



베릴륨(Be) 방사선의 수수께끼

주 승 환

기술사(방사선 관리) · 원자력공학 박사

「수분이 지나지 않아 나(채드윅)만큼 놀란 페더가 뛰어왔다. 그날 아침 러더퍼드에게 그 논문(폴리오-퀴리의 발표)에 대하여 이야기했다. 내가 오전 11시에 러더퍼드를 방문하여 흥미 있는 뉴스와 실험실에서 진행되고 있는 일에 대하여 이야기하는 것은 오래된 습관이었다. 내가 폴리오-퀴리의 관측과 그들의 의견에 대하여 이야기 하자 그의 놀라움은 점차 커지기 시작했다. 마침내 그는 외쳤다. “나는 그것을 믿지 않는다!” 이와 같이 참을성 없는 논평은 전혀 그에게 걸맞지 않는 것이었다. 오랫동안 그를 알고 있었지만 이런 경우는 전혀 기억이 나지 않는다. 나는 폴리오-퀴리의 해석에 오류가 있는 것 같다고 지적했다. 러더퍼드도 관측은 믿어야 하지만 설명은 완전히 다른 문제라고 동의했다.」(15, 1-197쪽).

중성자 발견 기회를 놓친 이들

X-선의 발견 때도 그랬다. 윈트겐보다 먼저 그런 현상을 발견했던 이들이 있었듯이(22), 중성자의 발견 때도 채드윅보다 한 발 앞서 중성자에 다가 섰던 이들이 있었다. 인류 최초로 폴로늄 원소를 발견했던 폴리오-퀴리 부부가 바로 그들이었다.

퀴리는 1927년 폴리오와 결혼하였지만, 2년 동안은 서로 독립하여 연구를 해오다가 2년 후부터 함께 연구를 하게 된다. 그들의 공동 관심사는 라돈이 쪼개지면서 생겨나

는 방사성 물질들 중에서 새로운 원소를 화학적으로 분리해 내는 일이었다.

그들은 그 일을 성공시켰으며, 발견한 새로운 원소를 그녀의 조국인 폴란드의 이름을 담아 폴로늄으로 이름 지었다. 그들은 계속하여 폴로늄을 순수하게 정제하는 기술을 연구하게 된다.

1931년에는 지금까지 알려진 방사능 소서보다도 10배나 센 폴로늄 원소를 분리할 수 있었다. 이것으로 만든 소서를 ‘베릴륨 수수께끼(알파 입자를 베릴륨 원자핵에 쪼일 때, 튀겨나는 이상한 방사선에 대한

의문)’를 푸는 데 이용하게 된다.

폴리오-퀴리는 1931년 12월 28일 프랑스 과학원에서 베릴륨 수수께끼 연구에 관한 1차 결과를 보고하였다. 그들이 발견한 베릴륨의 방사선은 독일의 보테 그리고 베이커(다음에 설명)가 공동으로 이미 보고한 적이 있었던 베릴륨 방사선보다도 더욱 센 것이었다. 폴리오-퀴리는 방사선 측정을 표준화시켜 그것의 에너지를 셈하여 본 결과 알파 입자의 것보다 3배나 더 강했다고 보고했다.

폴리오-퀴리는 문제의 베릴륨 방사선에 대하여 흥미를 가지게 된다.

그 같은 세 방사선은 좀 색다른 점이 있을 것이란 생각을 하게 되었고, 다른 알파 입자나 베타 입자의 방사선들에 견줘 어떤 다른 특성을 가지고 있는지도 궁금하였다. 베릴륨 방사선이 다른 물질의 원자핵과 충돌하여 어떤 반응을 일으키는지를 알아보기 위하여 실험 방향을 새로 정하게 된다.

그들은 이온 상자에 구멍을 내고 나서 얇은 알루미늄 박지로 그 구멍을 막아 베릴륨 방사선이 이온 상자로 들어갈 한 개의 창을 만들었다. 그리고 그 방사선 소서와 이온 상자의 창 사이에 여러 가지 물질들을 번갈아 놓아가면서 방사선을 쪼이고 이온 상자 속에서 일어나는 현상들을 관찰하였다.

다른 물질들에서는 이온 상자 속에 별 신기한 변화를 일으키는 것이 감지되지 않았지만, 파라핀 왁스 그리고 셀로판지 물질들처럼 수소가 많이 들어있는 것들을 놓았을 때, 베릴륨 방사선에 반응하여 전기적 신호가 생기면서 이온 상자에 전류가 많이 흐름을 관찰하게 된다.

