하는 시료마다 조금씩 다르다는 것입니다. 이는 자연계 동위원소의 존재 비율을 고려해 평균 원자량을 결정하는 방식에 혼란을 초래했습니다. 이를 해소하기 위한 방안으로 현재는 몇몇 원소에 대해 원자량을 단일 값이 아닌 구간으로 제시하고 있습니다. 국제순수·응용화학연합(IUPAC)에서 제시한 주기율표를 보면, 수소(H), 탄소(C), 질소(N), 산소(O) 등을 포함한 총 13개 원소의 원자량이 구간으로 표시돼 있습니다.

예를 들어, 원자번호 12번인 마그네슘(Mg)의 원자량은 [24.304, 24.307]이라는 구간으로 표시하고 있습니다. 이는 시료에 따라 마그네슘의 원자량이 24.304와 24.307 사이의 어느 값으로든 측정될 수 있음을 의미합니다. 하지만 통상 무역 등 여러 산업 분야에서는 여전히 단일 원자량 값을 필요로 합니다. 이런 요구에 부응해 IUPAC은 원자량 구간과 함께 관습적으로 사용됐던 단일한 원자량 값도 함께 제시하고 있습니다. 마그네슘의 경우 관습적으로 사용하던 단일 원자량 24.305가 주기율표에 함께 제시돼 있습니다.

한편, 물질마다 다른 동위원소비 정보는 여러 분야에서 유용하게 활용되기도 합니다. 예를 들어 꿀을 생산하는 식물군의 탄소 동위원소비와 설탕의 원료인 사탕수수의 탄소 동위원소비가 다르기 때문에, 동위원소 존재비율을 정밀하게 측정할 수 있는 동위원소비 질량분석법(IRMS)을 통해 천연벌꿀인지 사양벌꿀인지 판별할 수 있습니다. 뿐만 아니라 운동선수에게서 검출한 스테로이드가 체내에서 생성된 것인지 외부 약물로 유입된 것인지도 동위원소비로 판단할 수 있습니다. 이 외에도 고대 인류의 식습관 연구, 유출된 기름의 오염원 추적, 법과학 수사 등 다양한 분야에서 동위원소비가 '화학적 지문'으로 요긴하게 쓰이고 있습니다.

김지후(제주중앙중 1)
현유지(제주 한라초 3)
손진(경기 안양시)

Q

원소의 질량을 어떻게 그렇게 정확히 재나요?

16

차상원 교수가 답하다

원소의 평균 원자량은 동위원소들 각각의 원자 질량 단위(u) 값과 존재비율을 고려해 계산합니다. 이 때문에 원자번호가 28번인 니켈의 평균 원자량이 원자번호가 27번인 코발트의 원자량보다 더 작게 나오기도 하죠(자세한 내용은 89쪽 14번 질문 참조). 이 과정을 자세히 들여다보면 한 가지 의문이 생깁니다. 과학자들은 어떻게 동위원소들의 질량을 소수점 이하 다섯째 자리 또는 그 이하까지 정확하게 측정할 수 있었을까요?

수소 원자핵 질량, 소수점 12자리까지 구해

원자량을 아주 정밀하게 측정할 때에는 동위원소의 존재와 그 존재비율을 측정할 때와 마찬가지로 질량분석법을 이용합니다(자세한 내용은 97쪽 15번 질문 참조). 다만 좀 더 정밀한 측정을 위해 '페닝 이온트랩(Penning ion trap)'이라는 특정한 형태의 질량분석기를 사용합니다.

페닝 이온트랩 장치는 우리나라 타악기 중 하나인 장구와 비슷하게 생겼습니다. 허리가 잘록한 나무통처럼 생긴 링(ring) 전극과, 장구의 양쪽 가죽처럼 생겨 링 전극 양쪽을 덮는 두 개의 엔드캡(end cap) 전극으로 이뤄져 있습니다. 이 세 전극에 전압을 걸어 불균일한 전기장을 형성한 상태에서 세 전극 중앙을 관통하는 균일한 자기장을 걸어주면, 장구 나무통 속과 같은 전극 사이 빈 공간에 이온들을 잡아 둘 수 있습니다. 잡혀 있는 이온들은 작은 원을 그리는 동시에 큰 원운동을 하는 사이클로트론(cyclotron) 운동을 하게 됩니다. 스프링의 양쪽 끝을 이어 하나의 큰 원을 만든 모양을 상상해 보면 이해하기가 쉬울 겁니다.

