【講座】

태 양 의 구 조

정 현 채*

1. 태양의 핵심부와 내부

태양 내부는 그림 1 에서 보는 바와 같이 전체 태양 반경의 1/4 에 해당하는 부분으로 전체 부피의 1/64 에 해당한다. 태양 물질은 그 자신의

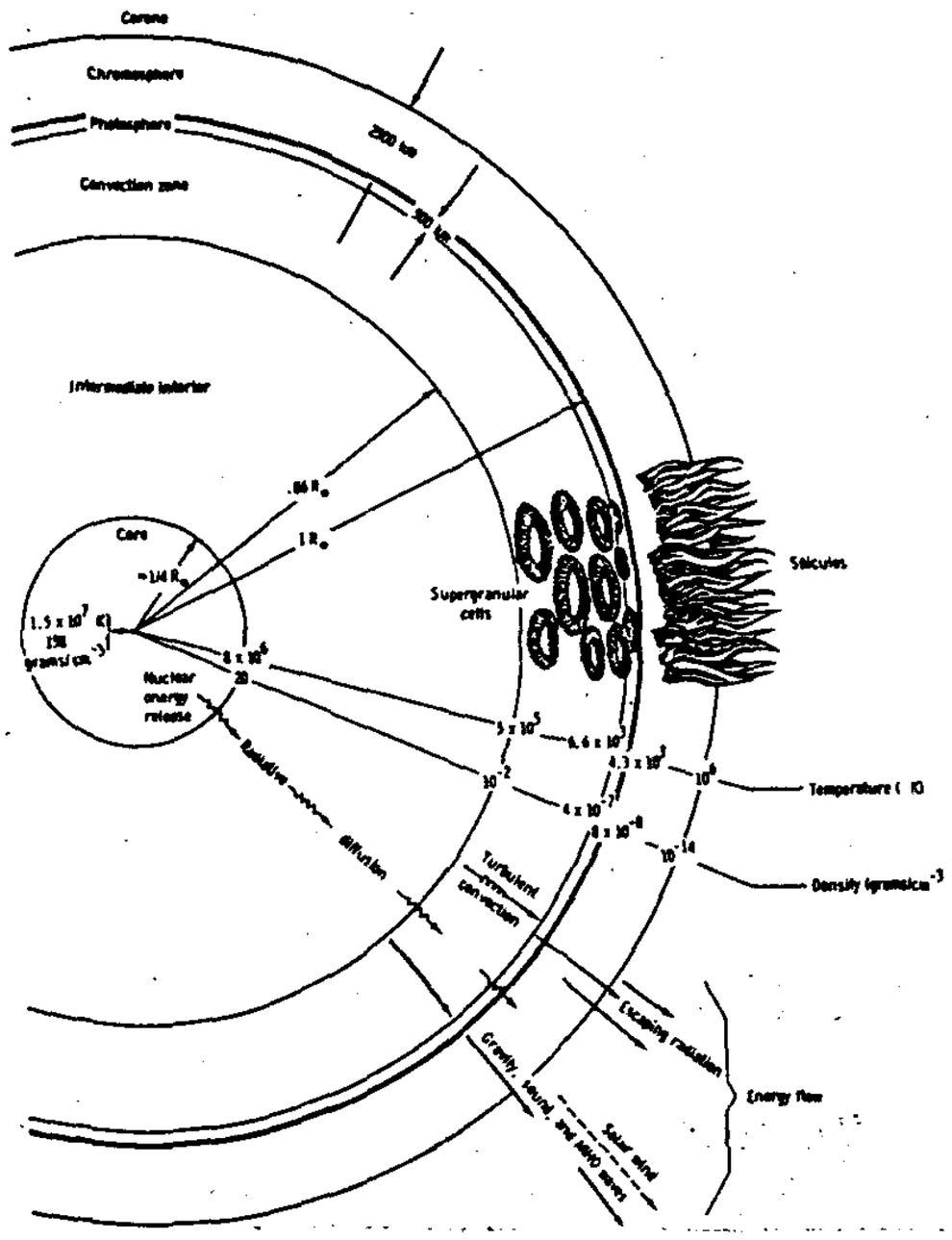

그림 1 . 태양의 구분

중력때문에 안쪽으로 갈수록 눌러져서 높은 밀도를 가지게 되는데 핵심부는 158g / cm^3이나 된다. 내부에서는 핵융합반응이 계속되고 있어 엄청난 에너지가 밖으로 방출된다. 따라서 높은온도 (1.5×10^7 K) 를 유지하고 있다. 높은 온도와 질량뿐 아니라 압력도 거의 250×10^9 K 기압을 나타낸다.

핵심 부분의 물질은 금속보다 천배 이상의 밀도를 가지는 샘이지만 높은온도 때문에 모두 기체 상태에 있는 것과 같이 핵들과 전자들이 자유로 빠른 속도로 움직여서 아무런 결정구조를 가지지는 못한다.

핵심부의 에너지는 수소핵이 헬륨핵 ($4'H \rightarrow 4He$) 으로 되는 핵융합반응 때문에 나타나고 1g 의 수소가 반응해서 헬륨이 될때마다 0.007g 은 에너지로 변화하는데, 현재 총태양에너지 4×10^{23} KW는 5 백만톤의 질량을 매초 에너지로 바꾸고 있다는 결론을 얻을 수 있고, 이는 태양의 질량이 매초 5 백만톤 만큼씩 줄어들고 있음을 의미한다.

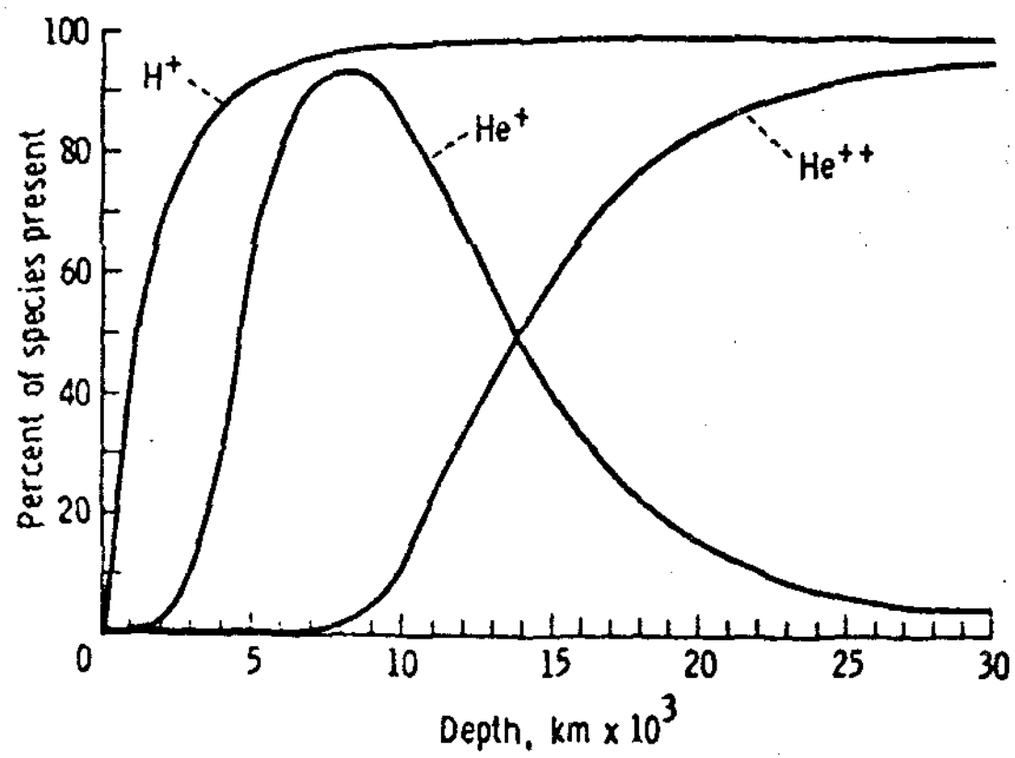

그림 2 . 태양내부 수소와 헬륨 존재 비율

핵심에는 핵융합반응물 즉 수소가 타고 남은

---

* 정회원:경희대 화학과

재가 남아있고 그 핵심부는 수소가 점점 줄어져 간다. 수소는 핵심으로부터 멀어지면 더 많아지기 시작하고 태양 반경의 1/4에 도달하면 96%의 수소가 차지함을 알 수 있다.

