

한국인 입자물리학자 이휘소 박사

김진 의

1977년 6월 16일(수), “이휘소 박사가 시카고에서 아스펜으로 가던 중 트럭으로부터 굴러 나온 타이어에 치인 교통사고로 42세를 일기로 사망하였다”는 소식을 Brown대학에 근무할 때 강경식 교수로부터 듣고서, 나는 가까운 사람을 잃은 큰 슬픔을 느꼈다. 서울공대 같은 학과로 시작해서 같은 분야 물리학을 하게 되었던 것이 항상 내 마음속에 뿌듯하게 느껴지곤 했었는데... 또 바로 보름 전 Fermilab에서 뵈었는데, 그렇게 가시다니...

이휘소 박사는 물리학자로서 수많은 불후의 논문들을 남겼다. 이들은 이 특집에서 많은 분들이 언급하리라 여겨지기 때문에 여기서 나는 개인적으로 느낀 점을 위주로 적어 보겠다. 나이로 보아 이휘소 박사는 나의 11년 선배이다. 내가 입자물리학을 공부하던 대학원생 때에는 학문의 대가로서, 연구를 시작했던 Post-doc 시절에는 새로운 아이디어가 많은 본받고 싶은 학자로서, 이휘소 박사를 우러러보고 있었다 할 수 있다.

몇 년 전, 서울대학교 화공과 10회 이훈택 동문의 글에서 물리학자이기 이전의 이휘소 박사에 대한 이야기가 있었기에 이 이야기부터 소개하고 이휘소 박사와 입자물리학에 대한 소감을 적어 보고자 한다. 이휘소 박사는 1935년 1월 생으로 1947년 9월 경기중학교에 입학하여 졸업 우등을 하였었다고 전해진다. 중학 4학년에 진급하자마자 1950년에 한국전쟁이 터졌고, 1.4후퇴 후 충남 공주를 거쳐 경남 마산으로 피난 갔다. 부산 용두산 위의 야외와 서대신동의 가교사로 마산에서 기차 통학을 하고 중학 5학년(현 제도에서는 고교 2학년) 과정을 1952년 3월 수료하게 된다. 그러나 경기중을 졸업하지는 않고, 곧 검정고시를 거쳐 서울대학교 공과대학 화학공학

저자약력

김진의 교수는 University of Rochester Ph.D(1975)로서 Brown University Research Associate(1975-1977), University of Pennsylvania Research Investigator(1977-1980)를 거쳤고 1980년 서울대로 자리를 옮겨 현재 물리학과 교수로 재직 중이다. 서울대 재직 동안 물리학과 학과장(1995), 연구처장(1995-1997), 이론물리연구소 소장(1999-2002) 등을 역임하였다. 수상업적으로는 한국과학상 대상(1987), 호암상(1992), Humboldt Research Award(2001), 과학기술훈장(혁신장)(2002), 최고과학기술인상(2003) 등을 수상하였고, 2006년 국가석학 중 한 명으로 선정되기도 하였다. (jekim@phyp.snu.ac.kr)

과에 입학하였다. 1952년 공대 입학생은 375명으로 알려지고 있고 이휘소 박사가 수석이었다고 전해진다. 서울대를 졸업하였다면 10회이었을 것이다. 부산의 대신동에 위치한 서울대 가교사에서 공대 1년생들은 2개 군으로 나뉘어 수업을 받았다 한다. 1군은 化金土建探과 하고 2군은 기타였다 한다. 1953년 이휘소 박사가 대학 2학년이었을 때, 서울 수복과 함께 용두동 현 서울사대부고 위치의 임시 교사에서 수업을 받았다. 공릉동의 공과대학(현 산업대학교)은 1955년 1월 유학길에 오르기 전 짧은 기간만 다녔을 것으로 사료된다.

이훈택 동문의 회고에 의하면, 이휘소 박사는 당시에 문리대 물리학과로 전과하고자 하였으나, 그때에는 전과나 복수전공은 제도적으로 허용되지 않아서 뜻을 이루지 못했다. 화공과에서 경기 38회 전완영 교수가 당시에 물리화학을 가르치면서 미국 유학을 준비 중이었는데, 이휘소 박사는 L. Pauling과 E. B. Wilson의 “Introduction to Quantum Mechanics” (일본어판으로는 量子力學)와 유타대학의 H. Eyring의 저서 “Quantum Chemistry”에 실린 문제들을 그분과 같이 풀었다 한다. 나는 이 과정이 이휘소 박사가 화학공학을 하지 않고 물리학으로 돌아선 직접적인 이유로 여겨진다. [필자도 화공과를 다녔고 1965년 이른 봄 2학년 초 현대물리 강의 중 박봉렬 교수가 소개한 그때 막 출판된 아시아판 빨간 책 “Feynman Lectures on Physics” Vol. I, Vol. II를 읽고 (Vol. III은 그때에는 출판되지 않았음), 물리에 매료된 추억이 있음.] 이훈택 동문의 회고는 다음 사실도 언급해 주고 있다. 서울 수복 후 이휘소 박사는 Benjamin Franklin 자서전을 대학 동기들과 원문으로 읽었다. Benjamin Franklin은 펜실베이니아대학이 있는 필라델피아를 근거지로 삼고 미국 독립 당시 1776년의 미국독립회의를 필라델피아에 소집했던 정치가이자 양성자의 전하 부호를 지금 우리가 택하는 양(+)으로 정했던 과학자였다. 또한 이휘소 박사를 가까이서 이끌어주었던 C. N. Yang의 미국 이름이 Frank(Franklin의 애칭)임을 기억하면, 이휘소 박사가 Benjamin을 미국시민 이름으로 택한 두 세 가지 이유를 짐작하게 한다. 필자가 참석했던 어떤 국제학회에서 이휘소 박사는 강연에서 필자는 알지 못한 어떤 소설의 문구를 인용한 것이 기억나는데, 이처럼 항