여러 번의 실험으로 그들은 베릴륨 방사선이 수소를 많이 함유한 물질에서 수소 원자인 양성자를 튀겨내게 하고, 그런 튀겨낸 양성자들이 이온 상자 속의 전류를 많이 흐르게 한다고 결론을 내렸다. 그들은 당구공이나 구슬들이 서로 충돌하는 것처럼, 베릴륨 방사선이 수소 원자들

과 서로 탄성 충돌하는 현상을 관측한 것으로 믿고 있었다.

그들은 1932년 1월 18일, 프랑스 과학원에서 위의 실험 결과를 보고했다. 줄리오-퀴리는 베릴륨 방사선이 러더퍼드가 가정했던 한 중립 입자의 방사선일 것으로는 전혀 의심해보지 않았다. 문제의 베릴륨 방사선을 감마선이라 믿고 있었던 것이 중성자를 놓치게 된 잘못이었다.

만일 그들이 이미 10년 전인 1920년 6월 3일, 런던 왕립학회의 베이커 강연에서 러더퍼드가 발표했던, 중립 입자-중성자-에 대한 문헌을 읽었다면, 아마도 실험중에 관찰된 수수께끼의 방사선을 중성 입자의 것으로 생각해 봤을지도 모르는 일이다. 안타깝게도 그들은 중성 입자들의 거동을 세계 최초로 확인은 하였지만, 중성 입자인 것을 모르고 지나쳐 버렸던 것이다.

과학사를 들추다 보면, 아쉽게도 줄리오-퀴리처럼 과학사의 한 획(패러다임)을 그을만한 중대한 발견을 하고서도 그 명예를 남에게 빼앗긴 비슷한 예들을 발견하게 된다. 인류 최초로 전류를 발견했던 앙페르(Andre-Marie Ampere)는 과학사에서 아주 중대한 기본 원리로 쓰이는 자기의 유도 전류(에컨대, 패러디 상수)를 인류 최초로 발견하였지만, 패러디(Michael Faraday)에게 그 명예가 돌아갔다(23). 이 글의 글머리 인용문에서 러더퍼

드 경이 말한 ‘관측은 믿어야 하지만 설명은 완전히 다른 문제’란 코멘트는 과학적인 설명이 과학의 요체를 뒤집어 놓는다.

베릴륨 수수께끼

채드윅은 1932년 2월초에 우편으로 배달된 물리학회지 <Comptes Rendus>에서 줄리오-퀴리의 논문을 읽고는 글머리에 소개된 인용문처럼 까무러치게 놀랐다. 그 논문을 읽고 난 채드윅은 하마터면 중성 입자를 그들에게 빼앗길 뻔했다고 중얼거렸다.

줄리오-퀴리의 논문을 읽고 정신을 차린 채드윅은 1932년 2월 7일부터 중성 입자를 찾는 실험을 강도 높게 다시 서두르게 된다. 이미 그는 러더퍼드가 10년 전에 중성 입자를 가정했던 그 때부터 틈틈이 그것을 찾기 위한 실험 준비를 해왔고, 그리고 실제로 실험해 본 경험도 있었기에 그 일에는 누구보다도 자신 있는, 그야말로 준비된 후보자였다. 그래서 채드윅은 줄리오-퀴리의 논문에서 자기의 경험으로 알고 있었던 사실들과는 다른, 의심나고 모순된 설명들을 하고 있음을 본능적으로 감지하게 됐을 것이다. 줄리오-퀴리는 그들이 발견했던 그 현상을 하나의 콤프턴 효과로 설명했다. 위의 인용처럼, 러더퍼드도 그 점을 지적했을 것이다.

줄리오-퀴리가 실험에 썼던 방사선 소서는 폴로늄의 알파 입자를 베릴륨의 원자핵에 충돌시켜 거기서 튀겨나는 베릴륨의 방사선이었다. 그런 실험은 1928년경, 이미 독일 물리학자 발터 보테(Walther Bothe)가 했던 실험의 일부이기도 하였다.

보테 팀은 알파 입자를 가벼운 원소들의 원자핵들에 충돌시켜 튀겨나는 감마선들의 특성을 알아보는 실험을 하고 있었다. 은, 마그네슘 그리고 알루미늄 금속들을 주요 실험 대상으로 정했다. 그리고는 원자 번호 순위로 리튬에서 산소에 이르기까지 실험 대상을 바꿔 가며 방사선을 쬐이는 반복된 실험을 계속하면서 표적 물질들에서 일어나는 형광 반응을 주의 깊게 관찰하였다.

그때의 방사선 소서는 주로 라듐의 알파 입자나 라돈 가스를 주된 소서로 썼다. 그런 소서들은 그것들 자체에서 알파 입자와 함께 튀겨나는 백그라운드인 감마선이 너무나 세계 나오는 결점이 있어 그들의 실험에 방해가 되곤 했다. 보테 팀은 감마선이 덜 나오는 폴로늄을 소서로 썼다. 채드윅도 그 정보를 알고 있었다. 하지만 그들은 어디에서 그 소서를 구했는지를 밝히지는 않았다.

