleus Scattering, Glauber Model, Java Applet