

# 별의 일생

Minjae Kim (김민재)

ITAP, Kiel Univ., Germany (이론물리 및 천체물리학 연구소, 킬 대학교, 독일)

LSW, Heidelberg Univ., Germany (주립 천문대, 하이델베르크 대학교, 독일)



별이 탄생하고 있는 수많은 우주 공간들

Credit: Hubble Heritage Team, ESA, NASA

## 오리온과 전갈

겨울철 북쪽 하늘엔 포세이돈의 아들이자 그리스 신화 최고 사냥꾼 오리온 자리가 나타납니다. 오리온은 사냥 실력이 더 없이 출중했지만, 상당히 거만했습니다. 자신의 사냥 실력을 자만한 나머지 무심코 “모든 짐승을 모조리 싸 죽여보겠다!” 라고 내뱉었을 때, 하필 대지의 여신인 가이아가 듣고 말았습니다. 크게 노한 가이아는 전갈을 보냈고, 이 전갈의 독침에 오리온은 사망했습니다. 오리온의 사후, 오리온이 사랑했던 제우스의 딸 아르테미스의 오빠인 아폴론은 오리온과 전갈<sup>1</sup> 모두를 하늘에 올려 별자리로 만들었는데, 아르테미스의 부탁으로 오리온은 겨울 하늘 높은

<sup>1</sup> 전갈도 그 공을 인정 받아서 별자리가 되었다고 합니다.

“ 오리온 자리는 전갈 자리가 나타나기 전 사라집니다. ”

그림1. 오리온자리와 전갈자리  
왼쪽은 겨울 하늘 별자리이고,  
오른쪽은 여름 하늘 별자리입니다.

출처 : Stellarium



곳에 가장 밝게 놓였습니다. 전갈은 항상 오리온을 노리고 있고, 전갈이 난폭해질 경우에 대비해 옆엔 궁수 (궁수자리) 놓았습니다. 전설에 걸맞게 두 별자리는 같은 계절 하늘에 나오질 않습니다. 전갈이 오리온을 쫓고 있어서 인지, 오리온 자리(겨울철 별자리)는 전갈 자리(여름철 별자리)가 나타나기 전 사라지게 됩니다.

여러분들이 가장 좋아하는 별은 무엇인가요? 사냥꾼 오리온자리에서 가장 밝게 빛나는 베텔게우스<sup>2</sup>를 좋아하시나요? 북쪽 하늘에서 가장 유명한 북두칠성들을 좋아하시나요? 또한 여러분의 별자리를 구성하는 별들 중 가장 밝게 빛나는 별은 무엇인가요? 하늘에 떠있는 수많은 별들은 우리가 함께 살고 있는 바로 이 우주 공간에서 태어납니다. 이 우주 공간에서 그들만의 일생을 보내다가 그들이 가진 에너지를 모두 소모한 후에 최후를 맞이합니다. 어떠한 별들은 베텔게우스처럼 엄청나게 밝습니다. 하지만 어떤 별들은 육안으로는 커녕 엄청난 기술력의 거대 망원경으로도 확인이 되지 않습니다. 베텔게우스처럼 엄청나게 밝은 별들은 엄청나게 많은 에너지 소비량 탓에 아쉽게도 수명이 짧습니다. 또한 눈에 보이지 않을 정도로 어두운 적색 왜성같은 별들은 오래도록 약하게 빛을 내는 적은 에너지 소비량과 맞물려 수명이 매우 깁니다. 이 수많은 별들에게는 한가지 공통점이 있습니다. 어떠한 별들도 예외가 없이, 모든 별들은 물리학 법칙을 따른다는 점입니다. 우주 공간은 별이 태어날 때부터, 심지어 장렬히 전사한 후에도 물리학 법칙을 따르는 따르는 공간입니다.

별이 쓸 수 있는 에너지는 별이 태어날때의 초기 질량에 따라서 운명이 이미 정해져 있기에, 모든 별의 마지막이 블랙홀은 아닙니다. 초기 질량이 매우 큰 항성 만이 블랙홀이 될 수 있는데 이 강력한 블랙홀 마저도 정해진 에너지를 다 쓰게 되면 초라한 뒷모습 만을 남긴 채 마지막 발악을 하게 되고 결국 어둠속으로 자취를 감추게 됩니다.<sup>3</sup> 인간이 태어나서 성장하고 결국 죽는 것처럼 별 또한 탄생하고 결국 소멸합니다. 인간이 탄생하면 그 인간을 중심으로 가족과 주변 사회가 더 복잡해지는것 처럼, 별의 탄생과 더불어 우주에는 이전에 나타나지 않았던 변화들이 발생했고, 이러한 변화들이 모여서 지금의 우주를 만들었습니다.

<sup>2</sup> 오리온자리의 알파성입니다. 알파성은 별자리에서 가장 밝은 별을 나타내지만 실제로 오리온자리에서 가장 밝은 별은 오리온자리의 허벅지부분에 위치해 있는 리겔이라는 중성자별입니다. 사실 베텔게우스는 밝기가 변하는 변광성이기 때문에 리겔보다 밝아질 때도 있기에 가장 밝다고 잘못 알려져 있었습니다.

<sup>3</sup> 블랙홀은 호킹 복사에 의해 천천히 증발하며 질량이 줄어듭니다. 그와 동시에 블랙홀은 밝아지기 시작하며, 마지막엔 증발이 심해져서 창백하게 빛이 나게 됩니다. 이때 블랙홀은 높은 에너지의 감마선을 방출하게 됩니다(Gamma-ray burst). 격렬한 감마선 방출 후에 증발하고는 소멸이 될 것입니다.

별의 탄생은 138억 년의 우주와 생명에서 가장 빈번하고 중요한 일중 하나입니다. 이러한 면에서 별의 일생은 인간의 인생과 많이 닮아 있습니다. 인간이 자기 의지를 가지고 생활 하는 반면, 별은 “물리학”을 따르는 생활을 하게 됩니다.

그렇다면 도대체 어떤 별이 블랙홀이 될 수 있는걸까요? 또한 초기 질량이 작은 별들은 어떤 마지막을 맞이하게 될까요? 여러분들이 좋아하는 별들의 최후는 어떻게 될까요? 여러분의 별자리에서 가장 밝게 빛나는 별들의 미래가 궁금하지 않으신가요? 은하 안의 모든 곳에서 별들이 태어나고 진화하며 죽어가고 있습니다. 물리학자, 천문학자들은 가능한 모든 다양한 진화 단계의 별들을 연구함으로써 별이 영겁의 시간에 걸쳐 어떻게 변하는지 알게 되었습니다. 물리학은 이 모든 질문에 대답을 해 줍니다.

