

2019年度

地球環境『自然学』講座

第6回

テーマ

太陽の恵みと怖さ

講師

京都大学名誉教授

黒河 宏企 先生

2019年6月22日

認定NPO法人・シニア自然大学校

講師プロフィール

黒河 宏企 (くろかわ ひろき)



和歌山県橋本市出身

主な経歴：1965年 京都大学理学部卒業 同大学院理学研究科入学

1975年 京都大学理学博士

京都大学理学部助手、助教授、同大学院理学研究科教授、
京都大学大学院理学研究科附属天文台長などを経て、

2006年～現在：京都大学名誉教授

2006年～2018年：認定NPO法人花山星空ネットワーク理事長

2018年～現在：認定NPO法人花山星空ネットワーク顧問

2007年～2013年：放送大学客員教授

2003年～現在：京都市青少年科学センター学術顧問

専門： 太陽物理学を中心とした天文学の研究と教育

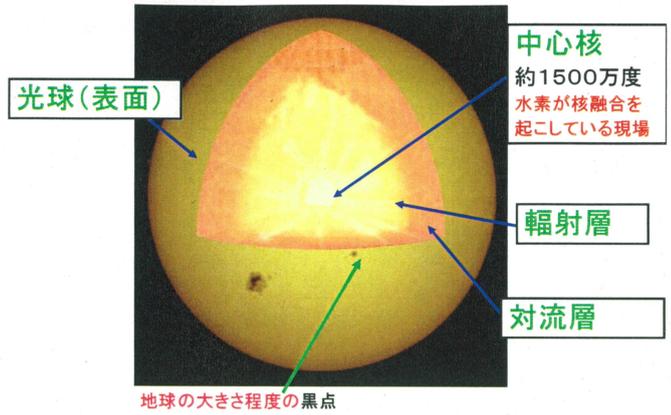
日本天文学会会員、国際天文学連合会員

現在の主な活動：一般市民と青少年向けに、京大花山天文台で「花山天体観望会」、「天体観測指導者養成講座」を開催。京大飛騨天文台では「子ども飛騨天文台天体観測教室」、「飛騨天文台自然再発見ツアー」を開催。

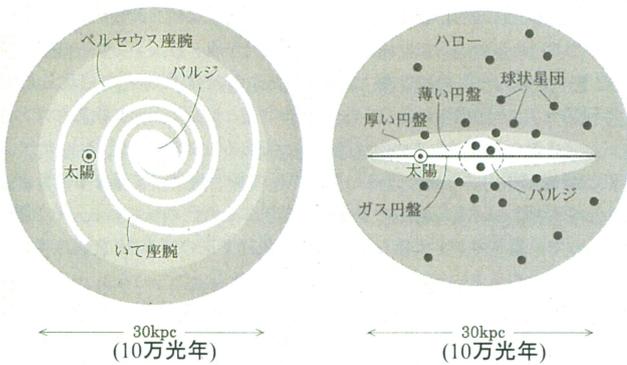
太陽の恵みと怖さ



I. 太陽の一生



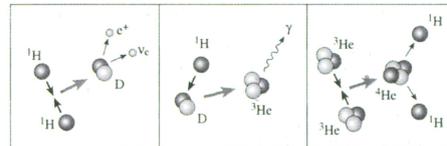
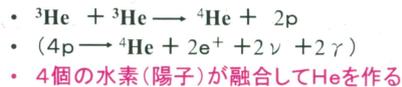
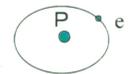
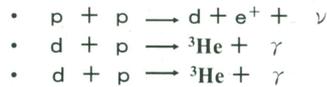
銀河系内の太陽系の位置



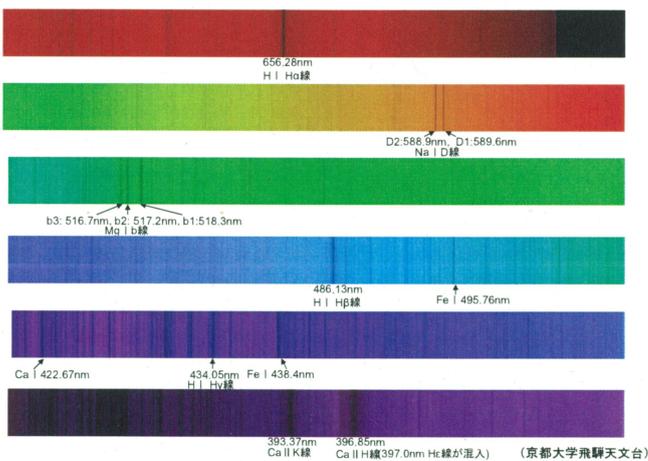
現在の太陽

中心核は約1500万度の高温

核融合反応が起こっている(太陽エネルギーの源)



太陽高分解分光スペクトル (フラウンホーファ(Fraunhofer)線)



太陽の恵み

太陽から地球に降り注ぐ光のエネルギー:

太陽定数 1.37 kW/m²

地球全体に降り注ぐエネルギー: E

$$1.37\text{kW/m}^2 \times \pi r^2$$

(πr^2 : 地球の太陽に向けた面積)

$$\pi r^2 = 3.14 \times (6.5 \times 10^6\text{m})^2$$

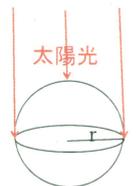
$$\sim 3.14 \times 4.2 \times 10^{13}\text{m}^2 \sim 1.3 \times 10^{14}\text{m}^2$$

$$E = 1.35 \text{ kW/m}^2 \times 1.3 \times 10^{14}\text{m}^2 \sim 1.7 \times 10^{14}\text{kW}$$

全世界の年間エネルギー消費量:

約 1.5×10^{14} kWh (2030年予測)

地球に降り注ぐ太陽エネルギーの約1時間分です
全世界の年間のエネルギー消費が賅える!



