경입자를 이용한 극한 핵물질 연구

DOI: 10.3938/PhiT.28.004

김 경 식

Extreme Nuclear Matter Study Using Leptons

Kyungsik KIM

Lepton-nucleus scattering is one of the most useful tools for investigating nuclear structures and nuclear properties. Since the first pioneering experiment at the Stanford University Linear Accelerator, electron-nucleus scattering has undergone continued development. For fixed three-momentum transfer, different processes, such as discrete excited states, giant resonance, and so on, can occur when the energy transfer is varied. In particular, problems, such as the EMC effect in a nuclear medium, the axial vector mass in parity violation, etc., remain unsolved. Furthermore, neutrino-nucleus scattering, can be used to solve unsolved neutrino problems such as the neutrino's mass, whether a neutrino is a Dirac or a Majorana particle, and the magnetic moment of a neutrino. With the recent development of accelerators, one can use unstable nuclei as targets for electron scattering.

서 론

표준모형에서 중요한 부분을 이루고 있는 경입자(렙톤)는 스핀이 1/2인 페르미온이고 강한 핵력에 영향을 받지 않는 기본 입자이다. 경입자는 전하에 따라 크게 두 가지로 분류되는데, 전하를 띤 입자로는 전자, 뮤온, 타우온이 있고, 전하를 띠지 않은 경입자로 중성미자가 있다. 이러한 경입자들 중 전자의 경우 산란 반응을 이용하여 핵물질 연구에 오랜 기간 동안 널리

Fig. 1. Feynman diagram for lepton-nucleus scattering.

리 사용되었다. 본 기고는 경입자 산란 반응 가운데 가장 많이 연구되어 온 전자-핵 산란과 앞으로 다양한 물리적 현상을 발견할 가능성을 가진 중성미자-핵 산란에 대하여 기술하고자 한다.

전자-핵 산란 실험은 1950년대 초 Hofstadter와 그의 동료들에 의해 스탠포드 선형가속기연구소(Stanford University Linear Accelerator, SLAC)에서 116 MeV 전자 빔을 사용하여 원자핵의 크기를 결정하기 위해 처음으로 시작하였다.^[1] 초창기 전자 산란실험은 탄성 산란을 통해 표적 핵의 기저 상태 전하 분포와 핵자들의 전기 및 자기 모멘트 분포 관측에 집중하였는데, 현재는 더 높은 고에너지 전자 가속기를 이용하여 이전보다 더 많은 전자 산란 실험 정보를 얻게 되었다.

한편 중성미자는 1933년 볼프강 파울리가 에너지 보존을 지키면서 약한상호작용(weak interaction)인 β-붕괴를 설명하는 과정에서 그 존재가 예견되었고, 편극된 ⁶⁰Co의 β-붕괴 사건에 대한 홀짜성 위배 실험을 통해 존재가 확인되었다.^[2] 이후 1970년대 초반 중성미자와 양성자의 탄성 산란 실험이 유럽핵입자물리연구소(CERN)와 아르곤국립연구소(Argonne National Laboratory)에서 시작한 것을 계기로 중성미자를 이용한 약한 상호작용 연구가 활발히 이루어졌다.^[3,4]

경입자-핵 산란 과정은 이론적으로 가상광자(virtual photon) 또는 다른 보존(boson)을 교환하는 과정으로 이해할 수 있다.

저자약력

김경식 교수는 중앙대학교 물리학과에서 이학사와 석사학위 취득 후, 미국 오하이오 대학에서 박사학위를 받았다. 성균관대학교에서 박사후연구원을 한 후, 2006년부터 한국항공대학교 인문자연학부 교수로 재직 중이다. (kyungsik@hau.ac.kr)

REFERENCES

- [1] R. Hofstadter, H. R. Fechter and J. A. McIntyre, Phys. Rev. **91**, 422 (1953).
- [2] C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes and R. P. Hudson, Phys. Rev. **105**, 1413 (1957).
- [3] D. C. Cundy, *et al.*, Phys. Lett. **31B**, 478 (1970).
- [4] W. A. Mann, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **31**, 844 (1973).

