핵자의 횡단면 구조

DOI: 10.3938/PhiT.26.049

김 현 철

Transverse Structure of the Nucleon

Hyun-Chul KIM

We briefly review, from a bird's-eye view, how the structure of the nucleon has been developed. The electromagnetic form factors of the nucleon were traditionally thought to describe the corresponding charge and magnetization densities. However, a modern concept of the nucleon form factors has changed the entire perspective on the internal structure of the nucleon. The generalized parton distributions (GPDs) describe the nucleon much vividly and even more correctly by combining form factors with parton distributions. The GPDs describe possible distributions of the quarks inside a nucleon, such as the charge and the spin distributions in a plane perpendicular to the direction of motion of the nucleon; they also encode information on how the partons shape the nucleon along the direction of motion, *i.e.*, the longitudinal direction. In this new point of view, form factors can be considered as Mellin moments of the GPDs; this allows one unprecedentedly to look into the internal structure of the nucleon in the transverse plane.

들어가는 말

핵자(nucleon)는 보이는 우주 대부분을 이루고 있는 입자다. 핵자는 별이 스스로 자신을 태우며 빛을 내는 데 쓰는 땀감이기도 하다. 그리고 핵자를 아는 건 핵물리학으로 들어가는 관문이다. 핵자의 구조를 이해하고 핵자가 서로에게 어떻게 영

저자약력

김현철 교수는 1993년 독일 Bonn 대학교에서 핵물리학 이론으로 박사학위를 받은 뒤, 독일 Bochum Ruhr 대학교 연구원을 거쳐 1998년부터 2008년까지 부산대학교 물리학과 교수로 일하였다. 2008년 3월부터 현재까지 인하대학교 물리학과 교수로 재직하고 있다.
(hchkim@inha.ac.kr)

향을 미치는지 알아야, 핵자가 모여 어떻게 핵을 이루는지 제대로 볼 수 있다. 양성자가 발견된 지는 벌써 백 년이 훌쩍 넘었고, 중성자가 발견된 지도 이미 구십 년 가까이 된다. 인간이 이 두 입자를 알게 된 지 이토록 오래되었지만, 이 입자가 어떻게 생겼는지 알아가는 것은 여전히 현재진행형이다. 물리학자들이 이 두 입자의 구조를 얼마나 파악했는지 설명하기 전에 먼저 잘 알려진 사실부터 살펴보자.

양성자는 양전하를 띠고 있기 때문에 우리말로로는 양성자라고 부르지만, 영어로는 러더포드가 지은 대로 프로톤(proton)이라고 부른다. 어원을 따져보면, 이 프로톤은 그리스어인 프로토스(protos)에서 왔는데, 처음을 뜻한다. 스타크래프트라는 전략 시뮬레이션 게임에는 세 종족이 나온다. 프로토스, 테란, 저그. 앞에서 말한 그리스어 프로토스를 떠올린다면, 이 중에서 가장 먼저 생겨난 종족이 프로토스라는 걸 금방 눈치 챘을 거다. 마찬가지로 프로톤이라는 이름도 양성자가 중입자 중에서 가장 먼저 발견된 입자라는 걸 암시한다. 핵 안에는 양성자가 오글오글 몰려 살고 있다. 그러나 양성자만으로는 핵의 질량을 다 설명하지 못한다. 더구나 전하가 같은 양성자끼리는 서로 밀치려고 한다. 그리고 강력이 있어도 힘이 미치는 범위가 짧기 때문에 이들이 서로 단단하게 묶여 있기란 쉽지 않다. 그래서 저 척력을 이겨내고 더 세계 양성자들을 끌어당길 수 있는 무언가가 있어야만 한다. 1932년에 채드윅이 이 조건을 잘 만족하는 입자를 찾아내었는데, 그게 바로 중성자다. 중성자는, 질량은 양성자와 비슷하지만 전하가 없다. 그래서 이름도 중성자(neutron)라고 부른다.

핵자는 양성자와 중성자를 통칭하는 단어다. 양성자와 중성자 사이에 미치는 힘이든, 중성자와 중성자 사이에 미치는 힘이든, 핵자들 사이에 작용하는 힘의 성격이 같아서, 전하를 제외하곤 굳이 양성자와 중성자를 구분할 필요가 없다. 그렇다고 양성자와 중성자의 생김새가 똑같다는 말은 아니다. 핵자들 사이에 미치는 힘만 따질 땐 양성자나 중성자를 구분하는 것이 그다지 중요하지 않다는 뜻이다. 이런 걸 핵력의 전하 대칭성 또는 조금 더 전문적인 말로 아이소스핀(isospin) 대칭성이라고 부른다.

