

太陽結構

對流層

THE CONVECTION ZONE

Energy moves toward the surface through convection currents of heated and cooled gas.

輻射層

THE RADIATIVE ZONE

Energy moves slowly outward from the core, taking more than 170,000 years to radiate through.

核心

THE CORE

Energy is generated by thermonuclear reactions, creating temperatures of around 15 million degrees Celsius.

色球層

THE CHROMOSPHERE

This relatively thin layer is sculpted by magnetic fields that restrain the electrically charged solar plasma. Occasionally larger plasma features—called prominences—form and extend far into the corona, ejecting material away from the Sun.

光球層

PHOTOSPHERE

The photosphere is composed of convection cells called granules, each around 1000 kilometres in diameter with hot plasma rising in the centre and cooler plasma falling in the narrow spaces between them.

SUN SPOTS

Sun spots are caused by intense magnetic activity which inhibits convection, forming areas of reduced surface temperature.

日冕

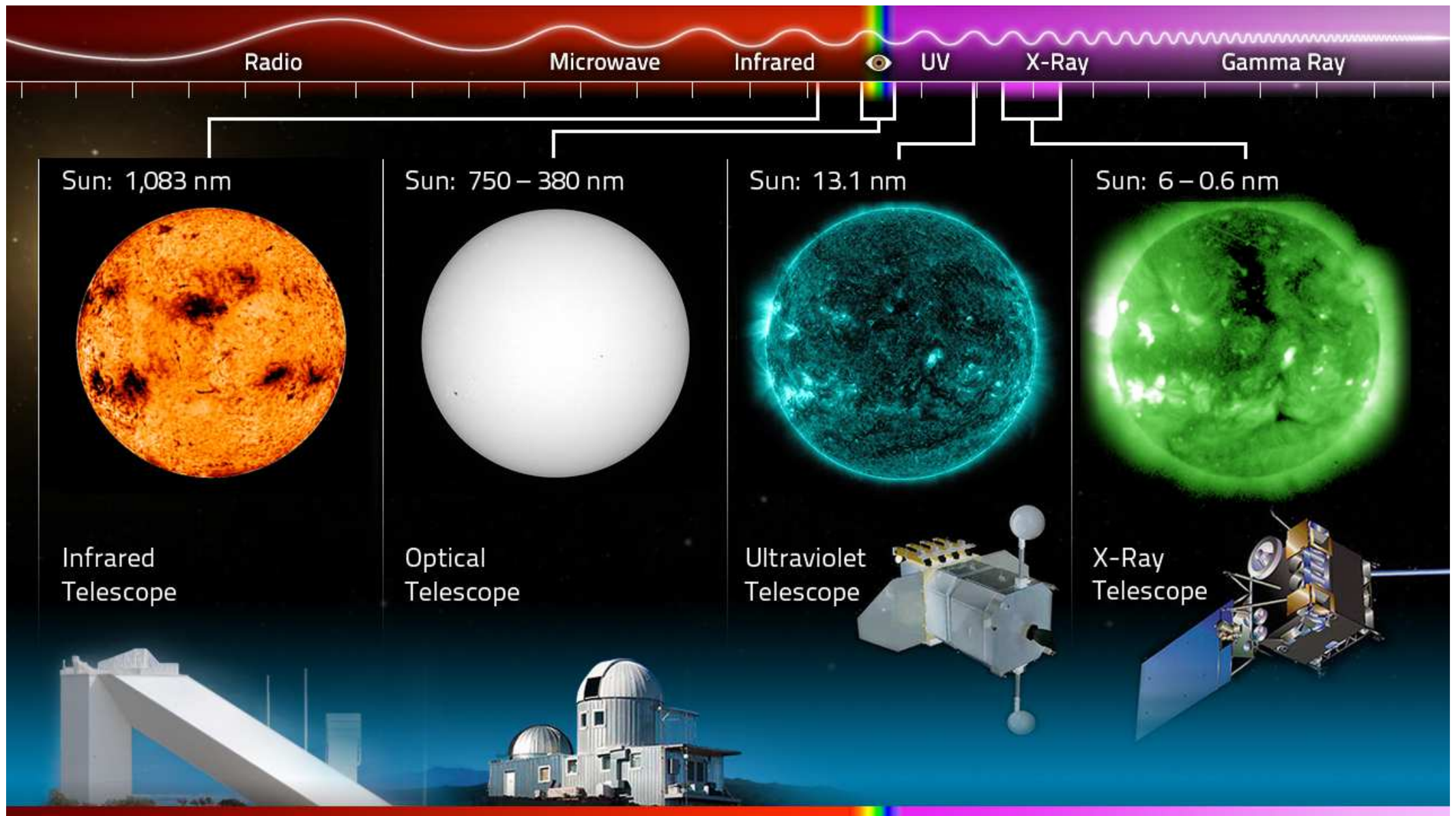
THE CORONA

Ionised elements within the corona glow in the X-ray and extreme ultraviolet wavelengths.

CORONAL STREAMERS

Outward-flowing plasma from the corona is shaped by magnetic fields into tapered coronal streamers which extend millions of kilometres into space.

多波段觀測

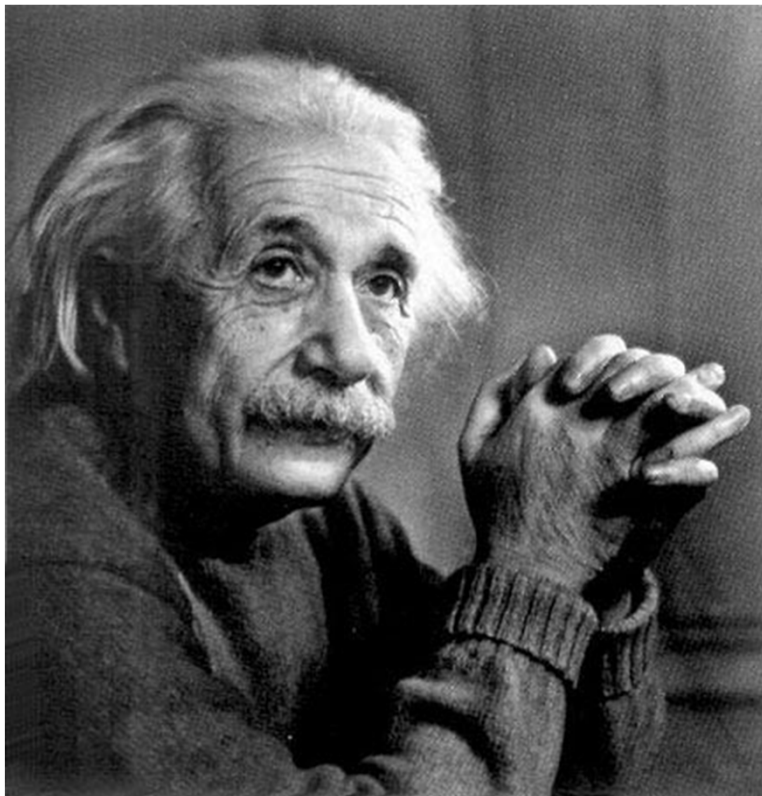


太陽內部結構

→ 核心(0-0.25 R_s) --- 太陽的能量來源

太陽核心溫度達 1.5×10^7 K，壓力為地球大氣壓力的 2.5×10^{11} 倍，所以核心處的氫會發生核融合反應。

太陽的能量如何產生？ --- 質能轉換



$$\Delta E = (\Delta m) c^2$$

氫核融合反應可簡單總結為：

4個氫 → 1個氦 + 能量 + 2個微中子

一次氫核融合所釋出的能量有多大？

4個氫核的質量: $m_{4\text{H}} = 6.693 \times 10^{-27} \text{ kg}$

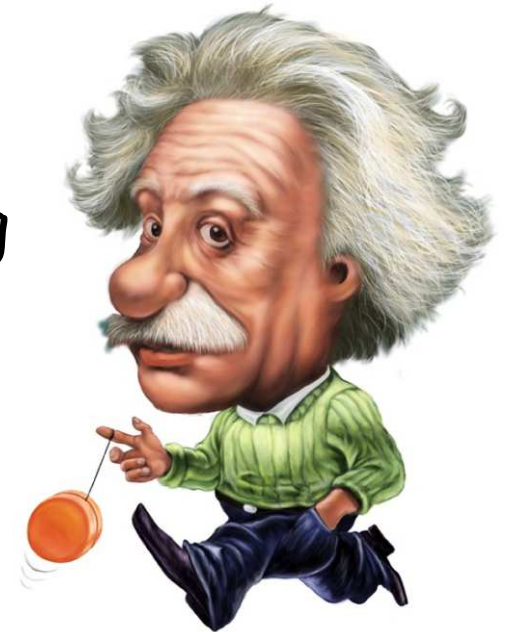
1個氦核的質量: $m_{\text{He}} = 6.645 \times 10^{-27} \text{ kg}$

在氫融合過程的質量損失: $\Delta m = 0.048 \times 10^{-27} \text{ kg}$

而一次氫核融合所釋出的能量為

$$\begin{aligned}\Delta E &= (\Delta m) c^2 \\ &= (0.048 \times 10^{-27} \text{ kg}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/sec})^2 \\ &= 4.3 \times 10^{-12} \text{ J}\end{aligned}$$

即一次氫核融合反應用掉4個氫核產生 $4.3 \times 10^{-12} \text{ J}$ 的能量



----- 我是分隔線 -----

這樣的能量其實非常小，所以必須有很多次反應才能獲得足夠維持一顆恆星的能量。例如對太陽而言，需要每秒約 10^{38} 次的這種反應(即約每秒五百萬噸的質量轉換成能量)，才能夠抵消太陽自身的重力收縮以維持穩定狀態。

