

승합니다. 이전보다도 훨씬 높은 약 1억 K까지요. 그러면 헬륨이 다시 핵 융합을 시작해 탄소(C)를 만듭니다. 그리고 1억 K의 헬륨 코어 바깥쪽에 온도가 1500만 K 정도 되는 부분에서는 다시 수소 핵융합이 시작됩니다. 이로 인해 별이 팽창하고 표면부 온도가 약 3000 K 정도가 되면서 붉은 색을 띠니다. 이러한 별을 적색거성(red giant)이라고 합니다.

별이 진화하는 동안 이 과정은 계속 반복됐습니다. 헬륨 다음으로는 탄소가 중심부에 점점 축적되고 헬륨의 핵융합이 중단되면서 중력수축에 의해 별의 중심부 온도가 상승했습니다. 중심부가 약 8억 K에 이르렀을 때 탄소의 핵융합, 즉 탄소 연소과정이 별 중심에서 일어났습니다. 이 과정에서 산소(O), 네온(Ne), 소듐(Na), 마그네슘(Mg) 등이 만들어졌습니다. 탄소 연소과정 이후에는 네온-산소-규소(Si) 순으로 연소가 일어났습니다.

그러다 안정한 철 원소가 별 중심부에 축적되면서부터는 핵융합이 더 이상 일어나지 않고 중력수축만 발생했습니다. 그 결과 별의 중심부 온도가 급격히 상승하고 이는 폭발로 이어졌습니다. 우리가 흔히 아는 초신성(supernova) 폭발입니다. 초신성 폭발은 중심부에서 생성된 원소들을 우주 공간 전체로 퍼뜨렸습니다. 그중 일부는 지구, 그리고 우리 몸에도 자리 잡았고요.

그렇다면 마지막으로 궁금해지는 한 가지가 있습니다. 원자번호 2번 헬륨과 6번 탄소 사이에 존재하는 리튬(Li), 베릴륨(Be), 붕소(B)는 어떻게 생겨났을까요? 베릴륨과 붕소 대부분은 탄소 같은 무거운 원소가 우주선(cosmic ray)이라 불리는 고에너지 입자에 의해 파쇄되면서 생성된 결과물입니다. 다 같은 우주 초기의 가벼운 원소들이지만, 생성 과정과 순서가 조금씩 다르다는 것이 재미있지 않나요?

Q

철보다 무거운 원소는
어떻게 나왔나요?

09



차상원 교수가 답하다

온도가 높고 중력이 센 별의 중심부에서 핵융합을 통해 만들어낼 수 있는 원소는 탄소(C)부터 철(Fe)까지입니다. 철 원소가 별 중심에 축적되면서부터는 핵융합이 더이상 일어나지 않죠(자세한 내용은 49쪽 8번 질문 참조). 그렇다면 과연 철보다 무거운 원소는 어떻게 만들어지는 걸까요?

핵의 양성자수를 높이는 2가지 방법

정말 단순하게 생각하면 철 원자핵에 양성자가 더해지면 됩니다. 양성자 수 또는 원자번호가 증가하면서 철보다 무거운 원소가 만들어지니까요. 하지만 양성자가 모든 정전기적 반발력을 이기고 큰 양전하를 가진 원자핵과 결합하는 일은 불가능합니다.

자연이 철보다 무거운 원소를 만들기 위해 택한 방법은 양성자 대신 중

성자를 더하는 방법이었습니다. 철 원자핵이 중성자를 포획한 후 베타붕괴를 거치게 한 거죠. 전 기적으로 중성인 중성자가 양전하를 가진 핵에 무리 없이 접근해 결합하고, 그 뒤에 음의 베타붕괴(β^-) 과정을 거치면 원자핵의 중성자 하나가 양성자로 바뀌면서 원자번호 또는 양성자수가 증가하는 참으로 영리한 방법입니다.

중성자를 더하는 방식은 두 가지로 생각할 수 있습니다. 첫째는 중성자가 원자핵에 하나씩 더해지고, 그때마다 베타붕괴가 일어나서 중성자가 양성자로 바뀌며 전자가 방출되는 과정을 반복하는 겁니다. 이 과정은 오래된 별에서 수백만 년에 걸쳐 아주 천천히 일어납니다. 때문에 ‘느린(slow)’이라는 단어의 앞글자를 따서 ‘s-과정’이라고 부릅니다.

만약 s-과정을 통해 생성된 핵이 안정하다면, 중성자를 추가로 포획해 원자번호는 같고 질량수가 다른 동위원소(isotope)를 생성할 수 있습니다. 반면 s-과정을 통해 생성된 핵이 안정하지 않고 방사성을 띤다면 다른 핵으로 바뀔 수 있습니다. 예를 들어, s-과정을 통해 생성된 원자번호 28번 니켈-64(^{64}Ni , 양성자 28개 중성자 36개)가 중성자 한 개를 포획하면 니켈-65(^{65}Ni , 양성자 28개 중성자 37개)가 되는데, 니켈-65는 방사성을 띠기 때문에 이후에 베타붕괴를 통해 안정한 구리-65(^{65}Cu , 양성자 29개 중성자 36개)로 전환됩니다.