## 별의 탄생

항성은 수소 및 헬륨 그리고 기타 중원소로 이루어진 거대한 성간 분자 구름(성운)이 붕괴하면서 탄생합니다. 성운은 성간물질이 밀집해 있는 기체와 먼지들의 모임입니다. 우리 눈에는 거대한 구름처럼 보여서 성운이라는 이름을 지녔습니다. 거대 분자 구름은 일반적인 우주 물질 밀도의 수백만 배에 달하는 상당히 밀한 밀도 가지고 있습니다. 별의 마지막이 별의 초기 질량에 따라서 달라지듯이, 별의 탄생을 위해서 가장 중요한 개념 역시 질량입니다. 물리학적으로 진스 질량(Jeans mass)이라는 개념이 있습니다. 가스 구름 내에서 발생하는 중력 붕괴 과정을 연구한 영국 물리학자 제임스 진스 경(그림 2)의 이름을 따서 만든 개념인데, 적절한 상황에서 그 구름이 (또는 구름의 일부분이) 불안정해지고 중력과 균형을 유지하기 위한 가스 압력이 불충분해져서 붕괴할 수 있다는 것을 점진적으로 계산한 질량값입니다. 가스 구름이 어떤 임계 질량을 초과하면 다른 힘이 붕괴를 저지시킬 때까지 폭주해서 수축하는 과정을 시작하게 되는데, 진스는 이 임계 질량을 계산하여 밀도와 온도에 대한 함수식으로 나타냈습니다. 구름의 질량이 클수록(밀도가 클수록), 크기가 작을수록, 온도가 낮을수록 중력 붕괴가 일어나기 쉬워집니다. 거대 분자 구름이 서로 충돌하거나 은하계의 팔 부분을 지나가면서 주변 중력원의 교란을 받게 되면 구름 내부에서 중력 붕괴가 일어나고 분자구름이 수축(contract-ion)하게 됩니다. 수축 과정에서 구름은 작은 부분들로 나뉘어지고(fragmentation), 각 부분 안에서 분자들은 중력이 강한 쪽으로 낙하하면서 발생하는 위치 에너지를 열의 형태로 발산하게 됩니다. 구름이 점점 작아지면서 중력은 점점 강해지고, 구름 안의 분자들은 중력이 가장 강한 부분을 중심으로 회전하는 가스 원반을 이루게 됩니다. 바로 항성이 막 탄생하는 순간입니다. 강착 원반은 점차 소용돌이치며 중력 중심을 향해 낙하하고, 중력 중심의 극지방에서는 양 방향으로 가늘고 긴 제트를 방출합니다. 이 형태를 바로 우리는 원시별(protostar), 혹은 아기 별이라고 부릅니다. 보통 아기 별들은 분자구름 속에 깊숙이 감추어져 있는 관계로 가시광선 영역으로는 관측이 어렵습니다.

중력 중심에는 분자들이 낙하하면서 위치에너지가 열의 형태로 축적되고 질량이 커지면 또 다시 중력이 강해지며, 중력이 강해진 만큼 분자들을 더욱 끌어들이는 현상이 발생하여 점차 온도가 올라갑니다. 이후



그림 2. 영국의 천문학자 제임스 진스 경

출처: Getty Images





그림 3. 오리온자리 성운의 모습

성운은 우주공간에 분포한 성간 물질이 어떠한 요인으로 인해서 비교적 좁은 지역에 밀집해 있는 것을 말합니다. 뒤쪽에 오리온 자리 별들이 보이시나요?

출처 : NASA

주변의 분자 구름이 흩어지고 강착 원반이 사라지는 전주계열성(pre-main-sequence star) 단계를 거칩니다. 전주계열성은 서서히 수축하면서 중력 에너지를 발산하며, 중심핵부분은 점점 압축되어 온도가 점차 올라가게 됩니다. 이 온도가 수소 핵융합이 가능한 온도까지 올라가면 중심핵에서는 더이상 위치 에너지가 아닌 핵융합 에너지를 생산하게 됩니다. 핵융합으로 발생하는 에너지는 복사압을 형성하여 중심핵으로 낙하하려는 분자의 움직임을 막아 중력붕괴에 저항하게 됩니다.<sup>4</sup> 복사압과 중력이 평형을 이루면서 원시별은 더 이상 수축하지 않고 중심핵에서 생산되는 핵융합 에너지를 전자기파(빛: photon)의 형태로 우주 공간에 방출하기 시작합니다. 새로 태어난 별이 주계열성 (main-sequence star) 단계로 진입한 것입니다.

## 별의 일생

물리학자, 천문학자들마다 계산의 차이와 분석의 차이는 약간 있지만 별은 대략 ‘태어날때의 초기 질량’에 따라서 5가지 정도의 다른 미래가 펼쳐 집니다.

한가지 중요한 예외사항이 있습니다. 만일 중력 중심의 질량이 매우 크다면 당연히 핵융합 반응이 폭발적으로 일어나게 됩니다. 따라서 새로 탄생한 별은 유체 정역학적 평형을 이룰 수가 없습니다. 이 가없는 아기별은 자신이 버틸 수 있는 한계까지만을 남겨두고 나머지 모든 질량을 자신의 항성풍으로 다시 우주 공간으로 흩뿌려 버립니다. 이처럼 ‘박살나지 않고 항성을 이룰 수 있는 한계’를 우리는 에딩턴 한계라고 부릅니다. 에딩턴 한계는 ‘에딩턴 광도’라는 용어로 사용되곤 합니다. 따라서 이 에딩턴 광도는 중력과 복사압이 균형을 이루고 있을때의 최대 광도를 설명하는 용어입니다. 천문학에 지대한 공을 세운 우아한 영국의 천문학자 에딩턴 경의 공로를 표하여 만든 용어입니다. 물론 에딩턴 한계의 (고전적인) 계산도 에딩턴 경이 했습니다. 현재 에딩턴 한계(에딩턴 광도)란 용어는 블랙홀을 설명할때 자주 사용 되곤 합니다.

우주에서 일어나는 변화는 사람의 인생과 상당히 닮아 있습니다. 사람이 엄마 뱃 속에서 태어난 후, 한 평생을 살고 흙으로 돌아가듯이, 별도 성간 물질에서 태어난 후, 한 평생을 살고 성운으로 되돌아 갑니다. 항성은 크게 주계열성, 거성, 밀집성 등으로 나뉩니다. 주계열성 별(그림 4에서 중간부분, Main-sequence star) 항성 전체 일생의 대부분(약 90%)을 차지하는 별의 진화 단계입니다. 약 90% 이상 우주에 있는 대

<sup>4</sup> 이를 우리는 정역학적 평형이라고 부릅니다.

