

우주 초기의 역사 (Ⅲ)

태양의 1.4배 이상인 무거운 별들의 일생

글 | 임성빈 _ 명지대학교 교수 sbimm@mju.ac.kr

질량이 태양의 1.4배 이상인 무거운 별들의 중심부 온도는 중력압으로 인하여 1천600만°K 이상에 달하게 되며 이런 경우에는 가벼운 별의 중심부에서 일어나는 양성자-양성자반응 대신에 탄소와 질소와 산소가 촉매 역할을 하면서 수소와 융합하여 상호 변환을 거듭하다가 헬륨을 생성하는데 이를 일반적인 'CNO 순환과정'이라고 한다.

그런데 별이 무거우면 무거울수록 중력압도 커지므로 별이 중력의 작용으로 붕괴되는 것을 막고 평형을 유지하기 위해서는 자신이 가지고 있는 핵연료를 그만큼 더 빨리 연소시킬 수밖에 없다. 따라서 별 표면으로부터 더 많은 열이 빠져나가게 되므로 밝기는 하지만 그만큼 단명할 수밖에 없다. 그래서 태양과 같은 크기의 별은 수명이 100억 년 정도 되지만 태양의 2배인 경우는 약 30억 년, 5배인 경우는 약 7천만 년, 10배인 경우는 약 1천만 년, 25배인 경우에는 약 500만 년이며 50배인 경우는 채 100만 년도 되지 않는다.

주계열별로 진화할 수 있는 질량의 한계는 일반적으로 태양의 60배 정도인데 드물게는 태양의 100배 정도인 주계열별도 있다. 또 이런 별들은 중심핵에서 수소를 연료로 헬륨을 합성한다는 점에서는 주계열별로 보아야 하겠지만 크고 매우 밝아 푸른색을 띠기 때문에 이 별의 다음 단계인 청색거성과 구분하지 않고 같이 보기도 한다.

청색초거성, 적색초거성, 여러 가지 백색왜성

CNO 순환과정을 통하여 헬륨이 만들어져도 무거운 별의 경우

에는 정수평형을 유지하는 중력압과 중심부의 온도가 충분히 높기 때문에 헬륨은 축퇴를 일으키지 않고 플라즈마 상태를 유지한다. 그러다가 헬륨이 충분히 합성되고 나면 수평가지별에서와 같이 수소 핵융합층 안에서 헬륨핵들이 삼중알파반응을 통하여 탄소를 합성하게 되는데 이러한 단계에 있는 별을 청색거성이라고 한다. 그러나 청색거성에서는 헬륨이 축퇴되어 있지 않기 때문에 수평가지별에서와는 달리 헬륨 섬광은 일어나지 않는다. 청색거성 중에서도 질량이 매우 큰 것은 청색초거성이라고도 한다.

청색거성에서 헬륨 핵융합이 계속 진행되면 중심핵에는 헬륨 핵 융합으로 만들어진 비활성 탄소가 점점 더 많이 축적되고 헬륨 핵 융합은 그 주위에서 일어나며 비활성 헬륨층은 점점 더 얇어진다. 그러다가 핵융합이 차차 줄어들고 중심핵에 무거운 탄소가 증가하면서 중심핵을 유지시키고 있던 평형이 깨어지게 된다. 그래서 핵 융합이 중단될 때가 가까워지면 핵융합이 진행되는 동안에는 플라즈마 상태로 있던 원자핵과 전자가 다시 결합하게 된다. 그리고 중력압으로 인해 중력붕괴가 다시 시작되어 중심핵이 수축되면서 온도가 다시 높아져 부피가 증가하고, 부피가 증가하면 온도가 다시 떨어져서 중력압이 증가하는 열적 평형상태가 유지된다.

이런 과정에서 탄소원자는 축퇴를 일으키게 되는데 별의 중심핵이 완전히 축퇴되기 전까지는 위와 같은 열적 평형상태가 유지되나 완전히 축퇴되면 사정은 달라진다. 이제는 압력이 증가하면서 온도가 상승해도 부피가 증가하지 않기 때문에 온도가 낮아지는 것이 아니라 더 높아져서 중심핵에 쌓이게 된다. 그러다가 중심핵을 둘