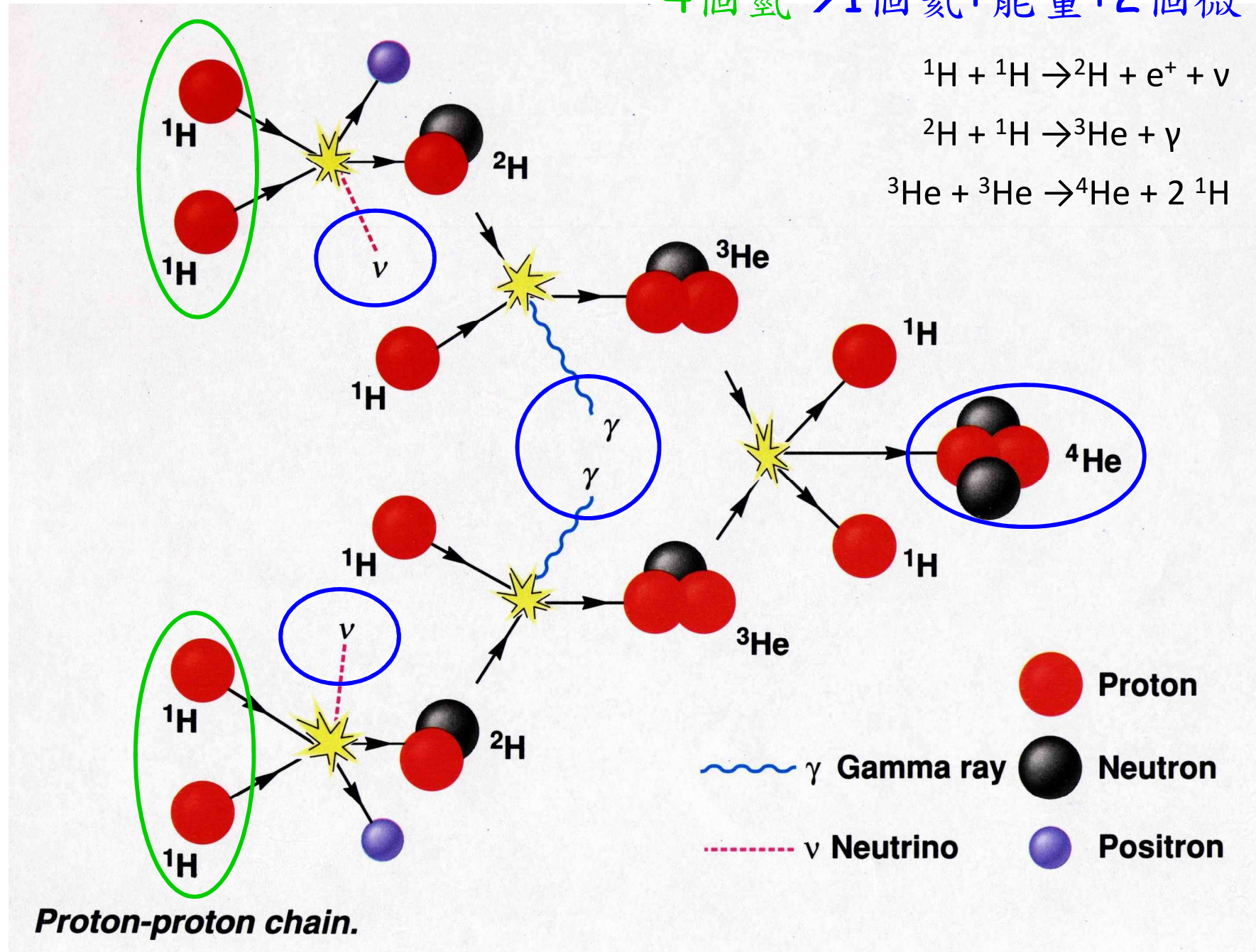
而兩個原子核必須要靠得夠近才可能融合，但因兩個原子核本身都帶正電會互相排斥。要克服此力，需要兩個原子核以高速互相碰撞。因為在高溫下粒子的運動速度才高，所以發生原子核融合反應的環境溫度要高達 10^7 K。

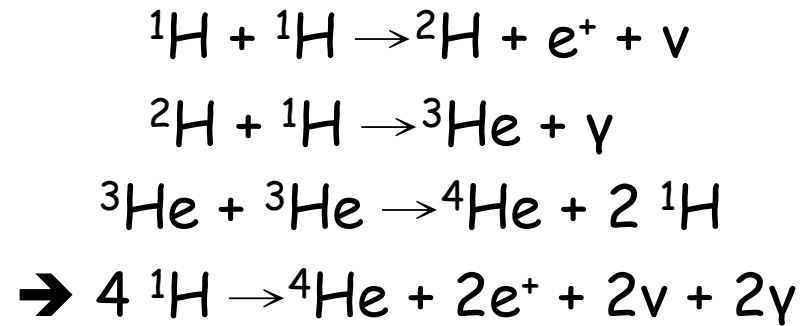
融合反應除高溫外，氣體的密度也要很高。我們知道太陽需要每秒 10^{38} 次反應才能提供足夠的能量，但是在所有碰撞中只有少數百分之幾的碰撞能產生核融合，所以只有當氣體的密度夠高，碰撞的次數才能高到符合維持太陽能量所需。

氫核融合的主要過程有：質子-質子(proton-proton chain)與碳氮氧循環(CNO cycle)兩種。

Proton-Proton Chain (PP Chain)---90%太陽能源的產生方式

4個氫→1個氦+能量+2個微中子





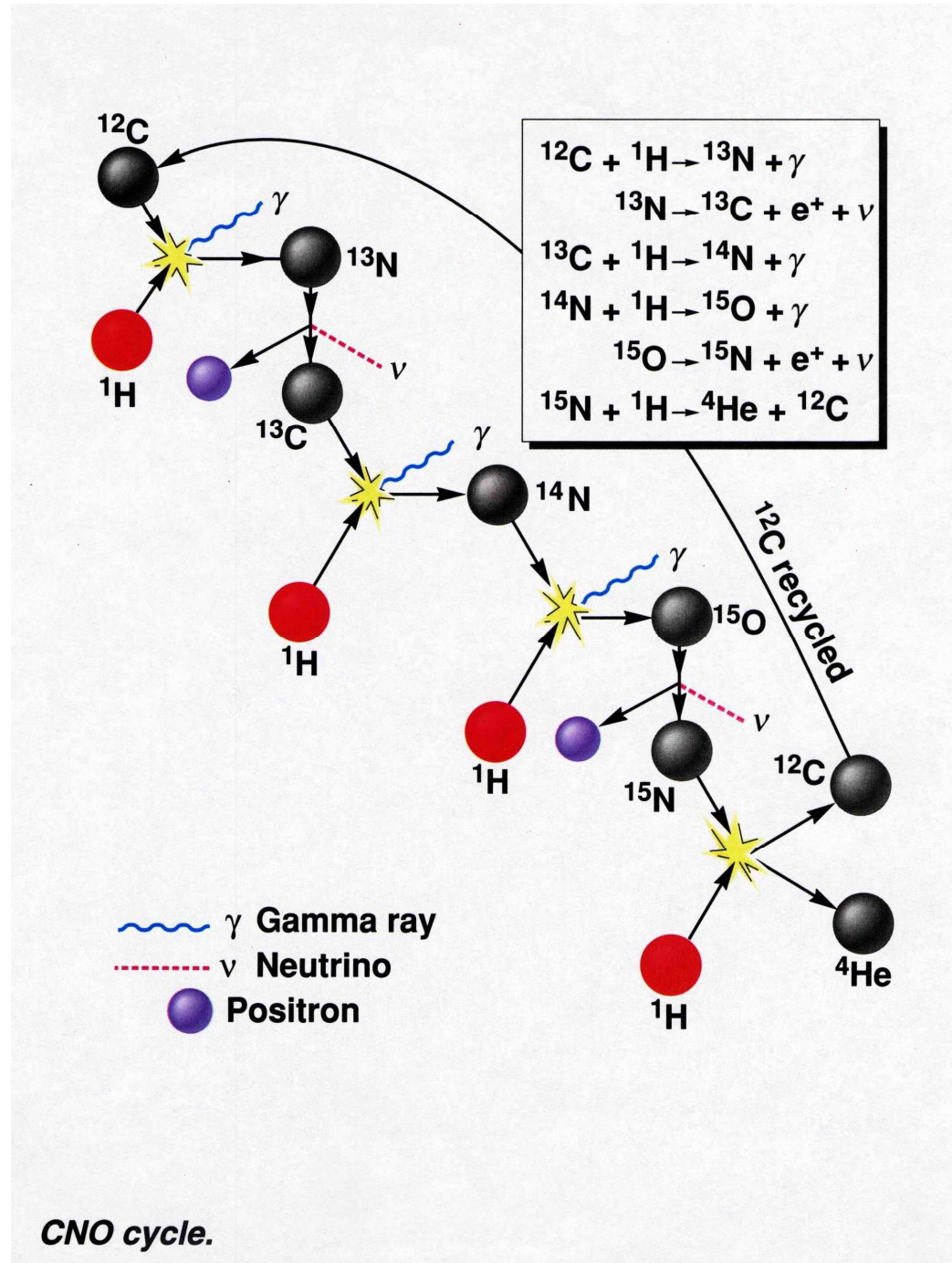
第一步，2個氫核(也就是兩個質子)合併產生1個重氫核(氘)，並放出1個正電子(帶正電的電子)，以及1個微中子(neutrino，為電中性，並以光速運動)。

第二步，重氫原子核(氘)吸收另一個質子，並放出 γ 射線，形成輕氦核。

最後，2個輕氦核合併產生1個普通的氦核及2個氫原子核。

正電子(e^+)與一般電子(e^-)相遇後，相互湮滅產生兩個X射線(兩個 γ 射線的光子被帶走)。

CNO Cycle (Carbon-Nitrogen-Oxygen)



→ 輻射層(0.25-0.7 R_s) --- 能量以輻射形式傳出

能量以輻射形式傳出，也就是以電磁波的形式傳遞，因為此層的溫度和壓力不如核心，所以無法產生氫核融合反應

溫度從7百萬K降至2百萬K，密度從20 g/cm³降至只有0.2 g/cm³

γ射線(高能光子): 不斷與輻射層內的物質粒子碰撞，被物質粒子吸收再以較低能量輻射出來，約花百萬年的時間才能穿過輻射層，光子的能量由γ射線減低到可見光與紫外光的能量

微中子: 幾乎不與太陽內部任何物質起反應，以光速或近光速的速度，離開核心向外傳播。

太陽微中子之謎

- 若想探究太陽內部的狀態，最理想的構想為偵測立即飛離太陽核心的微中子。不過由於微中子幾乎不與其他粒子作用，所以要偵測它並不容易。
- 根據標準太陽模型推測的微中子產生率，與核子物理預測微中子和氯化碳的反應速率，及實際觀測的結果，發現觀測的太陽微中子數目僅為理論預測值的 $1/3$ 。

