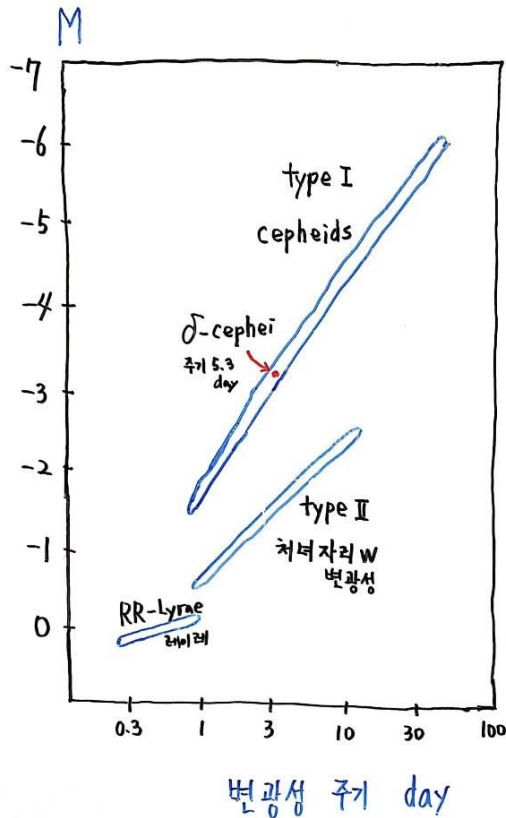


제 11 회 137 억년 우주의 진화 9강 노트

(박문호 박사님의 강의를 요약 정리한 내용입니다.)



천문학 역사에서 가장 중요한 도표이다. 이 도표로부터 천문학이 시작되었다고 할 수도 있다.

리비트가 변광성을 분류한 도표이다.

태양의 겉보기 밝기는 -27 등성이다. 그러나 절대 밝기는 4.8 등성이다.

인류가 측정할 수 있는 것은 겉보기 밝기뿐이다. 겉보기 등급은 별이 사진 건판에 찍힌 지름을 통해서 측정한다.

y 축은 절대 밝기이다. x 축은 변광성의 주기이다. 0.3 일부터 100 일까지 주기가 있다.

인류가 우주를 이해하는데 출발점이 된 도표이다.

3 종류의 변광성으로 분류 되었다.

거문고 자리 RR-Lyrae 변광성과 처녀자리 w 변광성인 type 2 변광성, 그리고 Type 1 Cepheid 변광성이다.

C

$$M = 5 \log d - 5$$

↑ 겉보기 등급 ↑ 절대 ↓ 거리

100 pc 1 연주시차

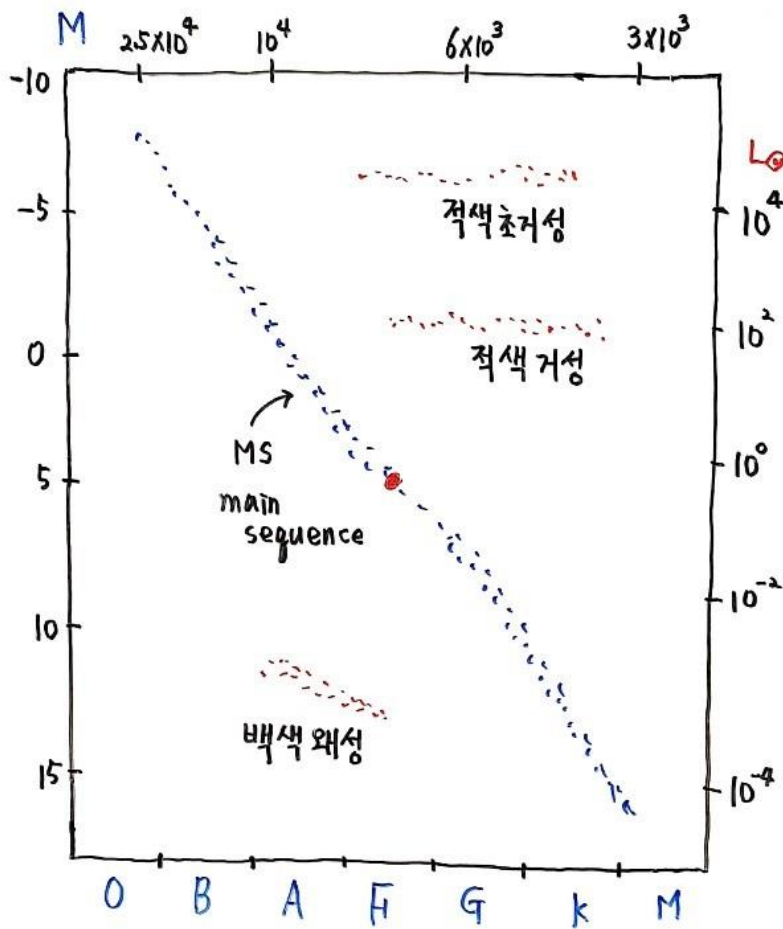
1 pc → 3.26 광년

$$M = -2.81 \log P - 1.43$$

리벨 주기 day

변광성의 주기를 알면 절대등급(M)을 알 수 있게 되고, 그 절대등급을 통해 별까지 거리 d를 구할 수 있게 되었다.

또 하나의 도표를 알아야 한다.



H-R
diagram

spectral class
of star $G_2 \rightarrow \text{SUN}$

러셀-헤르츠
스펙트럼

개년

\Rightarrow 표면 온도

20만개 별

y 축은 별의 절대 등급이다.

별은 밝기가 핵심적 기준이 된다.

눈으로 본 밝기는 기준이 될 수 없다. 모든 것은 사진이 기준이 된다.

천문학에 관한 정보는 사진과 스펙트럼 분석 밖에 없다.

별의 밝기는 사진에 남은 빛의 직경과 비례한다. 그것으로 등급을 매긴다.

인간이 할 수 있는 일은 비교하는 것과 카운트하는 일이다. 비교가 더 단순해서 누구나 할 수 있다.

비교를 위해서는 절대값이 필요하다. 그 절대값을 찾기 위해 천문학자들이 몸부림을 쳤다.

x 축은 별의 스펙트럼 분류이다. 물리적으로 별의 외각 대기층을 구성하는 원자의 이온화 정도이다.

1881년 하버드 대학교 천문대의 책임자였던 에드워드 피커링(Edward Pickering) 교수에게는 골치 아픈 문제가 하나 있었다. 천문대에서 관측한 자료 정리와 분석을 위해 평소 남자 조수들의 작업 수준에 불만족했던 피커링은 "차라리 우리 집 하녀가 더 잘 하겠다"라는 말을 자주 했다고 한다. 그래서 그는 마침내 남자 조수들을 해고하고 그의 집 하녀에게 그 일을 맡겼다.

피커링의 조수 중 한 명인 애니 점프 캐논(Annie Jump Cannon)은 천문학에 탁월한 공헌을 했다.

캐논은 현재도 사용되고 있는 별들의 분류체계를 고안한 인물이다. 캐논은 별의 스펙트럼을 수소의 흡수 스펙트럼 선의 세기에 따라 A, B, C, ..., P까지 16종류로 구분하였고, 그 후 흡수선의 세기와 온도가 깊은 관련이 있음을 알고 별들의 스펙트럼 형을 온도가 높은 것부터 순서대로 'O, B, A, F, G, K, M' 7개로 재 분류하였다. 각각의 스펙트럼 형은 다시 고온의 0에서 저온의 9까지 10등급으로 세분된다. 캐논은 이를 잘 외울 수 있게 하기 위해 '오, 착한 소녀야 키스해줘! (Oh, Be A Fine Girl...Kiss Me!)'와 같은 구절을 만들기도 하였다.

별의 표면 온도는 3000K에서 25,000K까지 분포한다. 태양은 G2에 해당된다. 태양의 절대등급은 4.8이다. 200,000개의 별을 스펙트럼과 온도(표면 밝기: 광도)로 분류한 결과 주 계열성(MS: main sequence), 적색거성(red giant), 적색 초거성(red super giant), 백색왜성(white dwarf)으로 분류되었다.

적색 초거성이 AGB 별이다. 태양 반지름의 300배나 된다. 부피는 1백만배이다. 생명의 원소인 C, H, N, O, P가 모두 여기서 만들어 진다.

이 도표가 이후에 H-R(Hertzsprung-Russell) diagram라고 불린다.

