

## 제 10 회 우주의 진화 11 강 별, 한국지질학

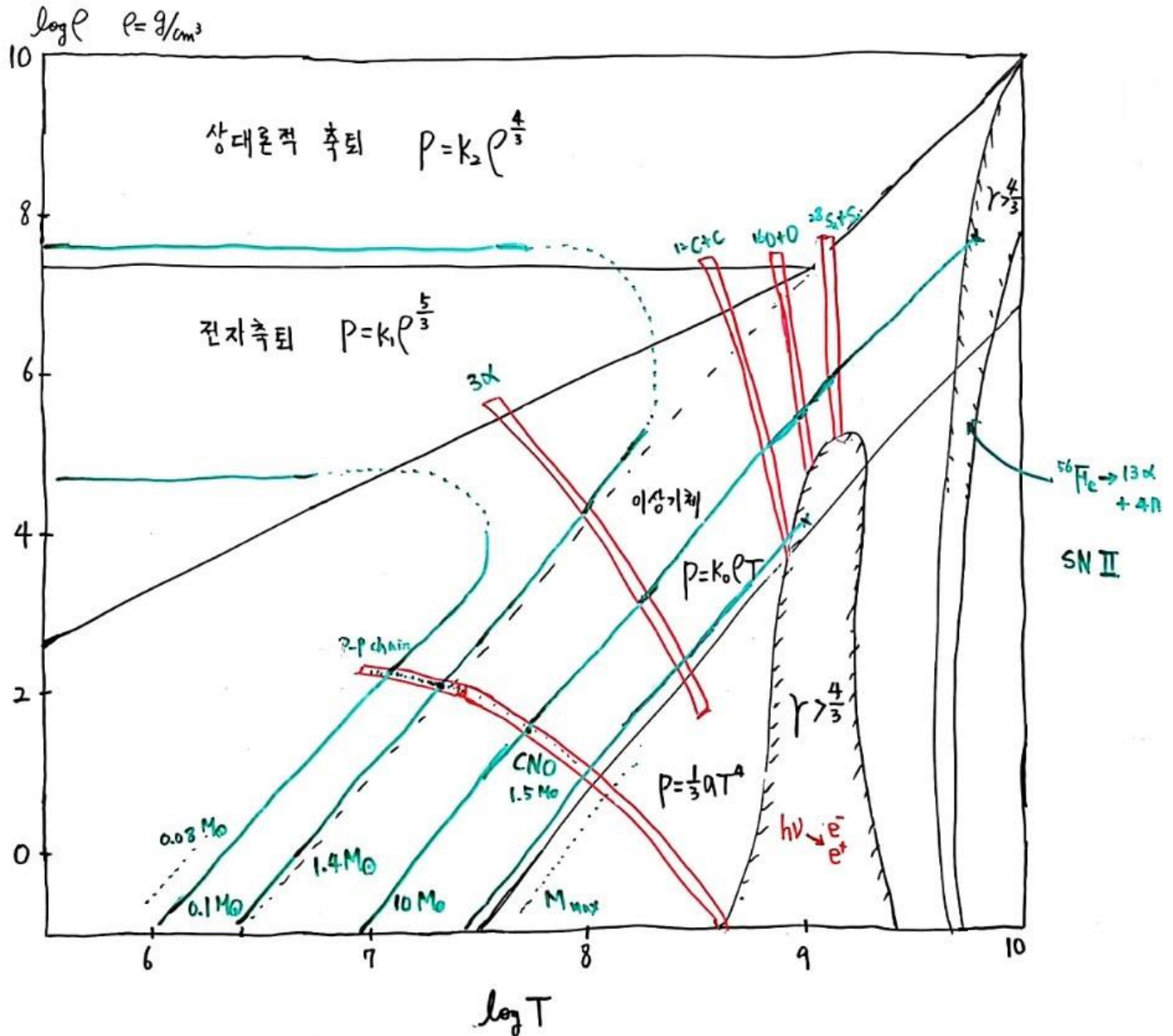
(박문호 박사님 강의를 초록한 것입니다.)

오늘은 별을 공부한다. 별은 왜 공부해야 하는가?

그 동안 다루었던 C, H, N, O, P 가 어디서 왔는가? 그것을 몸으로 느껴보자

도표 2 개면 된다. 어렵지 않다.

별에 관한 모든 물리가 이 도표 속에 들어 있다.



세로 축은 별의 밀도에 로그를 취했다. 대단히 큰 숫자이다.

로그 0 은 1 이므로 물의 비중과 같다. 로그 10 이면 비중이 물의 100 억배라는 것이다. 10,000 톤/1cm<sup>3</sup> 이다.

가로 축은 별 core 의 절대 온도이다. 좌표 10 은 100 억도라는 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 질량한계선이다.

Chandrasekhar limit 이다.

인도 과학자로서 19300 년대 영국 유학 길에, 영국으로 가는 여객선 안에서 풀었던 수식이다.  
이때의 결과로 1980 년대에 노벨상을 받았다.

태양 질량의 1.4 배를 나타내는 선이다.

중요한 것은 배경 이야기가 아니라 이름과 숫자를 외우는 일이다.

태양 질량의 1.4 배, 찬드라세카르 질량한계이다.

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.

공부를 해보면 모든 것은 form(구조)에 있다.

구체적 내용보다 구조가 어떻게 되었는가를 먼저 파악하면 헛갈리지 않는다.

도표가 4 개 구역으로 나누어져 있다.

각각의 이름을 알아야 한다.

왼 쪽 위에서부터 각각 상대론적 축퇴영역, 전자 축퇴영역, 이상 기체영역, 그리고 복사 영역이다.

별 속의 물리는 이 4 영역으로 표현된다.

또 하나의 영역은 별이 붕괴되는 영역이다.

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

쌍생성 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, 오른쪽이 CNO cycle 이다.

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

모든 것은 질량과 밀도가 결정한다.

Density is Destiny.

밀도가 운명이다.

별의 무게 별 운명을 살펴보자

태양 질량의 10% 인 별은 수소 핵융합 영역에서 100 억 년을 보낼 수 있다.

그러나 다음 핵융합 영역인 3 알파 영역에 못 가고 외쪽 옆으로 빠진다.

다음은 태양의 운명을 보자.

태양의 core 는 수소이다. 45 억년 동안 타 왔고 앞으로도 50 억년은 탈 것이다.

수소의 약 70%가 헬륨으로 바뀌었다.

100 억년은 보낼 수 있다. 수소가 다 타고나면 CNO cycle 을 빠져 나온다.