可能原因：

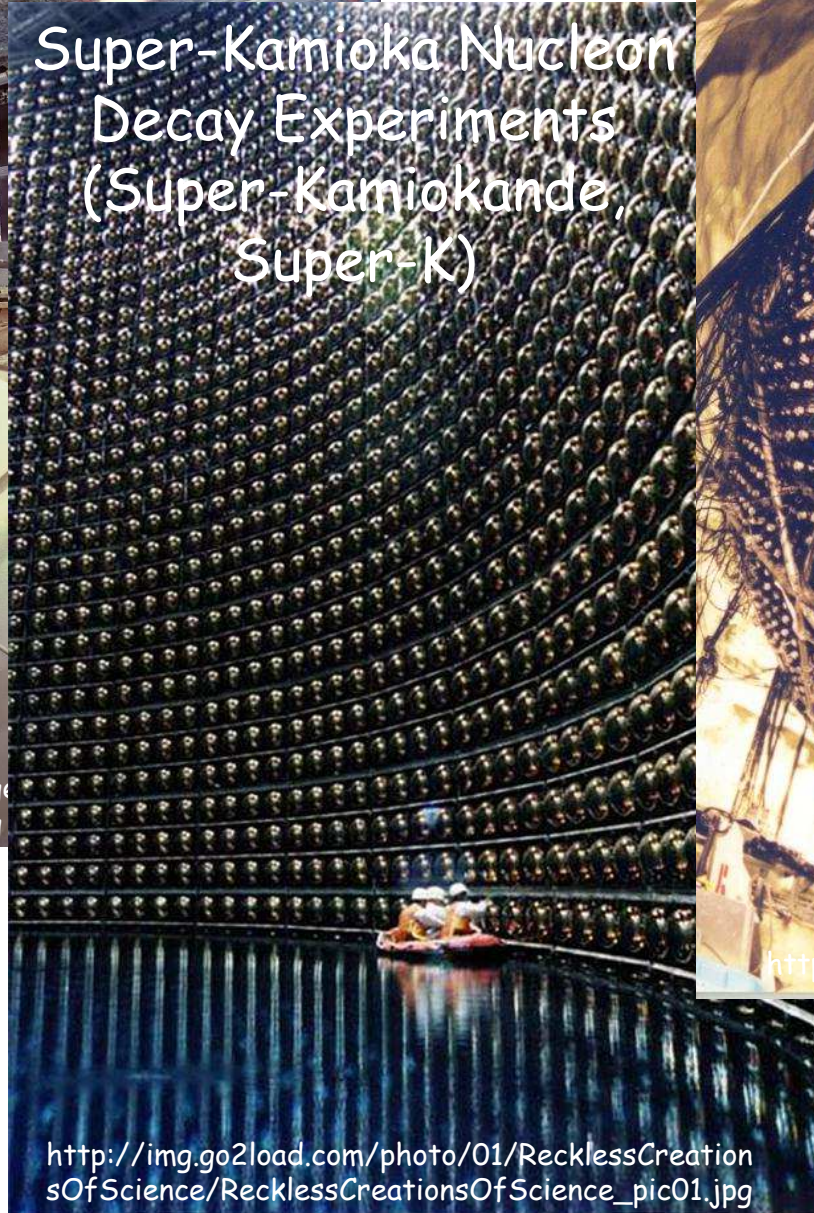
- 有關微中子物理的理論並不正確，即微中子的產生率或與物質的反應速率不如理論預測高。
- 太陽核心的溫度不如理論模型預測高，若核心溫度低 10% ，氫融合反應仍可進行，但微中子的產生率將大幅降低。但若太陽的核心溫度降低 10% ，則模型所預測的太陽光度將遠低於實測值，且模型的其他預測值也全錯。
- 微中子會在三種形式之間改變，即為微中子振盪(neutrino oscillations)。在太陽微中子傳到地球的 8.3 分鐘內，已經有 $2/3$ 的太陽微中子轉換成其他種類的微中子，而過往的實驗並無法偵測到其他種類的微中子。

Homestake Experiment



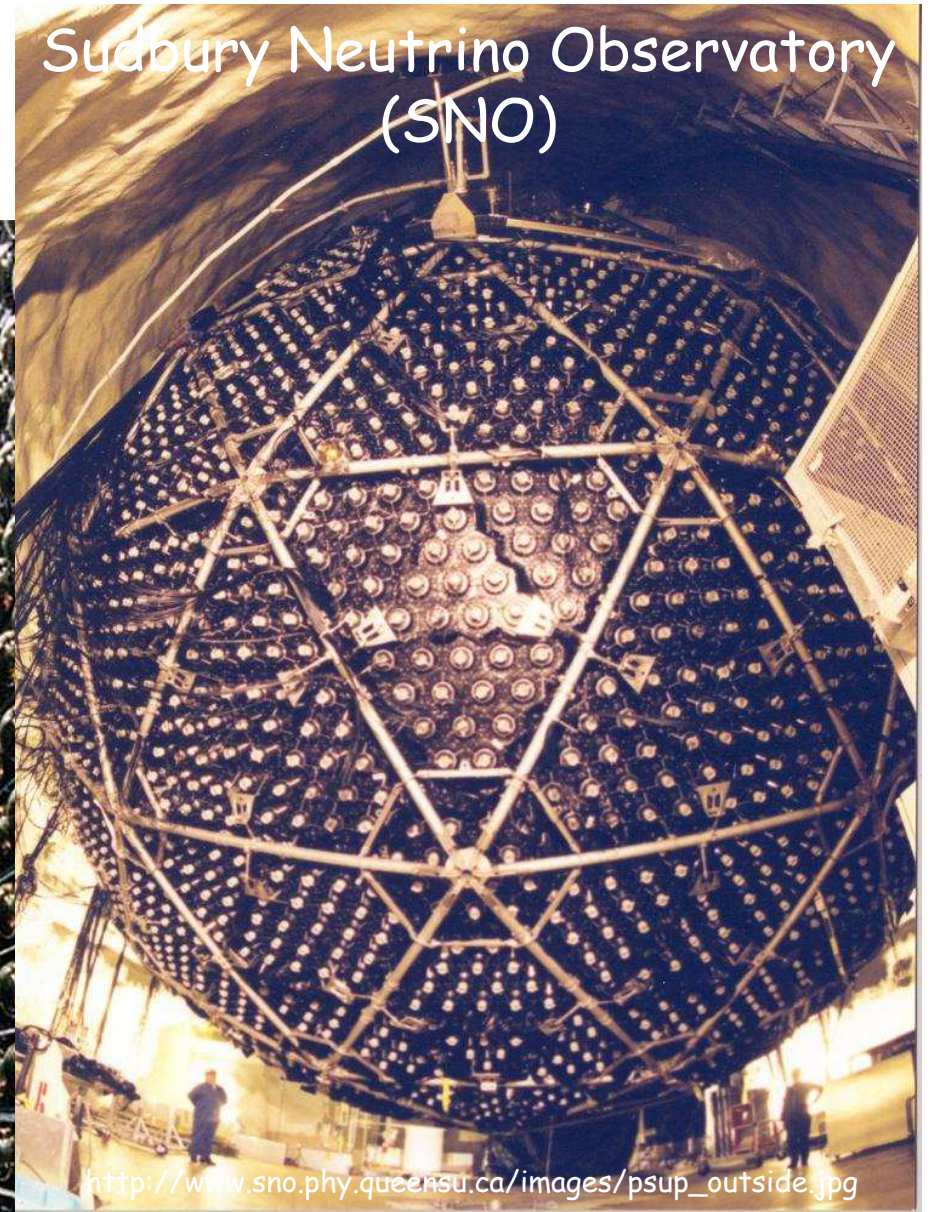
<http://hep.physics.indiana.edu/~hgg/graphics/detectors/homestake.jpg>

Super-Kamioka Nuclear Decay Experiments (Super-Kamiokande, Super-K)



http://img.go2load.com/photo/01/RecklessCreationsOfScience/RecklessCreationsOfScience_pic01.jpg

Sudbury Neutrino Observatory (SNO)



http://www.sno.phy.queensu.ca/images/psup_outside.jpg

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2015 to

Takaaki Kajita

Super-Kamiokande Collaboration

University of Tokyo, Kashiwa, Japan

and

Arthur B. McDonald

Sudbury Neutrino Observatory Collaboration

Queen's University, Kingston, Canada



“for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass”

Metamorphosis in the particle world

The Nobel Prize in Physics 2015 recognises **Takaaki Kajita** in Japan and **Arthur B. McDonald** in Canada, for their key contributions to the experiments which demonstrated that neutrinos change identities. This metamorphosis requires that neutrinos have mass. The discovery has changed our understanding of the innermost workings of matter and can prove crucial to our view of the universe.

What is left to do?

The chlorine and gallium detectors do not measure the energy of neutrino events. Only the water detectors (Kamiokande, Super-Kamiokande, and SNO) provide specific information about the energies of the solar neutrinos that are observed. However, the water detectors are sensitive only to higher energy neutrinos (with energies > 5 million electron volts).

The standard computer model of the Sun predicts that most solar neutrinos have energies that are below the detection thresholds for the water detectors. If the standard solar model is correct, water detectors are sensitive to only about 0.01% of the neutrinos the Sun emits. The remaining 99.99% must be observed in the future with new detectors that are sensitive to relatively low energies.

The Sun is the only star close enough to the Earth for us to observe the neutrinos produced by nuclear fusion reactions. It is important to observe the abundant low-energy solar neutrinos in order to test more precisely the theory of stellar evolution. We believe we can calculate the expected number of low energy

→ Tachocline(差旋層; $0.7 + 0.04 R_s$)

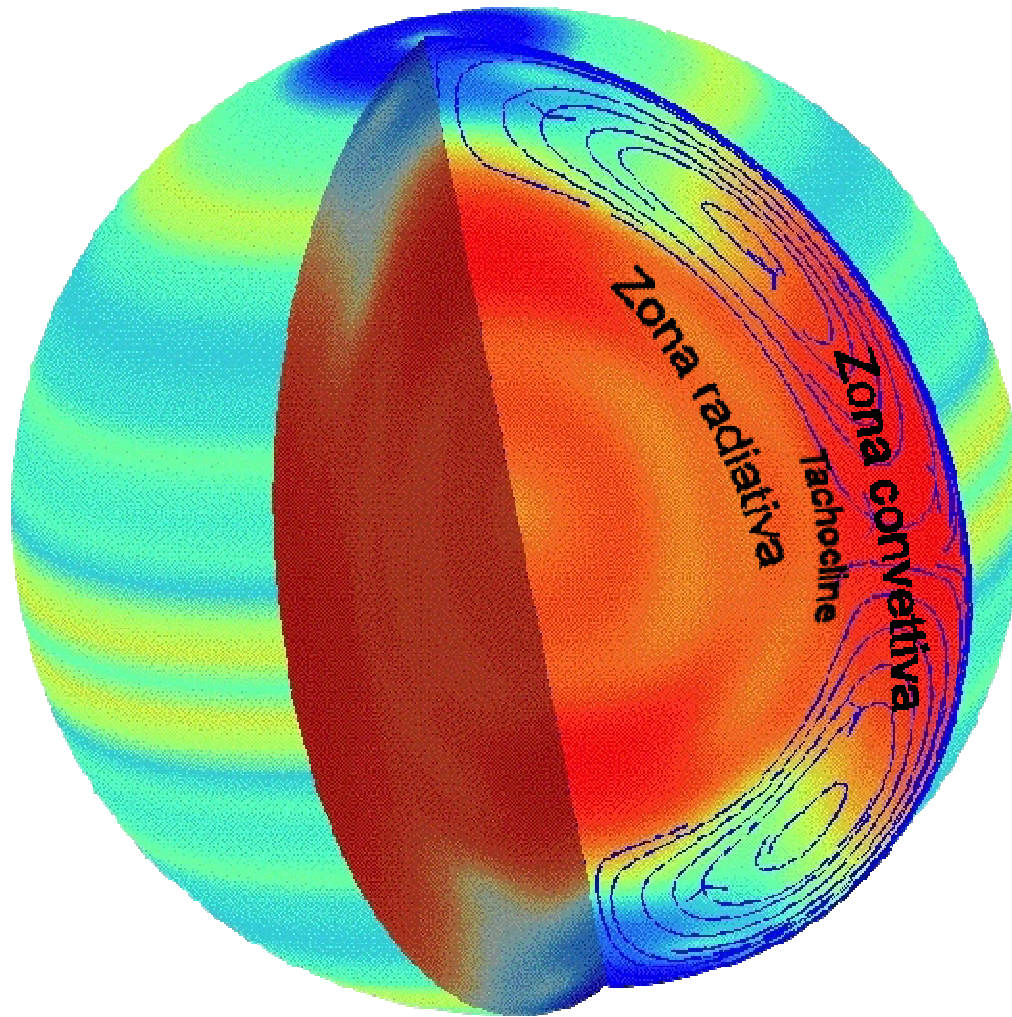
均勻旋轉的輻射層與差動自轉的對流層之間的過渡區域，即意味著此過渡區有很大的剪切剖面，這是一種可以形成大規模磁場的方法