보테 팀은 보론, 마그네슘, 그리고 알루미늄 물질들에서 감마선이 그런 원자들을 들뜨게 만드는 현상(‘여기 현상’)을 발견하였고, 리튬

(Li) 그리고 베릴륨(Be) 물질들에서는 감마선이 튀겨나는 것을 발견하였다. 1930년 8월, 보테 그리고 베커는 그들이 얻어낸 결과를 간단히 보고했고, 보다 자세한 내용들은 4개월 후인 12월에 발표했다.

그 논문이 지적한 것은 베릴륨에서 튀겨나는 방사선은 베릴륨 원자핵에 쬐 폴로늄의 알파 입자 에너지보다도 더 높은 에너지를 가진다고 썼다. 만일 그렇다면, 베릴륨 원자핵에 들어간 에너지보다 더 많은 에너지가 새로 생겨나서 베릴륨의 원자핵 밖으로 나오는 것이므로 에너지 보존 법칙에 모순되는 현상이다. 이것이 ‘베릴륨 수수께끼’다. 알파 입자에 쬐 베릴륨 원자핵에서 튀겨나는 베릴륨 방사선(중성 입자)의 정체를 수수께끼로 남겨놓게 된 것이다. 그들은 양성자가 튀겨나지는 않았지만, 핵이 쪼개진 것임을 제안하였다.

캐번디시에서 채드윅과 함께 연구하던 동료인 노먼 페더(Norman Feather)가 보테 연구팀이 폴로늄 소서를 다룬 실험에 관한 논문을 읽고, “베릴륨에서 나오는 방사선의 세기는 다른 원소들보다도 거의 열배나 강했다.”라고 알려주었다. 이들 반응에서는 알파 입자는 쪼개지지 않았다. 그리고 리튬과 베릴륨은 알파 입자의 충격을 받고서도 양성자를 튀겨내지 않았다는 점도 더 이상했다고 지적했다. 채드윅은 중성

입자에 미쳐있었고, 이미 실험을 했던 경험도 있었으므로 그런 현상은 콤프턴 효과에 의한 것이 아님도 의심하고 있었다.

채드윅의 실험

채드윅은 줄리오-퀴리가 했던 실험 방법을 답습하여 실험을 해보기로 하였다. 그는 스스로 정제해둔 폴로늄을 방사선 소서로, 그리고 특수하게 만든 이온 상자를 이용하였다. 그 이온 상자에는 진공관, 증폭기 그리고 오실로스코프(이후 ‘스코프’로 줄임)가 연결된다.

러더퍼드 경이 양성자를 발견한 실험에서 썼던 알파 입자의 소서는 라돈 가스였다. 단순히 한 얇은 유리관 속의 공기를 빼고 난 다음, 라돈 가스를 담아 밀봉한 것에 지나지 않았다. 병원에서 암-치료에 썼던 방사선의 앰플 소서와 같은 것이었지만, 라돈을 많이 채워 방사선의 세기를 그것보다 높인 거였다.

라돈에서 생겨난 폴로늄은 금속인 고체이므로 채드윅은 금속 튜브 속에 지름 1 cm 동전 위에 폴로늄을 바르고, 지름 2 cm 크기인 순수한 베릴륨 금속의 둥근 판을 폴로늄 소서 뒤에 붙여놓고, 그 금속 튜브 속의 공기를 빼고 나서 봉한 거였다. 폴로늄에서 알파 입자가 나와 베릴륨 원자핵을 때리면 거기서 센 베릴륨 방사선이 나온다. 이 방사선



은 2cm 두께의 납을 뚫고 통과할 만큼 센 방사선이다.

줄리오-퀴리의 실험에서 한 것처럼, 이온 상자에는 한쪽에 지름이 0.5 인치인 구멍을 뚫고, 알루미늄 박지로 덮인 창을 만들었다. 소서에서 나오는 센 방사선은 그 창을 통해 이온 상자 속에 들어가면 이온 상자 속에 채운 가스의 원자들은 베릴륨 방사선의 에너지를 받아 그들의 궤도 전자(속박 전자)들의 일부가 궤도를 벗어나게 된다. 이런 상태를 이온화(전리) 현상이라 부른다.

원자의 궤도를 벗어난 전자(자유 전자)들은 이온 상자 속에 마련된 플러스 전극으로 바로 이끌리면, 그런 전자들이 가진 하전 때문에 양극(플러스극)에서는 아주 약한 전기 신호(펄스; pulse)가 만들어진다.