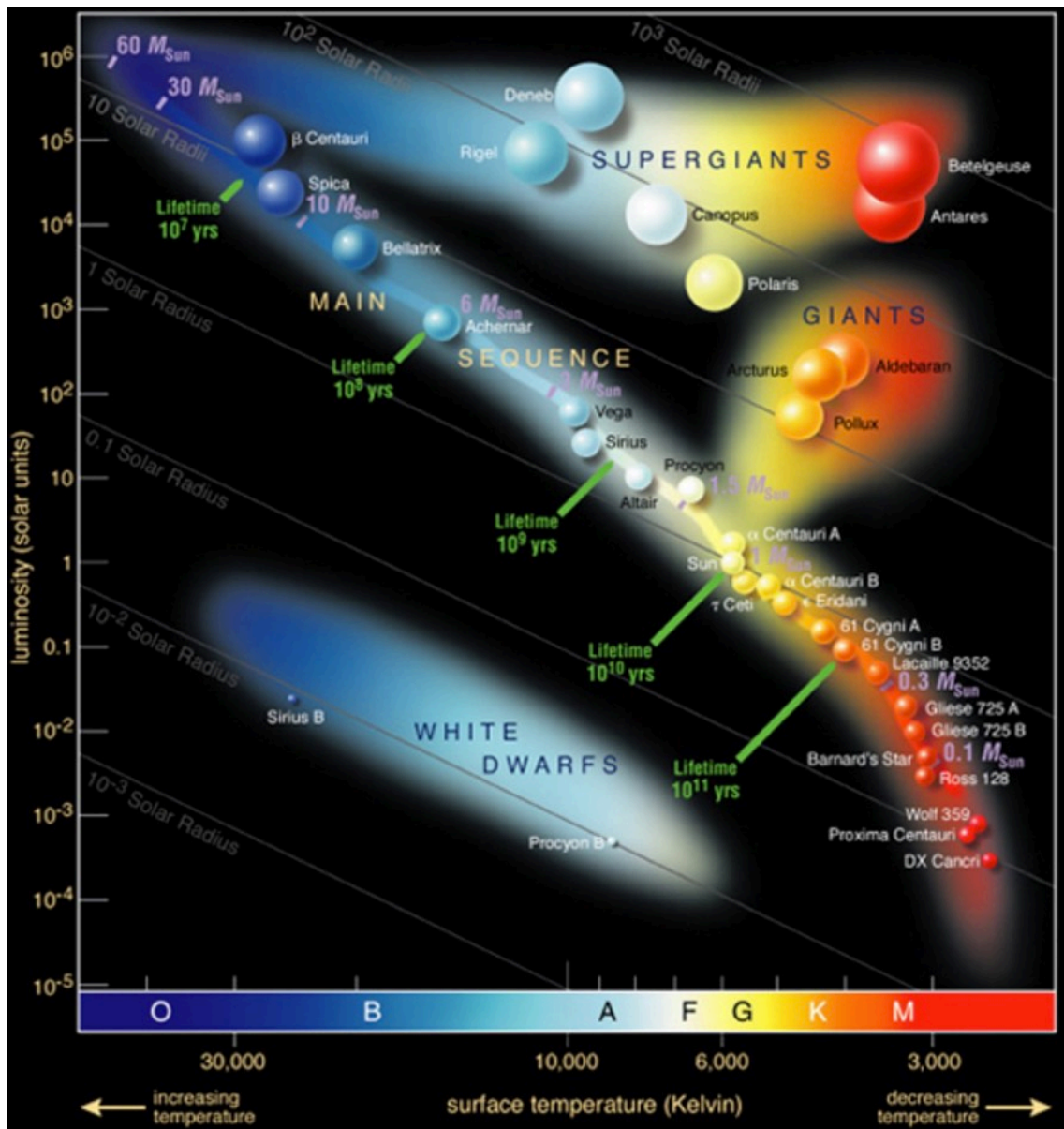


그림 4. Hertzsprung-Russell diagram

Hertzsprung-Russell 다이어그램의 각 좌표는 관측으로 얻을 수 있습니다. 또한 컴퓨터 모형으로부터 계산해 낼 수도 있습니다. Hertzsprung-Russell 다이어그램은 별의 종류를 정의하는 데 사용되기도 하고, 항성진화의 이론적 예측하기도 합니다. 별들은 도표 전체에 고르게 퍼져 있지 않으며 일정한 모양을 그리면서 "무리를 짓고 있음"을 확인할 수 있습니다.

출처 : <https://www.eso.org>

부분의 별도 주계열성의 별입니다. (거의) 모든 별은 주계열성 단계를 거칩니다. 별의 중심 온도가 천만K 정도가 되면, 수소 핵 융합 반응이 가능한데, 주계열성은 간단히 말해서 이 수소 핵융합을 하는 별입니다. 따라서 별 중심에서는 많은 양의 수소가 헬륨으로 변하게 됩니다. 수소 핵융합으로 생성된 헬륨은 별의 중심핵에 쌓이며, 이로 인하여 중심부의 중력이 더 강해지고 온도도 올라가게 됩니다. 헬륨 중심핵 주변에서 일어나는 남아있는 수소 핵융합도 점점 활발해지기 때문에, 주계열성은 조금씩 부풀어 오르며 진화를 하게 됩니다. 또한 서서히 밝아지게 됩니다. 우리의 태양도 주계열성 별입니다. 우리 태양도 주계열성의 마지막 단계에서는 현재보다 2배 이상 밝아질 것으로 예상되고 있습니다. 이들은 전주계열성에서부터 유지하고

있는 정역학적 평형안에서 진화를 하기에 크기뿐 아니라 모든면에서 상당히 안정적입니다.

중심에 남아 있던 수소가 모두 소진 되면, 별의 주계열성 단계가 끝나고 드디어 거성단계로 들어가게 됩니다. 거성(그림 4에서 오른쪽과 윗부분, Giant star)은 주계열성과 표면 온도가 비슷하면서 반지름과 밝기가 더 큰 항성들입니다. 거성은 보통 우리 태양 보다 10배 이상 큼니다. 이보다 더 밝으면 초거성(Supergiant)이나 극대거성(Hyper-giant)이라고 칭합니다. 거성에는 적색 거성, 청색거성 등이 있습니다.

적색 거성의 중심온도(약 1억K)는 더 올라가게 되어, 헬륨 이상의 원소들이 핵융합을 하며 탄소를 생성해내는 별입니다. 헬륨이 모두 소모가 되면, 중심핵 부분이 수축하고 온도가 더 상승하여 탄소 핵융합을 이루게 됩니다. 이러한 과정의 연속으로 결국 산소까지 생성해낼 수 있게 됩니다. 핵융합으로 생성된 무거운 원소들은 항성의 중심 쪽으로 가라앉게 됩니다. 이리하여 별의 중심핵에는 무거운 원소가 점점 쌓이게 되고 중심핵 주변에서 이루어지는 핵융합 반응도 점점 더 활발해집니다. 중력의 커짐은 중력을 지탱해주는 복사압도 커짐을 뜻합니다. 이로 인해 복사압이 강해져서 별은 적색 거성일 때보다 한층 더 부풀어오르게 되고, 주변 겉질은 더 팽창하여 밝아지지만 표면온도는 낮아지게 됩니다. 같은 상태에서 부피가 커진다고 가정해보면 온도는 내려가는걸 생각해보면 됩니다. 반면 초거성의 경우는 중심 온도가 더 높으며 철까지 생성 가능해집니다. 수축 -> 온도 상승 -> 핵 융합 반응의 기본적인 과정의 반복은 적색 거성과 같습니다. 초거성 단계에서는 큰 중력을 버텨주는 복사압이 엄청나기 때문에 결국 항성 표면의 외피층이 별의 중력을 이기고 우주 공간으로 탈출하게 됩니다. 모든 항성은 표면의 질량을 항성풍으로 날려보내지만 적색 초거성은 이 비율이 매우 높아서 항성풍의 밀도가 높습니다. 웬만큼 자신의 질량을 날려보내면 별의 내부가 드러나게 되는데 표면의 온도는 뜨거운 핵융합층과 가까기에 10000 - 50000K 정도로 올라갑니다. Wien의 법칙에 따라서 위의 온도의 색깔은 푸른색으로 보입니다. 따라서 별은 다시 푸른색으로 빛나게 되는데 이 단계가 청색 초거성입니다. 청색 초거성까지 진화하려면 외피층을 날려보내고도 타오를만큼 별이 매우 무거워야 합니다. 오리온자리에서 가장 밝은 리겔도 청색초거성입니다.

