스핀 편극 현상과 양성자의 구조

DOI: 10.3938/PhiT.24.040

황 대 성

Spin Polarization Phenomena and Proton Structure

Dae Sung HWANG

We study the mechanism of the single-spin asymmetry in connection with quantum chromodynamics. The basis of this mechanism is the interference effect of quantum mechanics. We also study the spin-dependent distribution functions of the proton and show that the existence of these distribution functions is related to the existence of the single-spin asymmetry.

서 론

하드론의 스핀 편극 현상 중에서 특히 흥미로운 현상인 단일 스핀 비대칭 현상(Single-Spin Asymmetry, SSA)의 실험적 발견은 1970년 중엽에 수행된 $pBe \rightarrow \Lambda^+ X$ 실험으로 거슬러 올라간다.^[1] 이 실험에서 관측한 현상은 편극되지 않은 양성자와 beryllium의 충돌에서 생성된 Λ 입자의 스핀이 20 내지 30%의 편극을 갖는다는 사실이었다. 이와 같이 전체 반응 중에서 한 입자만이 편극된 현상을 단일 스핀 비대칭 현상이라고 부른다. 만약에 이 반응에서 초기상태의 양성자 또는 beryllium의 스핀이 편극을 갖은 경우에 나중상태의 Λ 입자의 스핀이 편극되었다면, 초기상태의 스핀편극이 나중상태의 스핀편극으로 전달된 것으로 쉽게 이해할 수 있다. 그러나 전체반응 중의 한 입자의 스핀만이 관여하는 이 단일 스핀 비대칭 현상은 이론적인 측면에서 단순히 생각하면 불가능해 보임에도 불구하고 실험적으로 발견되었다. 이 실험결과에 대한 이해를 위하여 많은 노력이 있었으며, 양자역학의 간섭효과로 이를 이해하게 되었다. 양자역학에서 한 물리반응의 반응확률은 복소수로 주어지는 amplitude의 절대 값 제곱에 비례한다. 그런데

이 물리반응에 관여하는 amplitude가 하나 이상이라면 이 물리 반응의 반응확률은 관여하는 amplitude들의 합의 절대 값 제곱에 비례하기 때문에, 반응 확률은 관여하는 amplitude들 간의 복소수 위상(complex phase)의 차이에 민감하게 의존한다. 이와 같은 현상이 양자역학의 간섭현상이며 이 원리를 이용하여서 단일 스핀 비대칭 현상을 이해하는 것이 가능하였다. 단일 스핀 비대칭 현상은 앞에 얘기한 Λ 입자의 스핀 편극 이외에도 여러 물리반응에서 발견되었으며, 이와 관련하여서 특히 흥미로운 진전은 스핀에 의존하는 양성자의 분포함수의 존재가 단일 스핀 비대칭 현상의 존재와 밀접하게 관련되어 있다는 사실을 보인 연구결과이다. 단일 스핀 비대칭 현상과 스핀에 의존하는 양성자의 분포함수의 기본원리와 기본성질에 대하여 다음 두 절에서 차례로 설명하겠다.

단일 스핀 비대칭 현상

단일 스핀 비대칭 현상과 관련된 중요한 진전은 앞 절에서 얘기한 하드론-하드론 충돌 외에 $lp^+ \rightarrow l' \pi X$ 의 준포괄적 심층 비탄성 산란(Semi-Inclusive Deep Inelastic Scattering, SIDIS)에서도 활발하게 이루어지고 있다. 이 반응의 중요한 실험결과가 DESY의 HERMES 그룹에 의하여 발표되었으며 CERN의 COMPASS 그룹과 JLAB의 CLAS 그룹에 의하여 이 분야의 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 SIDIS 연구는 렙톤이 구조를 갖고 있지 않음으로 해서 표적(target) 하드론의 구조를 연구하는데 있어서 보다 깨끗한 상황을 제공해 주기 때문에 단일 스핀 비대칭 현상을 가능하게 하는 기본적인 핵심적인 원리에 대한 이론적 연구에 소중한 정보를 제공해 준다.