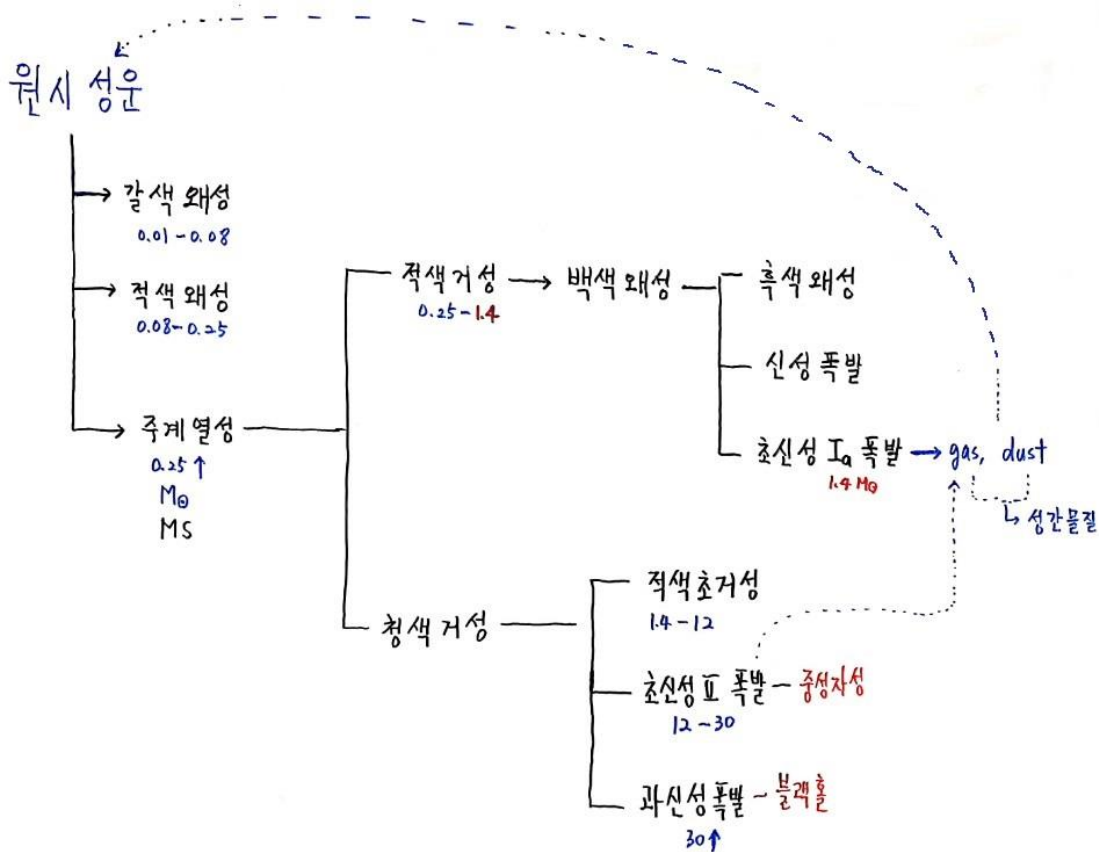
밤하늘 별의 80%가 MS 계열의 별이다. 태양은 MS에서 100억년을 머문다.

모든 학문은 동일한 프로세스를 밟는다.

처음에 데이터를 모은다. 그리고 분류한다. 다음에 연역적으로 법칙을 추론해 낸다.

빅 데이터 시대에는 이 방법을 쓰지 않는다. 왜냐하면 전수 조사하면 통계가 필요 없기 때문이다.

그래서 최근에 와서는 이론이란 것이 별로 없다.



모든 별은 원시 성운에서 시작한다.

성운은 성간 물질(ISM: inter stellar medium)이 응축된 것이다.

원시 성운에서 처음 나오는 것이 갈색왜성(brown dwarf)이다.

태양질량의 0.01~0.08 배 미만이다. 우주에 엄청나게 많다. 발견 된지 50 여년 밖에 되지 않는다.

밝기가 너무 어두워서 발견이 늦었다. 핵 융합을 하지 못한다. 중력수축에 의한 열로 빛을 낸다.

다음은 적색왜성(red giant)이다. 태양질량의 0.08~0.25 배 인 별이다. 잘 보이지 않는다. 그러나 밤 하늘에 가장 많은 별이다.

다음은 주 계열(MS: main sequence)성이다. 태양질량 0.25 배 이상인 별이다.

주 계열성은 적색거성과 청색거성으로 나누어 진다.

적색거성(red giant)은 많지 않다. 1000 개중 1 개 정도이다. 베텔게우스, 안타레스처럼 굉장히 밝다.

태양질량의 0.25~1.4 배 인 별이다. 태양질량 1.4 배는 찬드라세카르 리미트이다.

인도 출신 찬드라세카르가 1930 년 영국 캠브리지 대학으로 유학 가던 중 여객선 선실에서 태양질량보다 1.4 배 이하인 모든 별은 마지막에 백색왜성이 된다는 것을 증명했다. 그 후 53 년이 지나 이 찬드라세카르 리미트로 1983 년 노벨상을 수상했다.

적색거성은 백색왜성이 된다. 백색왜성의 core 는 다이아몬드로 되어 있다. 백색왜성은 흑색왜성으로 생을 마감한다. 백색왜성의 자기장은 100 Tesla 이다. 중성자성의 자기장은 1 억 Tesla 이다.

백색왜성이 적색거성을 만나면 쌍성이 된다. 백색왜성이 적색거성으로부터 물질을 흡수하여 핵융합을 일으키면 순간적으로 폭발한다. 이것이 신성(nova)폭발이다. 수 천년 주기로 폭발을 일으킨다.

밤 하늘 별의 50%는 쌍성으로 되어 있다. 복두칠성도 쌍성이다.

다음은 초신성 I_a 폭발이다.

백색왜성이 적색거성으로부터 물질을 흡수하여 그 질량이 태양질량의 1.4 배에 달하면 그 별 전체가 핵융합을 하여 폭발한다. 지구 질량의 50 만배가 넘는 질량이 1-2 초 사이에 핵 융합하여 아무것도 남기지 않고 가스와 dust 를 우주에 뿌린다. 이것이 초신성 I_a 폭발이다. 초신성 I_a 가 폭발하며 내는 에너지가 1000 억개 별이 내는 에너지보다 크다. 초신성 I_a 가 폭발하면 10 억 광년 떨어져도 보인다

허블 망원경으로 초신성 I_a 500 개 이상 관측했다. 허블은 우주가 가속 팽창한다는 증거를 초신성 I_a 를 통해서 밝혔다.

별에 관한 정보는 모두 빛으로 얻는다. 빛의 스펙트럼을 분석하여 별에 관한 정보를 얻는다.

스펙트럼 분석을 통해 질량, 화학적 조성, 중력 등 모든 것을 분석한다.

별의 밝기는 겉보기 밝기와 절대 밝기가 있다. 변광성을 통해서 겉보기 밝기와 절대 밝기의 상대적 비례를 알 수 있었다.

그러나 변광성까지의 거리를 아는 것이 문제였다. 표준광원을 찾는 것이 중요했다.

표준광원을 알면 그 곳까지의 거리는 계산할 수 있다. 초신성 I_a 가 표준 광원 역할을 했다.

초신성 I_a 의 질량이 태양 질량의 1.4 배 이므로 이것을 통해 정확히 에너지와 밝기를 계산할 수 있다.

초신성 I_a 폭발 시 최대 밝기는 모두 같다. 그러므로 이들의 겉보기 밝기만 측정하면 별까지 거리를 계산할 수 있게 되었다.

적색거성은 3 가지로 나누어 진다.

먼저 나오는 것이 적색 초 거성(RSG: red supergiant)이다. 태양 질량의 1.4~12 배까지 이다.

부피로는 우주에서 가장 큰 별이다. 베텔게우스와 안타레스가 가장 밝고 잘 알려진 적색 초 거성이다.

폭발은 하지 않고 가스를 뿜어 낸다.

두 번째는 초신성II 폭발이다. 태양질량의 12 배~30 배이다.

우리 갤럭시에서 지금까지 기록된 초신성II폭발은 3 번이다.

티코 브라헤 초신성, 케플러 초신성, 1054 년 송나라 때 기록된 crab nebula 초 신성이다.

crab nebula 초신성은 송나라 사서에 23 일 동안 대 낮에 보였다고 한다.

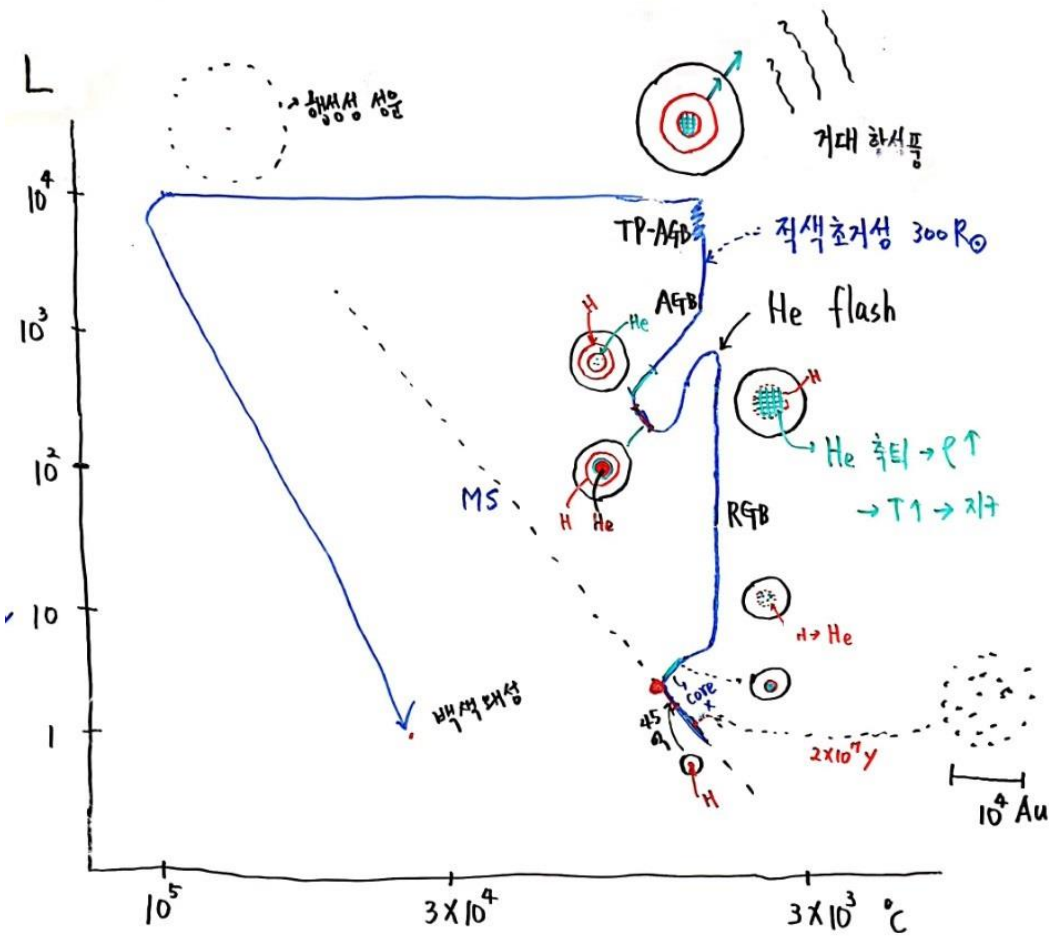
금성보다 더 밝다. 초 신성II는 폭발하고 중성자별이 된다.