太陽エネルギーの利用

太陽から地球に降り注ぐ光のエネルギー:

1.37 kW/m² (太陽定数)

太陽光発電システム

太陽電池パネル
(ソーラーパネル)



太陽光発電システムの実用例



屋根の例: 21枚
公称最大出力: 233W × 21
= 4893W ~ 4.8kW

大阪市: 年間日照時間(30年平均): 2030時間
(日照時間とは: 120w/m²以上の日照がある時間)

地球に降り注ぐ太陽光の中の65%が地表に届くとすると
快晴時の日照: $1.37 \times 0.65 \sim 0.89\text{kW/m}^2$

平均日照(平均日照時間に対応する)を0.5kW/m²とし、
太陽パネルの発電効率を0.2とすると

21枚のパネルの発電力: $0.5\text{kW/m}^2 \times 1.3\text{m}^2 \times 21\text{枚} \times 0.2 = 2.7\text{kW}$

年間総発電量: $2.7\text{kW} \times 2030\text{時間} \sim 5,500 \text{ kWh}$

~4人家族の年間平均使用電力量(省エネルギーセンター)

水素4個がHeに融合する際に発生するエネルギー： E



$$E \sim 4.4 \times 10^{-12} \text{ Jule}$$

太陽の寿命の概算

太陽の寿命 = (中心核の水素の全質量) ÷ (消費速度)

太陽中心核の水素の全質量： $1.5 \times 10^{32} \text{ g}$

水素の消費速度：(反応/s) × $4 m_p$ (m_p :陽子の質量)

$$\text{反応速度 (反応/s)} = \frac{\text{核融合エネルギーの発生速度}}{4.4 \times 10^{-12} \text{ erg}}$$

$$\text{核融合エネルギーの発生速度} = \frac{\text{太陽の放射エネルギー} : L \text{ (Jule / s)}}{\text{太陽の放射エネルギー} : L \text{ (Jule / s)}}$$

水素4個がHeに融合する際に発生するエネルギー： E



$$E \sim 4.4 \times 10^{-12} \text{ Jule}$$

太陽の寿命の概算

太陽の放射エネルギー $L = 3.8 \times 10^{26} \text{ Jule / s}$

反応速度

$$L / (4.4 \times 10^{-12} \text{ erg}) = 3.8 \times 10^{26} \text{ (Jule / s)} / (4.4 \times 10^{-12} \text{ erg}) = 8.7 \times 10^{37} \text{ 反応/s}$$

$$\text{水素の消費速度} : 8.7 \times 10^{37} \times 4 m_p / \text{s} \text{ (} m_p \text{:陽子の質量)} = 8.7 \times 10^{37} \times 4 \times 1.67 \times 10^{-24} \text{ g / s} = 5.8 \times 10^{14} \text{ g / s}$$

太陽中心核の水素質量： $1.5 \times 10^{32} \text{ g}$

$$\text{太陽の寿命} : 1.5 \times 10^{32} \text{ g} / (5.8 \times 10^{14} \text{ g / s}) = 2.6 \times 10^{17} \text{ s} \sim 10^{10} \text{ 年} \text{ 約100億年}$$

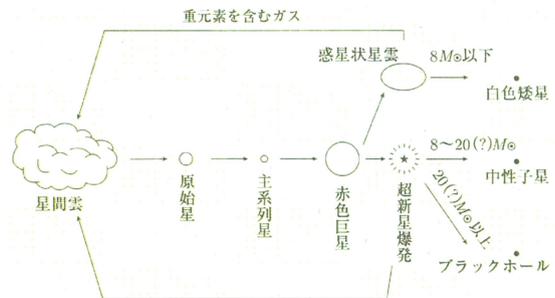
太陽の全放射エネルギー $L = 3.8 \times 10^{26} \text{ Jule / s}$

太陽から地球に降り注ぐ光のエネルギー：
 1.37 kW/m^2 (太陽定数)



$$L = 1.37 \text{ kW/m}^2 \times ?$$

現在までに判っている星の一生の概略シナリオ



星の質量によって星の最後は異なる

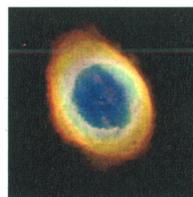
放送大学教材「進化する宇宙」より

太陽の最後の姿？

水素の燃焼効率増大、ヘリウムに点火
膨張 → 赤色巨星

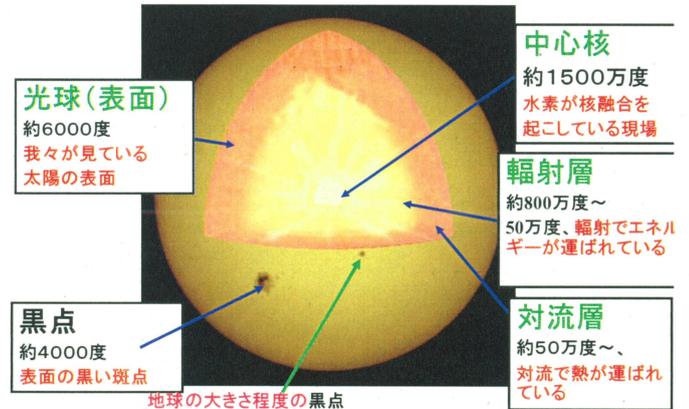
[50億年後]の明るさ：現在の1000倍

外層：惑星状星雲
中心核：白色わい星
(冷たく暗い)