→ 對流層($0.7-1 R_s$) --- 能量以對流形式傳出

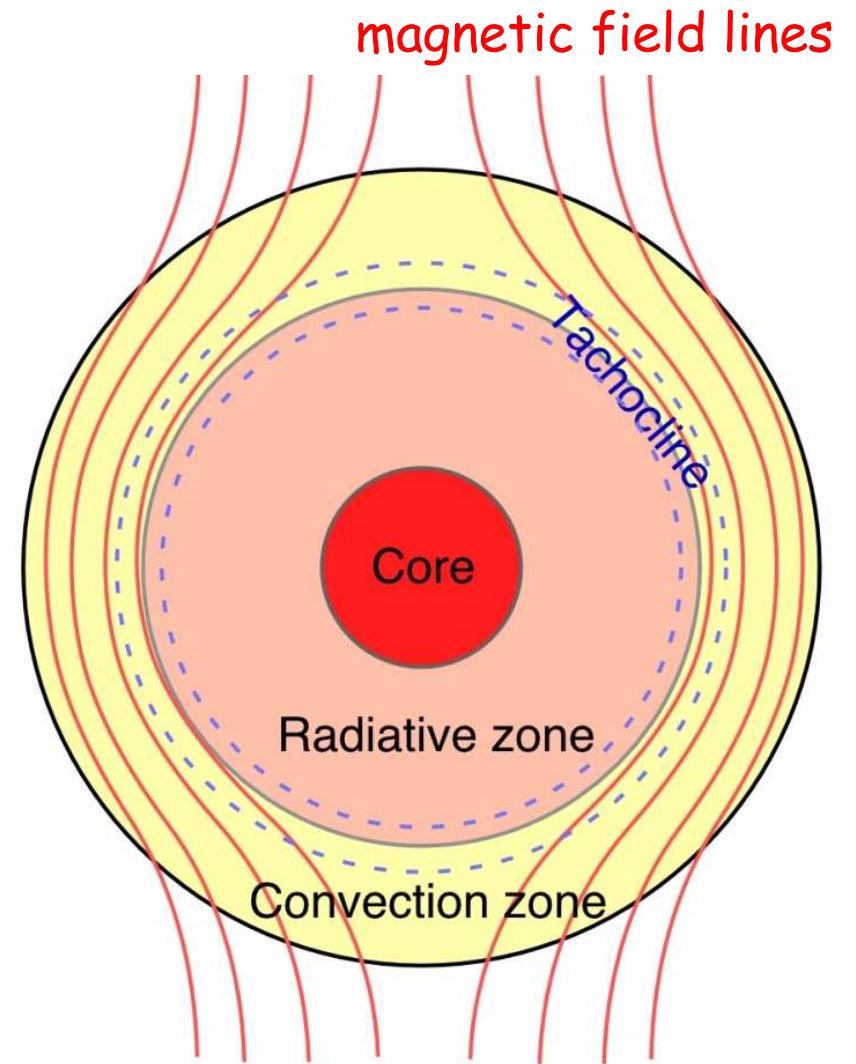
此層的電漿已經不夠稠密或不夠熱，由輻射層傳來的能量，不再能經由傳導作用有效的將內部的熱向外傳送

溫度向外遞減率非常大，在可見的太陽表面，溫度已經降至 **5800 K**，造成對流不穩定而發生對流

此層電漿呈現差動自轉(Differential Rotation)現象



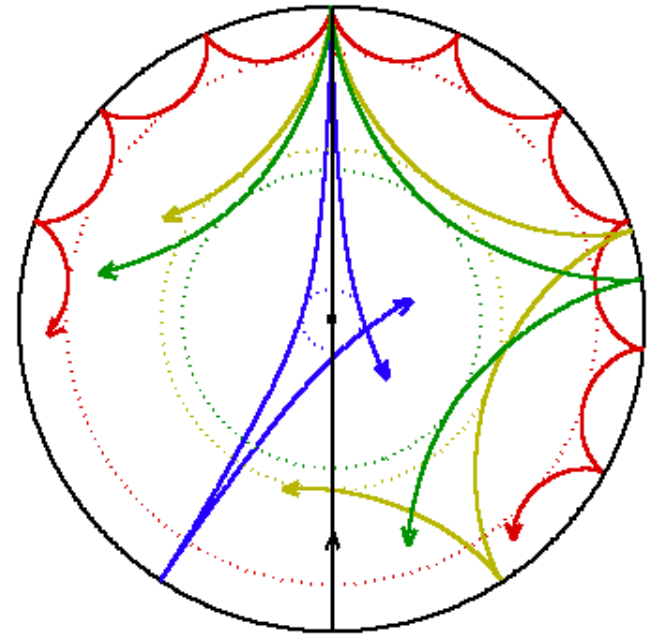
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/it/4/4f/Sole_interno_eliosismologia.png



http://www.ss.ncu.edu.tw/~lyu/lecture_files

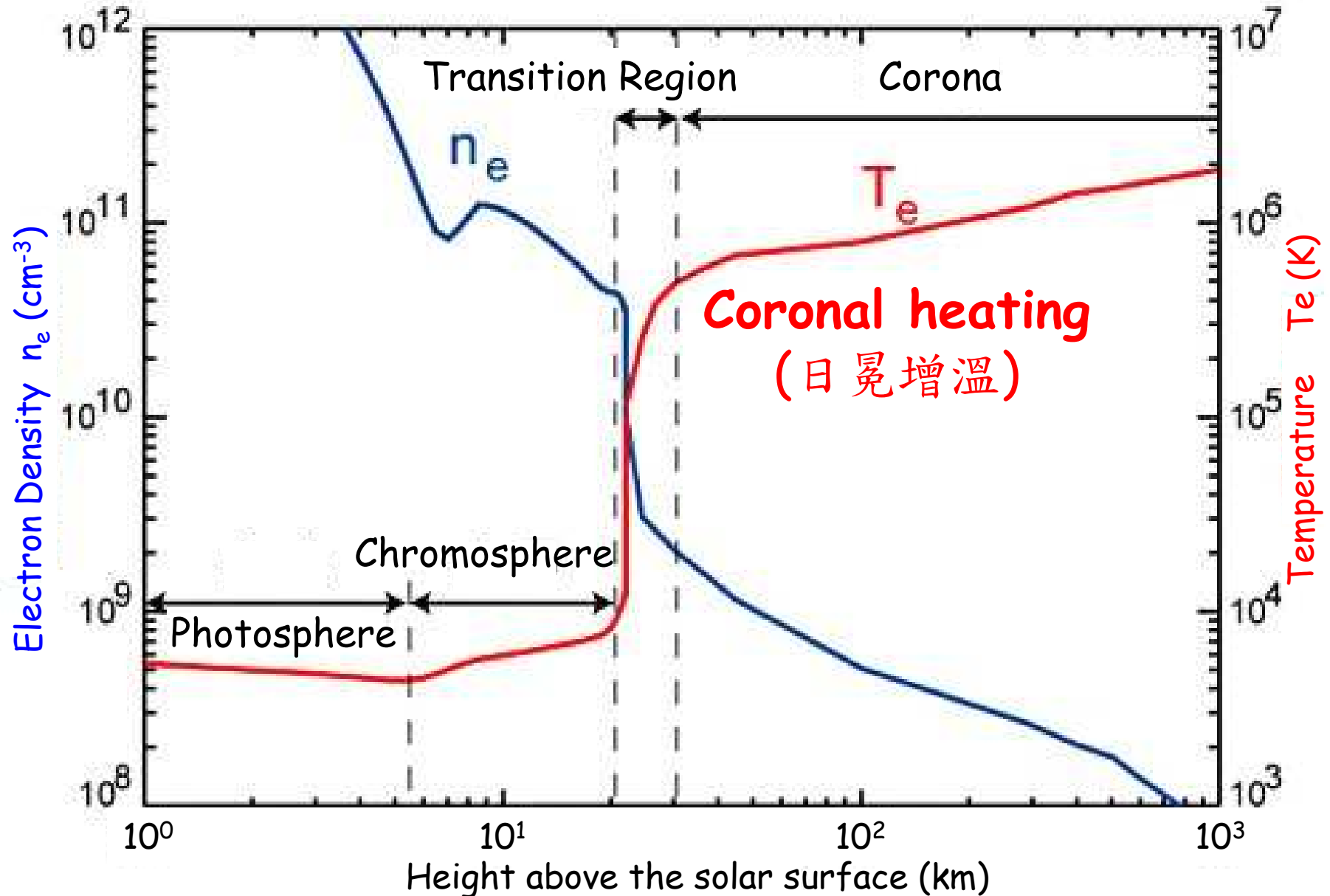
日震學(Helioseismology)

太陽內部的結構原本是以恆星理論預測的，並無法觀察到。類似地震波在地球內部反射與傳遞來推測地球的內部結構，科學家利用日震現象來推演太陽的內部結構，雖無法在太陽放置探測器，但是當太陽內部震動時，震波會傳到表面的光球層，造成複雜的上下運動。雖然表面震動很小，但可從都卜勒位移得到震動的頻率。將這些觀測結果與模擬太陽內部的模型比較，便可推斷出太陽內部的結構與運動。



日震學的結果發現太陽內部的溫度比以往想像的要高，排除了太陽微中子問題是由於太陽內部模型不正確的可能性，氦的成分也比原本認為的多，並瞭解對流層和輻射層以不同的速度旋轉，兩者的交界面處是太陽產生磁場及與太陽活動週期相關的地方。

