한스 베테의 노벨상 업적 및 연관 연구

DOI: 10.3938/PhiT.26.011

한 인 식

Nobel Prize Achievement and Related Research of Hans Bethe

Insik HAHN

How does the Sun shine? This question may be one of the oldest questions ever asked by human beings. Hans Bethe identified key nuclear reaction chains for the energy production of the Sun and more massive stars. The thermonuclear reactions that produce energy in stars by converting hydrogen into helium at high temperatures are called the p-p chain and the CNO cycle. Hans Bethe was awarded the Nobel Prize in Physics in 1967 for "his contributions to the theory of nuclear reactions, especially his discoveries concerning the energy production in stars." His great contributions to astrophysics and related research are discussed.

들어가는 글

한스 베테(Hans Albrecht Bethe)는 1906년 독일 Strasbourg(현재는 프랑스에 위치)에서 태어났다. 1912년부터 Kiel에 있을 때에는 몸이 허약해서 초등학교를 다니지 않고 가정교사에게 교육을 받았기 때문에 또래 친구 없이 조용한 유년기를 보냈다. 1914년에 Frankfurt 대학으로 자리를 옮긴 아버지를 따라 Frankfurt로 이주하게 된다. 유대인인 어머니는 음악가이면서 작가이었다. 베테는 어린 시절 생리학 교수였던 아버지의 영향을 받아 일찍이 숫자와 경제에 눈을 뜨게 된다. 베테의 첫 번째 과학 논문은 그가 18살 때 그의 아버지와 함께 쓴 투석(dialysis)에 대해서다.

저자약력

한인식 교수는 예일대학교에서 핵천체물리학으로 박사학위를 취득하였다. 이후 칼텍에서 박사후 연구원, 일본 이화학연구소에서 RIKEN Fellow, 휴스턴 대학교에서 연구교수를 거쳐 현재 이화여자대학교 과학교육과 교수로 재직 중이다. (ishahn@ewha.ac.kr)

베테는 고등학교에서 수학과 물리학에 모두 관심을 보이지만 결국 물리학을 선택하였다. 1924년 Frankfurt 대학에서 물리를 공부했고 Munich 대학에서 당시 세계적인 석학이었던 아놀드 조머펠트(Arnold Sommerfeld) 교수의 지도하에 박사학위를 받았다. 당시 조머펠트 교수 지도하에 베르너 하이젠베르크(Werner Heisenberg), 루돌프 파이엘스(Rudolf Peierls), 라이너스 폴링, 에드워드 콘돈, 에드워드 텔러(Edward Teller) 등의 수재들이 있었다. 베테는 박사학위 취득 후, 장학금을 받으며 캠브리지의 Cavendish 연구소에서 러더퍼드의 지도를 받았으며 이탈리아의 물리학자인 엔리코 페르미의 연구실에도 잠시 머물렀었다. 이처럼 독일에 있었던 젊은 시절의 베테는 많은 양자역학의 대가들과 접촉을 하였다.^[1]

유대인인 베테는 나치가 정권을 잡았을 때, 아인슈타인을 포함한 다수의 과학자들이 그랬듯 미국으로 이민을 가게 된다. 1935년 미국에 정착한 이후 그는 줄곧 Cornell 대학에서 교수로 있으면서 활발하게 활동하여 자신의 물리학 연구의 초석을 닦았다. 또한 2차 세계대전 중에는 맨해튼 프로젝트에 참여하였고, 이후 수소폭탄 개발의 기초적인 일에도 참여하였다. 베테의 수많은 과학 업적들 중에서도 노벨 물리학상을 받게 된 것은 1938년에 태양을 포함한 별(또는 항성)들의 에너지 생성 연구 때문이다. 그는 이 연구로 1967년에 "핵반응 이론, 특히 별의 에너지 생성과 관련된 연구"로 단독으로 노벨물리학상을 받았다. 그의 노벨상 업적인 별에서의 열핵반응인 p-p chain(또는 양성자-양성자 연쇄반응)과 CNO 사이클(또는 CNO 순환 과정)에 대하여 소개하고 맨해튼 프로젝트 등 핵과 관련된 연구에 대해서도 간략히 언급하고자 한다.

태양은 어떻게 빛나는가?