3 알파 프로세스 갈 때까지 핵융합 하지 않는다.

1 억년 정도 밖에 걸리지 않는다. x 축이 시간 축이 아니다.

물론 온도와 밀도가 시간과 관계는 있지만, 시간 축은 아니고 온도 축이다.

3 알파 프로세스에 가면 헬륨이 핵 융합한다.

주 계열성이란 코어가 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 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. 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 결합하는 것이다.

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. Si 는 하루 만에 핵 융합이 끝날 수 있다.

그래서 우리는 별에서 왔다는 것이다.

확실하게 예측할 수 있는 것은 30 억년 이후에 지구는 없어 진다는 것이다.

태양이 red giant 가 되어 지구와 달은 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.

태양은 백 억년 살 수 있다. 지금 50 억년 지났다.

태양보다 10 배 큰 질량의 별은 어떻게 되는가?

P-P chain 이 아닌 CNO cycle 구간을 통과한다. 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.

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

양파껍질처럼 층층이 핵 융합을 하고 있다. 온 산천에 불이 났다.

그러면 온도가 상승한다. 온도가 10 억도까지 올라간다. 마지막 에는 팡 하고 터진다.

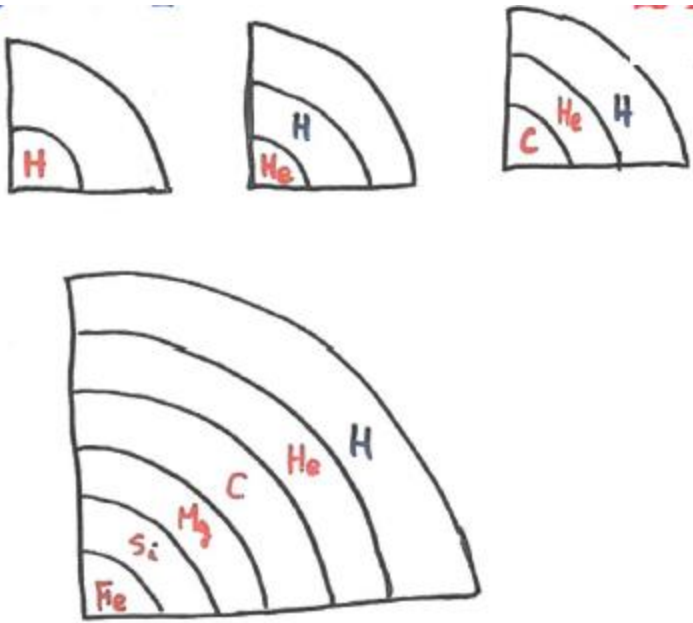
이것이 수퍼노바이다.

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.

그래서 붕괴가 된다. 붕괴가 되기 전 까지를 보면 그림과 같다.



수소부터 헬륨, 탄소, 산소, ... 핵융합 함에 따라 물질이 계속 생긴다.  
원자가 무거울 수록 핵 융합하는 기간이 짧다. 실리콘은 하루 만에 핵융합이 끝난다.  
마지막에는 폭발한다. 그래서 산산조각 난다. 이것을 수퍼노바 타입 2 라고 한다.

태양질량의 100 배가 되면 어떻게 되는가? 그런 별도 있다.  
지금은 잘 생기지 않지만 빅뱅 이후 3 억년 후면 별이 생긴다.  
그때 생긴 별들이 지금 측정이 되고 있다.  
그 별들을 재어 봤더니 수명이 10 만년, 100 만년 밖에 안 된다.  
생기자마자 불꽃놀이처럼 폭발해 버린다.  
그 별들도 모두 이런 물질들을 다 만들었다.  
탄소, 질소, 산소, 네온, 마그네슘... 다 만들었다. 만들자마자 10 만년,  
100 만년 만에 폭발하니까 그 가스들이 우주공간에 뿌려졌다.

태양 질량 100 배쯤 되는 별은 수퍼노바까지 못 간다. 쌍 생성 영역과 만난다.  
그곳에서 붕괴된다.  
이곳에서는 감마(r)선에서 electron(전자)과 positron(양전자)이 생긴다. 두 개가 쌍 생성 된다.  
그러면 입자개수가 달라져 평형조건이 깨어지고 붕괴된다.  
100 만년 밖에 못산다. 태양은 100 억년 산다. 지금 태양 수명이 반 지났다.

별의 질량의 상한은 있는가?  
별의 부피가 큰 것은 태양 부피의 10 만배 되는 것도 있다.  
질량은 최대크기가 100-200 배이다.

이것보다 더 무거우면 안 된다. 눈사람 만드는 것과 같은 이치다.  
성간 물질을 뭉치는 것이다. 뭉쳐서 단단해 지면 복사 에너지가 나온다.

별 질량의 상한 부피 태양의 10 만배, 무게가 100 배 이상이면 존재할 수 없다.  
눈사람 만들 때 복사에너지로 눈사람이 붕괴한다.

중력으로 모은다. 중력이 높아지면 복사 에너지가 높아지고 복사에너지가 중력보다 크면 분쇄된다.

태양질량의 200 배면 별이 안 된다. M max line 이다 별의 질량에 한계가 있는 것이다.

그러면 별이 작으면 얼마나 작을 수 있을까?

태양 질량의 8%이하면 별이 되지 않는다. p-p chain 을 지나지 못해 핵융합을 못한다.

목성은 별이 되지 못했다. 목성의 질량은 지구의 318 배이며, 태양의 0.1%이다.

태양은 지구질량의 30 만배이다.

우주에 태양 질량의 8%이하 이면서 목성보다 큰, 별도 아니고 행성도 아닌 존재들이 있는가?

별도 아니고 행성도 아닌 것을 갈색왜성이라고 한다.

우주에 무지하게 많다. 한때 갈색왜성이 dark energy 아닌가 생각되기도 했다.

지구와 가장 가까운 별 시리우스는 8 광년 떨어져 있다.

가까운 별들은 대개 지구에서 20 광년 떨어져 있다.

밤하늘의 대부분의 별은 200 광년안에 있다.

1000 만 광년 이상 떨어지면 1 등성이 되기 어렵다.

그런데 지구에서 2-3 광년 내의 별들이 20-30 개 발견 되었다. 최근 들어서 발견 되었다.

너무 희미하여 발견이 어려웠다. 그런데 별은 별이다. 갈색왜성이 아니다.

가까이 있다고 발견되는 것 아니다. 1 광년이면 어마어마하게 큰 지역이다.