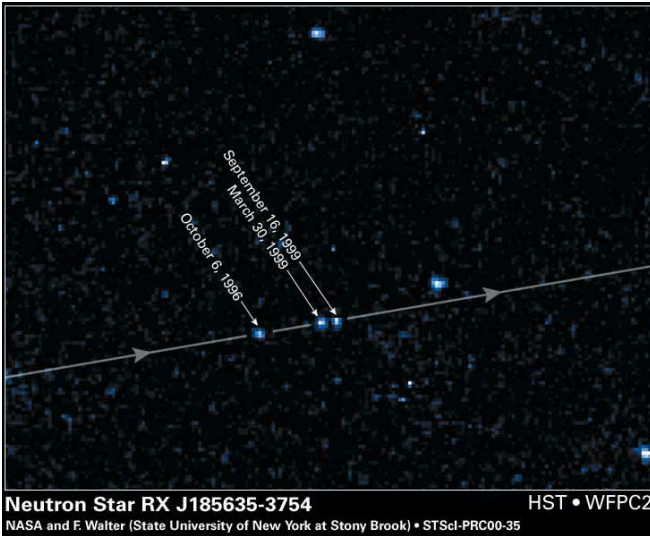
청색거성들 (빛의 환타지아 / www.stsci.edu)

러싸고 있던 비활성 헬륨층이 갑자기 수축한 중심핵의 표면으로 무너져 내리면서 압축되어 다시 핵융합을 시작하고 이 열로 인하여 바깥 부분에 있던 헬륨층이 엄청나게 팽창하여 적색거성의 경우와 같이 별의 겉껍질을 만드는데 이러한 별은 적색거성보다도 훨씬 더 크기 때문에 적색초거성이라고 한다. 그리고 겉껍질과 중심부 사이 역시 적색거성의 경우와 같이 거의 진공에 가까우며 대류로 인하여 맥동을 하게 된다.

별의 겉껍질을 만들며 다시 시작된 핵융합으로 인하여 만들어지는 탄소 핵이 중심핵에 자꾸 쌓이면 중심핵의 밀도가 높아져 축퇴된 중심핵의 가장 안쪽에서 작게나마 탄소 핵융합이 일어나게 된

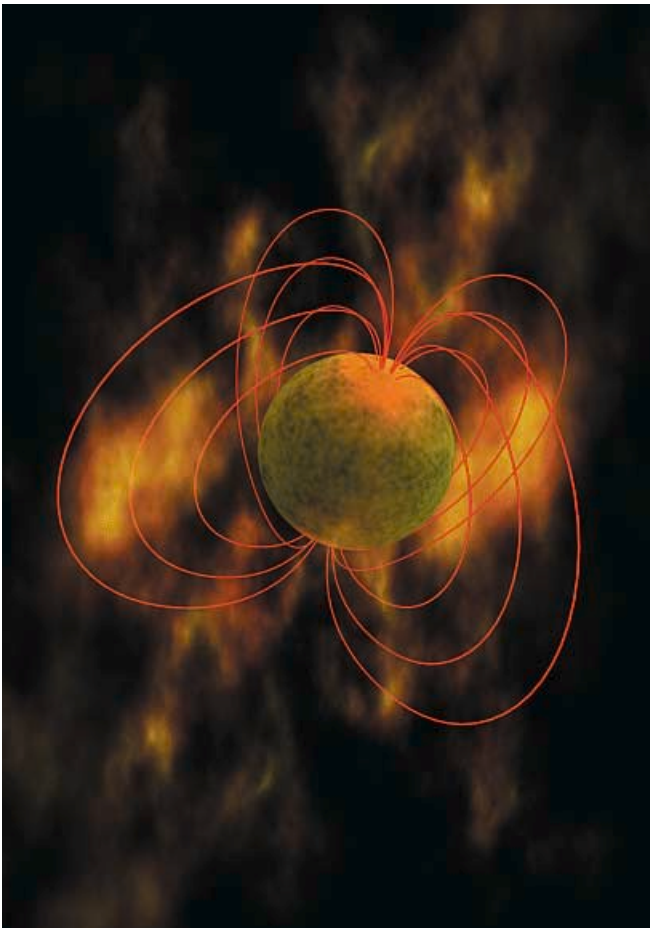
다. 축퇴된 탄소로 이루어진 중심핵은 별의 질량에 따라 탄소섬광을 일으키기도 하면서 온도가 6억 K 이상까지 올라가고 탄소핵은 헬륨핵과 융합하여 양성자와 중성자가 각각 8개씩인 산소를 합성한다. 그 다음 단계로는 탄소핵과 탄소핵이 융합하거나 산소핵과 헬륨핵이 융합하여 양성자와 중성자가 각각 10개씩인 네온을 만들고 네온핵은 다시 헬륨핵과 융합하여 양성자와 중성자가 각각 12개씩인 마그네슘으로 융합된다. 그리고 이들 원소가 중심핵에서 축퇴되며 위와 비슷한 과정을 거쳐 이번에는 탄소층이 겉껍질로 팽창하게 된다.