상 영어 서적을 독서하는 습관은 공대 시절에도 가졌었던 것임에 틀림 없다.

내가 1977년 9월부터 이휘소 박사가 과거에 대학원생이었고 교수였던 펜실베이니아대학에서 연구원으로 근무할 때, 이휘소 박사의 지도교수였던 Abraham Klein 교수가 가끔 이휘소 박사를 회고하곤 하였었는데, Klein 교수 본인은 이휘소 박사를 더 지도할 것이 없었다고 했다. 이처럼 이휘소 박사를 가까이서 알았던 모든 분들이 그의 우수함을 한결 같이 이야기하고 있다. 나는 이휘소 박사와 이야기할 기회가 없었으나, 처음의 접촉은 1977년 봄 이휘소 박사가 “Milli-weak theory of CP violation”에 관한 논문을 냈을 때, 편지로 질문한 적이 있고 이휘소 박사는 곧 답장을 보내왔다. 이 편지는 통상의 편지지에 썼던 것이 아니고, 과학자들이 많이 이용하는 모눈종이에 초록-노랑 중간색의 열은 그러나 굵은 사인펜으로 쓴 것이었으며, 이 편지가 오랫동안 나에게 간직된 것으로 생각했는데 30년이 지난 지금에는 안타깝게도 그 종이를 찾을 수가 없다. 그해 5월 나는 Fermilab을 1개월 방문하여 비로소 이휘소 박사를 대면하게 되었다.

양자역학의 시작이 1920년대 중반이라고 하면 물리학자들은 이에 토를 달지 않을 것이다. 어떻게 보면 양자역학의 완성은 1970년대이다. 그러나 이 말(“양자역학의 완성이 1970년대라”)은 많은 물리학자들로부터 인정을 받지 못할 것이다. 그럼에도, 여기서 내가 이렇게 주장하는 이유는 양자역학의 연산자들 사이의 교환자 관계식

$$[A, B]$$

의 구조와 그 여파가 1970년대까지 완성되었다고 볼 수 있기 때문이다. 즉, 우주에 존재하는 대칭성들(Symmetries)과 그 발현(Realization)이 1970년대까지는 다 알려졌다고 볼 수 있기 때문이다. 이 양자역학의 대칭성이 완전히 찾아졌던 시기(1960-1980)는 입자물리학의 황금기였고, 이휘소 박사는 이 시기에 입자물리학 이론분야 세계적 학자들 중 최정상에 도달했었던 몇 안 되는 학자들 군에 속해 있었다. 당시에는 전 세계에서 가장 큰 양성자 가속기를 가졌던 Fermilab의 이론 그룹에서 책임자였다는 것이 이를 말하고도 남는다. 이훈택 동문의 회고에서처럼 도미할 때 이미 쉬되던거 방정식에 근거한 양자역학을 깊이 익히고 있었던 이휘소 박사는, 유학 초기 언젠가 위 교환자 관계식의 심오함에 대해 해탈의 경지에 도달했을 것이고 곧바로 세계적 물리학자로 발돋움하였을 것이다.

입자물리학에서 이 대칭성의 찾음은 요사이 용어로 게이지 이론(Gauge theory)이라는 범주에 속했고, 이것이 구체적으로 자연현상을 기술하는 이론으로서 실험관측에 의해 정착된 것