핵자의 옛 모습

핵자는 전자와 달리 내부구조가 있다. 이걸 물리학자들이 이미 오래 전부터 알고 있던 사실이다. 1933년에 벌써 에스터만(Estermann)과 슈테른(Stern)이 양성자의 비정상 자기모멘트를 측정하였는데,^[1] 그 값이 전자의 비정상 자기모멘트보다 훨씬 더 크다. 그래서 핵자의 생김새가 전자와 사뭇 다를 것이라는 건 다들 어렵פות이 알고 있었다. 그러나 양성자의 모습이 제대로 윤곽을 드러낸 건 1950년대 들어서였다. 1950년대에 스탠포드 연구소에 있던 로버트 호프스테터는 그곳 선형 가속기에서 나오는 전자를 양성자에 쏘아, 전자가 물고 나오는 정보를 꼼꼼히 살펴보았다. 호프스테터가 한 실험을 전자와 핵자의 탄성 산란이라고 부르는데, 이 말은 양성자가 에너지를 흡수해서 다른 중입자나 들뜬 핵자로 바뀌지 않고 전자와 산란한 후에 에너지를 처음과 똑같이 유지되는 반응을 의미한다. 만약에 핵자가 전자처럼 아무런 구조가 없었더라면, 실험 결과가 전자와 전자가 산란하는 것처럼 나왔을 터지만, 운동량 전이가 크면 클수록 측정된 단면적 값은 전자끼리 산란하는 경우보다 더 작게 나왔다. 호프스테터는 이 실험에서 핵자의 내부구조에 대해 많은 걸 알아내었다.^[2] 이때 핵자의 내부구조를 보여주는 양을 형태인자라고 하는데, 이 중에서 전자기 형태인자는 핵자 내부에 전하와 전류가 어떻게 분포되어 있는지 알려준다. 호프스테터는 이 전자기 형태인자에서부터 양성자의 반지름이 대략 $0.8 \text{ 펨토미터}(10^{-15} \text{ m})$ 정도 된다는 사실도 알아내었다. 이 값은 오늘날 실험 물리학자들이 측정한 양성자의 반지름과 크게 다르지 않다. 호프스테터는 전자를 이용하여 핵자의 구조를 자세히 알아낸 공로로 1961년에 노벨물리학상을 수상하였다.

세월이 가면서 스탠포드에 있는 전자 선형 가속기도 점점 더 업그레이드되었다. 1967년에는 전자의 에너지가 21 기가볼트에 이를 정도로 세졌다. 전자의 에너지가 커지면서 전자와 핵자의 심층 비탄성 산란 실험도 가능해졌다. 여기서 심층 비탄성 산란은 사람의 뼈 속까지 살살이 들여다보듯이 핵자 안 깊숙이 살펴볼 수 있다는 걸 의미한다. 1969년에 매사추세츠 공과대학의 프리드먼(J. I. Friedman)과 켄들(H. W. Kendall)이 이끄는 실험 그룹과 스탠포드 선형 가속기 센터에 있는 테일러(R. E. Taylor)의 연구팀이 함께 내놓은 실험 결과는 매우 놀라웠다. 탄성 산란의 경우에 전자와 양성자의 산란 단면적은 전자와 핵자 사이의 운동량 전이가 커지면 커질수록 작게 나왔지만, 심층 비탄성 산란의 경우에는 이 운동량 전이가 커져도 그 값이 크게 바뀌지 않았다. 더구나 처음 전자의 에너지가 높으면 높을수록, 단면적을 측정한 값은 운동량 전이의 크기와 점점 더 상관없이 거의 일정하게 나왔다.^[3] 그건 마치 α 입자를 조금 높은 에너지로 원자에 충돌시켰을 때 나온 단면적의

결과를 연상시켰다. 이걸 핵자 내부에 새로운 입자가 존재한다는 걸 명시해준 실험이었다.