태양 핵심부 밖에는 대개 수소, 헬륨과 여타의 약 1%가량의 더 무거운 원소들로 구성되어 있다. 현재 태양 핵심부는 헬륨보다 수소가 약10배정도 더 많이 있고, 더 무거운 원소들의 존재비는 마치 지각에서 존재하는 원소들 (C, N, O Ne, Mg, St, S, A, Ca, Fe, Ni등) 의 존재비와 비슷하게 존재한다.

태양 핵심부에서 발생한 에너지는 복사에너지로 밖으로 나가기 전에 내부의 물질들이 흡수한다. 이때 핵융합반응 에너지는 대부분 γ선 형태인데 내부 물질이 흡수하였다가 다시 복사하면 그 파장이 약간 길어지게 되는데, 밖으로 갈수록 온도가 낮고 압력과 밀도도 낮아져서 자연 이때 에너지를 가지는 광량자도 낮은 에너지를 가지게 된다. 따라서 맨 처음 γ-선 이었던 복사에너지는 내부를 거쳐오는 도중 X-선으로 변하고 또 극자외선, 또 다시 자외선으로 파장이 길어지고 최종으로 태양 최외각에서 태양 밖으로 복사될 때는 우리 지구에 오는 빛이라는 형태로 나타난다. 물론 대류층에 이르러서는 복사만으로 에너지가 밖으로 전달되지 않고 대류의 형태로 밖으로 번져가기도 한다.

2. 대류층 (Convective zone)

대류층은 온도가 충분히 낮아져서 핵상태의 원소들은 원자 상태로 변화하기 시작하고 따라서 전자와 핵의 결합으로 여러가지 에너지 상태의 원자들이 나타나게 된다. 따라서 원자 상태의 원소들은 내부의 복사파를 흡수하기 쉽고, 생각보다는 온도가 급강하하는 것을 막는다. 대류층에 오면 밀도가 낮아져서 원자들이 상부로 떠오르는 현상이 두드러지고 또 가속되어 거치른 대류의 현상이 나타난다.

이런 불균형은 핵심부쪽으로 침강해가는 원소들에 의해서도 이루어진다. 형성된 대류 세포는 마치 지상의 폭풍과도 비슷하다. 거치른 대류는 복사파의 투과를 불투명하게 만들고, 거치른 대류층의 맨위층 부분에서는 비등과 기포발생등이 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 대류층을 거치는 동안 에너지 전달은 복사파 뿐만 아니라 대류 입자들의 직접 운반에 의하기도 한다. 떠오르는 각원소들은 자기가 가진 에너지를 직접표면으로 옮겨간다. 또 격심한 대류는 가끔 낮은 진동수의 소리파와 같은 잡음 또는 기계적 에너지를 나타내기도 한다. 바다위의 파도와 같은 중력파가 대단할 것임을 예측할 수 있다. 그림7의 대류층에서는 초대형의 알갱이와 같은 이온화된 기체 흐름이 형성되어 있고, 가끔 사이사이로 날카로운 불꽃의 솟구침이 나타난다. 따라서 주위는 엄청난 자장의 변화가 예상된다.

3. 광층 (Photosphere)

핵심부에서 발생한 복사에너지가 내부에서 흡수와 복사를 반복하다가 맨 나중에는 공간으로 방출되고 더이상 흡수되지 않는 그런 지각층을 광층이라고 한다.

광층의 온도는 비교적 낮고, 태양은 유체역학적으로 평형상태에 있음으로 태양 대기의 높이는 낮은 편이고 밀도는 급격히 감소한다. 층 밀도의 감소 이외에 높이에 따른 H^-의 밀도가 급격히 감소함은 전자 밀도의 감소에 연쇄적으로 연결되어 있고, ($H + e \rightleftarrows H^-$) 이는 내려가는 온도에 민감한 함수 관계를 갖는다. 우리가 관찰한 대부분의 복사는 약 100 *km*의 두께를 가진 대단히 엷은 층으로 부터 나온다. 이 층은 태양 반경의 0.014 %에 해당한다.

이 광층의 엷은 가시광 표면을 이루는 태양 지름은 0.696×10^6 *km* 또는 지구반경의 10^9

배이고, 표면 중력은 거의 27g에 해당하며 압력은 0.01atm이고 광층끝의 온도는 약 4300K에 해당한다. 방사되는 복사파가 평형을 유지하고, Stefan Boltzmann law (energy flux $= \sigma T^4$)를 이용하면 전체적인 복사층의 유효온도는 5780K로 계산된다.

광층에서 복사된 에너지가 태양복사의 대부분을 차지하고 가시스펙트럼에 중심을 차지한다.

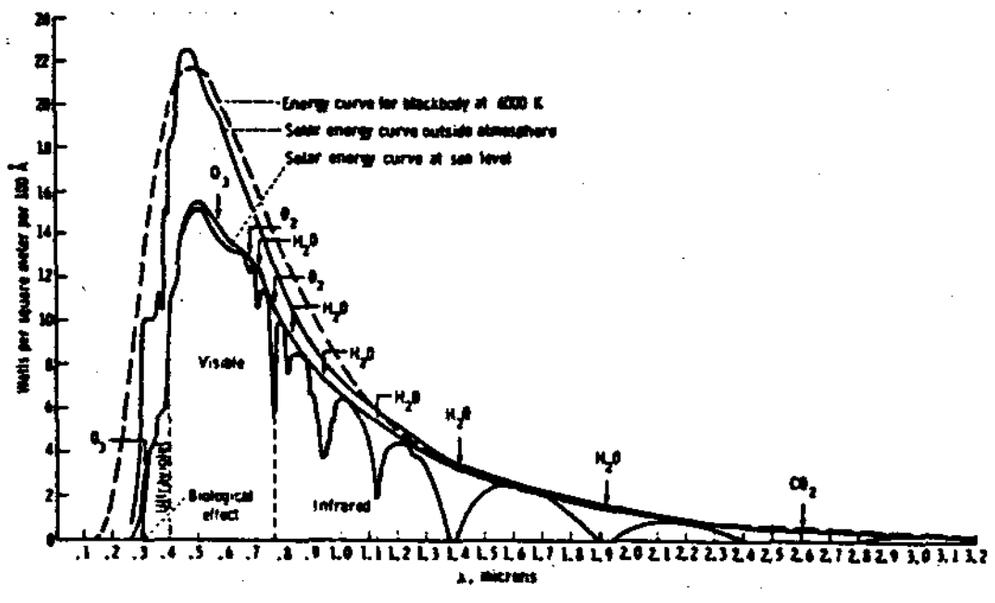

그림 3. 지상으로 오는 태양에너지, 대기권 밖과 내부의 강도

그림 3에서 보는 바와 같이 0.3 μ에서 3.2 μ에 이르는 넓은 폭의 광파장을 이루는 복사파는 지구에 도착하기 전에는 이상적인 복사파의 강도를 가지고 있으나 (실선), 대기권을 통과하면서 대기물질이 그 복사파의 반 정도를 여러 파장에서 흡수하기 때문에 복잡한 굴곡의 복사파가 지상에 도달하게 된다. 지상에 도달한 태양복사파의 에너지중 반이 가시 영역에 소속되고, 나머지는 자외선과 적외선 및 마이크로파에 해당한다.