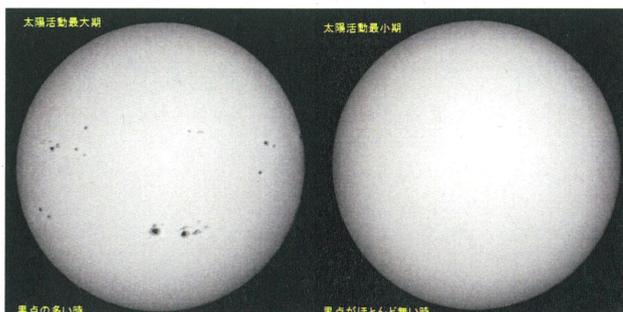


太陽の最後の姿：
こと座のリング星雲 M57

II. 現在の太陽の素顔



(1) 太陽表面：光球

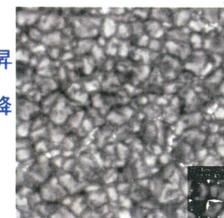


白色光で見た太陽表面。活動の極大期(左)には多くの黒点が見られるが、極小期(右)には全く見られない。中心から周縁にかけて暗くなっている周縁減光は光球の温度構造によるものである。左側写真左側(東側)の太陽縁近くに見られる白い斑点は白斑である。
(京都大学飛騨天文台太陽フレア監視望遠鏡によって撮影)

粒状斑

明るい部分 → 上昇

暗い部分 → 下降

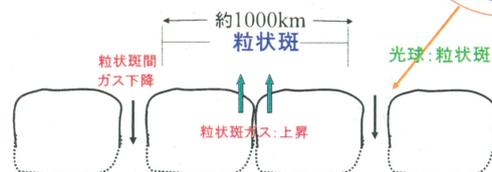


対流層

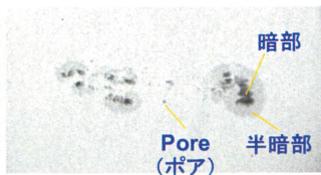
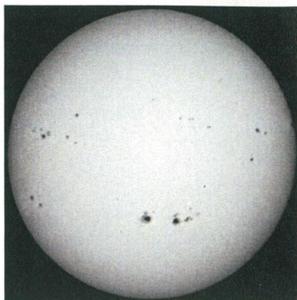
中心核

輻射層 $r = 5 \times 10^8$

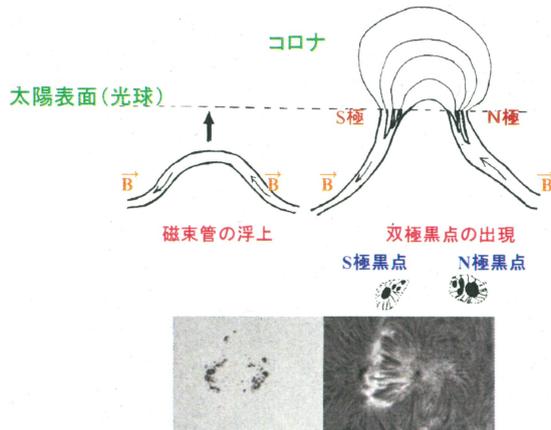
粒状斑は対流である



太陽黒点



内部の対流層から磁場が浮上してきている

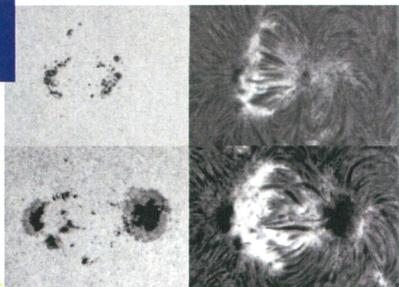
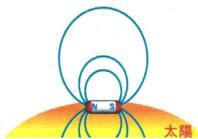