두 번째 방법은 원자핵에 중성자 여러 개가 동시에 붙는 겁니다. 여러 개의 중성자가 동시에 붙은 핵은 방사성을 띠고 불안정해져 0.01초 내에 베타붕괴를 일으킵니다. 이때 일부 중성자들이 양성자로 바뀝니다. 이렇게 양성자수 또는 원자번호가 늘어나면 원자핵에 더 많은 중성자가 붙을

! 베타붕괴

원자핵 안에서 약한 상호작용에 의해 중성자가 양성자로 변환되거나 역으로 변환되는 핵붕괴 과정. 중성자가 양성자로 바뀌면서 전자를 방출하는 과정을 음의 베타붕괴(β^-)라고 일컫는다.

수 있고 앞의 과정이 반복됩니다. 이와 같은 두 번째 방법은 온도가 매우 높고 중성자가 풍부한 상태에서 빠르게 일어나기 때문에, ‘빠른(rapid)’의 앞글자를 따서 ‘r-과정’이라 부릅니다. r-과정에서는 원자번호 26번 철이 원자번호 92번 우라늄(U)이 되는 데 1초가 채 걸리지 않습니다.

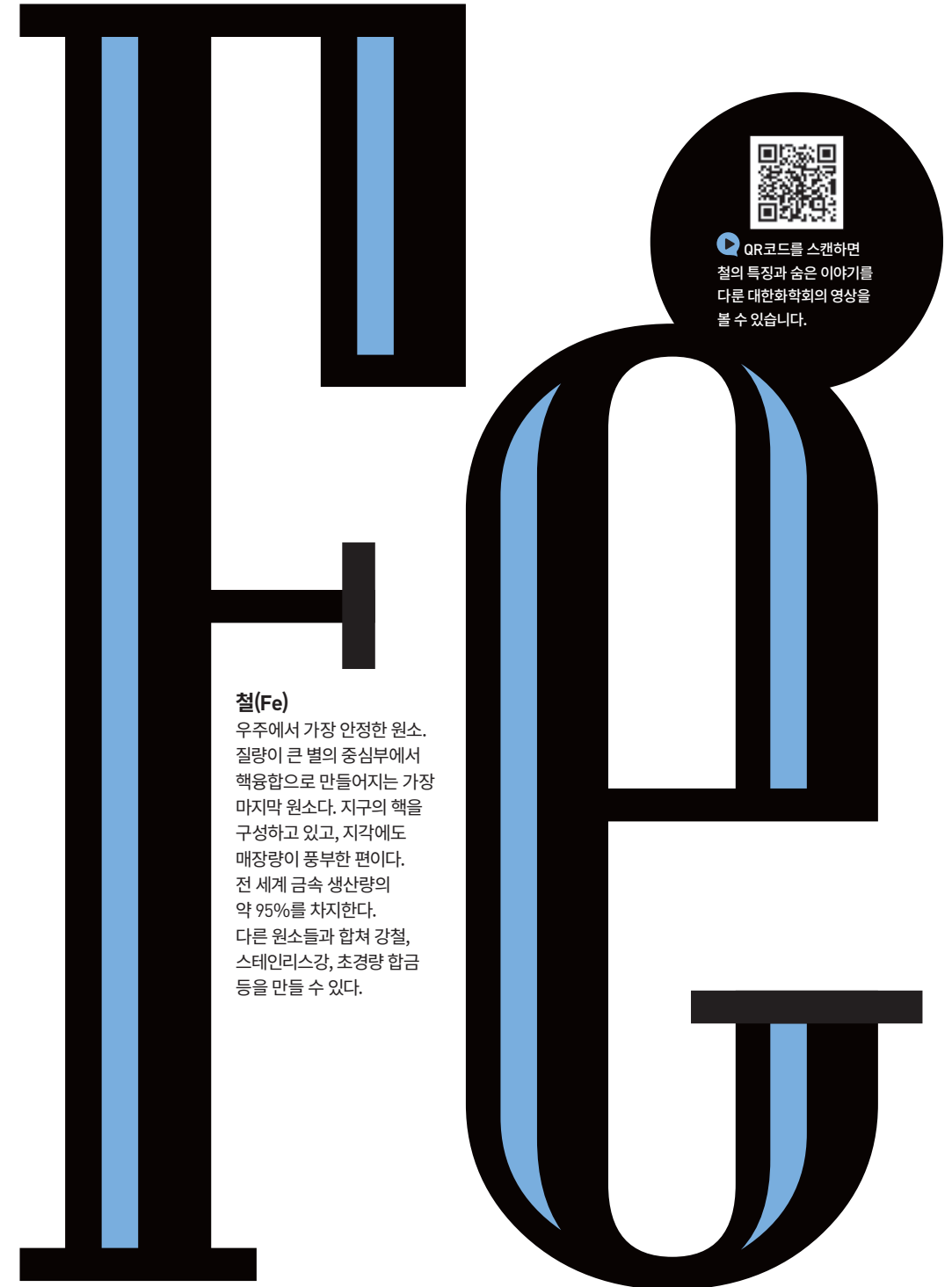
초신성 vs. 중성자별, 무거운 원소 기원 60년째 논쟁 중

우리가 태양계에서 접하는 대부분의 무거운 원소들은 r-과정을 통해 생성된 원소들입니다. 이런 r-과정이 일어나기 위해서는 굉장히 짧은 시간 내에 다량의 자유로운 중성자가 공급돼야 합니다. 에너지도 충분해야 하고요.

과학자들은 초신성(supernova)이 폭발하는 상황에서 이것이 가능할 것이라고 추측했습니다. 적색거성 또는 초거성의 중심부에 철이 축적되면 더 이상 핵융합은 일어나지 않고 순간적으로 핵붕괴가 일어납니다. 이 급격한 수축에 대한 반발력이 폭발로 나타나는 것이 바로 초신성 폭발입니다. 자유로운 중성자는 중력수축이 일어날 때 전자가 주변 원자핵에 포획되며 다량으로 확보됩니다. 관건은 초신성 폭발 중 무거운 원소가 만들어질 수 있을 만큼 충분한 중성자가 빠르게 공급될 수 있는가입니다.

여기에 대해 일부 과학자들은 중성자별 충돌이 일어날 때 발생하는 폭발인 킬로노바(kilonova) 환경에서 r-과정이 일어날 수 있다고 주장했습니다. 이때부터 철보다 무거운 원소가 초신성 폭발과 중성자별 충돌(후 폭발) 중 어느 것에서 비롯됐는지 논쟁이 시작됐죠. 논쟁은 60년째 이어져오고 있습니다.