Fig. 2. Schematic diagram of the scattering cross section as a function of the transferred energy at a given momentum transfer.

그림 1은 경입자-핵 산란 과정에서의 상호작용을 보여주는데, 전자 산란 과정은 그림 1의 왼쪽처럼 전자기적 상호작용만 사용하고, 중성미자 산란은 약한상호작용이므로 전자기적 상호작용과 약 상호작용, 두 가지 모두 사용한다. 약한상호작용은 전하 교환 여부에 따라 다시 두 가지로 분류할 수 있는데, 하나는 전하를 유지하는 중성 흐름(neutral current) 반응으로 Z 보존만 적용되고, 두 번째는 전하를 교환하는 전하 흐름(charged current) 반응으로써 $W^\pm$ 보존만 포함된다.

그런데 전자-핵 산란과 중성미자-핵 산란은 각각 관측하는 물리량이 다르므로 아래에서는 따로 기술하려고 한다. 우선 전자-핵 산란 과정의 공식과 관측 물리량을 간략히 기술하고, 아직 많은 실험이 이루어지지 않은 중성미자-핵 산란은 이어서 대략적으로 기술할 예정이다. 그리고 마지막으로 이 분야 연구의 전망에 대하여 기술하고자 한다.

전자-핵 산란

1950년대 초 Lyman^[5]에 의해 시작된 전자-핵 산란 실험은 지금까지 60년 이상 지속되어 왔다. 이 산란 실험 결과는 양자전기역학(Quantum Electrodynamics, QED) 이론으로 설명 가능한데, 전자의 비정상(anomalous) 자기모멘트와 같은 여러 물리량을 실험적으로 매우 정확히 측정할 수 있고 이론적으로 계산 가능하다.

전자-핵 산란 과정에서 표적 핵은 가상광자를 통해 에너지와 운동량을 전달받는데, 이러한 에너지와 운동량을 4차원 전이 운동량이라 한다. 그중 3차원 전이 운동량을 고정시킨 후 전이 에너지를 변화시키면 산란 단면적의 봉우리가 여러 개 생성되는데, 이때 생성된 봉우리들은 각각 서로 다른 전자 산란 과정을 의미한다.

그림 2는 주어진 전이 운동량에서 전이 에너지 변화에 따른 개략적인 산란 단면적 그림이다. 고정된 3차원 전이 운동량에

서 에너지 전이 값의 변화에 따라 여러 개의 봉우리를 볼 수 있는데, 첫 번째 봉우리는 탄성 산란에 의한 것으로 표적 핵의 전하 분포 정보를 얻을 수 있다. 두 번째로 나타나는 여러 개의 작은 봉우리들은 표적 핵 내에 존재하는 핵자의 불연속적인 여기 상태에 의해 생성된다. 세 번째 봉우리는 표적 핵 내 핵자들의 집단 운동에 의한 여기 상태에 의해 나타나는 자이언트 또는 거대 공명(giant resonance)이다. 네 번째 봉우리는 준탄성 산란으로 핵 내 핵자들의 페르미 운동 결과에 의해 나타나며, 마지막 봉우리는 전이 에너지가 파이온 질량보다 커질 때 표적 핵이 아닌 핵자와의 상호작용을 통해 파이온이나 케이온과 같은 중간자가 생성된다.

1. 탄성 산란

최초의 탄성 산란 실험은 Rutherford에 의해 이루어졌는데 표적 핵으로 금을 사용하고 입사 핵으로 헬륨 원자핵인 알파 입자를 사용하였다. 탄성산란 실험 결과를 설명하기 위한 가장 간단한 이론은 입사 입자와 표적 핵을 스핀이 0인 구조가 없는 질점으로 간주하고, 표적 핵의 질량이 무한히 커서 되튐(recoil) 현상이 없다고 가정하는 것이다. 여기에 추가로 입사 전자의 스핀과 되튐 현상만 고려하면 (아직 핵의 구조는 고려하지 않음) 러더퍼드 산란 단면적 공식이 전자와 핵의 산란현상을 다루는 모트(Mott) 산란 단면적 공식이 된다. 이 모트 산란 단면적 공식에 표적 핵의 내부 구조를 고려하기 위해서 아래와 같이 형태인자(form factor) $f(\vec{q})$ 의 제곱을 추가해야 한다.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{Mott} |F(\vec{q})|^2$$