밀집성은 별 내부 물질의 밀도가 보통의 별보다 압도적으로 큰 별들로, 백색 왜성, 초신성, 중성자별, 블랙홀, 그리고 여러 이론상의 천체들이 있습니다. 이들은 보통 항성 진화의 마지막 단계들입니다. 핵융합으로 발생하는 에너지가 중력에 대항하여 항성을 구성하는 물질들을 밖으로 밀어내기 때문에(복사압), 항성은 막대한 질량을 가지고도 스스로 붕괴하지 않습니다. 따라서 항성의 크기를 유지하는 에너지는 항성 내부의 핵융합에서 나온다고 할 수 있습니다. 하지만 항성의 연료가 전부 소모 된다면, 항성은 더 이상 핵융합을 일으킬 수 없게 되고, 중력의 영향을 받아서 항성의 중심핵은 급격히 수축하게 됩니다. 더 이상 핵융합으로 에너지를 얻을 수 없게 되기 때문에, 항성의 핵은 계속해서 수축하다가 첫 번째 장벽을 만나게 됩니다. 항성의 붕괴를 막는 첫 번째 장벽은 바로 '전자 축퇴압'입니다. 파울리의 배타원리에 따르면, 두 개 이상의 전자들은 같은 양자 상태에 있을 수 없습니다. 즉 강한 중력에 의해 원자가 압력을 받더라도 원자 내부의 전자 구름에 있는 전자들이 동시에 같은 양자 상태를 가질 수 없으므로 각자 서로 다른 양자 상태를 가지면서 '겹쳐지지 않는다는' 말입니다. 이 때문에 한정된 공간에 전자를 몰아 넣으려면 에너지가 필요한데, 이 공간을 줄이려면 필요한 에너지가 증가하게 됩니다. 전자를 뺄뻣하게 쌓는다고 생각하면 됩니다. 다만 이에 저항하는 방향으로 힘이 작용하게 되며 이를 축퇴압이라고 부릅니다. 붕괴하는 천체가 그렇게 많이 무겁지 않다면, 붕괴 도중 전자 축퇴압과 중력이 균형을 이뤄 서서히 식어가게 되고 백색 왜성이 이와 같은 상태입니다. 백색 왜성은 질량이 작은 별들이 적색거성으로 진화 했을시에, 적색 거성이 더 팽창해서 주변 물질들이 모두 날아가 버릴시에 진화하는 천체입니다. 적색 거성의 중심핵은 더 수축 되었고 상당히 고밀도 이기에 지구정도의 크기에 태양정도의 질량을 자랑합니다. 초신성은 초기 질량이 태양보다 10배 이상 큰 별들

이 초거성(적색, 청색)을 거친 후, 더이상 핵이 수축하지 못해서 급격히 팽창, 폭발하는 천체를 말합니다. 이때에 많은 물질들이 우주로 방출되게 되는데, 철보다 무거운 원소들은 이때에 방출됩니다. 초신성은 밝기가 항상 일정하기에 아주 정확한 우주의 거리를 재는 척도(standard candles)로 사용될 수 있습니다. 우주의 팽창 정도는 허블 상수로 나타낼 수 있는데, 이 허블상수는 거리와 관계가 있습니다. 따라서 초신성은 우주의 팽창에도 아주 중요한 단서를 주기에, 우주의 신비를 풀 수 있는 단서가 될 수 있습니다.

항성의 핵은 계속해서 수축하다가 두번째 장벽을 만나게 되는데, 전자 축퇴압보다 중력이 강할 정도로 천체의 질량이 크다면, 천체는 계속해서 수축하게 됩니다. 태양 질량의 1.44배가 그 한계점이며, 이 한계점을 '찬드라세카 한계'라고 합니다. 항성 질량이 이 한계점을 넘으면 파울리의 배타원리는 강력한 중력에 의해 의미가 없어지는데, 고밀도, 고압력 상태에서 양성자들은 전자를 포획하며 중성자로 변하기 때문입니다. 따라서 항성의 핵은 다음으로 '중성자 축퇴압'이라는 세번째 장벽을 만나게 됩니다. 그리고 중성자와 중성자 사이의 축퇴압이 천체의 붕괴를 멈추게 합니다. 중력이 중성자 축퇴압과 강력을 이길 정도로 강하지 않다면, 천체는 그 상태에서 안정되면서 중성자가 주요 구성 물질인 중성자 별이 됩니다. 중성자별은 초기 질량이 태양보다 10 - 20 배정도 되는 큰 별들이 초신성 폭발 단계 후 남은 별의 핵이 중력붕괴를 통해 축퇴(degenerate) 되는 별을 말합니다. 원자 내부의 핵과 전자가 합쳐졌기에 모두 중성자로 변한 고밀도의 천체인데, 지름이 고작 10 - 30km 정도이며 질량은 태양의 2배 정도 됩니다. 따라서 중성자별의 밀도는 가히 천문학적으로 높습니다. 중성자별은 축퇴 되어 있기에, 질량이 높아질수록 그 무게를 견디지 못하고 점점 작아지며 어느 값의 이상이 되면 붕괴해서 블랙홀이 되어버리기도 합니다. 축퇴 되어있는 상태이므로, 중성자들이 붙어 있습니다. 중성자별의 탈출 속도는 초속 15만 km로서, 블랙홀과는 달리 아직 빛이 나올 수 있다고 예상됩니다.

만약 천체의 질량이 너무 무겁다면, 즉 중력(4가지 기본 힘 중에서 가장 약한 힘)이 강한 상호작용력(4가지 기본 힘 중에서 가장 강한 힘)을 이겨내게 됩니다. 즉 중력 붕괴를 막아낼 힘이 아무것도 남지 않게 되기에 이러한 상태가 되면 천체의 모든 질량은 하나의 특이점으로 수렴하게 되며, 이 상태를 우리는 바로 블랙홀이라고 부릅니다. 블랙홀은 초기질량이 태양의 30배 이상인 경우에, 별이 초신성 (혹은 극초신성)으로 진화 한 후 껍데기를 날려버리고 남은 핵이 중력을 이기지 못해서 끝까지 수축(중력 붕괴)된 밀도가 가장 높은 별입니다. 강한 중력으로 인해 탈출속도가 광속을 넘습니다. 따라서, 어떤 물체도 탈출할 수 없습니다. 이는 별의 마지막 잔해이고 이 잔해들이 뭉쳐질 수 있는 한계까지 뭉쳐있는 무시무시한 별입니다.