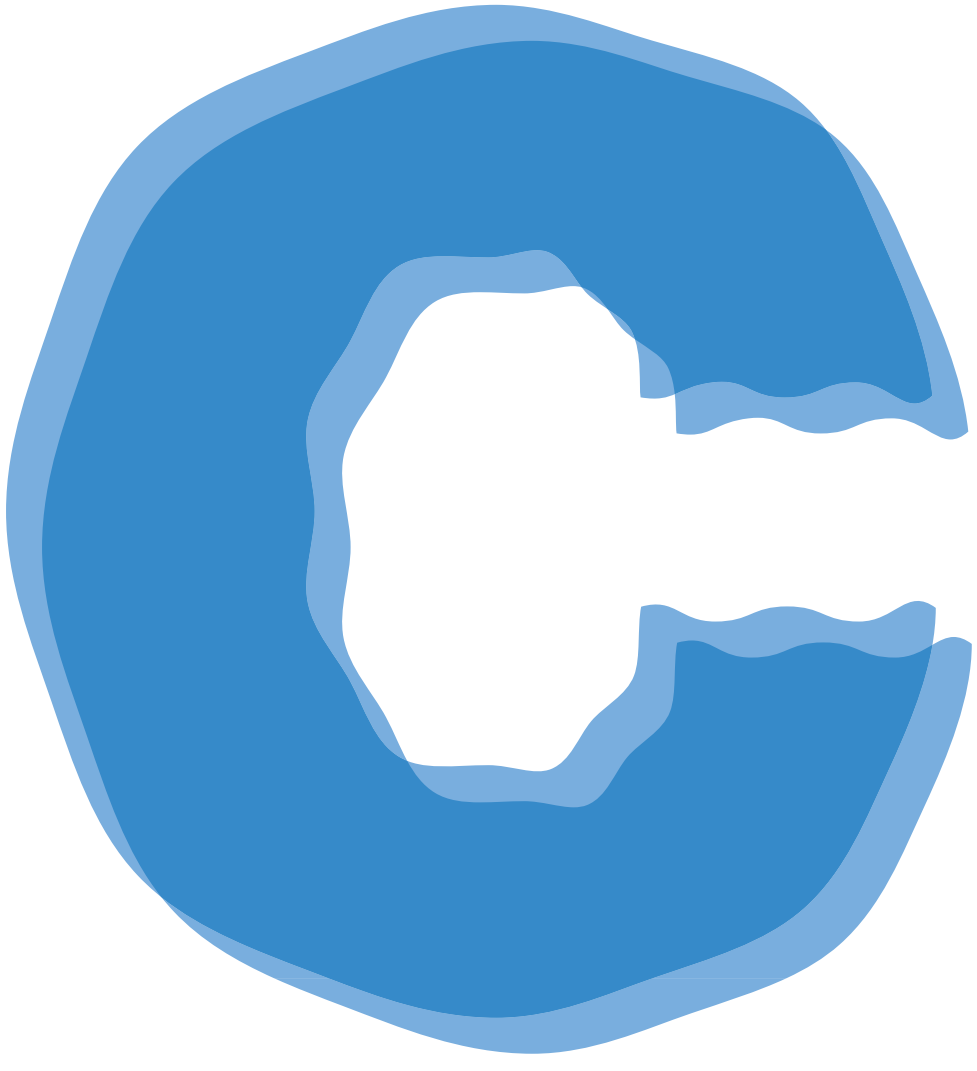
사이클로트론 운동의 진동수, 즉 이온이 트랩 안에서 얼마나 빨리 돌고 있는지는 이온의 질량 대 전하비(mass-to-charge ratio, *m/z*)와 반비례합니다. 진동수는 매우 정밀하게 측정할 수 있기 때문에, 이를 변환해 얻은 이온의 질량 또한 매우 정밀합니다. 페닝 이온트랩 장치를 발명한 한스 데멜트(Hans Georg Dehmelt)는 그 공로를 인정받아 1989년 노벨물리학상을 수상했습니다.