黒点はなぜ黒いか？

黒点の成長とその上の磁気ループ

黒点には強い磁場がある

黒点は磁石である



黒点の強い磁場によって内部からの熱い対流運動が抑えられる
黒点の温度が周囲の光球より低い → 黒く見える

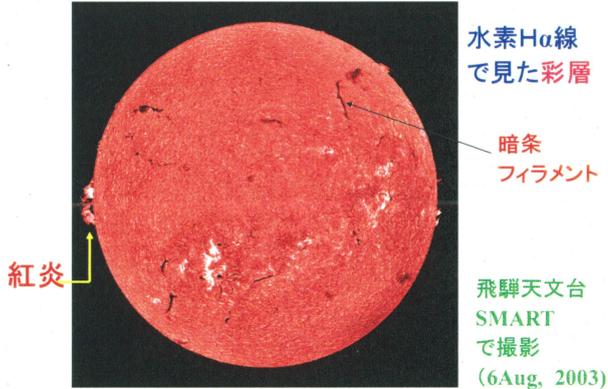
(2) 彩層と紅炎

皆既日食観測で彩層は発見された！

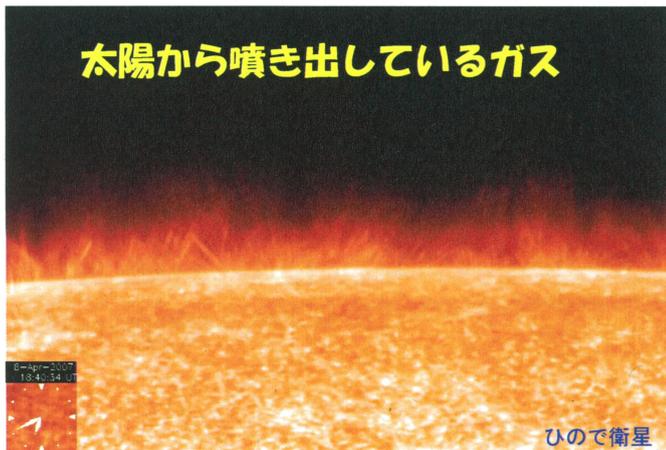


現在では通常観測でも見られる

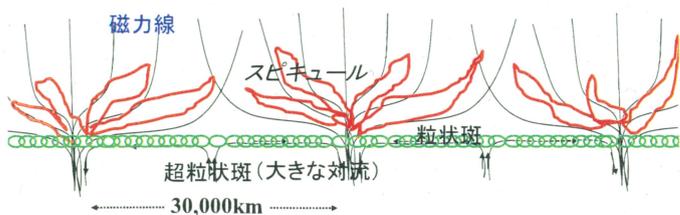
正面から見た彩層と紅炎 (温度: 数千度~1万度)



太陽から噴き出しているガス

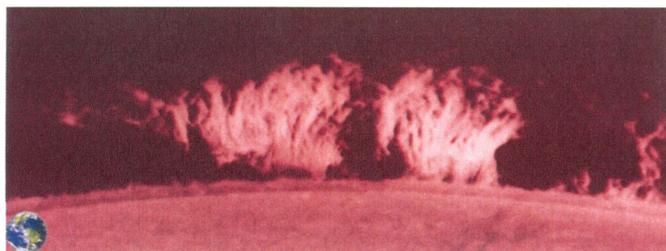


彩層網状構造 (chromospheric network) と超粒状斑の関係



彩層網状構造 (chromospheric network): 直径約30,000km
超粒状斑 (supergranulation) に対応 (大規模な対流)

太陽紅炎



飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) で撮影

(3) 太陽コロナ

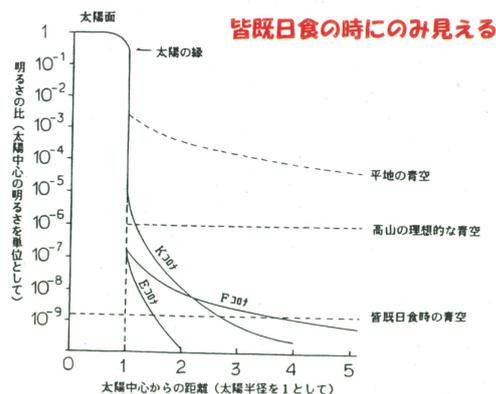
温度 150万度



1991年メキシコにて
京都大学観測隊撮影

太陽コロナの明るさは太陽本体の100万分の1

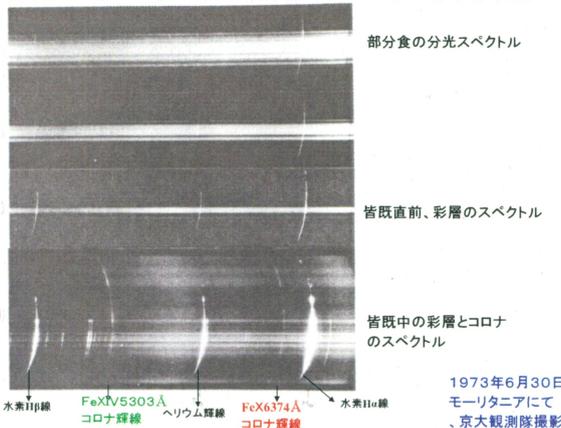
太陽本体に対する太陽コロナ及び青空の明るさ



皆既日食の時にのみ見える

コロナが100万度もの高温であることは1940年代まで解らなかつた。

コロナの分光スペクトル中の未知な輝線はコロニウムと呼ばれた

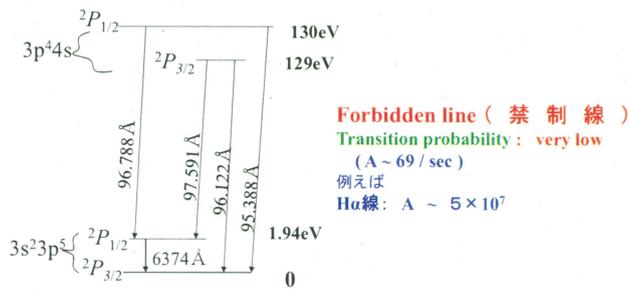


1973年6月30日
モータニアにて
京大観測隊撮影

コロニウム輝線の同定

Grotorian(1939):