은 대칭군 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 에 근거한 손잡이꼬임(Chirality)을 가지는 표준모형이다. 1960년대에 많은 입자물리학자들이 S-matrix 이론으로 강한 상호작용을 이해하려는 노력을 경주하였으나, 이휘소 박사는 양자장론으로 입자물리 현상을 이해하려 노력하였던 몇 안되는 학자들 중 한분이었다. 양자장론에서 대칭성을 고려하고, 우주환경에서 이 대칭성의 발현을 생각해 보면 두 가지가 있을 수 있다는 것이 1960년대 초반에 알려지게 된다. 하나는 소위 위그너-바일 발현(Wigner-Weyl realization)으로 일컬어지는 것으로서 우주에 발현된 상태도 역시 대칭성을 보여준다는 것이고, 다른 하나는 남부-골드스톤 발현(Nambu-Goldstone realization)으로 일컬어지는 것으로서 우주에 발현된 상태는 대칭성을 깬다는 것이다. 1960년 이전에는 위그너-바일 발현만을 대상으로 대칭성을 연구했다. 이휘소 박사가 박사학위를 받고 연구를 시작할 때는 이 남부-골드스톤 발현에 대한 깨달음이 입자물리학계에서 인식되기 시작한 때이었다. 입자물리학의 당시 연구 선호도를 보면 주 연구 대상은 S-matrix 이론에 의한 강한 상호작용이었고, 작은 그룹만이 이 양자장론적 대칭성의 연구에 큰 의미를 부여했었다. 돌이켜보면, 1970년대 이후에는 양자장론적 대칭성에 바탕을 둔 연구가 입자물리학 분야를 점령하게 된다. 이후 지금까지 입자물리학을 이끌었던 학자들('t Hooft, Veltman, S. Weinberg, Abdus Salam, Glashow, Gross, Wilczek, Politzer)이 무슨 연구로 노벨위원회로부터 인정을 받았는지 보면 쉽게 알 수 있는 일이다. [현재 주류 연구인 초대칭성이 맞지 않는다면, S-matrix 연구 때보다 더 큰 빛나간 연구의 역사가 기록될 것이다.]

어느 시기에는 주류 연구에서 벗어난 비주류이었지만 결국 자연을 올바르게 기술하는 분야를 연구할 수 있었다는 것은 엄청난 행운이다. 나의 30여 년의 연구 경험에 비추어 볼 때, 연구자가 어떤 주제를 택해 연구하느냐 하는 것은 그 연구자 일생의 영욕을 결정짓는 첫 번째 관문이라 할 수 있다. 어떤 분야를 택한다는 것은 운(chance)으로 밖에 설명할 수 없다. 이 행운의 신은 “누가 더 명석하느냐?”로 대상을 선택하지는 않을 것이다. 물론, 그 택한 분야에서 탁월한 업적을 이룩할 수 있는 것은 명석함과 준비와 노력에 의해서 이루어지지만, 이와 관련해 필자는 흔히 학생들에게 't Hooft가 게이지이론을 연구 분야로 택하게 된 것을 예로 들곤 한다. 다 알다시피 't Hooft는 수학적 능력이 탁월한 명석한 학자이다. 그가 네델란드에서 게이지이론에 관심이 많았던 Veltman을 지도교수로 택하지 않았다면, 입자물리학에서 그가 이론 것에 버금가는 훌륭한 업적을 다른 분야에서 성취할 수 있었을까? 물론 그의 명석함과 유능함으로 판단하건대, 어느 분야에서건 괄목할만한 업적을 이루었을 것으로 추측할 수 있지만, 그에

게만 꼭 들어맞는 분야로 여겨지는 게이지이론에서 이룩한 수준의 업적을 다른 분야에서는 이룩하지 못했을 것으로 여겨진다. 그가 Veltman을 지도교수로 택한 것은 행운이었다.

이휘소 박사가 (게이지이론을 선도하게 되는 분야인) 대칭성 및 남부-골드스톤 발현에 이미 1960년대에 관심을 가졌던 것도 엄청난 행운이었다. 물론, 지도교수 Abraham Klein은 양자장론으로 연마된 핵물리학자이었으므로 지도교수로부터의 영향은 없었을 것으로 사료되며, 이휘소 박사는 박사학위를 받은 후 연구자 생활을 통해 점진적으로 이 분야에 매력을 느꼈을 것으로 본다. 이휘소 박사는 유명 여름학교에서 중요한 강연 노트들을 많이 남겼을 뿐만 아니라, 책이나 개괄논문으로서도 한 권의 책, 두 편의 Reviews of Modern Physics (RMP) 논문 및 한편의 Physics Reports 논문을 남겼다. 1970년 Cargese 여름학교에서의 강연을 쓴 책 “Chiral Dynamics” [Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., 1972], “Simple Groups and Strong Interaction Symmetries” [R. E. Behrends, J. Dreitlein, C. Fronsdal, and W. Lee, Rev. Mod. Phys. 34, 1 (1962)], “Gauge Theories” [E. S. Abers and B. W. Lee, Phys. Rep. 9, 1 (1973)], “Search for Charm” [M. K. Gaillard, B. W. Lee and J. L. Rosner, Rev. Mod. Phys. 47, 277 (1975)]이 그것들이다. 이들에는 공저자들도 있으므로 공저자가 있는 세 편의 개괄논문들을 보면 연구원 초창기 때 완성한 것으로 여겨지는 1962년의 RMP 논문 이외에는 모두 이휘소 박사의 주도로 집필된 것이 분명하다. 1973년의 Physics Reports 및 1975년의 RMP(1974년 여름 투고) 논문들은 게이지이론의 황금기에 나타난 모든 물리학자들에게 길잡이가 되었던 논문들이다. 이들은 “게이지이론이 재규격화가 가능하다”는 이휘소 박사의 주 연구업적 이후에 쓰인 논문들이므로, 게이지이론의 재규격화 증명 이전의 개괄논문 및 책에 나타난 이휘소 박사의 관심을 먼저 살펴보자.