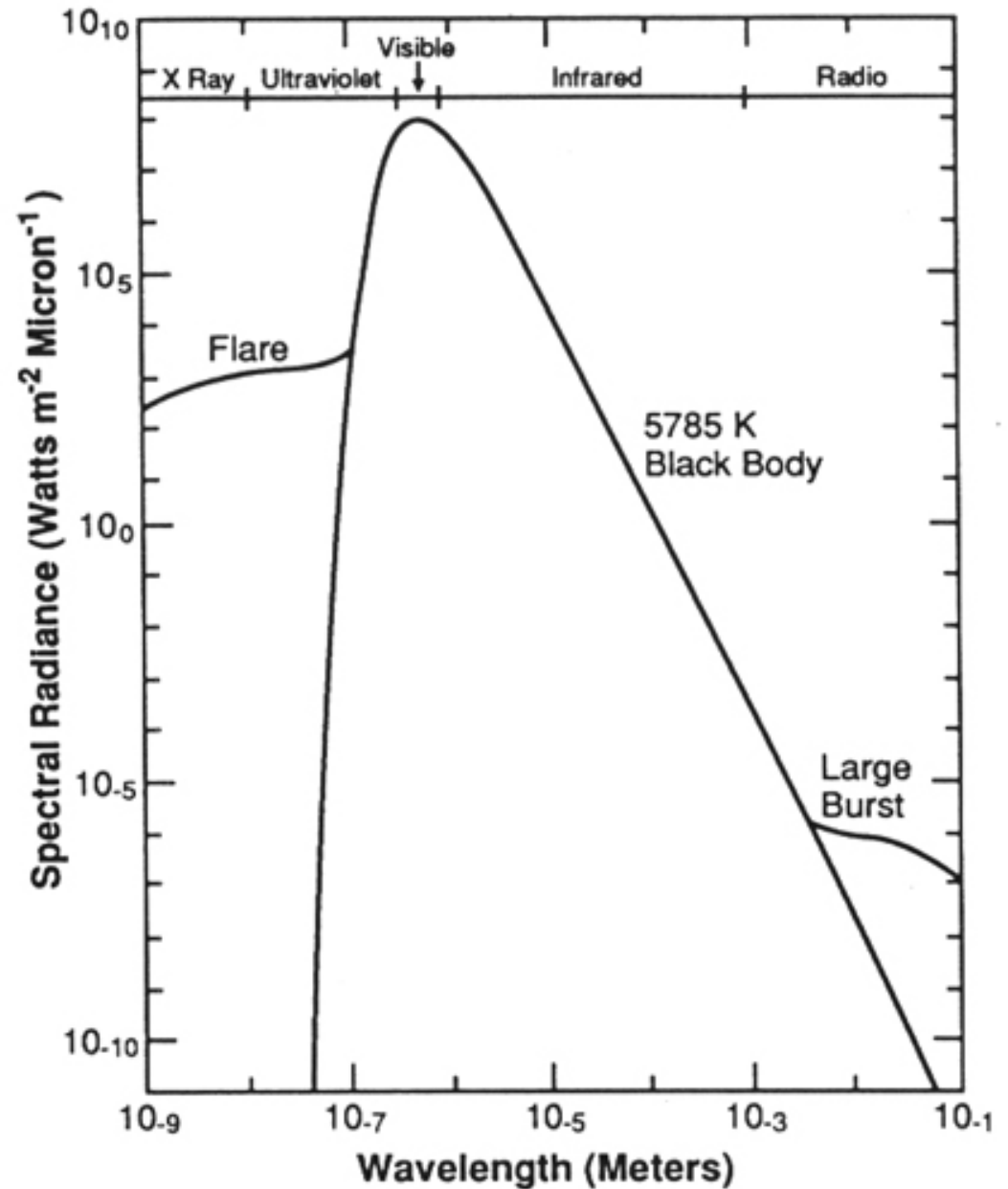
太陽大氣層



→ 光球層(Photosphere)

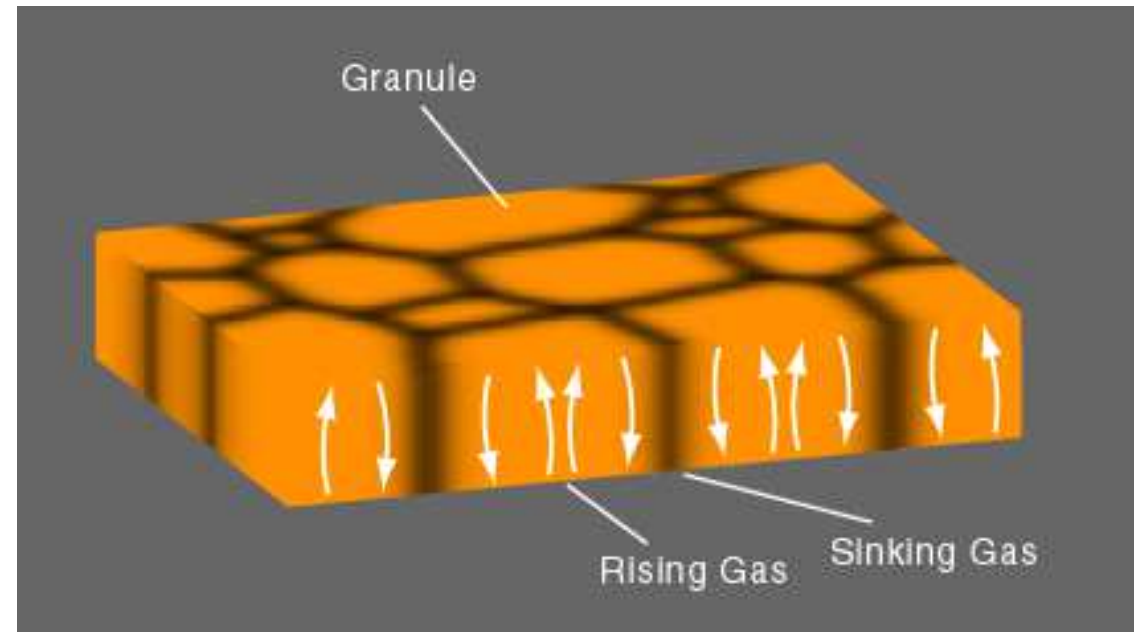
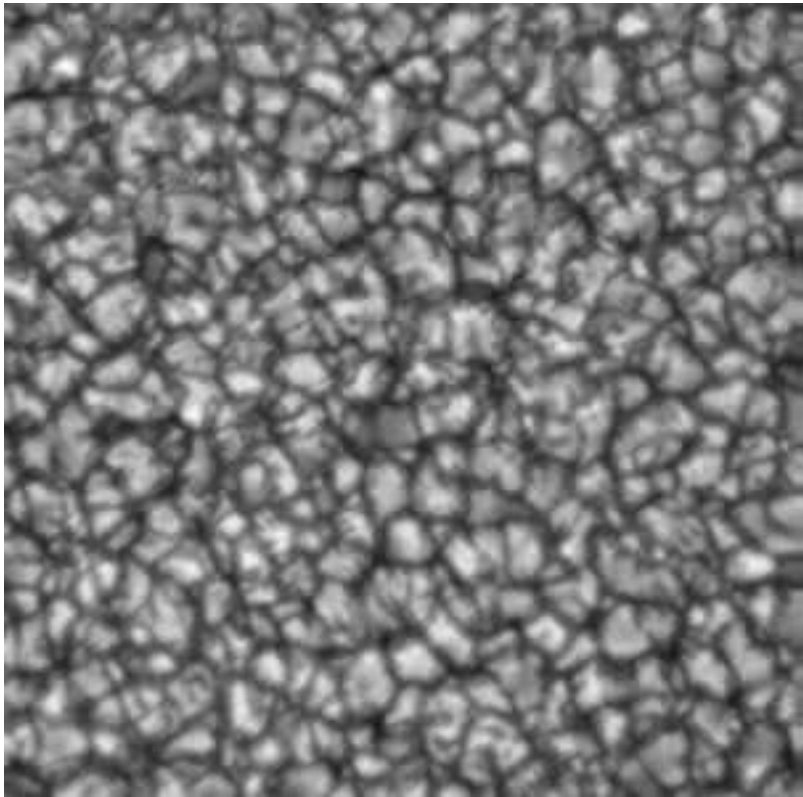
厚度約500 km，溫度約5800 K，為我們所能看到的太陽表面。地球所見太陽光譜主要來自光球層，譜型與5800 K的黑體輻射相近。光球層以下的太陽對可見光是不透明的，而在光球層上方的氣體密度又太低，無法放出足夠的光。只有光球層它的溫度密度恰當，既能輻射出較多的光，又能讓光子逃離太陽表面。

主要現象為：黑子(sunspots)，米粒組織(granulation)。



→ 光球層(Photosphere)---米粒組織(granulation)

每個米粒組織的尺度大小約為1500公里，生命週期約10分鐘，中央部份比四周溫度約高300 K，故較為明亮。由都卜勒位移的測量，可發現米粒組織的中心部份是向上湧升而週圍是下沉，此一結構是由對流所造成。



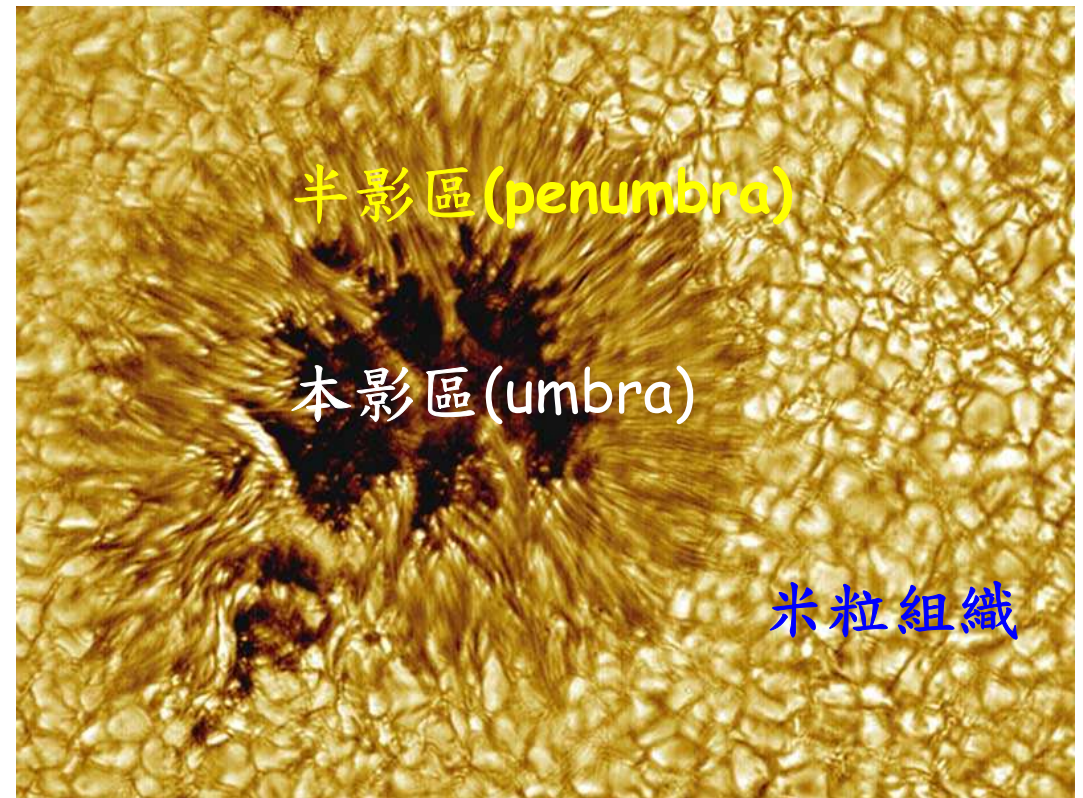
http://www.lcsd.gov.hk/CE/Museum/Space/EducationResource/Universe/framed_e/lecture/ch11/ch11.html