빛으로 1 년가는 거리이다. 3 광년이  $10^5$  Au 이다. 지구와 태양 사이의 거리가 1 Au 이다.

1 광년이 지구와 태양 사이의 10,000 배 거리이다. 얼마나 먼지 상상해 보라.

태양과 토성과의 거리가 10Au 이다. 1 광년이면 태양과 토성과의 거리의 1000 배이다.

그 곳에 목성 10 배 정도의 별이 있어도 알기 힘들다.

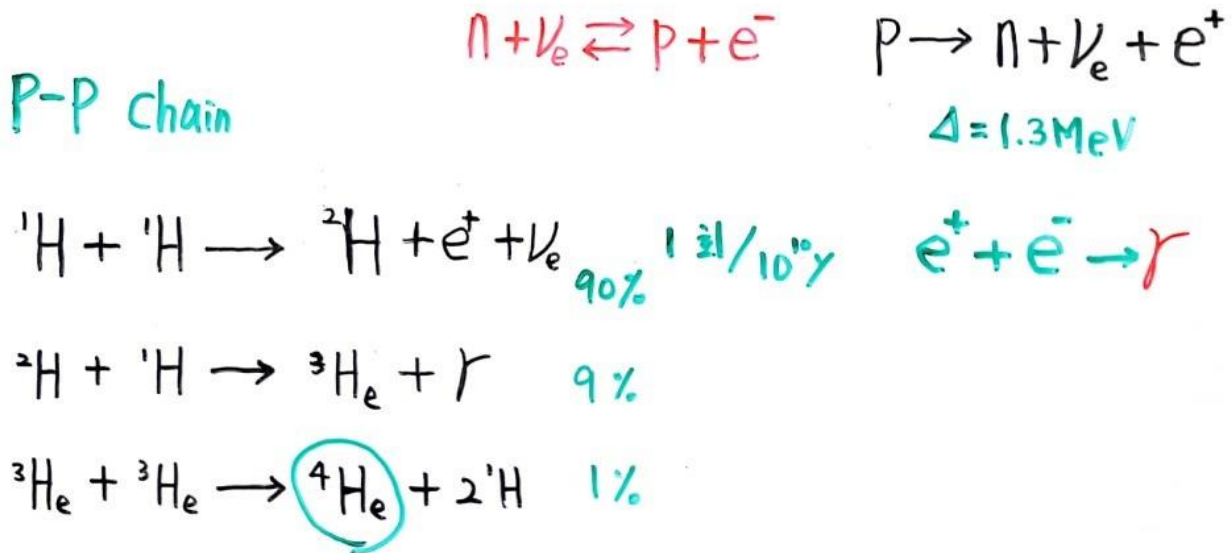
상대론을 적용해야 하는 전자축퇴영역이다.

이상기체는 탄성 충돌하는 당구공과 같은 것이다. 입자와 입자 사이에 아무런 다른 힘이 존재하지 않는다.

미케니컬 충돌만 고려하는 입자이다.



핵력이 작용하는 거리가 1 페르미이다.  $10^{-15}$  m 이내에서  $W^+, W^-, Z_0$ 가 작용한다.



양성자와 양성자가 결합하면 양성자 2 개가 된다.

이것은 헬륨이 될 수 없다. 아직 중성자가 없기 때문이다. 이것이 중수소이다.

양성자 하나와 중성자 하나로 구성되어 있다. 하나의 양성자가 중성자로 바뀌어야 한다.

베타 붕괴가 필요한 것이다.  $n + \nu_e \rightleftharpoons p + e^-$

여기서는 양성자가 중성자로 바뀌는 데 이것을 역 베타붕괴라고 한다.

$p \rightarrow n + \nu_e + e^+$

전자가 이동할 경우는 시간을 거슬러 가야 하므로 반물질이 된다.

전자의 반물질은 양전자이다.

양성자와 양성자가 결합하면 양성자 하나가 역 베타 붕괴를 일으키고,

결과적으로 양성자+중성자로 된 중수소와 양전자 그리고 electric 뉴트리노가 생긴다.

중성자 질량이 양성자보다 1.3Mev 만큼 무겁다.

자연 상태에서 중성자는 10 분 정도(반감기 614 초) 밖에 못 산다. 곧장 양성자로 바뀐다.

그래서 가벼운 양성자가 무거운 중성자로 변하는 역 베타 붕괴는 잘 일어나지 않는다.

100 억년에 한번 일어난다. 그래서 태양의 수명이 100 억년이나 길다.

어쨌든 이 중수소에 양성자가 하나가 다시 추가 되면

질량 수 3 개(양성자 2 개와 중성자 하나)인 헬륨 동위원소가 되고 그 과정에 빛(광자)이 나온다.

이 질량 3 인 동위원소 헬륨 2 개가 충돌하면 질량 4 개(양성자 2 개 중성자 2 개)인 헬륨이 나오고 양성자 2 개가 다시 생긴다.

이것이 p-p chain 이다. 결국 양성자 4 개가 헬륨 한 분자를 만든 것이다.

그래서 별의 1/4 이 헬륨이다. 그리고 양전자와 전자가 만나서 광자(빛)를 만든다. 태양이 빛이 많은 이유이다.

감마 ray 가 태양 core 에서 생겼다가 x ray --> 자외선 ---> 적외선이 된다.

빛이 나오면서 파장이 길어진다.

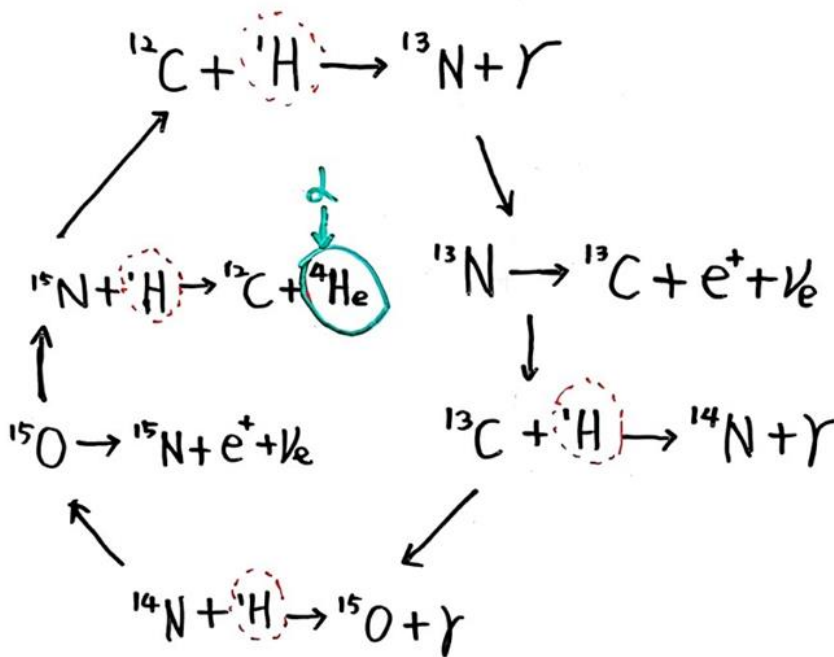
태양광의 구성은 자외선이 9%, 가시광선 40%, 그리고 적외선이 51%이다.