페닝 이온트랩 장치를 이용해 정밀하게 원자량을 결정할 때는 이미 원자량 또는 분자량이 잘 알려진 이온과 원자량을 측정하고자 하는 이온을 이온트랩 장치에 같이 주입합니다. 이때 두 이온들은 서로 다른 진동수로 원운동을 하고 있으며, 우리가 측정하는 신호는 각 이온에 의해 유도된 전류들이 겹쳐진 신호입니다.

다행히도 푸리에 변환(Fourier transform)이란 수학적 기법을 사용하면 겹쳐진 신호를 각 이온의 진동수 성분으로 분해할 수 있습니다. 이렇게 얻어진 진동수를 이용해 두 이온의 진동수 및 질량 비율을 구하고, 전자 질

탄소(C)
원자량을 측정할 때 기준이 되는 원소. 1961년 바닥상태로 존재하는 탄소-12(^{12}C) 원자 1개 질량의 12분의 1에 해당하는 질량이 원자 질량 단위(u)로 정의됐다. 질량분석기에 측정 대상과 함께 넣으면 둘의 질량비를 통해 측정하려는 원자의 질량을 정확하게 잴 수 있다.

QR코드를 스캔하면 탄소의 특징과 숨은 이야기를 다룬 대한화학회의 영상을 볼 수 있습니다.



량 및 이온화 에너지 등을 고려해 원자량을 계산합니다.

페닝 이온트랩을 이용해 이온의 질량을 정밀하게 측정한 대표적인 사례는 2017년에 보고된 양성자 질량 측정입니다.[doi: 10.1103/PhysRevLett.119.033001] 양성자는 수소 1가 양이온($^{1}H^{+}$)이자 수소 원자핵이며, 다른 원자핵의 빌딩블록입니다.

독일 연구팀은 이 양성자와 함께 원자량의 기준이 되는 탄소-12의 6가 이온($^{12}C^{6+}$)을 페닝 이온트랩에 주입해 두 이온의 질량비를 측정했습니다. 이를 통해, 1조(10^{12})분의 32의 정밀도로 양성자의 질량을 측정할 수 있었습니다. 연구팀은 원자 질량 단위(u)로 소수점 이하 열두 번째 자리까지 양성자 질량을 보고했습니다. 그들이 보고한 양성자 질량(1.007276466583 u)은 당시 받아들여졌던 양성자 질량 값보다 현저히 작은 값이었습니다.

전자는 양성자보다 얼마나 가벼울까

원자량을 정밀하게 측정하면 원자 1개의 질량도 정확하게 알 수 있습니다. 이온의 질량 대 전하의 비를 측정할 수 있기 때문에, 이온 또는 전자가 가진 전하량을 알면 원자 1개의 질량을 계산할 수 있습니다. 국제과학협의회(International Science Council)의 위원회 중 하나인 과학기술데이터위원회(CODATA)가 2019년 6월에 공표한 기본 전하량과 전자 질량의 값은 다음과 같습니다.

기본 전하량 (e): $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C

전자 질량 (m_e): $9.109\ 383\ 7015(28) \times 10^{-31}$ kg

전자의 전하량과 질량을 알고자 했던 시도는 1897년 조지프 톰슨(Joseph John Thomson)이 전자를 발견하면서부터 시작됐다고 할 수 있습니다. 톰슨은 음극선이 전기장과 자기장에서 휘어진다는 사실을 토대로 오늘날 전자(electron)라 불리는 음으로 하전된 미립자(corpuscle)들이 음극선을 이룬다고 주장했습니다. 그리고 일련의 실험을 통해 전자의 전하 대 질량비(charge-to-mass ratio, e/m)를 계산했고, 다음과 같은 중요한 사실들을 알게 됩니다.