마지막은 과신성(super giant) 폭발이다. 태양질량의 30 배 이상이다. 과신성은 폭발 후 블랙홀이 된다.

초 신성은 우주 물질 순환 펌프 역할을 한다.

별의 마지막은 백색왜성, 중성자 별, 블랙홀이다.

별을 공부하는데 제일 중요한 지식은 별의 일생을 암기하는 것이다.



밤 하늘 별의 80%가 주 계열 성이다.

주 계열성은 별의 core에서 수소가 핵 융합한다.

태양은 46 억년 동안 수소 핵 융합을 했고 앞으로도 50 억년 이상 주 계열성에 머물 것이다.

별은 색깔을 봐야 한다. 표면 온도가 3000 도 정도면 붉은색, 6000 도 정도면 노란색, 10,000 도 정도면 흰색으로 보인다. 20,000 도가 넘으면 청백색으로 보인다.

성간 물질이 모여 2000 만년 정도 중력 수축을 하면 주 계열성으로 진입한다.

별의 운명은 태어날 당시 질량에 의해 결정된다.

초기 질량이 태양의 20 배 정도면 마지막에는 중성자 별이 되고 30 배가 넘으면 마지막에 블랙홀이 된다.

태양 질량의 8% 미만은 별이 되지 못한다. 이러한 천체들을 갈색왜성이라 한다.

핵 융합을 하지 못하지만 중력 수축에 의해 열을 낸다.

태양의 100 배 이상 되면 별이 되기 힘들다.

빅뱅 후 3~5 억년 뒤에 생긴 1 세대 별 중에는 태양보다 260 배 큰 별도 있었다고 한다.

그러나 대부분 200 배 이내이다. 별의 질량이 크면 오래 살지 못한다.

태양은 100 억년 이상 살지만 질량이 무거운 별은 1000 만년, 100 만년, 심지어는 10 만년 밖에 살지 못하는 별도 있다.

부피가 태양의 100 만배 되는 별들도 있다. 부피가 크면 방출하는 빛의 양이 많다. 그러나 온도는 내려간다.

그래서 붉은 색이 된다. 베텔게우스나 안타레스는 태양 부피의 100 만배 이상 된다.
앞으로 50 억년 뒤에는 태양도 반지름이 100 배 정도 커진다. 부피는 1 백만배가 된다.
그러면 지구도 목성도 모두 그 속에 들어간다. 태양의 표면 온도는 3000 도 정도 된다. 철을 포함하여 모두 녹아 버린다.

핵융합은 Core 에서 하는지 shell 에서 하는지가 중요하다.
주 계열성은 core 에서 수소가 핵융합을 하고, 적색거성은 shell 에서 수소가 핵 융합을 한다.
점근거성가지(AGB: asymptotic giant branch) 별은 shell 에서 수소와 헬륨이 교대로 핵융합을 한다.
그래서 unbalance 가 일어 나고 수축과 팽창을 반복한다. 수 만년 주기로 밝기가 변한다.
3000 도에서 영하 260 로 바뀌면 분자들이 결합을 한다. 이 과정에서 실리카가 생긴다. 지구에 실리콘이 많은 이유이다. 지구 표면의 50%는 SiO₂ 이고, SiO₂ 는 AGB 별에서 생긴 물질이다.
지구를 구성하는 원소 50% 이상이 AGB 별 단계에서 만들어 진다. 우리는 별에서 왔다.

특히 탄소가 많이 생긴다. HCN 과 CO 도 대량으로 만들어 진다.
또한 수소와 산소가 합쳐져 기체 상태의 물(H₂O)이 생긴다. 별이 만들어 지면 항상 물이 생긴다.
오리온 성단에 태평양 바다의 60 배의 물이 발견 되었다.
물과 돌의 90%는 AGB 별 단계에서 생긴다. 우리의 고향은 AGB star 이다.

AGB 별은 수축과 팽창의 반복으로 거대 항성풍이 생겨 전체 질량의 70%를 우주에 뿌린다.
주요 물질은 탄소와 산소가 결합한 분자들이다. 이들이 성간 물질이 된다.

알파붕괴와 베타붕괴의 결과물이 별이고, 방사선이고 약한 상호작용이다.
방사선은 알파선, 베타선, 감마선으로 구성되어 있다.
알파선은 알파입자의 흐름이다. 알파입자는 양성자 2 개와 중성자 2 개가 합친 것이다.
알파 입자는 잘 쪼개지지 않는다. 알파입자를 쪼개는데 필요한 에너지가 60,000eV 이다.
온도로 환산하면 1 억도가 넘는다. 알파입자는 하나의 알갱이로 활동한다.
마지막에 초 신성에서 알파입자가 분해된다.
알파입자가 분해되면 중성자가 나오고, 중성자가 양성자로 바뀌면서 주기율표의 원소들이 대거 생성된다.

천문학은 간단히 이야기 하면 주기율표를 공부하는 학문이다.
수소에서 우라늄까지 모두 빅뱅과 별에서 만들어 진다..

베타선은 전자의 흐름이다.
감마선은 포톤의 흐름이다. 베타붕괴를 하면 감마 ray(빛: 포톤)가 나온다.
처음 나오는 것이 감마 ray 이고, 중간에 에너지를 잃고 X ray 가 되었다가, 마지막에 가시광선이 된다.
태양광은 적외선 51%, 가시광선 40%, 자외선 9%로 구성되어 있다.

또한 태양에서는 엄청난 뉴트리노가 나온다.
수퍼노바가 폭발할 때 에너지의 90%를 뉴트리노가 갖고 나온다.
뉴트리노는 물질과 상호작용을 거의 하지 않는다. 지금도 1 초당 수조개의 뉴트리노가 우리 몸을 통과하고 있다.
뉴트리노를 정지 시키기 위해서는 지구를 20 개 늘어 놓아야 가능하다.

1987 년 수퍼노바 폭발시 일본에서 뉴트리노 11 개를 발견했다. 베타붕괴 시에 뉴트리노가 나온다.
 그래서 알파붕괴와 베타붕괴를 이해해야 천문학을 이해할 수 있다.

천문학은 어렵지 않다.

베타붕괴 등 핵물리학에 대한 기본 지식이 없어 어렵다고 생각한다.

첫 번째 주기율표를 암기하고 두 번째 베타붕괴를 완전히 이해하면 천문학 기본 지식의 80%가 끝난다.

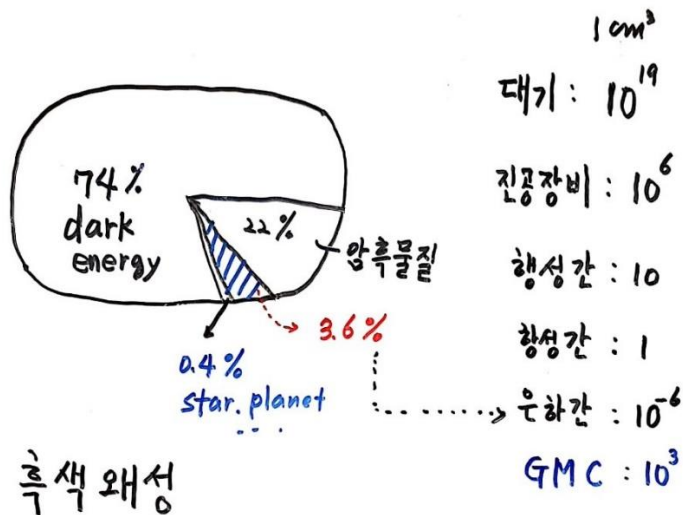
주기율표의 모든 원소가 어떻게 만들어 졌는지 정확히 안다면, 그 사람은 별, 지구, 바다, 암석, 사람 모두 아는 것이다. 주기율표의 수소와 헬륨을 제외한 모든 원소는 별 속에서 만들어 진다. 별은 전적으로 수소와 헬륨의 핵융합 이야기이다. 핵융합이 이루어 지는 장소(core or shell)와 핵융합의 조건(온도와 압력)을 이해하면 된다.

첫째 별을 분류할 수 있어야 한다.

둘째 별이 어떻게 만들어 지는가를 알아야 한다.

이 두 가지만 알면 별의 90%는 아는 것이다.

우주의 성간 물질은 대단히 희박하다.



지구 대기 중에는 1 cm^3 속에 질소와 산소 입자가 10^{19} 개 있다.

반도체 안에는 10^{23} 개의 입자가 있다.

인류가 만든 최고의 완벽한 진공 속에도 10^6 개의 입자가 있다.

행성간(지구와 화성 사이)에는 10 개 밖에 없다. 마찰력이 거의 없기 때문에 우주 공간에서 한번 돌아간 천체는 영원히 돌아간다.

별과 별 사이에는 1 개, 그리고 갤럭시와 갤럭시 사이에는 10^{-6} 개 입자가 있다.