즉 같은 운동학 조건에서 실험적으로 측정한 산란 단면적을 모트 산란 단면적으로 나누면 형태 인자를 얻을 수 있다. 이 형태인자는 이론적으로 표적 핵의 확률 밀도분포함수의 푸리에(Fourier) 변환이다. 여기서 스핀이 0인 표적 핵의 경우 위 형태인자는 표적 핵의 전하 분포를 나타낸다. 탄성 전자 산란 실험을 통해 많은 표적 핵의 전하 분포를 매우 정밀하게 측정할 수 있다. 만약 스핀이 1/2인 표적 핵인 경우에는 표적 핵 부피에 걸쳐 있는 자화 분포 정보를 첨가하여야 한다.

이러한 형태인자를 실험적으로 구하는 두 가지 방법이 있다.

REFERENCES

- [5] A. O. Hansen, L. H. Lanzl, E. M. Lyman and M. B. Scott, Phys. Rev. **84**, 634 (1951).

하나의 위 식처럼 산란 단면적을 구하는 방법이고, 다른 하나는 입사 전자 빔과 되튐 핵자를 편극시켜 전기와 자기 형태인자의 비를 구하는 방법이다. 그러나 현재까지 두 실험 방법으로 구한 결과가 서로 일치하지 않고, 두 방법의 결과를 설명할 수 있는 이론적 모형도 없다.

2. 비탄성 산란

비탄성 산란 과정은 표적 핵의 여기 상태 또는 여러 조각으로 깨지는 파편화 현상으로 나타나는데, 파편화 현상의 경우 다양한 상태로 깨어지는 모든 경우를 포함한다. 기본적으로 이론적 수식은 탄성 산란과 거의 비슷하며 단지 에너지 전이가 0이 아닐 따름이다. 또한 그림 2에서는 나타나지 않지만 핵물리 분야에서 중요한 문제로 EMC 효과와 홀짝성 위배가 있는데 아래에 이 두 가지 물리 현상도 함께 간략히 기술한다.

(1) 불연속 여기상태

전자-핵 산란에서 입사 전자는 작은 에너지를 표적 핵에 전달하므로 산란 후의 전자 에너지와 입사 전자 에너지는 서로 다르다. 핵의 불연속 여기상태를 연구하기 위해 실험적으로 여러 산란 각도로 산란된 전자를 관측한다. 이 경우 이론적으로는 표적 핵과 전자 사이의 상호작용을 가상광자 하나의 교환으로 가정하여 앞서 소개한 QED로 계산한다. 산란 단면적은 크게 쿨롱 다중극(multipole), 전기 및 자기 다중극의 합으로 표현되는데 긴 파장 영역에서는 쿨롱 다중극 항이 전기 다중극 항에 비례하게 된다. 초기상태의 총 각운동량 J_i 에서 최종 각운동량 J_f 로 전이할 때, 산란 단면적 $\frac{d\sigma}{d\Omega}(J_i \rightarrow J_f)$ 을 실험에서 측정하고 이론적으로 계산한다. 이 산란 단면적 계산 결과는 쿨롱, 전기, 자기항의 합이므로 운동량 변화에 따른 전하의 전이, 자화 밀도 등을 얻을 수 있다.