이런 펄스들은 전류의 세기가 아주 약하므로 스코프로는 잡아낼 수 없다. 먼저 그런 펄스들을 스코프가 잡을 수 있는 수준으로 증폭을 시켜줘야 한다. 지금은 이런 펄스의 증폭에 쓰이는 것을 '전치 증폭기'라 한다. 당연히 이온 상자 속에서 베릴륨 방사선 에너지로 생긴 전자들은 전치 증폭기를 통하여 스코프에 나타나게 된다.

이온 상자 속에서 생겨나는 이온들은 거기에 채운 가스들의 종류에 따라 생겨날 펄스의 수효가 달라진다. 뿐만 아니라 이온 상자 속으로 들어오는 방사선의 에너지 세기에

도 크게 영향을 받게 된다.

하지만 채드윅의 실험에서는 방사선의 세기가 이미 정해진 한 소서를 썼으므로 그 방사선의 에너지와 이온 수효와는 정해진 고유한 정수일 뿐이다. 지금은 이런 원리를 이용하여 방사선을 측정하는 검출기를 만든다.

채드윅의 실험 과정에는 좀 색다른 점이 있었다. 위의 펄스들은 방사선 소서에서 나오는 방사선이 하전을 가진 방사선들(알파·베타 입자들 그리고 양성자들) 또는 간접적으로 이온화를 일으키는 감마선들이 이온화를 일으키는 메커니즘에 따른 것들이고, 채드윅의 실험은 하전이 없는 중성 입자를 찾는 데 목적이 있었으므로 당연히 스코프에는 아무런 전기적 신호도 나타나지 말아야 한다.

그런데 중요한 사실은 채드윅이 2mm 두께의 파라핀(양초의 재료) 판을 소서와 이온 상자의 알루미늄 창 사이에 놓는 순간, 스코프에 느닷없이 전기 신호가 나타났다. 그는 방사선 소서의 방사선이 먼저 파라핀에 들어가서 어떤 하전 입자를 만들어내고 그것들이 이온 상자 속에 채워진 물질과 반응하여 전기 신호를 만든다고 생각했던 것이다.

앞서 얘기인, 줄리오-퀴리는 같은 현상을 관찰했으면서도 이런 생각을 하지 못했던 것이다. 당연히 이온 상자 속에 넣었던 가스의 종류

에 따라 생겨날 이온들의 세기(하전)도 달라지게 된다.

하지만 그에게 중요한 것은 그런 방사선이 어떤 입자의 것인지 궁금하였고, 그 입자들은 얼마 정도의 알루미늄 두께까지 뚫고 나와 이온 상자 속의 물질과 반응하게 되는 것인지도 궁금하여 이온 상자과 소서 사이에 알루미늄 박지들을 겹쳐 채워갔다. 스코프에 아무런 펄스 신호가 나타나지 않을 때까지 채워진 알루미늄 박지들을 합친 총두께 그리고 그 박지들 사이의 공기층도 생각하면서 그 에너지를 셈하여 본 결과, 그 입자가 공기 중에 날을 수 있는 거리가 40cm나 되었다. 이 거리(전문 용어로 '비정(飛程)' 또는 '도달 거리')는 양성자가 공기 중에서 도달 거리와 같은 거였다.

그는 파라핀에서 나오는 입자를 양성자들로 잘못 알고 있었으므로 이런 입자들이 다른 물질들과의 반응을 계속 관찰하기 위하여 순수한 물질이 필요하였고, 표적인 고체 물질들은 알루미늄 창밖에 놓고 그리고 가스들은 이온 상자 속에 넣어 방사선을 쬐었다. 실험 결과는 물질의 종류에 상관없이 스코프에 펄스가 나타나게 되었고, 그 신호의 크기도 대체로 같은 수준으로 고른 값이었다.

이 실험으로 발견한 것들 중에서 가장 중요한 것은 베릴륨에서 나오는 방사선의 에너지 세기였다. 만일

줄리오-퀴리의 설명처럼, 베릴륨 방사선이 감마선일 경우, 최대로 가질 수 있는 에너지 세기는 낮아야 옳다. 하지만 관측된 에너지의 세기는 훨씬 높았으므로 감마선은 아닐 것이란 의심을 하게 된다.

또 다른 의심은 베릴륨에서 나오는 방사선을 여러 가지 순수한 물질(표적 물질)에 쪼일 때, 튀겨져 나오는 어떤 입자들이 감마선과의 충돌이라면, 에너지 보존 법칙에 따라 표적 물질의 원자량이 커지면 커질수록 표적 물질의 원자량에 따라 그 감마선이 갖는 운동 에너지도 비례하여 더욱 높아져야 옳다. 하지만, 실험에서 관찰한 에너지는 표적 물질이 원자량에 상관없이 대체로 비슷한 수준이었다. 그는 다음과 같은 결론에 이른다.