태양 스펙트럼중에서 특히 두드러진 현상은 푸라운 호퍼선 (Fraunhofer-line)이다. 이것은 스펙트럼의 특정 파장이 상당히 흡수당해서 태양 스펙트럼에서 강도가 푹 패인 형태로 나타난다.

가령 Hα선은 6562.84A°에서 흡수하는데 태양 스펙트럼에서는 이 파장의 강도가 유독히 줄어져 있는 것을 볼 수 있다. 이는 태양의 광층과 채층및 코로나등지에 수소 원자가 광범위하게 분포되어 있어 광층에서 나타난 태양스펙트럼중 6562.84 A°을 흡수하는 것을 알 수 있게 한다. 또 유사하게 여러 파장에서 흡수된 파장을 검토해 보면 태양 표면과 태양 대기중에 존재하는 여러가지 원소들의 존재와 그들의 상대적 밀도를 알아낼 수 있다.

광층에서 빛을 외부로 복사시키고 아주 작은 복사량만이 주위의 원자들이 흡수하므로 점점 온도가 낮아질 것으로 예측하는데 의외로 광층 꼭지에 가면 최저 온도가 되나 또 다시 온도는 상승하기 시작하여 코로나에 이르면 10^6K에 달한다. 이 사실은 짧은 파장인 X-선으로 사진을 찍으면 태양의 가장자리는 검게 나타나나, 가장자리를 벗어나면서 오히려 약간 밝은곳을 가지는데 이것이 코로나 지역에서 오히려 높은 온도를 가지게 됨을 알 수 있게 하는 것이다.

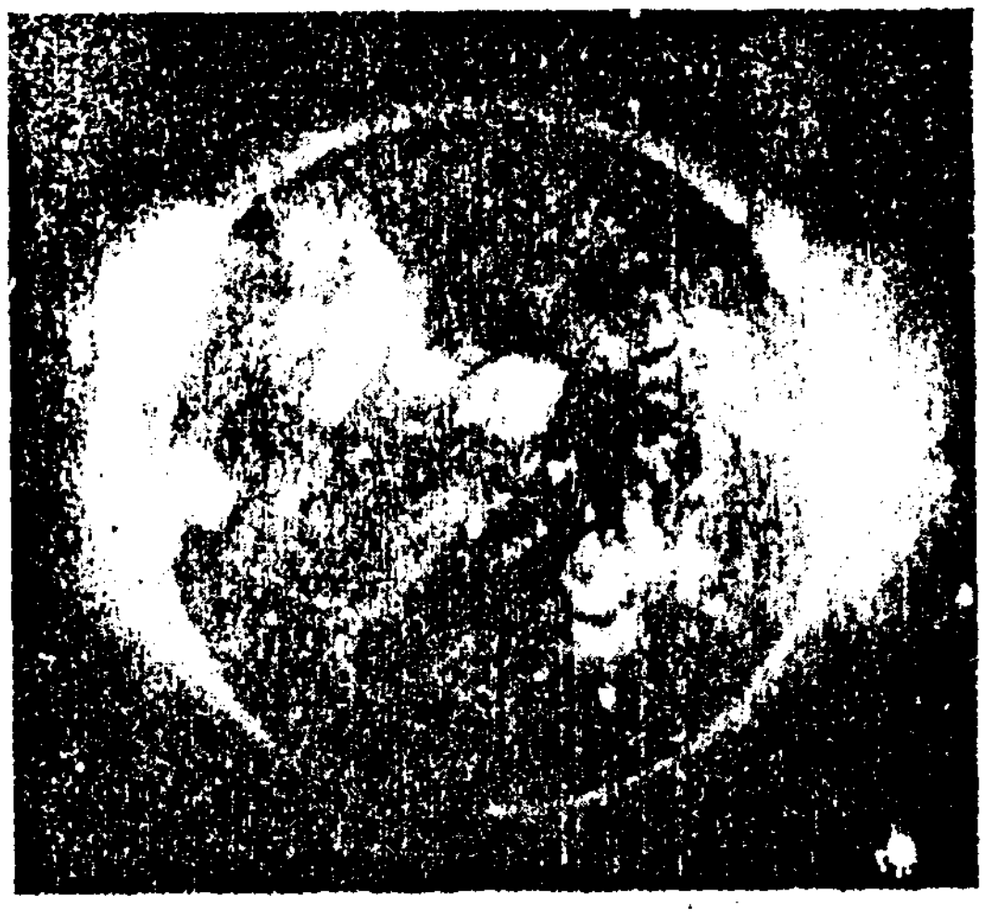

그림 4. 태양의 X선 사진

이는 광층에서 전번되는 복사파를 체층과 코로나에서 흡수하여 자신들의 에너지 상태를 높여서 결국 광층보다도 높은 온도로까지 가게 된다고 본다.

수소대류층과 광층에 깔려 있는 가장 두드러진 현상은 미립자형성 (granlation)이다. 이 미

립자 형성은 마치 옥수수 핵심과도 같다.