(2) 자이언트 공명

자이언트 공명은 핵 내에 존재하는 전체 중성자에 대한 전체 양성자의 집단 진동 현상이다. 이 현상은 광핵 반응(photonuclear reaction)에서 처음 발견되었다.^[6] 가상광자를 교환하는 전자 산란을 이용하여 그림 2의 자이언트 공명을 얻을 수 있다. 광핵 반응보다 전자 산란이 더 이로운 점은 여러 운동량에 대해서 측정이 가능하기 때문인데, 이러한 핵 내의 집단 모형을 구축하는 대표적 이론으로 Goldhaber-Teller(GT) 모형을 들 수 있다.^[7]

(3) 준탄성 산란

준탄성 산란은 전자 산란은 상호작용을 하는 가상광자가 핵

Fig. 3. Experimental data from EMC Collaboration.^[8] The horizontal axis is the Bjorken x and the vertical axis represents the ratio of the form factor in Fe and deuterium targets.

내의 단일 핵자와 반응한 후 핵으로부터 튀어나오는 과정이다. 이 준탄성 산란의 운동학 조건은 변수 $\omega = Q^2/2M$ 를 이용하여 정의된다. 여기서 ω 는 에너지 전이, Q^2 은 4차원 전이 운동량 제곱, M 은 핵자의 질량이다. 현재 대부분의 원자핵 모형은 실험 결과를 대체적으로 잘 기술한다. 그러나 고정된 3차원 전이운동량에서 세로 함수를 전이 에너지 전 영역에 대하여 적분한 값이 표적 핵의 전하량과 같다는 쿨롱합규칙(Coulomb sum rule) 현상에 대해 이론 결과와 실험 결과가 현저한 차이를 보이고 있다. 이것이 아직 풀리지 않은 핵물리 문제 가운데 하나이다.

(4) EMC 효과

1983년 CERN에서 처음으로 발견된 European Muon Collaboration(EMC) 효과는 현재까지 풀리지 않은 문제로 남아있다.^[8] 그림 3은 유명한 EMC 실험 결과로서 x -축은 핵 내에 존재하는 쿼크에 의해 운반된 핵자 운동량의 비율이며 흔히 Bjorken x 변수라고 불린다. 핵 내의 쿼크는 자유 상태인 핵자 내의 쿼크보다 더 작은 운동량을 갖고 더 큰 부피 영역에서 운동한다. 그림자 영역이라 불리는 더 작은 x 영역에서 측정된 구조 함수의 비율이 줄어드는 이유는 광자의 하드론 구조나 파톤의 세로 방향 겹침 탓으로 짐작되고 있다. 즉 자유 상태 핵자 크기보다 구속 핵자 크기가 더 크거나 핵자 결합 때문에 파이온 구름 효과와 핵 내의 파이온 장이 상승을 이끈다고 해석될 수 있다.

REFERENCES

- [6] G. C. Baldwin and G. S. Klaiber, Phys. Rev. **71**, 3 (1947).
- [7] M. Goldhaber and E. Teller, Phys. Rev. **74**, 1046 (1948).
- [8] J. Aubert *et al.*, Phys. Lett. **123B**, 275 (1983).

(5) 홀짝성 위배

1950년 말에 핵의 베타 붕괴 과정에서 홀짝성 위배현상의 발견은 약전기상호작용을 이해하는데 결정적인 역할을 했다. 역사적으로 중수소(deutrium) 표적에 의한 깊은-비탄성(deep-inelastic) 편극 전자 산란실험에서 홀짝성 위배현상의 측정은 표준 모델에서 약전기상호작용의 $SU(2) \times U(1)$ 형태의 타당성과 하드론 약중성 흐름의 효과적 탐침 수단으로 사용되었다. 더욱 관심 있는 부분은 불확실성이 높은 중성자의 전기 형태인자(electric form factor)인데, 근래에 시행된 MIT-Bates 실험에서 중성자 전기 형태인자를 약 15-20% 정도의 정밀도로 측정하였다.^[9] 최근에 더욱 큰 관심을 끄는 문제는 하드론 중성 흐름과 관련된 기묘 쿼크의 전기 및 자기 형태인자와 축 벡터 기묘 형태인자이다. 낮은 에너지 영역에서 QCD는 검증하기 매우 어려우므로 위의 기묘 쿼크 형태인자 등을 이용하여 표준 모형을 검사할 수 있다.

