

Fizyka Procesów Klimatycznych

Wykład 10 – wpływ słońca

prof. dr hab. Szymon Malinowski
Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
malina@igf.fuw.edu.pl

dr hab. Krzysztof Markowicz
Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
kmark@igf.fuw.edu.pl

Zmiany energii docierającej od Słońca do Ziemi

- Cykl roczny $\pm 3.4\%$ (98W/m^2) związany ze zmianą odległości Ziemia-Słońce
- Zmiany aktywności słonecznej w cyklu 11 letnim wynoszą ok. 1.3 W/m^2 co stanowi zaledwie ok. 0.1% stałej słonecznej
- Zmiany aktywności słonecznej w skalach dłuższych są słabo poznane ale prawdopodobnie nie są większe niż kilka W/m^2 .

Aktywność słoneczna

- to zmiany zachodzące na powierzchni i w atmosferze Słońca
- Zmiany te powodują fluktuacje promieniowania emitowanego w postaci fal elektromagnetycznych oraz strumienia cząstek emitowanych przez Słońce (wiatr słoneczny).
- Do aktywności słonecznej zalicza się też zmiany w liczbie i rozmieszczeniu plam słonecznych oraz koronalnych wyrzutów masy.
- Ze zmianą pola magnetycznego Słońca wiążą się liczne zjawiska, które stanowią o aktywności słonecznej.
- Przejawia się ona
 - w fotosferze w postaci plam i pochodni;
 - w chromosferze jako rozbłyski i protuberancje;
 - w koronie słonecznej jako rozbłyski i wyrzuty materii.

Rys historyczny

- Pierwsze obserwacje przejawów aktywności słonecznej prowadzono około 800 lat. p.n.e w Chinach.
- Od 1610 r. astronomowie zaczęli używać teleskopów do obserwacji plam i ich przemieszczania się.
- W 1845 r. prof. Joseph Henry i prof. Stephen Alexander z Uniwersytetu w Princeton używając termopary zauważyli, że plamy słoneczne emitują mniej energii w porównaniu do obszarów ich otaczających. Ponadto odkryli obszary o wyższej emisyjności zwane flokule (flokule) słoneczne.
- W 1843 r. niemiecki astronom amator Samuel Schwabe odkrył wzrost a następnie spadek rocznej liczby plam słonecznych. Sugerował, że cykl plam na Słońcu trwa 10 lat.

- Szwajcarski astronom Rudolf Wolf używając badań swoich poprzedników zrekonstruował cykle słoneczne do 1745 r. W 1849 r. zdefiniował liczbę plam zwaną obecnie liczbą Wolfa R :

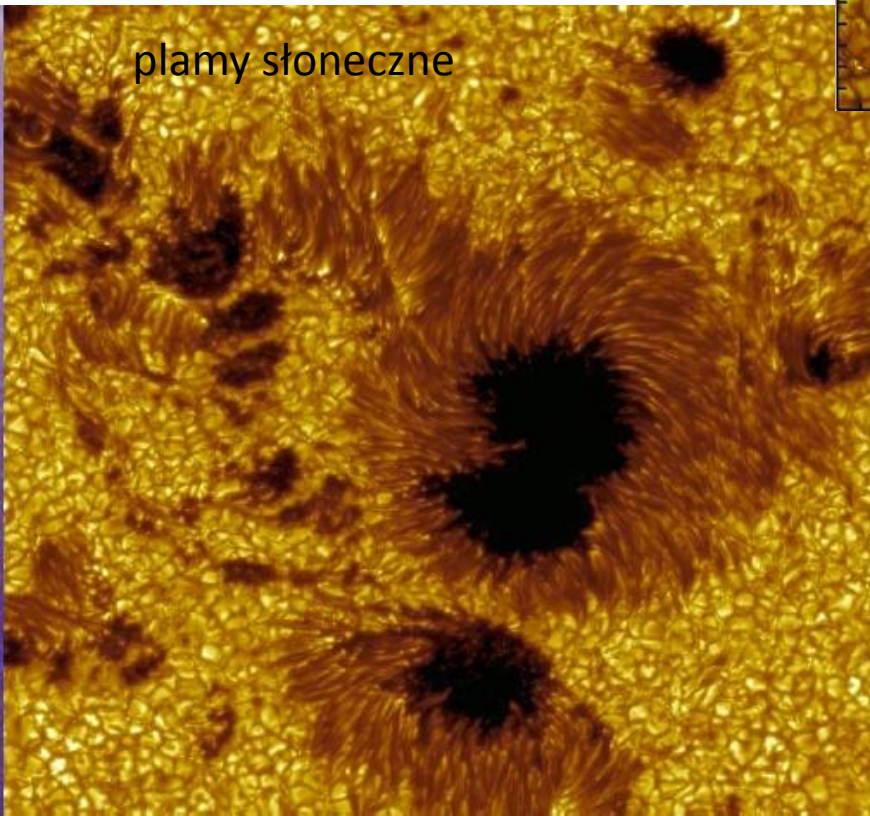
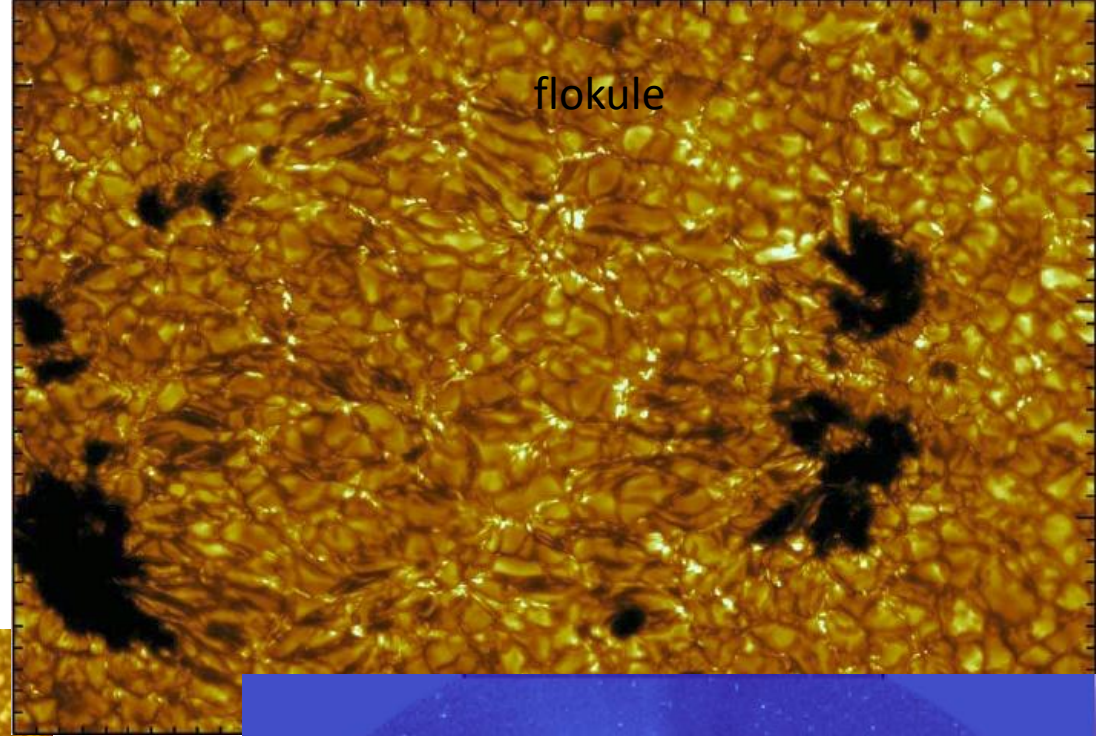
$$R=k(10g+p)$$

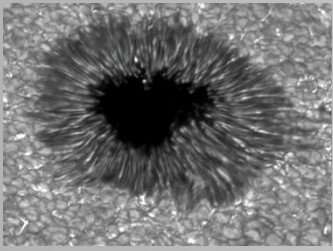
- gdzie g to liczba grup plam, p - ilość plam, a k to wielkość, która umożliwia porównanie wyników uzyskanych przez obserwatorów dysponujących różniącymi się powiększeniem lunetami.
- Około 1852 r. czterej astronomowie zauważyli, że okres cyklu plam słonecznych był identyczny z okres zmian aktywności geomagnetycznej na Ziemi, dając początek badań tzw. "pogody kosmicznej".

Cykle słoneczne

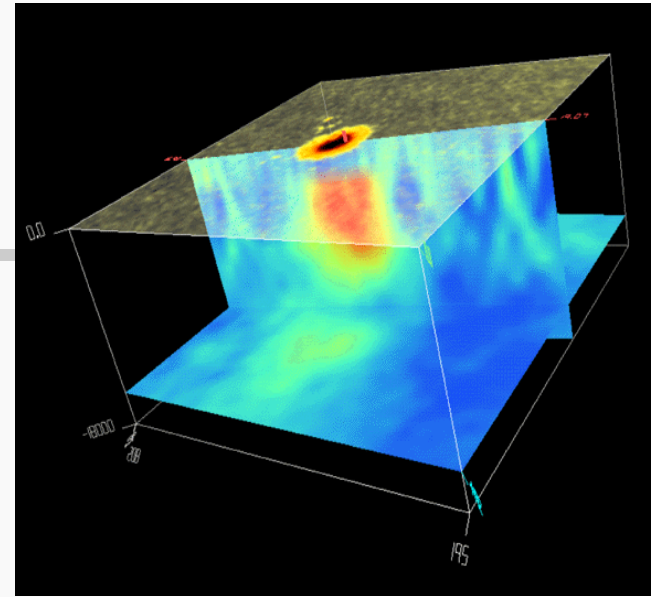
- Podstawowy 11 letni (9-12 letni cykl) w czasie którego liczba plam stopniowo rośnie a następnie dość szybko spada.
- 22 letni
- 87 letni – modulacja amplitudy cyklu 11 letniego
- inne...