질량이 태양의 8배 이하인 경우에는 이 단계에서 겉껍질은 팽창



Neutron Star RX J185635-3754 HST • WFPC2
 NASA and F. Walter (State University of New York at Stony Brook) • STScI-PRC00-35

중성자별 (빛의 환타지아 / www.stsci.edu)



자기별 (빛의 환타지아 / Dr.Robert Mallozzi)

하여 행성성운이 되었다가 우주공간에 흩트러지게 되고 중심핵은 주로 산소, 네온, 마그네슘으로 이루어진 백색왜성이 된다. 그러나 별의 질량이 태양의 8~12배인 경우에는 중심핵의 온도가 15억°K 까지 이르게 되고 산소와 네온이 다시 위와 비슷한 과정의 핵융합을 일으켜 마그네슘, 황, 실리콘을 합성하며 역시 위와 비슷한 과정을 거쳐 네온과 산소가 곁곁질이 되고 중심핵은 주로 마그네슘, 황, 실리콘으로 이루어진 백색왜성이 된다.

철 생성을 끝으로 열핵융합 반응 종료

별의 질량이 태양의 12배 이상인 경우에는 중심핵의 온도가 20억°K 이상이 되고 실리콘이 다시 핵융합을 일으켜 니켈을 합성한다. 니켈은 양전자와 중성미자를 방출하며 코발트로 붕괴되고 코발트는 다시 양전자와 중성미자를 방출하며 철로 붕괴된다. 그런데 앞서의 모든 핵융합 단계에서는 질량이 줄어들면서 이들이 열에너지로 바뀌었으나 철을 합성하기 위해서는 오히려 에너지가 소모되므로 이들이 더 무거운 원소로 합성되는 것은 불가능하며, 따라서 철이 생성되는 것으로 모든 열핵융합 반응은 끝나게 된다.

이와 같이 별의 일생은 별의 질량에 따라 직접적인 영향을 받는데 질량이 태양의 개략 25배인 별은 다음과 같은 변화를 겪는다. 첫 번째 단계는 주계열별(또는 청색거성)로서 CNO순환과정에 의해 수소를 태워 헬륨을 융합하는데 중심핵의 온도는 4천만°K 정도이고 수명은 500만 년에서 1천만 년 정도이다. 두 번째 단계는 청색거성으로서 삼중알파반응에 의해 헬륨을 연료로 하여 탄소와 산소를 융합하는데 중심핵의 온도는 2억°K 정도이고 수명은 50만 년에서 100만 년 정도이다. 세 번째 단계는 적색초거성 1단계로서 탄소를 연료로 산소, 네온, 마그네슘을 생성하는데 중심핵의 온도는 6억°K 정도이고 수명은 500년에서 1천 년 정도이다. 네 번째 단계는 적색초거성 2단계로서 산소와 네온을 연료로 마그네슘, 황, 실리콘을 생성하는데 중심핵의 온도는 15억°K 정도이고 수명은 반년에서 1년 정도이다. 다섯 번째 단계는 적색초거성 3단계로서 실리콘으로 니켈을 융합하고 니켈은 코발트로, 코발트는 다시 철로 붕괴되는데 중심핵의 온도는 20억°K 이상이고 수명은 겨우 하루 정도이다.

무거운 별의 경우, 별이 주계열에서 다른 단계로 바뀌거나 또 적색초거성에서 핵융합의 단계가 바뀔 때마다 별의 밝기가 달라지며 또 뒤에 설명할 신성폭발이나 초신성폭발 때에는 별의 밝기가 급격히 변화하는데 이와 같이 별의 밝기가 달라지는 별들을 통 털

어 변광성이라고 한다. 그리고 가벼운 별의 경우와 마찬가지로 적색초거성은 맥동변광성이 된다.

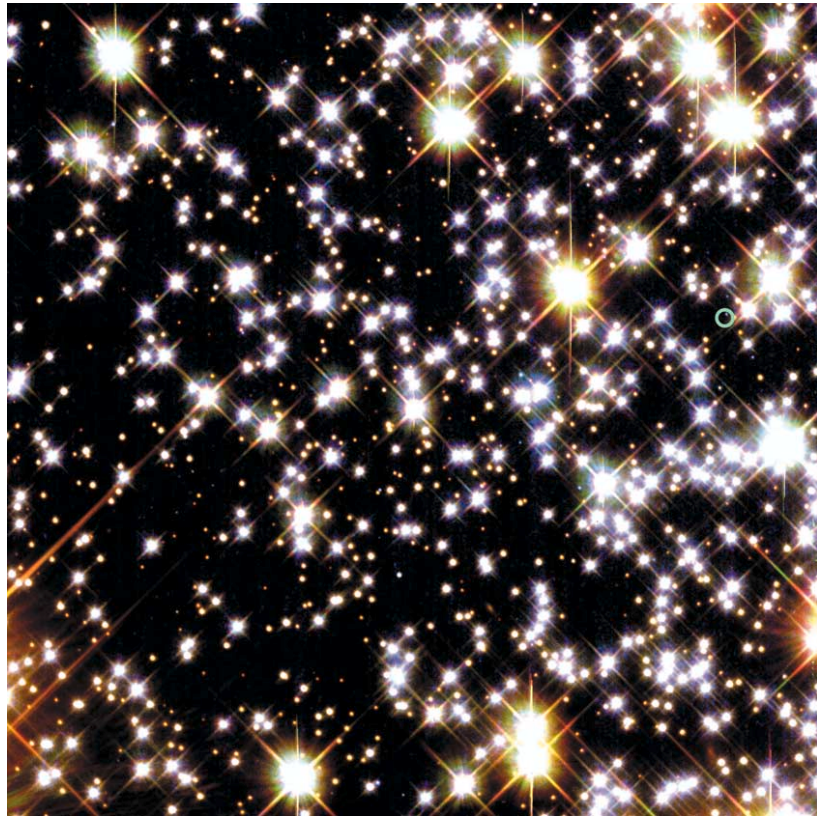
중성자포획 - 무거운 원소들의 합성

별의 중심핵에서 핵융합으로 만들어지는 원소는 철과 그보다 가벼운 원소까지이다. 그리고 철보다 양성자와 중성자가 더 많은, 더 무거운 모든 원소들은 초신성폭발 때 이미 만들어졌던 원소들이 중성자들을 포획하고 포획된 중성자들 중 일부가 β 붕괴를 통하여 양성자와 전자가 뒹으로써 만들어진다. 중성자의 밀도가 낮을 때에는 하나의 중성자가 포획된 후 두 번째 중성자가 포획되기 전에 양성자와 전자로 붕괴되어 양성자가 하나 더 많은, 즉 원자번호가 하나 더 높은 원소가 되는데 이것을 '느린 과정'이라고 하며 이렇게 새로운 원소가 만들어질 경우 원자번호가 83인 비스무트까지의 원소는 안정적이지만 그보다 더 무거운 원소는 불안정한 상태가 된다. 한편 중성자의 밀도가 높으면 포획된 중성자들이 붕괴되기 전에 계속 다른 중성자들을 포획하다가 가장 불안정한 동위원소가 만들어지면 이 때 β 붕괴로 양성자 하나가 만들어지면서 다음 단계의 원소가 되는데 이를 '빠른 과정'이라고 한다.

우주공간에 존재하는 철보다 무거운 모든 원소들, 예를 들어 철보다 약간 더 무거운 구리, 아연, 게르마늄 등을 비롯하여 폴리브렌, 은, 카드뮴, 주석, 텅스텐, 백금, 금, 수은, 납 등은 물론 아주 무거운 우라늄, 플루토늄 등에 이르기까지 모두 이러한 과정을 거쳐서 만들어지게 된다. 따라서 초신성폭발은 무거운 원소들을 우주공간에 쏟아내는 역할뿐만 아니라 무거운 원소들을 만들어내는 데에도 결정적인 역할을 하는 것이다. 그러나 금이나 수은과 같은 일부 중금속의 경우에는 이러한 과정만으로 지금 존재하고 있는 양이 모두 만들어질 수는 없었을 것이며, 태양계의 생성에는 아마도 중성자별들의 충돌이 크게 기여했을 것으로 보인다.

중성자별, 자기별, 맥동성

II형 초신성폭발을 일으키고 남은 내핵은 대부분이 중성자로 되어 있고 나머지는 가장 안정적인 원소인 철이어서 중력압과 중성자



맥동성(필서) (빛의 환타지아 / www.stsci.edu)

간의 반발력이 평형을 이룰 때까지 수축한 후에는 더 이상 붕괴를 일으키지 않는데 이러한 별을 중성자별이라고 한다. 중성자별은 크기는 직경이 10~20km 정도로서 매우 작지만 밀도가 1cm³당 약 수십억 톤 정도로 엄청나게 높아 질량이 매우 크며 이에 따라 중력도 매우 크다. 중성자별 중에는 지구 자기장의 10억 배에 달하는 엄청나게 강한 자성을 가진 별도 있고 또 비교적 약한 자성을 가진 별도 있는데 이와 같이 자성을 가진 중성자별을 자기별이라고 한다. 또 중성자별의 자전속도는 매우 빨라서 대개 1초에 한번 정도 자전을 하며 가장 빠른 것은 1초에 600회, 가장 느린 것은 4초에 한 번 정도 자전을 하는데 이 때 발생하는 전기장으로 인하여 주기적으로 라디오파, 가시광선, x선, γ 선 등을 발산하므로 이런 별들을 맥동성이라고 한다. 이 외에 자성이 전혀 없는 중성자별도 있다. ㉓



글쓴이는 서울대학교 토목공학과 졸업 후 동대학원에서 석사·박사학위를 받았다. 한국교통문제연구원 원장, 명지대학교 공과대학장·교통관광대학원장·문화예술대학원장 등을 지냈으며, 현재 서울특별시 무술협회 회장, 한국바둑학회장을 겸임하고 있다.