“만일 우리가 그 방사선이 감마선이 아니고 질량이 거의 양성자와 같은 입자라고 한다면, 충돌 문제에 관련된 모든 어려움이 사라진다. 방사선의 고투과력을 설명하기 위하여, 우리는 이 입자가 전하를 갖고 있지 않다고 추정해야 된다. ……우리는 이것이 1920년 베이커 강연에서 러더퍼드가 논의한 중성자라고 가정할 수 있을 것이다.” (15, 1-199 쪽)

중성자 도구

채드윅은 원자핵을 이론 제3의

기본 입자를 찾기 위한 실험을 시작하여 끝낼 때까지 10년 동안 그 일에 열정을 쏟았다. 중성자의 발견은 원자핵의 질량수(원자량)에서 원자 번호가 커지면, 커질수록 그에 따라 원자 번호의 거의 2 배로 원자량도 늘어나는 모순도 해결될 수 있었다.

원자핵은 그때까지 양성자들과 전자들만으로 이뤄진 것으로 알고 있었다. 그리고 원자의 궤도 전자 수효(마이너스 전하량)와 원자핵 속의 플러스 전하량인 양성자의 수효가 서로 같아야 중성인 한 안정된 원자가 될 수 있다. 원자핵을 이론 여분의 양성자들은 원자핵 속에 있는 베타 입자와 같은 별도의 또 다른 전자들과 어울려 전기적으로 중성이 될 수 있다고 생각하고 있던 시절이었다.

원자핵 속에 마이너스 전하를 별도로 갖지 아니할지라도, 그 질량수가 2배로 높아질 수 있는 것은 궤도 전자들과는 상관없는 중성자가 그 모순을 해결해 준 것이다. 채드윅이 발견한 중성자는 하전을 띠지 않으므로 원자의 궤도 전자들이 원자핵을 철통같이 지키고 있는 쿨롱장의 장벽을 쉽게 뚫고 침입할 수 있다. 원자력 산업이 지금처럼 활성화될 수 있었던 것은 중성자를 써서 원자핵을 쪼개는 기술을 개발했기 때문에 가능했던 것이다.

미국의 이론물리학자 필립 모리슨(Philip Morrison)은 “음속으로

운동하는 열중성자들은 40분의 1 전자볼트(eV)의 운동 에너지를 가지고 있지만 수백만 전자 볼트의 에너지로 수천 배나 더 빠르게 운동하는 양자보다 훨씬 쉽게 많은 물질들과 핵반응을 일으킨다.”라고 했다.

그리고 한스 베테(최초로 별들의 에너지 생산은 헬륨이 탄소 12로 쪼개지는 이론을 제안)는 1932년 이전의 모든 것은 “핵물리학의 유사 이전의 것이고, 1932년부터는 핵물리학의 역사”라고 말한 적이 있다. 그 기준은 중성자 발견 시절이었다.

우리가 고민하는 방사성 쓰레기의 대부분은 중성자가 만들어내고 해도 틀린 말은 아니다. 원자력 발전소의 원전 연료인 우라늄의 원자핵을 쪼개는 일, 양성자 가속기로 새로운 물질을 만들어낼 연금술(핵변환 기술), 안정한 원자핵을 방사능을 띠게 만드는 방사화(방사성 동위원소 생산) 기능, 무수한 분열성 물질들을 만들어내는 일, 그리고 안정한 원자의 궤도 전자들을 자극시켜 화학 작용을 돕는 일, … 등등, 중성자의 응용 분야가 다양하므로 앞으로 우리 주변에 있는 물질 세계의 기본 틀을 아주 바꿔 놓을 수도 있을 것이란 전망이 가능하다. 중성자는 우리가 다루기에 따라 순기능과 역기능이 동전의 양면처럼 우리에게 나타나게 된다.

줄리오-퀴리 부부 그리고 채드윅

양쪽의 실험에서 썰던 방사능 소서들은 그들 스스로가 폴로늄을 정제하고 순도를 높여 만든 것이었다. 앞서 얘기처럼, 라듐에서 나오는 백그라운드 감마선의 세기는 폴로늄보다는 단위 퀴리마다 약 2830 배나 높다. 상대적으로 백그라운드 감마선이 낮은 폴로늄 원자를 정제시켜 폴로늄의 양을 높인 방사능 소서가 베릴륨 수수께끼를 푸는 데 중요한 도구가 되었던 거였다.