대칭성의 논의에서는 군론의 지식이 필수적이다. 이휘소 박사의 1962년 RMP 개괄논문 “Simple Groups and Strong Interaction Symmetries”의 저자들은 모두 펜실베이니아대학에 주소를 두었고 1962년 RMP 첫 번째 호에 실렸다. RMP에서는 투고 후 출판되는데 통상 1년의 기간이 소요됨을 감안하면, 1955년 1월에 도미한 이휘소 박사로서는 도미 후만 6년에 가서 RMP에 투고하였을 것이고, 오하이오주의 마이에미대학 및 피츠버그의 피츠버그대학을 거쳐 펜실베이니아대학으로 옮긴 점을 감안하면 이제 막 박사학위를 받은 연구원으로서 이 개괄논문에서는 주도적 역할을 했다고 보기는 힘들다. 그러나 공저자들 중에서 유독 이휘소 박사가 그 후 이 분야에서 대성한 것을 보면, 대칭성에 관한 것을 누구보다도 꿰뚫어 보고 있었다고 사료된다. 내가 펜실베이니아대학에

있을 때, 핵물리학자 Ralph Amado 교수로부터 들은 이야기는 당시의 군론에 대한 이휘소 박사의 심정을 잘 대변해 준다. 당시 펜실베이니아대학의 수학과에서도 군론은 깊이 연구되고 있었으나 그들은 논리적으로만 군론을 연구하였던 것이 분명하다. 물리학자들은 SU(2)군의 표현을 흔히 파울리의 σ -행렬로 표현해서 보는데, 펜실베이니아대학 수학과 교수들 (아마도 이휘소 박사가 대화를 나누었던 수학과 교수들이었을 것으로 사료됨)이 이것을 모른다는 것을 보고 이휘소 박사는 놀랐었다고 한다. 필자도 Amado 교수로부터 이 이야기를 듣고 놀랐다. 어쨌든 이러한 비가환 대칭성을 이휘소 박사는 이미 1961년에 깊이 알고 있었음에 틀림없다. Zweig와 Gell-Mann의 SU(3) 쿼크모형이 1963년 말에 가서나 정립(1964년 출판)되었을 것을 감안하면, 유명 개괄논문인 RMP에 출판할 정도로 이휘소 박사의 군론에 대한 깊은 지식을 엿볼 수 있다.

그 다음에 출판한 “Chiral Dynamics”의 목차를 살펴보면, Chiral SU(2) \times SU(2), The σ -model, Renormalization of the σ -model, Ward-Takahashi identities 등이 실려 있다. 이들은 현대 입자물리학에서 흔히 접하는 말들이며, 게이지이론이 1971년부터 재규격화(Renormalization)가 가능한 이론으로 받아들여진 것을 감안하면 이미 게이지이론의 재규격화가 증명되기 전에 거기에 필요한 모든 도구들을 이휘소 박사는 익히고 있었다고 볼 수 있다. 이 책에서, 파이중간자의 질량이 거의 없음을 “파이중간자는 골드스톤 보존이다”라는 Gell-Mann-Oakes-Renner에 의해 발견된 Chiral SU(2) \times SU(2) 대칭성의 자발적 깨짐이 논의되고 있다. 게이지이론을 공부한 학자들은 여기에 나타난 골드스톤 정리를 익히 접해 보았을 것이다. 목차로부터 알 수 있듯이 이러한 자발적으로 깨진 대칭성(비록 광역 대칭성에 국한되었지만)을 가지는 이론에서의 재규격화가 이 책에서 기술되고 있다. 서문에서 적고 있듯이 재규격화에 대해서는 Abraham Klein의 지도교수였던 Schwinger의 Stony Brook 체재가 이휘소 박사에게 큰 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 이 책을 쓰게 된 1970년의 Cargese 여름학교 강연! 아마도 't Hooft는 학생으로서 이 여름학교에 참가하지 않았을까?

이휘소 박사가 대칭성과 대칭성의 자발적 깨짐을 깊이 알고 있었다는 것은 신이 내린 크나큰 행운이었다. 그러나 이휘소 박사는 대칭성과 대칭성의 자발적 깨짐을 깊이 알고 있었었는데도 왜 게이지이론의 재규격화를 첫 번째로는 증명하지 못했을까? 나는 이와 관련하여 S. Weinberg에 대해서도, 그의 1967년 Phys. Rev. Lett. 논문이 “Renormalizable”할 것이라는 가능성을 제시하고 있었기 때문에, 같은 의문을 가졌었고 그에게 아직까지 이 점에 대해 물어 볼 기회는 없었다. 30년 전 Weinberg의 학생이었던 Lay Nam Chang에게