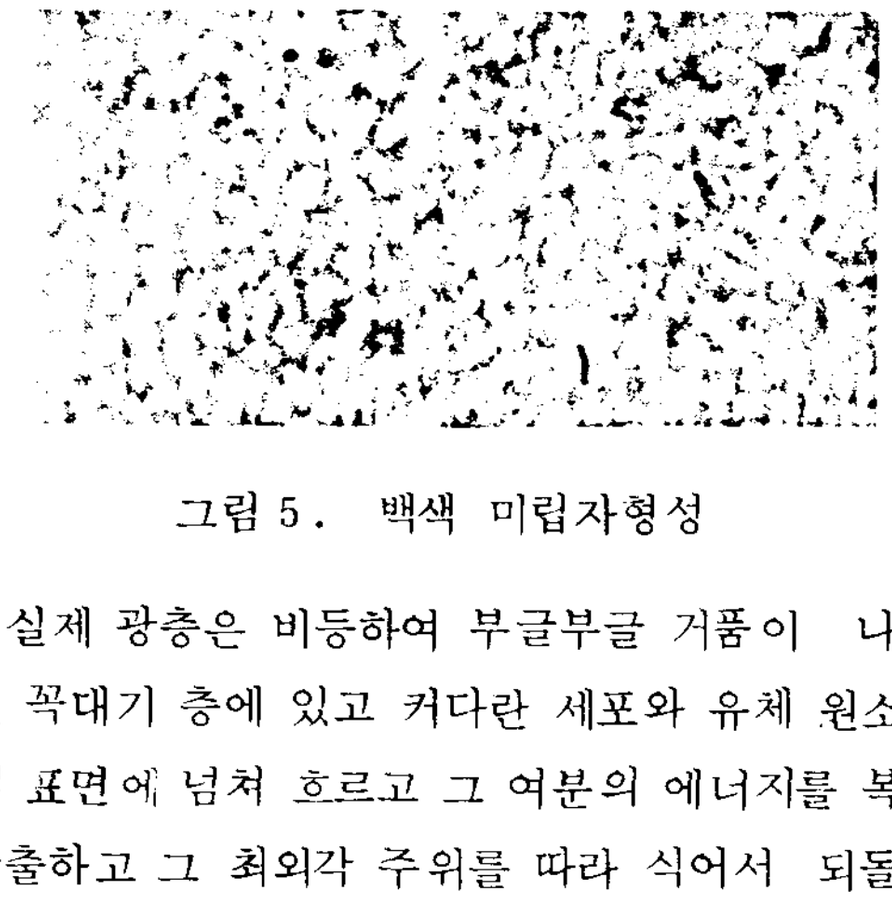

그림 5. 백색 미립자형성

실제 광층은 비등하여 부글부글 거품이 나는 맨 꼭대기 층에 있고 커다란 세포와 유체 원소들이 표면에 넘쳐 흐르고 그 여분의 에너지를 복사 방출하고 그 최외각 주위를 따라 식어서 되돌아 흘러오는 차거운 기체들이 가라 앉으며 서로 사이 간격을 내며 멀어지는 현상이다. 이들 세포들은 평균 크기가 약 1800 *km* 정도가 넘을 정도이고 특정 수명은 약 10 분정도이며 가장자리와 중앙 사이의 온도 차는 100 K가 넘을 것으로 본다. 비슷한 모습의 대류현상이 엷은 기름층에서도 나타나는데 이는 지구 대기층이내에서 일어난다. 좀더 규모가 크고 또 약간 보기드믄 광층운동현상은 초대형 입자형성 현상이다. 이것 역시 대류에 근원이 있는 것으로 생각된다.

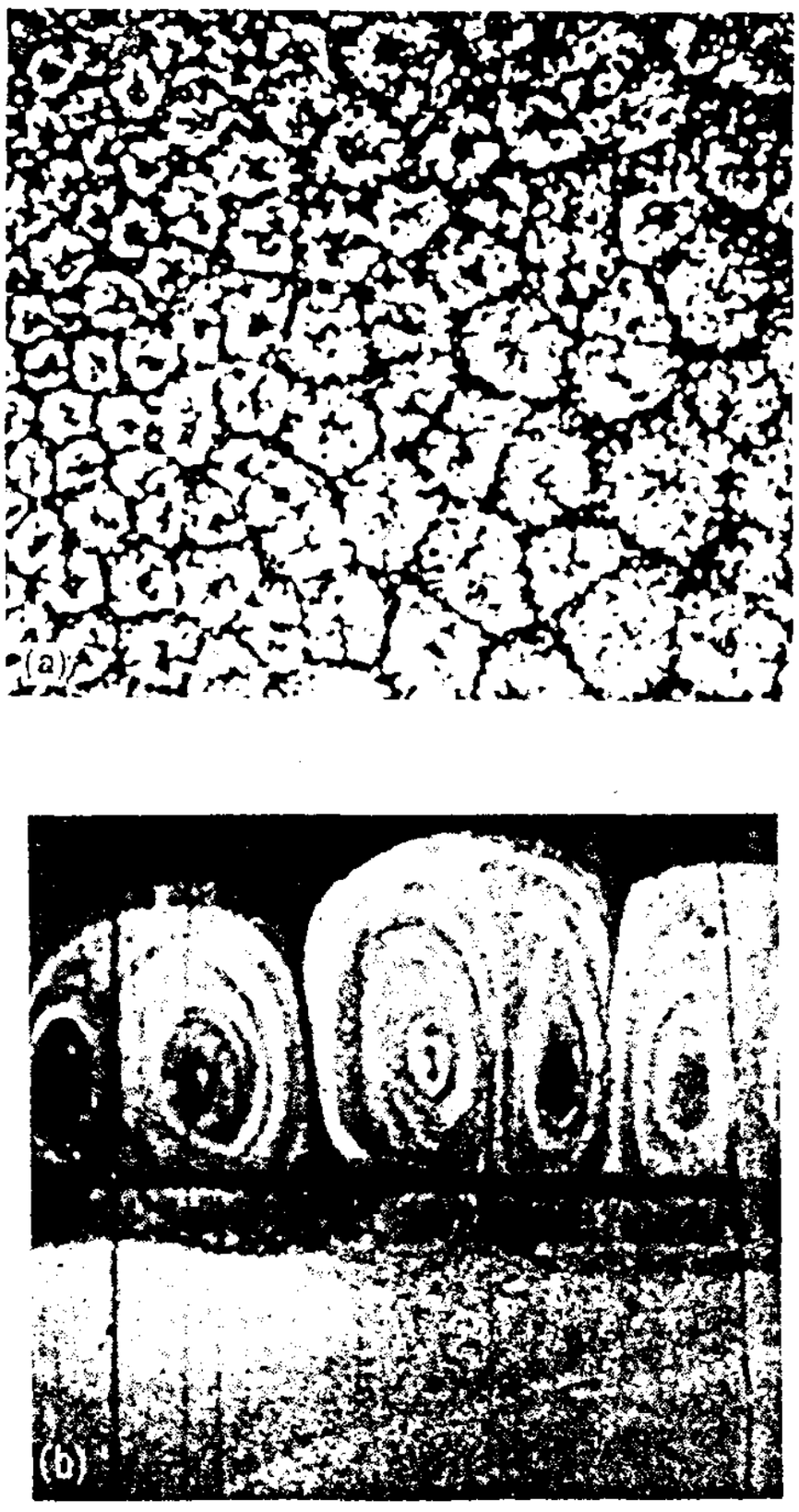

그림 6. a. 엷은 기름층의 대류 세포형성
b. 스모크 중의 대류세포의 단면도

초대형 입자는 보통 미립자보다 18 배정도 크고 (각 직경이 $2\frac{1}{2}$ 배정도) 그들은 120 배 정도 더 오랫동안 지속되곤 한다. 그 크기 때문에 초대형 입자형성은 더욱 깊숙한 뿌리를 가진 운동현상을 나타낸다. 이는 수소이온의 재결합 보다는 훨씬 낮은 층에서 헬륨이온의 재결합에 의해서 유도된 더 크고 두꺼운 대류에 의해서 이루어 진다고 본다.