탄성 산란에서 단면적 실험 결과를 설명하는 데 중요한 역할을 한 양이 형태인자였다면, 심층 비탄성 산란에서 양성자의 내부 구조를 나타내는 양은 구조함수이다. 이 함수는 양성자가 진행하는 방향의 운동량 중에서 쿼크 하나가 가져가는 운동량이 얼마인지 보여주는 양이다. 또 다른 종류의 구조함수는 양성자의 스핀 $1/2$ 중에서 쿼크가 기여하는 스핀은 얼마나 되는지 알려주기도 한다. 그리고 이 구조함수는 글루온도 양성자의 운동량과 스핀의 일정 부분 담당하고 있다는 정보도 준다. 뿐만 아니라 양성자 안에는 반쿼크도 존재하는데, 이 반쿼크도 양성자의 운동량과 스핀에 기여한다. 그러니까 심층 비탄성 산란 실험은 핵자가 쿼크 모형이 설명하는 것처럼 단순히 쿼크 세 개로 이루어져 있는 단순한 입자가 아니라, 쪽입자(parton)라고도 불리는 쿼크, 반쿼크, 글루온으로 이루어져 있는 매우 복잡한 입자라는 사실을 암시한다. 이와 같이 궁극적으로 전자 양성자 심층 비탄성 산란은 1970년대에 나온 양자색소역학이 강력을 설명하는 근본 이론임을 뒷받침하는 데 매우 큰 역할을 했다. 전자의 심층 비탄성 산란 실험을 주도한 세 명의 물리학자는 1990년에 노벨물리학상을 공동으로 수상하였다.

일반화 쪽입자 분포와 일반화 형태인자

핵자의 형태인자와 구조함수가 핵자 속 모습이 어떻게 생겼는지 윤곽을 잡는 데 크게 도움을 주었지만, 핵자의 모습을 흠없이 다 이해한 건 아니었다. 아주 오래 전부터 물리학자들을 끊임없이 괴롭히던 문제가 하나 있었다. 1927년에 데니스(Dennison)이 양성자가 스핀 $1/2$ 인 페르미 입자라는 걸 실험으로 알아낸 지 수십여 년이 지났지만,^[4] 물리학자들은 양성자의 스핀이 왜 $1/2$ 이 되는지 아직까지도 완벽하게 파악하지 못하고 있다. 1970년대부터 실험 물리학자들은 심층 비탄성 산란을 더 발전시켜서, 전자를 진행방향으로 편극시키고 양성자도 편극시킨 편극된 심층 비탄성 산란 실험을 했는데, 놀랍게도 양성자 내부에 있는 쿼크와 반쿼크가 양성자의 스핀에 기여하는 건 기껏해야 40%도 채 안 된다는 사실을 알아내었다. 1980년대 후반에는 그 이유가 핵자 안에서 생겨난 기묘쿼크의 스핀이 핵자의 스핀과는 반대로 편극되면서 핵자의 스핀에 쿼크가 주는 기여를 제법 많이 갉아먹고 있다는 사실도 알게 되

REFERENCES

- [1] I. Estermann and O. Stern, Z. Phys. **85**, 17 (1933).
- [2] R. Hofstadter, Rev. Mod. Phys. **28**, 214 (1956).
- [3] M. Breidenbach *et al.*, Phys. Rev. Lett. **23**, 935 (1969).
- [4] D. M. Dennison, Proc. R. Soc. London, Ser. A **115**, 483 (1927).

었다. 그렇다면 양성자의 스핀에서 쿼크의 기여를 뺀 나머지는 어디서 오는 걸까? 이 문제가 워낙 어려웠기 때문에, 사람들은 여기에 “양성자의 스핀 퍼즐”이라는 이름을 붙여놓고 고민하기 시작했다. 양성자 스핀의 나머지는 글루온의 스핀, 그리고 쪽입자들의 각운동량에서 오리라는 걸 짐작할 수 있지만, 그걸 명징하게 규명하는 건 아주 어려운 일이었다. 특히 쪽입자들의 각운동량을 알기 위해서는 핵자와 진행 방향과 같은 방향의 성분(이걸 핵자의 평행 방향 구조(longitudinal structure)라고 부른다)뿐만 아니고, 진행 방향에 수직인 면에서 핵자의 구조도 살펴봐야만 한다(이걸 핵자의 횡단면 구조(transverse structure)라고 부른다).