Przejawy aktywności słonecznej

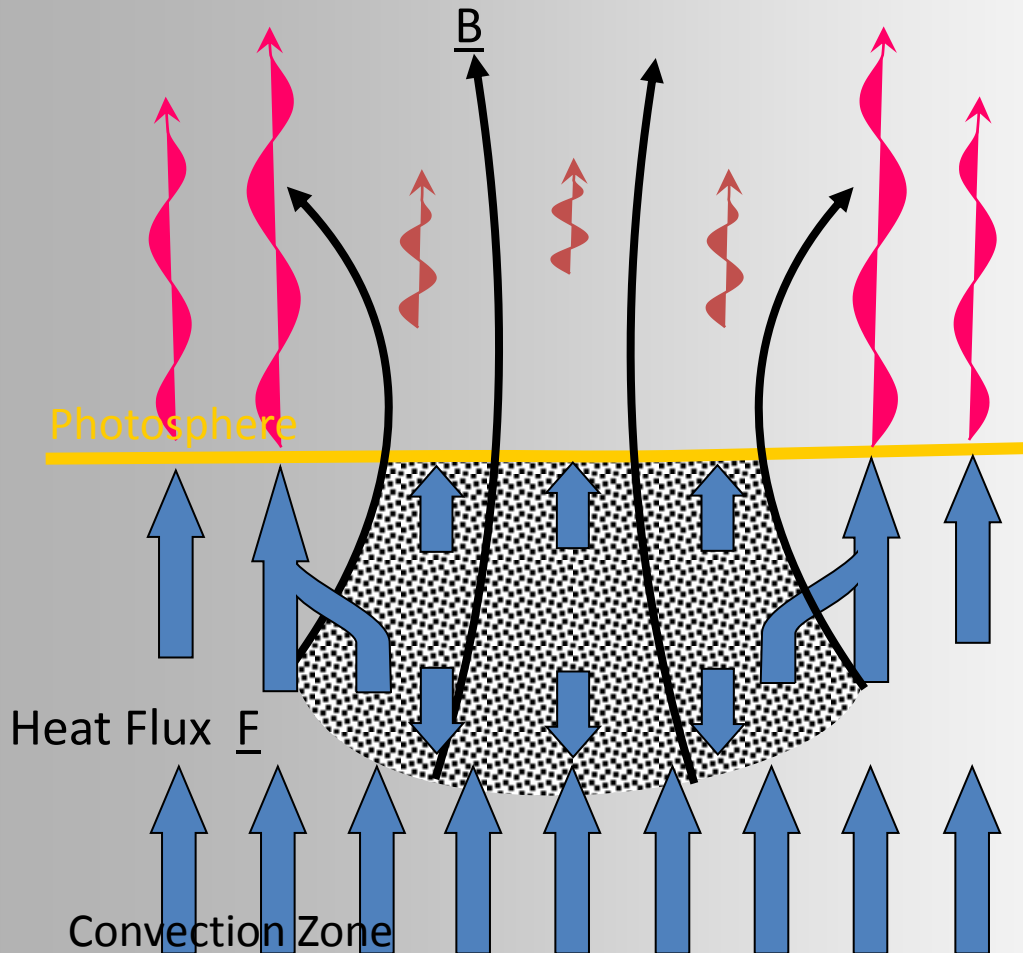




Plamy słoneczne

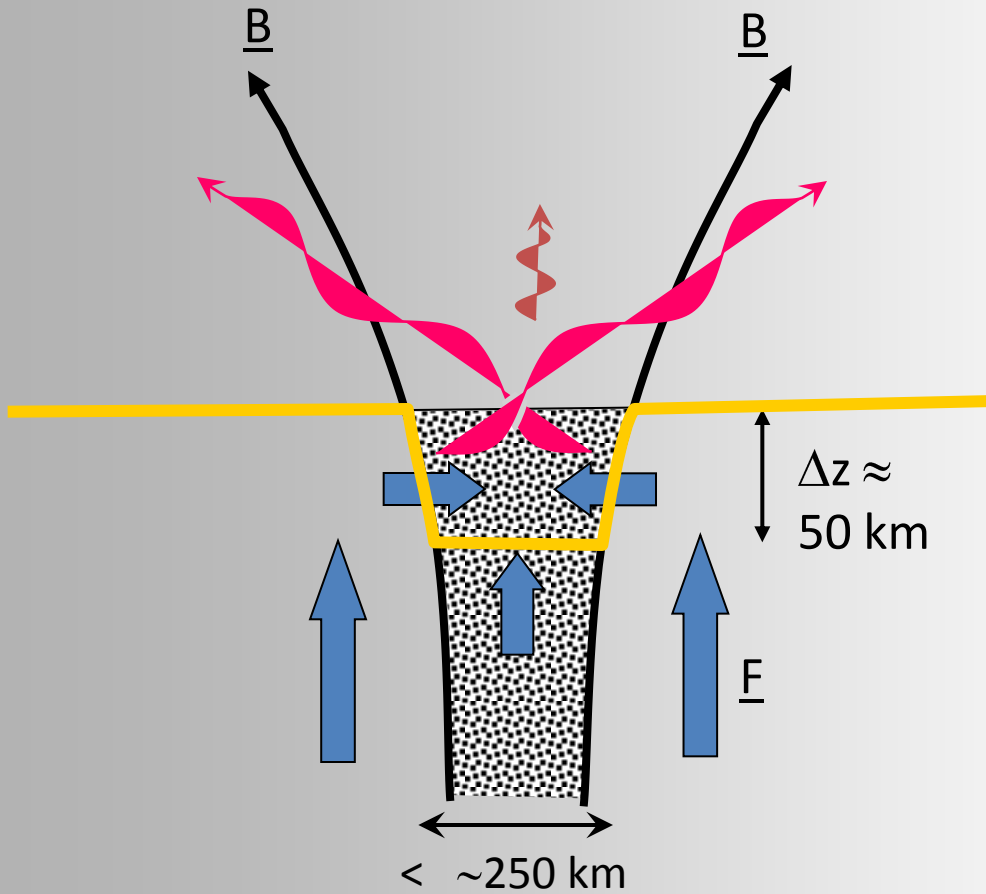


Quiet Sun Bright Ring P Spot U P Bright Ring Quiet Sun



- Pole magnetyczne blokuje strumień ciepła

Flokule - model jasnej ściany



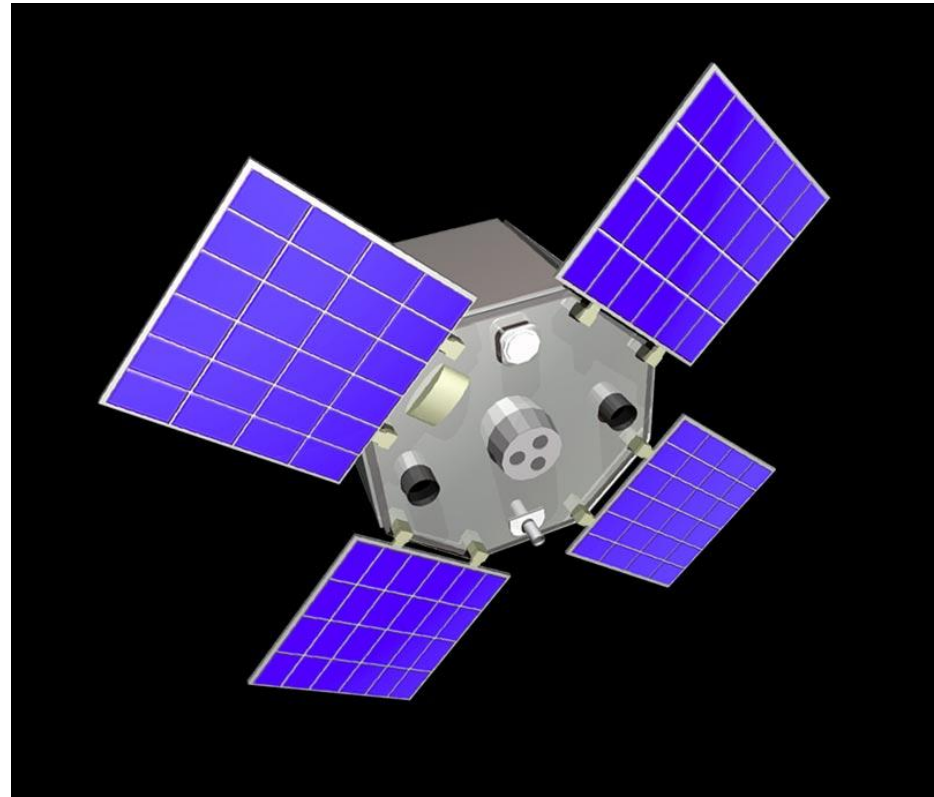
$T_f \approx 6200 \text{ K}$

Współczesny monitoring aktywności słonecznej

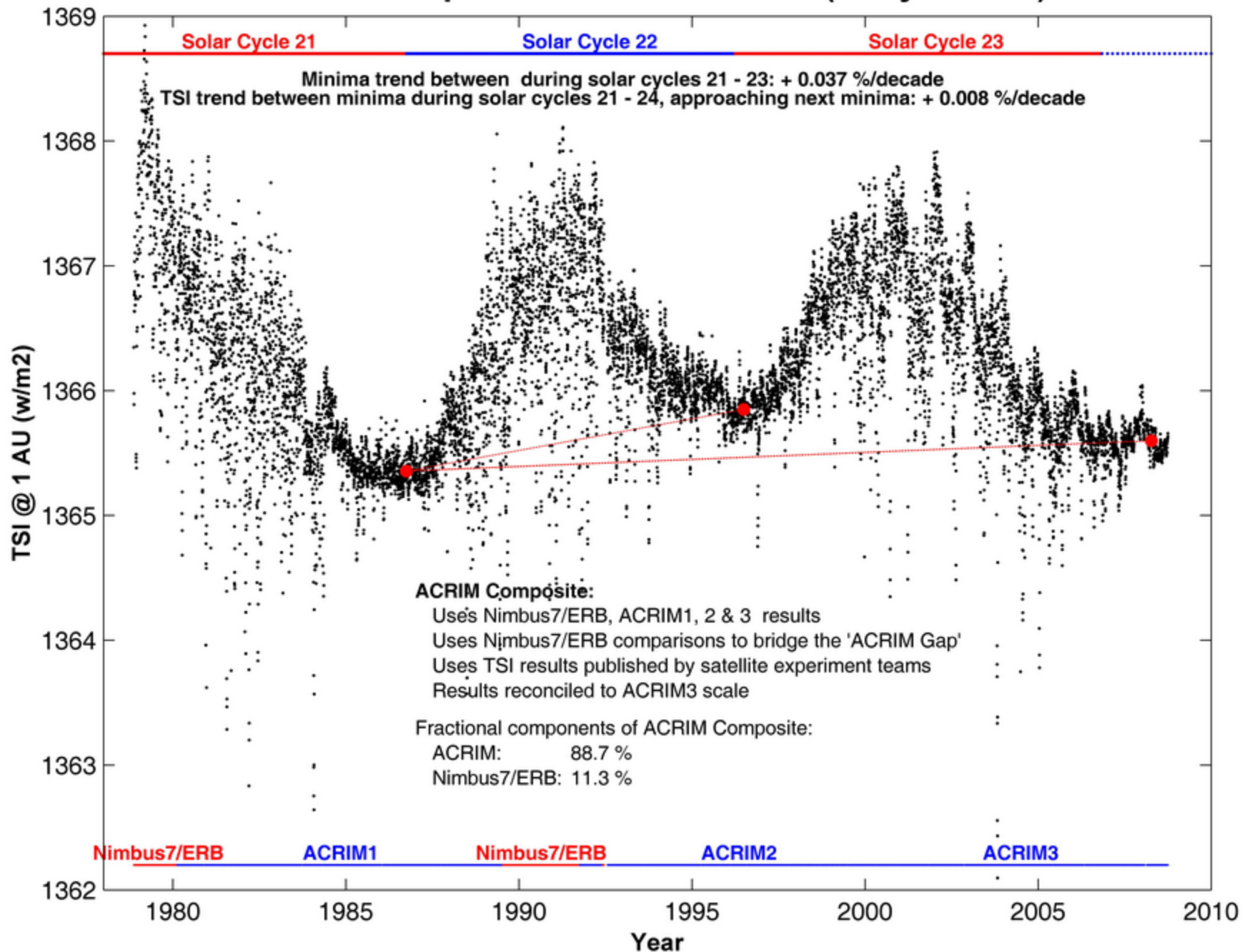
- Od 1977 r. prowadzony za pomocą detektorów umieszczonych na satelitach
- Obserwacje naziemne - utrudnione przez zmienności własności optycznych atmosfery ale możliwe w stacjach wysokogórskich
- Rekonstrukcje historyczne – przy użyciu różnych technik paleoklimatycznych.

Misje satelitarne ACRIMSAT

- Trzy misje satelitarne w latach 1980, 1991 i 1999 (ACRIMSAT I, II i III)
- ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor), pierwszy instrument satelitalny, który zaobserwował zmienność stałej słoncznej na poziomie 0.1% w czasie jednego cyklu 11 letniego.



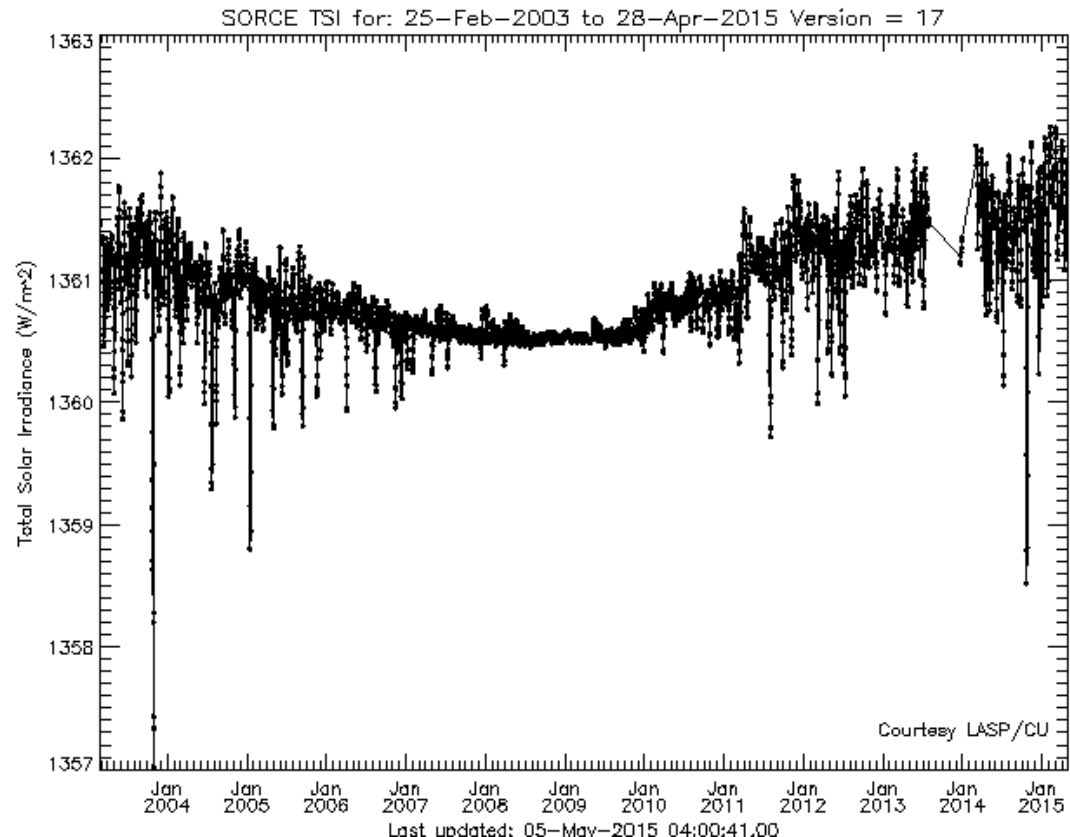
ACRIM Composite TSI Time Series (Daily Means)¹



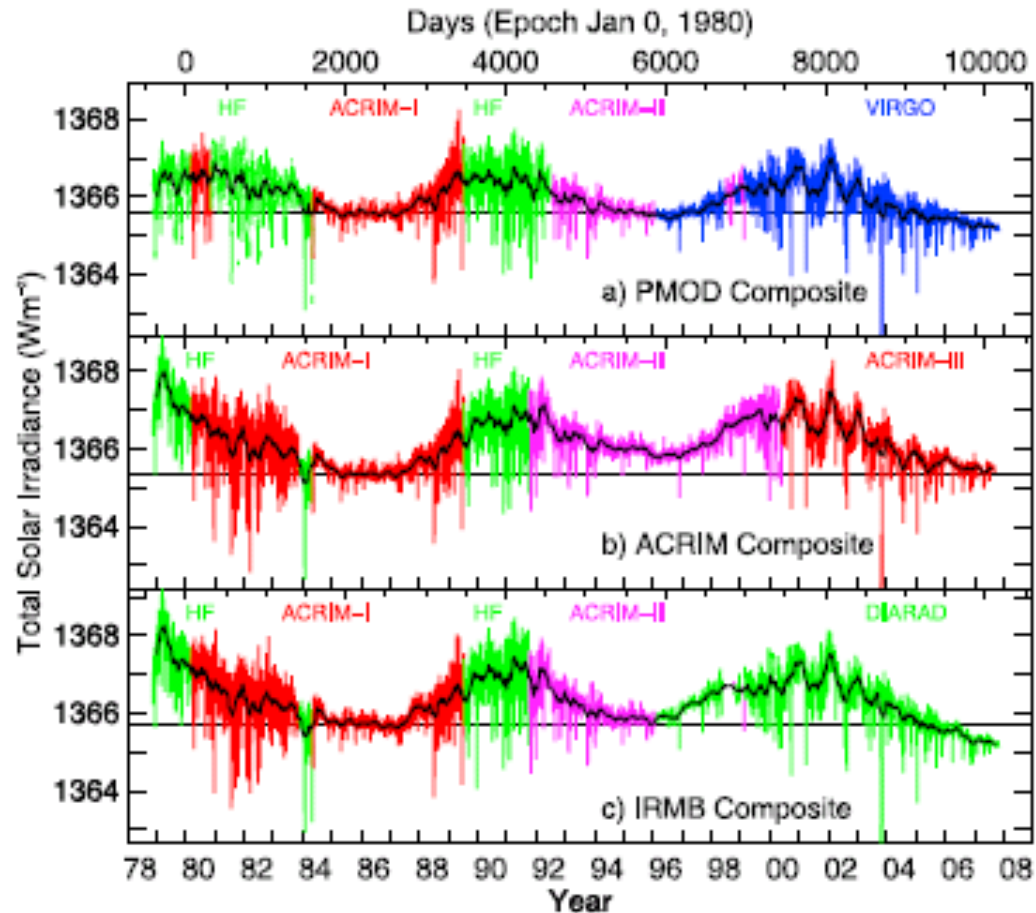
Pomiary satelitarne stałej słonecznej - SORCE

- Od 2003 The Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE).
Pomiary promieniowania w zakresie (x-ray, UV VIS, NIRD, TSI), 1nm - 2000nm obejmującym 95% energii docierającej od Słońca

SORCE wyposażony jest 4 instrumenty:
instruments Spectral Irradiance Monitor (SIM), Solar Stellar Irradiance Comparison Experiment (SOLSTICE), Total Irradiance Monitor (TIM) XUV Photometer System (XPS).

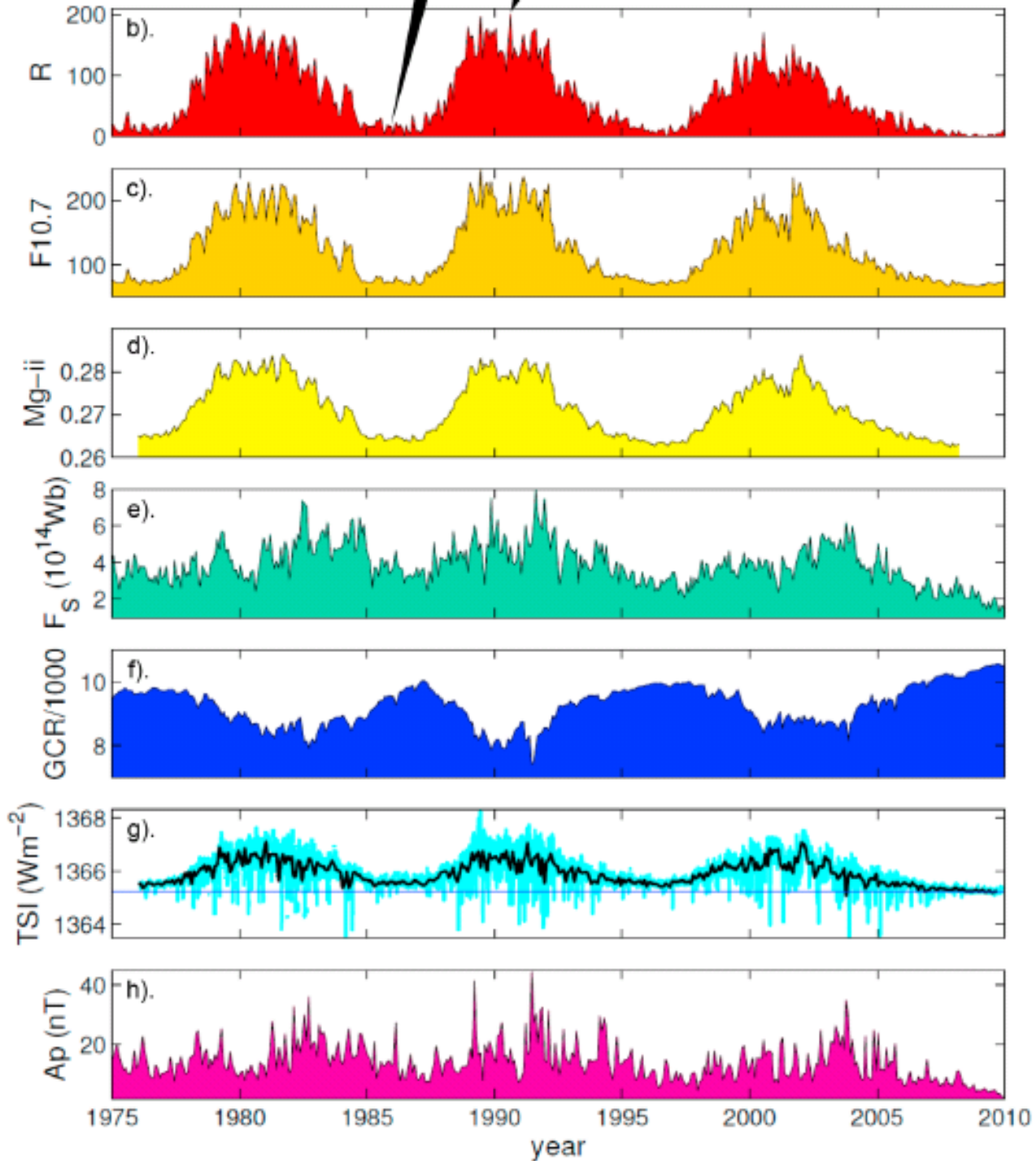


Problem dryfu instrumentów satelitarnych



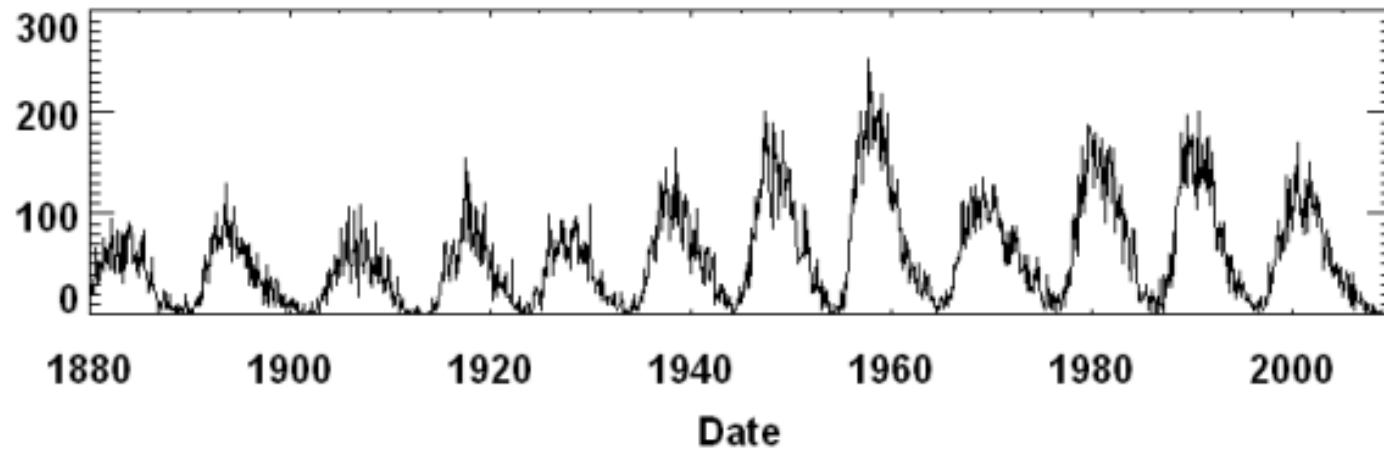
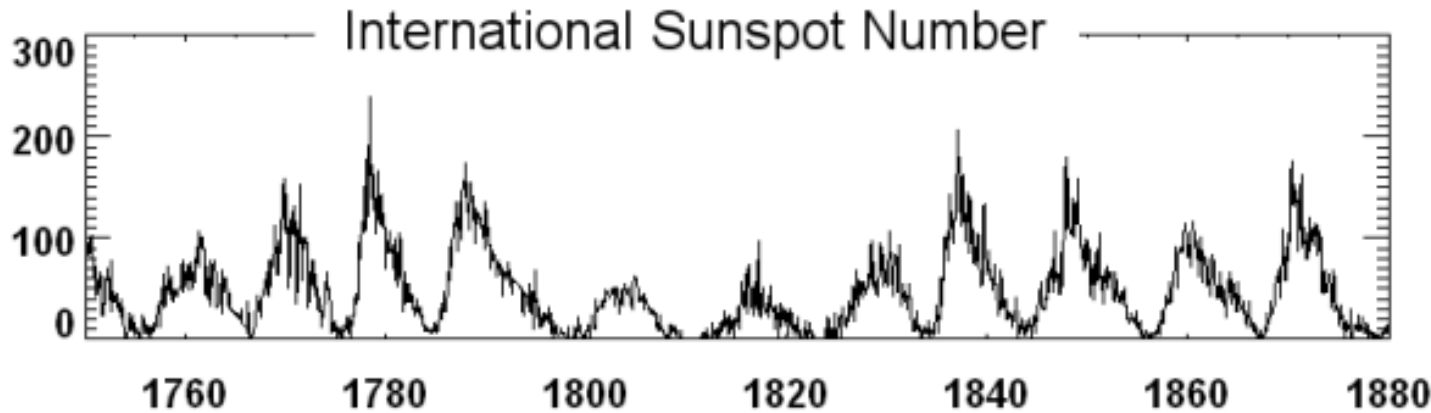
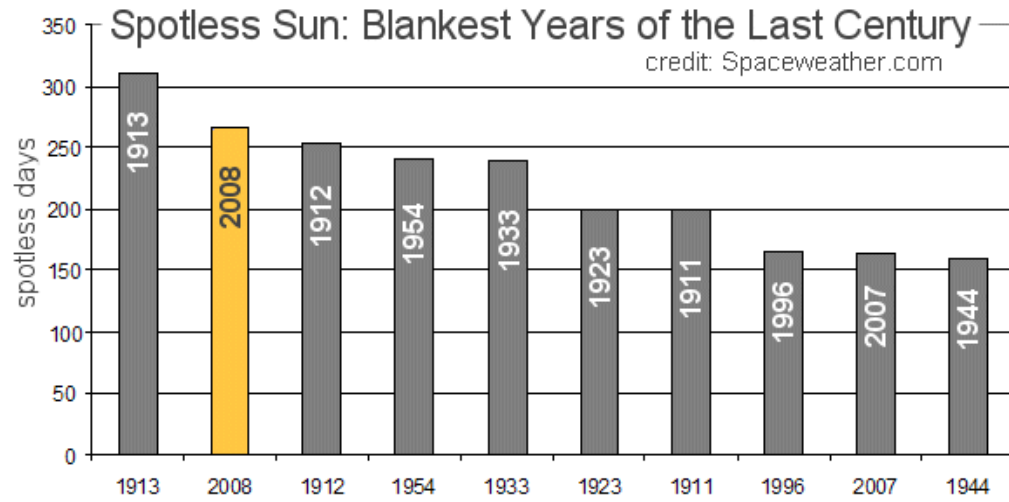
Gray et al., 2009

Zmiany aktywności
słonecznej w
ostatnich 35 latach



Zmiany aktywności słonecznej w ostatnich 250 latach

www.spaceweather.com



Pomiary z powierzchni ziemi - metoda Langley'a

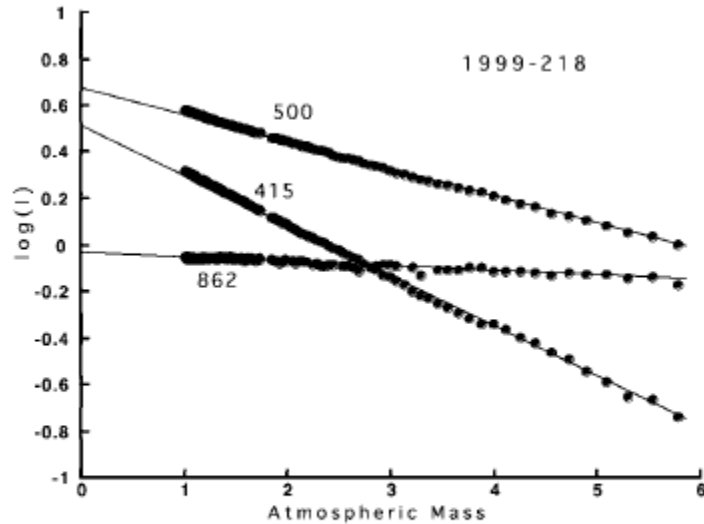


FIG. 11. A Langley plot for day 1999-219 from the Mauna Loa Observatory calibration. The clean dry air at the 3500-m altitude yields exceptionally low τ values, but the I_0 (see Table 2) are consistent with the earlier values.

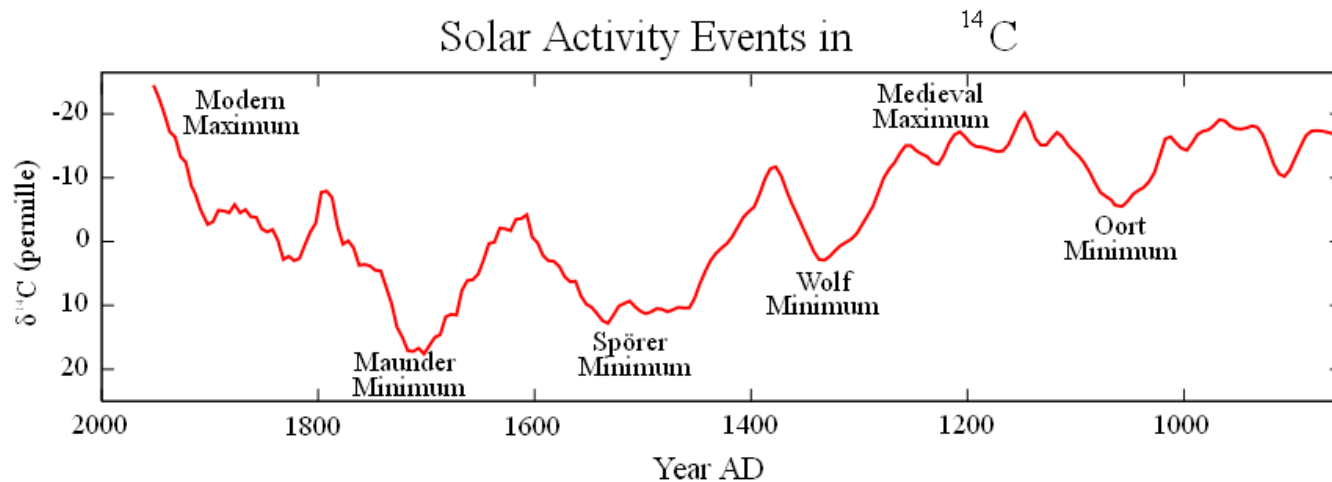
- Metoda Langley'a pozwala wyznaczyć spektralną stałą słoneczną na podstawie pomiarów prowadzonych na powierzchni ziemi.

Wymagania:

1. Bezchmurne warunki blisko zachodu lub po wschodzie słońca
2. Brak zmian czasowych własności optycznych atmosfery podczas kalibracji ok. 2-2.5h
3. Horyzontalna jednorodność
4. Najlepsze do tego celu są obserwacje prowadzone wysoko w górach

Rekonstrukcje zmian aktywność słonecznej

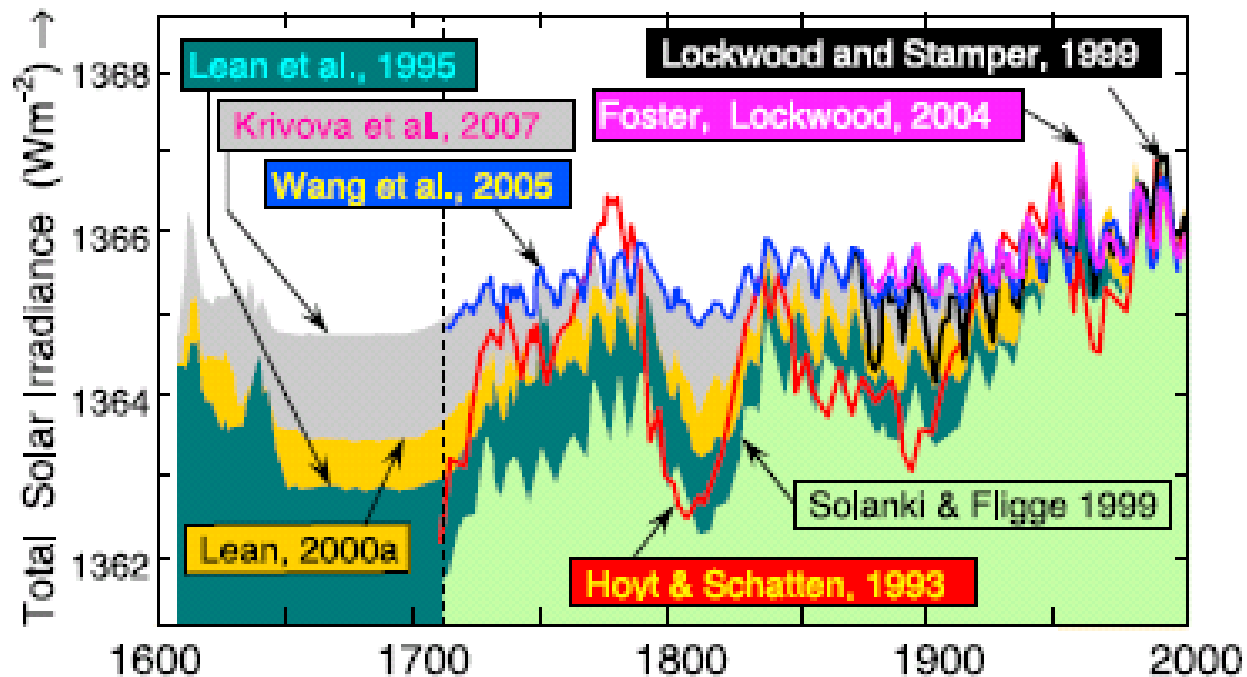
- Zmiany aktywności Słońca wpływają na wielkość strumienia cząstek promieniowania kosmicznego, wytwarzających w atmosferze promieniotwórczy węgiel ^{14}C (i ^{16}Be) z azotu atmosferycznego i magazynowany potem przez rośliny.
- Skala tej zmienności wprowadza błąd w wynikach datowania radiowęglowego. Jeszcze większe zmiany powodują wahania natężenia ziemskiego pola magnetycznego, w skalach czasowych rzędu kilku tysięcy lat.
- Z wyników badań radiowęglowych wynikałoby, iż w ciągu ostatnich 8000 lat było 18 minimów.



Szacowanie zmienności strumienia promieniowania słonecznego na podstawie liczby plam słonecznych

- Badania aktywności geomegetycznej, aktywności zórz polarnych czy izotopów powstających wskutek promieniowania kosmicznego wskazują na dodatkową zmienność aktywności słonecznej, która nie jest odzwierciedlona w ilości plam słonecznych.
- Niemal wszystkie minima słoneczne charakteryzują się zerową lub niemal zerową ilością plam na Słońcu podczas gdy inne wskaźniki aktywności słonecznej pokazują, że Słońce nie powraca do tego samego poziomu aktywności.

Porównanie rekonstrukcji stałej słonecznej za ostatnie 400 lat.



Mechanizmy oddziaływania aktywności słonecznej na klimat

- Poprzez zmianę bilansu energetycznego całego systemu klimatycznego
- Poprzez zmiany promieniowania UV i struktury termicznej stratosfery
- Poprzez oddziaływanie na wysokie warstwy atmosfery
- Oddziaływanie promieniowania kosmicznego na atmosferę (chmury)

Zaburzenia prowadzące do zmian klimatycznych

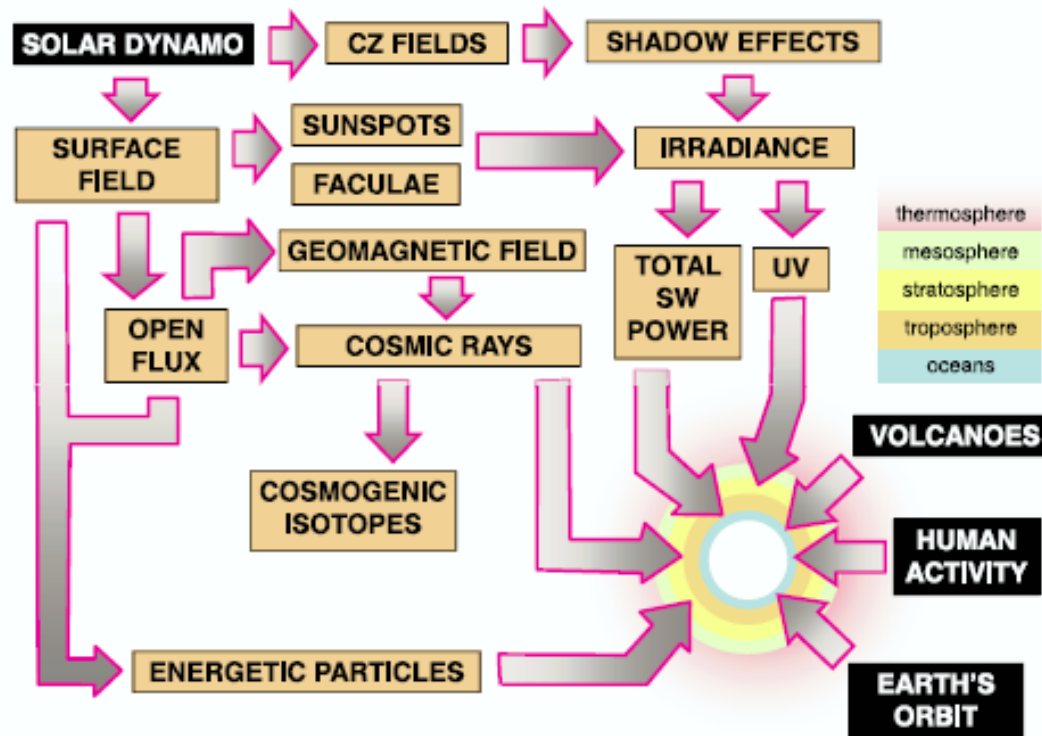
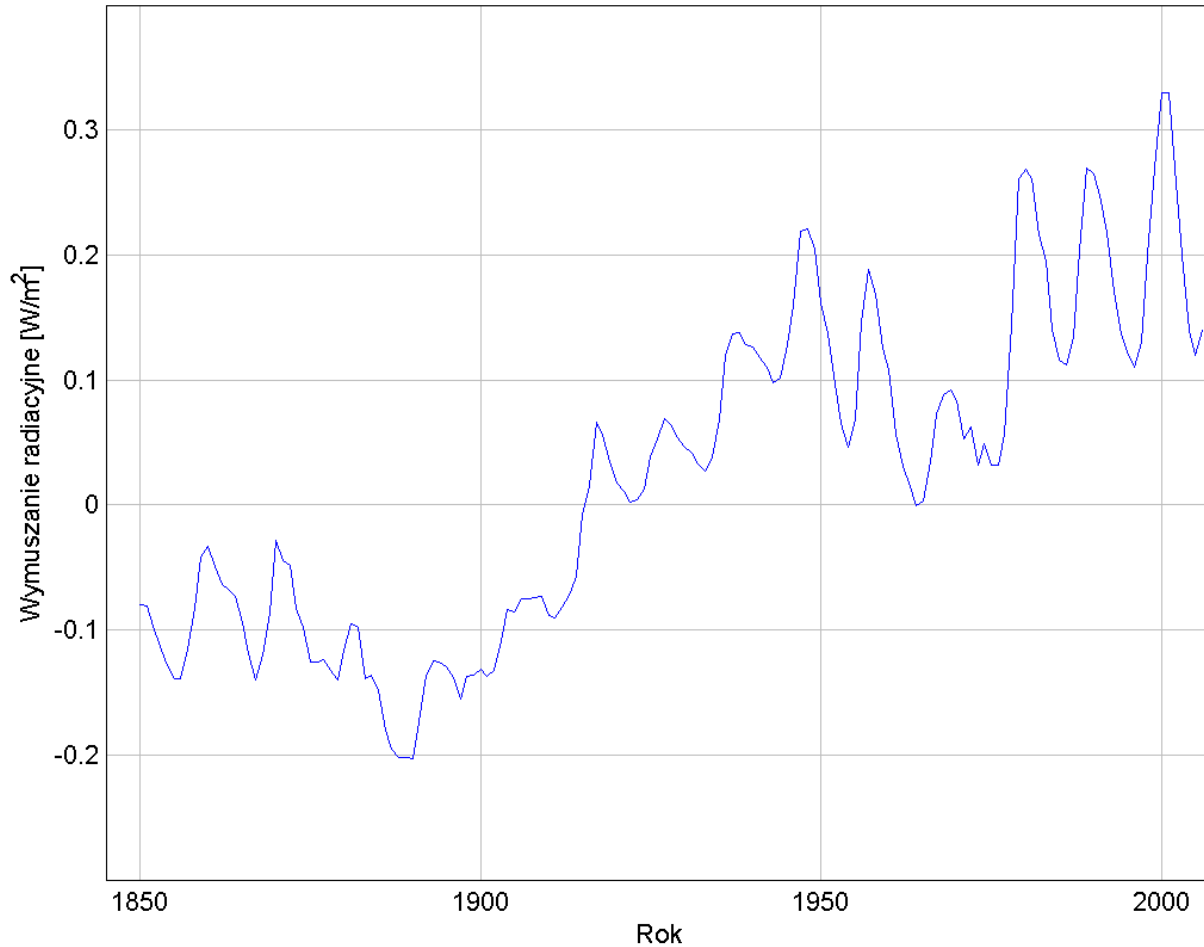


Figure 20. Schematic overview showing various climate forcings of the Earth's atmosphere, with factors that influence the forcing associated with solar variability (irradiance and corpuscular radiation) shown in more detail on the left-hand side, as discussed in section 2.

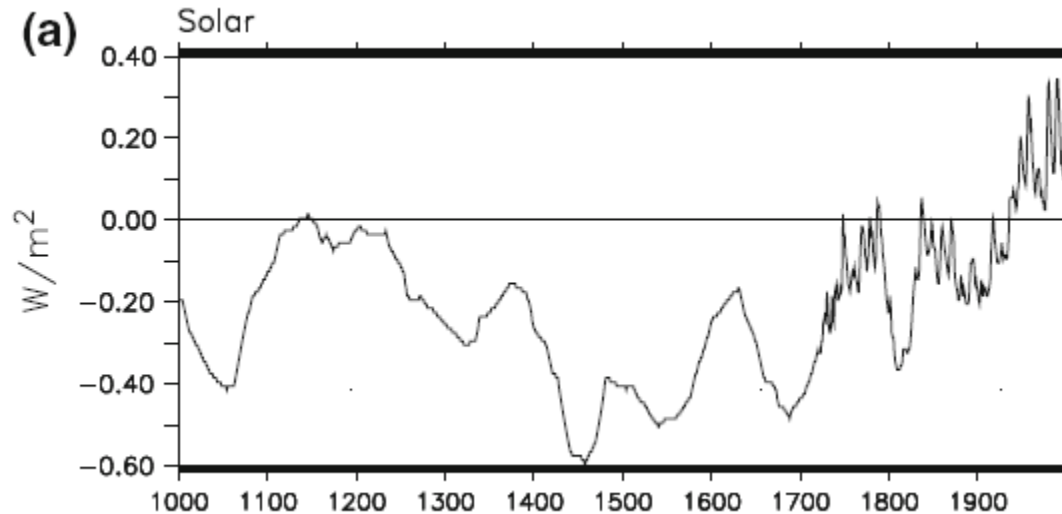
Wymuszanie radiacyjne związane aktywnością słoneczną w ostatnich 160 latach.

Solar Radiative Forcing, Myhre et al., 2001



Dla porównania wymuszanie radiacyjne związane z działalnością człowieka wzrosło od roku 1750 do dziś o ok. 1.6 W/m^2

Rekonstrukcja wymuszania radiacyjnego dla ostatniego milenium, Bard et al., (2000)



Uwagi:

1. Nie ma konsensusu wśród naukowców co do skalowania zmian czasowych stałej słonecznej.
2. Lean et al., 2002 i Foukal et al., 2004 amplituda zmian stałej słonecznej jest mniejsza.

Czy wymuszanie radiacyjne Słońca może zmieniać temperaturę na Ziemi?

Zmiana temperatury powierzchni ziemi T_s związana z wymuszaniem radiacyjnym ΔF dana jest wzorem (po ustaleniu nowego stanu równowagi)

$$\Delta T_s = \alpha \Delta F$$

gdzie α oznacza współczynnik wrażliwości klimatu. Współczynnik ten jest bardzo trudny do określenia i szacuje się, że wynosi 0.5-0.7 K/W/m².

Zakładając wymuszenie radiacyjne na poziomie 0.2 W/m² dostajemy zmianę temperatury o ok. 0.1 K.

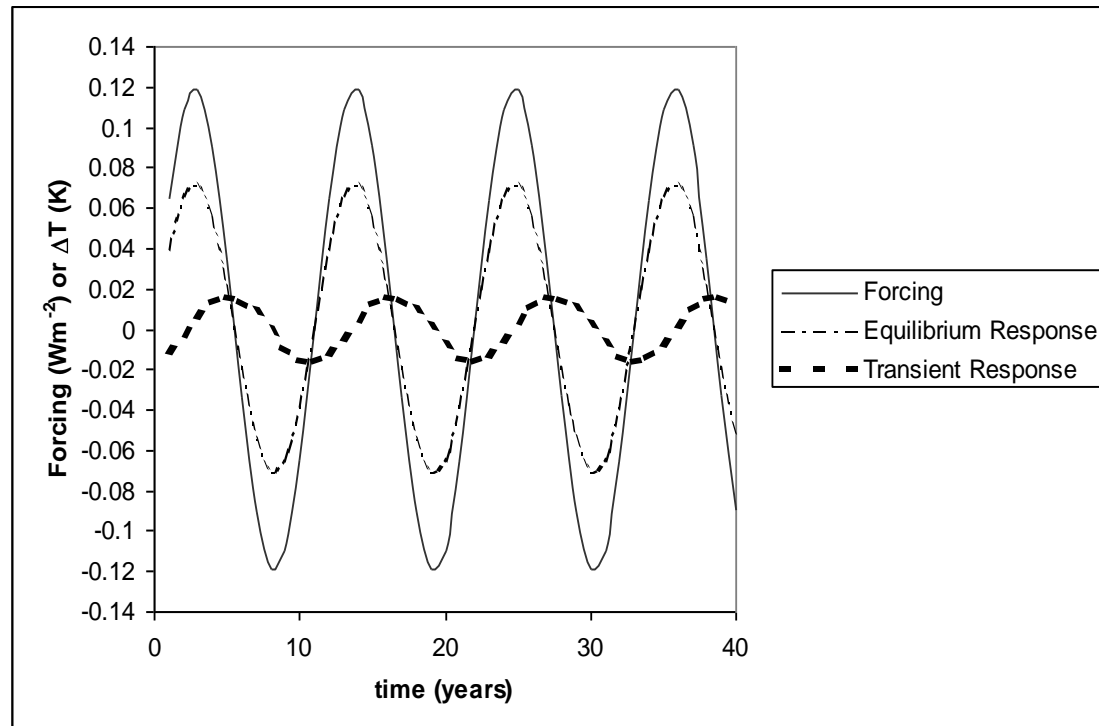
Wyznaczona zmiana temperatury na poziomie 0.1 K w ciągu jednego cyklu wyznaczona została przy założeniu „natychmiastowej” odpowiedzi systemu klimatycznego na zaburzenie

Opóźnienie systemu klimatycznego w dochodzeniu do nowego stanu równowagi.

- System klimatyczny składający się z atmosfery, hydrosfery, kriosfery, biosfery i litosfery wykazuje dużą bezwładność.
- Stała czasowa takiego systemu jest szacowana w dziesiątkach lat.
- Zaburzenia takiego systemu mające skalę 11 lat charakteryzują się niewielką odpowiedzią w systemie.
- 11 letni cykl słoneczny nie jest w stanie efektywnie pobudzać systemu klimatycznego (jesteśmy daleko od rezonansu)

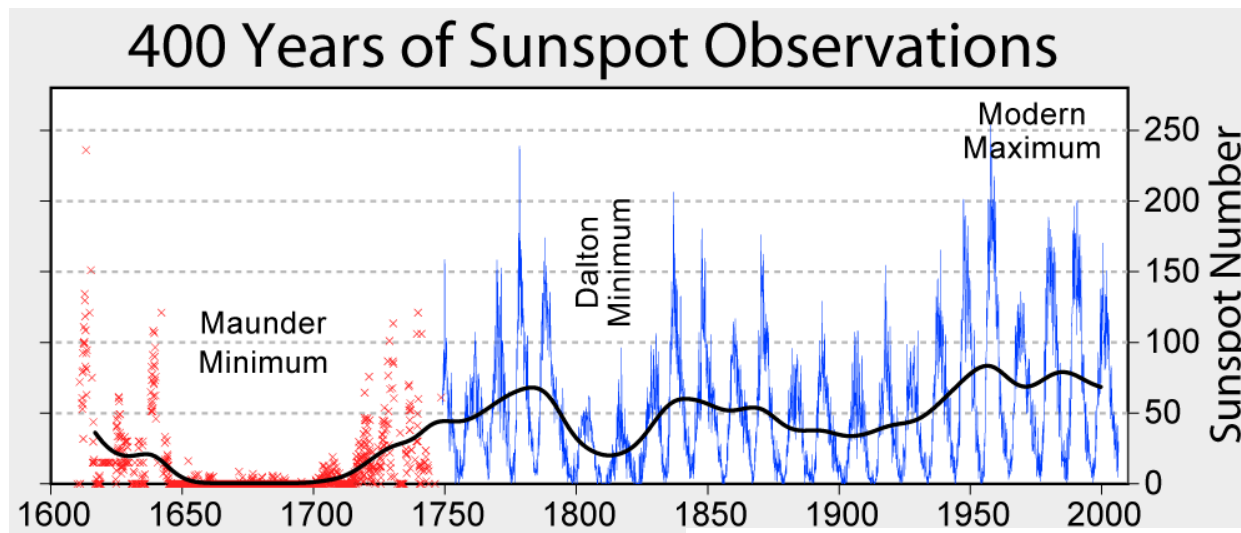
Przykład

- Rozważmy model aktywności słonecznej o sinusoidalnej oscylacji 11 letniej z amplitudą wymuszania radiacyjnego 0.24 W/m^2 .
- Pomijamy tutaj uproszczony model matematyczny ziemi będącej jednym wielkim oceanem.
- Temperatura równowagowa zaznaczona jest cienką linią przerywaną, zaś rzeczywista odpowiedź systemu grubą linią przerywaną.

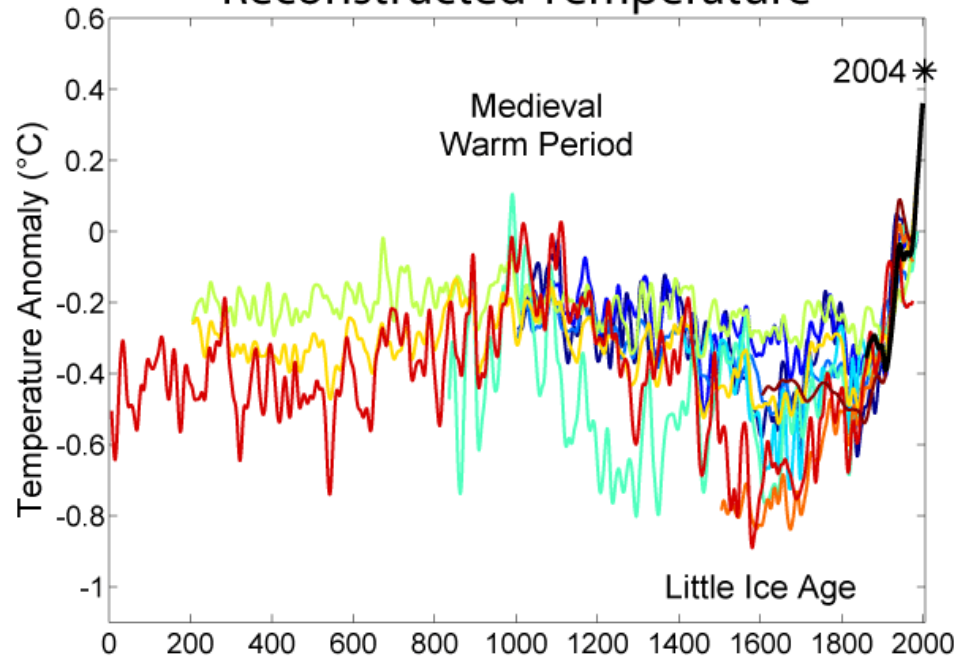


- Zauważmy, że wyznaczone z naszego modelu zmiany temperatury są znacznie mniejsze (około 20%) niż zmiany związane ze stanem równowagi.
- Wynika to z faktu, iż wymuszenie radiacyjne zmienia się zbyt szybko dla bezwładnego systemu klimatycznego
- Stąd też wynika przesunięcie w fazie pomiędzy wymuszeniem a odpowiedzią systemu klimatycznego.
- Tak, więc wpływ 11 cyklu słonecznego jest prawdopodobnie znacznie mniejszy niż wynika to z wartości wymuszenia radiacyjnego.
- Zmiany aktywność słonecznej w dłuższej skali czasowej mogą odgrywać większe znaczenie ze względu na dłuższy okres czasowy wymuszenia oraz większą amplitudę w porównaniu do cyklu 11 letniego.

Wpływ długookresowych zmian aktywności słonecznej na klimat – minimum Maundera



Reconstructed Temperature



Minimum plam słoneczny w latach 1610-1700 pokrywa się częściowo z okresem zwanym małą epoką lodową

Naukowcy próbują powiązać oba fakty

Minimum Maundera

- Najnowsze oszacowania stałej słonecznej dla tego okresu mówią o jej redukcji o jedynie $1.3 \pm 0.3 \text{ W/m}^2$ w stosunku do współczesnego poziomu.
- Tym samym trudno jedynie zmianami całkowitej ilości energii docierającej od Słońca wytłumaczyć niższe temperatury w okresie małej epoki lodowej.
- Być może inne mechanizmy spowodowały spadek temperatury

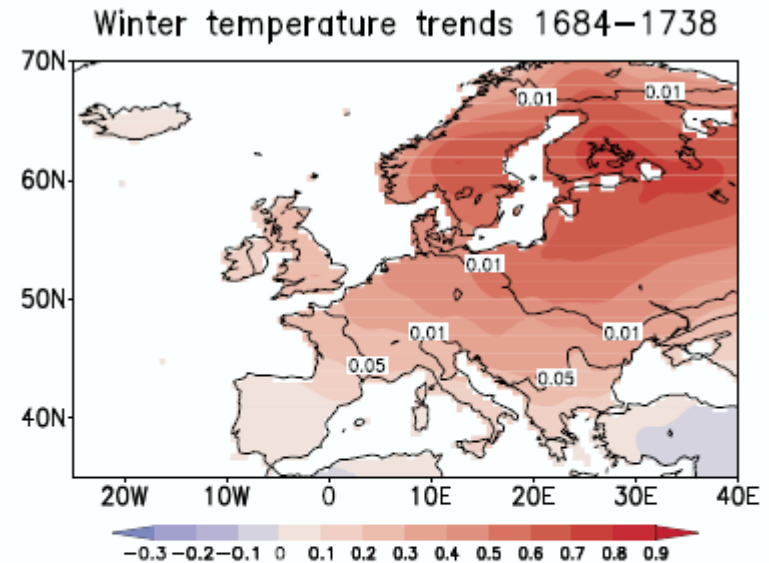


Figure 17. Winter temperature trends ($^{\circ}\text{K decade}^{-1}$) from 1684 to 1738. The thick solid lines represent the 95% and 99% confidence levels (error probabilities of 0.05 and 0.01, respectively) using a Mann-Kendall trend test. Except for the Mediterranean area, the warming trends are statistically significant over the whole of Europe. From *Luterbacher et al.* [2004]. Reprinted with permission from AAAS.

Mechanizmy odpowiedzi systemu klimatycznego na małe zaburzenia

Odpowiedz systemu na zmiany promieniowania słonecznego

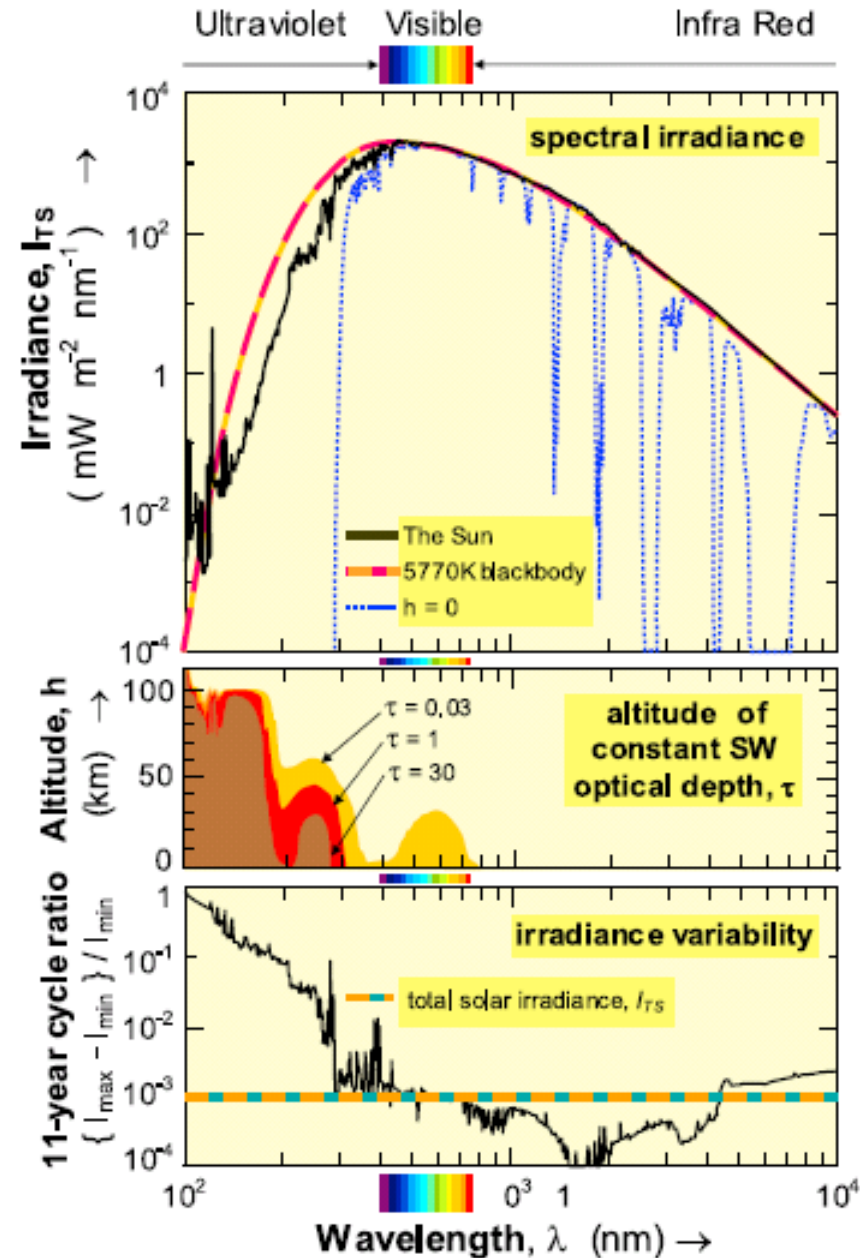
- a) zmiany bilansu energii
- b) zmiany w stratosferze i górnych warstwach atmosfery przez promieniowanie UV

Odpowiedz systemu na energetyczne cząstki

- a) wiatr słoneczny
- b) Promieniowanie galaktyczne (kosmiczne) i wiatr międzygwiazdny

Zmienność widma promieniowania słonecznego

- Największe zmiany w natężeniu promieniowania słonecznego występują w zakresie UV.
- W zakresie 200-300 nm to ok. 1.5% pomiędzy min i max cyklu 11 letniego. Dla fal ok. 200 nm zmiana ta wynosi już 6%, zaś dla 100 nm prawie 100%,
- Podczas minimum Maundera promieniowanie UV był mniejsze o ok. 4.3% niż obecnie.
- W zakresie promieniowania X zmiany te sięgają 2 rzędów wielkości (w ciągu 11 lat)



Zmiany w wysokiej atmosferze

- Zmiany temperatury związane z pochłanianiem promieniowania o długości 100 nm w egzosferze (500-1000 km) sięgają 1000K!
- W stratosferze wynoszą już tylko ok. 2K w tropikalnej atmosferze na wysokości 50 km oraz 20-25 km.
- Ogrzewanie stratosfery w czasie wysokiej aktywności słonecznej związane jest ze wzrostem UV oraz sprzężenie zwrotnym z ozonem, który powoduje pochłanianie tego promieniowania.
- Z oczywistych względów zmiany w stratosferze są w stanie wpływać na warunki panujące w dolnej troposferze. Wpływ wyższych warstw atmosfery na klimat panujący przy powierzchni ziemi jest ciągle mało poznany ale prawdopodobnie jest niewielki.

Odpowiedź stratosfery

- W stratosferze panuje równowaga radiacyjna to znaczy, że temperatura powietrza określona jest przez bilans promieniowania (promieniowanie jest jedynym źródłem energii). W troposferze dodatkowe źródła energii stanowi konwekcyjny transport ciepła odczuwalnego oraz utajonego.
- Równowaga radiacyjna ustala się w stratosferze relatywnie szybko bo w okresie ok. 2-4 miesięcy. Tym samym stratosfera może efektywnie odpowiadać na zaburzenia na Słońcu.
- Zróżnicowanie promieniowania UV w zależności od szerokości geograficznej prowadzi do kontrastów termicznych i zmian w cyrkulacji stratosferycznej.

Zmiany temperatury stratosfery i zawartości ozonu pomiędzy fazą maksymalną i minimalną

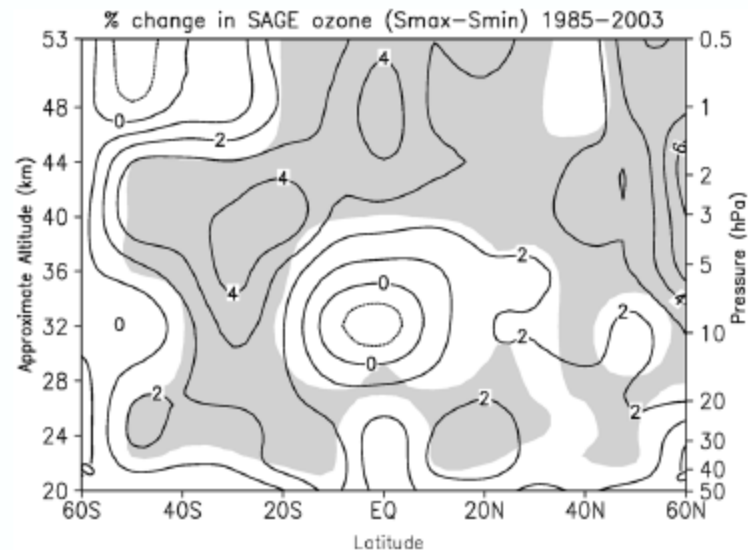


Figure 10. Annual averaged estimate of S_{\max} minus S_{\min} ozone differences (%) from a multiple regression analysis of SAGE II ozone data for the 1985–2003 period. Shaded areas are significant at the 5% level [from Soukharev and Hood, 2006].

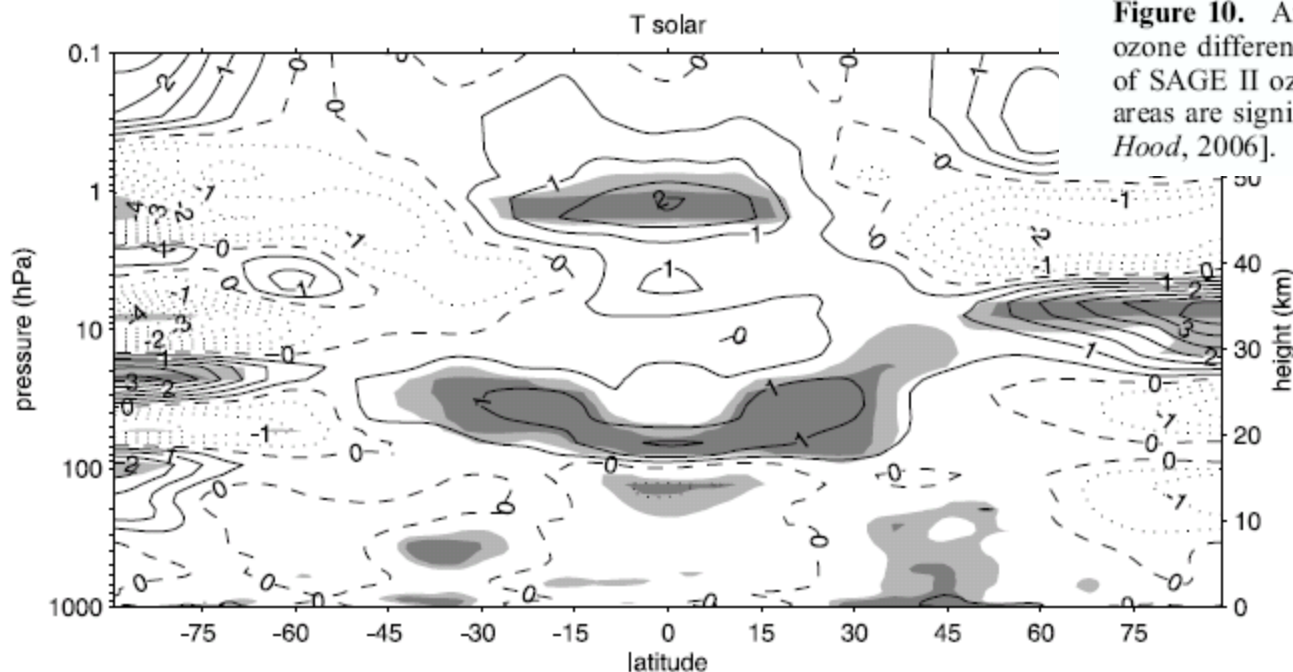


Figure 11. Annual averaged estimate of S_{\max} minus S_{\min} temperature difference (K) derived from a multiple regression analysis of the European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis (ERA-40) data set (adapted from Frame and Gray [2010]). Dark and light shaded areas denote statistical significance at the 1% and 5% levels, respectively.

Zmiany wiatru strefowego pomiędzy fazą maksymalną i minimalną

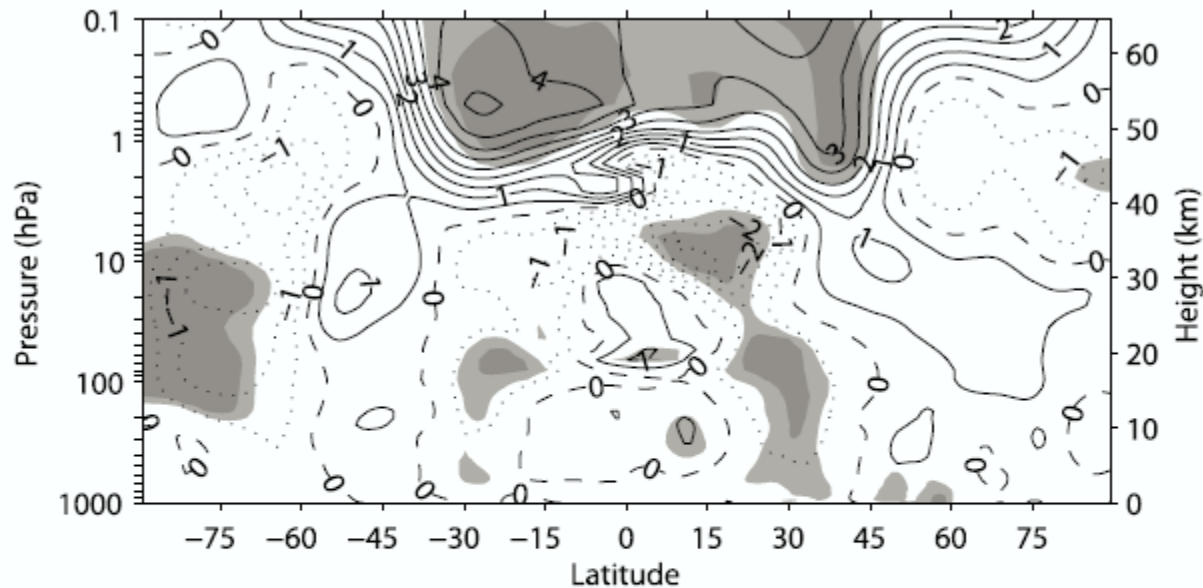
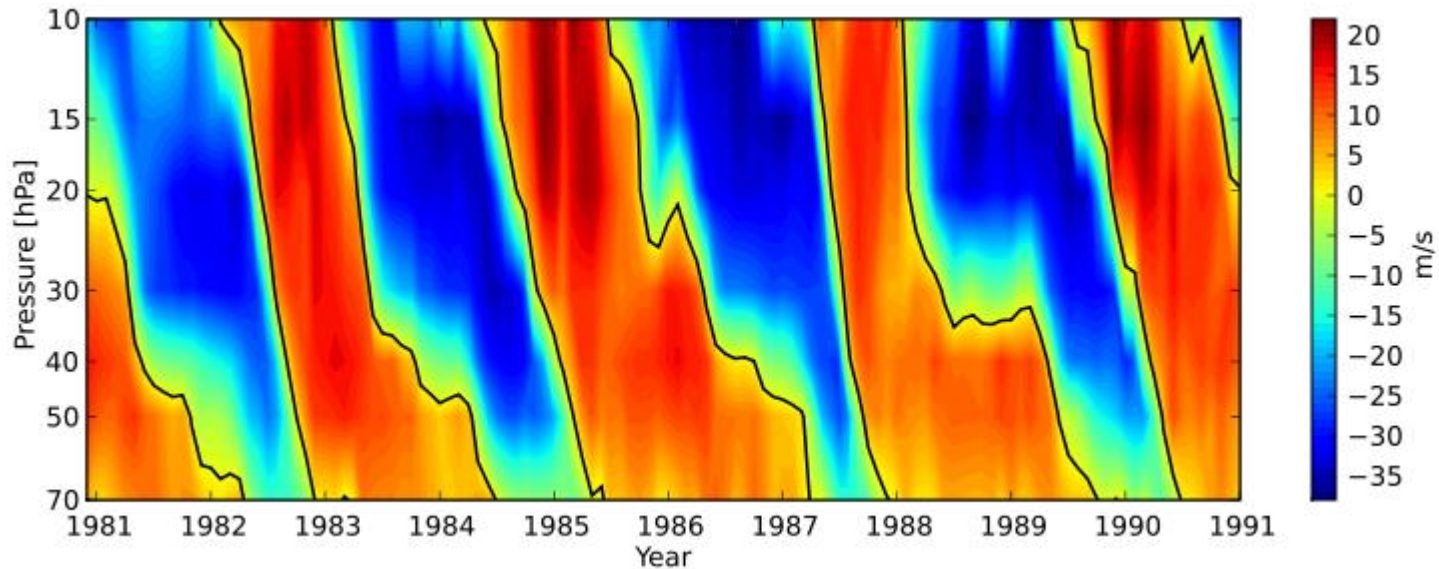


Figure 12. Annual averaged S_{\max} minus S_{\min} differences in zonally averaged zonal wind (m s^{-1}) from the ground to 0.1 hPa (~ 65 km) derived from a multiple regression analysis of the ERA-40 data set (adapted from *Frame and Gray* [2010]). Dark and light shaded areas denote statistical significance at the 1% and 5% levels, respectively. Contour values are 0, ± 0.5 , ± 1 , ± 2 , and ± 3 m s^{-1} and a contour interval of 2 m s^{-1} thereafter. Solid (dotted) contours denote positive (negative) values, and the dashed line is zero.

Wpływ na QBO (quasi-biennial oscillation)



- QBO to cyklicznie zmiany wiatru strefowego w tropikalnej dolnej stratosferze z okresem 28-29 miesięcy propagujące się z górnej stratosfery do tropopauzy gdzie zaburzenie ulega dyssypacji.

- Aktywność słoneczna wpływa na długość cyklu QBO. Zachodnia faza QBO jest istotnie dłuższa podczas wysokiej aktywności słonecznej niż podczas małej aktywności.

Podczas QBO-W pole geopotencjału rośnie ze wzrost aktywności słonecznej
 Podczas QBO-E jest na odwrót.
 Tym samym aktywność słoneczna oddziałuje na intensywność QBO oraz na tzw. wir polarny.

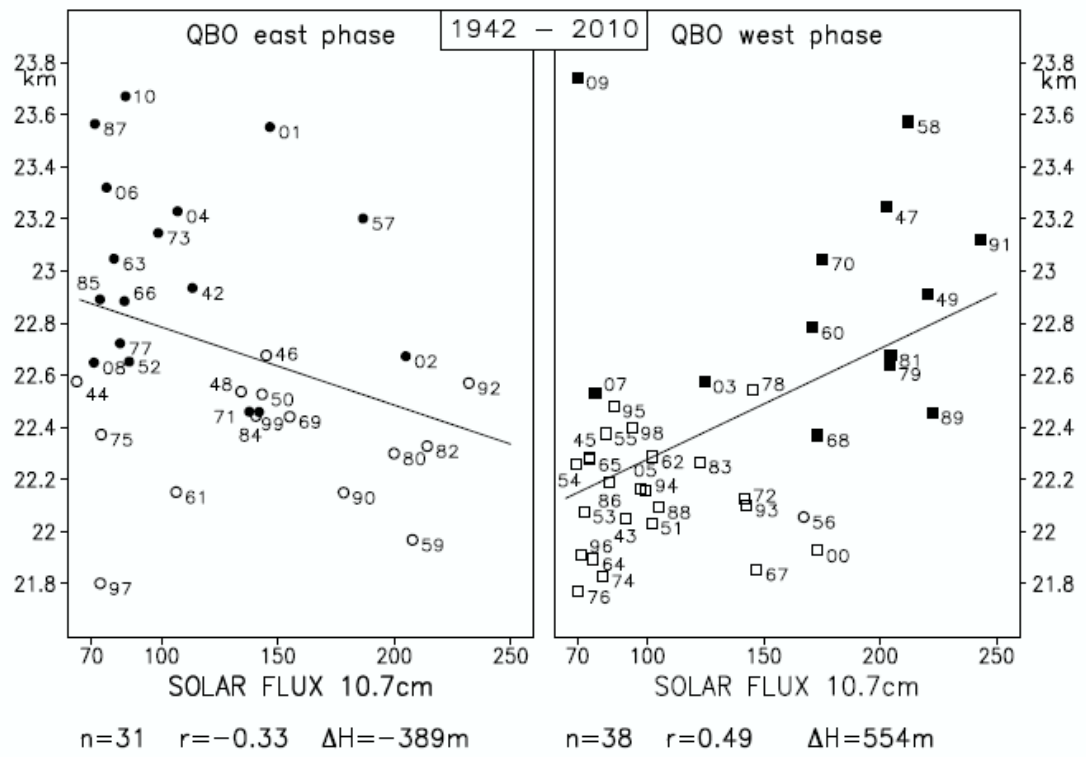
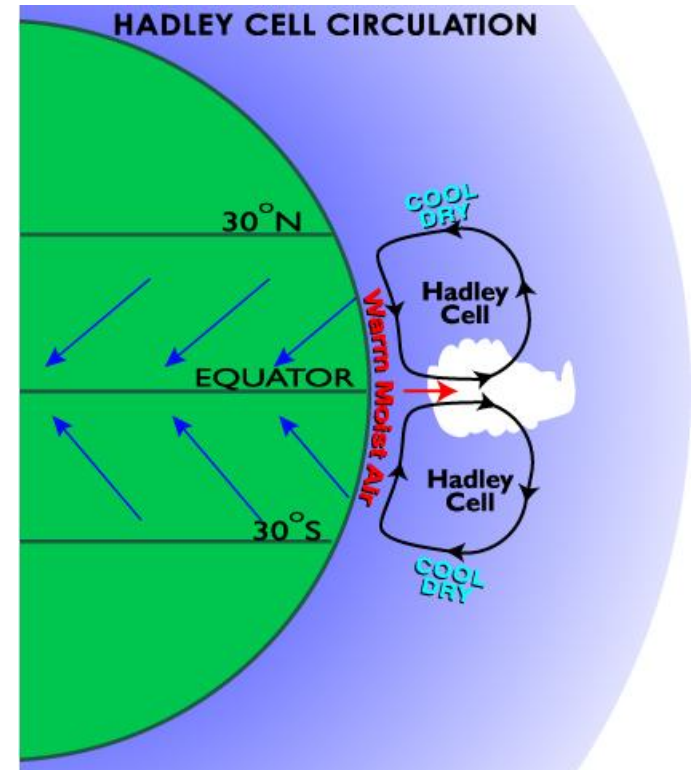


Figure 13. Scatter diagrams of the monthly mean 30 hPa geopotential heights (geopotential kilometers) in February at the North Pole (1942–2010), plotted against the 10.7 cm solar flux in solar flux units ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). (left) Years in the east phase of the quasi-biennial oscillation (QBO) ($n = 31$). (right) Years in the west phase ($n = 38$). The numbers indicate the respective years, solid symbols indicate major midwinter warmings, r is the correlation coefficient, and ΔH gives the mean difference of the heights (geopotential meters) between solar maxima and minima (minima are defined by solar flux values below 100). Updated from Labitzke et al. [2006], <http://www.borntraeger-cramer.de>.

Wpływ aktywność słonecznej na troposferę w tropikach

- Zmiany temperatury w górnej troposferze północnej półkuli sięgają 0.2-0.4K
- Zauważono silniejszą cyrkulację Handleya w czasie wysokiej aktywności słonecznej oraz przesuwanie się na północ tropikalnego prądu strumieniowego.



Intensyfikacja cyrkulacji Hadleya

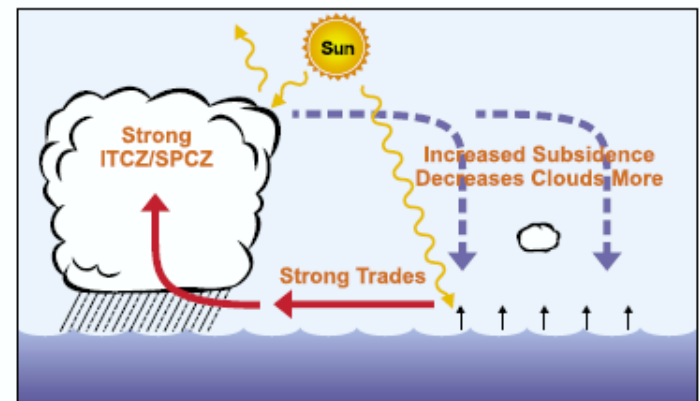
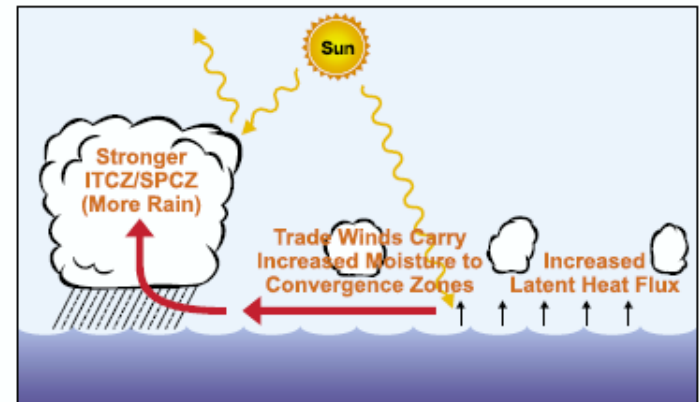
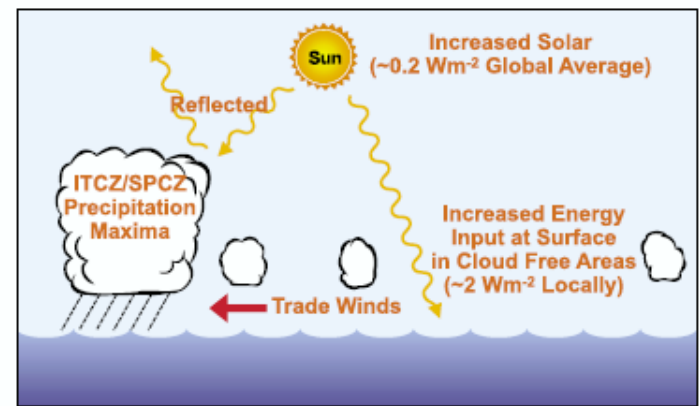
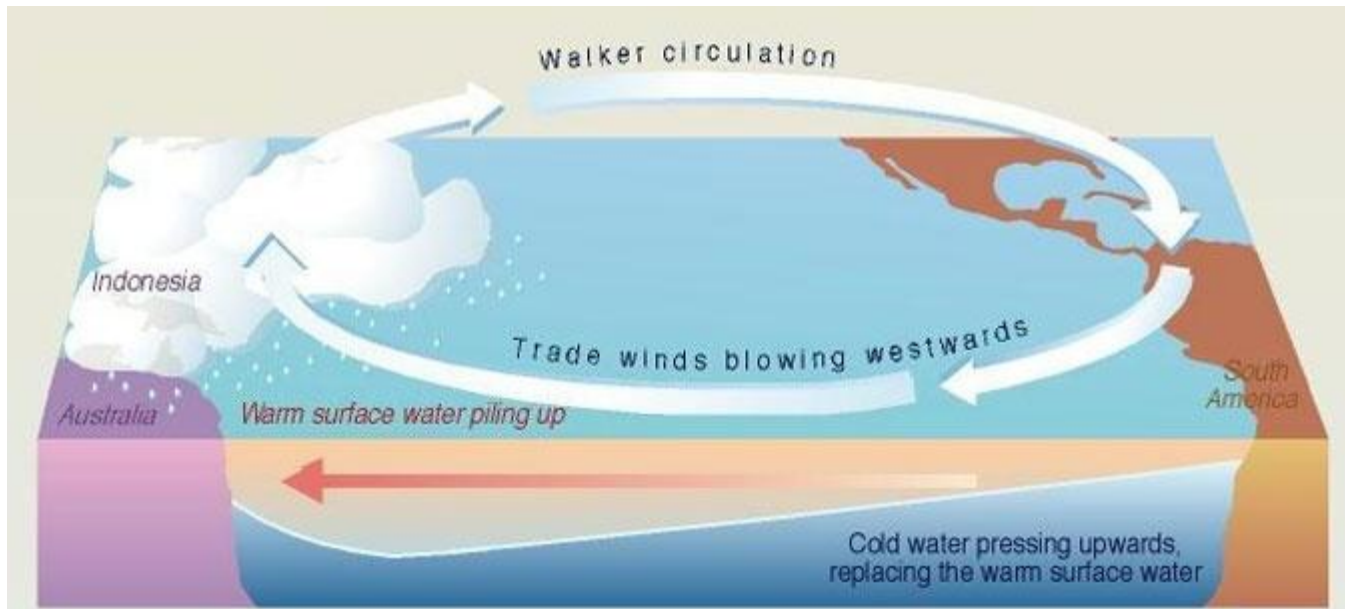


Figure 22. Schematic diagram showing processes involved with the Pacific coupled air-sea response coincident with peak years of solar forcing [after Meehl *et al.*, 2008].

Cyrkulacja Walkera

- Ostatnie badania pokazują również intensyfikację cyrkulacji Walkera podczas wysokiej aktywności słonecznej.
- Tym samym cyrkulacja Hadleya na zachodnim Pacyfiku zwiększa się, zaś na wschodnim słabnie podczas maksimum aktywności słonecznej.



Anomalie temperatury i opadów podczas maksimum aktywności słonecznej

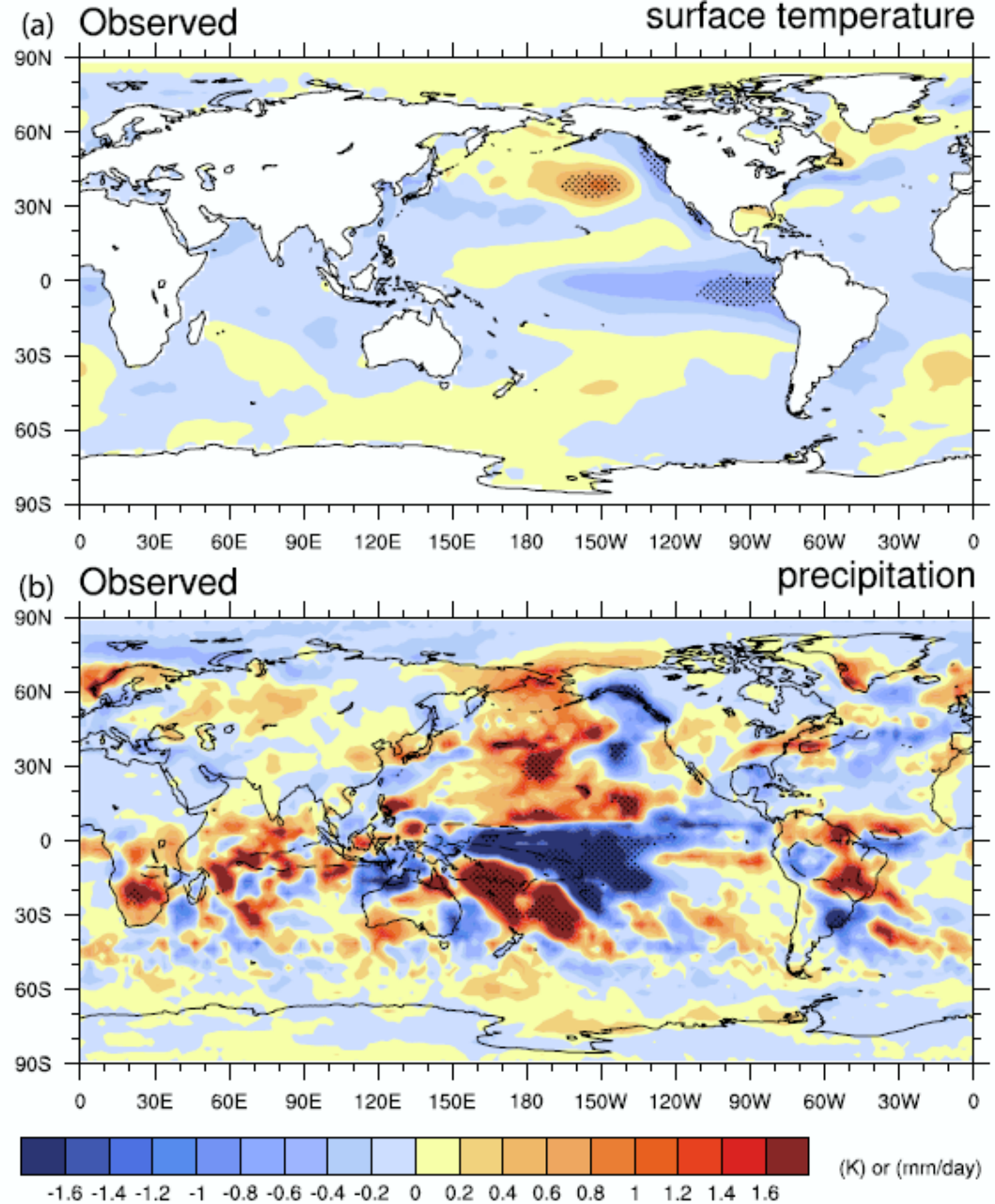


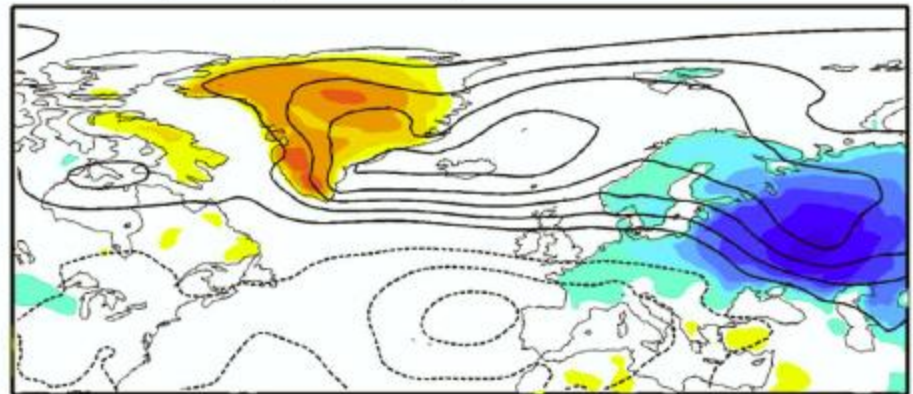
Figure 16. (a) Composite average sea surface temperature anomaly in the Pacific sector for December, January, and February (DJF) for 11 peak solar years ($^{\circ}\text{C}$). (b) Same as Figure 16a but for composite average surface precipitation anomaly from three available peak solar years (mm s^{-1}). Adapted from *Meehl et al.* [2009]. Reprinted with permission from AAAS.

Zmiany w szerokościach umiarkowanych i wysokich

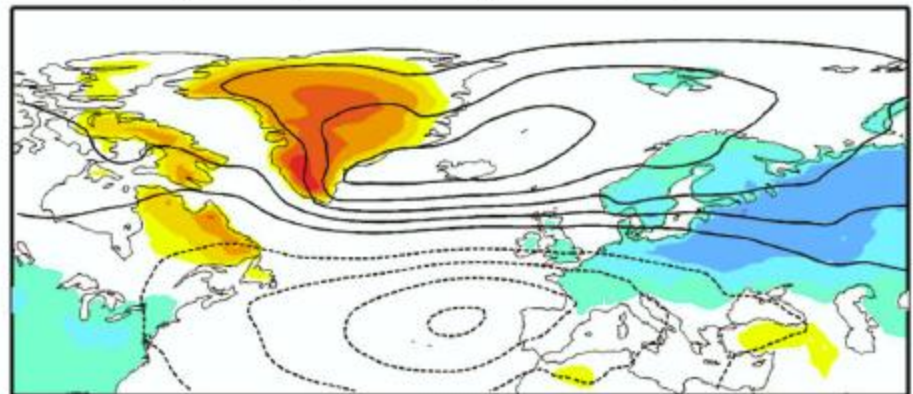
- (a) zmiany ciśnienia atmosferycznego (linie) oraz temperatury (skala kolorów) (b) te same anomalie związane z NOA (oscylacją północnoatlantycką)

WOOLLINGS ET AL.: SOLAR VARIABILITY

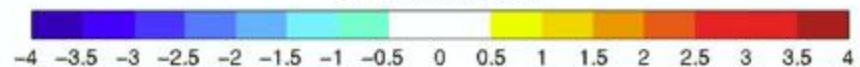
a) MSLP (CTRS 1HPA) SOLAR: LOW - HIGH



b) MSLP (CTRS 1HPA) DJF NAO: -1 STD



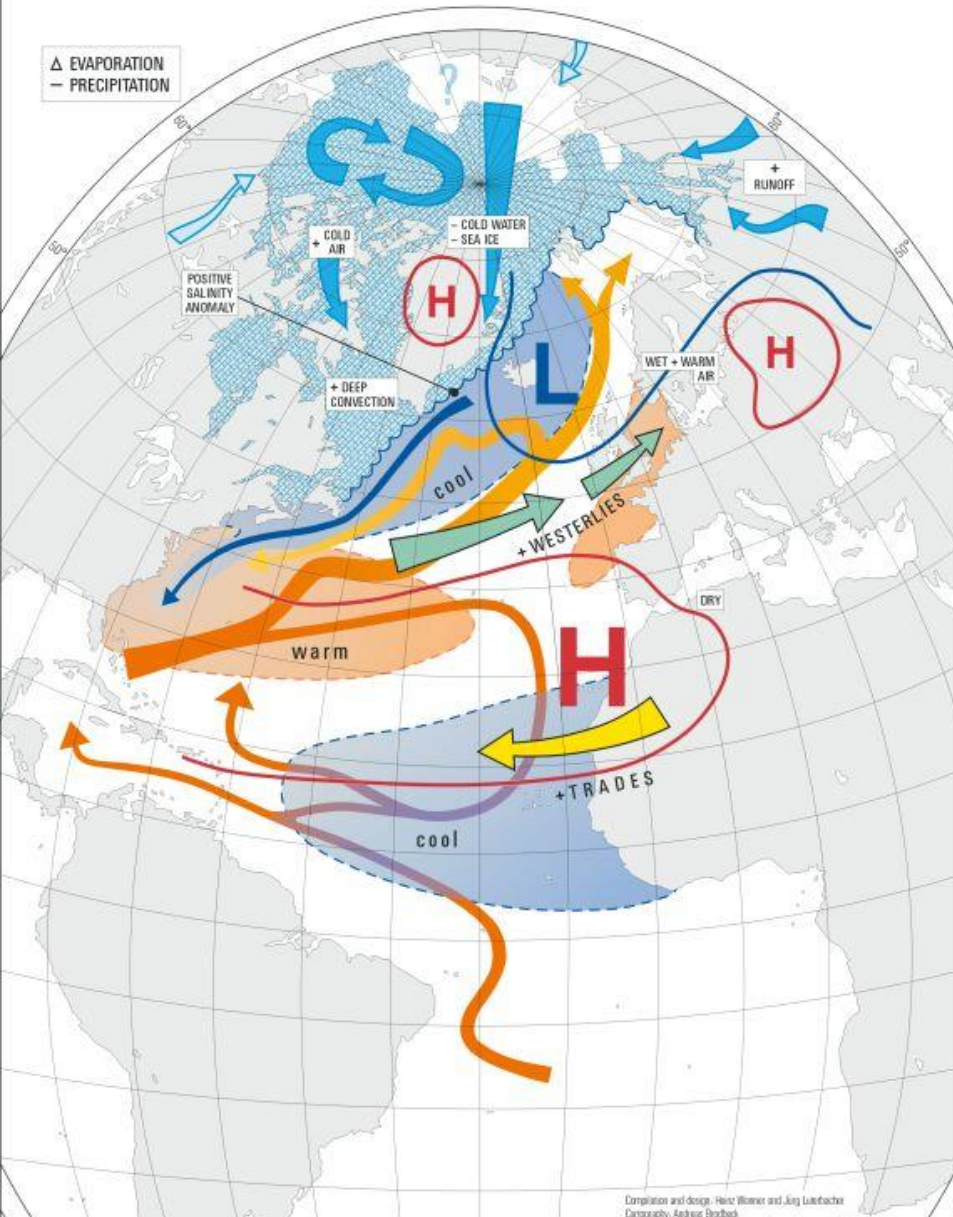
2m Temperature (K)



Oscylacja północno atlantycka NAO

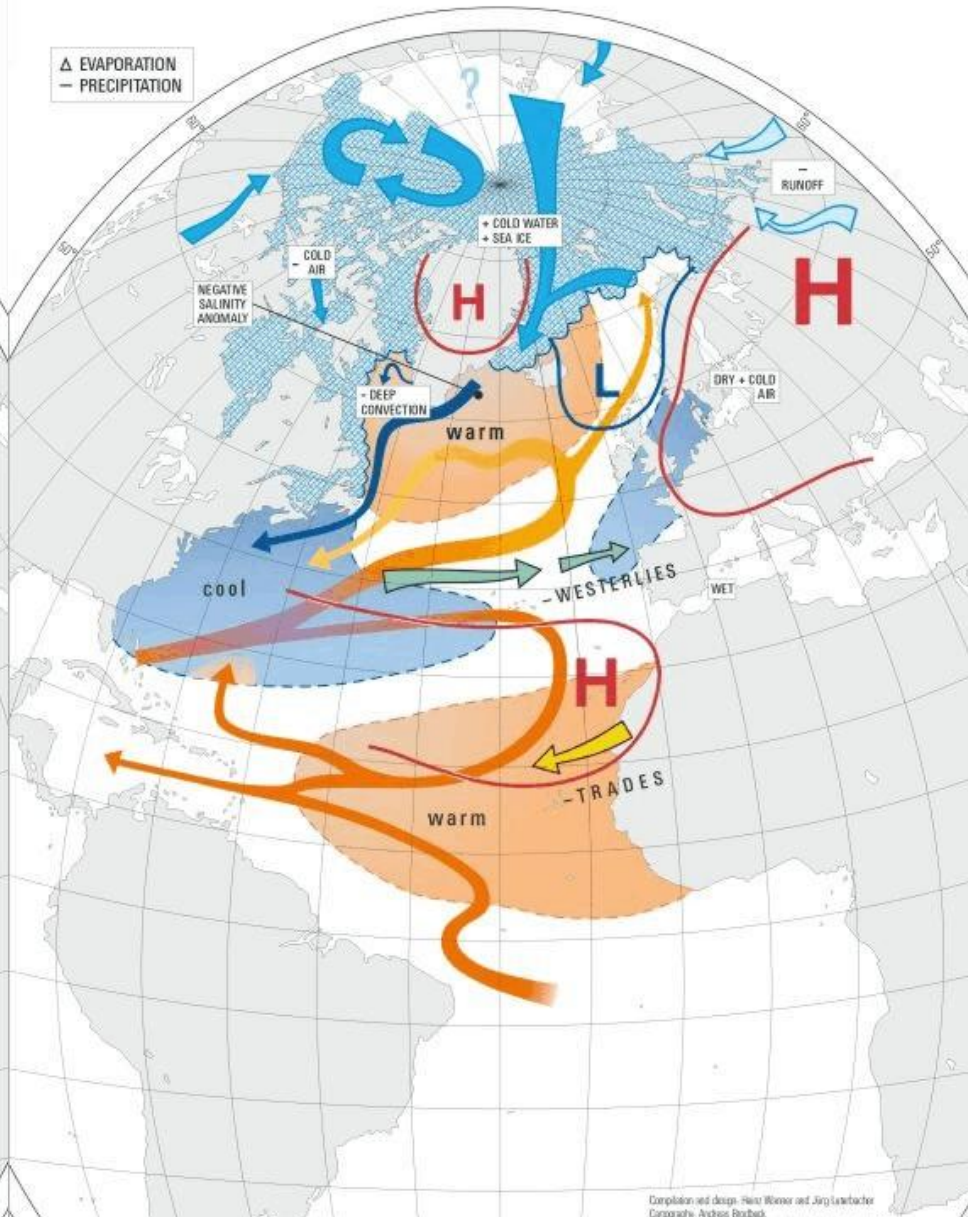
NAO +

Δ EVAPORATION
- PRECIPITATION



NAO -

Δ EVAPORATION
- PRECIPITATION



Związek aktywności słonecznej z indeksem NAO

L20805

WOOLLINGS ET AL.: SOLAR VARIABILITY

L20805

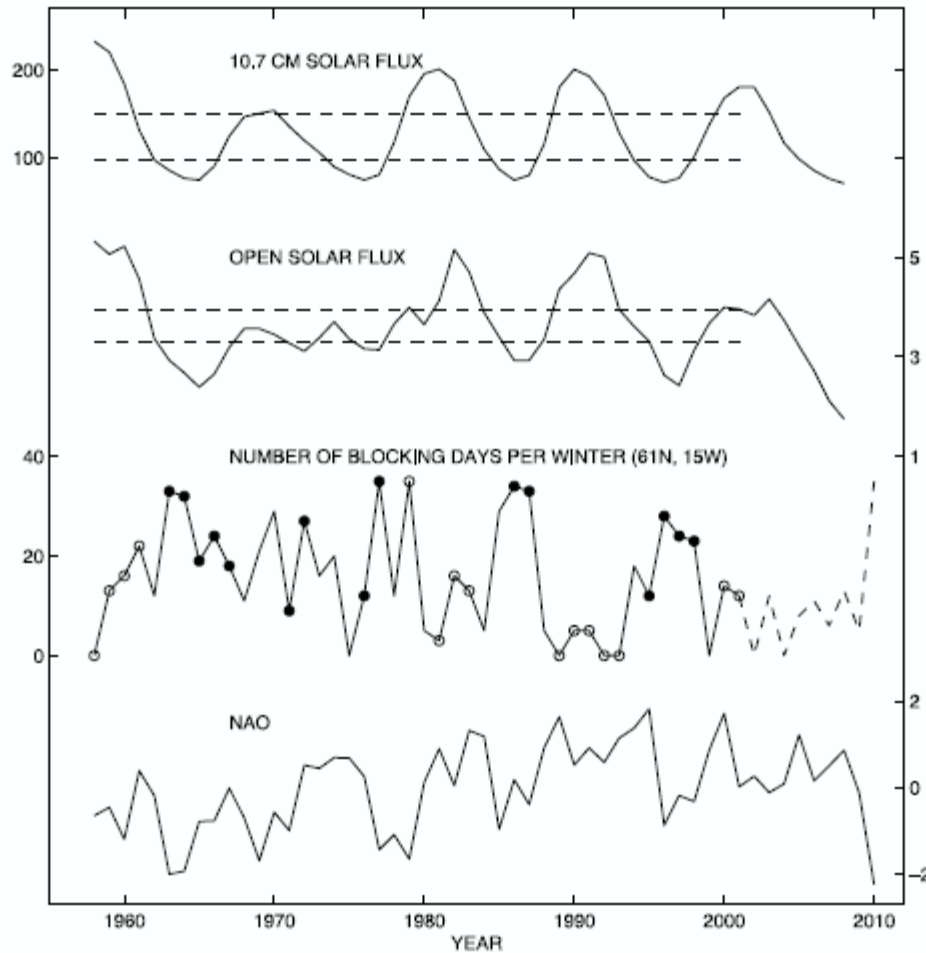


Figure 1. Time series of winter $F_{10.7}$ and F_s , with horizontal dashed lines showing the terciles over the ERA-40 period. Also shown is the DJF NAO index from CPC and a simple count of the number of blocking days per winter at the location marked in Figure 4. Winters in the high-solar tercile according to the F_s are marked with open circles and those in the low-solar tercile with filled circles. The dashed line shows the extension of the series to winter 2009/10 using ERA-Interim.

Symulacje klimatyczne

- Symulacje klimatyczne odpowiedzi systemu na zaburzenie związane ze wzrostem promieniowania słonecznego ukazują znaczące ocieplenie w obszarach polarnych pół. N i ochłodzenie w rejonach polarnych pół. S.
- Prawdopodobnie dość skomplikowany mechanizm sprzężeń zwrotnych odpowiada za taki stan rzeczy.
- Symulacje modelami klimatu pokazują oddziaływanie aktywności słonecznej na indeks NAO.
- NOAA odpowiada na zaburzenie po bardzo długim okresie czasu (ok. 20-50 lat).

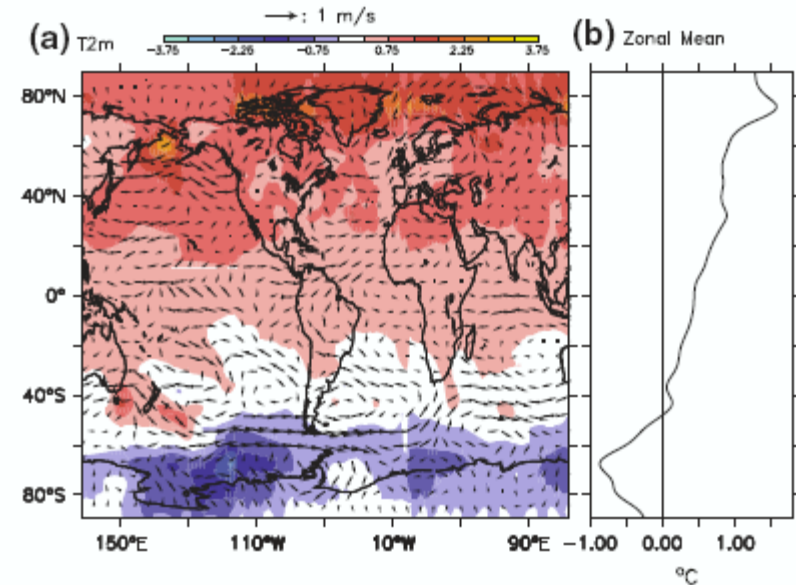


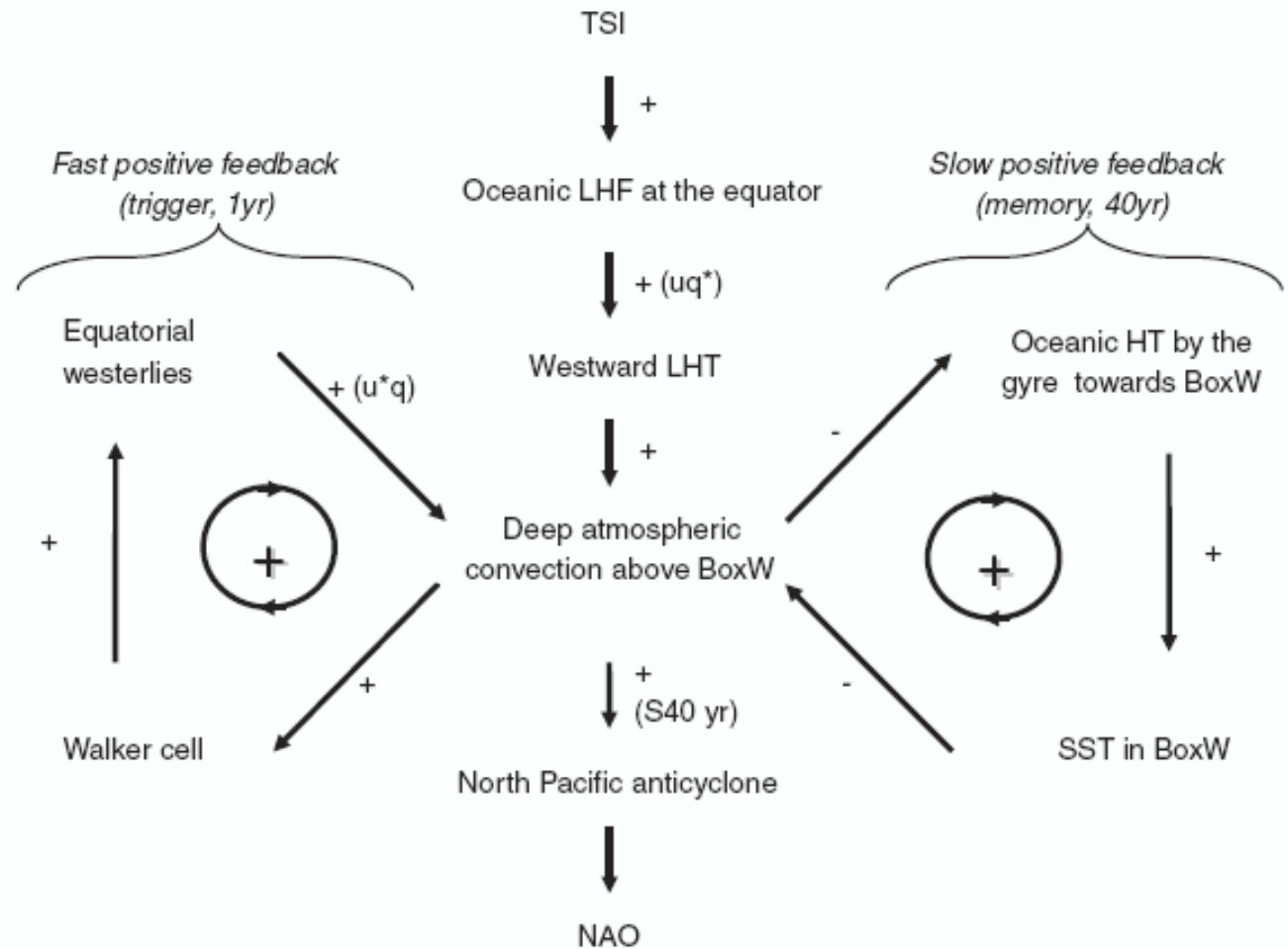
Fig. 3 a Regression on the solar forcing variations (Fig. 1a) of the surface atmospheric temperature at 2 m (in $^{\circ}\text{C}/\text{W m}^{-2}$) and surface wind speed (in $\text{m s}^{-1} \text{W m}^{-2}$) for the period 1001–1860. All series have been low-pass filtered with a cutoff value of 13 years. Values statistically significant at the 90% level are represented by the colored shading. The contour interval is 0.5°C . b Zonal mean of the surface atmospheric temperature represented in a