이 점을 물어본 게 전부이고, Lay Nam Chang의 대답은 Weinberg는 Faddeev-Popov의 논문을 모르고 있었었다고 답변해 주었다. 추측컨대, 이휘소 박사는 Faddeev-Popov의 논문을 1968년 말에는 알았을 것으로 보이지만 그 중요성을 나중에야 알았을 것이다. 왜냐면, 이것을 등한시한 恨(?)으로 인해 러시아판 Faddeev-Popov의 논문을 이휘소 박사가 번역하였을 것으로 사료되기 때문에. 강주상 교수는 이 점을 잘 알고 있을 것으로 생각된다. 't Hooft의 지도교수였던 Veltman은 Faddeev-Popov의 논문 내용 및 중요성을 일찍부터 알고 있었던 것 같다. D. Gordon과 이휘소 박사가 영문으로 번역한 Faddeev-Popov의 논문 서문에 이 논문을 어디서 구한 논문인지 다음과 같이 밝히고 있으므로: "The present text is based on an informal translation of the original Russian version that Professor M. T. Veltman arranged in Paris in 1968." 신은 왜 이렇게 완전하게 준비된 이휘소 박사에게 러시아어를 배우고 Faddeev-Popov 논문의 중요성을 인식하라는 계시의 행운을 주지 않았을까?

이휘소 박사는 파리에서 1968-69 안식년을 보냈다. 이것이 1970년대 이휘소 박사의 불후의 논문들에서 프랑스 학자들(Zinn-Justin, Gaillard)의 이름을 발견하게 되는 이유일 것으로 사료된다. 나는 이것이 이휘소 박사의 행운인지 프랑스 학자들의 행운인지 가끔 궁금해질 때가 있다.

이휘소 박사는 1972년부터 5년여 근무하게 되는 마지막 근무지 Fermilab으로 주소를 옮기고, 여기서 그의 일생 중 가장 왕성한 학문 활동을 벌이게 된다. 그의 나이 37세이었다. Fermilab에 설치된 당시 세계에서 가장 큰 가속기는 1972년부터 가동에 들어가 한동안 100 GeV 정도 에너지를 가지는 muon-neutrino 실험을 하게 된다. 이때에는 이미 게이지이론의 재규격화가 't Hooft, Veltman, 이휘소 박사에 의해 증명이 된 이후여서 입자물리학에서의 새로운 발견이 Fermilab으로부터 기대되던 때이었다. 1972년부터 1977년까지의 기간 중 입자물리학 분야에서는 많은 중요한 현상들이 발견되게 된다. 강한 상호작용을 기술하는 이론이 QCD라 불리는 SU(3)로 정착되는 것을 가능하게 한 Asymptotic freedom의 발견, 표준모형의 재규격화와 맞물려 예견된 네 번째 쿼크 charm quark의 발견, 비가환 게이지이론에서 자기홀극(Monopole) 해 및 순간자(Instanton)의 발견 및 Strong CP Problem 등장 등등. 이 기간 중 이휘소 박사의 불후의 논문 "Search for Charm"의 Preprint가 1974년 여름에 나왔고, 이때부터 c 쿼크를 포함하여 표준모형이 거의 믿어지게 되었다. [표준모형과 관련해, 아래에 1977년 상황을 좀 더 자세히 적음.] 물론 이보다 먼저 M. K. Gaillard와 계산한 c 쿼크 질량(1.5 GeV/c²)은 학계에서 받아들여지고 이후 Gaillard-Lee

계산은 입자물리학 입자 예견의 좋은 본보기가 되어 왔다. 이휘소 박사의 c 쿼크 질량 예견 1.5 GeV/c² 및 "Search for Charm" Preprint는 Brookhaven에서 실험하는 Ting 교수에게 어느 에너지 영역을 쳐다볼지 알려 주었을 것이고, Ting 교수는 1974년 8월 말에 e⁺e⁻ 에너지 3.1 GeV에서 입자를 보았다고 알려져 있다. 그 후 이 3.1 GeV/c² 입자는 11월 하순에 가서야 November Revolution이라 불리며 입자물리학계를 강타한다. 이 입자는 현재 J/ψ라 불리고 논문은 Brookhaven의 Ting 그룹과 SLAC의 Richter 그룹에서 동시에 나왔다. 이로써, 입자물리학 분야는 Parity violation에 이어서 중요한 이론적 예견이 실험으로 발견된 두 번째 경험을 하게 되었다. 1974년부터 이휘소 박사가 어떤 위치에 서게 되었는지 가히 짐작할 수 있다. "내가 계산한 그 예측이 맞았다."는 기쁨을 맛볼 수 있는 과학자가 과연 몇 명이나 될까? 누구나 November Revolution 이후 이휘소 박사가 맛보았을 기쁨을 추측하기는 어렵지 않을 것이다. J/ψ의 발견으로 Ting과 Richter는 1976년 노벨상을 공동수상하게 된다.