저자는 동료 물리학자들과 함께 단일 스핀 비대칭 현상을 그림 1에 보인 쿼크와 글루온의 나중 상태 상호작용(final-state interaction)에 의한 양자역학적 간섭효과를 적용하여 이해한 논문을 2002년에 발표하였으며 이 논문의 연구내용은 이 연구 분야에서 단일 스핀 비대칭 현상을 설명하는 것으로 받

저자약력

황대성 교수는 University of California, Berkeley에서 1987년에 박사 학위를 받았으며 1994년부터 세종대학교 물리천문학과 교수로 재직 중이다. (dshwang@sejong.ac.kr)

REFERENCES

- [1] G. Bunce *et al.*, Phys. Rev. Lett. 36, 1113 (1976).

Fig. 1. The final-state interaction in the semi-inclusive deep inelastic scattering which provides the single-spin asymmetry.^[2]

아들여지고 있다.^[2] 그림 1은 단일 스핀 편극 현상의 가장 기본이 되는 원리를 준포괄적 심층 비탄성 산란(SIDIS)에서 보여 주고 있으며 구체적인 계산은 그림 2에 주어진 파인먼 도형의 계산을 통하여 이루어졌다.^[2] 이 연구에서 발견한 중요한 점은 계산의 결과가 운동량 전달 제곱(momentum transfer square) Q^2 값이 매우 커지더라도 영이 되지 않는다는 사실이다. 이 연구의 기본이 되는 핵심원리는 양자역학의 amplitude에 의한 간섭현상의 원리이며 양성자-양성자 충돌의 스핀 편극 현상에도 이 원리가 적용된다.

이와 같은 단일 스핀 비대칭 현상은 스핀편극을 가진 양성자가 스핀편극을 지니지 않은 양성자와 충돌할 때 생성되는 파인온이 생성방향에 대한 분포의 비대칭성을 보이는 반응에서도 나타나며 이 현상은 1990년대 초반에 Fermilab의 E704 그룹의 실험에 의하여 관측되었다.^[3] 이 실험의 에너지 영역은 $\sqrt{s} = 20$ GeV이었으며, 이는 양성자의 정지질량보다 매우 높은 에너지 영역에 해당된다. 더 나아가 RHIC의 STAR 그룹에 의하여 $\sqrt{s} = 200$ GeV의 에너지 영역에서도 $p^\uparrow p \rightarrow \pi X$ 의 스핀 비대칭이 존재함이 밝혀졌다.^[4] 따라서 이와 같은 단일 스핀 비대칭 현상이 낮은 에너지 영역에 국한된 현상이 아니라 높은 에너지 영역에서도 존재하는 현상임이 밝혀졌다. 더 나아가서 $\sqrt{s}$ 가 10 TeV 정도인 더욱 높은 에너지 영역의 CERN LHC 실험에서는 스핀 비대칭 현상이 어떻게 나타날지 궁금하게 된다. 이에 대한 연구가 저자와 동료 물리학자들에 의하여 $pp \rightarrow \Lambda^+ X$ 반응에 대한 연구에서 이루어졌다.^[5] 이 연구에서는 나중 상태의 Λ 입자의 운동량, 스핀과 함께 제트(jet)의 운동량을 측정함으로써, Λ 입자의 운동량, Λ 입자의 스핀과 Λ 입자가 포함된 제트의 운동량의 상관관계를 분석하여 LHC의 높은

Fig. 2. The tree (a) and one-loop (b) diagrams for SIDIS. The interference of the two amplitudes with $J_p^z = \pm 1/2$ provides the proton's single-spin asymmetry.^[2]

에너지 영역에서도 단일 스핀 비대칭 현상을 실험적으로 측정하는 것이 가능하다는 사실을 밝혔다. 이 연구의 독창적인 면은, 이전의 양성자를 표적(target) 하드론에 충돌시키는 실험의 반응에서는 Λ 입자의 운동량, Λ 입자의 스핀과 초기 양성자의 운동량의 상관관계를 연구하였으나, 이 연구에서는 초기 양성자의 운동량 대신에 Λ 입자가 포함된 제트의 운동량을 이용함으로써 LHC와 같이 높은 에너지의 하드론 충돌 실험(hadron collider)의 mid-rapidity 영역에서 생성되는 Λ 입자에 대해서도 단일 스핀 비대칭 현상을 연구하는 것이 가능하다는 것을 보인 점이다. 이 현상은 그림 3에서 보는 바와 같이 Λ 입자의 운동량과 스핀, 그리고 제트의 운동량의 상관관계(correlation)에 의하여 가능하다.