태양에서 나오는 빛의 메인은 적외선이다.

그런 빛의 메인 소스가 전자 양전자의 충돌이다. 베타 붕괴가 약한 상호 작용이다.

C N O

CNO cycle 1.5M<sub>☉</sub>



질량이 태양의 1.5 배인 별들은 p-p chain 을 거치지 않고 CNO 사이클을 통해 핵 융합한다. CNO cycle 은 C, N, O 가 촉매역할을 한다.

베타붕괴를 학교에서 배우지만 그것이 어디에서 일어나는지를 제대로 모른다. 별 속에서 무제한 적으로 일어난다.

C, N, O 의 양성자 개수는 각각 6 개 , 7 개, 8 개이다.

질량이 12 번(양성자 6 개, 중성자 6 개)인 탄소에 양성자가 결합하면,

질량 13 번(양성자 7 개와 중성자 6 개)인 질소 동위원소가 된다.

여기에서 역 베타붕괴가 일어나면 질량 13 번(양성자 6 개와 중성자 7 개) 탄소 동위원소와 양전자와 전자 뉴트리노가 나온다.

이 13 번 탄소에 양성자 1 개가 추가되면 14 번 질소와 감마선이 나온다.

이 14 번 질소에 다시 양성자 1 개가 더해지면 15 번(양성자 8 개, 중성자 7 개) 산소와 감마선이 나온다.

이 15 번 산소가 역 베타붕괴를 일으키면 15 번질소(양성자 7 개, 중성자 8 개)와 양전자 및 뉴트리노가 나온다.

이 15 번 질소에 양성자 하나가 더해지면 12 번 탄소와 헬륨이 나온다.

결과적으로 양성자 4 개가 헬륨을 만들었고, C, N, O 는 촉매역할만 했다. 그래서 CNO 사이클이라 한다.

우주 별의 1/4 이 헬륨이다. 별에는 헬륨이 많지만 지구에는 없다.

별과 지구가 얼마나 다른가를 전율하면서 느껴야 한다.

생성된 양전자는 즉시 전자-양전자 쌍 소멸을 일으켜 감마선 형태로 에너지를 방출한다.

p-p chain 과 CNO cycle 의 조건이 다르다.

입자가 무거워지면 수명이 짧다.

P-P chain 밴드는 거의 수평이다. 조건을 만족하는 온도범위가 넓다.

p-p chain 은 밀도를 고정하고 온도를 10 배 해도 핵융합 밴드 속에 있다. 그래서 오랜 시간 동안 핵 융합한다.

밀도는 조금만 벗어나도 핵융합이 이루어지지 않는다.

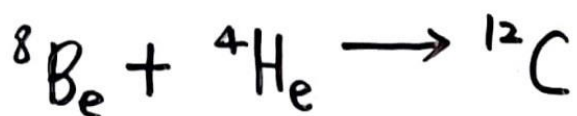
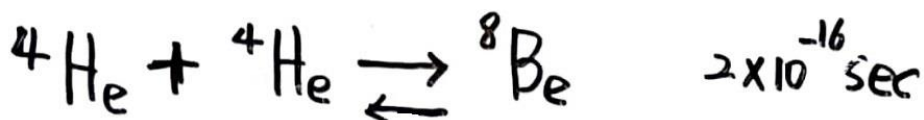
밴드가 수직에 가까워지면 온도가 조금만 바뀌어도 핵융합 영역을 벗어난다.

그래서 Si 는 핵융합이 하루 만에도 끝난다. 그만큼 핵 융합하는 온도 범위가 좁다.

태양은 p-p chain 이다. CNO cycle 이 아니다. 둘 다 양성자를 결합하여 알파 파티클을 만든다.

태양 질량의 1.5 배 되는 별들은 CNO cycle 을 돈다. CNO 과정의 별은 빨리 태우고 수명이 짧다.

3 $\alpha$  process



3 알파 프로세스의 결과는 탄소가 나온다는 것이다. 알파 파티클 3 개가 결합하여 탄소를 만든다.

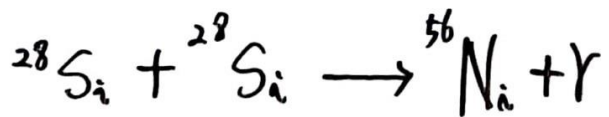
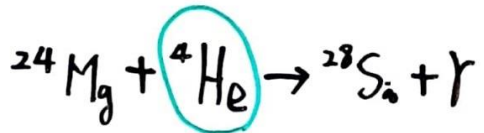
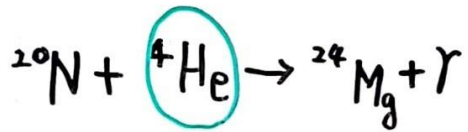
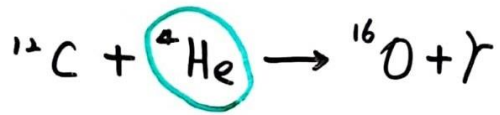
지난 10 년간 이 프로세스를 3 번 강의 했는데, 매 강의 때마다 10 번 이상 그려 봤다. 여러분과 나의 차이는 그 노력을 했는가 안 했는가의 차이이다. 그래서 어디서 에러가 생기는지 잘 안다. 지금은 봄에 배여 있다. 그 때부터 자연이 보이기 시작한다. 어떤 자연 현상을 머리로 한참 계산해서는 자연이 보이지 않는다.

전문가는 해당 분야의 전문 숫자를 생각하지 않고 그냥 얘기하는 사람이 전문가이다. 생각하지 않고도 바로 바로 나와야 한다. 몸에 배여 있어야 바로 나올 수 있다. 그래야 다음 단계의 사고로 올라갈 수 있다. 일부러 생각해서 그것을 끌어 모아서는 한 단계 올라갈 수 없다. 그 문제는 자료를 끌어 모아 어느 정도 가능해도, 다음 단계의 사고는 전개가 안 된다.

그렇지 못하기 때문에 의견이 많다. 팩터가 부족하면 느낌과 의견을 말한다.

알파 파티클은 헬륨 원자핵이다. 헬륨원자핵 두 개가 핵융합을 하면 8 번 베릴륨이 된다. 그런데 이 베릴륨은  $2 \times 10^{-16}$  초 사이에 붕괴한다. 너무 짧은 시간에 사라지므로 불가능 하다고 여겼다. 그러나 사라지는 시간 보다 더 짧은 순간에 알파 파티클을 하나 더 충돌 시키면 12 번 탄소가 나온다.

파인만은 이것을 우주의 7 가지 신비 중 하나라고 했다. 결과적으로는 3 개의 알파 파티클을 동시에 충돌 시키면 탄소가 나오는 것과 같은 결과이다. 우주의 기적이다.



그 다음부터는 다 만들 수 있다.

탄소에 알파 파티클을 더하면 산소가 되고, 산소가 네온, 네온이 마그네슘, 그리고 마그네슘이 실리콘이 된다.

지구의 맨탈을 구성하는 성분이다.

암석이 어디서 왔느냐는 지구가 아니라 별에게 물어야 한다.

지질학을 하려면 천문학을 알아야 한다.

알파 파티클이 왜 그렇게 중요한가? 별의 25%가 헬륨이다.

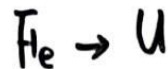
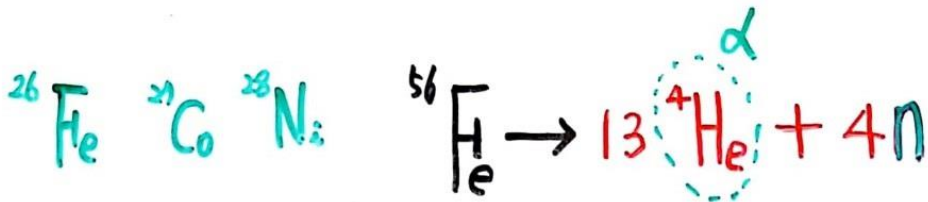
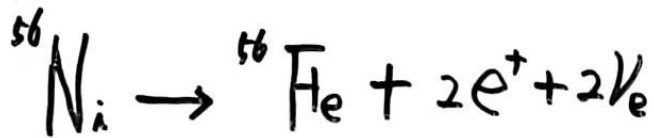
그리고 원소 기호 중 짝수가 홀 수 보다 1000 배 가량 많다.

알파타티클이 추가 되면서 원소가 만들어 지기 때문이다

그리고 별 속에 감마 ray 가 이렇게 많이 나온다는 것을 알아야 한다.

우주에는 수소가 가장 많고 다음은 헬륨이다. 나머지는 얼마 되지 않는다.

실리콘 2 개를 합하면 니켈이 된다.



56 번 니켈의 반감기는 약 6 일이다.

이 56 번 니켈이 2 번의 역 베타붕괴를 통해 바로 56 번 철과 2 개의 양전자, 2 개의 전자 뉴트리노로 변한다.

이 56 번(양성자 26 개, 중성자 30 개) 철이 13 개의 알파타티클과 4 개의 중성자가 된다.

우주에서 가장 강한 중성자 다발이 출현한다. 이것이 수퍼노바이다.

상상을 초월한 중성자 선 속이 생긴다.

중성자가 베타붕괴를 통해 양성자와 전자 그리고 반 전자 뉴트리노가 된다.

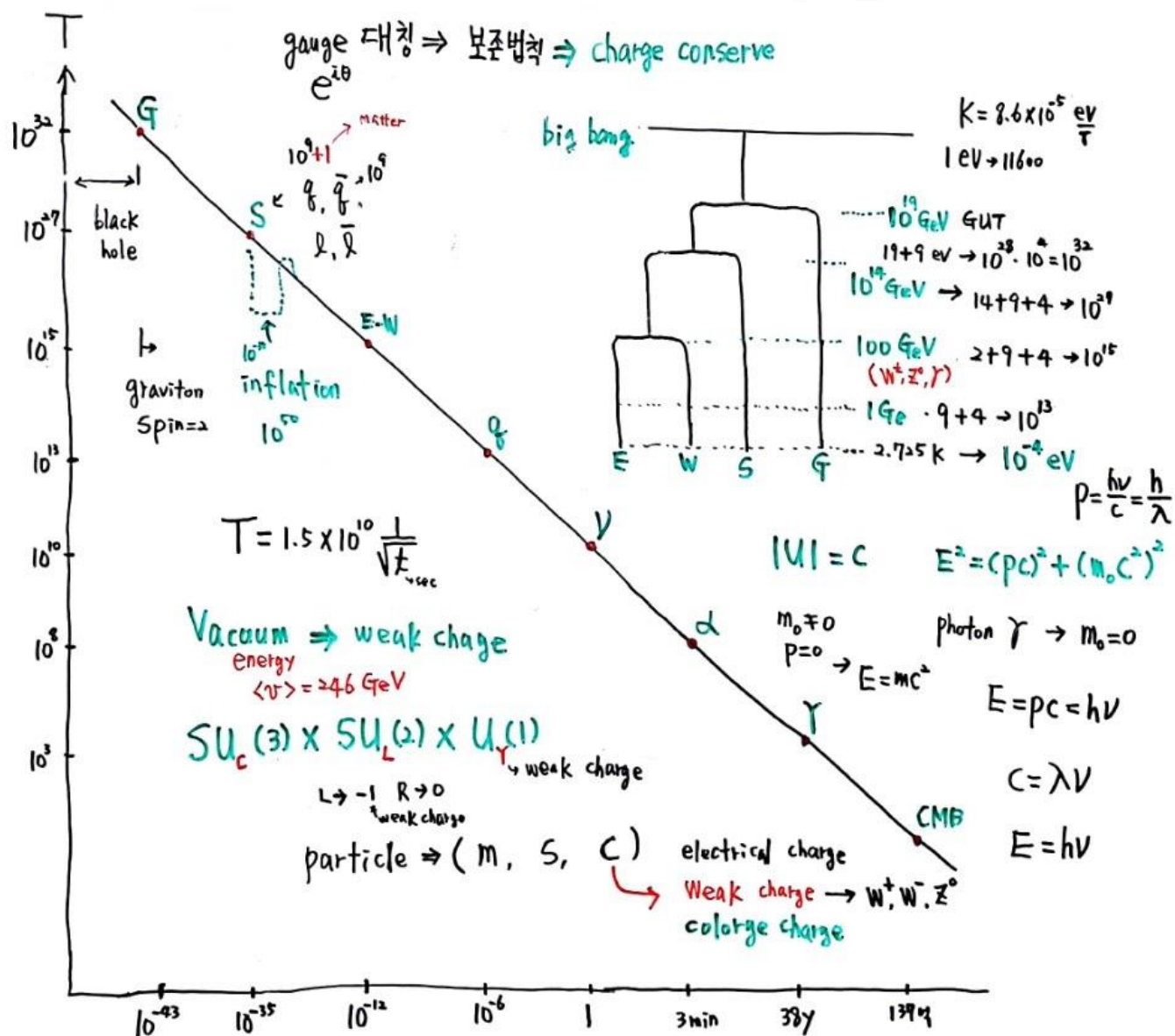
이 과정이 항성내부구조 그림의 수퍼노바 2 에서 일어난다.