Edlen(1937)の実験室における極紫外線の測定を用いて
波長6374Åのコロニウムが9階電離したFeX 6374Å
であることを計算により同定した。

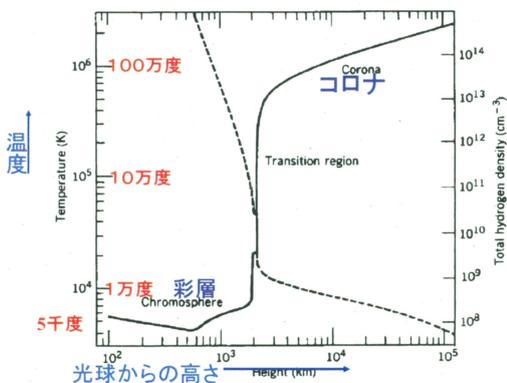


Forbidden line (禁制線)

Transition probability: very low
(A ~ 69 / sec)

例えば
H α 線: A ~ 5 × 10⁷

光球(6千度)から コロナ(100万度)へ 温度急上昇 → なぜか?

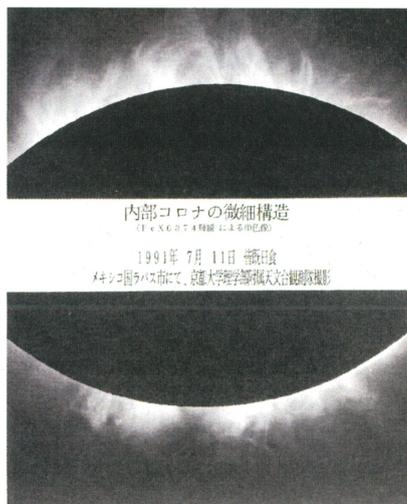


1991年メキシコ日食

コロナループ
微細構造の
撮影に成功

コロナは
磁力線で
覆われている

コロナの加熱には
磁場が重要な
役割を演じている



X線で見たコロナ

太陽表面の至るところで
爆発が起こっている → 活動領域



ようこう衛星で撮影

光球の6000度からコロナの150万度まで
温度が上昇するのはなぜか?

現在でも謎

コロナ加熱の問題: 天体物理学の重要課題

主な二つの説

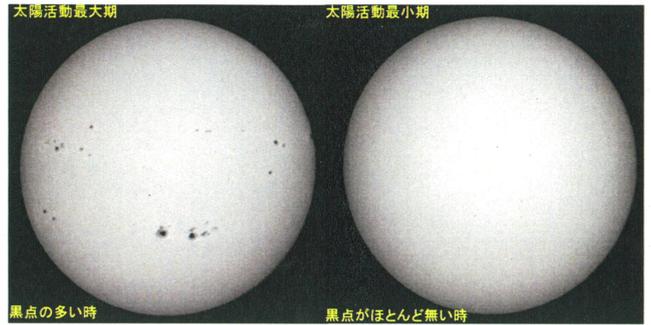
- (1) 磁気波動加熱説 (電子レンジ説)
磁力線を伝わる波のエネルギーがコロナで解放される
- (2) マイクロフレア・ナノフレア加熱説 (超小型爆発説)
フレアのエネルギーより6桁小さいマイクロフレアや
9桁小さいナノフレアによる加熱

どちらが正しいか?



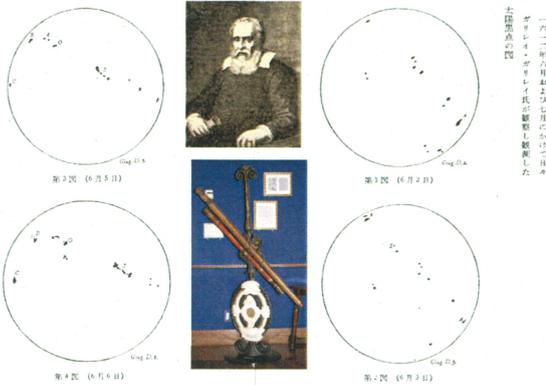
Ⅲ. 太陽活動の変動

太陽の黒点は増えたり減ったりする
太陽活動も激しくなったり静かになったりする



太陽黒点を初めて望遠鏡で見た人

ガリレオ・ガリレイ



黒点の周期的変動

11年周期の発見

シュワーベ(1789-1875):
アマチュア天文学家(独:薬剤師)

黒点の国際協同観測開始

ウオルフ(チューリッヒ天文台)