REFERENCES

- [2] S. J. Brodsky, D. S. Hwang and I. Schmidt, Phys. Lett. B **530**, 99 (2002); Nucl. Phys. B **642**, 344 (2002).
- [3] D. L. Adams *et al.*, E704 Collaboration, Phys. Lett. B **261**, 201 (1991).
- [4] J. Adams *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 171801 (2004).
- [5] D. Boer, C. J. Bomhof, D. S. Hwang and P. J. Mulders, Phys. Lett. B **659**, 127 (2008).

Fig. 3. It is possible to investigate the polarization phenomenon of the Λ particle in LHC by analyzing the correlation of the momentum and spin of the Λ particle and the momentum of the jet containing the Λ particle.

스핀에 의존하는 양성자의 분포함수

원자핵을 이루고 있는 양성자와 중성자의 내부구조와 이들의 내부에서 기본 되는 힘이 어떻게 작용하고 있는지를 밝혀내는 것은 자연의 이해를 위하여 중요하다. 이와 관련하여 양성자의 스핀구조는 매우 중요한 물리연구대상이다. 1988년에 CERN의 유럽 뮤온공동연구그룹(European Muon Collaboration)은 양성자의 스핀구조에 대한 Ellis-Jaffe의 이론결과^[6]와 three-standard deviation으로 어긋나는 실험결과를 발표하였다.^[7] 이는 양성자 내의 valence 쿼크들이 기여하는 스핀의 합이 양성자의 스핀에 비하여 매우 적음을 암시한다. 그 후 같은 실험을 SLAC과 DESY에서도 행하였으며, 앞의 CERN의 결과와 동의하는 결과를 얻었다. 따라서 이에 대한 이해를 위하여 많은 이론적 연구가 진행되어 오고 있다. 비상대론적 이론에서는 양성자의 세 개의 valence 쿼크들이 양성자 스핀의 대부분을 구성한다고 예측되지만, 상대론적 고려를 충분히 하면 글루온의 기여와 궤도각운동량(orbital angular momentum)의 기여를 포함시켜야 한다는 설명이 현재까지의 이론연구의 주된 내용이다. 하지만 이에 관한 이론연구는 아직 이 문제를 충분히 정량적으로 설명하는 정도에는 미치지 못하고 있다. 따라서 양성자의 구조를 이해하는데 있어서 큰 진전을 제공하여 줄 수 있는 이 스핀구조에 대한 이론연구를 보다 엄밀하고 정량적으로 발전시키는 것이 중요하다. 저자는 이를 위하여 Light-Cone 양자장론을 이용하여 양성자의 각운동량과 에너지 모멘텀 텐서의 form factor 간의 관계를 연구하는데 초점을 맞추고 있다.^[8-10] 이를 통하여 양성자 구조를 기술하는데 있어서의 미묘한 점들을 이해할 수 있으며, 나아가서 양성자의 스핀구조를 이해하는데 필요한 이론적 발전을 얻을 수 있다.

미국 Jefferson 국립연구소(JLAB)에서 편극된 전자를 양성자

Fig. 4. Schematic depiction of the Siverts distribution function $f_{1T}^+(x, \mathbf{p}_\perp)$. The spin vector S_T of the proton points out of and into the page, respectively, and k_T is the transverse momentum of the extracted quark.

에 충돌시켜 나중 양성자의 편극을 조사하는 실험인 $\vec{ep} \rightarrow \vec{ep}$ 반응을 통하여 양성자의 electric form factor와 magnetic form factor의 비(ratio)를 운동량 전달 제곱(momentum transfer square) Q^2 의 값이 3.5 GeV²인 영역까지 측정한 실험 결과를 1999년에 발표하였다.^[11] 이 JLAB 실험의 실험방법은 미분단면적의 각도에 따른 변화를 측정한 결과를 이용한 이전의 Rosenbluth 방법과는 달리 편극을 측정한 결과를 이용함으로써 electric form factor를 큰 값의 Q^2 까지 정확히 측정할 수 있는 장점이 있다. 이 실험의 결과가 보여주는 바는 Pauli form factor $F_2(Q^2)$ 와 Dirac form factor $F_1(Q^2)$ 의 비(ratio)가 큰 값의 Q^2 에서 QCD의 예측인 $1/Q^2$ 에 비례하는 대신에 $1/Q$ 에 비례한다는 사실이다. 이 실험결과가 발표된 후에 많은 이론적 연구가 있었는데, 그 중의 한 연구로서 저자가 동료 물리학자들과 함께 제시한 해결책은 QCD 예측에 logarithmic 보정이 필요하며 이 보정을 통하여 QCD 예측이 실험결과와 모순되지 않을 수 있다는 것이었다.^[12] 양성자의 form factor에 대한 정보는 양성자의 내부 구조를 파악하는데 매우 중요하며 이를 위하여 JLAB은 가속기의 에너지를 높여서 더 큰 값의 Q^2 에서 이 실험을 진행할 것이다.