태양은 어떻게 빛나는가? 이 질문은 인류가 가지고 있었던

REFERENCES

- [1] Gerald Edward Brown and Chang-Hwan Lee, *Hans Bethe and His Physics* (World Scientific, 2006).

Fig. 1. The Sun's interior. The interior of the Sun consists of convective zone, radiative zone, and the core. The core temperature is 15.7 million K and it is where the thermo nuclear reaction called the p-p chain occurs.

가장 오래된 질문 중에 하나일 것이다. 태양이 없는 지구를 상상할 수 없는 이유는 인간을 포함하여 지구에 있는 모든 생명체는 태양 빛으로부터 얻어지는 에너지가 직간접적으로 반드시 필요하기 때문이다. 태양이 어떻게 수십억 년 동안 일정한 에너지를 공급하는가에 대한 올바른 설명을 한 것은 채 100년이 되지 않는다. 그 이유는 이 궁금증을 해결하기 위해서는 20세기 물리학의 두 개의 큰 줄기인 상대성 이론과 양자역학이 동시에 필요하기 때문이다.

여러 과학자들은 식 $E=mc^2$ 으로 대표되는 아인슈타인의 특수상대성 이론에서부터 태양의 에너지 생성과정 풀이에 접근하였다. 이들은 질량도 에너지의 한 종류라는 상대성 원리로부터 태양 질량과 태양 에너지의 상관관계에 대해 쉽게 이해할 수 있을 것이라 생각했지만 올바른 원리를 이해하는데 많은 시간이 걸렸다. 핵융합 반응을 몰랐던 시대에는 태양이 수소로 가득 채워져 있으며 이 수소가 산소와 결합하여 연소하면서 에너지를 내는 것이라 생각했었기 때문이다. 하지만 이러한 가정 하에 계산된 태양으로부터 방출되는 에너지는 태양의 수명은 수백~수천 년 정도밖에 되지 않기 때문에 설득력을 잃었다.

이후 핵융합 반응을 과학자들이 이해하기 시작하면서 핵융합을 태양에도 접목시키기 위한 시도를 하기 시작하였다. 특히 1920년에 에딩턴(Arthur Eddington)이 영국 Cardiff의 한 미팅에서 태양의 에너지는 열핵반응(thermonuclear reaction)으로 생긴다는 가설을 처음 주장했다고 전해진다. 그러나 고전물리로는 이를 설명하지 못하여 이 가정 또한 존폐위기에 처한

다. 서로 같은 극인 양성자와 양성자가 서로 밀어내는 방향으로 작용하는 전자기력을 극복하고 결합하기 위해서 가져야 하는 쿨롱 퍼텐셜 에너지 혹은 쿨롱 장벽(Coulomb barrier)에 해당하는 에너지보다 태양의 에너지가 낮았기 때문이다.

하지만 이때 나타난 것이 양자역학이며, 특히 양자역학 중에도 ‘양자 터널링’이다. 이 터널링 효과로 태양의 낮은 온도에서도 핵융합이 가능하다는 것을 설명할 수 있게 되었다. 1930년대에는 베테를 포함한 본 하이제커(Von Weizsacker), 찰스 크리치필드(Charles Critchfield)와 같은 물리학자에 의해서 좀 더 구체적인 핵반응 연구가 진행되었고 여러 가지 핵반응에 대한 반응률(cross section)과 함께 좀 더 정확하게 태양 내부에서 일어나는 핵융합을 이해할 수 있었다. 이렇게 상대성 이론과 양자역학을 접목하여 현재 우리가 알게 된 핵융합에너지로 계산하면 태양의 수명은 거의 백억 년이다.

1938년에 한스 베테는 태양뿐만 아니라 더 나아가 태양보다 무거운 별에서 두 가지의 서로 다른 핵융합이 가능하며 이 과정에서 엄청난 에너지가 만들어진다는 것을 밝혔다. 그는 수소 핵이 융합하여 헬륨으로 바뀌는 과정이 p-p chain뿐만 아니라 CNO 사이클도 있으며, 높은 온도에서는 CNO 사이클이 더 큰 에너지를 만든다고 밝혔다.