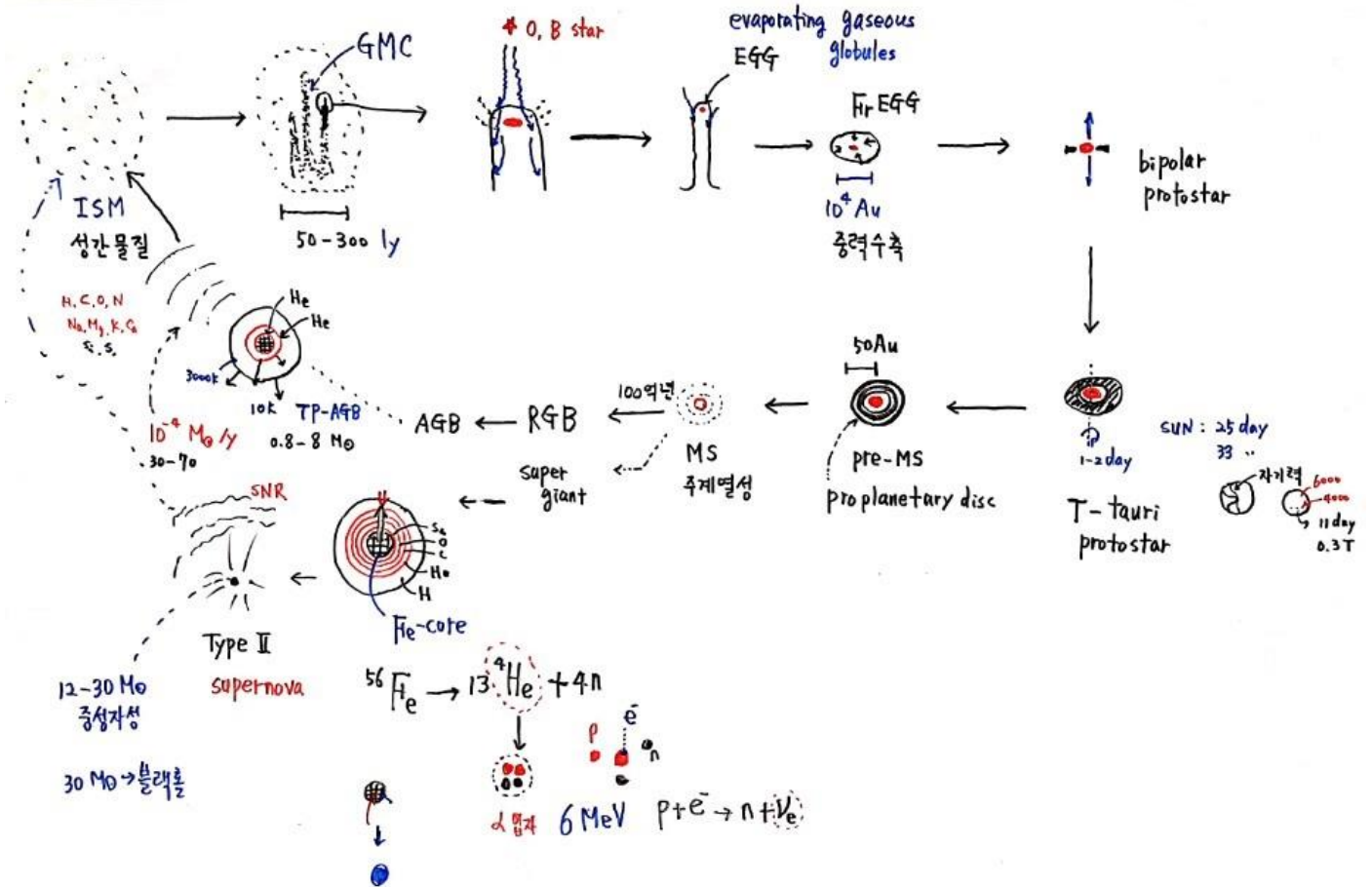
인간이 만든 최고의 진공과 갤럭시 간의 입자 개수가 10^{12} 배 즉 1 조배 차이가 난다.

우주 전체의 물질분포를 보면 dark energy 가 74%를 차지하고, 암흑물질(dark matter)이 22% 그리고 별이나 행성, 갤럭시를 구성하는 물질(matter)은 0.4%에 불과하다. 나머지 3.6%가 intergalactic gas 이다. 우주 공간이 얼마나 넓은지 다시 생각해 보아야 한다.

눈동자가 지구라면 금성, 목성은 눈썹 부근에 있고 지구와 제일 가까운 별인 시리우스는 대전쯤에 있는 것이다. 가장 가까운 갤럭시는 미국쯤에 있을 것이다. 이 공간이 얼마나 큰지 모르기 때문에 천문학을 느끼고 전율하지 못한다.

별을 만드는 거대분자구름(GMC: giant molecular cloud) 입자는 10^3 g/cm^3 개이다.
우주가 팽창할 때는 갤럭시와 갤럭시 사이 공간이 늘어난다. 그것을 암흑에너지라 한다.
그 공간이 늘어난다는 것을 초신성 I_a 가 밝혀 주었다.

별의 형성 과정을 그림으로 표현하면 아래와 같다



먼저 성간 물질(ISM: interstellar medium)이 있다.

성간 물질이 모이면 거대분자구름(GMC: giant molecular cloud)이 된다. 주변 온도는 10K(-260C) 정도 이다.
크기는 50-300 광년 정도 된다.

먼저 거리에 대하여 알아야 한다.

8분 20초
1 AU: 1억 5천만 km
1 광년: 63000 Au
지구 30 km/s, 220 km/sec
300 km/s → $10^3 \gamma$
300 km/h → $360 \times 10^6 \gamma$

1Au 는 태양에서 지구까지의 거리로서 1 억 5 천만 km 이다. 빛으로 가면 8 분 20 초가 걸린다.
1 광년(light year)은 63000Au 이다. 인공위성이 지구 한 바퀴 도는데 90 분 정도 걸린다.

지구의 공전 속도가 30km/sec 이다. 태양의 궤적시 공전 속도는 220km/s 이다.

우리 은하의 움직이는 속도는 600km/s 이다.

권총으로 쏜 총알의 속도가 300m/s 이다. 음속이 340m/s 이다. 공기 중 수소의 속도는 500m/s 이다.

1 광년을 권총의 1000 배인 초속 300km 로 달려도 1000 년이 걸린다.

시속 300km 로 달리면 3 백 6 십 만년이 걸린다.

거대분자구름 끝에는 베이비 star 가 자라고 있다.

그 위에 먼저 생긴 표면 온도가 1000 도가 넘는 O, B 형 별에서 아주 강한 자외선이 나와 구름을 Erode 시킨다.

이것을 광분해(photo evaporation) 이라고 한다.

다음 단계는 pillar 형태인 증발하는 기체 구상체(EGG: evaporating gaseous globules)가 된다.

크기가 태양계 정도이다. 성간 물질에서는 수 천 개 별이 동시에 만들어지고 있다.

다음 단계는 EGG 가 자외선에 의한 식각으로 떨어져 나와 FrEGG(free floating EGG)가 된다.

FrEGG 의 사이즈가 10^4 Au 이다. 대략 태양계 크기이다. 이 시기부터 중력 수축을 한다.

다음 단계는 gas 들이 원반 상태로 모이면, 수직 방향으로 가스 분출(bipolar outflow)이 일어나는 bipolar proto star 가 된다.

다음 단계는 대단히 빨리 자전(주기: 1-2day)하는 T-Tauri 형 proto star 이다.

태양은 자전 주기가 적도는 25 일이고 극지방은 33 일이다. 위도에 따라 자전 주기 차이로 인해 자기장 꼬임이 발생하여 자기장이 떨어져 나오는 것이 태양의 흑점이다. 태양 흑점의 주기는 11 일이고, 흑점의 온도는 4000K 로 태양 표면온도(6000K)보다 낮으며, 자기장은 0.3Tesla 로 태양 평균 자기장보다 1000 배 정도로 아주 강하다.

다음 단계는 Pre-MS 즉 주 계열성 전 단계이다.

검게 보이는 테두리(disk)가 dust 이다. 이것을 protoplanetary disk 라고 한다.

태양계 같으면 행성이 될 물질들이다. 반지름이 50Au 이다. 태양계 반지름과 거의 같다.

마지막으로 주 계열성이 된다. 점으로 표시한 것들이 행성들이다. 원시 성운에서 주 계열성까지 오는데 2000 만년 걸렸다. 주 계열성은 core 에서 수소가 핵 융합하는 별이다. 태양은 이 단계에서 46 억년을 보냈다. 앞으로 50 억년을 더 이 단계에 머문다.

주 계열성은 두 갈래로 간다. 하나는 적색거성(RGB)으로 하나는 청색 거성(super giant)으로 간다.

적색거성으로 간 별은 AGB(asymptotic giant branch) 별이 된다. AGB 별은 shell 에서 헬륨과 수소가 핵융합을 한다. core 에는 헬륨이 핵 융합하고 생긴 탄소가 축퇴되어 쌓여 있다. shell 에서 헬륨과 수소가 핵 융합을 하는데 동시에 하지 않고 교대로 한다. 그래서 unbalance 가 일어 나고 이로 인해 핵융합과 팽창을 반복하는 과정에서 밖으로 가스를 내 뿜는다. 핵 융합하는 기간이 200 년, 팽창하는 기간이 35000 년 주기로 반복한다. 이 단계를 TP-AGB(thermal pulse AGB)별이라 한다. 팽창할 때 반지름이 10,000 배까지 확장된다.

이 가스들이 성간 물질이 되고 남은 핵은 백색왜성이 된다. 모든 것이 순환된다.

내뿜는 가스는 H, C, O, N, Na, Mg, K, Ca, Si, S 등이다. 모두 AGB 에서 나온다.

이 가스를 거대항성풍(super stellar wind)라고 한다. 1 년에 태양 질량의 10^{-4} 만큼 빠져 나간다.

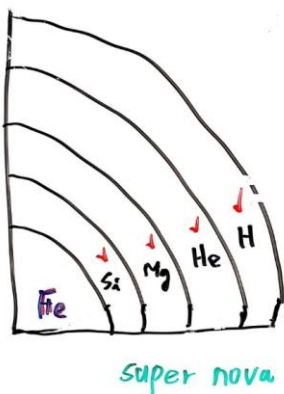
1 만년이 지나면 구성 성분의 70%를 내 뿜는다.

태양 질량의 0.8~8 배되는 별은 모두 AGB 별이 된다.

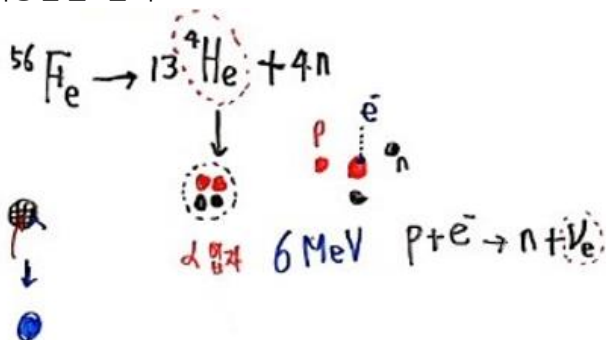
“별 빛이 바위에 스며들어 꽃이 피었네”

문학적 표현이 아니라 정확히 SCIENCE 이다.

청색거성은 초신성이 폭발하기 전에 핵융합이 양파 껍질처럼 일어난다.



core 는 아주 밀도 높은 철로 바뀐다. 철은 핵 융합하지 않지만, shell 은 양파껍질처럼 H, He, C, O, Si 모두 핵융합을 한다.



Fe 는 13 개 알파입자와 4 개의 중성자로 분해된다. 알파 입자는 양성자 2 개 중성자 2 개로 이루어져 있다.

알파 입자 당 6MeV 의 에너지를 흡입시키면 양성자 2 개와 중성자 2 개로 분리된다.

압력이 높아져 전자가 양성자와 합쳐지면 중성자와 뉴트리노가 나온다.

이 과정에 의해 Fe 속의 양성자가 모두 중성자로 바뀌면서 중성자 별이 된다.

양성자가 중성자로 바뀔 때마다 뉴트리노가 나온다. 뉴트리노에서 상상을 초월한 beam 이 나온다. 이 beam 이 core 에 있던 Fe 를 밀어 내면서

별은 핵융합에 의한 복사 에너지와 중력이 균형을 맞춤으로서 안정된다.

철은 핵융합을 하지 않음으로 복사 에너지가 없어진다. 그러면 중력에 의해 철이 붕괴되면서 뉴트리노가 빠져 나간다. 뉴트리노 압력에 의해 수퍼노바가 폭발하며, 뉴트리노가 수퍼노바 에너지의 90%를 갖고 나간다.

이 현상이 수퍼노바II 폭발이다. 광속도의 50% 정도로 퍼져나가면서 수퍼노바 잔류물(SNR: supernova remnant)를 우주 공간에 뿌린다. 이들도 성간 물질이 된다. 납보다 무거운 원소는 수퍼노바에서 왔고 생명과

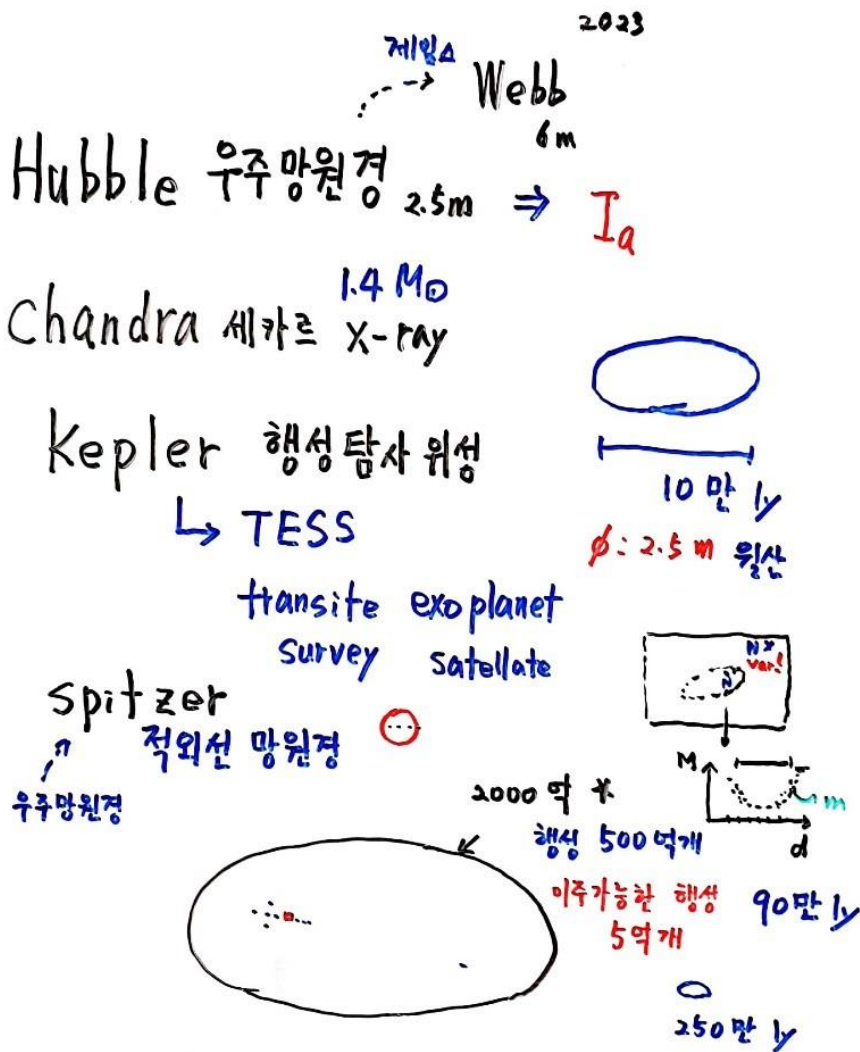
관계되는 원소는 AGB 별에서 왔다. 심은 남아 중성자 별이 된다. 중성자 별은 1 초에 33 회 회전한다.
태양 질량의 12~30 배의 별은 이 과정을 겪는다.

초기 질량이 태양 질량의 30 배가 넘으면 붕괴하여 블랙홀이 된다.

별의 운명은 탄생 초기의 질량이 결정한다.

별의 마지막 단계는 백색왜성, 중성자 별, 블랙홀 3 가지이다. 우리 태양은 백색왜성으로 간다.

이것을 조사하는 우주 망원경을 알아야 한다.



제일 처음이 허블 우주 망원경이다. 렌즈 지름이 2.4m 이다. Type 1a 수퍼노바를 500 개이상 발견했다.

허블은 안드로메다 성운에서 변광성을 발견하고, 지구에서 거리가 90 만 광년이라는 것을 밝혀, 안드로메다 성운이 우리 갤럭시 밖에 있다는 것을 최초로 증명하여 일약 스타가 되었다. 그때까지 인류는 우주에는 우리 갤럭시 하나만 있다고 믿고 있었는데, 허블이 새로운 갤럭시를 발견함으로써 우주의 지평을 무한대로 넓혔다. 지금은 우주에서 갤럭시가 2000 억개 이상이 있다고 알게 되었다.

후속 망원경 제임스 웹 우주망원경(JWST: james webb space telescope)의 직경은 6.5m 이다. James 는 제 2 대

NASA 소장이자. JWST 발사는 여러 번 연기되어 2021년 쏘아 올릴 예정이다. 허블 우주 망원경이 지표로부터 610km 라는 비교적 낮은 궤도상에 위치하고 있어 광학 기기에 이상이 있을 때 수리나 부품 교체가 가능했던 데 반해, JWST 는 허블 우주 망원경처럼 지구 주위를 도는 것이 아니라 지구에서 150 만 km 떨어진 태양-지구의 L₂ 라그랑주점에 위치하게 되어, 먼 거리 때문에 수선할 수 없다는 단점이 있다.

다음은 찬드라세카르 X-ray 망원경이 있다. 블랙홀과 중성자 별을 연구한다.

다음은 케플러 인공위성이다. 행성탐사를 주로 하고 있다. 케플러 후속으로 TESS(transit exoplanet survey satellite)를 준비하고 있다. 케플러 위성이 백조자리 부근의 전체 우주의 1/10,000 도 안 되는 영역에서 1년 사이에 행성을 1000 개이상 발견했다.

우리 은하에 2000 억개 별이 있는데 이 중 500 억개는 행성을 가지고 있다고 보면, 인간이 이주 가능한 행성이 5 억개는 된다고 예상한다. NASA 에서 지구 유사 인덱스(ESI: earth similarity index)를 개발했다

$$ESI = \sum_{k=1}^n \left(1 - \left| \frac{X - X_{i0}}{X + X_{i0}} \right| \right)^{\frac{w}{n}}$$

$$X_{i0} \rightarrow 300K$$

$$ESI \rightarrow 0.8 \uparrow$$

ESI 가 0.8 이상이면 인류가 살 수 있다고 생각하는데 지금까지 2 개 행성을 발견하였다.

Spitzer 적외선 망원경도 있다.

Spitzer 는 우주 망원경이란 개념을 처음 만든 사람이다.

C

100 PC
연주시차

변광성 주기 day

$m - M = 5 \log d - 5$

↑ 밝기 등급 ↑ 절대 등급 ↓ 거리

1 PC → 3.26 광년

$M = -2.81 \log P - 1.43$

리벳 주기 day

인간이 측정할 수 있는 것은 겉보기 등급(m) 밖에 없다.

알고 싶은 것은 별까지의 거리(d)이다.

리벳이 변광성의 밝기 주기와 절대등급간의 관계를 발견함으로써 절대등급(M)을 알 수 있게 되었다.

사진에 나타나는 점의 크기로서 겉보기 등급을 재었다.

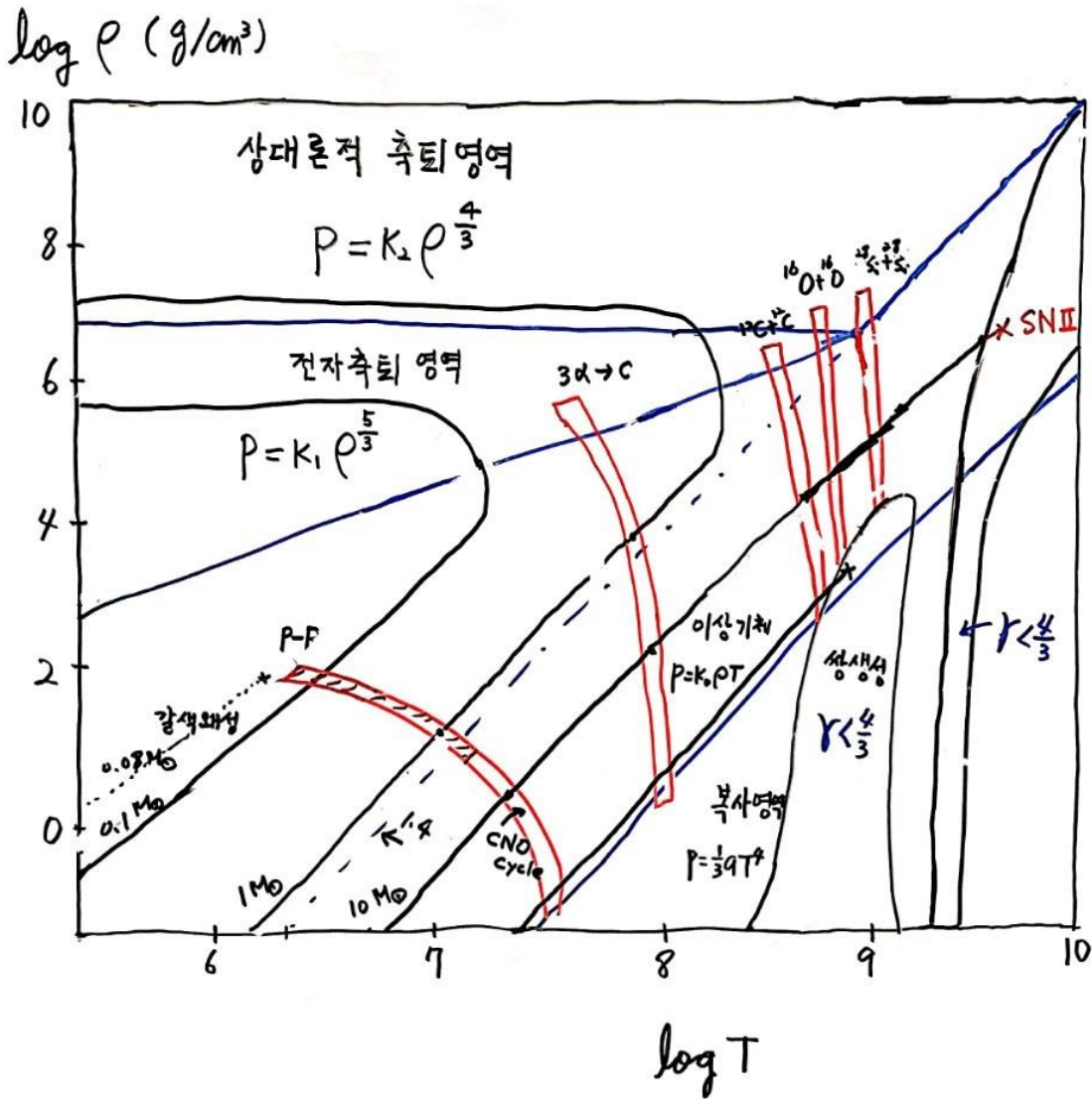
연주 시차를 이용한 거리 측정은 100PC(약 300 광년)이내에 있는 천체만 가능했다.

허블은 안드로메다 성운에서 변광성을 발견하고, 지구에서 거리가 90 만 광년이라는 것을 밝혀, 안드로메다 성운이 우리 은하 밖에 있다는 것을 최초로 증명하여 일약 스타가 되었다. 그때까지 인류는 우주에는 우리 은하 하나만 있다고 믿고 있었는데, 허블이 새로운 은하를 발견함으로써 우주의 지평을 무한대로 넓혔다. 허블은 밝기의 주기를 알았으므로 절대 등급을 알 수 있었다. 그래서 거리를 계산할 수 있었다.

현재는 지구와 안드로메다 간 거리는 250 만 광년으로 정정되었다.

(2 교시)

별에 관한 모든 물리가 이 도표 속에 들어 있다.



세로 축은 별의 밀도에 로그를 취했다. 대단히 큰 숫자이다. 밀도가 운명이다.
 로그 0 은 1 이므로 물의 비중과 같다. 태양 core 의 비중은 150 이다. 플라스마 상태이다.
 로그 10 이면 비중이 물의 밀도의 100 억배라는 것이다. 10,000 톤/cm³이다.

가로 축은 별 core 의 절대 온도이다. 좌표 10 은 100 억 K 도라는 뜻이다.
 이 도표는 <항성내부구조 및 진화>라는 교과서 한 권의 내용이다.
 이 도표 하나면 밤하늘 무수한 별 들을 모두 알 수 있다.

가로축 6 과 7 사이에서 오른 쪽 위 코너로 연결 짓는 선을 그린다.
 이 선이 찬드라세카르 질량한계선(Chandrasekhar limit)이다.
 찬드라세카르는 인도 과학자로서 1930 년에 영국 캠버리지 대학 유학 길에, 영국으로 가는 여객선 안에서 풀었던
 수식이다. 태양 질량의 1.4 배 이하의 모든 별은 백색왜성으로 일생을 마친다는 내용이다.

이 때의 결과로 1983 년에 노벨상을 받았다.

태양 질량의 1.4 배, 찬드라세카르 질량한계선은 모든 별의 운명을 가르는 기준선이다.

가로 축 7 과 8 사이에서 찬드라세카르 리미트와 평행하게 선을 그린다.

그리고 세로 축 6 과 8 사이에 수평으로 선을 찬드라 세카르 리미트와 접하게 긋는다.

두 선이 마주친 지점에서 세로 축 2 와 3 사이로 선을 긋는다.

도표가 4 개 구역으로 나누어져 있다.

각 구역의 이름은 왼 쪽 위에서부터 각각 상대론적 축퇴영역, 전자 축퇴영역, 이상 기체영역, 그리고 복사 영역이다. 별 속의 물리는 이 4 영역으로 표현된다.

상대론적 축퇴영역의 압력 $P = K_2 \rho^{\frac{4}{3}}$ 이다. 전자축퇴 영역의 압력 $P = K_1 \rho^{\frac{5}{3}}$ 이다.

이상 기체 영역의 압력

또 하나의 영역은 별이 붕괴되는 영역이다.

온도가 10 억도 정도로 높아지면 포톤이 양전자와 전자로 나누어 진다. 쌍 생성 되는 영역이다.

쌍 생성 되면 입자의 개 수가 달라진다. 입자의 개수가 달라지면 별의 안정성이 깨어져 붕괴되어 버린다.

마지막 한 영역이 수퍼노바 타입 2 영역이다.

이 영역에 들어 가면 입자가 전자와 반전자로 변환되며 수퍼노바처럼 터진다. 불안정한 영역이다.

C, H, N, O, Si 등은 모두 별에서 생겼다. 우리 모두는 별에서 왔다.

엄밀한 이야기다. 문학적 표현이 아니다. 진짜 별에서 왔다.

또 한 영역은 핵 융합하는 영역이다.

밴드를 형성한다. 기울기가 각각 다르다. 오른 쪽으로 갈 수록 기울기가 크다. 수직에 가까워 진다.

모두 5 개의 핵 융합하는 영역이 있다.

맨 아래는 밴드에는 2 가지 핵융합이 있다.

왼쪽이 수소가 핵 융합하는 p-p chain 이고, 오른 쪽이 CNO cycle 이다.

그 위가 3 알파 프로세스, 그 위는 탄소, 그 위는 산소, 그리고 마지막이 실리콘을 핵융합 영역이다.

모든 것은 밀도와 온도가 결정한다.

Density is Destiny.

밀도가 운명이다.

별의 무게 별 운명을 살펴보자

태양 질량의 10% 인 별은 p-p chain 에서 핵융합을 한다. 주 계열성이 된다.

그러나 다음 핵융합 영역인 3 알파 영역에 못 가고 외쪽 옆으로 빠진다. 온도가 바뀌어도 밀도가 일정하다.

이것을 축퇴되었다고 한다.

다음은 태양의 운명을 보자.

태양의 core 는 수소이다. 태양도 p-p chain 에서 핵융합을 한다. 주 계열성이다.