앞 절에서 설명한 바와 같이 단일 스핀 비대칭 현상과 관련하여 이루어진 최근의 중요한 이론의 발전은 이 현상을 양자 색역학(Quantum Chromodynamics)의 체계 내에서 쿼크와 글루온의 상호작용에 의하여 생겨나는 간섭효과를 이용하여 설명한 것이다.^[2] 이 연구결과와 핵심은 양성자 내부에서 글루온의

REFERENCES

- [6] J. Ellis and R. Jaffe, Phys. Rev. D **9**, 1444 (1974).
- [7] European Muon Collaboration, J. Ashman *et al.*, Phys. Lett. B **206**, 364 (1988).
- [8] S. J. Brodsky and S. D. Drell, Phys. Rev. D **22**, 2236 (1980).
- [9] S. J. Brodsky and D. S. Hwang, Nucl. Phys. B **543**, 239 (1999).
- [10] S. J. Brodsky, D. S. Hwang, B. -Q. Ma and I. Schmidt, Nucl. Phys. B **593**, 311 (2001).
- [11] M. K. Jones *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 1398 (2000).
- [12] S. J. Brodsky, J. R. Hiller, D. S. Hwang and V. A. Karmanov, Phys. Rev. D **69**, 076001 (2004).

Fig. 5. Schematic depiction of the Boer-Mulders distribution function $h_1^\perp(x, \mathbf{p}_\perp)$. The spin vector S_T of the quark points out of and into the page, respectively, and k_T is the transverse momentum of the extracted quark.

Fig. 6. Feynman diagram which is used to perform the model calculation of the Siverts and Boer-Mulders distribution functions. The upper horizontal line in (b) shows that this line corresponds to an eikonal propagator.^[15]

작용이 단일 스핀 비대칭을 가능하게 하며, 높은 에너지의 반응에서도 이 비대칭이 작아지지 않는다는 것이다. 이후 이와 관련된 연구들에 의하여 더욱 이해하게 된 중요한 사실은 양성자의 내부를 기술하는 분포함수 중에서 파르톤(parton)의 평행 운동량 부분(longitudinal momentum fraction) x 뿐만 아니라 수직 운동량(transverse momentum) $\mathbf{p}_\perp$ 에도 의존하는 Time-odd 쿼크분포함수인 Siverts 함수 $f_{1T}^\perp(x, \mathbf{p}_\perp)$ 가 이 현상에 관련된다는 사실이다.^[13-16] 이러한 이론적 발전으로 인하여 단일 스핀 비대칭 현상에 대한 이해에 중요한 진전을 이룰 수 있었으며 양성자 내부의 구조에 대한 이해 또한 발전할 수 있었다.

양성자의 Time-odd 쿼크분포함수 중에는 앞에 얘기한 Siverts 함수 $f_{1T}^\perp(x, \mathbf{p}_\perp)$ 외에 Boer-Mulders 함수 $h_1^\perp(x, \mathbf{p}_\perp)$ 이 존재한다는 사실이 알려져 있다. 그림 4와 5는 각각 Siverts 함수와 Boer-Mulders 함수를 설명하여 주고 있다. Siverts 함수와

Fig. 7. The leading order contribution and the initial-state interaction contribution to the Drell-Yan process.^[15]

Boer-Mulders 함수는 각각 양성자 스핀과 쿼크 스핀에 의존하는 양성자의 분포함수이다. 이 분포함수들의 모델 계산은 그림 6에 주어진 파인먼 도형을 계산함으로써 실행될 수 있다.^[15] 여기서 언급되는 Time-odd는 하드론 반응의 초기 상태 및 나중 상태 상호작용에 의하여 생성되는 것으로서 기본 물리현상의 Time-violation을 의미하지는 않는다. 이러한 이유로 여기에 언급되는 Time-odd를 Naively Time-odd라고도 부른다. 그림 2와 그림 6을 비교하여 볼 때, 그림 6은 그림 2의 두 도형(diagram)의 결합임을 알 수 있다. 이 사실은 스핀에 의존하는 양성자의 분포함수의 존재가 단일 스핀 비대칭 현상의 존재와 밀접하게 관련되어 있다는 것을 보여준다.