(6) 중간자 생성

마지막으로 전자의 에너지 전이가 더욱 커지면 파이온과 같은 중간자의 생성과정에 이르게 된다. 이때 가상광자는 핵자와 상호작용을 함으로써 강입자의 구조를 연구하는 데에도 크게 기여할 수 있다. 특히 파이온-핵자 상호작용과 같은 매개변수의 측정부터 게이지 불변이나 손지기 대칭과 같은 문제를 이해하고 연구하는데 크게 활용될 수 있다. 이 경우에도 여러 공명상태가 발견되는데, 이것은 핵이 아닌 핵자가 들뜨며 생기는 공명 상태이다.

파이온 생성반응을 통해 특정 운동학 조건 하에서 핵자나 파이온의 형태인자와 같은 여러 매개변수를 측정할 수 있다. 특히 게이지 불변이나 근사적 손지기 대칭과 같은 문제는 많은 주목을 끌고 있다. 한편, 이 영역에서는 여러 공명 현상이 일어나는데 지금까지 이 공명은 가로 산란 단면적과 세로 산란 단면적 비에 의존한다고 알려져 왔으나 제퍼슨연구소(Jefferson National Accelerator Laboratory, JLab)에서 실시된 E94-110 실험결과에 따르면 오히려 세로 산란 단면적이 매우 큰 기여도를 보이고 있다.^[10]

중성미자-핵 산란

우선 중성미자 자체에 대한 연구는 Raymond Davis Jr.가 2002년에 노벨물리학상을 수상한 후 매우 활발하게 연구되는 분야이다. 우주 생성의 원리인 대폭발(Big Bang) 이론에 따르면 우주 공간에 무한히 많은 중성미자가 차있는 것으로 짐작된다. 그래서 이 분야는 천체, 입자, 핵 물리학 등 여러 분야

Fig. 4. Experimental data for (anti)neutrino-proton elastic scattering.^[14] The horizontal axis is the square of the 4-momentum transfer and the vertical axis represents the cross section.

에서 아직 풀리지 않은 문제점을 해결할 유일한 분야이다. 그 문제점들 가운데 현재 가장 큰 숙제는 중성미자 질량의 존재 여부와 진동 현상에 대한 이해이다. 또한 중성미자의 진동 매개변수 값, CP-위배 현상, 디랙(Dirac) 입자 또는 마요나라(Majorana) 입자 여부, 자기 모멘트의 존재 등 아직도 중성미자에 대해 많은 이해가 필요한 상태이다. 그래서 중성미자는 발전 가능성이 큰 분야로 손꼽히고 있다. 최근 이와 같은 흐름에서 우주 관측을 통한 중성미자 자료의 해석은 이 방면 연구의 새로운 돌파구가 될 수 있을 것으로 기대된다.^[11]

한편 우주 중성미자를 핵의 구조 연구에 이용하기에는 에너지 범위가 너무 제한적이므로, 페르미 국립연구소(Fermi National Accelerator Laboratory, FNAL)의 FINESS 실험 계획은 0.5 ~ 1 GeV 빔 에너지 범위를 제안하였다.^[12] 이 실험은 중성-흐름 탄성 산란을 이용하여 양성자 스핀에 대한 기묘 쿼크의 기여도에 초점을 두고 있다. 그리고 FNAL의 MiniBooNE 실험은 중성미자의 진동 현상에 중점을 두고 현재 초신성 중성미자, 중성미자-핵 산란, 그리고 하드론 구조 연구와 관련된 자료를

REFERENCES

- [9] P. A. Souder, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **65**, 694 (1990).
- [10] Y. Liang *et al.*, arXiv nucl-ex/0410027 (2004).
- [11] K. Langanke and C. A. Barnes, Advances in Nuclear Physics, **22**, 173 (1996); S. Kubono, Prog. of Theoretical Physics, **96**, 275 (1996); Claus E. Rolfs and W. S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos* (The Univ. of Chicago Press, 1988); D. N. Schramm and M. S. Turner, Rev. Mod. Phys. **70**, 303 (1998).
- [12] L. Bugel *et al.*, arXiv:hep-ex/040207v1 (2004) and <http://www.finesse.fnal.gov/TheFINESSFNALLOI.html>.