연금술은 가능하다. 골드를 만들 수 있다. 중성자에서 양성자를 만들면 금도 만들 수 있다.

이 과정에서 철에서 우라늄까지 다 만든다.

수퍼노바 2 에서 뉴트리노를 측정하였다.

다음 그림은 우주의 온도와 시간의 관계이다.



빅뱅 이후 137 억년 우주에는 8 가지 중요한 사건이 있었다.

gravity, strong force, electro weak force 의 decoupling, quark 의 confinement, neutrino 의 출현, 알파 파티클과 photon 의 출현(같은 시점에 수소 원자도 나온다), 마지막으로 CMB 의 측정이다.

8 가지 사건과 온도와의 관계를 알아야 한다.

그 치환 공식이  $T=1.5 \times 10^{10} \times 1/\sqrt{t}$  이다. t의 단위는 초이다.

이 공식은 RUD 에서 유도한 공식이다. 그래서 RUD 에서는 엄밀하지만 MDU, ADU 에서는 그렇지 못하다. 그러나 천문학에서는 그 정도 오차는 문제 없다.

시간을 공식에 넣으면 온도를 알 수 있다.

포톤이 자유로워 지는 시기는 빅뱅 후 38 만년 후이다. 이때 온도는 3 천도 K 정도 이었다.

CMB 를 측정한 137 억년 지난 지금 우주 온도는 2.725K 이다. 에너지는  $10^{-4}$  eV 이다.

우주의 4 가지 힘이 분리되는 도표와 함께 보면 유용하다.  
입자 물리학 할 때는 이 도표를 그려 놓고 시작하면 빠르다.

1eV 는 11,600 도 K 이다.  
이것은 볼츠만 상수에서 나온다.  
 $K=8.6 \times 10^{-5}$  eV/T

중력이 분리되는 시점의 온도가  $10^{19}$  GeV 이다. 지구상에서 가장 강력한 가속기도 대략 10 TERA eV 정도이다.

그러면  $10^{19}$  GeV 의  $10^{-15}$  정도 밖에 안 된다. 이 에너지 규모의 가속기를 만들려고 하면 가속기 크기가 태양계 정도 되어야 한다.

그래서 과학자들이 수퍼 스트링 이론을 좋아하지 않는다. 수퍼 스트링 이론을 증명 하려면 가속기가 태양계만큼 커야 한다. 불가능한 이야기다.

스트롱 포스가 분리되는 시점의 에너지가  $10^{14}$  GeV 이다. 온도는  $10^{27}$  도 K 이다.

weak force 와 electromagnetic force 가 분리되는 에너지가 100GeV 이다.  $W^-$ ,  $W^+$ , Z 의 에너지와 같은 수준이다.

온도는  $10^{15}$  도이다. 100GeV 보다 높으면 통합된다.  $W^+, W^-, Z_0$  입자의 질량이 제로가 된다. 포톤의 질량도 제로이다.  $W^+, W^-, Z_0$ , 그리고 포톤이 한 형제가 된다. 질량이 제로가 될 때 대칭이 회복된다. 질량과 대칭은 철천지 원수로서 공존할 수 없다. 이것을 스탠다드 모델이라고 한다.

양성자는 질량이 938 MeV 이다. 약 1 GeV 이다. 온도는  $10^{13}$  도 K 이다.

우주의 온도가  $10^{13}$  도 K 보다 높으면 quark 이 자유롭게 된다.

온도가 낮으면 quark 이 confinement 가 되면서 양성자가 생긴다. 빅뱅 후 백 만분의 1 초가 지난 시점이다.

137 억년 지난 지금 우주의 온도는 2.725 도 K 이다. 대략 1 도 K 이다. 1 도 K 는  $10^{-4}$  eV 이다. 태양 빛 에너지의 1 만분의 1 이다. 태초의 빛보다 지금은 그 파장이 10,000 배나 늘어났다는 의미다.

빅뱅에서부터 중력이 자유로워지는 시간까지의 프랭크 시대에는 물리학이 접근을 못한다. 이 시대에는 블랙홀이 끝도 없이 생기고 사라진다. 블랙홀의 난무이다. 블랙홀은 시공의 패브릭에 구멍이 난 것이다. 시공의 곡률이 무한대가 된다.

블랙홀은 시공이 찢어져 있어 인과율이 적용되지 않는다. 원인과 결과를 따질 수 없다. 시공이 fluctuation 한다. 김손이 쓴 <블랙홀과 시간여행>에는 블랙홀이 물에 불은 통나무 같다고 했다.

통나무를 아궁이에 넣어 태우면 수증기가 나가고 재만 남아 산산조각이 난다.

통나무를 구성하던 시공간이 산산조각 나서 재가 되는 과정과 같다고 생각하면 된다.  
이것이 우주의 초기이다.

이 모든 파티클들이 인과적으로 연결되지 않았다. 시간과 공간이 evaporation 된다.

$10^{-35}$ 초에서 아주 극적인 사건이 일어난다. 이 때가 인플레이션이다.

인플레이션 때 크기가 양성자만 하던 우주가  $10^{50}$  배로 확대되었다. 축구공만큼 커 졌다.

$10^{-43}$ 초에 중력이 분리된다.

중력자는 spin 이 2 이다. 아직 측정되지 않았다. 중력자는 물질과 인터랙션하지 않는다.  
중력의 시공이 왜곡된 패스를 따라간다. 중력자는 중력 필드를 양자화한 것이다.

$10^{-43}$ 초부터 우주론이 시작된다.

그리고 quark 과 antiquark, lepton 과 antilepton 이 폭발적으로 생긴다.

quark 과 lepton 이 각각  $10^9+1$  개 그리고 anti quark 과 anti lepton 이  $10^9$ 개 생겼다.