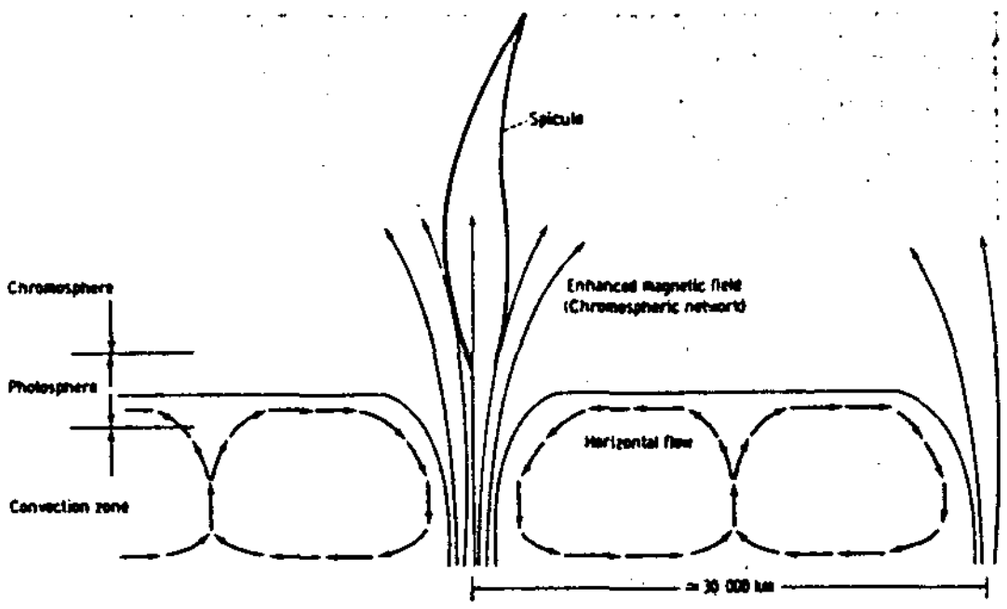

그림 7. 초대형 입자형성

대류층의 격동은 약 5 분 간격을 가진 태양 대기의 규칙적인 승강과 연계되어진다. 이 수직적 진동은 공간 파장 5000 *km* 이내의 표면위로 조화적 변화를 관찰할 수 있게 한다. 수직 방향의 상변화 관찰은 극히 드믄일인데 이는 이 진동이 정류파로서 광층과 체층사이 최저 온도지역에 갇혀 있는 것으로 간주된다.

광층 바로 위에 있는 보통때는 투명한 층으로 완전일식 직전이나 직후에 번쩍이나 핑크빛을 내는 가장자리의 층으로 색구 "Color sphe" 라고 한다. 이 빛은 대부분 Hα방사선인 붉은 선이다.

체층은 최저온도 바로 위층이기 때문에 밑으로부터 위로 올라감에 따라 밀도가 대단히 빨리 감소한다. 따라서 체층을 지나면 대단한 밀도 감소가 나타나서 광층에서처럼 우리가 곧 알기가 쉽게 된다.

체층은 비교적 거치른 소용돌이 같은 비교적 높은 밀도의 광층의 위에 있는 거품층으로 이는 움직이는 자장과 밀접한 관련이 있다.

낮은 진동수의 소리파가 요란한 대류영역에서 발생되어 체층으로 들어가면 두가지 변화가 나타난다. 첫째, 급작스런 밀도 감소때문에 소리파는 가속되어 충격파가 된다. 훼초리의 날카로운 끝힘 소리에 의해 생성되는 효과와 비슷하게 에너지 플럭스 (flux) 가 거의 고정되어 있다면 놀머리내의 물질 속도의 진폭은 증가할 것이 틀림없다.

이들 고속 파동액의 유체 운동은 유체입자사이에서 더 큰에너지 충돌을 자아낸다. 따라서 파동이 지나감에 따라 그 유체는 더욱 강한 열을 받는다. 둘째로, 밀도의 감소는 자장이 파동형태 (MHD) 의 에너지 플럭스(flux) 를 수반할 수 있는 능력이 비교적 상승된다. 자장속을 지나가는 이들 파동들은 또한 하전입자들인 전자와 이온들의 진동을 유발하고 이들 입자들이 서로 충돌하고 또 비하전 입자들과도 충돌함에 따라 에너지가 유체내에 축적된다. 체층에서 초래되는 이들 두가지 기구가 왜 당초 4300 K로부터 3000 *km*이내에서 거의 코로나의 콘도에 이르게 된다. 솟구치는 대류세포의 운동에 의해서 광층에서 발생한 중력파 (gravity wave)도 또한 자장과 복합되어 대기 가열의 또하나의 요인이 된다.

아무튼 동파장 (Coherent) 및 직행하는 파동운동의 형태를 가진 운동에너지는 (전체 유체 또는 하전된 입자들의) 입자충돌에 의해서 우리들이 열이라고 부르는 무질서한 입자 운동의 운동에너지로 전환된다.

밀도의 감소는 또한 유체운동에너지를 높이에 따라 급격히 감소하지 않는 자장속에 저장된 에너지에 비해 작도록 한다. 자장속에 에너지를 저장할 수 있는 능력을 다음과 같이 설명할 수 있다. 자장을 생성하는 전류를 증가시킴으로서 자장의 세기를 증가하면 전기 에너지는 전류 변화를 저항하는 유도 효과를 이기기 위해서 확대되어야 한다. 이 에너지를 자장속에 축적되도록 한 것으로 볼 수 있고, 이 에너지 밀도는 자장세기의 자승에 비례한다.

높은 전도율을 가지는 태양물질이 자장력선에 직각으로 움직일때 그 저장된 에너지는 전류와 힘을 자발적으로 유도하게 된다. 밀도 감소 때문에 광층 (photosphere) 에서와는 상황이 달라진다.

광층에서는 유체운동이 자장세기를 초과해서 마음대로 밀쳐내져서 완전히 이온화된 기체운동이 자장에 의해서 제한되고 정리된 윗부분 체층까지 밀쳐진다.

특히 초입자세포 (Super granular cells)내에서 수평 외향 운동은 자장을 유체흐름내에서 응진력(shear.)이 자장 강도를 높이는 세포 가장자리쪽으로 운반시킨다. 이것은 체층 (chromo-sphere) 속까지 확산되어 가는 자장망을 형성한다.

이 체층 자장망은 고온의 자장망과 일치하고 체층의 특성인 많은 푸라운호퍼 (fraun hofer) 선들에서 보여준 밝은 방사선이나 어두운 흡수선들과도 잘 맞아들어간다는 것이 확립되었다. 이 고온 자장망은 고조된 자장의 결과로서 이는 이미 설명한데로 MHD파의 역학적 에너지의 상향이동과 소강과정을 촉진시킨다.

4. 채층 (Chromosphere)

채층 구조에서는 또 훤하게 빛나는 분출현상이 무려 10000 ㎞까지 솟아 올라서 2~5분 사이에 사라지곤 한다. 이 현상은 태양의 가장자리를 Hα로 관측하면 분명해지는데 그림8과 그림9에서 보여 주고 있다. 그들은 마치 창과 같다고 해서 spicule 이란 이름을 붙혔다.