1849年:提案

黒点相対数: $R = K(10g + f)$

g : 黒点グループの数

f : 黒点個々の数

K : 観測機器の特性の補正項

1849年以前:残されていたスケッチから決定

黒点のスケッチから黒点相対数を求める



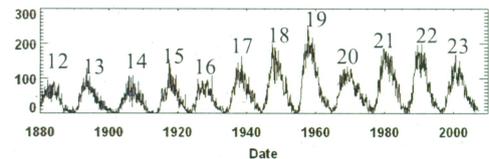
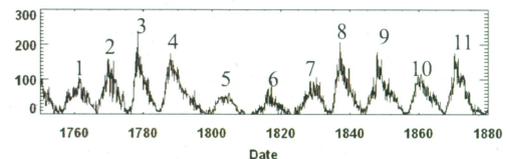
黒点相対数: $R = K(10g + f)$

g : 黒点グループの数

f : 黒点個々の数

K : 観測機器の特性の補正項

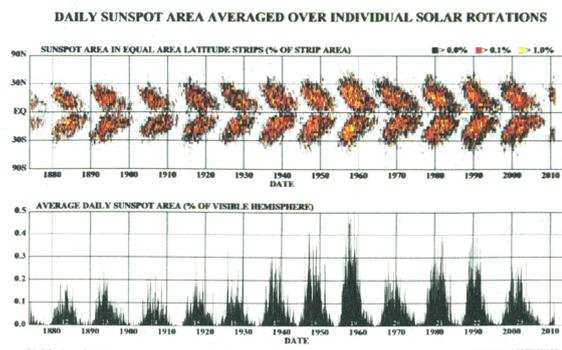
太陽黒点数の周期変動



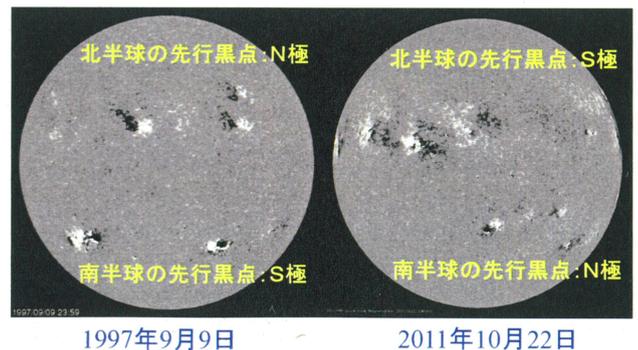
黒点数が11年周期で増減する

第1周期(1761年)~第23周期(2001年)間の平均:10.9年

黒点が出現する緯度が11年周期で変わる

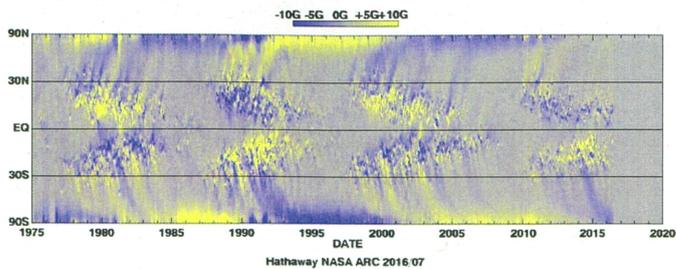


黒点磁場の極性は11年で反転する



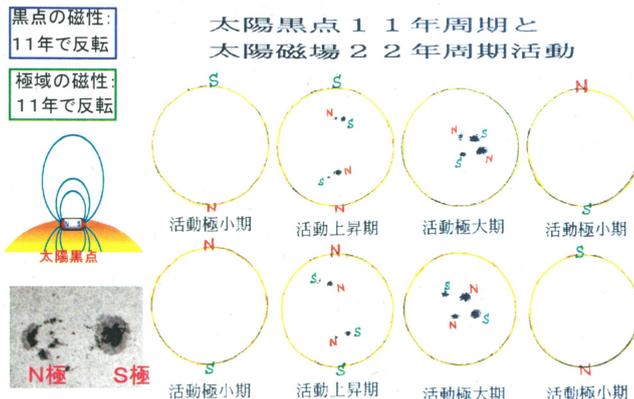
太陽磁場の蝶形図

(1975年~2016年)



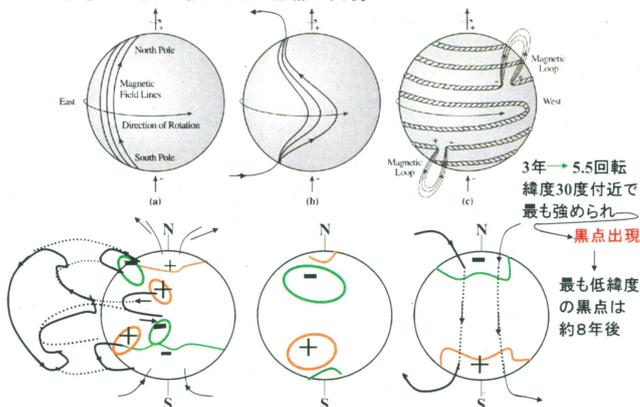
極域磁場の反転: 北極: 1980.8-1982.6, 1991.8, 2001.5, 2012.5
南極: 1981.0, 1990.6-1992.4, 2001.2, 2014.0

太陽磁場活動周期

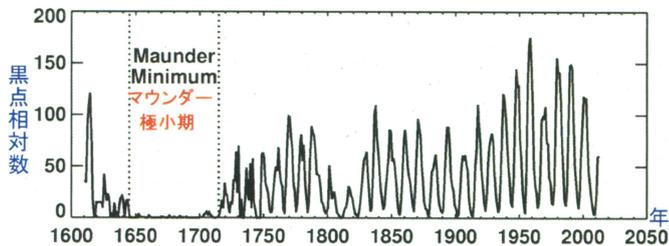


太陽磁場の22年周期の説明(バブコックのモデル)

差動回転によって磁場が赤道方向に引き延ばされて強められて黒点が出現
H. Babcock: Ap. J 133, 572(1961)



太陽黒点の周期変動はどれほど安定しているか?



Maunder (1890)の発見

「黒点がほとんど出現していない期間があった」
1645年~1715年: 「マウンダーの極小期」
長い間信用されなかった

Eddy(1976)の再発見

マウンダー極小期は確かにあった

- ☆ 17世紀の太陽観測は信用できる
- ☆ オーロラの回数が異常に少ない
- ☆ 木の年輪中の¹⁴Cが多い
- ☆ 17世紀のヨーロッパ異常に寒かった



17世紀の日食観測の様子



木の年輪中の炭素同位元素¹⁴C含有量と太陽活動との相関関係

銀河宇宙線の衝突で作られた中性子n → 地球大気中の¹⁴N



炭素の同位元素¹⁴C生成
CO₂として → 樹木に吸収 → 銀河宇宙線の歴史を刻む年輪木質部中の¹⁴C/¹²Cの年変化: 測定

過去の銀河宇宙線の侵入量の多少がわかる

黒点数・太陽活動大(小) → 銀河宇宙線の侵入量小(大)
C¹⁴ 少(多)

年輪中の¹⁴Cの測定から → 過去の太陽活動の大小がわかる

太陽活動変動と地球気候変動の関係

1645年~1715年: 「マウンダーの極小期」

17世紀のヨーロッパは異常に寒く河が凍った(小氷河期)



凍結したテムズ川

1100年~1250年: 中世の温暖期

太陽活動極大(Grand Maximum)

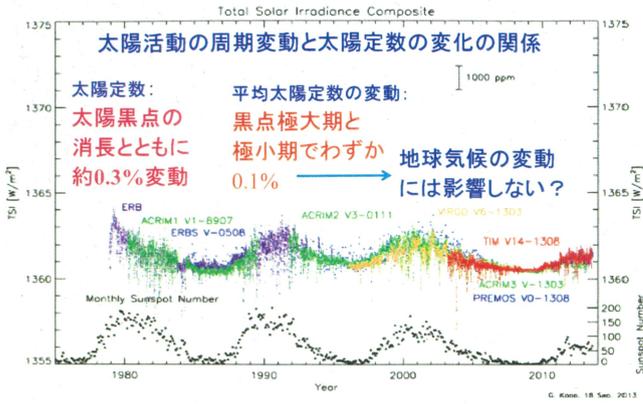
1645年~1715年: 「マウンダーの極小期」

太陽活動極小(Maunder Minimum)

小氷河期

太陽活動 高 → 地球気候 温暖
太陽活動 低 → 地球気候 寒冷

(1) 黒点が少ないと太陽放射が減る？



(2) 紫外線の増減が地表の温度変化を引き起こすか？

成層圏の役割

太陽極大期に紫外線は約2~5%増

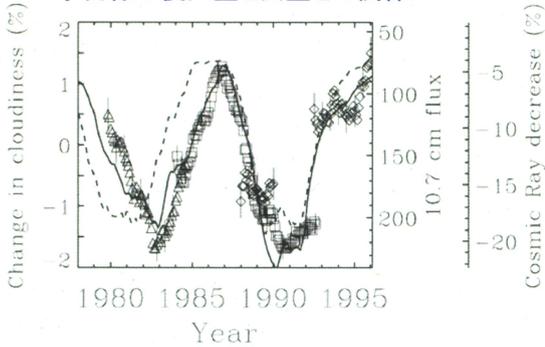
成層圏で吸収

成層圏の温度: 約1~2度上昇

対流圏の温度をどのようにして上げるか？

(3) 宇宙線が雲を作る？

宇宙線の侵入量と雲量との関係



実線: 宇宙線の流入量 (Climax 観測所)、点線: 10.7cm太陽電波流入量
 △、◇、□: 人工衛星で撮影した南半球海上の雲量
 Svensmark (Physical Review Letters 1998)

IV. 太陽面爆発の脅威



太陽の怖さ

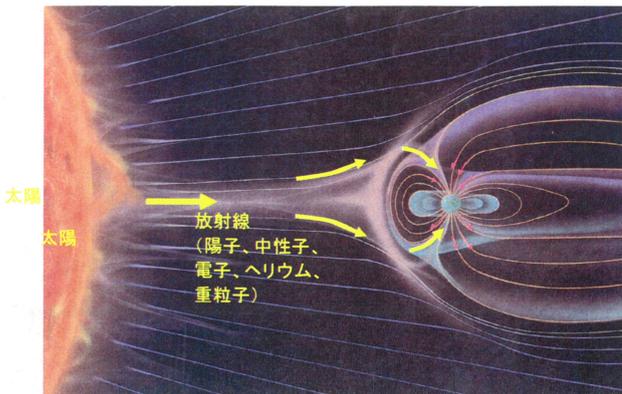
太陽コロナの爆発



2003年10月28日の太陽面爆発(太陽フレア)とそれによる磁気嵐

太陽面爆発が起こると

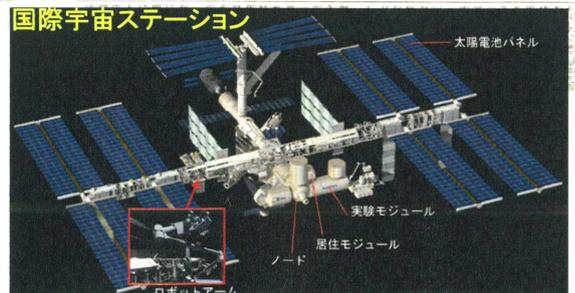
地球磁気圏へ太陽放射線が流入 → 大きな危害



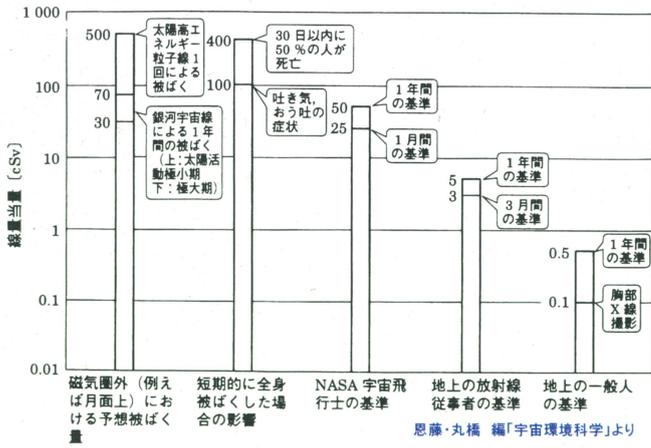
2025年 月に基地

宇宙航空機構 長期ビジョン
 10年で衛星から携帯に災害情報

(毎日新聞2月28日朝刊)



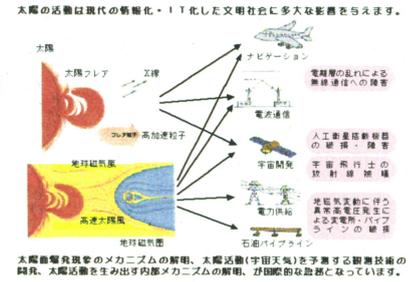
太陽放射線による被爆の危険性



宇宙天気予報

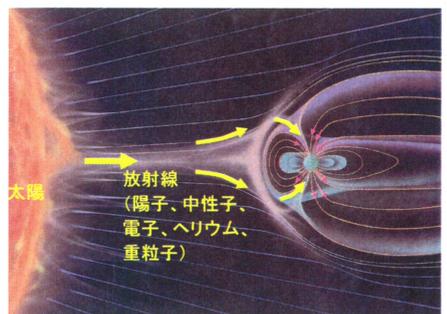
危険な太陽面爆発を予報する

21世紀人類の地球・宇宙活動の安全性を高める



大きなフレアの発生を予測して警報を発する必要がある(宇宙天気予報)

そのためにはフレア発生メカニズムの解明が必須



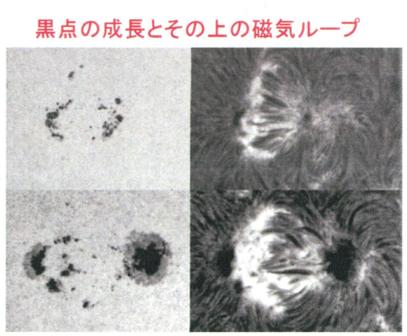
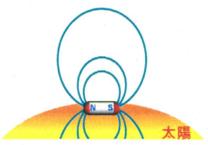
太陽表面の大爆発 (京大飛騨天文台撮影)



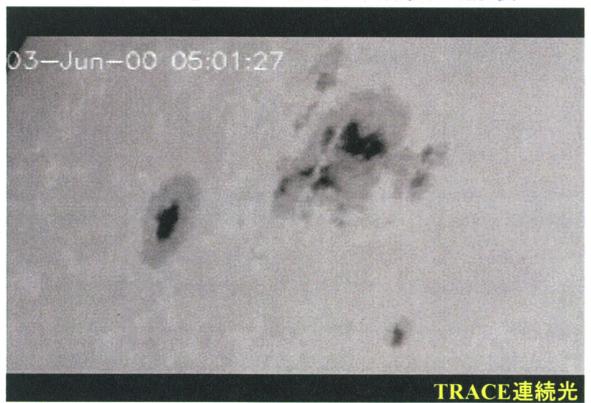
太陽表面爆発(太陽フレア)を起す源は何か? その下では何が起きているか?

その下には黒点と磁場がある

黒点は磁石である

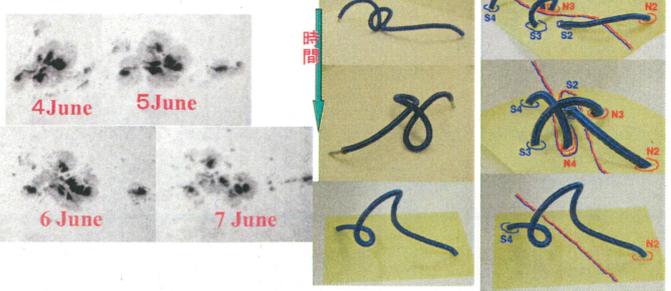


どのような黒点が大フレアを起こすか? 大フレアを起した黒点の成長と崩壊



黒点群の成長・回転運動・崩壊は 振じれた磁束管の浮上で説明できる 振じれた磁束管の浮上

黒点群NOAA9026の進化



振れた磁場を持った大黒点が急速に発達すると 強い大フレアが発生する!