1990년대 들어서면서 핵자의 횡단면 구조를 살피는 데는 심층 가상 콤프턴 산란(deeply virtual Compton scattering)이나 배타적 산란(exclusive scattering) 실험이 중요하다는 사실과 일반화 쪽입자 분포라고 하는 양이 그 산란과 깊은 연관이 있다는 걸 발견하였다.^[5] 일반화 쪽입자 분포함수는 핵자의 평행 방향 구조와 횡단면 구조를 모두 포함하고 있는, 물리적으로 대단히 가치 있는 양이다. 그리고 최근 들어서 이 횡단면 구조는 지금까지 알고 있던 형태인자보다 훨씬 더 일반적인 의미가 있다는 사실도 알아내었다. 여태까지는 핵자의 전기형태인자를 삼차원 푸리에 변환해서 핵자 내부의 전하 분포를 볼 수 있다고 생각했지만, 이런 생각은 철저히 틀렸다는 게 밝혀졌다. 핵자 속에 있는 쪽입자인 쿼크, 반쿼크, 글루온은 태생부터 상대론적이기 때문에 핵자의 진행 방향의 횡단면에서 쿼크의 전하분포와 스핀 분포를 재정의하는 게 필요하다.^[6] 이들을 각각 횡단면 전하밀도(transverse charge density), 횡단면 스핀밀도(transverse spin density)라고 부른다. 이런 양은 모두 상대론적이기 때문에 핵자뿐만 아니라, 파이온이나 케이온 같이 가벼운 중간자나 그 외 모든 강입자의 구조를 이해하는 데도 크게 도움이 된다. 이 횡단면 전하밀도가 삼차원 전하 분포와는 극명하게 다르다는 걸 보여준 게 중성자 전하분포다. 전에는 중성자 내부 중앙에 양전하(또는 위쿼크)가 자리 잡고 있고, 바깥으로 갈수록 음전하(아래쿼크)가 위치한다고 알고 있었으나, 횡단면에서는 이와는 완전히 어긋난 모습을 보여준다. 그림 1처럼 아래쿼크는 중성자의 중앙에 딱 하니 놓여있는 반면에 바깥쪽에는 위쿼크가 가까스로 자리 잡고 있다.

이 일반화 쪽입자 분포함수를 이용하면, 지금까지 알고 있던 핵자의 형태인자를 완전히 새로운 관점에서 정의할 수 있다. 앞에서 설명한 전기 형태인자를 예로 들어보자. 대부분의 교과서에서는 전기 형태인자를 전하분포를 삼차원 푸리에 변환한 양이라고 정의한다. 그러나 형태인자를 일반화 쪽입자분포의 멜린 모멘트(Mellin moment)로 정의하면, 핵자가 진행하는 방향의 횡단면에서 핵자의 내부구조를 양자역학에 걸맞게 들여다 볼 수 있다. 그러니까 핵자 안에서 쿼크가 확률에 따라 분포하

Fig. 1. Transverse charge densities of the proton, as computed in the SU(3) chiral quark-soliton model with and without relativistic corrections. Note that the negative charge is centered whereas the positive one is located in the tail of the density.^[7]

고 있다는 걸 모순 없이 보여줄 수 있다. 새로운 정의에 따르면, 앞서 말한 전기 형태인자는 벡터 일반화 쪽입자 분포함수의 첫 번째 멜린 모멘트로 간주할 수 있고, 이 양은 횡단면에서 쿼크들의 전하가 확률적으로 어떻게 분포되어 있는지를 보여준다. 더 흥미로운 형태인자는 중력 형태인자(gravitational form factors) 또는 에너지-운동량 텐서 형태인자(energy-momentum tensor form factors)다. 이 형태인자를 직접 측정하려면, 중력자를 매개할 수 있는 입자를 핵자와 산란시켜야 하는데, 유감스럽게도 그런 실험은 존재하지 않는다. 하지만 핵자의 배타적 산란을 이용하여 일반화 쪽입자 분포를 측정할 수 있다면, 중력 형태인자를 간접적으로 확인할 수 있는 방법이 가능하다. 왜냐하면 핵자의 중력 형태인자는 아이조-스칼라 벡터 일반화 쪽입자 분포함수의 두 번째 멜린 모멘트로 정의할 수 있기 때문이다. 그래서 이렇게 정의한 형태인자를 일반화 형태인자(generalized form factor)라고 부른다.