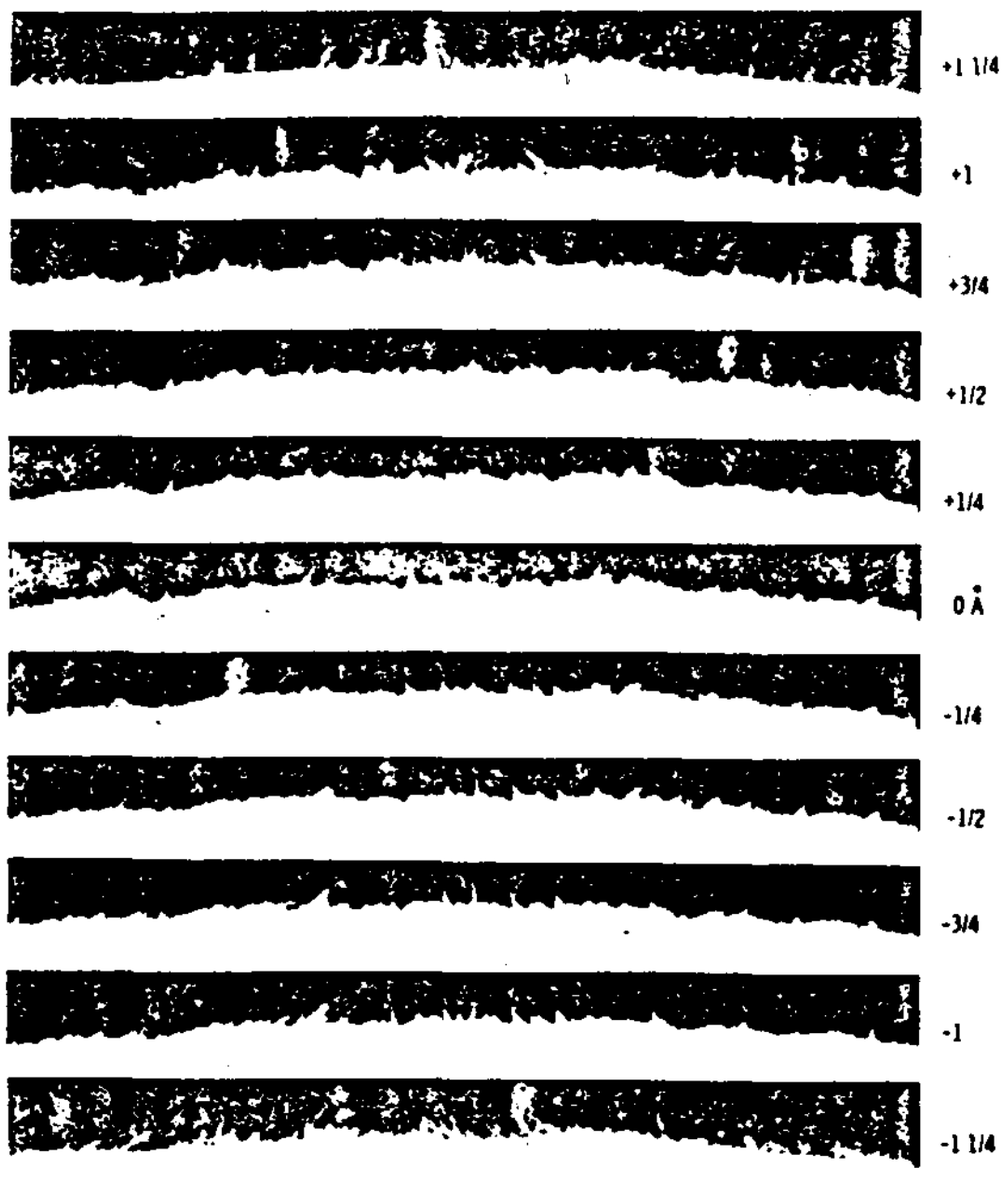

그림8. Hα로 관측된 태양가장자리의 스피클의 모형 변화

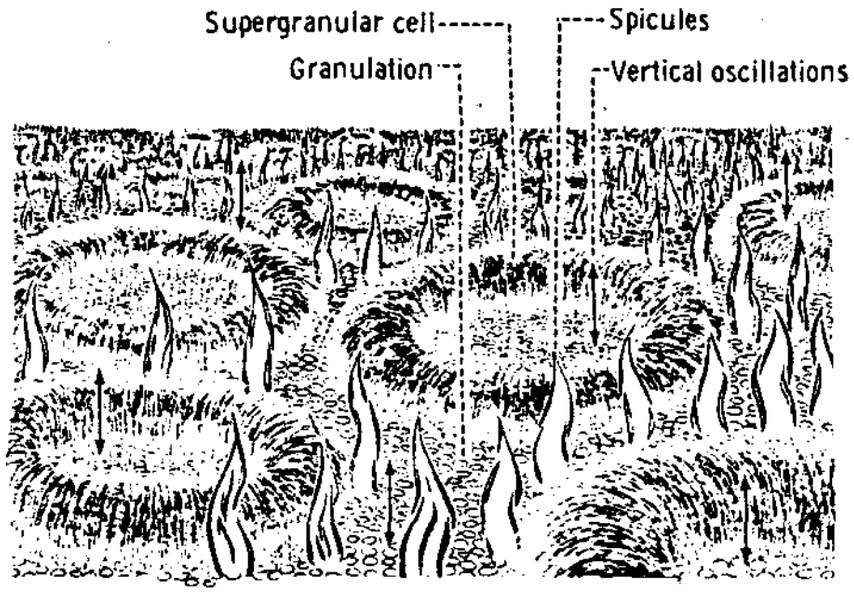

그림9. 태양 대기의 모습

따라서 채층은 마치 불타는 평원(burning-prairie)과 유사하다고 볼 수 있다. 또 이들의 근원을 자장의 존재가 크게 기여함은 의문의 여지가 없다. 스피클은 코로나를 향한 물질과 에너지의 유동을 크게 돕는 주요 행로이고 격렬한 현상이다.

5. 코로나 (corona)

채층 위 영역에서 우리는 대단히 밀도가 낮고 따라서 관찰하기 매우 힘든곳이 있음을 알게 된다.

태양면에 비해서 코로나의 백색 광도는 약10^{-6}배 정도로 마치 만월의 달빛과 비슷한 강도를 갖는다. 지상에서 코로나 사진에 의한 직접 관측은 지구 대기의 하늘에서 산란하는 빛때문에 상당한 난관에 부딪친다. 이 문제를 해결하기 위해 우리는 3년마다 약 2회 일어나는 완전일식을 기다려야 한다. 이때 달이 빛을 가리도록 한다. 다행이도 달은 거의 태양과 같은 각도의 크기를 갖는다. 이 경우 장점은 직사 일광이 대기에 의해 산란을 받지 않게 되고 강한 후광은 없어진다. 이렇게 해서 백색광 코로나는 훨씬 먼 태양 반경 밖까지도 촬영이 가능해진다. 이 방법을 사용하는 코로나 관측자는 쉽지 않은 고통을 받은 것이다. 완전일식을 관찰하기 위해서는 몇톤이나 되는 관측용기자재를 지구위 한적한 곳까지 옮겨야하고 또 날씨가 좋다고 가정할 경우 완전일식이 되어 촬영할 수 있는 시간은 불과 수분밖에 않되기 때문이다.

태양 반지름보다 멀리있는 백색광 코로나를 촬영할 수 있는 또 한가지 방법은 코로나 측정 장비를 로케트에 실어서 대기권 밖까지 운반해서 촬영하는 방법이다. 이때 산란되는 후광은 대부분 제거되고 광층과 채층의 빛은 기계 내부에서 효과적으로 제거시켜야 한다. 백색광 코로나로부터 오는 빛은 3가지의 뚜렷이 다른 근원을 갖는다. 코로나 빛의 첫째 성분은 K-코로나로서 독일어의 ckontinuirlich, 영어로 continuous의 뜻을 가진 것으로 태양표면으로부터 1.3Rθ (Rθ : 태양반지름) 이내에서 대부분 볼 수 있다.