→ 光球層(Photosphere)---太陽黑子(sunspots)

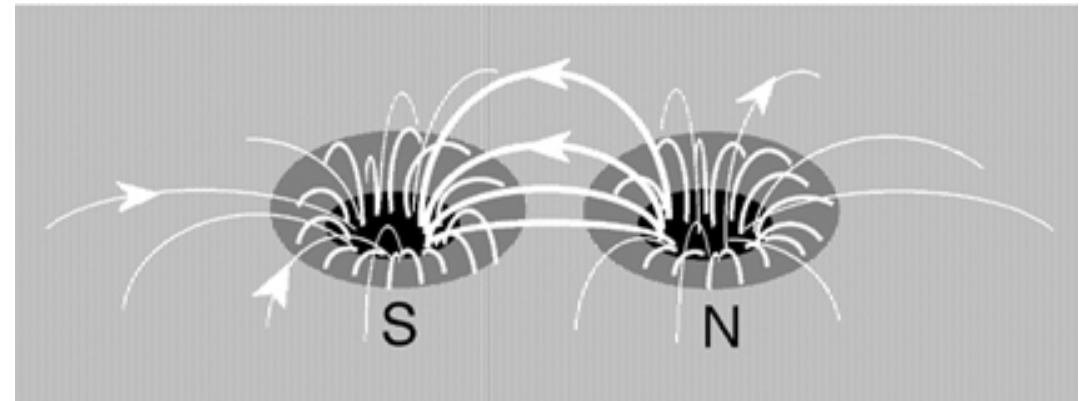
黑子處的溫度約比光球層其他區域低1000-1500 K，中心溫度約4000 K，故對比之下呈黑色，但實際上單一黑子的照度與滿月相去不遠。

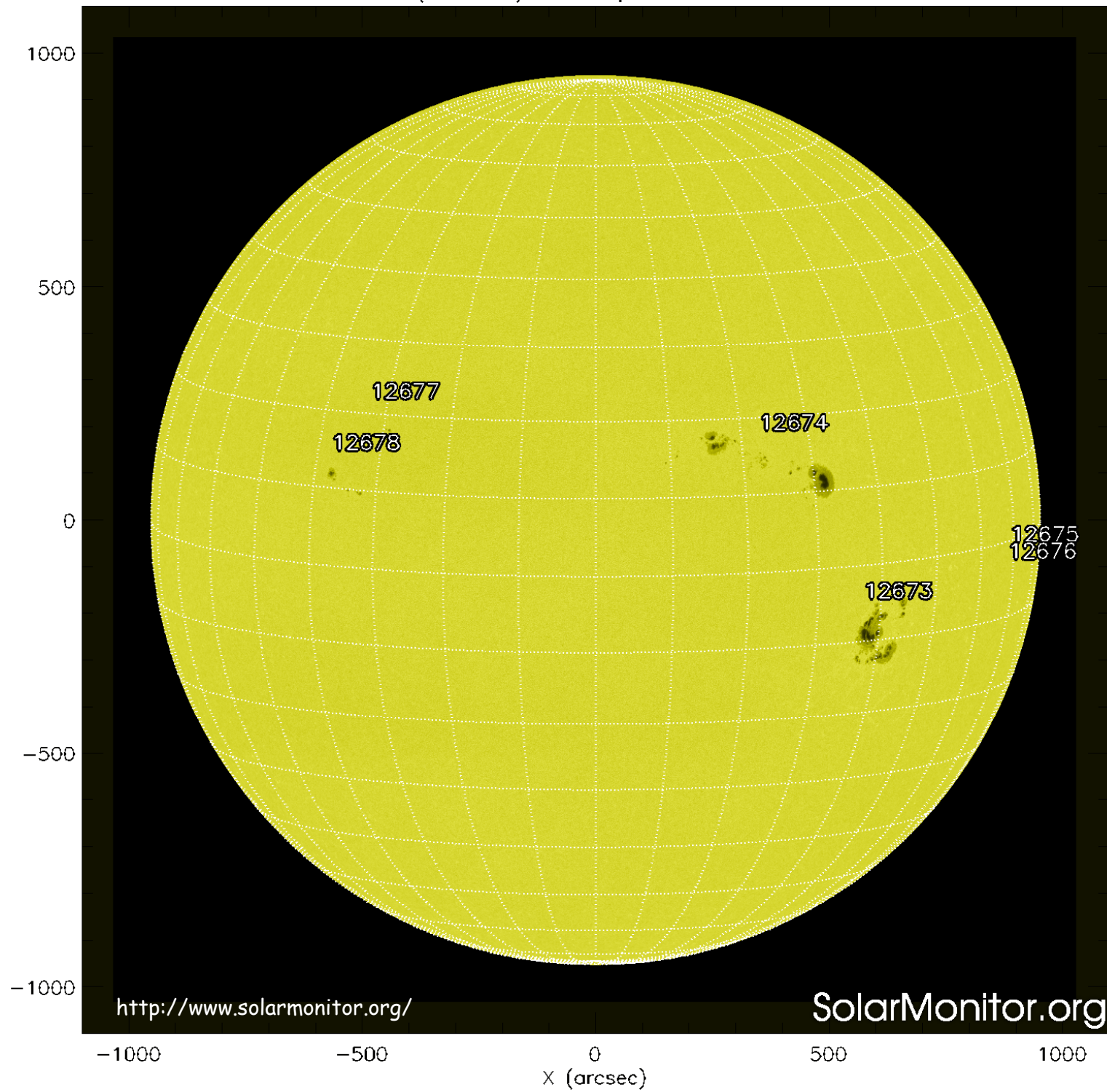
黑子經常成對或成群出現。黑子處的磁場約為太陽表面平均磁場的數百倍，本影區的磁場強度可能介於1000至4000高斯之間，比地球上的磁場强度高上一萬倍。

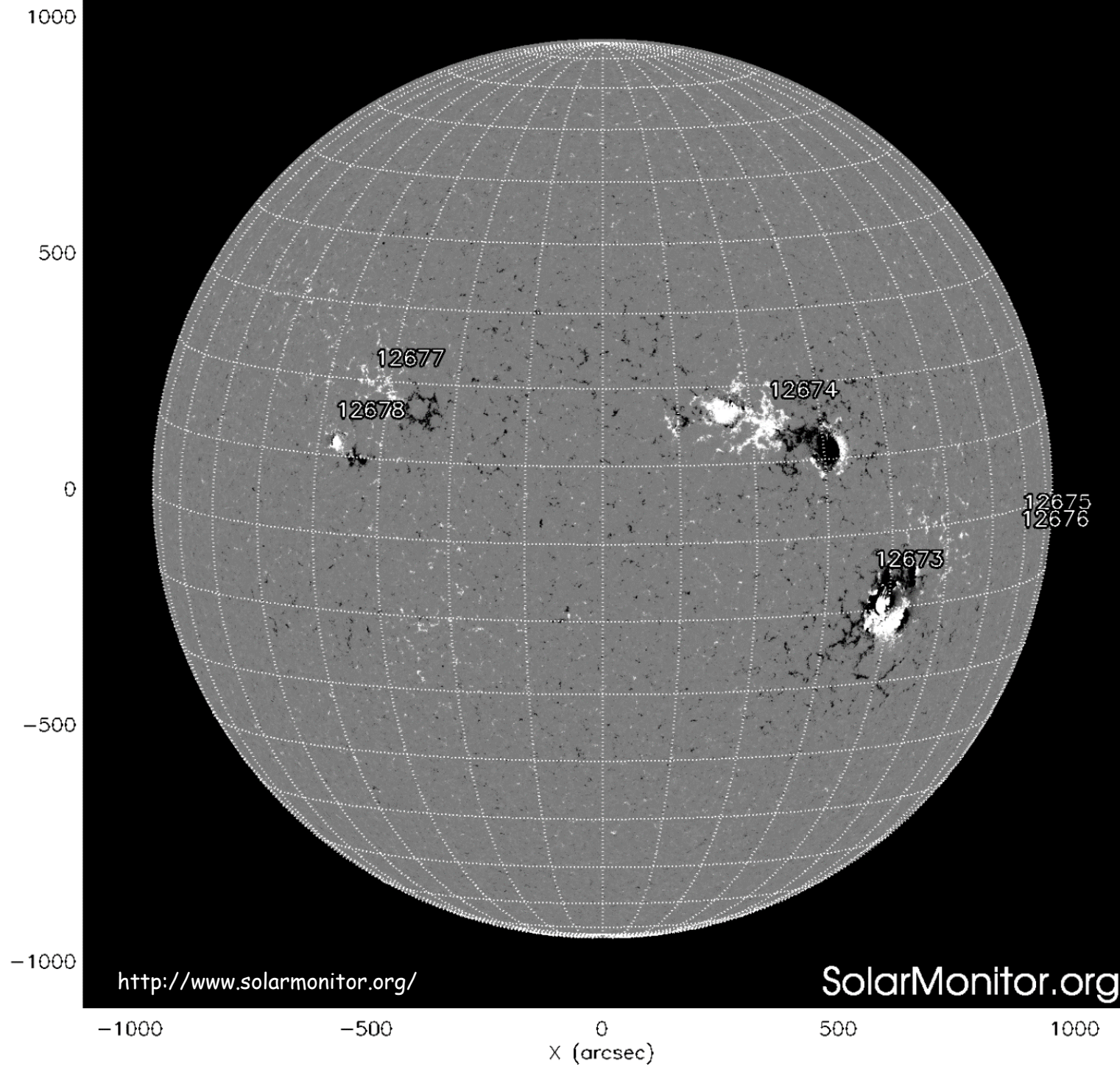
黑子為強磁低溫區域。



<http://www.explanationizer.com/wp-content/uploads/2011/08/sunspot-really-close.jpg>