둘이 쌍 소멸하면 정 물질이 1 개 생긴다. 이 한 개가 우리 우주를 만들었다.

이때 폭발적으로 입자가 생기면 우주를 구성하는 압력의 방정식이 달라진다.

quark 과 antiquark 이 폭발적으로 생긴 것이 인플레이션이다.

공부를 위해서는 핵심적인 공식들을 암기해야 한다.

4 차원 시공에서 속도 벡터의 크기는 광속이다.

모멘텀 공식에서 기억해야 할 것은

$$|V|=c \quad E^2=(pc)^2+(m_0c^2)^2$$

이 공식 엄청 중요한 공식이다.

빛을 넣으면, 포톤의 경우 정지 질량이 제로이다. 그러면  $E=mc^2$ 으로 쓸 수 있다.

$m_0=0$  이 아니면서 정지해 있다면 속도가 0 이므로  $P=0$  이고  $E=mc^2$ 이다. 정지질량을 에너지로 바꿔 준다.

포톤은  $m_0=0$  이다. 질량이 0 이다. 그러면  $E=PC$  가 되고, 아인슈타인의  $E=hv$ 를

넣으면  $E=PC=hv$ ,  $P=hv/C$ ,

이 식에  $C=\lambda v$  를 넣으면,  $P=hv/C=h/\lambda$ .

드브로이의 노벨상 받은 공식이 바로 유도 된다.

지난 시간에 입자물리학에 갈 때 가장 중요한 것이  $SU_c(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$ 이라고 했다.

여기서 C 가 color charge 이고, L 이 left, right 이며, Y 가 weak charge 이다.

입자(particle)는 3 가지 속성을 갖는다. mass, spin, charge 이다.

이 중에서 charge 가 가장 중요한데 chage 는 3 종류가 있다.

첫째가 electrical charge, 두 번째가 weak charge 이다. 세 번째가 color charge 이다.

와이버거가 만든 스탠다드 모델은 weak charge 이다.

electric charge 는 전자가 날라준다. weak charge 는  $W^+, W^-, Z_0$  입자가 나른다.

vacuum 은 weak charge 의 바다이다. 진공 에너지의 값이 246 GeV 이다.

물리학에서 가장 중요한 것은 대칭이다. 구체적으로 전하대칭이다. 대칭은 물리학에서 보존법칙을 말한다.

gauge 대칭을 요구한다. charge 를 보존한다. 입자물리학에서 말하는 보존은 전하 보존이다. 그런데 left, right 이동 과정에서 보존 법칙을 위반하여 그것을 회피하기 위해 출현한 입자가 힉스 입자이다.

대칭은 입자물리학에서는 전하보존을 말한다. 전하보존에서 중요한 것이 weak charge 보존이다.

weak charge 가 질량을 가지는 이유는 이들이 대칭이 깨어졌기 때문이다.

left, right 과정에서 질량을 획득했기 때문이다.

축구공이 꾸구려 들면 대칭이 깨어진 것이다. 꾸그러든 부분에 힘을 준 입자가  $W^+, W^-, Z_0$  입자이다.

그 입자는 대칭의 요청에 의해 들어왔다.

빛은 대칭이 요청하지 않아도 그 자체로서 완결되어 있다. 왜냐면 빛은 질량이 제로다.

빛은 이미 대칭을 만족하고 있다. 그래서 더 이상 진공에 손을 벌릴 필요가 없다.

그래서 빛은 진공을 경험할 수 없다. 다른 입자는 진공 속에서 해엄을 쳐야 한다.

그 때 필요한 전하 보존을 만족하기 위해서 힉스 입자가 출현했다.

left 뮤온 전하가  $-1$ , right 뮤온의 전하는  $0$  이다.

라이트에서 레프트로 바뀌는 것이 weak charge 보존법칙을 위배한다.

그래서 제 3 의 입자인 힉스 입자를 상정해 놓았다. 힉스 바다는 weak charge 의 바다이다.

gauge 대칭의 요청에 의해  $W^+, W^-, Z_0$  입자가 출현하였다.

$e^{i\theta}$  의 절대값은  $1$  이다.  $1$  은 곱해도 값이 바뀌지 않는다.

현실에서는 대칭이 깨어 지지만 절대치는 바뀌지 않는다. 그래서 대칭이 유지된다.

문제 자체에서는 대칭이 유지 되는데 그 문제 솔루션에서는 대칭이 깨어진다.

솔루션이란 특정한 어떤 세타 값을 상정하는 순간 대칭은 깨어진다.

그러나 사실은 계속 돌아간다. 측정 했을 때 stop 한다.

모든 것이 gauge 대칭이라는 말 속에 다 들어 있다.

gauge 대칭이 회복된다는 말은 더 이상 질량을 획득할 필요가 없다는 말이다.

온도가  $100\text{GeV}$  이상이 되면  $W^+, W^-, Z_0$  입자의 질량은 제로가 된다.

질량이 제로라는 말이 대칭이 회복 되었다는 말이다.

대칭은 질량과 철천지 원수이다. 대칭을 하든지 질량을 갖든지 둘 중 하나이다.

질량을 가졌다는 말은 대칭이 깨어 졌다는 말이다.

빛은 질량이 제로이므로 대칭이 그대로 유지 되고 있는 것이다.

입자 물리학의 결론은 질량과 대칭은 철천지 원수이다.

대칭이 깨어 졌다는 것이 질량을 얻었다는 것이고 그것이 힉스 메카니즘이다.

공부는 한꺼번에 되지 않는다.

씨를 뿌려야 한다.

초등학생을 박자세 공부하는 장소에 데리고 오면 내용은 알지 못하지만,  
어른 들이 즐겁게 그리고 열심히 공부하던 모습은 각인되게 된다.  
자녀들 중,고등 학교 때 학원에 보내면서 수백,수 천 만원의 돈을 쓰는데 크게 좋은 방식은  
아니라고 생각한다.  
그것은 대학 들어가는데 까지만 효과가 있다.

공부는 씨를 뿌려야 한다.  
초등학교 5 학년부터 중학교 2 학년 때가 좋다. 전두엽이 전면적으로 재 조합하는 시기이다.  
이 때 자연이나 놀라운 광경을 예기치 않게 보고 나면, 발아는 10 년 이후에 일어날 수 있다.