‘하느님은 스스로 돕는 자를 돕다’는 얘기는 그들에게도 통했다. 양쪽이 그런 소서를 각각 따로 얻게 된 얘기들은 방사성 쓰레기 문제로 고민하는 이들에게는 되새겨 봐야 할 대목일 듯 하다.

방사성 쓰레기에서 나온 폴로늄 소서

줄리오-퀴리가 실험에 쓰일 폴로늄 소서를 얻게 된 것은 아주 우연이었다. 그 때 세계 각국의 의사들은 암 치료에 알파 방사선인 라돈 가스 소서를 쓰고 있었다. 앞서 얘기처럼, 그것은 유리관 속에 일정한 양의 라돈 가스를 담아 둔 단순한 앰플이었으며, 그 속에 담긴 라돈의 알파 입자가 암세포를 죽이는 작용을 하였다.

라돈은 반감기(3.825 일)가 짧아 며칠이 지나면 라돈 방사선의 세기가 약화되어 더 이상 암 치료에는 쓸모없는 하나의 버릴 방사성 쓰레

기에 지나지 않았다. 세계 여러 나라 의사들은 라듐을 발견한 퀴리 부인에게 감사의 표시로 쓰고 난 그 앰플들을 보내준 것들이 한 곳에 모여져 그녀는 운 좋게 세계에서 가장 많이 폴로늄 자원을 소유하게 됐다.

잘 알려져 있듯이, 라돈 원자핵이 쪼개지면 3가지 핵종들인 납 210(^{210}Pb), 비스무트 210(^{210}Bi) 그리고 폴로늄 210(^{210}Po)으로 바뀐다(변환). 앰플 속에 혼합된 이들에서 폴로늄만 화학적으로 분리하는 기술인 부분 결정 분리법은 이미 그들이 개발해 놓은 것이라 문제가 없었다.

채드윅의 사연은 좀 달랐다. 그는 독일 카이저 빌헬름 연구소에 있는 마이트너(그녀는 오토 한이 발견한 우라늄 원자핵이 쪼개짐을 처음 이론적으로 검증한 핵물리학자임)에게 부탁하여 얼마 정도의 폴로늄을 얻어놓긴 하였지만, 그 양은 보테 팀이 했던 수준의 실험을 하기에 턱없이 약한 소서였다.

줄리오-퀴리처럼, 채드윅도 폴로늄 소서를 얻는 데 행운이 뒤따랐다. 캐번디시 동료인 페더가 1929-1930 학년도를 미국의 볼티모어에 있는 존스 홉킨스 대학 물리학과에서 연구를 했던 적이 있었다. 거기에 있는 동안 볼티모어에 있는 헨리 종합병원에서 라듐 공급 책임을 맡고 있던 영국인 의사와 친구가 되었다. 그 의사는 쓰고 난 라돈 가스

앰플 수백 개를 보관하고 있었다. 그 양은 줄리오-퀴리가 가졌던 양만큼이나 되었다. 켈리 병원은 그것들을 캐번디시에 기증하였고, 페더가 귀국할 때 그 귀한 물건을 가지고 왔다. 그 해 가을 채드윅은 방사선의 피폭이 우려되었지만, 그것들로부터 위험한 폴로늄 분리 작업을 마쳤으므로 그가 원하던 센 방사선의 소서를 이미 마련해서 시험 준비를 해두고 있었던 참이었다.

그 폴로늄 소서는 최초로 인류가 원자핵을 이룬 기본 입자들 중의 하나인 중성자를 발견하게 했던 주된 도구였다. 앞으로 우리는 중성자를 활용하는 새로운 양성자 가속기 시대를 맞게 될 것이다. 양성자 가속기는 한 양성자를 전자기적인 방법으로 높은 에너지로 가속시키는 장치이다.

높은 에너지를 띤 양성자를 어떤 표적 물질의 원자핵에 쏘이면, 핵자(뒤에 설명)인 중성자를 쉽게 우리 손에 넣을 수 있다. 이를 우리가 원하는 원자핵에 쏘여 그 핵을 파쇄시킨다면, 우리는 이제까지 만들어 내지 못하던 신-물질들을 만들 수도 있을 것이며, 물질의 계층 구조를 렙톤까지 소상하게 밝혀낼 수도 있게 될 것이다.

양성자 가속기는 ‘거대 과학(big science)’ [24]으로 표현된다. 앞으로 우리에게 펼쳐질 거대 과학은 물질의 계층 구조를 소상히 밝혀내어

이를 인류 복지에 활용하는 모든 과학 기술 분야들의 한 조합으로서의 기능을 하게 될 것이다.