The p-p chain

핵자 당 결합에너지(binding energy)가 가장 큰 핵인 철(^{56}Fe)을 기준으로 핵분열과 핵융합이 일어나는 영역을 구분할 수 있다. 철보다 질량이 작은 핵자들의 영역에서는 두 개 이상의 핵종들이 결합하여 무거운 핵이 만들어지면서 에너지를 방출하는 핵융합이 일어날 수 있다. 핵융합반응 후에 생성된 원자핵 질량의 합은 충돌하기 전의 2개의 원자핵 질량의 합에 비하여 약간 적다. 상대성 이론에 의하면 이 질량결손 Δm 에 상당하는 $\Delta m \cdot c^2$ 의 에너지가 방출된다. 태양에서의 주된 에너지원은 4개의 양성자가 다양한 핵융합과 붕괴를 통하여 최종적으로 1개의 헬륨핵과 2개의 양전자 그리고 2개의 중성미자를 만드는 핵융합반응이다.

베테가 미국으로 간 후 1936년과 1937년 Reviews of Modern Physics에 3편의 논문^[2-4]을 발표하는데, 이 논문들은 그 당시 알고 있던 핵물리 전반에 대해서 잘 정리된 논문들로 베테의 성경(Bethe's Bible)이라고 불린다. 베테가 처음으로 천체물리

REFERENCES

- [2] H. A. Bethe and R. F. Bacher, Rev. Mod. Phys. 8, 83 (1936).
- [3] H. A. Bethe, Rev. Mod. Phys. 9, 69 (1936).
- [4] M. S. Livingston and H. A. Bethe, Rev. Mod. Phys. 9, 245 (1937).

Fig. 2. Nuclear fusion process in the proton-proton chain.

와 관련된 연구를 한 것은 바이츠제커(Weizacker)가 제안한 양성자 두 개가 이중수소핵(deuteron)으로 되는 $p + p \Rightarrow d + e^+ + \nu$ 반응이다. 1938년 조지 가모프(George Gamow)는 그의 대학원생인 찰스 크리치필드(Charles Critchfield)에게 proton-proton 반응을 계산하라고 제안하였다. 크리치필드는 계산결과를 $p + p \Rightarrow d + e^+ + \nu$ 반응에 대한 연구를 했던 베테에게 보냈다. 베테는 크리치필드의 계산 결과가 올바르다는 것을 확인시켜 주었고 이후 둘은 함께 연구 결과를 정리하여 논문을 발표하였다. 둘의 논문^[5]에서 별에서는 양성자-양성자 반응이 다른 여러 다른 반응들과 함께 최종적으로 헬륨으로 만들어진다는 것을 제시하였으며 여러 연쇄과정(chain)들이 있지만 가장 일반적인 반응경로는 아래와 같다고 발표하였다.

위 반응 중에서 중성미자를 생성하는 핵반응은 지구에서 중성미자를 측정함으로써 태양에서 일어나는 핵반응을 직접 확인할 수 있기 때문에 매우 중요하다. 일련의 과정을 통하여 봤을 때 결국 태양은 양성자를 헬륨으로 만드는 거대한 헬륨공장인 것이다. 아래 식은 태양에서 일어나는 핵반응의 최종 결과이며, 그림 2는 p-p chain을 대략적으로 도식화한 그림이다.

하지만 베테와 크리치필드의 연구는 에딩턴의 태양 내부 온도 예측 결과와 맞지 않았다. 이 시기에 에딩턴은 태양 내부의 온도가 4000만 도라고 예측했는데, 이 온도에서의 핵반응률은 관측된 태양의 빛의 세기를 설명하기에는 너무 컸기 때문이

Fig. 3. The pp chain in the Sun. There are three different ways to make a helium, as indicated in ppI, ppII, and ppIII.^[6]

다.^[1] 1938년 워싱턴학회에서 가모프(Gamow)와 텔러(Teller)는 별들의 에너지 발생(energy production in stars)이라는 주제를 선정하고 베테를 초청하였다. 그 당시 베테의 관심은 양자전기역학(quantum electrodynamics)이었기 때문에 워싱턴 학회에 가고 싶지 않았다. 하지만 텔러의 설득으로 학회에 참가하였고, 그 학회에서 태양의 중심온도가 에딩턴이 예측한 4000만도가 아닌 1500만도로 예상한다는 중요한 정보를 얻게 된다. 이 차이는 태양의 원소 분포차이에서 기인하였다. 이전에는 태양이 지구와 같은 원소분포(chemical composition)를 가지고 있다고 생각하였지만 태양이 대부분 수소와 25%의 헬륨으로 되어 있을 것이라는 연구가 제시되었기 때문이다. 이전보다 낮은 1500만도의 온도에서는 크리치필드와 베테의 논문에서 밝힌 핵반응들이 태양의 밝기(luminosity of the sun), 즉 관측된 복사선(radiation)의 양과 일치하게 된다.