중성자별은 초신성 폭발 후 남은 잔해의 한 형태입니다. 잔해로 남은 별 중 상대적으로 가벼운 별들이 밀도가 높고 작게 수축돼 중성자별이 됩니



다(상대적으로 무거운 별들은 계속 중력수축을 일으켜 블랙홀로 변합니다). 킬로노바는 바로 이런 중성자별 두 개가 서로의 주변을 돌다가 충돌하면서 발생하는 폭발입니다. 킬로노바는 태양계로부터 약 1억4000만 광년 떨어진 ‘NGC 4993’ 은하에서 2017년 처음으로 관측됐는데요. ‘GW170817’이라고 명명된 이 발견은 국제학술지 ‘사이언스’가 선정한 ‘2017 올해의 과학 연구 성과’ 중 1위로 뽑히기도 했습니다.

다시 본론으로 돌아와, 최근에는 이런 중성자별 충돌, 즉 킬로노바로부터 무거운 원소가 탄생했다는 가설을 지지하는 연구 결과가 속속 나오고 있습니다. 한 예로 지구 대양 바닥에 존재하는 불안정한 동위원소이자 8100만 년의 반감기를 가진 무거운 플루토늄-244(^{244}Pu)의 기원을 조사한 연구를 들 수 있습니다. doi: 10.1038/nphys3574

이스라엘 연구팀은 지각의 플루토늄-244 존재량을 통해 초신성 폭발로 무거운 원소가 얼마나 만들어졌는지를 알 수 있을 것으로 보고 존재량을 측정했습니다. 그러나 초신성 폭발로 만들어졌다고 하기에는 플루토늄-244의 존재량이 너무 적었습니다. 이는 초신성 폭발보다 훨씬 드문 이벤트인 중성자별 충돌 등에 의해 무거운 원소가 생성됐음을 시사합니다.

2019년 10월 국제학술지 ‘네이처’에는 2017년 관측한 킬로노바 자료를 분석한 결과, 중성자별 충돌 과정에서 중성자 포획을 통해 원자번호 38번 스트론튬(Sr)이 만들어졌음을 밝힌 연구도 실렸습니다. 이는 중성자별이 중성자로 이뤄졌으며 r-과정이 중성자별에서 일어날 수 있음을 확인한 결과입니다. doi: 10.1038/s41586-019-1676-3 아직 확신할 수는 없지만 무거운 원소의 탄생을 설명하는 패러다임이 조만간 크게 바뀔 수도 있음을 조심스럽게 예측해 봅니다.



원소는 앞으로
 몇 개까지 나올 수
 있나요?

10