그리고 지금 우리가 고민하는 방사성 쓰레기 처분에서 골치 아픈 긴 수명의 핵종들을 소멸시킬 근본적인 문제들을 해결해 줄 하나의 대안이고, 희망이다. 뿐만 아니라, 앞으로 방사성 쓰레기에서 분리될 쓸모 없는 물질들도 인류 복지를 위해 요긴하게 쓰일 바탕 물질의 원료가 될 가능성도 필자는 의심하지 않는다.

인간은 필요할 때, 스스로 인류 복지를 위한 수많은 문제들을 제안해 왔고, 복지를 위해 그들에 관련된 올바른 해답을 수없이 찾아냈다. 양성자 가속기는 우리의 미래 에너지 그리고 에너지의 순환으로 생겨난 방사성 쓰레기 처분 문제도 함께 해결해 줄 것임을 의심하지 않는다.

다행스러운 것은 우리 과학기술부가 신속하게(2003년 8월 5일) 「방사성폐기물 안전규제법」(24)을 본격적으로 가동했다는 소식을 전한다(25). 그 팀에 양성자 가속기 사업 팀도 참여했다. 필자는 그 팀의 역할과 성공적인 사업 수행을 기원한다.

요즘 우리는 방사성 쓰레기 처분 문제로 나라가 시끄럽다. 처분 부지로 지정된 지역 주민들은 사생결단으로 방사성 쓰레기 처분장 건설을 반대하고 있으므로 지금은 시급하고 중요한 대책 사업의 진로가 한치

앞을 예측하기 힘들다.

만일 그 때 이런 문제가 돌출했었다면, 아무도 줄리오-퀴리에게 방사성 쓰레기에 지나지 않을 그 귀중한 보물들을 보내줄 수는 없었을 것이다. 그렇게 됐었다면, 누가 감히 원자 폭탄이나 지금 우리의 에너지를 해결해 주는 원자력 발전을 꿈이나 꾸었을지 아찔했던 순간들이다.

방사성 쓰레기는 아주 쓸모없는 것만은 아닌 미래의 자원으로라도 활용될 여지도 있음을 필자만의 주장은 아닐 것이다. 하나의 방사성 쓰레기에 불과했던 라돈 앰플처럼, 언젠가는 방사성 쓰레기의 하나인 태운 원전 연료에서 긴요한 물질들을 우리 후손들이 찾아낼지 지금은 어느 누구도 장담할 수 없을 것이다. 아직 그런 쓰레기들은 위험한 것은 사실이다. 선언하지만, 그렇다고 필자는 방사성 쓰레기의 예찬론자는 아니다.

핵자(核子) 그리고 반핵자(反核子)

앞서 물질의 계층 구조를 살펴보면서 물질의 기본 단위인 원자의 모양새를 대충 알아봤다. 그리고 원자의 중심에 놓여 원자의 무게를 대표하고, 원자의 특성을 좌우하는 원자핵, 그리고 거기에서 튀겨나는 알파, 베타 그리고 감마 방사선들, 주된 기본 입자들인 양성자와 중성자의 발견에 관한 얘기들도 대충 알아

봤다. 그것들은 방사성 쓰레기의 특징을 나타내는 기본 물질들이다. 이런 물질들 외에도 원자핵 속에는 여러 가지 중간자들 그리고 기본 입자들과 쌍을 이루는 반입자(antiparticle)들도 들어있는 것으로 알려지고 있다. 이들을 모두 포함시킨 계층 구조는 분자?원자?원자핵?소립자?쿼크 그리고 렙톤까지 이어진다.

전자나 양성자의 운동 속도를 가속기로 가속시키면, 입자의 높은 운동 에너지를 얻을 수 있다. 이것은 위의 양성자 가속기 시대의 주역이 될 것이다. 가속시킨 입자를 원자핵에 충돌시켜 원자핵이 쪼개질 때 일어나는 현상들을 액체 수소를 채워 만든 안개상자로 들여다 보면, 수많은 원자핵의 파편들과 중간자들이 나타나게 된다.

소립자로 불리는 이들을 연구하는 이론 물리학은 상대적으로 젊은 학문으로서 새롭게 발전된 분야이다. 가속된 입자를 원자핵에 충돌시켜 원자핵의 기본 물질들을 연구하는 소립자 연구에서 양성자, 중성자, 반입자들인 반양성자와 반중성자들은 소립자들이며, 이들을 하나로 묶어 핵자(nucleon)란 용어를 쓴다. 그리고 반양성자와 반중성자를 반핵자(antinucleon)로 따로 구분하여 부르기도 한다.

