한스 베테와 천체물리: 초신성, 중성자별 그리고 중력파

DOI: 10.3938/PhiT.26.014

이 창 환

Hans Bethe and His Astrophysics – Supernovas, Neutron Stars and Gravitational Waves

Chang-Hwan LEE

In 2006, Gerald E. Brown and I edited a memorial volume “Hans Bethe and His Physics”. In that book, we put together 19 papers written by physicists in different fields in appreciation of the work done by Hans Bethe. This collection also includes a paper, “My Life in Astrophysics”, which was initially written by Hans Bethe in 2003 as a personal reminiscence of more than six decades of research in astrophysics. Based on this paper, I summarize Bethe’s later works on astrophysics, most of which were done after his retirement and in collaboration with G. E. Brown. Bethe’s later works cover supernovae, neutron stars, black holes, gravitational waves and gamma-ray bursts. In addition, I introduce a few episodes with G. E. Brown to show Bethe’s passion and superior research abilities.

베테 박사와의 인연

베테 박사(Hans A. Bethe, 1906-2005, 뉴욕주 이타카에 있는 코넬 대학 명예교수)를 처음 만난 것은 1999년 1월 칼텍 방문 때였다. 베테 박사와 브라운 박사(Gerald E. Brown, 1926-2013, 뉴욕주 스토니브룩에 있는 뉴욕주립대학교 석좌교수)는 매년 뉴욕의 겨울을 피해 칼텍을 방문하여 중성자별

및 블랙홀 쌍성 존재 빈도와 중력파의 상관관계 연구를 진행하고 있었다. 스토니브룩에 있는 뉴욕주립대에서 연구원으로 활동하고 있던 나는 지도교수인 브라운 교수와 함께 칼텍을 몇 주 방문하였다. 베테 박사 부부와 브라운 박사 부부는 칼텍에서 제공한 콘도에서 함께 생활을 하고 있었고, 나도 몇 번 저녁식사에 초대 받아 함께 식사를 하였다. 사람을 압도하는 거장의 위엄 앞에 나 스스로 위축되었던 기억이 남아 있다. 베테 박사는 과묵한 편이었고 전체적인 대화는 제리 브라운 박사가 주도하였다. 베테 박사를 두 번째이자 마지막으로 만난 것은 1999년 3월 애틀랜타에서 개최된 미국 물리학회 100주년 기념 학회였다. 고령의 나이에도 불구하고 과거의 기억을 더듬어 맨해튼 프로젝트에 대한 강연을 하였다.^[1] 이후 건강 악화로 코넬 대학이 있는 뉴욕 이타카를 벗어나지 못해 다시 만날 기회를 얻지는 못하였다.

이러한 인연으로 베테 박사와 중성자별과 중력과 관련 논문 7편의 공동 저자가 되었고, 2003년 베테 박사, 브라운 박사, 그리고 내 논문 중 블랙홀의 형성 및 진화와 관련된 논문을 모으고 해설을 추가한 논문집을 출판하였다.^[2] 2000년 5년의 미국 연구 생활을 접고 국내로 귀국할 때, 브라운 박사의 적극적인 도움으로 베테 박사의 추천서를 받기도 했지만, 추천서 내용이 너무 짧아서 별 도움이 안 되었다는 후문도 들었다. 베테 박사 사후 브라운 박사와 함께 추모집 “Hans Bethe and His Physics (World Scientific, 2006)”의 편집자가 되는 행운도 얻었다.^[3] 추모집에는 2003년 베테 박사가 본인의 천체물리 연구를 직접 소개한 “My Life in Astrophysics”도 포함되어 있

저자약력

이창환 교수는 1995년 서울대학교 물리학과에서 박사학위를 취득하였고, 미국 스토니브룩 소재 뉴욕주립대학교, 고등과학원과 서울대 BK사업단을 거쳐, 현재 부산대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 중성자별과 관련된 물리 및 천체물리 현상을 연구하고 있으며, 한스 베테와는 7편의 공동 논문을 발표하였다. (clee@pusan.ac.kr)

REFERENCES

- [1] Hans Bethe, “Manhattan Project”, Centennial Symposium: History of Physics in National Defense, Centennial Meeting of American Physical Society, March 24, 1999, Atlanta, Georgia, USA.
- [2] Hans Bethe, Gerald E. Brown and Chang-Hwan Lee, *Formation and Evolution of Black Holes in the Galaxy: Selected Papers with Commentary* (World Scientific, Singapore, 2003).
- [3] *Hans Bethe and His Physics*, edited by Gerald E. Brown and Chang-Hwan Lee (World Scientific, 2006).