1977년은 이휘소 박사가 서거한 해이다. 이 해 초에 Fermilab 가속기에서는 muon-neutrino 실험으로부터 Tri-muon event 들을 보았다는 발표가 있었고, 전 세계는 이 Tri-muon event 를 설명하려는 노력을 경주하게 되었다. 지금 받아들여진 SU(2)_xU(1) 표준모형으로는 Fermilab에서 발표한 Tri-muon event를 설명할 수 없었다. 이에 이휘소 박사는 S. Weinberg와 SU(3)_xU(1) 모형을 Phys. Rev. Lett.에 발표한다. 이 모형은 SU(2)_xU(1) 모형이 설명하는 것들은 물론 Fermilab의 Tri-muon event를 설명하려 하였다. 결국 더 많은 데이터의 축적으로, Fermilab에서 원래 발표한 Tri-muon event는 사라지게 되었다. 어쨌든, 이로써 Fermilab은 1973년의 "중성류(Neutral current)가 없다"는 발표와 1977년의 "Tri-muon event"로 두 번의 불명예를 역사상 안게 되었다. 그러나 지금에는 이들이 모두 데이터 축적과정의 일부로 취급되고 있다. 이 에피소드들은 물리현상 발견의 발표에 신빙성이 얼마나 있는지 깊이 살펴보아야만 한다는 교훈을 우리에게 던져주고 있다. [참고로 부연하면, 표준모형이 현재에 받아들여진 형태로 정착된 것은 1977년의 Tri-muon event라는 대 혼돈을 거쳐 1978년 여름에 가서야 SLAC의 편극된 전자-중수소 산란 결과 발표 이후 이루어졌다. 이휘소 박사는 이것을 지켜보지 못하고 떠났다.] SU(3)_xU(1) 모형과 관련하여, Phys. Rev. Lett.에서는 Lee-Weinberg-Shrock으로 더 자세한 논문을 예고해 놓고도, 이 예고된 논문에서 Weinberg는 이름을 뺐다. 아마도, SU(2)_xU(1)이라는 본인의 모형이 있는데, 실험적 의문이 뒤따르는 문제에 더 큰 주장을 하기 싫어서이었을 것으로 생각된다. 참고로 부연하면, Glashow, Salam, Weinberg가

1979년 노벨상을 받게 되는 것은 (필자도 나중 RMP에 출판하게 되는) 약한 상호작용의 중성류 발견에 기인한 것이었다. $SU(2) \times U(1)$ 이 예견한 Z보존은 1982년 말에 가서야 CERN의 SPS 가속기에서 발견되었다. Z 보존의 발견은 입자물리학에서 이론적 예견이 실험으로 증명되는 세 번째 중요한 예이다. 중성류 현상은 표준모형의 정착에서 넘어야 할 관문이었고, $SU(2) \times U(1)$ 모형에서는 Z보존에 의한 중성류가 꼭 나타나므로, 1972년 이휘소 박사는 Z보존은 있으나 뉴트리노 산란 실험에서 중성류 현상이 나타나지 않는 모형을 Prentki, Zumino와 함께 만든 적이 있고 Georgi, Glashow는 아예 Z보존이 없는 모형을 만들기도 하였다.

1977년 이휘소 박사는 S. Weinberg와 불후의 마지막 논문을 남기고 세상을 떠난다. Phys. Rev. Lett. 7월 25일자에 실린 “Cosmological Lower Bound on Heavy Neutrino Masses”이며 이휘소 박사가 서거한지 1개월 여 만에 출판되었다. Referee 과정이 모두 끝나도 물론 출판되었겠지만, 전해들은 바로는 이 논문은 투고 중 사망하면 Editor에 의해 출판해준다는 관행에 의했다 한다. 논문 접수일자가 5월13일인 점을 감안하면 알 수 있는 점이다. 약한 상호작용을 하는 입자 중 질량을 자유로 택해 볼 수 있는 입자는 당시에는 뉴트리노 뿐이었다. 1972년에 이미 뉴트리노 질량이 $O(100 \text{ eV})$ 이면 우주의 임계질량을 채운다는 점이 알려졌다. Lee-Weinberg 논문에서는 가상적인 약한 상호작용을 하는 입자로서 당시엔 생각할 수 있는 무거운 뉴트리노를 생각하고 우주의 임계질량을 주는 무거운 뉴트리노 질량을 계산한 논문으로서 질량이 2-5 GeV보다 크면 안 된다는 것이었다. 암흑물질을 설명할 때 이용하는 WIMP라는 말 중 W는 약한 상호작용의 “Weak”를 뜻한다. 요사이 초대칭 이론에서 암흑물질을 예견하는 것이 가장 큰 장점처럼 주장하는 학자들이 많은데, WIMP의 상호작용을 매개하는 초대칭성 입자들의 질량을 대개 100 GeV - 1000 GeV로 잡기 때문에 약한 상호작용과 견줄 수 있기 때문이다. 즉 WIMP 아이디어의 원 논문은 바로 Lee-Weinberg의 논문이다. R-parity를 도입한 초대칭이론에서 가장 가벼운 초대칭성 입자를 LSP라 부르고 있다. LSP가 우주의 진화과정 중 평형으로부터 벗어나기 시작할 때의 우주온도 즉 T_1 는 LSP 질량의 1/20으로 쓰고 있는데, 이 수치도 Lee-Weinberg 논문에 이미 계산되어 있다. 이처럼 이휘소 박사는 이 분야 즉 입자천체물리학(Particle astrophysics 또는 Particle cosmology)을 열어 놓고 세상을 떠났다. 나는 1977년 가을 Weinberg의 일반 대중을 위한 유명한 저서 “The First Three Minutes”를 읽고 큰 감명을 받았다. 아마도 이 책은 많은 입자물리학자들에게 감명을 주었을 것이다. 이는 이후의 입자천체물리학의 폭발적인 연구 결과들을 보면