45 억년 동안 핵 융합을 해왔고 앞으로도 50 억년은 할 것이다. 한 곳에서 100 억년을 보낸다.

수소가 다 타고나면 P-P chain 을 빠져 나온다.

3 알파 프로세스까지 갈 때까지 core 에서는 핵 융합을 하지 않고 shell 에서 수소가 핵융합을 한다. 부피가 급격히 커져서 적색 거성이 된다.

core 온도가 높아져 1 억도 가까이 되어 3 알파 프로세스에 가면 헬륨이 핵 융합한다.

헬륨이 핵 융합하면 탄소가 생성된다. 그러나 태양은 질량이 작아 온도를 더 높이지 못해 탄소를 핵 융합하지 못한다. 태양 크기의 별은 방향을 바꾸어 축퇴 상태로 들어 간다. 탄소가 축퇴되면 다이아몬드가 된다. 태양은 다이아몬드 별이 된다.

주 계열성이란 core 가 수소 핵융합을 하는 곳이다. 밤하늘 별의 80%가 주 계열성이다.

핵융합을 하는 장소가 core 나 shell 이냐, 핵융합 물질이 수소나 헬륨이냐를 잘 구분해야 한다.

4 가지 factor 의 조합이다.

core 가 핵 융합하느냐, shell 이 핵 융합하느냐의 문제다. shell 은 대부분 핵 융합하지 않는다.

별은 반지름의 10%인 core 에서만 주로 핵 융합을 한다.

90%에 해당하는 나머지 영역에 있는 수소는 핵융합을 하지 않는다.

이유는 온도와 압력이 핵융합 조건에 맞지 않기 때문이다.

주 계열성의 정의는 별의 core 에서 수소가 핵 융합하는 별이다.

core 가 아닌 shell 에서 수소가 핵융합 할 때가 있다.

shell 에서 수소가 핵융합 하는 것이 적색 거성이다. shell 에서 핵융합 하면 부피가 커진다.

밝기도 1000 배까지 밝아진다. . red giant 이다

core 와 shell 이 각 각 핵융합 할 수 있고, core 와 shell 이 동시에 할 수도 있다.

그리고 수소를 핵 융합하는 것과 헬륨을 핵 융합하는 것이 있다. 이 조합을 잘 이해해야 한다.

태양은 탄소를 핵 융합하지 못한다. 태양에도 탄소가 있다. 헬륨이 타고난 재가 탄소이다.

3 억도 이상이 되어야 탄소를 핵융합 할 수 있는데, 태양은 질량이 모자라 탄소를 핵융합 할 수 없다.

태양 질량의 3 배 이상 되어야 탄소를 핵융합 할 수 있다.

별은 핵융합을 한다.

p-p chain 과 CNO cycle 그리고 3 알파프로세스에서 핵 융합한다.

3 알파프로세스는 알파 파티클 3 개가 결합하여 탄소가 되는 과정이다.

알파 파티클은 양성자 2 개이다. 3 알파는 양성자 6 개 이다. 양성자 6 개인 원자가 탄소이다.

탄소가 생명이다. 그래서 생명 이야기가 진행 될 수 있다.

기원을 알아야 한다.

탄소가 어디서 왔는지 알아야 한다.

헬륨원자핵 3 개 결합한 것이 탄소이다.

산소는 탄소에 알파 파티클 하나 붙이면 된다.

C, O, Si 모두 별에서 왔다. Si는 하루 만에 핵 융합이 끝날 수 있다.

그래서 우리는 별에서 왔다는 것이다.

확실하게 예측할 수 있는 것은 50 억년 이후에 지구는 없어 진다는 것이다.

태양이 red giant가 되어 지구와 달, 목성까지도 태양 속으로 끌려 들어가게 된다.

태양 표면의 온도가 2000-3000 도 된다. 1500 도가 넘으면 철도 녹는다. 지구는 녹아 없어진다.

태양은 탄소 핵융합 단계를 통과하지 못한다.

그 후 태양은, 헬륨이 타고 남은 탄소가 고온 고압에 의해 다이아몬드 별이 된다.

다이아몬드 별은 수백 개가 발견되었다.

별의 수명은 질량에 달렸다.

태양보다 10 배 큰 질량의 별은 어떻게 되는가?

P-P chain 이 아닌 CNO cycle 구간을 통과한다. 별은 가벼워야 오래 산다. 태양 질량의 10 배되는 별은 수명이 짧다. 태양 수명의 1/10 밖에 안 된다.

태양 질량의 10 배 되는 별은 CNO 구간을 거치고, 그리고 탄소 핵융합 구간, 그리고 산소 핵융합구간을 거친다. 산소는 탄소가 핵 융합해서 생겼다. 그리고 실리콘도 산소가 핵 융합해서 생겼다. 실리콘이 핵 융합하면 니켈이 된다. 니켈이 베타붕괴를 하면 철이 만들어진다.

실리콘은 하루면 핵융합이 끝난다. 하루 정도 머물러도 지구 덩어리만 것을 만든다.

양파껍질처럼 층층이 핵 융합을 하고 있다. 그러면 온도가 상승한다.

온도가 10 억도까지 올라간다. 마지막 에는 팡 하고 터진다. 이것이 수퍼노바II이다. Core는 중성자 별이 된다.

태양질량의 100 배가 되는 별은 쌍 생성 영역을 만나 폭발한다. 수명이 100 만년 정도 밖에 되지 않는다. 폭발하고 나면 core가 블랙홀이 된다.

태양 질량의 8% 미만은 핵융합 구간에 들어가지 못해 별이 되지 못한다. 이런 천체를 갈색왜성이라 한다.

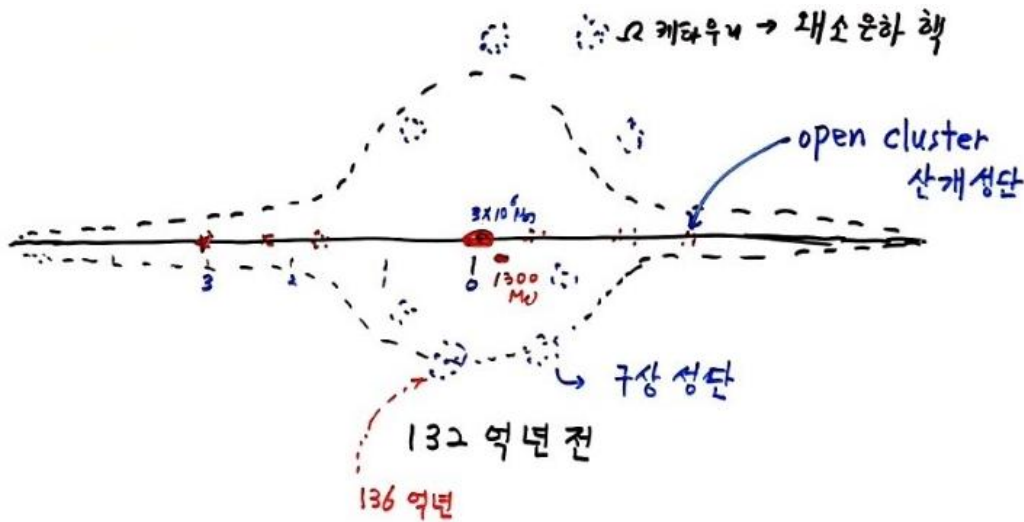
별의 안전조건이 있다. 별의 형태를 유지하는 core 밀도와 온도의 조건이다.

정적비율과 정합비율의 비율이 3/4 보다 크면 안전하다.

$r < 3/4$ 이면 붕괴한다. 압력과 부피를 일정하게 하고 나서 그 비율을 잴 것이 r 값이다.

이것이 천체 물리학이다

우리 갤럭시에 대한 개념을 가져야 한다.



가운데 선이 갤럭시의 적도이다. 가운데 까만 부분에서 별이 생긴다. Milky way 는 밀집모자처럼 생겼다. 밀키웨이 중앙에 태양질량의 300 만배나 되는 블랙홀이 발견되었다. 밀키웨이 전체 크기는 10 만 광년이다. 태양은 중심에서 3 만 광년 정도 떨어져 있다.

중심선 부근에 있는 별 무리를 산개성단(open cluster)라고 한다.

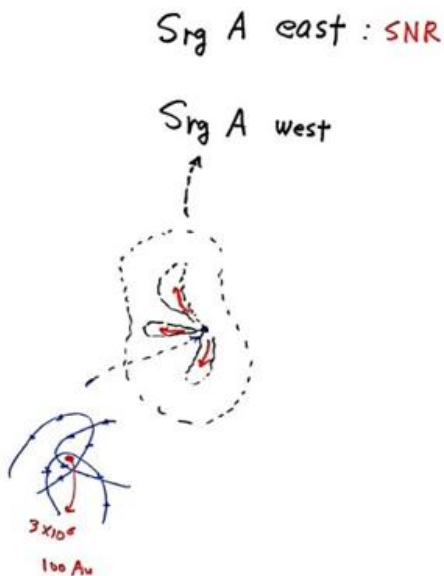
은하 중심 주위를 도는 공처럼 보이는 성단이 구상성단(globular cluster)이다.

산개 성단은 주로 젊은 별들로 구성되어 있다. 대표적 산개 성단이 플레이아데스 성단 (Pleiades star cluster: 줌생이 성단)이다. 산개 성단은 수 십 개 별들의 집합이다. 반면 구상성단은 수 십 만개의 별들이 모여 있다. 주로 늙은 별들이다. 구상 성단이 왜소은하의 중심이라는 것이 최근에 밝혀졌다.