이처럼, 별에서 가장 중요한 변수는 질량입니다. 질량이 크다면 오래 살 수 있을것이라고 생각할 수 있지만, 사실은 정반대입니다. 질량이 클수록 안타깝게도 별은 빠르게 죽습니다. 항성의 연료량은 질량에 비례하지만 광도, 즉 단위시간당 연료를 소모해 에너지를 내는 양은 대략 질량의 3 제곱 정도입니다. 태양 질량의 0.2 ~ 0.5배 정도 밖에 안되는 적색 왜성의 경우 기대수명이 1조 년까지 갈 수 있습니다. 이는 우주의 나이보다도 길기에, 이론적으로 적색 왜성의 다음 진화단계로 알려진 청색 왜성은 아직 발견되지 않았습다.<sup>5</sup> 현재 우주의 나이는 138억 년이고 별이 생성된 시점은 134억 년 전입니다. 적색 왜성이 생성되기 시작한 시점이 대략 132억 년 전이라고 감안할시에, 현재까지 생성된 우주의 적색 왜성 중 수명을 다한 별은 아직 존재하지 않습니다.

별이 태어났을때의 초기질량은 항성이 될 수 있는 최소 질량을 정해줍니다. 이는 현재 태양 질량의 7% 정도로, 이보다 작은 초기질량의 경우에는 별은 주계열성이 되지 못하고, 수소 핵융합을 못하는 갈색 왜성이

<sup>5</sup> 이론적으로라면 발견 되지 않는게 정상입니다.





됩니다. 수명뿐만 아니라 별의 진화 과정도 질량에 따라 천차만별로 달라집니다. 질량이 클수록 합성할 수 있는 원소의 범위가 늘어나기 때문에 좀 더 복잡한 내부 구조를 지니게 되며, 에너지 생성률이 온도에 민감해지기 때문에 그만큼 불안정 해집니다. 질량이 아주 큰 별의 진행단계가 초신성 폭발로 가는 이유입니다. 질량이 작은 별은 주로 백색 왜성의 모습으로 마지막 생을 보내게 되는데 이는 초신성이나 블랙홀 보다는 훨씬 안정적인 별입니다.

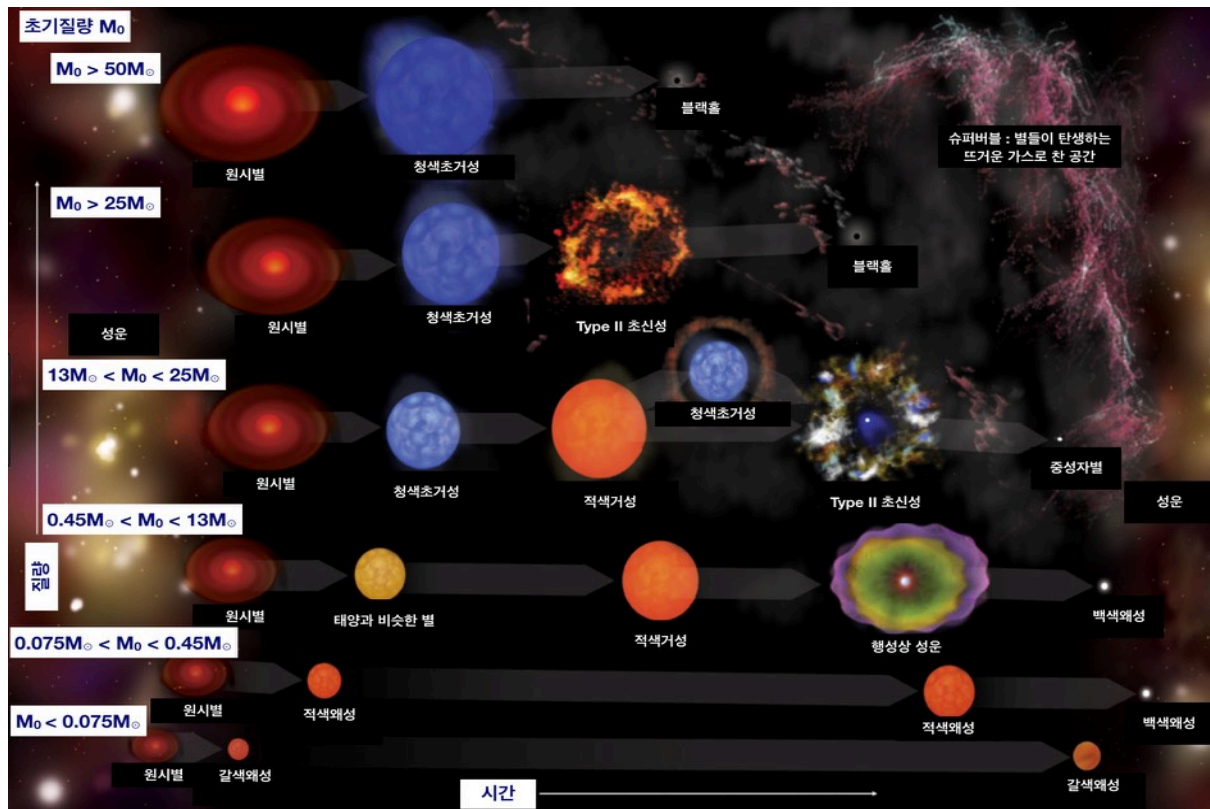


그림 5. 별의 일생

모든 별은 성운에서 태어나서 성운으로 다시 돌아갑니다. 원시별의 초기질량에 따라서 별들의 너무나도 다른 진화과정이 나타나 있습니다.

출처 : <http://espace-univers.blogspot.de>

## 초기 질량에 따른 별의 진화 과정

그럼 이제 별의 초기질량에 따른 대략 6가지의 각각 다른 진화 과정 들을 살펴 보겠습니다. 그림 5는 원시별의 초기질량에 따라서 별들의 각각 다른 진화과정을 그림으로 나타낸것 입니다. (맨 뒷장에 그림 5 의 확대 버전이 있습니다.) 모든 별은 성운에서 태어나서 성운으로 다시 돌아갑니다. 원시별의 초기질량에 따라서 각각의 별들이 너무 다른 진화과정으로 그들만의 일생을 보내는 것을 확인 할 수 있습니다. 심지어 별이 되지 못하고 갈색 왜성으로 평생을 사는 천체도 있으며, 태어난지 얼마 지나지 않아서 금방 블랙홀이 되는 천체도 있습니다. 아래 설명부터는 모든 기준이 태양의 질량<sup>6</sup>입니다. 우리 지구의 질량 ( $M_{\oplus}$ )은 보통 별을 기준으로 했을때 너무나도 작기 때문에 흔히 모든 천체들은 태양을 기준으로 설명합니다.

<sup>6</sup> 태양의 질량은  $M_{\odot}$  라고도 나타내는데, 이는 Solar Mass라고 부릅니다.



## ① 초기질량( $M_0$ ) $\leq 0.075 M_\odot$ :

### 원시별 -> 갈색 왜성

초기질량이 태양의 0.075배보다 작다면, 원시별은 정상적인 별이 되지 못하고 갈색 왜성의 모습으로 평생을 살아 가게 됩니다. 요즘 큰 이슈가 되고 있는 갈색 왜성에 대해서 말씀드리자면, 엄밀히 갈색 왜성이라는 천체는 별이 아닙니다. 앞서 말씀 드린 별의 정의대로, 별이란 가벼운 원소들의 핵융합 반응을 통해 에너지를 생성하며 스스로 빛을 내는 구형 천체를 말하기에, 수소 핵융합을 하지 못하는 갈색 왜성은 별도 아닌, 그렇다고 행성도 아닌 묘한 존재입니다. 갈색 왜성은 태양 질량의 대략 8%미만의 질량만을 가지고 있는 천체입니다. 왜성(矮星; 난쟁이 별; dwarf)이라는 명칭을 가지고 있지만, 질량이 가벼운 탓에 연속적인 수소 핵융합 반응을 하지 못하기에 중수소나 리튬만을 태울 수 있는 천체입니다. 따라서 핵에서 연속적인 수소 핵융합 반응을 유지할만한 중력을 가지지 못하는 갈색 왜성은 별의 정의에서 벗어납니다. 애초에 질량자체가 너무 작아서 별이 되질 못한것이기에, 갈색 왜성은 “failed star” 라고 불리웁니다. 갈색 왜성에도 여러가지 종류가 있는데, 질량이 목성의 13배가 넘으면 중수소와 헬륨3를 태울 수 있고 대략 65배를 넘으면 리튬을, 70배를 넘으면 붕소와 베릴륨을 태워 헬륨4로 만들 수 있는 3가지 종류의 갈색 왜성이 있습니다. 위의 중수소와 헬륨3, 리튬, 붕소 등은 별 내부에 극소량만이 존재하기 때문에 내부에 이들 연료가 줄어들면서 갈색 왜성은 서서히 식어가게 됩니다. 이 3가지 종류의 갈색 왜성 모두 수소 핵융합 반응은 하지 못하기에 현재 항성 정의상 갈색 왜성은 별의 범주에서 탈락 되었습니다. 갈색 왜성은 표면온도가 낮아(빈의 변위법칙을 통해서) 보통 적외선 영역을 위주로 빛을 발산합니다. 표면 온도가 매우 낮은탓에 갈색 왜성이 내뿜는 광도도 매우 어둡습니다.

## ② 초기질량( $M_0$ ) $\sim 0.075 - 0.45 M_\odot$ :

### 원시별 -> 주계열성 적색 왜성 -> (청색왜성) -> 백색 왜성

초기질량이 태양의 0.075 - 0.45배인 별들은 적색 왜성 주계열성이 됩니다. HR 도표에 (그림 4) 따르면 적색 왜성의 스펙트럼형은 대부분 어두운 K형으로부터 M형까지이며, 질량이 작아 표면 온도가 낮습니다. 우주에 있는 별들의 약 90퍼센트 정도가 적색 왜성인 것으로 알려져 있습니다. 이처럼 적색 왜성은 우주에서 가장 많은 종류의 별입니다. 우주상에서도 태양보다 밝고 큰 별은 상당히 많지만, 통계적으로 분석하면 달라집니다. 태양은 특별할 것 전혀 없는 작은 별일 뿐이지만 밝기로만 보면 상위 1%안에 들어가는 밝은 별입니다. 이유인 즉슨 이 적색 왜성의 숫자가 너무 많기 때문입니다. 태양보다 더 무거운 별들이 가벼운 별들보다 훨씬 희귀합니다. 적색 왜성과 갈색 왜성과의 차이점이라면 먼저 질량을 들 수 있습니다. 적색 왜성은 내부 수소를 핵융합 반응을 통한 헬륨으로 바꿈으로서 나오는 에너지를 빛의 형태로 내뿜습니다. 적색 왜성의 내부는 전체적으로 대류층만 있기에, 핵융합 과정에서 헬륨이나 기타 무거운 원소가 중심핵에 축적되지 못합니다. 따라서 상대적으로 수소 핵융합이 늦습니다. 이러한 이유로 적색 왜성의 수명은 질량이 큰 별들보다 훨씬 깁니다. 적색 왜성의 질량이 작은 경우 17조 5000억년까지 버틸 수가 있다고 하니 영겁의 세월을 사는 별들 입니다. 적색 왜성들도 질량에 따라서 그 최후가 역시 달라집니다. 질량이 상대적으로 큰 적색 왜성은 적색 거성이 될 수 있습니다만, 태양의 미래 모습인 적색 거성의 그것보다는 훨씬 작습니다. 작은 적색 왜성은 표면적 모습만 바뀌게 됩니다. 수소를 모두 소진하고 헬륨을 쓰게되면서 청색 왜성이라는 모습으로 진화를 할 것이라고 예측됩니다. 하지만 이를 관측하려면 현 우주의 나이의 150배인

2조년 이상을 기다려야 합니다. 우주 나이보다 긴 별이라니 참 아이러니 하지만, 적색 왜성의 노년이 아직 오지 않았을 뿐입니다. 우주는 끊임없이 변하고 진화할 것이고, 적색 왜성은 결국 생을 마감하게 될 것입니다. 영겁의 세월이 여러번 흐른 후에는 적색 왜성의 수명이 우주의 나이보다 짧아질테고, 이때 즈음이면 우리도 청색 왜성이라는 이론적 천체를 볼 수 있을 것입니다. 한가지 재미있는 사실은, 이러한 적색 왜성들은 우주가 처음 생길 때부터 만들어진 별들은 아니라는 점입니다. 빅뱅이 시작되고 최초의 별들은 수소, 헬륨, 리튬 등의 가벼운 원소로만 만들어졌지만, 적색 왜성들에선 핵융합으로 인해 만들어진 중금속성 원소가 발견되기 때문입니다. 이들은 초신성 폭발로만 만들어질 수 있는 물질들이기에, 이러한 별들은 최초의 별이 죽은 이후에 만들어졌을 가능성이 크다는 점입니다. 그말은 우리가 청색왜성 보려면 좀 더 오랜 시간이 필요하다는 말과도 같습니다. 적색 왜성의 말년 역시 질량이 작은 별들의 무덤인 백색 왜성이 되리라고 예측합니다.

### ③ 초기질량( $M_0$ ) ~ 0.45 - 13 $M_\odot$ :

원시별 -> 주계열성 -> 적색 거성 -> 행성상 성운 -> 백색 왜성

태양 질량의 0.45 - 13배인 별들은 태양과 비슷한 진화 단계를 거칩니다. 주계열성에 진입하고 난 후, 수소를 모두 소진한 별은 적색 거성 단계에 진입하게 되면서부터 헬륨을 핵융합 시키기 시작합니다. 탄소를 만들기 시작하는 시기입니다. 하지만 탄소를 핵융합 할 만큼 높은 온도와 압력을 가질 수는 없는 환경 이기에 더 이상의 진화는 불가능합니다. 태양같은 별들은 질량이 작은 이유로 탄소가 핵융합 반응을 일으키는데 필요한 열과 압력을 가할 수 없기 때문입니다. 헬륨 핵융합으로 발생한 막대한 중력에 길항하는 복사압으로 인하여 적색 거성의 외피층은 수만 년에 걸쳐서 우주 공간으로 날아가 버리게 됩니다. 날아간 외피층은 행성상 성운을 이루게 되는데, 행성상 성운은 태양과 같은 유형의 별들이 그들의 일생을 다 하고 백색 왜성이 되기 전 거대한 크기로 팽창한 외피층을 자신의 강력한 항성풍을 이용하여 우주공간으로 대량으로



그림 6. 헬릭스 성운

대표적인 행성상 성운의 모습인 헬릭스 성운입니다. 천문학 책에 가장 많이 등장하는 표지중 하나입니다.

출처 : NASA

방출하는 천체를 말합니다. 이것이 성운의 형태로 관측이 되기에 성운이라는 이름이 붙었고, 행성 모양을 띠고 있어서 행성상 성운(그림 6)이라는 이름이 붙었습니다. 하지만 생성 과정에서 행성은 전혀 관련이 없습니다. 이때 즈음이면 각각의 태양계엔 행성은 이미 사라지고 없습니다. 행성상 성운은 중심부에 백색 왜성이 관측되며 매우 높은 온도의 가스가 방출되는데 (짧은 파장의 자외선 파장 발생) 이 가스들이 이온화되어 있어서 상당히 아름다운 색을 띄게 됩니다. 이들의 중심부(탄소)는 점점 수축하여 결국 백색 왜성이 됩니다. 백색 왜성은 보통 핵 융합 반응을 통해 생성된 탄소와 (혹은 산소)를 주성분으로 하고 있으며, 더 이상 핵융합 반응을 일으킬 수 없으므로 스스로의 중량을 지탱할 힘을 얻을 수 없습니다. 따라서 백색 왜성은 점차 스스로 무너지게 되지만, 전자축퇴압에 의해 붕괴를 멈추고 안정되게 됩니다. 백색 왜성의 표면온도는 상당히 높습니다. 하지만 이는 별의 붕괴과정에서 발생한 에너지일 뿐, 역시 스스로 에너지를 생산해서 내는 온도는 아닙니다. 따라서 백색 왜성의 추후 진화과정은 점점 식어버리는것 그 이상 그 이하도 아닙니다. 완전히 식어서 보이지 않을때의 왜성은 우리는 흑색 왜성이라고 하는데, 이론적으로 100,000K에 달하는 백색 왜성이 보통 5K이하인 흑색 왜성이 되는 데에 걸리는 시간은 900조년에 달합니다. 청색 왜성과 마찬가지로 흑색 왜성은 아직까지 존재 하지 않습니다. 흑색 왜성 역시 언젠간 우주에서 모습을 드러낼 것입니다.

태양의 미래도 백색 왜성입니다. 계산에 따르면 대략 지금으로부터 약 78억년 뒤에 백색 왜성으로 진화할 예정입니다. 이때 즈음 되면 지구는 당연히 없겠죠. 적색 거성이 되기 훨씬 이전부터 말입니다.

#### ④ 초기질량( $M_0$ ) ~ 13 - 25 $M_\odot$ :

원시별 -> 주계열성 -> 청색초거성 -> (적색 거성) -> 초신성 -> 중성자별

태양 질량의 13 - 25배인 별들은 중성자별로 가는 운명을 지니게 됩니다. 재미있는점은 이 무거운 별들은 초거성(supergiant)이라는 매우 무겁고 매우 밝은 별들로 진화하는데, 어찌나 밝은지 청색으로 보일정도입니다. 불꽃을 예로 들면 긴파장의 빨간빛보다 짧은 파장의 푸른빛의 온도가 더 높습니다. (빈의 변위법칙; 온도와 파장 사이의 반비례 관계). 별들도 마찬가지 입니다. 적색보다는 청색이 온도가 훨씬 더 높은 별들입니다. 이들은 HR 도표에서 (그림 4) 맨 위 영역을 차지하며, 온도는 약 3,500 ~ 20,000K 사이입니다. 초거성은 태양질량의 12 배 이상의 질량을 가지고 있지만, 광도는 태양광도의 약 10,000 배에서 백만 배 이상입니다. 초거성은 무거운 주계열성의 별들이 중심핵 수소를 소진할 때 (적색 거성과 같이) 바로 진화하기 시작합니다. 작은 질량의 별과는 달리, 수소가 소진되면서 즉각적으로 헬륨을 융합하기 시작하는데 초거성은 헬륨보다 무거운 원소를 융합하기에 충분히 무겁습니다. 이들중 대개는 철의 생산까지 계속해서 무거운 원소를 태웁니다. 철만큼 안정적인 원소는 없기 때문에 융합반응은 여기에서 멈추게 되지만, 엄청나게 큰 질량으로 인해 이들은 곧 초신성으로서 폭발할 운명에 처해집니다. 그래서 이들은 헬륨이 고갈되었을 때 행성상성운처럼 자신의 대기층을 방출하지 않습니다. O형 주계열성과 B형 주계열성은 대부분 초거성이 됩니다. 이들은 HR 다이어그램(그림 4)에서 왼쪽 윗부분을 차지합니다. 매우 무거운 질량 때문에 이들의 수명은 상당히 짧습니다. 겨우 수십만년 정도밖에 살지 못하며, 주로 나선은하의 나선팔부분 같은 어린 은하구조에서 쉽게 관측됩니다. 초거성은 높은 광도로 인해 하늘에서 육안으로 가장 잘보이는 밝은 별들 입니다. 오리온자리의 베텔게우스와 안타레스도 적색 초거성입니다. 적색이기에 리겔(청색 초거성)보다는 온도가 높지 않다는것을 짐작할 수 있습니다. 초거성 과정 이후에 적색 거성을 거치는 별들도 있지만,



거치지 않는 별들도 있다고 알려져 있습니다. 질량이 무거운 별의 운명은 크게 두가지로 나뉘지만 이들은 공통적으로 초신성 폭발을 겪을 것입니다. 초거성을 거친 대략 태양 질량의 13배 이상의 별들의 중심부 철 핵의 질량이 태양의 1.44배 이상 커지면(찬드라세카 한계) 중심핵의 철을 구성하던 양성자가 전자를 흡수하는 전자 포획이 일어나게 됩니다. 이는 모든 철이 중성자로 변하는 사실을 말합니다. 앞서 언급한 대로, 별의 중력붕괴는 중성자 축퇴압이라는 반발력에 의해 급작스럽게 멈춥니다. 이로 인해 중심핵과 핵으로 쏟아져내리던 외부 층이 차례대로 충돌하면서 강력한 충격파가 발생합니다. 외부 구조를 이루던 철 이하의 원소들의 급격한 핵반응이 시작되어 별 전체가 동시에 핵반응을 일으키게 됩니다. 그 결과 엄청난 에너지가 발생하게 되고 결국 초신성 (supernova) 폭발이 일어나게 됩니다. 빛나는 현상이 우리가 보기엔 마치 새로운 별이 태어나는 것처럼 보이기에 신성이라는 명칭이 붙었지만, 실제로는 수명이 다한 별의 폭발입니다. 이에 따라서 엄청난 에너지가 동반됩니다. 이 때문에 초신성 폭발이 태양 근처에서 일어난다면 고에너지 감마선으로 인해서 태양계 전체가 없어질 수 있습니다. 다행스럽게도 지구 주변에는 초신성 후보가 없습니다. 초신성 폭발 후 별들의 미래는 2가지로 갈라집니다. 남아 있는 철 핵이 일으키는 중력이 중성자 축퇴압과 강력을 이길 정도로 강하지 않다면, 그 상태에서 좀 더 안정을 추구하게 됩니다. 따라서 남아 있는 중성자로 이루어진 중성자 별로 진화할 것입니다. 중성자별의 밀도는 가히 천문학적으로 높습니다. 중성자별의 질량이 커질수록 축퇴되어 있는 중성자별의 핵은 점점 작아지며 어느 값의 이상이 되면 붕괴해서 블랙홀이 되어버리기도 합니다.