가히 짐작할 수 있는 일이다. 1978년의 대통일이론에서 Baryogenesis의 유도, 1979년의 대통일이론에서의 우주의 자기홀극 문제 존재 인식, 1981년의 팽창우주론 제창, 1982년의 New inflation 제창 및 우주배경복사 계산, 1983년의 Axion cosmology 도입, 1984년의 초중력자의 우주론적 영향 등. 이휘소 박사가 생존해 있었다면, 이 모든 분야에서 주도적 역할을 담당했을 것임에 의문의 여지가 없다. 입자천체물리학을 개척함은 물론, 위에 열거한 모든 분야를 논의할 준비가 가장 완벽하게 갖추어진 학자임에 틀림없었으므로.

이휘소 박사가 서거한지 4개월이 지난 후, 급히 소집된 “Unification of Elementary Forces and Gauge Theories”를 주제로 한 Ben Lee Memorial Conference가 1977년 10월 20일부터 22일까지 3일간 Fermilab에서 개최되었다. 이휘소 박사를 존경하는 많은 학자들이 모였으며, 그 규모면이나 내용 면에서 이를 능가한 추모학회를 나는 들어 본 적이 없다. 나는 최근에 이 학회 Proceedings에 참가자들이 적혀 있지 않고 이휘소 박사에 관해 추모 이야기를 한 학자들도 완전하게는 적혀 있지 않아서 기록으로서는 좋지 않은 Proceedings라는 것을 발견하게 되었다. 이 학회에는 나를 포함하여 한국 학자들도 다수 참석하였다. 결국 노벨상을 받게 되는 학자들도 다수 참석하였는데, 내 기억에 남는 학자들은 Fowler, Glashow, Lederman, Politzer, Veltman, Weinberg, Wilczek 등이다. 30년이 지난 후 돌이켜 보건대, 이 학회에 대한 나의 기억에는 중요한 게 두 개 있다.

첫째는, 이휘소 박사가 't Hooft와 함께 증명한 비가환 게이지이론의 재규격화에 관한 관련 당사자들의 언급이다. 내 기억에 Veltman은 이 학회에서 이휘소 박사를 존경했다고 말한 기억이 있다. 그러나 재규격화에 대해 어떤 것을 어떻게 구체적으로 말했는지 기억이 나지 않는다. Veltman이 노벨상 받은 후인 몇 년 전 Ann Arbor의 학회에서 학회만찬 후 Veltman과 오래 동안 Strangeness의 발견 및 그 후 입자물리 뒤 이야기를 하였을 때, Veltman은 이휘소 박사가 훌륭한 학자라고 하면서 Ben Lee Memorial Conference의 단편을 이야기해 주었다. Veltman 본인은 거기에서 이휘소 박사에게 대해 좋게 말했지만, Weinberg는 그렇지 않았다고 했다. Weinberg의 원고는 그러나 편집자의 권고에 의해 마지막에 고쳐져서 Proceedings에 Veltman이 보기에는 만족스럽지 않았지만 괜찮게 출판되었다 했고, “Even there are good words.”라고 말해 주었다. Veltman 본인은 원고를 쓸 기회가 없어서 원고를 편집자에게 보내지 않았고, 나에게 한번 Weinberg의 글을 읽어 보라고 했다. Conference Summary에서 Weinberg의 재규격화에 대한 언급은 “For these reasons, there was little interest in a conjectured fourth flavor