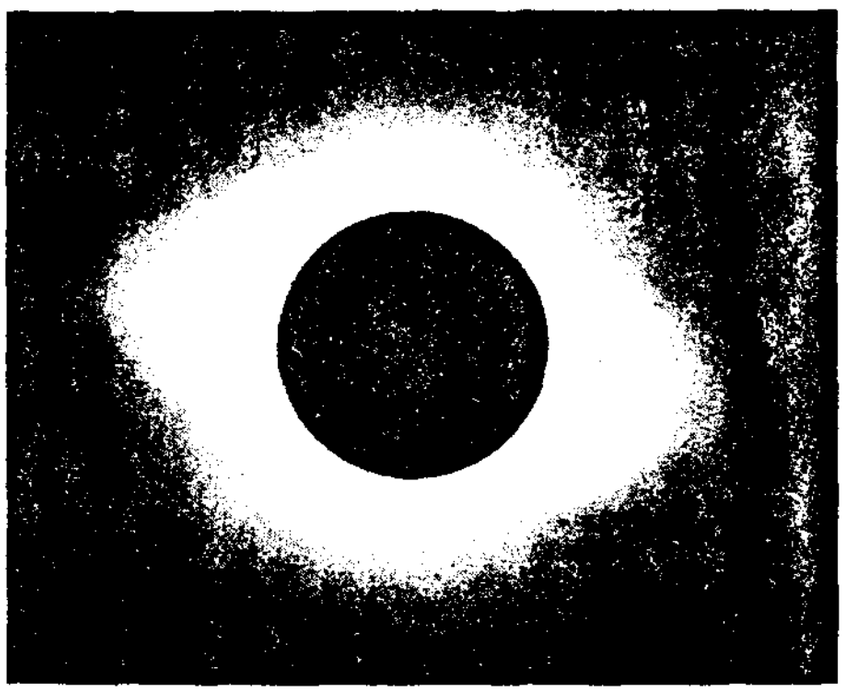

그림 10 . 최저 태양흑점을 통해 본 코로나
(1959 .6 .30 일식때 찍음)

이 빛은 광층에서 복사된 연속스펙트럼이고 자유 코로나전자에 의해서 관측자를 향해서 산란된 빛이다. 프라운 호퍼선은 나타나지 않는다. 왜

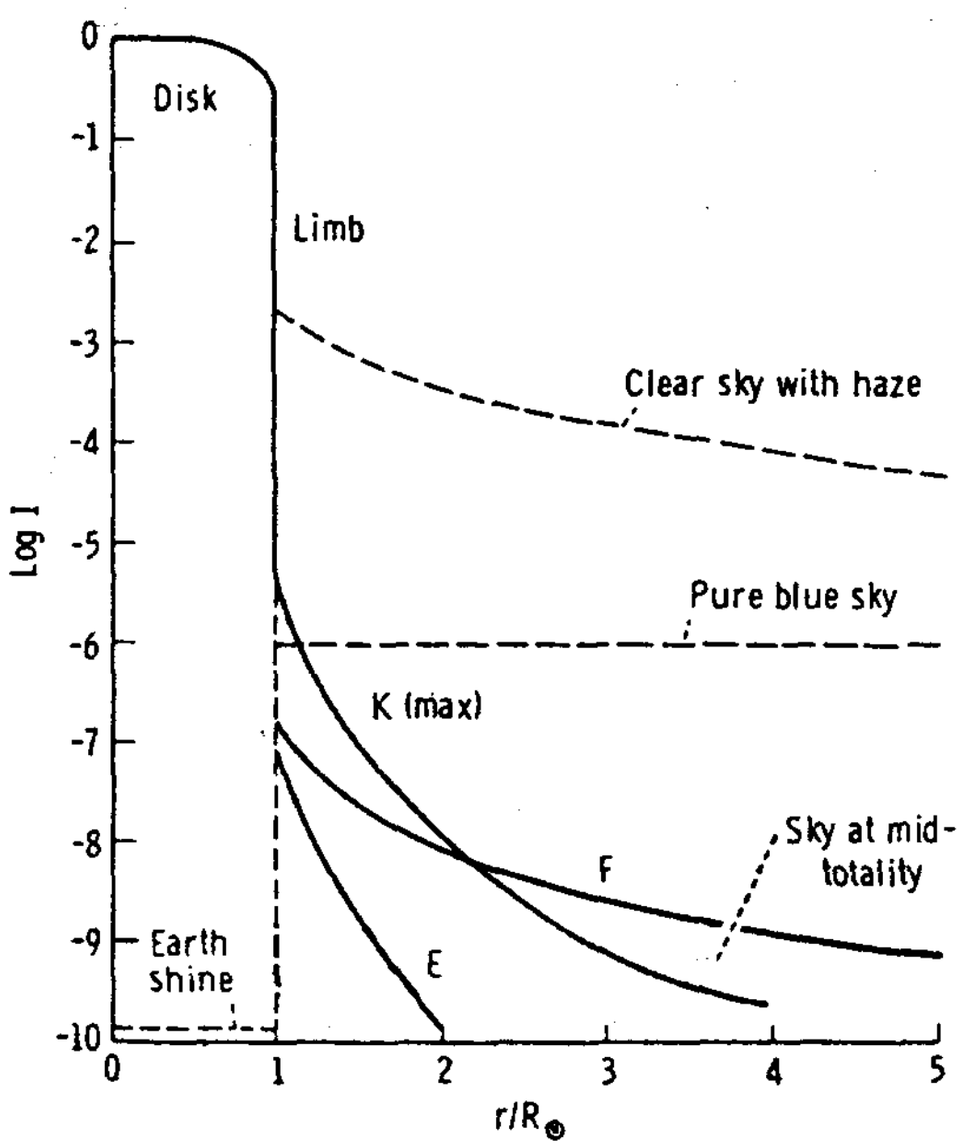

그림 11 . 코라나 빛의 3가지 성분
K 코로나, F 코로나, E 코로나

나하면 빨리 움직이는 전자에 의해서 산란됨으로 각 광양자가 준 도플러 변이(Doppler shift)가 각 선의 폭에 비해서 크기 때문이다. 따라서 그선은 대단히 큰 폭을 가지며 서로 겹쳐져서 더 이상 서로 분간할 수 없기 때문이다. 한편 F-