중력 형태인자는 전자기 형태인자 못지않게 중요한 양이다. 이 형태인자는 쿼크와 글루온의 에너지가 핵자 내부에 어떻게 분포되어 있는지, 그리고 쿼크와 글루온의 궤도 각운동량이 어떻게 주어지는지를 보여준다. 거기에 더해 핵자가 어떻게 해서 안정된 상태를 유지할 수 있는지도 알려 준다. 그리고 에너지-운동량 형태인자는 핵자를 설명하려고 하는 모형이 올바른지 그른지를 확인할 수 있는 시금석이기도 하다. 뿐만 아니라 에너지-운동량 형태인자는 핵물질 안에서 핵자가 어떤 변화를 겪

REFERENCES

- [5] D. Müller *et al.*, Fortsch. Phys. **42**, 101 (1994); X. Ji, Phys. Rev. Lett. **78**, 610 (1997); A. V. Radyushkin, Phys. Lett. B **380**, 417 (1996).
- [6] M. Burkardt, Phys. Rev. D **62**, 071503 (2002).
- [7] A. Silva, D. Urbano and H.-Ch. Kim, PTEP, in press (2018).

Fig. 2. Mass form factor $M_2^*(t)$ as a function of the momentum transfer squared t . ρ denotes the nuclear matter density and ρ_0 is the density at normal nuclear matter density. For details about Models I and II, we refer to Ref. [8].

는지도 잘 보여준다. 그림 2는 벡터 중간자 솔리톤 모형에서 질량 형태인자를 계산한 결과인데, 핵물질의 밀도가 높아질수록, 형태인자의 값이 운동량 전이가 커짐에 따라 더 빨리 줄어드는데, 이 말은 핵물질 안에서 핵자의 크기는 좀 더 커진다는 걸 보여준다.

일반화 형태인자 중에서 반대칭 텐서 형태인자는 핵자의 횡단면에서 쿼크의 스핀이 어떻게 분포되어 있는지 보여주기도 한다. 그림 3은 핵자 안에서 위쿼크와 아래쿼크의 스핀이 어떻게 분포되어 있는지를 나타낸다.

이처럼 일반화 쪽입자 분포와 일반화 형태인자가 우리에게 제공해주는 핵자의 모습은 예전과는 비교가 안 될 정도로 선명하다. 그건 마치 흑백으로만 보던 세상을 총천연색으로 다시 보는 것에 비견할 만하다.

전 망

일반화 쪽입자 분포와 일반화 형태인자는 지금까지 알고 있던 핵자의 내부구조를 보다 온전하게 이해할 수 있게 해주었다. 미국 제퍼슨 연구소의 전자가속기에서 나오는 전자 에너지를 12 GeV에 이르도록 업그레이드한 주 이유도 핵자를 더 깊

Fig. 3. Transverse up and down quark spin densities with the lowest moment of the nucleon from the chiral-quark-soliton model. In the upper left panel, the density of unpolarized quarks in a transversely polarized nucleon ($[S, s]=[(1,0),(0,0)]$) is drawn and in the upper right panel, that of transversely polarized quarks in an unpolarized nucleon ($[S, s]=[(0,0),(1,0)]$). In the lower panel, we plot the down quark densities. S and s denotes respectively the spin vectors of the nucleon and quark in the transverse plane. $S=(1, 0)$ implies that the spin of the nucleon is polarized along the b_x axis.^[9]

이 이해하려는 목적 때문이다. 그리고 CERN의 LHC에서도 핵자 안에 글루온들이 어떻게 분포되어 있는지, 그리고 핵자의 스핀 1/2 중에서 글루온이 기여하는 게 어느 정도인지 더 정확하게 알아낼 수 있는 실험을 할 수 있다. 양성자가 발견된 지 100여 년이 지나서야 물리학자들은 핵자 안을 제법 제대로 그려낼 수 있게 되었다. 그러나 물리학자들은 이제 겨우 핵자를 제대로 묘사할 수 있는 붓과 물감을 손에 넣은 셈이다. 마치 MRI나 PET-CT가 사람의 몸속을 정확하게 찍어내듯이 핵자의 구조를 속속들이 알아내기 위해서는 가야할 길이 제법 멀지만, 점점 더 드러나는 핵자의 모습은 물리학자들이 열광할 만큼 충분히 아름답다.

REFERENCES

- [8] J.-H. Jung *et al.*, Phys. Rev. D **89**, 114021 (2014).
- [9] T. Ledwig and H.-Ch. Kim, Phys. Rev. D **85**, 034041 (2012).