until 't Hooft and Ben Lee proved the renormalizability of gauge theory in 1971.”이다. 여기에는 후에 표준모형의 재규격화 증명으로 't Hooft와 노벨상을 공동수상하게 되는 Veltman의 이름이 빠져있다. 잘 알려져 있듯이 Veltman이 간주했던 표준모형에서의 재규격화 완성은 Weinberg의 1967년 Phys. Rev. Lett.에서 “Renormalizable” 가능성을 언급한 것으로 완성되었던 것이 아니라 Glashow-Iliopoulos-Maiani의 c 쿼크의 도입에 의해 Anomaly가 없는 SU(2) \times U(1) 모형으로 만들어야 완성된다는 것이었다. [지금은 세 번째 입자족인 tau-neutrino, tau, b 쿼크, t 쿼크까지 도입해 Anomaly가 없게 표준모형을 만들고 있다.] 학자들 사이 서로 학문적 업적을 인정하는데 있어서 재미있는 것은, 여기에 적혀 있듯이 Weinberg에게는 c 쿼크의 도입이 재규격화가 증명될 때까지는 별로 흥미가 없었다는 것이다. 이 말에 Glashow는 동의하지 않을 것이다. 그러나 1971년 게이지 이론의 재규격화 증명 이후 1972년에 가서야 두 그룹 (Gross-Jackiw, Bouchiat-Iliopoulos-Meyer)에서 “'t Hooft의 Dimensional regularization을 이용한 재규격화 증명은 Anomaly가 없어야 완성된다.”는 논문이 나온 것을 보면, Veltman과 Weinberg의 주장 모두 일리가 있다고 여겨진다. 게이지이론의 재규격화와 c 쿼크의 발견에 결정적 기여를 한 이휘소 박사! 그는 한국이 낳은 양자역학 완성기의 입자물리학 지도자로서 영원히 기억될 것이다. Weinberg의 마지막 문장인 이휘소 박사에 대한 회고는 “I want to say a word about this conference and Benjamin Lee. I think that Ben would have enjoyed this conference very much. For one thing, Ben tried throughout his working life to break through the barriers of specialization, and to cover the widest possible range of problems in physics. This conference has brought together a fantastic variety of concerns within physics, ranging from cosmological and galactic down to the level of atoms, nuclei, elementary particles, and underlying substratum of quantum fields. Ben would have found all of it stimulating, and would have illumined every part of our discussion.”이다. 내 보기에 정확한 표현인 것 같다.

둘째로는, 이 Ben Lee Memorial 학회에서 Weinberg와 Wilczek은 Peccei-Quinn 메카니즘은 액시온을 내포한다는 발표를 한 것이다. 이것은 아주 새로운 폭탄선언이었기에 이 학회 기간 중 Lederman이 Weinberg를 뒤따라 다니며 어떻

게 발견할지 물어보았던 장면이 내 눈에 선하다. Weinberg는 학회 Summary에서 액시온은 1년 내로 발견될 것이라고 언급했다. 일생 액시온에서 흥미를 잃지 않았던 나에게 이 학회는 특별한 것이었다. 나는 이 학회에서 펜실베이니아대학으로 돌아온 직후, Langacker, Segre 및 연구원들과 함께 Weinberg와 Wilczek의 이야기를 이해하려 노력했고 이들이 지나서야 앞뒤를 완전히 알게 되었다. 우리는 1년 후 각자 Strong CP Problem을 푸는 모형들을 제시했고, 나만이 액시온 방법으로 문제를 해결하였다.

이제 내가 일생 동안 많은 노력을 경주했던 아주 가벼운 액시온에 관련된 Fermilab 관련 에피소드를 적어 보자. 1977년 5월 한 달 동안 내가 Fermilab을 방문하고 있을 때, Helen Quinn은 5월 중순 Fermilab Theory 그룹 세미나에서 Peccei-Quinn 논문에 관한 발표를 하였고, 나는 이때 처음 Peccei-Quinn 대칭성을 접하게 되었다. 이 조그만 세미나 청중 중에는 1개월 후 작고하게 되는 이휘소 박사도 있었다. 당시 세미나실 탁자들은 U자형으로 배열되어 있었다. Peccei-Quinn 대칭성은 기본적으로 쿼크에 대한 손잡이 꼬임(Chirality)을 힉스 입자까지 포함하여 확장한 것이었다. Peccei-Quinn 대칭성은 광역 U(1) 대칭성이며, 힉스 스칼라는 진공기대치를 가지게 되므로 Peccei-Quinn 대칭성을 자발적으로 깨게 되고, 따라서 골드스톤 입자가 존재하게 되며 이 입자가 액시온으로 불린다. 그러나 소위 이 페차이-퀸-와인버그-윌체 액시온은 1978년 여름에는 이미 존재하지 않음이 알려졌고, 따라서 1978년에는 액시온이 아닌 방법으로 강한 상호작용의 CP 문제를 해결하려는 노력이 폭 넓게 이루어지고 있었다. 이러한 배경 하에서 나는 Peccei-Quinn 대칭성을 힉스 이중장이 아닌 SU(2) \times U(1) singlet 장에 도입하는 방법으로 1979년 초 아주 가벼운 액시온을 얻었고 현재 차가운 암흑물질 후보로 여겨지는 것이 바로 이 아주 가벼운 액시온이다. SU(2) \times U(1) singlet 장은 표준모형을 뛰어넘는 이론에 나타나므로, 나는 이후 자연스럽게 표준모형을 포함하는 대통일 이론 및 초끈 이론을 아주 가벼운 액시온과 관련지어 연구하게 되었다.

나는 대학 입학 학과와 학문적으로 추구하는 분야가 이휘소 박사와 일치했던 것을 자랑스럽게 생각한다. 그리고 가끔 생각해 본다. 이휘소 박사는 보지 못했지만, 나의 액시온 연구가 이휘소 박사 마지막 1년의 발자취에서 그 씨앗이 나오고 있음이, 또한 액시온은 Ben Lee 추모학회로부터 연속되어 오고 있음이, 신의 구도인지도 모를 일이라고.