Fig. 5. Conceptual design of the beta-beam accelerator.^[17,18]

제공하고 있다.^[13]

특히 중성미자-핵 산란 과정은 약한상호작용이므로 흐름 산란자는 기묘 축-벡터 형태인자를 포함하고 있다. 지금까지 이 형태인자 값은 영으로 알려져 있었으나 브룩해븐국립연구소(Brookhaven National Laboratory, BNL)에서 진행된 중성미자-양성자와 반중성미자-양성자 탄성 산란실험을 통해 그림 4와 같이 0이 아님을 보고한 바 있다.^[14] 이 결과는 중성미자와 핵 사이의 반응에 대한 최초 실험결과이며 축 결합 상수에 기묘도가 일정한 역할을 하고 있다는 최초의 실험적 보고이다.

그런데 위 실험은 중성미자 검출의 어려움과 함께 입사 중성미자의 빔이 고정되어 있지 않으므로 나중 상태 핵자의 에너지를 고정시킬 수 없다는 문제점이 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 전자 포획(electron capture) 과정을 이용한 단일 에너지 중성미자 빔을 만드는 방법을 몇몇 논문에서 제시하였다.^[15,16]

최근에는 베타-빔(beta-beam)이라 불리는 새로운 개념의 중성미자 빔 생성 방법이 CERN에서 제안되었다.^[17,18] 이 베타-빔은 경입자 부분의 CP-위배를 연구하기 위하여 제안되었다.

베타-빔의 개념은 중성미자를 방출하면서 붕괴하는 방사능 이온을 가속시켜 단일 중성미자 빔을 얻는 것이다. 그림 5와 같은 장치를 이용할 경우 2.2 GeV 에너지를 갖는 100 μ A 양성자 빔으로 ${}^6\text{He}$ 를 생성시키면 평균 580 MeV의 중성미자 빔 에너지를 얻을 수 있다. 이 계획이 성공하면 쿨롱 효과에 의한 왜곡이 없으므로 표적 핵의 성질을 규명하는데 전자 빔보다 훨씬 유리할 것으로 기대된다.

결론

전자와 중성미자 빔을 이용한 핵 산란은 지난 60여 년간 핵물질 연구에 매우 유용하게 사용되었다. 제퍼슨국립가속기연구소에서는 중성자 별의 구조를 연구하기 위하여 ${}^{208}\text{Pb}$ 표적을 이용한 전자 산란 실험을 진행 중이다. 또한 중성미자-핵 산란은 최근 여러 가속기 실험실에서 실험을 이미 끝냈거나 계획 중이다. 이러한 실험들은 표적 핵이 안정한 원자핵이라는 공통점이 있다. 그런데 최근 일본 이화학연구소(RIKEN)에서 SCRIPT (self-confining RI ion target) 기술을 개발하여 불안정한 원자핵을 표적 핵으로 사용하는 실험을 시험적으로 수행하였다.^[19] 이와 같이 새로운 기술개발을 통해 경입자-핵 산란은 핵물질 연구에 매우 유용한 도구로 다양하게 사용될 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [13] C. Athanassopoulos *et al.*, LSND, Phys. Rev. Lett. **75**, 2650 (1995).
- [14] L. A. Ahrens, *et al.*, Phys. Rev. D **35**, 785 (1987).
- [15] Joe Sato, Phys. Rev. Lett. **95**, 131804 (2005).
- [16] Jose Bernabeu, *et al.*, J. Hep. **12**, 014 (2005).
- [17] P. Zucchelli, Phys. Lett. B **532**, 166 (2002).
- [18] Cristina Volpe, J. Phys. G **34**, R1 (2007).
- [19] K. Tsukada, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 262501 (2017).