다.^[4]

이 글에서는 위에 소개된 추모집에 실린 베테 박사와 브라운 박사의 글을 중심으로, 1967년 베테 박사의 노벨상 수상 이후 이루어진 초신성 폭발 및 중력파와 관련된 주요 업적을 소개하고자 한다. 이 글은 베테 박사와 브라운 박사의 천체물리 분야 연구를 주로 다루고 있지만, 30여 년을 함께 연구해 온 두 분의 학문 외적인 모습도 담으려고 노력하였다.

코펜하겐에서의 하룻밤의 기적: 엔트로피와 별의 운명

태양과 같은 주계열 항성의 에너지원인 핵융합과정을 밝힌 업적으로 1967년 노벨상을 수상한 이후 베테 박사는 한동안 핵물리 연구에 몰두하였다. 초신성 폭발 및 중력파원에 관한 베테 박사의 천체물리 주요 업적은 1975년 코넬 대학에서 은퇴한 이후에 이루어졌다. 은퇴 기념 파티에서 브라운 박사는 베테 박사에게 천체물리 공동 연구를 제안하였다. 당시 베테 박사는 에너지 위기에 관한 연구를 진행하고 있었으므로, 두 분의 초신성 폭발 공동 연구는 1978년 코펜하겐에서의 만남 이후로 이루어졌다.

1978년 4월 1일, 베테 박사가 터키 여행을 거쳐 코펜하겐의 보어연구소에 도착한 첫 날, 브라운 박사는 초신성 폭발의 원인이 되는 거대한 별의 내부핵 구조에 대한 최신 연구 결과를 그의 책상 위에 올려 두었다. 그런데, 바로 다음 날 아침, 베테 박사는 그 동안의 연구 결과가 틀렸다는 선언을 하였다. 브라운 박사는 그 날의 충격을 자주 얘기하곤 했다. 수많은 과학자들이 오랜 기간 동안 이론, 실험 및 컴퓨터 계산을 통해 연구한 결과의 문제점을 단 하루 밤 사이에 알아차린 것이다. 이날 이후 베테 박사와 브라운 박사는 초신성 폭발의 메커니즘을 밝히는 연구를 진행하게 된다.^[3,5]

당시 학계에 통용된 의견은 별의 중심부 밀도가 보통 핵밀도의 10%에 도달하면 수축을 멈춘다는 것이었다. 2차 대전 이후 수행된 모든 초신성 계산 결과가 이를 뒷받침하고 있다는 브라운 박사의 물음에 베테 박사의 답은 단호하고 간결하였다. “They’re wrong!”. 문제는 엔트로피였다. 주계열 항성의 중심부에서는 수소 핵융합 반응, 헬륨 핵융합 반응 등 다양한 핵융합 반응이 순차적으로 진행되어 무거운 원소가 쌓이게 된다. 형성 당시 초기 질량이 태양의 8배 이상인 별들에서는 중심부에 철핵이 형성될 때까지 핵융합 반응이 진행된다. 철은 우주에서 가장 안정된 원소이므로, 일단 철이 형성되면 핵융합 반응이 멈추게 된다. 베테 박사는 별 중심부에 존재하는 철로 구성된 핵의 엔트로피가 너무 낮아 붕괴할 수밖에 없음을 밝힘으로써, 통계역학의 기반이 되는 엔트로피가 별의 진화에 직접 적용될 수 있음을 보여주었다. 이후 진행된 공동연구로 베테

Fig. 1. Type II supernova SN1987A which was observed in southern hemisphere in 1987 (Image credit: Anglo-Australian Observatory). After this observation, Hans Bethe and G. E. Brown returned to supernova research.

테 박사와 브라운 박사는 별 중심부의 엔트로피 때문에 중심부 밀도가 평균 핵밀도($2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$)를 넘어설 때까지 수축이 계속 진행됨을 밝혔다. 연구 결과는 매우 성공적이었고, 당시 핵폭발 전문가들이 컴퓨터 계산의 문제점을 찾는 데 1년의 시간이 걸렸다고 한다.

행운은 준비된 자를 위한 것이다: 초신성 1987A

1987년 1월, 베테 박사와 브라운 박사는 초신성 폭발 연구를 그만두고, 천체물리가 아닌 다른 연구를 진행하기로 결심하였다.^[3] 이론을 검증할 초신성 폭발 관측이 없는 상황에서 추가적인 이론 연구에 한계가 있음을 느낀 것이다. 당시, 가장 최근에 관측된 초신성 폭발은 400년 전인 1604년에 관측된 케플러 초신성이었다. 그런데 놀랍게도 두 분이 초신성 연구를 그만 두기로 결심한 직후인 1987년 2월 23일 남반구에서 1987A로 명명된 새로운 초신성 폭발이 관측되었다(그림 1). 브라운 박사는 당시의 감동을 “행운은 준비된 자를 위한 것이다”로 대신 표현하곤 했다.

1987A는 여러 가지 면에서 역사적인 발견이었다. 광학 관측과 더불어 초신성 폭발에서 발생한 중성미자가 최초로 관측된 것이다. 중성미자는 초신성 폭발의 원인이 되는 중심부 핵붕괴 과정에서 발생하는데, 입자들과의 상호작용이 작아서 별 중심

REFERENCES

- [4] H. A. Bethe, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **41**, 1 (2003).
- [5] H. A. Bethe, G. E. Brown, J. Applegate and J. Lattimer, Nuclear Physics A **324**, 487 (1979).

부 폭발 과정의 정보를 가지고 별 밖으로 빠져나올 수 있다. 중성미자 관측으로 베테 박사와 브라운 박사의 이론이 다시 한 번 검증 받게 되었다.

초신성은 백색왜성이 질량 유입에 의해 별전체가 폭발하는 제1유형과 거성의 진화 마지막 단계에서 중성자별이 형성되면서 별 외곽 껍질을 우주로 방출하는 제2유형으로 크게 분류될 수 있다. 초신성 1987A는 제2유형 초신성으로 중심부에 중성자별이 형성되면서 폭발이 일어난 것으로 믿어지고 있다. 중성자별 형성과정에서 양성자와 전자가 결합하여 중성자가 형성되는 과정에서 많은 중성미자가 외부로 방출된다. 일본의 카미오칸데 실험실과 미국의 IMB 실험실에서 이때 방출된 중성미자의 직접 검출에 성공하였고, 검출된 중성미자의 에너지가 베테 박사와 브라운 박사의 예측과 일치한 것이다.

초신성 1987A의 발견은 베테 박사를 다시 초신성 연구에 몰두하게 하는 계기가 되었다.^[6] 베테 박사의 초신성 폭발 메커니즘 연구는 맨해튼 프로젝트로 핵무기 개발에 참여하면서 얻은 충격과 연구 경험이 바탕이 되었다. 1987년 후반 베테 박사는 대류가 초신성 폭발에 미치는 영향에 대한 수치 연구 결과를 시애틀 워싱턴대학에 있는 핵이론 연구소에서 발표하였다. 놀라운 점은 베테 박사의 수치 계산은 계산자를 이용하여 이루어졌다는 점이다. 복잡한 현상 속에 숨어 있는 핵심을 찾아 간단한 계산을 통해 문제점과 해결책을 찾는 베테 박사의 직관력을 다시 한 번 보여준 사건이었다.

중성자별의 운명은

제2유형 초신성인 1987A의 중심부에 존재할 것으로 예측되는 중성자별의 발견이 지연됨에 따라, 베테 박사와 브라운 박사는 중성자별 상태방정식으로 연구 영역을 확대하였다.^[7] 중성자별 상태방정식 연구는 브라운 박사 중심으로 진행되었고, 당시 브라운 박사와 공동연구를 수행하던 내가 베테 박사와 인연을 맺는 계기가 되었다. 내 박사학위 주제가 중성자별에서의 케이온 응축현상이었다.^[8]

중성자별은 양자역학적 축퇴압에 의해 별의 구조가 결정되는 밀도가 매우 높은 고중력체이다. 양성자 및 중성자는 페르미온 입자로 분류되는데, 페르미온 입자는 같은 상태에 두 개의 입자가 존재할 수 없으므로, 밀도(갯수 밀도)가 높아지면 전체적으로 에너지 밀도가 증가하여 양자역학적 축퇴압이 열에 의한 압력을 초과하게 된다. 양자역학적 축퇴압이 지배하는 별은 질량이 증가하면 반경이 감소하여 밀도가 높아지는 성질이 있다. 밀도가 높아지면 에너지 밀도 증가와 함께 운동량이 증가하지만, 입자들의 속도는 빛의 속도에 제한을 받게 된다. 중성자별의 질량이 계속 증가할 경우, 에너지 밀도 증가로 인한 중력의

Fig. 2. Artist's illustration of Neutron star Interior Composition Explorer (NICER) (Image credit: NASA/GSFC). NICER is an International Space Station (ISS) payload dedicated to the study of neutron stars. NICER is scheduled to launch in early 2017.

증가가 입자들의 속도에 영향을 받는 양자역학적 축퇴압을 이겨 별이 붕괴하게 된다. 결과적으로 중성자별에 질량이 지속적으로 유입될 경우, 더 이상 안정적인 중성자별로 존재할 수 없어 블랙홀로 붕괴하게 된다. 이 한계 질량을 중성자별 최대 질량이라고 부른다. 중성자별 최대 질량은 아직도 정확히 알려지지 않았다. 양성자와 중성자를 포함한 고밀도 물질의 성질은 강상호작용에 의해 결정이 되는데, 강상호작용은 상호작용이 너무 강하여 근사적인 계산이 불가능하기 때문이다.

강상호작용을 하는 고밀도 물질의 밀도가 증가할 경우, 페르미온 입자의 성질에 의해, 위쿼크(up quark)와 아래쿼크(down quark)로 구성된 양성자와 중성자의 에너지 밀도가 증가하게 된다. 핵물질의 밀도가 매우 높은 경우, 새로운 종류의 야릇한 쿼크(strange quark)를 포함한 입자가 존재하는 것이 시스템의 안정화에 기여할 것으로 예측이 된다. 야릇한쿼크를 포함하는 대표적인 입자가 케이온이다. 고밀도 상태에서 케이온 입자가 안정적으로 존재하는 현상이 케이온 응축(kaon condensation) 현상이다. 케이온 응축 현상은 중성자별의 최대질량을 줄여주는 역할을 한다.

베테 박사와 브라운 박사는 초신성 1987A의 잔재물에서 중성자별의 존재 증거가 발견되지 않는 것은 초기 뜨거운 중성자

REFERENCES

- [6] H. A. Bethe and G. E. Brown, Scientific American **252**, 60 (1985).
- [7] G. E. Brown and H. A. Bethe, ApJ **423**, 659 (1994).
- [8] Chang-Hwan Lee, Physics Reports **275**, 255 (1996).

별이 식으면서 블랙홀로 진화했기 때문이라는 제안을 하였다.^[7] 초신성 1987A에서 초기 중성자별이 형성된 것은 중성미자 관측으로 확인이 되었고, 모체별의 질량으로부터 유추된 중성자별의 질량은 태양 질량의 약 1.5배였다. 이에 근거하여 베테 박사와 브라운 박사는 중성자별의 최대 질량이 태양 질량의 1.5배임을 주장하였다. 또한 쌍성계 진화 과정에서는 짝별로부터의 질량 유입이 가능하므로 처음에 형성된 중성자별이 질량 유입에 의해 블랙홀로 진화할 수 있다는 제안을 하였다.^[8]

베테 박사와 브라운 박사 사후에, 중성자별과 백색왜성으로 구성된 쌍성계에서 태양 질량의 2배 질량을 가진 중성자별이 관측됨으로써 중성자별의 최대 질량에 대한 그들의 예측이 틀렸다는 것이 확인되기는 했지만,^[9,10] 그 분들의 도전 정신은 새로운 시대를 살아가는 우리에게 귀감이 되고 있어 현재까지 이어지고 있다. 그림 2는 2017년 발사 예정인 중성자별 내부 구조 탐색을 위한 엑스선망원경 NICER가 국제우주정거장 (ISS)에 탑재된 모습의 상상도이다.

미완의 업적: 중력파

1996년 1월 베테 박사와 브라운 박사는, 매해 겨울에 정기적으로 이루어진 칼텍 방문을 마치고 뉴욕으로 돌아오기 직전, 킵손(Kip Thorne, Caltech) 교수로부터 중력파 관련 연구를 제안 받는다. 일반인들에게 킵손 교수는 2014년 가을 개봉한 영화 “인터스텔라” 제작자로 더 잘 알려져 있다. 브라운 박사는 다음 해인 1997년 칼텍 방문 시 중력파 연구를 시작하자고 베테 박사에게 제안을 하였지만, 베테 박사는 “Oh, no! I want to begin now”로 응답하였다. 베테 박사의 중력파 연구가 시작된 순간이었다. 당시 베테 박사의 나이는 90세였다. 거장의 연구 욕심을 채우기에는 아직 부족한 나이였음을 인정하지 않을 수 없다. 중력파 관련 연구는 대부분 브라운 박사의 주도로 진행되었고 현재는 베테와 브라운 박사의 예측이 틀렸다는 것이 확인되기는 했지만, 베테 박사의 중력파 연구는 많은 물리학자들에게 마지막 순간까지 연구를 진행한 거장의 열정을 느끼게 하였고 새로운 동기를 부여하였다.^[11,12] 1999년 베테 박사의 칼텍에서의 마지막 세미나는 중력파가 주제였고, 대형 강의실을 가득 채운 청중이 92세 거장의 세미나를 즐기고 있었던 기억이 난다. 당시 몸이 불편하여 발표자료 준비에 브라운 박사와 나의 도움을 받았지만, 베테 박사가 세미나에서 보여준 정신력과 열정은 놀라웠다.

중력파는 아인슈타인의 일반상대성이론에 의해 예측된 4차원 시공간 자체의 주기적 변화로서, 미국의 라이고(LIGO; Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)와 같은 지상의 중력파 실험실에서 관측 가능한 중력파는 중성자별과 블랙홀

Fig. 3. Photo of the Livingston detector site of LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) (image credit: LIGO). LIGO (with detector at Hanford) detected gravitational waves generated by merging binary black holes.^[13]

을 포함한 쌍성계가 병합하는 마지막 순간에 방출하는 강한 중력파이다. 라이고에서 관측 가능한 중력파의 빈도 예측은 관측된 중성자별-중성자별 쌍성계를 바탕으로 이루어졌다. 만약 베테 박사와 브라운 박사가 제안한 것처럼 중성자별의 최대 질량이 태양 질량의 1.5배라면, 전자기파 관측으로 확인이 어려운 작은 질량의 (태양 질량의 1.5~2.5배 질량을 가진) 블랙홀이 우주에 많이 존재하게 된다. 이 블랙홀은 전자기파로는 관측이 어렵지만, 중력파로는 관측이 가능하므로 주요한 중력파원이 될 수 있다. 베테 박사와 브라운 박사는 중성자별-블랙홀 쌍성계가 중력파 검출 빈도를 향상시킬 것이라는 예측을 하였다.^[11,12] 아쉽게도 베테 박사와 브라운 박사 모두 중력파 검출 소식을 듣지 못한 채 숨을 거두었다. 비록, 현재는 태양 질량의 2배 질량을 가진 중성자별의 발견으로 베테 박사와 브라운 박사의 빈도 예측이 틀렸다는 것이 확인은 되었지만,^[9,10] 두 분은 마지막 순간까지 중력파 검출을 통해 자신들의 이론이 검증될 희망을 버리지 않았다.

최초의 중력파 검출은 2015년에 이루어졌는데, 기존의 기대와 달리 중성자별 쌍성계의 충돌이 아닌 태양 질량의 30여 배 질량을 가진 두 블랙홀의 충돌에 의해 발생한 중력파가 검출되었다^[13](그림 3). 블랙홀 쌍성계의 존재가 처음으로 관측으로 확인된 순간이었다. 중력파 검출과 관련된 자세한 소식은 ‘물리학과 첨단기술: 중력파 특집호(2016 3월호)’에 실린 한국중력

REFERENCES

- [9] P. B. Demorest, T. Pennucci, S. M. Ransom, M. S. E. Roberts and J.W.T. Hessels, *Nature* **467**, 1081 (2010).
- [10] J. Antoniadis *et al.*, *Science* **340**, 1233232 (2013).
- [11] H. A. Bethe and G. E. Brown, *ApJ* **506**, 780 (1998).
- [12] H. A. Bethe and G. E. Brown, *ApJ* **517**, 318 (1999).
- [13] B. P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).

Fig. 4. Artist's illustration of a bright gamma-ray burst (image credit: NASA/Swift).

파연구협력단의 특집 기사를 참고 바란다.^[14]

끝없는 도전: 감마선폭발

중력파가 관측되기를 기다리는 동안, 한스 베테 박사와 브라운 박사는 감마선 폭발 천체 현상에 대한 새로운 연구에 참여하였다.^[15] 감마선 폭발은 수 분 이내에 아주 많은 에너지를 감마선으로 방출하는 천체로서, 감마선으로 짧은 시간에 방출된 에너지는 일반적인 초신성 폭발에 수반된 전체 폭발 에너지보다 크다(그림 4). 지속 시간이 긴 감마선 폭발은 초기 질량이 매우 큰 (태양 질량의 25배 이상인) 별의 진화 마지막 단계에서 빠르게 회전하는 블랙홀이 중심부에 형성되면서 발생하는 것으로 믿어지고 있다. 또한 일반적인 초신성보다 폭발에 수반된 에너지가 10여 배 이상 큰 하이퍼노바와 감마선 폭발의 연관성도 제시되었다. 반면, 지속 시간이 짧은 감마선 폭발의 모체로 중성자별 쌍성계가 제안이 되었다. 감마선 폭발의 정확한 메커니즘은 현재까지도 명확하게 밝혀지지는 않았다. 별의 진화, 초신성, 중성자별, 그리고 블랙홀을 포함한 다양한 천체 현상을 한평생 연구해온 베테 박사의 마지막 연구주제로서 감마선 폭발은 손색이 없어 보인다.

베테 박사의 마지막 논문은 감마선 폭발과 하이퍼노바에 관한 연구로서, 논문이 출판된 당시 그의 나이 95세였다.^[16] 비록 감마선 폭발 연구는 브라운 박사에 의해 주도되기는 하였지만, 95세까지 연구를 수행한 베테 박사의 열정과 능력이 놀라울 따름이다. 과학 논문은 아니지만, *Physics Today*에 실린

그의 마지막 글은 97세에 작성이 되었다.^[17] 베테 박사와 브라운 박사는 주로 전화와 팩스를 이용하여 연구를 진행하였는데, 베테 박사는 본인이 팩스로 보낸 모든 노트의 페이지 번호를 누적하여 표시하였다. 그의 추모집에는 페이지 번호가 5424번인 팩스 사진이 예로 포함되어 있다.^[3] 이 팩스에서는 쌍성계의 진화 과정에서 질량 유입량에 별의 질량 변화량을 예측하였는데, 526번식에서 출발하여 533번식에 이르는 계산 과정이 자세하게 기록되어 있다. 90세를 넘어서 고령의 나이에도 불구하고 문제의 핵심을 찾아 직접 수치 계산을 수행하는 베테 박사의 단면을 잘 보여주고 있다.

감사의 글: 독수리와 함께 날다

브라운 박사는 ARNPS에 실린 그의 글 제목과 같이 베테 박사를 독수리에 비유하곤 했다.^[18] 브라운 박사에게 있어서 베테 박사는 스승이자, 동료이며 삶의 일부였다. 1978년 코펜하겐에서의 베테 박사와의 만남과 충격은 이후 브라운 박사의 연구 스타일을 바꾸는 계기가 되었다. 은퇴 이후에 이루어진 베테 박사의 주요 업적은 모두 브라운 박사의 주도로 진행이 되기는 하였지만, 코펜하겐의 기적에서 소개한 바와 같이, 베테 박사는 탁월한 직관력으로 복잡한 문제 속에 숨어있는 핵심을 꿰뚫어 문제를 해결하는 능력을 보여주었다. 브라운 박사는 베테 박사가 없었다면 본인의 천체물리 연구도 없었다는 고백을 자주 하곤 했다. 칼텍 방문 당시 브라운 박사는 아침부터 베테 박사를 위해 스테이크를 굽는 수고를 아끼지 않을 만큼, 베테 박사와 함께하는 삶도 즐기고 좋아하였다. 베테 박사는 90세의 나이에도 아침부터 스테이크를 원할 만큼 쇠고기를 좋아하였다.

나에게 있어서 브라운 박사는 독수리와 같다. 그를 통해서 베테 박사를 만날 수 있었고, 두 분의 삶을 보면서 진정한 동료의 의미를 깨달을 수 있었다. 그가 직접 요리한 양고기의 향을 맛보며 물리를 토론하던 저녁의 기억들이 아직도 생생하다. 이제는 두 분 모두 고인이 되었지만, 두 분의 흔적이 내 삶에 남아 있음을 느끼고 감사한다. 이 글을 통해서 두 분에 대한 기억을 나눌 수 있는 기회를 제공한 물리학과 첨단기술 편집진에게도 감사를 드린다.

REFERENCES

- [14] H. M. Lee *et al.*, *Phys. High Technol.* **25**(3), 2-43 (2016).
- [15] G. E. Brown, C.-H. Lee, R.A.M.J. Wijers, H. K. Lee, G. Israelian and H. A. Bethe, *New Astronomy* **5**, 191 (2000).
- [16] G. C. McLaughlin, R.A.M.J. Wijers, G. E. Brown and H. A. Bethe, *ApJ* **567**, 454 (2002).
- [17] H. A. Bethe (with N. D. Mermin), *Physics Today* **55**, 53 (2004).
- [18] G. E. Brown, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **51**, 1 (2001).