첫째, 전자의 전하 대 질량비는 어떤 물질에서 방출되는지와 관계없이 일정했습니다. 둘째, 전자의 전하 대 질량비는 전하를 띤 수소 원자의 전하 대 질량비보다 1700배 정도 컸습니다. 셋째, 전자의 전하량은 전하를 띤 수소 원자의 전하량과 같았습니다.

톰슨은 이 사실들을 토대로 음으로 하전된 미립자, 즉 전자의 질량이 수소 원자 질량의 약 1700분의 1이며, 약 6×10^{-31} kg이라고 결론지었습니다. 톰슨은 전자 발견에 대한 공로를 인정받아 1906년 노벨물리학상을 수상했습니다.

톰슨이 계산한 전자 질량과 현재 알려진 전자 질량의 차이는 대부분 전하량 측정 오차로부터 기인한 것입니다. 1909년 로버트 밀리컨(Robert A. Millikan)이 기름방울 실험을 통해 기본전하(e·elementary charge)를 좀 더 정확히 측정함에 따라 이 오차는 크게 줄어들게 됩니다.

밀리컨은 증기압이 매우 작은 기름을 분무기로 뿜어내 기름방울을 생성하고 X-선을 이용해 이온화시킨 뒤 중력에 의해 낙하하도록 했습니다. 이때 전기장을 걸어 기름방울이 중력과 반대 방향으로 힘을 받아 두 전극 사이에 떠 있도록 하고, 떠 있는 각 기름방울의 크기를 측정했습니다. 이를 통해 각 기름방울이 가진 전하량을 계산할 수 있었습니다.

밀리컨의 실험에서 '신의 한 수'는 증기압이 매우 낮은 기름을 사용했다는 점입니다. 물 또는 알코올을 사용할 경우 증발에 의해 발생하는 측정 오차가 기름을 사용함으로써 현저하게 줄어들었기 때문입니다. 실험 결과, 밀리컨은 각 기름방울이 가진 전하량이 어떤 최소 전하량의 정수배임을 밝혀냈습니다. 이 최소량이 바로 기본 전하량이며, 밀리컨이 발표한 기본 전하량 값을 국제표준단위인 쿨롱(C)으로 환산하면 1.592×10^{-19} C입니다. 이는 현재 알려진 기본 전하량(1.602×10^{-19} C)과 분명히 차이는 있으나, 1% 오차 이내로 근접한 수치입니다.

밀리컨은 기본전하와 광전효과 연구에 대한 공로를 인정받아 1923년 노벨물리학상을 수상했습니다. 하지만 밀리컨 사후에 그가 연구 결과에 유리한 데이터만 선별적으로 사용했다는 의혹과 반론이 제기되면서, 기름방울 실험은 실험 결과 측면뿐만 아니라 연구윤리 측면에서도 크게 주목을 받은 연구로 남아있습니다.

양성자 vs. 중성자, 무엇이 더 무거울까

지금까지 전하를 띤 입자 또는 원자의 질량을 어떻게 측정할 수 있는지 알아봤습니다. 기본전하 및 원소 관련 기본 상수들을 통해 계산해 보면 원자 1개의 질량은 원소에 따라 10^{-27}~10^{-25} kg이 됩니다. 그렇다면 전기적으로 중성인 중성자의 질량은 어떻게 알아낼 수 있을까요?

한 가지 방법은 중성자를 포함한 이온과 그렇지 않은 이온의 질량 차이를 측정하는 것입니다. 예를 들어, 양성자만 갖고 있는 수소이온($^1H^+$)과 양성자와 중성자로 이뤄진 중수소 이온($^2H^+$)의 질량 차이를 측정하면 중성자의 질량을 알아낼 수 있습니다. 단, 중성자와 양성자가 강한 핵력에 의해

결합할 때 발생하는 질량 결손 등을 고려해 보정해야만 정확한 중성자의 질량을 구할 수 있습니다. 중성자와 양성자의 질량은 거의 같지만, 중성자가 아주 조금 더 무겁습니다.

최무현(대전 보문중 1)
최별(경기 고양시)

Q

소립자가 아닌 원소를 물질의 기본 단위로 정의하는 이유가 무엇인가요?

17