太陽黑子數目

沃夫黑子相對數(Wolf Number, R)計算公式:

$$R = K \times (10 \times g + f)$$

K: 為比例常數，由觀測者與觀測器材的差異性來決定，
可先設為1，以求簡化

g: 為黑子群數

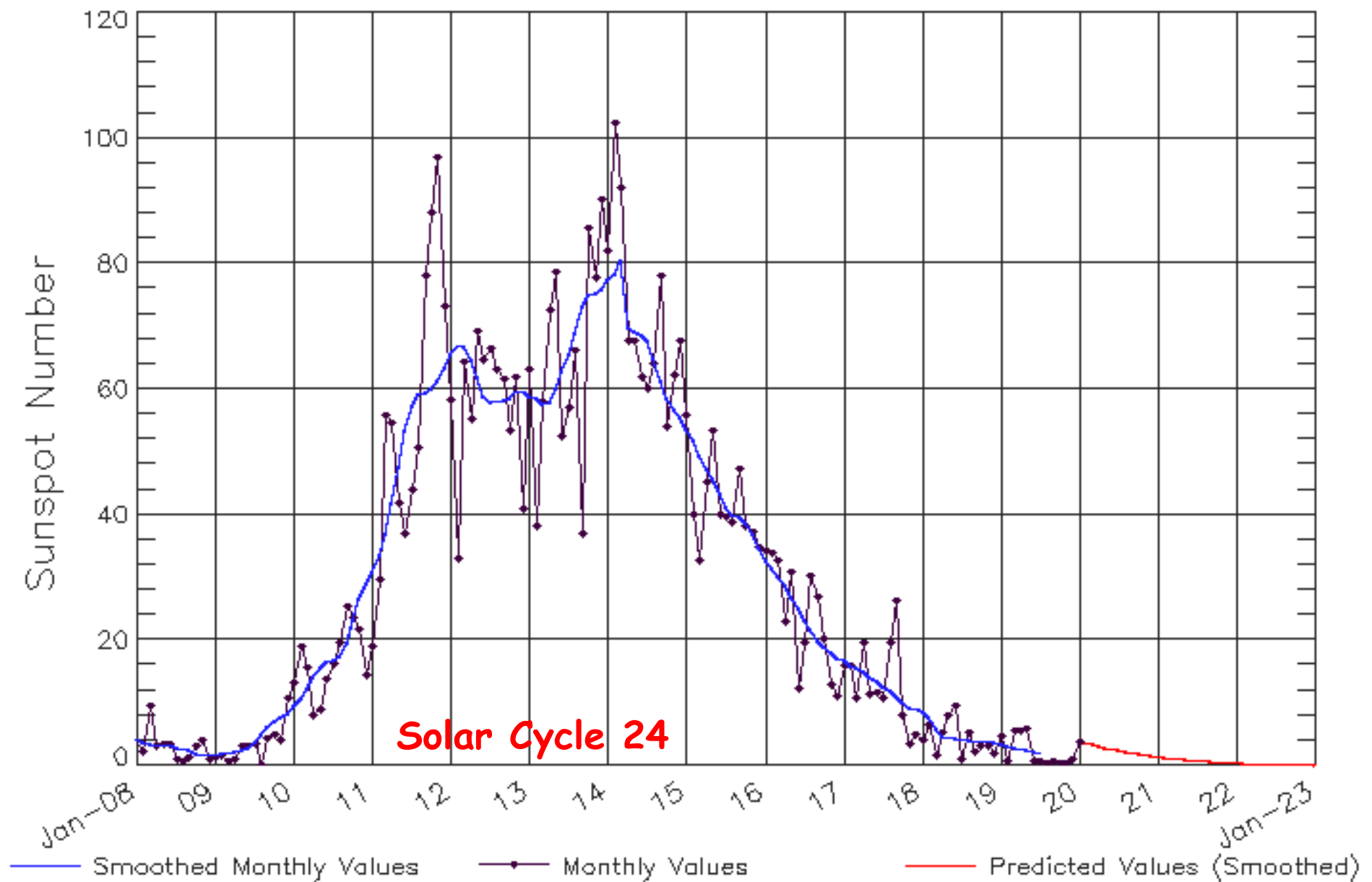
f: 為黑子總個數

太陽活動週期

週期	開始	結束	時間 (年)	極大期	太陽黑子極少的天數
1	1755/3	1766/6	11.3	1761/6	
2	1766/6	1775/6	9.0	1769/9	
3	1775/6	1784/9	9.3	1778/5	
4	1784/9	1798/5	13.6	1788/2	
5	1798/5	1810/12	12.3	1805/2	
6	1810/12	1823/5	12.8	1816/5	
7	1823/5	1833/11	10.5	1829/11	
8	1833/11	1843/7	9.7	1837/3	
9	1843/7	1855/12	12.4	1848/2	
10	1855/12	1867/3	11.3	1860/2	561
11	1867/3	1878/12	11.8	1870/8	942
12	1878/12	1890/3	11.3	1883/12	872
13	1890/3	1902/2	11.8	1894/1	782
14	1902/2	1913/8	11.5	1906/2	1007
15	1913/8	1923/8	10.1	1917/8	640
16	1923/8	1933/9	10.1	1928/4	514
17	1933/9	1944/2	10.4	1937/4	384
18	1944/2	1954/4	10.2	1947/5	382
19	1954/4	1964/10	10.5	1958/3	337
20	1964/10	1976/6	11.4	1968/11	285
21	1976/6	1986/9	10.5	1979/12	283
22	1986/9	1996/5	9.9	1989/11	257
23	1996/5	2008/12	12.3	2001/11	619
24	2008/12			2014/4	987
平均數			11.04		

ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression

Observed data through Jan 2020

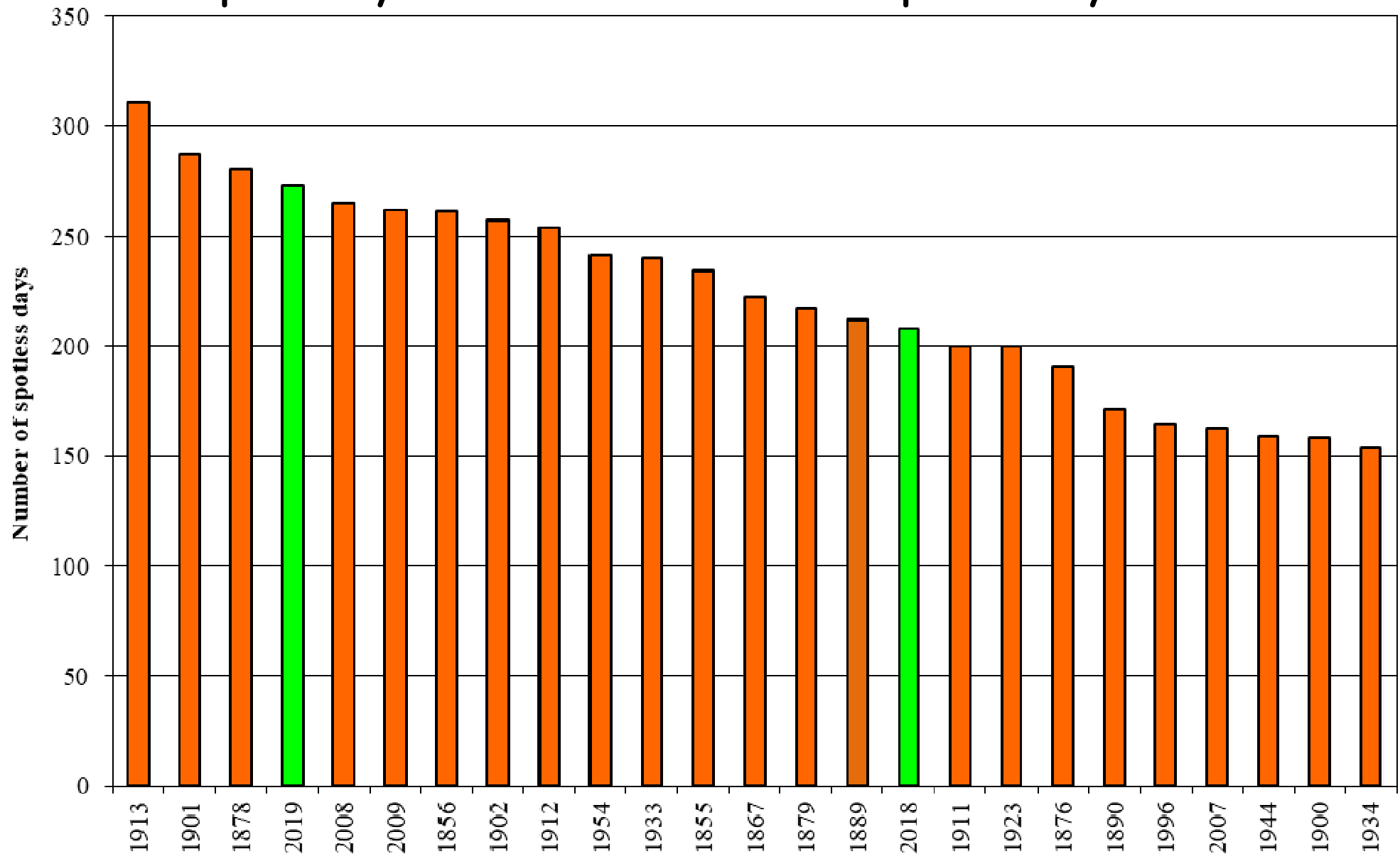


Updated 2020 Feb 3

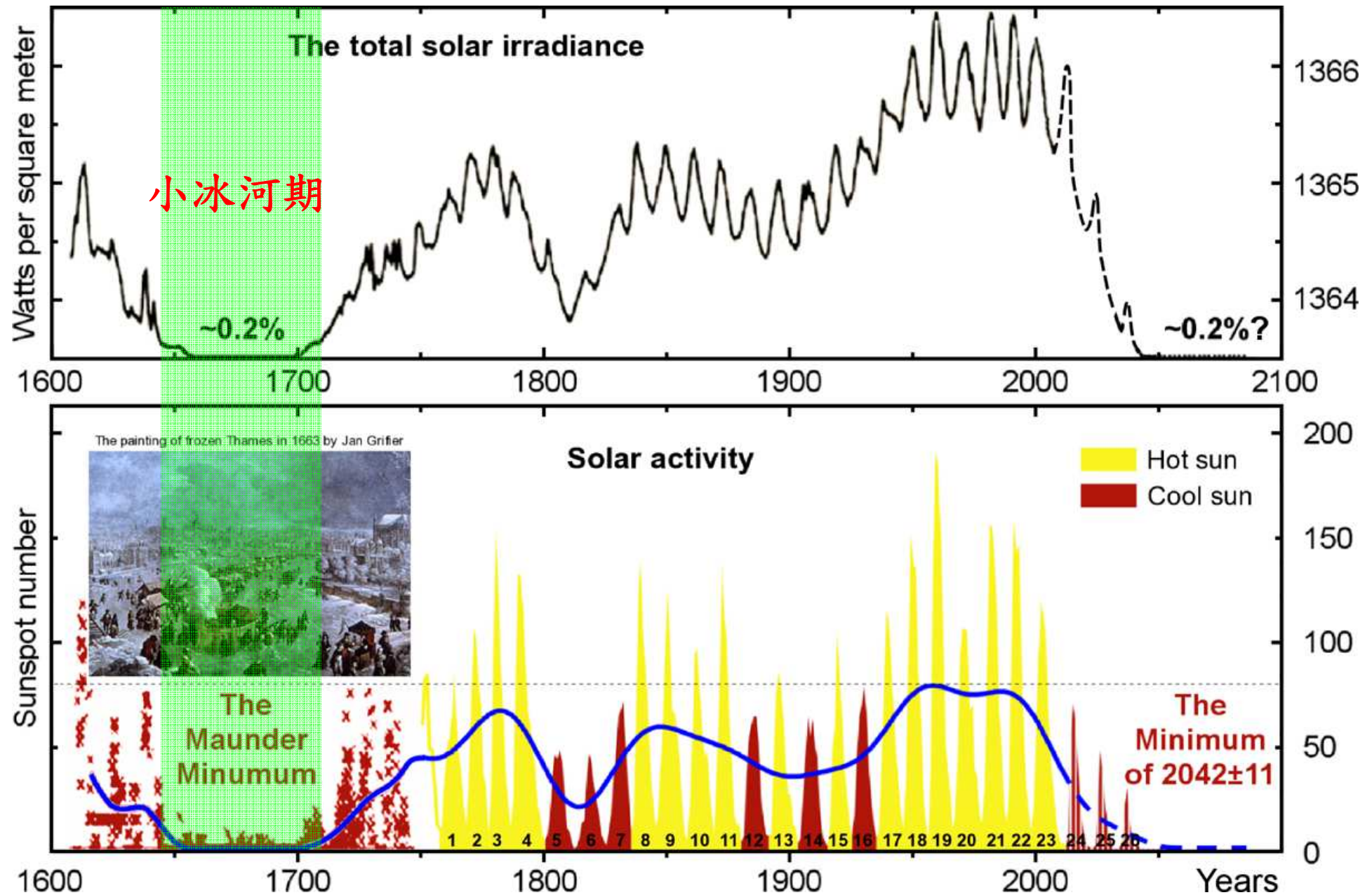
NOAA/SWPC Boulder, CO USA

Days of Spotless Sunspot

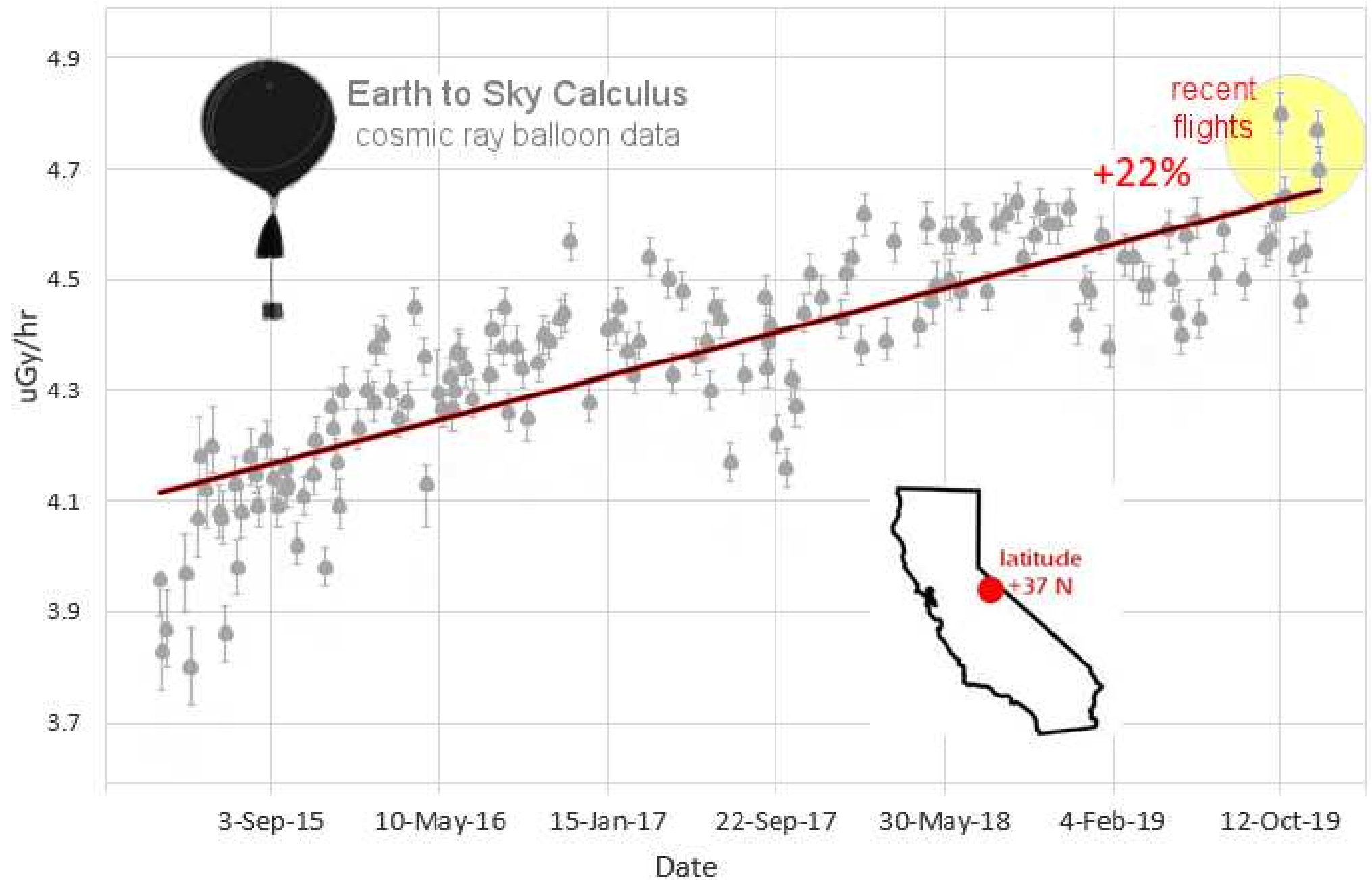
Top 25 of years with most number of spotless days since 1849



Maunder Minimum (1645-1715)



Stratospheric Radiation (March 2015 -December 2019)



Cosmic Rays on Earth Since 1964

Oulu Neutron Monitor



In recent years, cosmic rays have been unusually strong, reaching a Space Age maximum in 2009-2010.

太陽黑子面積

$$A_M = \frac{A_F n}{\cos(B)\cos(L-L_0)}$$

A_M : 黑子在太陽盤面上所佔的面積比例(單位：百萬分之一)

A_F : 面積係數，依盤面直徑及格子大小來決定

n : 一群黑子面積(包括半影及本影)所佔的格子數

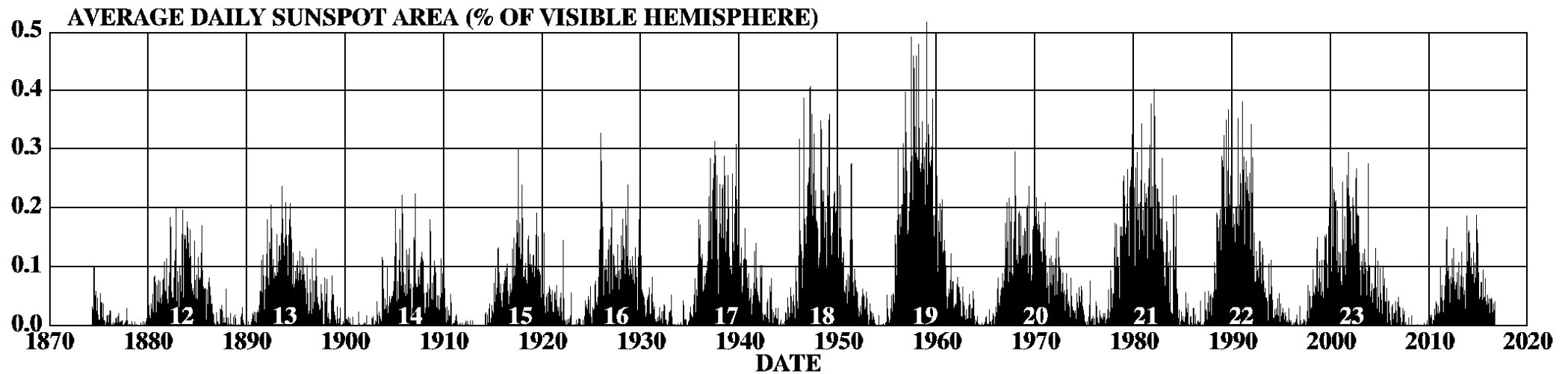
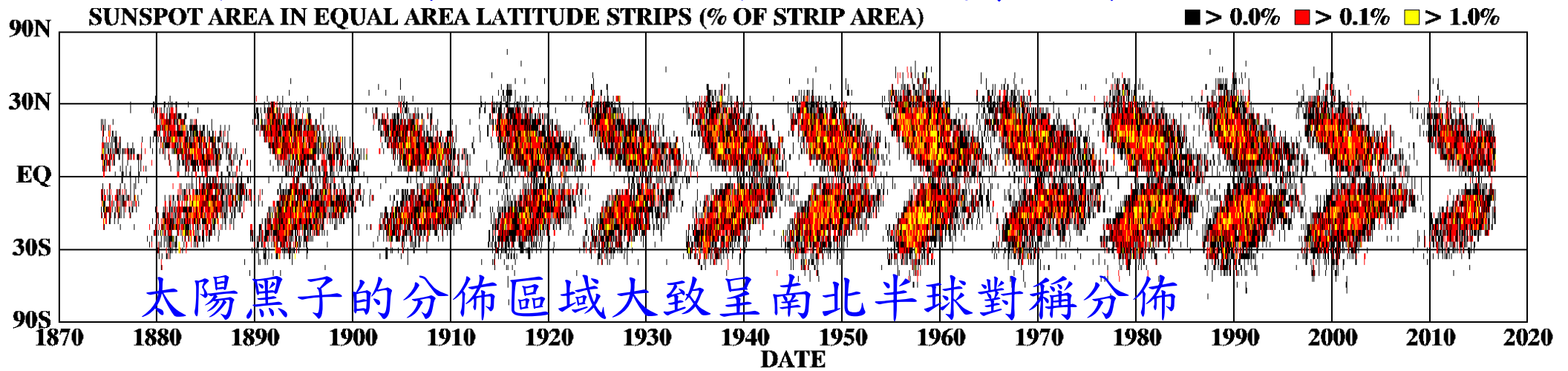
B : 黑子在太陽盤面上的緯度 (degrees)

L : 黑子在太陽盤面上的經度 (degrees)

L_0 : 盤面中心點的經度 (degrees)

蝴蝶圖(butterfly diagram)

高緯度區沒有太陽黑子，赤道地區幾乎沒有黑子



<http://solarscience.msfc.nasa.gov/>

HATHAWAY NASA/ARC 2016/10

太陽黑子週期開始時，黑子主要出現在南北緯約 35° 處，而在週期結束時，黑子通常出現在南北緯約 5° 處

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif>