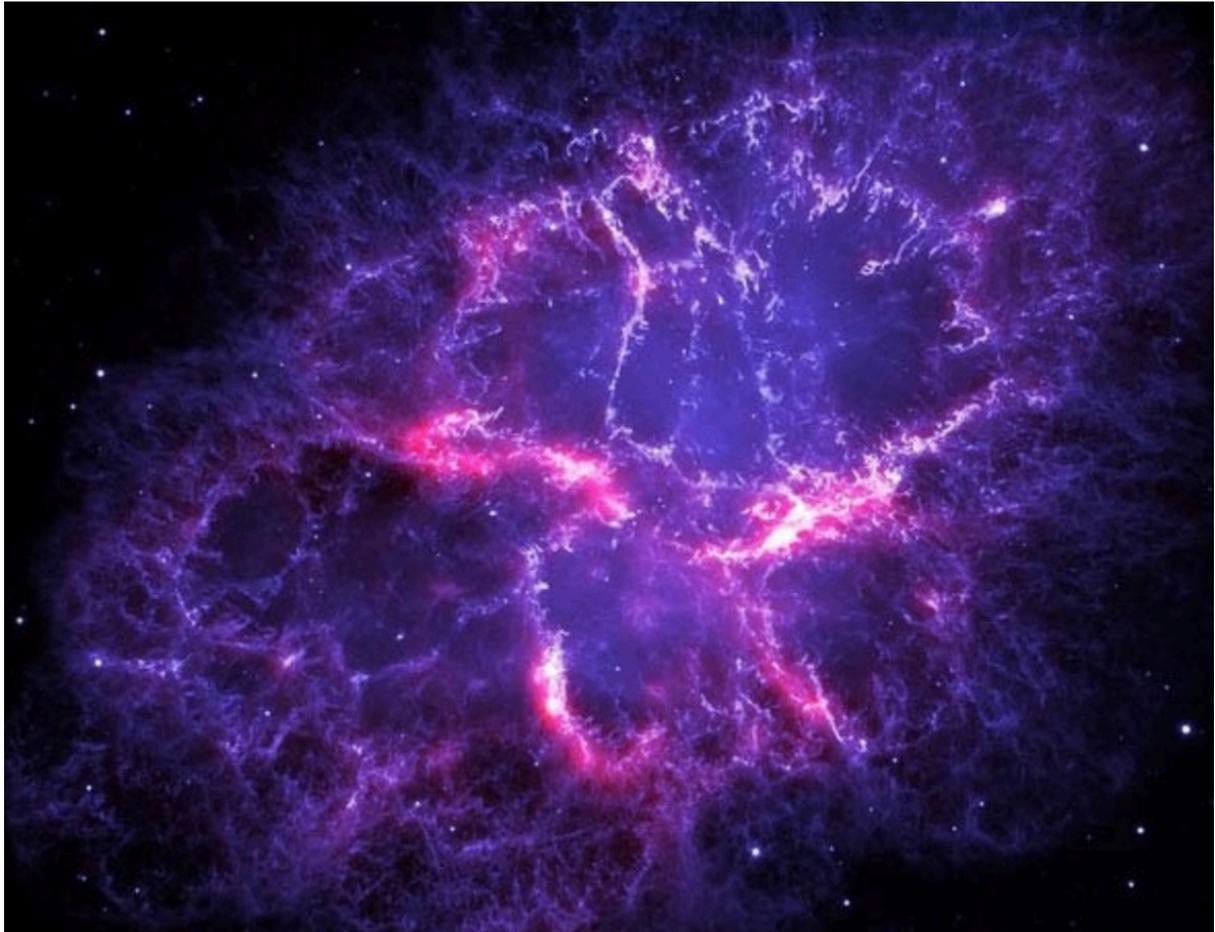


별들의 후손

Minjae Kim (김민재)

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

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



게 성운 사진, 6500광년 거리의 초신성 폭발 잔해

Credit: ESA

우리는 별들로 이루어져 있습니다

1935년 뉴욕의 브루클린에서 태어난 작은 소년 칼(Carl)은 어릴 적부터 천문학에 관심이 많았던 호기심 가득한 소년이었습니다. 어느날 칼의 부모님은 도서관 카드를 선물해 주었고 이 작은 소년은 85번가의 도서관으로 곧장 달려갔습니다. 칼은 도서관 사서에 게 별에 관한 책을 보고 싶다고 말했습니다. 어린 칼은 우주의 거대함과 상대적으로 평범한 인간에 놀라워 했으며, 이때부터 천문학자가 되겠다고 다짐을 했습니다. 재능이 뛰어났던 칼은 몇 학년을 월반하면서도, 독서에만 빠져있었던 다소 벗어나간 학생이었습니다. 칼은 학교 수업에서 배우지 못하는 수학의 중요성을 과학소설계의 거장 아서 찰스 클락의 소설 “성간 비행 (Interplanetary Flight)” 을 읽고 깨달았습니다. 이어서 천문학계의 우아한 천재들이었던 아서 에딩턴경과 제임스 진

"광막한 공간과 영겁의 시간 속에서 행성 하나와 찰나의 순간을 앤(Anne)과 공유 할 수 있었음은 나에게서 커다란 기쁨이었다."

칼 세이건, 『코스모스』



그림 1. 칼세이건과 그의 부인 앤 드류안

Credit: Peter Morenus

스경 등의 저서를 탐독하기 시작했습니다. 이들의 우하한 서사와 표현방식은 훗날 칼의 성격에 지대한 영향을 주었습니다. 이 작은 소년 칼이 바로 훗날 다른 과학 분야 간의 벽을 허물고, 과학과 대중들을 갈라놓았던 벽마저도 허문 — 우리에게서 코스모스로 더 유명한 — 칼 세이건입니다. 그는 사람들이 과학의 핵심에 있는 정신이 무엇인지 이해하고 이를 지키기를 원했습니다. 바로 그 정신은 “진실이 중요하다는 것”이었습니다. 이것은 그 당시에만 해도 큰 변화를 가져오는 일이었습니다.

“우리가 믿고 싶은 것만 믿을 수는 없죠. 현실도, 자연도 그렇습니다. 우리의 방식이 아닌 과학의 방식으로 접근을 해야 합니다. - 칼 세이건 ”

최고의 과학 저술가이자 과학 다큐멘터리 제작자인 앤 드루안은 칼 세이건의 부인입니다. 그녀는 방송 「코스모스」의 대본을 쓴사람으로도 유명한데, 과학계와 대중은 방송과 책 「코스모스」를 통해서 하나가 되어 갔습니다. 그녀가 기억하는 칼 세이건과 그들의 꿈을 담아서 제작한 방송 「코스모스」는 이 시대의 우아한 로맨티스트이자 천문학자였던 칼 세이건을 기억하게 했습니다. 또한 「코스모스」는 생명, 지구 그리고 우주를 포함하는 ‘코스모스’ 그 자체를 우리에게 인식시켜 주었습니다. 「코스모스」를 통해서 보여준 칼 세이건과 앤 드루안의 놀라운 통찰력은 표현의 힘이 얼마나 대단한지 깨닫게 해 주었습니다. 앤 드루안이 생각하는 칼 세이건의 업적을 물었을때 그녀는 이렇게 대답했습니다.

“참으로 심오한 질문이네요. 왜냐하면 칼은 정말 여러 곳에 기여를 했고, 과학과 문화를 바꾸어 놓았거든요. 동시에 저는 칼이 우주의 시대에서 왔다고 말하고 싶습니다. 사실 그때의 과학은 우주 시대에 대해 준비가 되어 있었다고 생각하지 않아요. 그때는 서로 소통하지 않는 작은 분야들로 갈라져 있었죠. 칼이 했던 것들 중 하나는 칼의 위대한 멘토였던 해럴드 유리, 제러드 카이퍼, H. J. 멀러 같은 위대한 과학자들과 함께 과학 분야 사이의 벽을 허무는 것이었어요. 덕분에 지질학자, 생물학자, 물리학자, 천문학자 들이 우주 시대에서 최초로 발견되었던 엄청난 양의 데이터들을 함께 분석할 수 있었죠.”

(출처: 사이언스 북스, <http://sciencebooks.tistory.com/986>)

칼 세이건의 딸인 사샤 세이건(Sasha Sagan)에게 어릴적 처음으로 죽음을 대해 생각하게 되었던 순간이 있었습니다. 그녀의 할아버지와 할머니가 돌아가신 후, 그들이 어디로 가셨을까 하는 의문을 품게 되었기 때문입니다. 그 후부터, 어린 사샤 세이건이 존재의 두려움에 빠지려 할 때마다, 칼 세이건과 앤 드루안은 과학적 세계관으로 사샤 세이건을 위로해 주었습니다.

“너는 지금 바로 이 순간 살아있단다. 그건 정말 놀라운 일이야.” 그들은 한 사람이 태어나기까지 얼마나 많은 운명의 갈림길앞에서 선택을 해야하는지 설명 했고, 그 선택들로 인해서 지금 내가 존재한다는 사실이 얼마나 감사한 일인지도 이야기했습니다. 수많은 다른 선택이 있는 우주에, 만약 증조부와 증조모께서 만나지 못했다면 지금 내가 없을 것입니다. 지금 우리가 호흡하고, 물을 마시고, 가까운 별이 내는 따스한 온기를 즐길 수 있게 진화했다는 사실도 감사해야 할 일이라고 말했습니다. 우리는 DNA를 통해 조상들과 연결되어 있으며, 더 멀리는 우주와도 연결되어 있다는 사실도 말해주었습니다. 우리 몸을 이루는 모든 세포들은 항성들의 심장에서 만들어졌기 때문입니다. 그는 “우리는 별들로 이루어져 있다(We are star stuff)” 라는 말을 했고, 어린 시절부터 그것을 느끼게 해주었습니다. 우리가 영원한 존재가 아니더라도 깊은 아름다움이 있다는것을 깊이 감사해야 한다고 했습니다. 우리가 영원히 살 수 있다면, 우리의 존재는 더 이상 놀라운 일이 아닐테니까요. (칼 세이건의 딸 사샤 세이건이 뉴욕매거진에 기고한 에세이입니다. 원문 출처 : <https://www.thecut.com/2014/04/my-dad-and-the-cosmos.html>)

칼 세이건은 과학자이기 이전에 로맨티스트였습니다. 상당한 미남이기도 했지만 코스모스 방송에서 보여진 그의 이미지는 멋진 뇌섹남이었습니다. 그가 남긴 말 한마디는 사람들의 심금을 울렸고, 과학과 대중을 가깝게 만들었습니다. 그는 왜 우리가 별들로 이루어져 있다는 말을 했을까요? 단순히 서사적으로 표현한 비유였을까요? 결과적으로 그의 말은 사실입니다. 이는 문학적이나 서사적인 표현이 아니고, 과학적인 사실 그대로 객관적으로 표현한 말입니다. 그리고 그 이유를 알기 위해서는 먼저 별이 무엇인지 알아야 합니다.

별 (항성) 이란?

밤하늘을 보면 항상 수많은 별들이 있습니다. 단순히 생각해서 별이란 빛나는 천체로 생각할 수 있는데 밤하늘에서 밝게 빛나는 모든것이 별은 아닐 것입니다. 태양의 빛을 받아 반사시키면서 지구에 빛을 내뿜는 달도 있고 지구와 상대적으로 가까워서 때로는 별처럼 보이는 태양계의 여러 행성들도 있습니다. 그렇다면 별은 무엇일까요? 별(항성)은 막대한 양의 플라즈마 (전리된 기체)가 중력으로 뭉쳐져 있고, 중심부에 있는 가벼운 원소들의 핵융합 반응을 통해 에너지를 생성하며 스스로 빛을 내는 구형 천체를 말합니다. 우리 지구에서 가장 가까운 항성은 바로 태양입니다.

별의 중앙은 중심핵으로 이루어져 있습니다. 항성 중심부에서 수소 원자핵이 융합되면서 감마선 형태의 에너지를 발산하게 됩니다. 이 광자들은 주변에 가득한 플라즈마와 반응하여 중심핵에 열에너지를 공급하는 역할을 합니다. 안정적인 별의 내부에는 몇가지 평형상태가 지속되어야 하는데, 첫째로 유체 정역학적 평형이 필요 합니다. 안쪽으로 향하는 별의 자체중력에 대항하는, 바깥쪽으로 향하는 압력과의 평형입니다. 한마디로 유체가 원래의 운동 상태를 유지하는 것을 말합니다. 광자들이 공급한 열에너지로 항성 내부의 온도는 중심에서 가장 높고 외부로 갈수록 낮아지는 분포를 보입니다. 따라서 열흐름은 에너지 2법칙을 따라 내부에서 바깥쪽을 향하게 됩니다. 결과적으로 항성 내부에서 외부로 흘러나가는 에너지 흐름과 아래에서 위층으로 밀려 올라오는 흐름의 양은 정확히 일치하게 됩니다. 중심핵에서 바깥쪽으로 복사층이나 대류층이 있는데, 복사층은 매개물질이 없이 열이 전달되는 방법인 복사의 방법으로 에너지를 전달하는 층을 말합니다. 복사는 빛의 속도로 전달되기에 에너지의 전달 속도가 가장 빠른 효율적인 방법입니다. 어떠한 이유로 인해서 플라즈마가 불안정해질 경우엔 대류 작용이 발생하게 됩니다. 이 구간에서는 에너지가 대류의 형태로 전달됩니다. 별의 질량에 따라서 대류층이 생겨나는 장소가 결정되는데, 태양보다 몇 배 무거운 항성들은 항성 내부 깊은 곳에 대류층이 형성되며 바깥쪽에 복사층이 둘러싸고 있게 됩니다. 바깥쪽에 복

사층이 형성됨으로서 더 효율적인 열 에너지 소모가 이루어 지고, 이러한 조건 역시 큰 별의 수명이 작은 별에 비해 짧은 이유가 됩니다. 태양처럼 상대적으로 질량이 작은 별들은 복사층이 깊은 곳에 위치해 있고 대류층이 바깥쪽에 위치해 있습니다. 질량이 매우 작은 적색 왜성 같은 경우는 항성 내부 전체가 대류층으로 형성되어 있어서 중심핵에 헬륨이 쌓이지 않습니다. 또한 비 효율적인 열 에너지 소모가 이루어 지게 되어서 오랜 수명을 가질 수 있습니다.

별의 에너지원으로는 크게 2가지를 들 수 있는데, 첫번째 가장 기본적인 에너지는 핵융합 과정에서 발생하는 열 에너지입니다. 별은 질량과 화학구성에 따라 중심핵에서 서로 다른 핵융합 과정이 발생하게 됩니다. 가벼운 원자핵이 서로 반응해서 더 무거운 원자핵을 만들게 됩니다. 이 과정에서 융합된 분자핵의 총질량은 융합전의 총 분자의 질량보다 적어지게 됩니다. 이 손실된 질량 결손 만큼 에너지를 방출 하게 되는데, 에너지와 질량은 서로 변환이 가능하다는 아인슈타인의 상대성 이론에 따라서 ($E = mc^2$) 질량의 결손이 아주 작더라도 (빛의 속도가 어마어마하게 빠르기) 바뀌는 에너지는 실로 엄청납니다. 엄청난 질량의 중력에 대항하기 위해서 바깥쪽으로 뿜어지는 복사압이 필요한데, 이를 만들기 위한 에너지는 질량 결손 후 에너지 방출 반응에서 나오게 됩니다. 무거운 별 내부에서는 중심핵이 수축하면서, 네온 연소 과정 및 산소 연소 과정 등을 통해 더 무거운 원소를 태울 수 있습니다. 별 내부 핵융합의 가장 마지막 단계는 가장 안정적인 철(Fe)을 생산하는 규소 연소 과정입니다. 이 단계까지 오면 에너지는 중력 수축을 통해서만 생산될 수 있습니다.

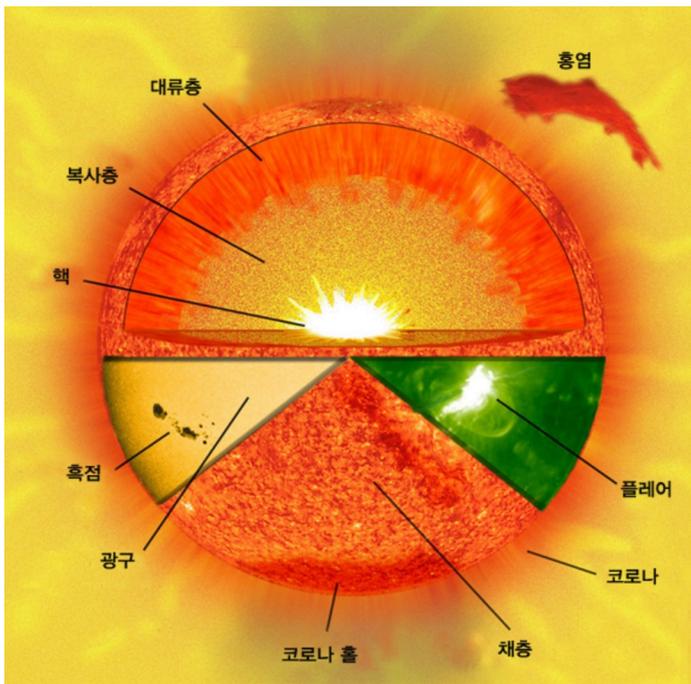


그림 2. 태양의 구조

출처 : 한국 천문 연구원

그렇다면, 중력 수축이 대체 뭘까요? 이는 말 그대로 중력에 의하여 별이 수축되는 현상을 말합니다. 이론적으로 (중력에 대항하는) 내부압력에 의한 힘이 중력보다 약해질 때 발생하게 됩니다. 이 수축때 생기는 중력 위치에너지는 운동에너지로 전환될 수 있고 이는 열에너지의 형태로 나타납니다. 별이 수축하면서 반지름이 줄어들고, 자신의 중력은 증가되기에 내부의 압력 또한 정유체역학적 평형을 유지하기 위해서 증가되어야 합니다. 그리고 이 계의 총 에너지가 보존되려면 위치에너지 변화량의 절반 정도가 외부로 복사되어야 하는데, 이것은 별의 광도로서 나타납니다. 이는 비리얼 정리(Virial theorem)로 알려진 이론인데 간단히 말해서, 중력 수축할때 생기는 중력 위치 에너지의 절반은 열에너지로, 나머지 절반은 복사에너지로

전환됨을 알려주고 있습니다.

항성의 중심 쪽으로 가까워지다 보면 엄청나게 높은 가스의 밀도 때문에 더 이상 빛이 자유 자재로 통과하기 힘든 부분이 있으며 이 위치를 물리학적으로 항성의 '표면'이라고 정의합니다. 바로 이 광구(그림 3)의 온도가 항성의 표면 온도이자 항성의 온도입니다. (항성의 내부온도는 잴 수도 없고 너무 복잡한 탓에 표면 온도를 항성의 유효 온도(effective temperature)로 정의합니다).

광구 바깥쪽으로는 우리가 관찰 할 수 있는 항성의 대기층이 펼쳐집니다. 우리 태양의 경우 대기층이 채층과 코로나로 이루어져 있으며, 플레어와 홍염현상이 관찰됩니다. (그림 2)

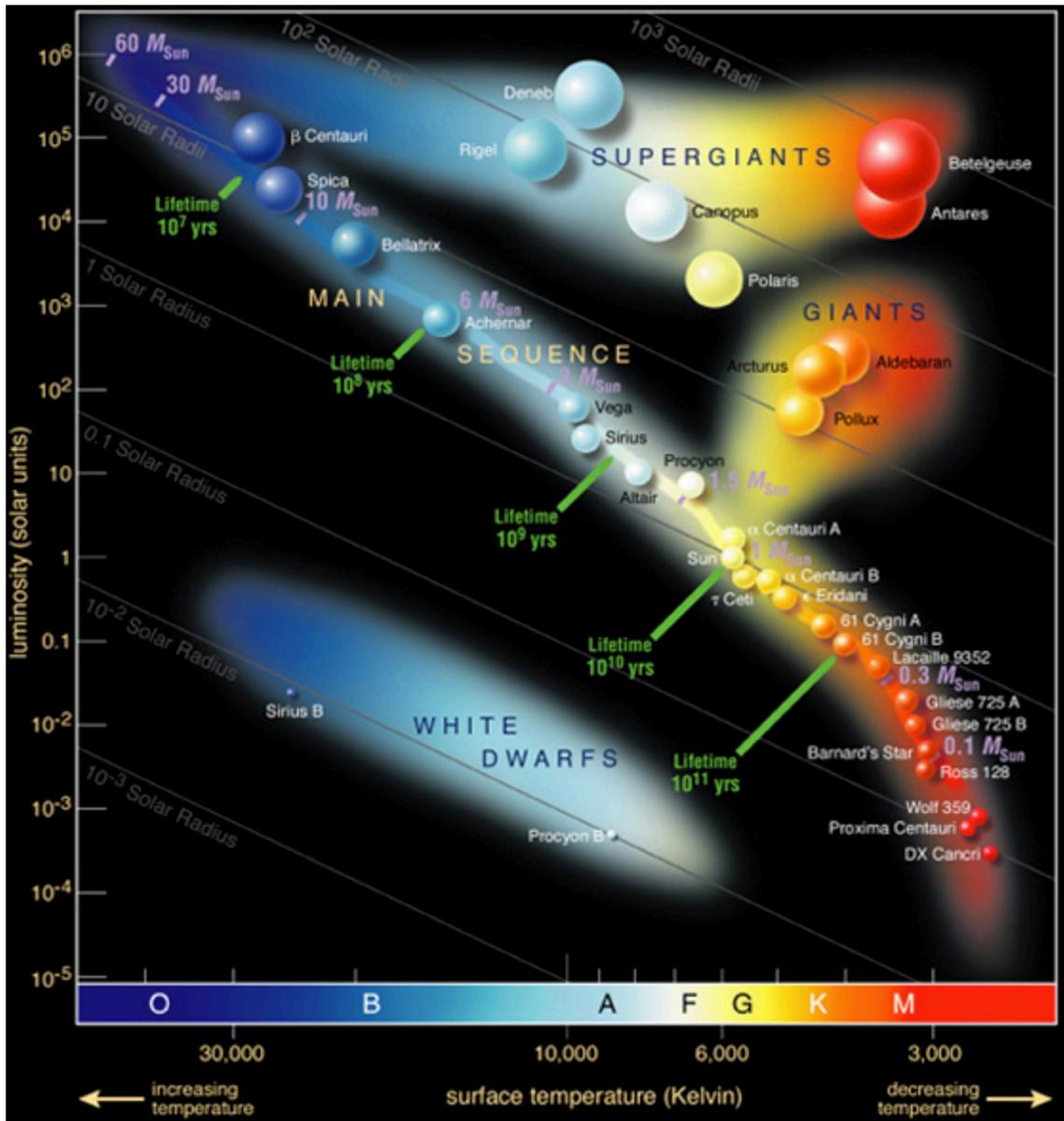


그림 3. Hertzsprung–Russell diagram

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.

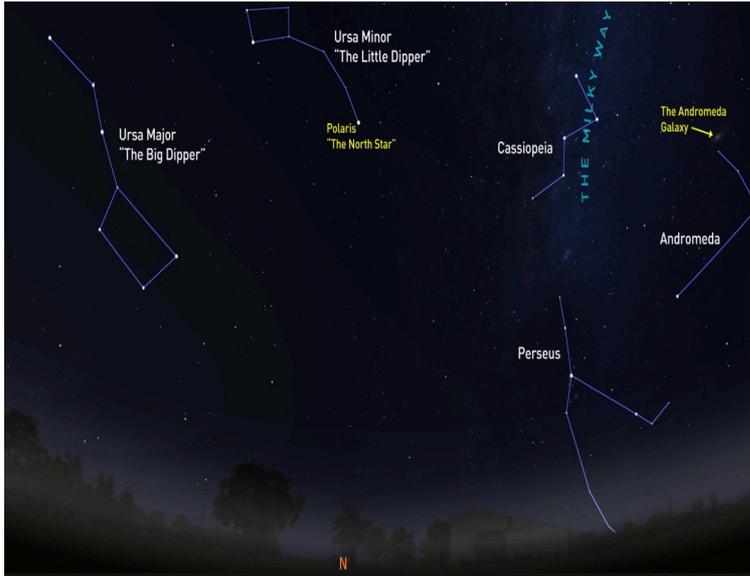
출처 : <https://www.eso.org>

별들을 밝기, 질량, 표면 온도 등으로 구분하여 나타낸 HR 도표 (Hertzsprung–Russell diagram, 그림 3) 에 따라서 모든 별들을 각각의 분광 등급으로 나눌 수 있습니다. O등급의 별일 수록 뜨거운 별이고 M등급의 별일 수록 차가운 별입니다. HR 도표는 많은 정보를 나타내줍니다. HR 도표의 표면온도는 Wien의 변위법칙을 통해서 분류할 수 있지만, 지구로부터 멀리 떨어진 항성의 경우는 Wien의 법칙을 사용하기가 곤란합니다. 특정 원소의 흡수선은 일정한 온도 범위 내에서만 나온다는 사실이 밝혀진 후, 흡수선의 변화 양상에 따라 (거리에 관계없이) 항성들을 분류할 수 있게 되었습니다. 바로 분광학을 이용하는 방법입니다. 항성 분류에 가장 중요한 변수로는 질량을 들 수 있습니다. 특히 별이 태어날때의 초기질량은 앞으로의 항성 진화 및 항성의 최종 운명까지 결정하는 가장 중요한 요소가 됩니다. 별들은 그들이 태어날때의 초기 질량에 따라서 미래가 달라집니다. 특히나 초기질량이 태양온도의 10배 정도 되는 큰 별일 경우에는 결국 초신성이라는 별로 진화하게 됩니다. 여기에서 우리가 왜 별들의 후손인지 알 수 있게 됩니다.

별과 인간

130억년전 우주의 시작, 즉 우주 대폭발(Big Bang)과 함께 만들어진 가장 오래된 원소들은 수소, 헬륨, 그리고 리튬입니다. 빅뱅으로부터 어느 정도 시간이 지난 후, 우주 형성 초기에 널리 퍼져있던 수소와 헬륨 원자들이 하나 둘 뭉치기 시작하면서 수많은 초기 별들이 탄생하였습니다. 이 별의 내부에서 만들어질 수 있는 원소들로는 탄소, 산소 그리고 질소 등이 있습니다. 별 내부의 핵 융합 반응은 다양한 원소를 만들어 낼 수 있으며 원자번호 56번 철까지 만들어 낼 수 있습니다. 수소와 헬륨 원자들의 뭉쳐있는 정도에 따라서 별들의 크기가 결정 되었고, 별들의 크기가 점점 커질수록 별 중심으로 끌어당기는 중력의 세기가 커졌습니다. 고온, 고압과 함께 수소와 헬륨 원자들에게 변화가 일어났고, 아주 오랜 시간이 흐른 뒤, 결국 불안정해진 별은 엄청난 폭발을 일으키게 되는데 철보다 무거운 원소들은 반드시 이 초신성의 폭발과 함께 만들어 집니다. 초신성이란 별의 수명이 다해갈 무렵, 중력에너지가 폭발하면서 만들어지는 작은, 하지만 아주 밝은 에너지 폭발을 의미합니다. 광도가 극도로 높으며, 폭발적인 방사선을 일으킵니다. 물론 초신성의 폭발은 무거운 원소 뿐 아니라 가벼운 원소도 만들어 냅니다. 따라서 우주를 구성하고 있는 모든 물질들 중 무거운 물질 대부분은 별의 내부에서 만들어 졌습니다.

별이 가지고 있던 수많은 원소들과, 별 폭발에 의해 새로이 형성된 원소들은 별 주위 그리고 우주 멀리로 흩어 졌습니다. 적절한 원소들의 조합과 조건이 갖춰진 행성에서는 또 한번의 적절한 유기 원소들의 조합과 조건으로 생명이 탄생하였습니다. 또한 여러 생명체의 끊임 없는 진화와 시간의 흐름에 따라서 인간과 같은 생물도 생겨났습니다. 북두칠성과 함께 북쪽 하늘을 대표하는 별자리에는 카시오페이아가 있습니다. 몇 년전 우리나라 연구진들은, 330년 전 거대한 별이 폭발해 생긴 '초신성'의 잔해에서 다량의 인(P)을 발견했습니다. 인은 생명체 필수 원소로 DNA를 이루는 뼈대입니다. 거대한 별의 내부에서 핵융합으로 인이 만들어졌고, 별이 폭발할 때 우주에 뿌려진 것으로 생각됩니다. 초신성 잔해들을 살펴보면 우리 은하에서도 100년당 평균 약 2-3 번의 초신성 폭발 사건이 일어나고 있음을 알 수 있습니다. 초신성은 무거운 원소들의 생성에 절대적인 역할을 하면서도 폭발로 인한 충격파로 새로운 별 형성에 방아쇠 역할도 합니다. 표지 사진은 가장 유명한 초신성 폭발 사진중 하나입니다. 지구로부터 6500광년 거리에 떨어진 게 성운은 전파에서부터 적외선, 가시광선, 자외선 그리고 X선까지 스펙트럼 전역에 걸쳐 전자기파를 뿜어내는 몇 안 되는 천체 가운데 하나입니다.



“ 카시오페이아자리 근처의 초신성 잔해에서 다량의 인(P)을 발견했습니다.”

그림 4. 카시오페이아 자리

출처 :theweathernetwork

빅뱅 이론이 확립된 후 우리는 주기율표에 있는 수 많은 원소들이 어디서 왔는지, 왜 이렇게 다양한 원소들이 있는지 알 수 있습니다. 초신성 폭발로 인한 여러 원소들의 우연한 조합으로 인하여 생명체가 탄생 하였기에, 우리 몸을 구성하고 있는 모든 유기물 들은 별의 내부에서 만들어졌다는 말과도 같습니다. 우리 몸을 구성하는 모든 원소 들도 초신성 폭발로 인한 물질들 이지만, 지구상의 모든 유기물, 무기물등도 초신성 폭발의 잔재입니다.

우리는 물고기, 원시 세포의 후손 이면서, 지구의 후손이고 또 별들의 후손입니다. 우주가 만들어낸 우리가 이제는 다시 그 우주를 생각하고 있습니다. 우리가 먼 훗날 또 다른 우주를 만드는 데에 작은 기여를 하는 동안 여전히 우주는 우리를 만드는데에 큰 기여를 해줍니다. 우리 모두는 별에서 왔습니다. 우리들은 모두 별들의 후손입니다. 별을 생각하고 바라보는 것만으로도 우리의 가슴은 늘 설레입니다. 인류라는 존재는 우주라는 찬란하고 광활한 하늘에 떠다니는 한 점 티끌에 불과하지만, 밤하늘을 바라보며 별 빛과 함께 하고 싶다고 생각하는 이유는 바로 우리가 그들의 후손이기 때문이 아닐까요?

Minjae Kim (김민재)

mkim@astrophysik.uni-kiel.de

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

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

- 칼럼 목록

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

References :

- Pictures

표지 그림 : ESA

그림 1 : Peter Morenus

그림 2 : 한국 천문 연구원

그림 3 : ESO

그림 4 : theweathernetwork

- Websites

사이언스 북스, <http://sciencebooks.tistory.com/986>

뉴욕 매거진, <https://www.thecut.com/2014/04/my-dad-and-the-cosmos.html>