Boer-Mulders 함수 $h_1^\perp(x, \mathbf{p}_\perp)$ 는 양성자-양성자 또는 양성자-반양성자 충돌에서의 Drell-Yan 반응인 $pp(\text{or } p\bar{p}) \rightarrow l^+ l^- X$ 의 다음과 같이 주어지는 미분 단면적 각분포 중에서 $\cos 2\phi$ 분포의 계수인 ν 와 관련된다.

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\lambda+3} \left(1 + \lambda \cos^2\theta + \mu \sin^2\theta \cos\phi + \frac{\nu}{2} \sin^2\theta \cos 2\phi \right).$$

Next-to-leading order까지의 섭동 QCD 계산은 $\lambda \approx 1, \mu \approx 0, \nu \approx 0$ 의 결과를 준다. 그러나 Boer-Mulder 함수가 Drell-Yan 반응에 관여하는 경우에는 $\cos 2\phi$ 분포의 계수인 ν 가 작은 값이 아니라는 사실이 현상론적으로 알려졌다.^[17] 이는 CERN의 NA10 실험결과와 동의하는 사실이다.^[18] 저자는 공동연구자들과 함께 양성자의 쌍쿼크 모델(diquark model)을 이용하여 ν 의 값을 계산하였으며 실험 사실과 동의하는 결과를 얻었다.

REFERENCES

- [13] J. C. Collins, Phys. Lett. B **536**, 43 (2002).
- [14] X. Ji and F. Yuan, Phys. Lett. B **543**, 66 (2002).
- [15] D. Boer, S. J. Brodsky and D. S. Hwang, Phys. Rev. D **67**, 054003 (2003).
- [16] M. Burkardt and D. S. Hwang, Phys. Rev. D **69**, 074032 (2004).
- [17] D. Boer, Phys. Rev. D **60**, 014012 (1999).
- [18] NA10 Collaboration, S. Falciano *et al.*, Z. Phys. C **31**, 513 (1986).

그림 7은 이 계산에 관여하는 양자색역학(Quantum Chromodynamics)의 반응을 보여주고 있다.^[15]

결론

소립자 반응 중의 단일 스핀 비대칭 현상과 양성자 스핀 혹은 쿼크 스핀에 의존하는 양성자의 분포함수에 대한 근본적인 이해를 위해서는 확률적인 접근보다 한 단계 더 기본적인 amplitude를 통한 문제 해결이 필요하다. 간섭효과는 amplitude들의 상호작용에 의하여 나타나며 이는 양자역학의 핵심적 특징이다. 단일 스핀 비대칭 현상을 이 간섭효과를 이용하여 이해할 수 있다. 양자장론의 파인먼 도형의 루프 도형(loop diagram)이 amplitude에 복소수 위상을 제공하며 이를 통하여 단일 스핀 비대칭 현상을 이해하는 것이 가능하다. 또한, Higgs 입자의 다른 입자들과의 반응의 구조에 대한 연구를 단일 스핀 비대칭 현상을 통하여 연구하는 것이 산란단면적을

통한 연구에 보완적인 역할을 할 수 있다. 그 이유는 단일 스핀 비대칭 현상이 양자역학적인 간섭효과로 이해될 수 있기 때문에, 하나 이상의 파인먼 도형 amplitude가 동일한 한 물리반응에 기여하는 경우에 단일 스핀 비대칭 현상을 분석하는 연구는 이 amplitude들의 상대적인 복소수 위상을 결정하는 것을 가능하게 해주기 때문이다.^[19] 이 주제에 대한 이론적 연구를 세계적으로 활발히 얻어지고 있는 실험결과들과 긴밀히 연관 지으면서 진행할 수 있다. 특히 스위스 제네바에 소재한 CERN과 미국 버지니아에 소재한 Jefferson 국립연구소에서 이와 관련된 중요한 실험결과들이 얻어지고 있으며, 이 실험결과들이 이 분야의 연구에 유익할 것이다.

REFERENCES

- [19] J. Ellis, D. S. Hwang, K. Sakurai and M. Takeuchi, JHEP **1404**, 004 (2014).