반입자들은 소립자의 세계에서 모든 소립자들이 반입자들을 갖는



다고 하지만, 물질의 계층 구조에서는 아직 그들이 어디에 존재하고 있는지는 밝혀내진 못하였다. 반물질들은 우리 주변에 있는 그것의 한 쌍인 물질과 접촉하면 곧바로 소멸되면서 모두 에너지로 바뀌므로 우리의 주변 물질들과 한 폐쇄된 시스템(계) 안에서는 공존할 수 없다. 따라서 우리 마음대로 우리 주변의 물질들을 소립자의 세계에서만 존재 가능한 반물질과 충돌시켜 무한대의 에너지를 얻어내지 못한다. 대체로 그 수명들이 찰나(수억 분의 1 초)이므로 아직도 그들의 일부만 이용할 수 있을 뿐, 대부분은 우리가 접근하지 못한다. 모든 것을 실제로 입증하는 과학 분야인 현대 물리학의 견해로 보면, '존재하는 것은 반드시 관측되어야 하고, 반대로 관측되지 않는 것은 존재한다고 말할 수 없다'는 주장은 오랜 물리학의 전통으로 이어져 왔고, 또한 전문가들 사이에서 보편화된 상식이다. 하지만, 소립자의 세계는 그런 전통이 깨져버렸다. "관측되지 않아도 존재하는 것은 존재한다" (26, 69쪽).

대표적인 반물질은 우리가 잘 알고 있는 '양전자(陽電子)'를 들 수 있다. 양전자는 전자와 쌍을 이루는 반입자이다. 1932년 영국인 P. A. M. 디랙(Dirac)은 전자에 대한 파동방정식을 풀고는 새로운 물질인 전자의 부호가 정반대인 반물질을 예언하였다.


이것은 전자와 모든 것이 같지만, 오로지 전기적인 성질을 상징하는 부호만이 전자와는 정반대이다. 즉 전자인 베타 방사선(β^-)의 부호는 마이너스(-)이나 플러스(+인 베타도 있다는 얘기다. 이것을 '양전자(positive electron, β^+)'라 부른다.

1938년 앤드슨은 우주선 속에 양전자를 관측하여 디랙의 예언을 실증하였다. 안개상자에 나타난 또 다른 플러스의 성질을 띤 베타 입자를 관찰했던 것이다. 정상적인 입자와는 정반대인 한 쌍의 또 다른 입자가 존재하는 또 다른 물질 세계가 있음을 가상할 수 있고, 정상과 반입자 물질들이 서로 결합하면 물질의 개념은 살아지고 에너지만 남게 된다. 아인슈타인의 특수 상대성 이론이 이런 현상을 보여준다.

예컨대, 지구와 반지구가 충돌하면 우주에서 지구는 완전히 사라져 버리고 엄청난 에너지만 우주에 남게 된다. 블랙홀 속은 바로 그런 현상을 보여준다. 대부분의 반입자들은 물질의 본질을 이론적으로 파헤치는 과정에서 존재할 가능성이 예측되고 있을 뿐이다.

지금까지 필자는 원자핵의 모양새를 살펴 보면서, 특히 기본 입자들에 얽힌 주변 얘기들을 다룬 것이 지나지 않는다. 방사성 쓰레기의 특성을 이해하려면, 원자핵을 이루는 기본 입자들의 이해가 중요하다. 위

의 원자핵에 관한 소립자 이론에서 다루는 쿼크의 모델은 반입자들의 세계와 함께, 아직도 우리의 관심을 이끌어내지는 못하고 있는 듯하다.

현대 과학은 원자핵 모양새의 비밀을 모두 밝혀내진 못하였다. 우리 눈으로 원자를 확인할 수 있게 된 것은 약 20년 전의 일이었다. 1981년 3월 스위스의 두 과학자들(로러 그리고 비니히)이 주사형 터널 전자 현미경을 개발하여 원자의 모습을 직접 눈으로 관찰할 수 있게 되었다 (27, 121쪽). 

<참고 자료>

22. 주승환, "물질의 계층 구조 그리고 원자핵", 원자력산업, 23(8), 59쪽, 한국원자력산업회의(2003)
23. 주승환, "과학철학자 앙페르의 업적(앙페르의 아쉬웠던 실책)", 기술사, 29(3), 80-81, 한국기술사회(1996)
24. 박창규, "양성자가속기 KOMAK 및 미입계로 HYPER", 원자력산업, 17(7), 51쪽, 한국원자력산업회의(1997)
25. 원자력 NEWS: "방사성 폐기물 안전규제팀 본격 가동", 원자력산업, 23(8), 88쪽, 한국원자력산업회의(2003)
26. 히로세 · 다치시게 지음, 임승원 옮김, 「질량의 기원」, 전파과학사(1996)
27. 국양, "극미세 과학: 원자의 세계"; 「21 세기와 자연과학」, 사계절출판사, 121 쪽(1994)