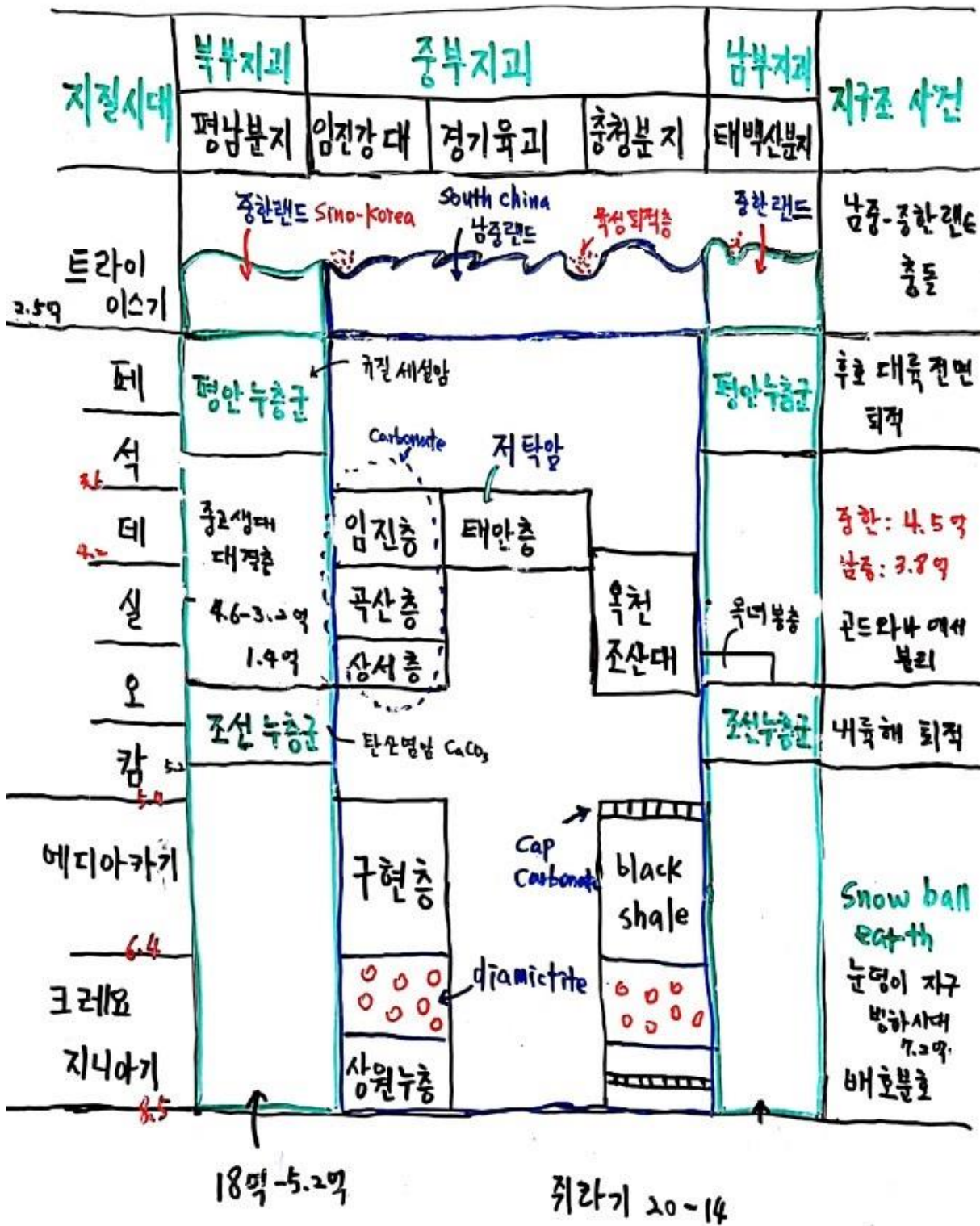
공부를 하면서 어디에 씨 먹을 것인가 생각하면 안 된다.

박사 후 10 년간은 눈에 보이지도 않는다. 본 게임은 박사 후 20 년 후부터, 50 대 중반  
부터이다.

공부에는 장기 계획이 필요하다  
5 년 전부터 씨를 뿌려야 한다. 싹이 트고 스스로 재미를 느끼고 자랄려고 하면 결정적  
자료가 있어야 한다.

그리고 간절해야 한다. 간절함이 없으면 내 지식이 되지 않는다.

다음 도표는 한 대가가 40 년을 바쳐 연구한 자료이다. 그 분의 일생이 담긴 자료이다.  
나도 지질학을 공부하면서 2 년전부터 이런 자료가 있었으면 하고 바라던 자료이다.  
그러므로 읽는 순간 모두 기억되었다.  
용어가 순 우리말로 되어 있어 기억하기가 쉽지 않다.  
10 번 정도 그려보면 기억할 수 있을 것이다. 그리고 깡그리 외워야 한다.



## Qin ling - Sulu - 임진강대

트라이아스기 이전의 한국지형에 관한 연구이다.  
우리나라는 트라이아스기 이후에 한 덩어리로 이루어 졌다.

북부지괴와 남부지괴는 중한랜드(sino-korea land)에  
그리고 중부지괴는 남중랜드(southchina)에 속해 있었다.  
이 두 지괴가 트라이아스기에 충돌하였다.

북부와 남부지괴에서 중. 고생대 대 결층은, 4.6 억년부터 3.2 억년 사이 1.4 억년 동안 아무런  
퇴적층이 없다는 사실이다.

먼지만 쌓여도 1.4 억년이면 1km 가 넘어야 하는데 아무것도 없다.

곤도나와에서 분리되어 고 테티스해를 통과하며 다 씻겨 나간 것으로 설명된다.

반면 중부지괴의 충청분지에서는 빙하시대의 흔적이 뚜렷이 나타난다.

에디아카라기에 상응하는 지층에서 cap carbonate 가 5m 정도 있고 그 밑으로 black shale,  
그리고 diamictite 가 나타난다.

snow ball earth 때 빙하 시대를 거쳤음을 보여 준다.

저자(최덕근 전 서울대 교수)는 정년퇴직 후 더욱 연구에 몰두하고 계시다.

책 후기에서 자신이 젊었을 때 학문을 더 넓게 공부하지 못했음을 후회하고 있다.

snow ball earth 를 좀더 빨리 접했으면 연구를 10 년은 앞당겼을 거라고 한다.

갈구해야 한다.

정말 알고 싶은 것이 있으면 몇 년 안에 채워진다.

품고 있어야 한다.

이 땅에 살면서 이 땅의 역사는 알고 있어야 하지 않겠나.

다음 시간에도 계속되므로 이 도표를 반드시 암기하고 오기 바란다.