밀키웨이 중심 부근에서 태양 질량의 1300 배에 달하는 새로운 블랙홀을 발견했다.

밀키웨이 중심은 지구에서 보았을 때 궁수자리 부근이다. 스피츠 적외선 우주 망원경으로 집중적으로 관측한 결과 별이 무수히 만들어 지고 있음을 확인했다.

별이 만들어 질 때는 가시광선은 모두 흡수되므로 적외선으로 보아야 보인다.



사가타리우스 A 영역(Srg A) west 에 나선 구조가 보이고 물질이 분출되는 모습이 보였다.

나선 구조의 중심에 있는 몇 개 별들의 공전 궤도를 측정하였더니 그 별들의 질량 중심에 태양 300 만개에

해당하는 블랙홀이 있다는 것을 알게 되었다. 100Au 즈 되는 공간에 태양(직경: 0.01Au) 수 백 만개가 들어 있다는 뜻인데 블랙홀이 아니고는 불가능한 일이다.

Srg A east 는 놀랍게도 초신성 잔해(SNR: supernova remnant)라는 것이다. SNR 이 10 개 이상 발견되었다. 이 태양계 만한 좁은 공간에서 초 신성이 불꽃놀이처럼 터졌다는 것이다. 지금까지 밀키웨이에서 기록된 초 신성 폭발은 3 번 밖에 없었다.

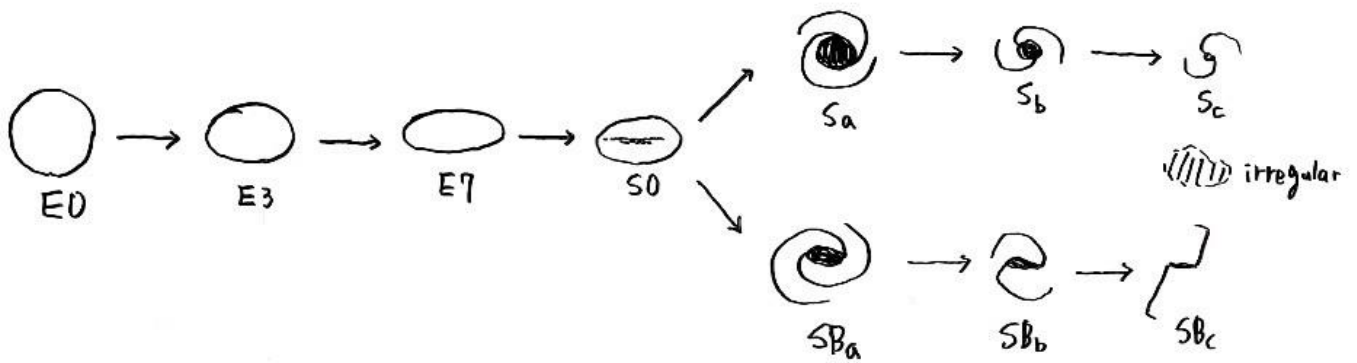
거대한 갤럭시 속에는 모두 블랙홀이 있다. 밀키웨이는 얼마 전까지도 활동했던 것으로 보인다. 새로 발견된 작은 블랙홀이 10 억년 전에 밀키웨이가 잡아먹은 갤럭시의 블랙홀이라고 한다.

안드로메다 갤럭시가 밀키웨이 쪽으로 가까워 지고 있다. 몇 십 억년 뒤에는 두 갤럭시가 합쳐질 것이다.

구상 성단을 연구하여 밀키웨이의 나이가 132 억년임을 알아냈다.

구상 성단 중 하나는 나이가 136 억년까지 올라간다. 밀키웨이는 빅뱅 후 빠른 시기에 만들어진 것으로 보인다.

허블은 갤럭시 형태를 다음과 같이 분류했다.

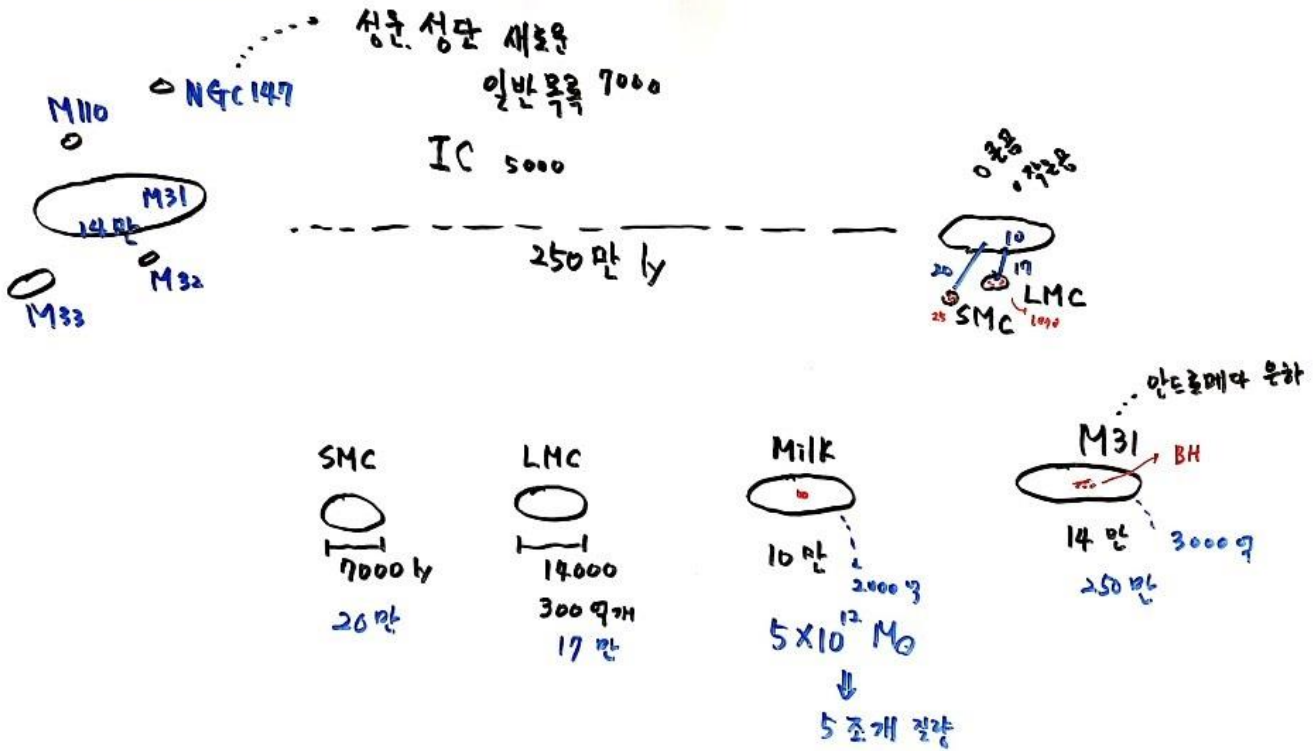


갤럭시는 초기에는 원형에 가까운 E0 형에서. 점점 타원형(Elliptical)으로 바뀐다. 타원형에서 렌즈(lenticular)형을 거쳐 나선형으로 간다.

나선형도 S(spiral)형과 SB(spiral barred) 두 가지로 나누어 진다. S 형과 SB 형에는 각각 a, b, c 형이 있다.

또 한가지 유형은 불규칙(irregular) 형이다..

밀키웨이는 SB 형이다.



안드로메다 갤럭시(M31)는 3000 억개의 별로 구성되어 있다. 크기는 14 만 광년이다. 지구에서 250 만 광년 떨어져 있다. 안드로메다 은하 속에는 태양 질량 3000 만배의 블랙홀이 존재한다.
NGC(new general catalogue)는 성운 성단의 새로운 일반 목록이다. 7000 개가 넘는다.
부가목록(IC: index catalogue)도 5000 여개이다.

밀키웨이 옆에 큰곰자리와 작은곰자리 국소 은하계(satellite galaxy)가 있다.
지구에서 17 만 광년 떨어진 곳에 대 마젤란 성운(LMC: large Magellanic cloud)이 있고, 20 만 광년 떨어진 곳에 소 마젤란 성운(SMC: Small magellanic cloud)이 있다. LMC 에서 1770 개, SMC 에서 25 개 변광성이 발견되었다.
크기는 SMC 가 7000 광년, LMC 가 14,000 광년, 밀키웨이가 10 만 광년, 안드로메다가 14 만 광년이다.
지구에서 거리는 SMC 가 20 만 광년, LMC 가 17 만 광년, 그리고 안드로메다 성운까지가 250 만 광년이다.

밀키웨이는 2000 억개, 안드로메다는 3000 억개의 별로 구성되어 있다.
그러나 최근 연구에 의하면 밀키웨이의 Dark matter 와 halo 를 모두 계산 했더니 5×10^{12} 태양 질량이 나왔다.
태양 5 조개의 질량이다. 어쩌면 밀키웨이가 안드로메다와 비슷한 규모일 수도 있다.
대 마젤란 성운에는 300 억개 별이 있는 것으로 보고 있다.
오메가 캔타우리 구상 성단은 왜소 은하의 핵으로 보고 있다.

퀘사의 감마레이 폭발(GRB: gamma ray burst)이 75 억 광년 떨어져 있는데도 눈으로 보인다.
폭발 때 나오는 에너지가 $E=2Mc^2$ 이다.
여기서 M 은 태양 질량이다. 태양 질량 전체가 핵 폭탄이 된 것이다. 수 조개가 넘는 핵 폭탄이 1-2 초 사이에 터진 것과 같다. 그러면 75 억 광년 밖에서도 보인다는 것이다.
수고하셨습니다.

(파워포인트 설명은 동영상참고 하시기 바랍니다).