## ⑤ 초기질량( $M_0$ ) > $25M_{\odot}$ :

원시별 -> 청색초거성 -> 초신성 -> 블랙홀



그림 7. 찬드라 X선 관측선의 궁수자리 A\*의 사진

과학자들은 이곳에 초대형 블랙홀이 있다고 예상하고 있습니다.

출처 : NASA

태양 질량의 25배가 넘는 거대한 별들은 결국 블랙홀로 가게 됩니다. 블랙홀(black hole)은 자연계에서 가장 약한 기본힘인 중력이 가장 강한 강한 상호작용<sup>7</sup>을 이긴 경우입니다. 상당한 질량이 만들어내는 강한 중력 붕괴덕분에 만들어지는 블랙홀은 형성된 후에도 주변의 질량을 흡수하여 성장할 수 있습니다. 다른 항성을 흡수하거나 블랙홀들끼리 융합하면서 더 큰 질량의 블랙홀이 될 수도 있습니다. 대부분 은하의 중심에는 초대질량 블랙홀이 존재한다는 것이 물리학/천문학계의 일반적인 견해입니다. 블랙홀 주위를 공전하는 다른 항성이 있을 경우, 그 궤도를 통해 블랙홀의 질량과 위치를 예측할 수 있는데 우리은하 중심 방향에 존재하는 궁수자리 A\* (그림 7)가 태양의 400백만배가 넘는 초대질량 블랙홀임을 밝혔습니다.

<sup>7</sup> 강한 상호작용(strong interaction)은 물리학에서 다루는 개념으로 원자핵이나 중간자들이 결합하고 상호작용하게 하는 힘입니다.

2016년 2월 11일, LIGO 합동연구진<sup>8</sup>은 두 개의 블랙홀이 서로 융합하면서 발생한 중력파를 감지함으로써 역사상 최초의 중력파 관측에 성공했다고 발표했습니다. 이는 그 뒤로도 여러번 검증이 되었고, 사실로 판명이 났으며 최초로 블랙홀 쌍성계 융합이 관측된 사례이기도 합니다.

## 별이 죽고난 후

모든 별의 생이 성간물질에서 시작하는 만큼 모든 별들의 마지막도 다시 성간물질로 돌아갑니다. 별이 거성이거나, 초거성의 상태로 진화 후에 그들의 고유 초기 질량에 따라서 그들의 중심핵이 백색왜성이나 중성자별, 블랙홀로 죽음을 맞이하는 반면, 중심핵의 주변 역시 그들의 고유 초기 질량에 따라서 행성상 성운 (그림 8)이나 초신성 폭발을 통해서 생을 마감하게 됩니다. 별들은 폭발을 통해서 자신의 모든 물질을 성간물질에 뱉어 내는데, 따라서 별의 마지막 단계는 보통



**그림 8. 캣츠아이 성운 (NGC6543)**

고양이의 눈을 닮았다고 해서 캣츠아이 성운이라고도 불리웁니다. 상당히 복잡한 구조를 가지고 있으며, 행성상 성운에서는 거품 상자가 겹쳐보이는 구조를 볼 수 있는데, 별에서 내뿜는 항성풍의 영향입니다.

출처 : NASA

성운으로 돌아가는 과정입니다. 성운 어디엔가는 슈퍼버블이라고 불리우는 별들이 탄생하는 뜨거운 가스로 가득 찬 공간으로 돌아가게 되면 다시 새로운 별의 일생이 시작됩니다. 주변에 슈퍼버블이 없다면 이 물질들은 심지어는 항성이 없는 떠돌이 행성을 만들기도 합니다. 만약 이들이 지구 같은 행성에 도착하면, 생명체를 구성하는 물질을 만들 수도 있습니다. 지금도 우주 어느곳에선가는 끊임 없이 별이 탄생하고 있고 죽음이 계속 되고 있습니다. 그림 9은 허블 망원경으로 촬영한 소마젤란은하 안에 있는 별들의 탄생 지역입니다. 새로 태어난 별들이 밝게 빛나고 있고 아직 핵융합을 시작하지 않은 예비

원시별들이 가득합니다. 별들은 성간물질에서 최소 수백 개씩 무리 지어 태어납니다. 성간물질은 밀도가 상대적으로 희박하기에 엄청난 양의 가스와 먼지가 수축하여야 합니다. 군데군데 부분적으로 밀도가 아주 높아진 부분이 생기면, 많은 별이 동시다발적으로 만들어집니다.

빅뱅 대폭발 이후에, 어느 순간에서부터인가 차갑고 어두컴컴한 우주에서 뜨겁고 밝은 별이 탄생합니다. 우주에서 우리가 알고 있는 천체들이 차지 하는 비율은 상당히 낮지만, 별이 탄생하면서 우주는 이전보다 훨씬 더 복잡해 졌습니다. 따라서 수많은 별의 탄생과 죽음이 138억 년의 우주 역사와 그리고 생명의 탄생에서 중요한 역할을 한건 자명합니다. 별의 탄생과 함께 우주에는 이전에 없던 물질들이 생겨났고, 생명이

<sup>8</sup> 우리나라도 포함되어 있습니다.



**그림 9. 소마젤란은하 안에 있는 별들의 탄생 지역**

허블우주망원경으로 촬영한 소마젤란은하 안에 있는 별들의 탄생 지역입니다.  
붉은 성운을 배경으로 새로 태어난 별들이 밝게 빛나고 있습니다.

출처 : NASA

태어났습니다. 모든 별들의 각각 다른 고유의 진화과정이 없었다면, 또 초신성 폭발같은 진화가 없었다면 우리 인간은 태어나지도 못했을 것입니다. 그런 의미로 별은 우리의 고향이고 우리는 별들의 후손입니다.

우리 모두는 같은 조상을 가지고 있고, 우리의 조상인 별들은 우리와 같은 원소로 이루어져 있는 또 다른 우리입니다. 우리가 우주입니다. 우리가 바로 130억년 우주와 함께 살아 숨쉬는 우주입니다.



## Minjae Kim (김민재)

[mkim@astrophysik.uni-kiel.de](mailto:mkim@astrophysik.uni-kiel.de)

Institute of Theoretical physics and Astrophysics,  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany

- **CARMENES** scientific member
- FOR 2285 Research Unit “**Debris Disks in Planetary Systems**” member

### - 칼럼 목록

1. 먼지원반으로의 여행
2. 외계행성으로의 여행
3. 우리태양계로의 여행
4. 40억년전으로의 여행
5. 별들의 후손
6. 별의 일생

## References :

### - Pictures

표지 그림 : Hubble Heritage Team, ESA, NASA

그림 1 : Stellarium

그림 2 : Getty image

그림 3 : NASA

그림 4 : ESO

그림 5 : <http://espace-univers.blogspot.de>

그림 6 : NASA

그림 7 : NASA

그림 8 : NASA

그림 9 : NASA

### - Books

*Simon Glover* : **Observing Big Bang lecture material, in Univ. Heidelberg**

### - Websites

<https://namu.wiki/w/항성>

## 그림 5 (확대). 별의 일생

출처 : <http://espace-univers.blogspot.de>