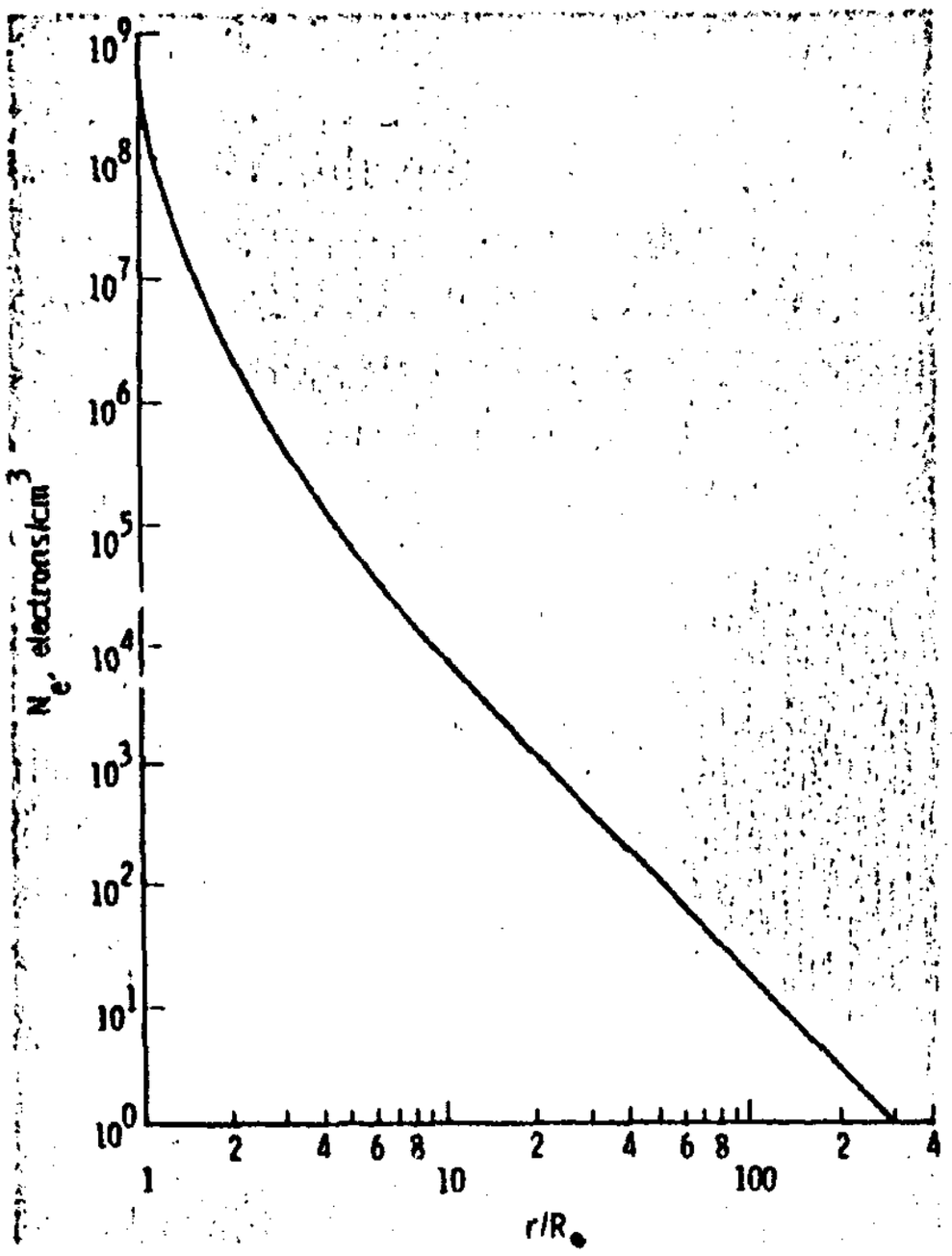

그림 12 . 대표적인 코로나의 전자밀도
(황도와 최저태양 흑점에서 측정)

코로나는 광층의 빛이 지구와 태양사이에서 비교적 무겁고 천천히 움직이는 입자들에 의해 산란되어진 성분임으로 프라운호퍼선들이 나타난다. 이것은 황도광과 똑 같은 구조를 가지고 있고 사실 F-코로나는 가끔 내부 황도광이라고 부르기도 한다. 세째번 성분은 E-코로나인데 이는 코로나 기체의 이온들에 의해 방출된 선들로 된 빛이다. 전자들에 비해 이온들의 열적운동은 느리고 방사된 선들은 K-코로나의 프로운호퍼선들 처럼 큰 도플러 변이 때문에 씻겨져 버리지는 않는다.

코로나 기체 온도를 측정하는 방법은 여러가지가 있으나 대략 같은 값을 나타내고 있으며 코로나의 각 입자들은 대단히 높은 평균에너지를 가진다는 것이 확인되었다. 그중 한 방법을 유체정력학적 척도의 높이에 따른 복사밀도 변화로부터 온도를 산출하는 데, 즉 이 온도 (평균입자에너지) 는 그 높이에 따라 비례하고 있다는 것

이다. 또 한 방법은 라디오파의 복사강도를 측정하여 기체온도를 직접결정하는 법이다. 코로나는 가시광선에 투명하지만 약 2 미터 보다 큰 파장을 갖는 라디오파에는 불투명하다. 전자기체는 이 영역의 복사를 잘 흡수하고 방출하는 데 충분한 밀도를 가지고 있다. 그래서 전자기체와 라디오 파장의 복사는 같은 온도에 있다고 가정할 수 있다. 세째 방법은 코로나 원자의 높은 이온화 강도를 관찰하고 이온생성과 제거 기구 사이에 균형을 이루도록 하는 온도 (평균전자에너지) 를 계산한다. 이 높은 이온화를 설명하기 위해서 예를 들면 철이온 FeXVl1 경우 26 전자 중 16 개가 떨어져 나갔고 E-코로나에 많은 높은 에너지 복사선들을 낸다. 마지막으로 온도 (평균이온 속도) 는 코로나 이온 복사선들의 도플러폭 (Doppler width) 을 측정함으로서 얻어질 수 있다. 이들 방법들은 유효온도가 10^6 K 임을 확인해 주고 있으며, 1.5×10^6 K는 코로나 내부의 명목상의 온도다. 이 온도는 대단히 높지만 코로나의 총 에너지량은 작다. 입자의 평균 에너지는 크지만 극히 작은 입자밀도 때문에 에너지 밀도는 낮다. 즉 지구 대기의 해표면상의 입자밀도가 10^{19} 입자/㎤인데 비해 4 $R\theta$ 에서 ($R\theta$ 는 태양반경) 10^5 입자/㎤이다. 또 이 낮은 밀도 때문에 코로나에서 방출되는 에너지는 다만 체층의 10^{-3} 배에 불과하다.

코로나는 정체상태가 아니고 태양풍력에 대항해서 그 자신의 압력경사도를 지닌체 우주 진공을 향해 끝임없이 팽창해 나간다. 그 결과로 초래되는 유동을 태양풍 (solar wind) 라고 부르고 이 바람은 약 400㎞/sec 라는 초음속으로 지구까지 도착하며 그 밀도는 ㎤당 몇개의 입자가 들어있고 그 온도는 10^5 K에 이른다. 빛이 태양에서 지구까지의 거리 215 $R\theta$ 를 거쳐 우리들에게 도착하는 데 8 분이 걸리는 데 반면 태양풍은 약 5 일만에 날라와 닿는다. 태양에 근접한 곳 (즉 3$R\theta$ 의 거리이내) 에서는 흐름의 기하학은 자장구조가 결정한다. 그러나 태양에서 멀어지면 기체 역학적 압력에 비해 자기 압력의 감소 때문에 자장은 외곡된체 태양풍에 의해 태양계로 뻐쳐간다. 그래서 지구대기는 극히 미미하지만 태양의 외각 대기로 실제 소속되어진다.

결국 태양에너지는 태양핵심에서 발생되어 그 대부분은 비교적 엷은 광층에 의해 우주 공간으로 확산되어진다. 대류층은 핵심으로 부터 온 약간의 에너지를 기계적 형태로 바꾸어 줌으로 갑작스런 밀도의 감소와 더불어 태양외각기체의 대단히 높은 온도를 유지하는 데 기여한다. 각층은 약간씩 서로 겹치면서도 나름데로 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.