위에 언급한 경로 외에도 물론 다른 경로(chain)도 헬륨 생성이 가능하며 더 정밀한 핵물리 실험 및 이론에 의한 p-p chain은 그림 3이다.^[6] 태양에서는 그림 3에서 보이는 것과 같이 다양한 경로로 양성자가 헬륨으로 만들어지면서 질량차이만큼 에너지를 생성하게 된다. 이런 다양한 p-p chain은 실제로 태양과 별에서 일어나고 있다. 현재 태양의 중심부는 온도 $1.57 \times 10^7 \text{ K}$, 압력은 약 2500억 atm인 초고온, 초고압의 플라즈마로 이루어졌고, 구성 원소의 대부분을 차지하는 수소의 원자핵(양성자)이 서로 충돌해서 열핵융합반응을 일으켜, 양성자 4개가 헬륨핵으로 변하고, 이때 질량의 0.7%가 소실하여 방대한 에너지를 생산한다.

REFERENCES

- [5] H. A. Bethe and C. L. Critchfield, Phys. Rev. **54**, 248 (1938).
- [6] Wick Haxton, Nature **512**, 378 (2014).

CNO 사이클

한스 베테가 참석한 1938년 워싱턴 학회에서 태양의 온도가 이전 값보다 적다는 것으로부터 p-p chain으로 태양의 에너지를 설명할 수 있었지만, 더 무거운 별에서의 에너지 생성에 대한 질문은 계속 남게 됐다. 관찰에 의하면 질량에 따라 내부(core) 온도는 천천히 증가하지만 별의 밝기(luminosity)는 아주 빠르게 증가한다. p-p chain으로부터 생성되는 에너지 또는 별의 밝기는 온도 변화에 상대적으로 천천히 증가하기 때문에 이 현상을 설명하지 못하였다. 또한 이 학회에서는 다른 중요한 천체물리 문제도 다루게 되는데 그 중의 하나는 헬륨보다 무거운 원소들이 어떻게 만들어지는가이었다. 그 이유는 양성자와 중성자의 합이 5나 8(즉 $A = Z + N = 5$ 또는 8)인 핵은 존재하지 않으며, $A = 6$ 이나 7인 핵들도 양성자와 융합을 하면 바로 2개의 헬륨핵인 알파로 붕괴되기 때문이다. 예를 들면, ${}^7\text{Li} + p \Rightarrow 2\,{}^4\text{He}$ 반응으로 질량이 8을 만들지 못한다. 이 문제는 살피터(Salpeter)와 같은 다른 물리학자들에 의해서 결국 풀리게 된다. 고온, 고밀도의 별의 내부에서 가벼운 원자핵은 충돌에 의해 더 무거운 핵으로 합쳐지면서 많은 양의 에너지를 방출한다. 별 내부에서 수소핵융합반응이 어느 정도까지 일어나게 되면 별은 수축하게 되고 중심부의 온도가 10^8 K에 이르면, 헬륨이 ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \Rightarrow {}^8\text{Be} + \gamma$ 와 ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He} \Rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$ 핵반응인 triple-alpha process를 거쳐 탄소가 생성된다.

p-p chain만 가지고는 태양보다 무거운 항성(별)에서의 에너지 생성을 설명할 수가 없어서 베테는 워싱턴 학회 이후 이 문제에 대해서 연구하게 된다. 헬륨보다 무거우면서 가장 가벼운 원소인 리튬(Li), 베릴륨(Be), 보론(B)은 원소비율이 상대적으로 희소하기 때문에 위 원소들은 p-p chain을 대체할 새로운 반응에서 제외되었다. 그 다음 원소가 탄소인데, 탄소와 양성자의 반응은 아래와 같은 구체적인 반응들로 표시될 수 있다. 탄소는 위에서 설명한 triple-alpha process를 거쳐서 만들어지며, 항성의 중심부에 충분한 탄소가 형성된다. 즉, 탄소가 촉매 역할을 하는 탄소-질소 사이클(CN cycle) 또는 탄소-질소-산소 사이클(CNO cycle)이 되는데 그 과정은 다음과 같다.

1938년에 위 반응에 대한 일부 실험 결과들이 있었고, ${}^{13}\text{N}$ 와 ${}^{15}\text{O}$ 는 반감기가 각각 10분과 2분 정도인 베타 붕괴를 한다.

Fig. 4. The CNO Cycle.

위 식 중에서 ${}^{15}\text{N} + p$ (즉, 양성자와 ${}^{15}\text{N}$ 가 반응하면)은 ${}^{16}\text{O}$ 를 만들지 않고 다시 ${}^{12}\text{C}$ 로 돌아가는데 실제 ${}^{16}\text{O}$ 로 되는 경우는 0.1% 정도이다. 위의 체인들은 결국 4개의 핵이 하나의 헬륨핵을 만드는 것과 같고, ${}^{12}\text{C}$ 는 이 반응을 촉진시켜주는 촉매 역할을 하게 된다. 그림 4는 앞에서 설명한 핵반응들을 보여준다. 위의 양성자 포획 과정은 p-p 반응보다 쿨롱 퍼텐셜 barrier가 크기 때문에 온도에 따라 반응률이 많이 바뀌게 된다.

베테가 CN 사이클(또는 CNO 사이클)을 발견 후 정량적으로 계산하는데 걸리는 시간은 2주면 충분하였다. 이후 여러 대학에서 콜로키움을 하게 되며 이 결과를 알리게 된다. 일부 반응에 대해서 여러 연구자들이 실험적 검증을 하게 되는데 그 대표적인 사람이 Caltech의 윌리 파울러(Willy Fowler)와 찰스 로리츠(Charles Lauritsen)이다. 이 계기로 파울러와 베테의 성공적인 학술교류가 시작된다. 베테는 CNO 사이클과 p-p chain 연구로 1967년에 노벨상을 받게 되고, Fowler도 무거운 원소들의 생성에 대한 연구로 1983년 노벨상을 받게 된다.

한 가지 흥미로운 사실은 한스 베테는 1938년도에 CNO 사이클에 대한 논문을 다 완성했으면서도 발표를 미뤘다는 것이다. 그 대신 별의 에너지 생성과 관련된 미발표 연구에 주는 상에 지원하였다. 결국 그 상을 받게 되어 상금으로 그의 어머니를 미국으로 초청하였다. 노벨상을 받는데 꼭 필요했던 중요한 그의 논문은 연구를 완료한 지 1년이 지난 1939년에야 Physical Review에 실리게 된다.^[7]

결론적으로 항성 속에서 수소가 헬륨으로 바뀌는 과정 중 나머지 하나는 질량이 큰 항성에서 일어나는 CNO 사이클이다. CNO 사이클은 탄소-질소-산소의 순환 과정을 의미하며 양성자

REFERENCES

- [7] H. A. Bethe, Phys. Rev. 55, 434 (1939).

Fig. 5. Hans Bethe. Two reactions in the CNO cycle are shown in the photo.

Fig. 6. The CNO Cycle. There are known to have different CNO cycles. Cycle 1 is what Hans Bethe originally suggested the main hydrogen burning process in stars heavier than the Sun.^[8]

-양성자 연쇄반응보다는 더 높은 온도(약 2×10^7 K 이상)에서 일어난다. p-p chain과 다른 점은 반응 초기에 탄소가 촉매 역할을 하게 되며, 질소와 산소가 반응과정에서 나타나기 때문에 CNO 순환반응이라 부른다. 그림 6은 CNO 사이클이 여러 가지 다른 경로가 있음을 보여준다.

p-p chain과 CNO 사이클 모두 수소연소(hydrogen burning)를 하며 그림 7과 같이 온도에 따라 반응률이 달라진다. 태양의 핵 온도는 1.6×10^7 K로서 p-p chain을 통하여 대부분의 에너지를 만들고 겨우 1% 정도만이 CNO 사이클로부터 생성된다. 한스 베테가 1938년에 계산을 할 때에는 정확한 태양 내부 온도를 몰랐기 때문에 태양에서 CNO 사이클의 역할이 지금 우리가 알고 있는 것보다는 더 클 것으로 이해되었다. 태양에 대한 에너지 생산과정인 p-p chain은 다른 학자들과 함께 연구한 것이었고, 베테가 단독으로 노벨상을 받은 이유는 CNO 사이클을 단독으로 제안하여 별들의 에너지 생산과정을 설명했기 때문이다. 우리에게 가장 중요한 별인 태양에는 거

Fig. 7. The stellar energy production for the pp chain and CNO cycle. The Sun is powered dominantly by the pp chain at solar temperature of 1.6×10^7 K.^[9]

의 적용할 수 없는 핵융합과정으로 노벨상을 받게 된 것일 수도 있지만 p-p chain에 대한 그의 업적까지 합하면 노벨상을 받을 최고 책임자임은 변함이 없다.

맨해튼 프로젝트

1941년에 한스 베테는 미국시민이 되었으며 원자 폭탄의 개발 연구에 기여를 했던 과학자 중 한 명이었다. 1942년 오펜하이머가 로스앨러모스의 연구소 소장으로서부터 맨해튼 프로젝트라고 불리는 원자폭탄 개발이 본격적으로 시작되었다. 오펜하이머는 1942년 여름에 작은 이론 물리 그룹을 버클리에서 초청하였다. 이 연구를 위해 에드워드 텔러(Edward Teller), 반 블렉(Van Vleck), 펠릭스 블로흐(Felix Bloch), 로버트 서버(Robert Serber), 에밀 코노핀스키(Emil Konopinski)와 같은 저명한 이론물리학자들과 두 명의 박사 후 연구자들, 그리고 한스 베테가 초청되었다.

이 당시 베테는 별의 에너지 생산과정을 밝혀낸 36세의 젊고 뛰어난 이론가로 유명했다. 또한 나치에 반대하는 곳에서 전쟁에 기여를 하고 싶어 했기 때문에 전쟁에 도움이 되는 탱크, 총격과 등의 연구를 진행 중이었다. 하지만 원자 폭탄 개발에 관해서는 부정적인 입장을 가지고 있어 처음부터 연구에 참여하지 않았다. 원자폭탄의 원료가 되는 우라늄 동위원소를 분리해내는 것이 불가능하다고 생각했기 때문이었다. 하지만 베테의 가장 친한 친구인 텔러가 베테에게 페르미의 연구와

REFERENCES

- [8] C. E. Rolfs and W. S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos* (the University of Chicago Press, 1988).
- [9] E. Adelberger *et al.*, Rev. Mod. Phys. **83**, 195 (2011).

자신의 생각을 얘기하며 폭탄의 가능성을 제시하였다. 베테는 페르미와 텔러의 이론이 틀렸음을 증명하려 하였지만 1942년 버클리에서 여름캠프의 성과는 베테의 예상과는 달랐다.

이후, 베테는 텔러와 버클리에서 원자 폭탄을 이용하여 이중 수소에 불을 붙일 수 있는 가능성에 대한 연구를 함께하게 되었다. 그때부터 베테는 맨해튼 프로젝트가 진행되는 로스 앨러모스(Los Alamos) 연구소에서 이론물리 파트의 책임자로 일하기 시작하였다. 모든 설계와 실험 계획은 그의 검토를 거쳐서 입안되었다. 그가 주로 한 일은 원자핵 분열이 일어날 때 발생하는 열량을 계산하고 전자기의 모양과 방사를 예측하는 것이었다. 그는 파인만을 자기 부서의 관리자로 임명하였으며 원자 폭탄의 효율성을 베테-파인만 공식이라고 불리는 방법으로 계산해 내었다.

이 연구를 바탕으로 1945년 원자폭탄을 투하한 이후 더 발전된 폭탄을 개발하라는 해리 트루먼(Harry Truman) 대통령의 지시가 있었다. 이에 베테는 수소 폭탄이 많은 생명을 앗아갈 것이며 도덕적으로도 인간의 가치에 위배되는 것이라는 의견을 피력하였지만 통하지 않았다. 베테는 수소 폭탄 제작에 찬성하지는 않았지만 군사적으로 도움이 될 수 있었던 일이기에 로스 앨러모스 수소폭탄 제작 컨설턴트로 연구에 참여하여 텔러의 주도하에 수소폭탄을 개발하였다. 하지만 평생 친구였던 텔러와는 남은 생애 동안 핵무기에 관한 논쟁의 반대편에서 있었다.^[10]

기타 관련 연구

1934년 한스 베테는 블락(Bloch)과 함께 이온화된 입자가 물질을 지날 때 단위거리 당 잃는 평균 에너지를 도출하였다. Bethe-Bloch formula는 우주선(cosmic ray)으로부터 입자소나기(particle shower)가 일어나는 원인을 설명하기 위하여 연구되었다. 핵물리나 입자물리에서 입자가 물질에서 어떠한 상호작용으로 얼마만큼의 에너지를 잃어버리는지를 알려주는 Bethe-Bloch formula의 이해는 매우 중요하다. 이 식은 베테를 이야기할 때 가장 대표적으로 연관되는 공식이다.

한스 베테는 천체물리학이 그의 과학자로서의 삶뿐만 아니라 개인적인 삶에 세 번의 중요한 역할을 했다고 말하였다. 첫 번째는 1938년에 그가 별의 에너지 생성에 대해서 연구했을 때이다. 두 번째는 1938년 연구로 인하여 거의 30년이 지난 1967년에 노벨상을 받으면서 즐거웠던 시절이다. 그리고 세 번째는 그가 1990년대부터 G. Brown과 함께 천체물리학에 대해서 매우 활발하게 연구하던 시기이다. 그는 2005년 그의 나이 98세에 타계하기 전까지도 태양의 중성미자 검출에 대한 실험결과에 관심이 많을 정도로 천체물리학 연구를 하었다고 알려진다. 철보다 무거운 원소들의 생성과정은 현재까지도 완

전히 풀리지 않은 문제인데, 베테도 말년에는 이 문제에 대해서도 연구를 한 것으로 알려진다.

마치는 글

태양과 항성에서 일어나는 열핵반응인 p-p chain과 CNO 사이클은 이제 대부분의 일반물리학 책이나 천문학 책에 자세히 언급되어 있다. 우리가 현재 이해하고 있는 이 수소연소(hydrogen burning) 과정은 베테의 연구이며 베테는 이 공로로 50년 전에 노벨물리학상을 받았다. 노벨상을 받은 후에도 베테는 계속해서 태양중성미자에 대한 깊은 관심과 여러 다양한 연구를 하여 핵물리와 천체물리 분야에 큰 업적을 남기게 된다.

필자가 핵천체물리를 처음 접하면서 참여한 실험도 CNO 사이클과 관련된 $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ 반응과 p-p chain 반응 중의 하나인 $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ 실험이었다. 특히 후자는 태양 중성미자와 관련되어 매우 중요한 반응으로 희귀동위원소 빔을 사용하여 연구하였다. 이러한 핵물리 실험에 필요한 실험장치를 최적화하거나 데이터 분석을 할 때 입자가 물질에서 어떠한 상호작용으로 얼마만큼의 에너지를 잃어버리는지를 보여주는 Bethe-Block formula를 자주 사용하게 된다.

1990년도 중반에 베테를 필자의 연구원 시절에 Caltech에서 몇 번 보았다. 그는 주로 Gerry Brown과 함께 있었고 천체물리에 대해서 다양한 연구를 했던 시기인 것으로 보인다. 베테가 물리학과 콜로키움에서 초신성과 신성의 에너지 생성에 대해서 발표를 하였는데 빈자리가 없을 정도로 많은 사람들이 왔었다. 이미 그때 베테의 나이가 많았음에도 불구하고 옛날에 연구한 내용이 아니라 본인의 최근 연구 내용을 열정적으로 발표하는 것을 보고 존경하는 마음이 들었던 것으로 기억한다. 본 원고를 준비하면서 “gentle giant”라고 불리는 그의 인간성과 위대한 과학적 업적에 많은 감동을 받았다.

별이 빛나는 어느 저녁에 베테는 그 당시 약혼자였던 부인과 걸으면서 별이 빛나는 이유를 아는 사람은 세상에서 자신 밖에는 없을 거라고 자랑을 했다고 한다. 하지만 그녀는 별로 감명을 받지는 않았다고 한다. 밤하늘에 보이는 별들을 보면 우리는 아름답다는 생각과 광활한 우주에 대한 많은 궁금증을 가지게 된다. 밤하늘에 반짝이는 별들은 수많은 예술가와 작가들에게 많은 영감을 주어왔다. 아마도 그의 말처럼 한스 베테는 이러한 별이 빛나는 원리를 이해한 지구상의 첫 번째 사람이었을 것이다.

REFERENCES

- [10] Richard Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb* (Simon and Schuster, 1986).