Propagacja długookresowych zaburzeń - hipoteza

1. Wzrost aktywność słonecznej niemal natychmiastowo zwiększa cyrkulacje Walkera i konwekcje w północnej ITCZ
2. Powolny transport anomalnie ciepłych wód tropikalnych oceanu spokojnego poprzez cyrkulację podzwrotnikowe do północnego Pacyfiku w okresie kilku dziesięcioleci.
3. Po ustąpieniu zaburzenia słonecznego anomalia SST zanika w rejonie równika po około 30-40 latach
4. Co prowadzi do południkowego gradientu SST w tropikach i przesuwanie się ITCZ na północ.
5. Prowadzi to do wzrostu konwekcji w północnych rejonie tropikalnym oceanu spokojnego co powoduje dodatnią anomalię ciśnienia na północnym Pacyfiku.
6. Ta anomalia propaguje się za pośrednictwem prądu strumieniowego na ocean Atlantycki powodując ok. 40 letnie opóźnienie w stosunku do zaburzenia słonecznego.

Mechanizmy oddziaływania Słońca na NOA

Fig. 11 Summary scheme of the mechanisms implied in the forcing of a positive NAO 40 years after a low frequency solar variations. “BoxW” is defined as the box over the Pacific ocean between 5–20°N and 140–220°E. “ u ” represents zonal wind and q humidity. The stars stands for anomalies as compared to the mean. The sign associated with each array represents the sign for the influence of the considered process. *LHF* means latent heat flux, *LHT* latent heat transport, *HT* heat transport and *S40* significant after 40 years



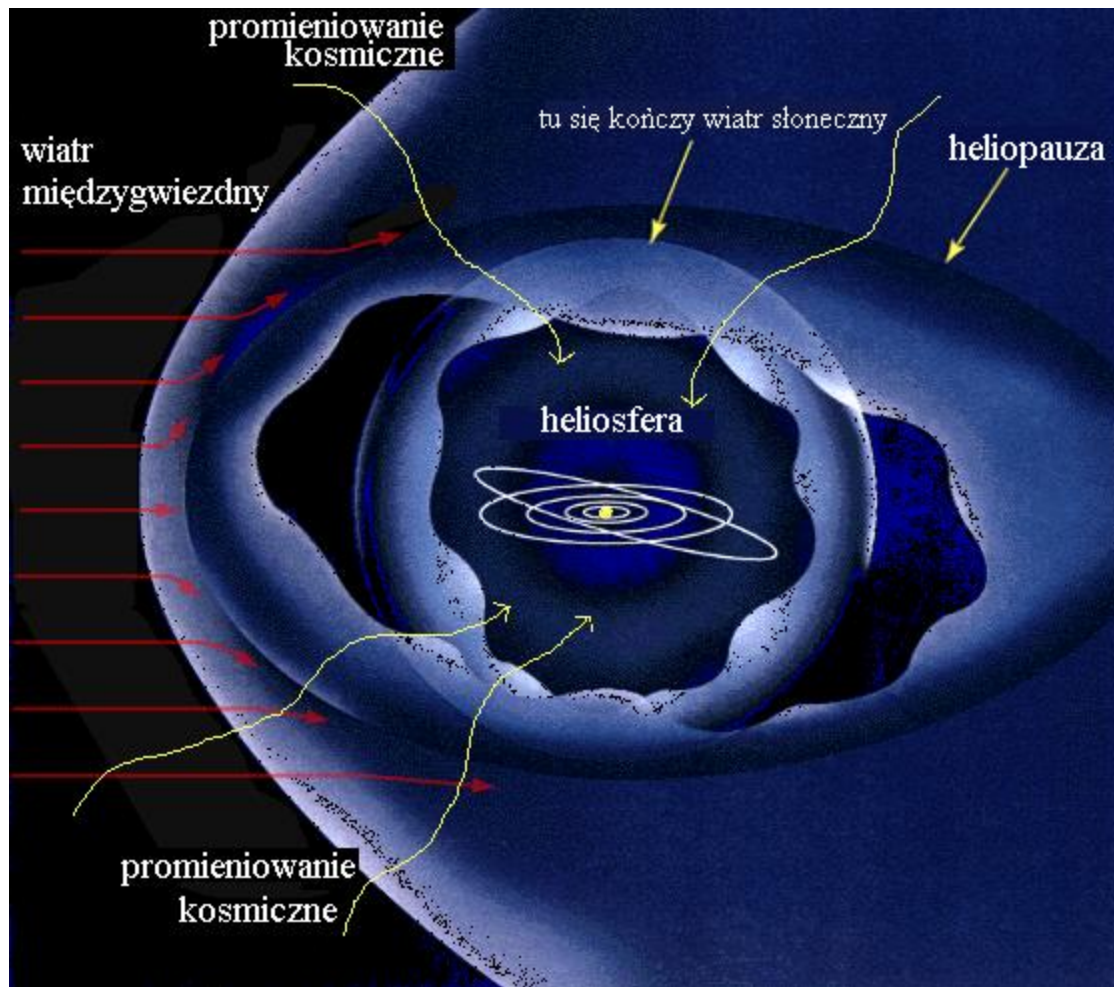
Wpływ wiatru słonecznego i promieniowania kosmicznego

Wiatr słoneczny powoduje:

- jonizację tlenu i azotu w górnej atmosferze.
- powstające cząsteczki NO_x przyczyniają się do niszczenia warstwy ozonowej

Promieniowanie kosmiczne:

- hipoteza wpływu na zachmurzenie niskich chmur



Hipoteza oddziaływania promieniowania kosmicznego na chmury

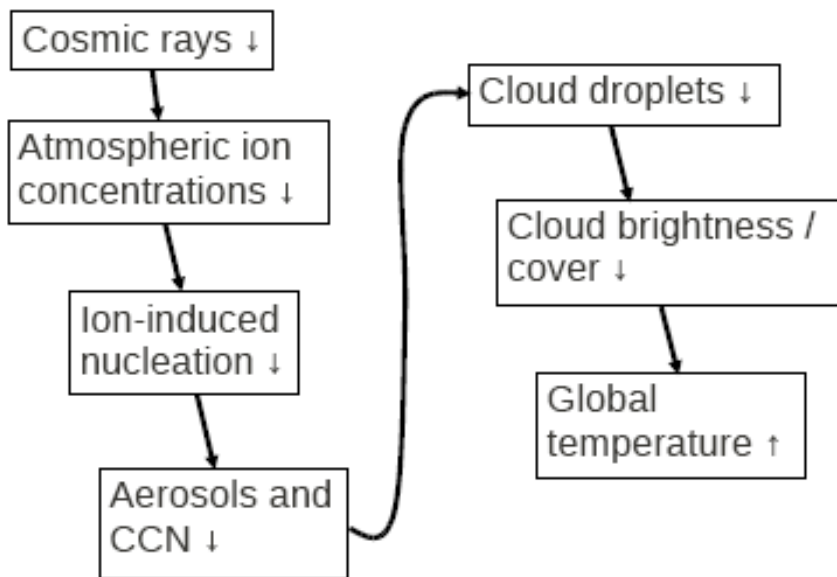


Fig. 1. The ion-aerosol clear-sky mechanism showing how cloud cover could be reduced and temperature could be increased from a decrease in cosmic rays.

E. J. Snow-Kropla et al. 2011

- promieniowanie kosmiczne powoduje jonizację, która przyczynia się to wzrostu nukleacji aerozolu
- część aerozolu stanowi jądra kondensacji CCN, które tworzą chmury
- teoretycznie, wzrost promieniowania kosmicznego może prowadzić do wzrostu zachmurzenia
- nie ma co do tego konsensusu naukowego. Mechanizm ten jest słabo poznany.

Wg wielu naukowców badania Marsha i Svensmarka [2003] nie mają potwierdzenia w pomiarach.

Antykorelacja promieniowania kosmicznego z promieniowaniem słonecznym

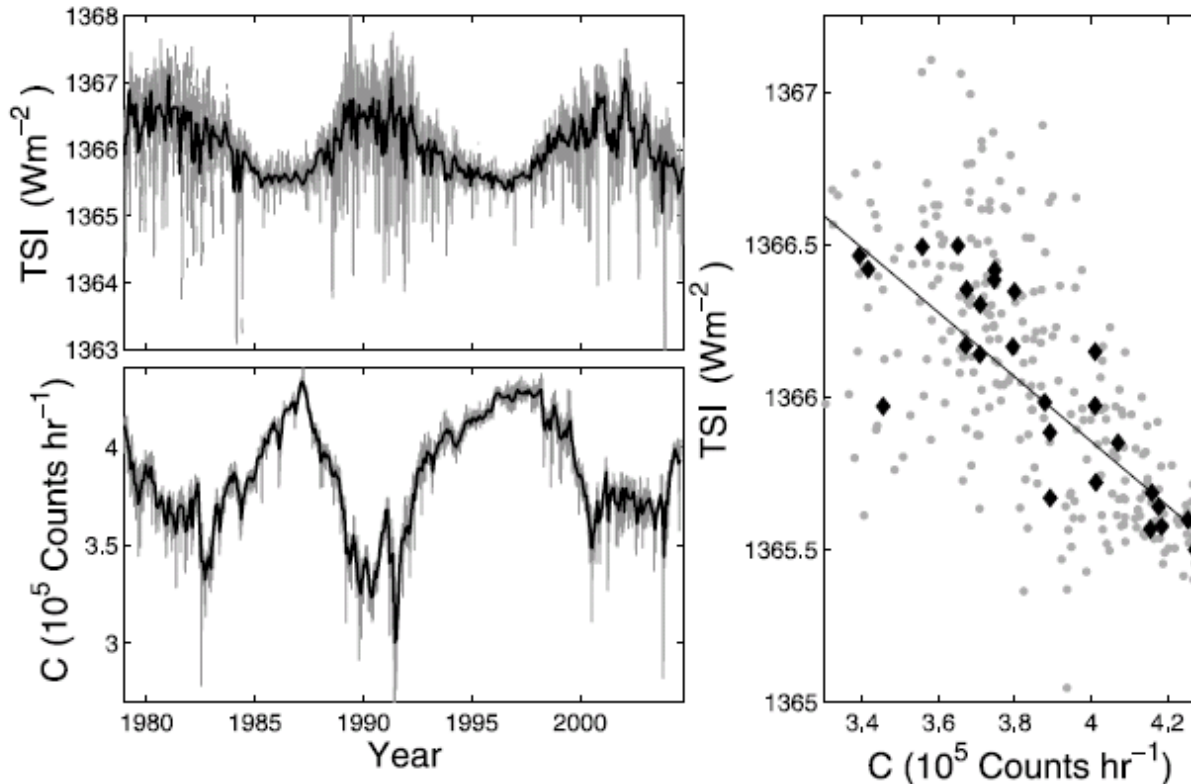


Figure 9. The anticorrelation of GCR fluxes with the TSI since 1978. Variations of (top left) PMOD TSI composite and (bottom left) counts, C , detected by the neutron monitor at Climax. The grey line indicates daily values, and the black line indicates the monthly means. (right) Scatterplot of TSI as a function of C . Grey points are monthly means; black diamonds are annual means. The best fit linear regression to the annual data is also plotted. The correlation coefficients (and significance levels) are -0.68 (99.99%) and -0.85 (91.5%) for monthly and annual data, respectively (reprinted from *Lockwood* [2006] with kind permission of Springer Science and Business Media).

Korelacja zachmurzenia z promieniowaniem kosmicznym

Błędy w danych Marsh i Svensmarka z 2003

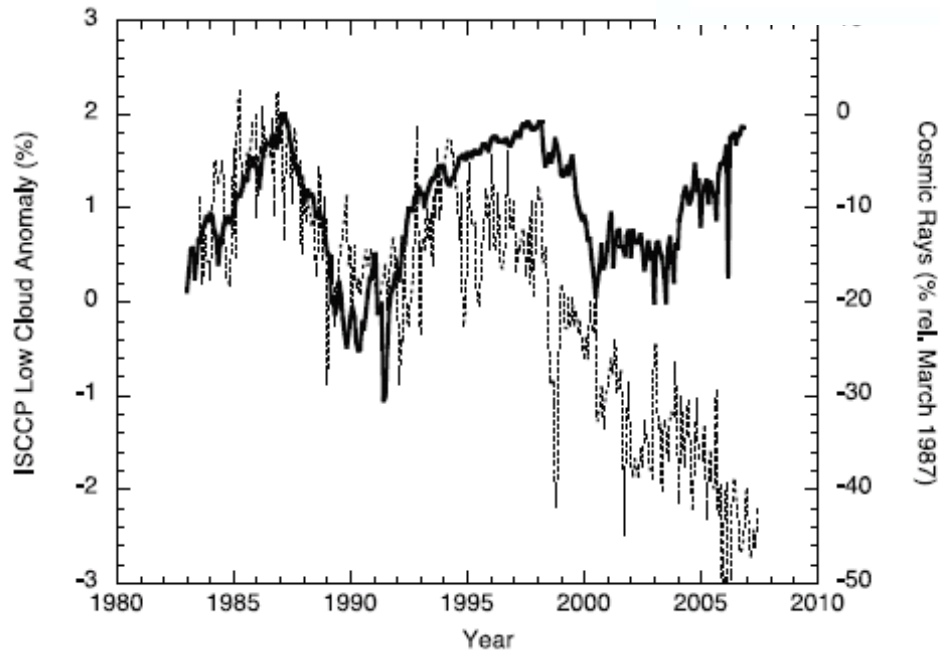
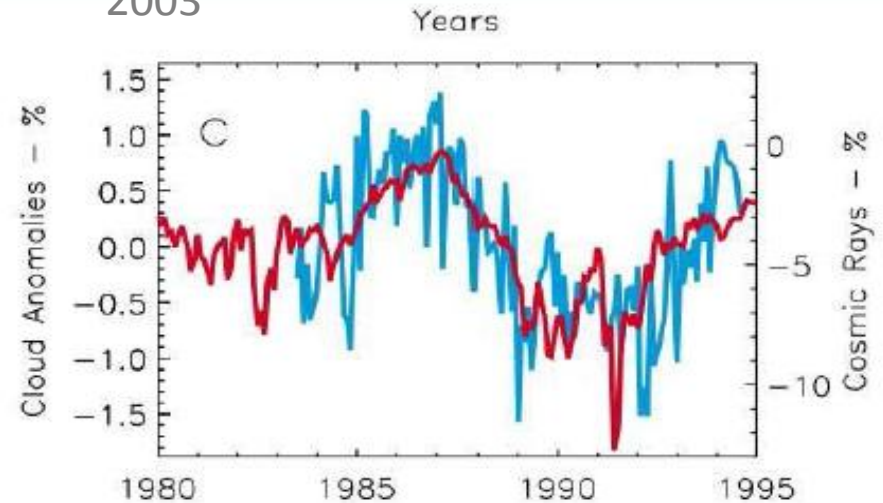


Figure 15. Monthly averages of ISCCP D2 IR global low cloud amount derived from a combination of polar orbiting and geostationary satellites (thin dashed line) and cosmic rays (thick solid line). The low cloud amount has not been adjusted to allow for a possible intercalibration problem after 1994 suggested by *Marsh and Svensmark* [2003].

Oddziaływanie słońca na system klimatyczny

Podsumowanie

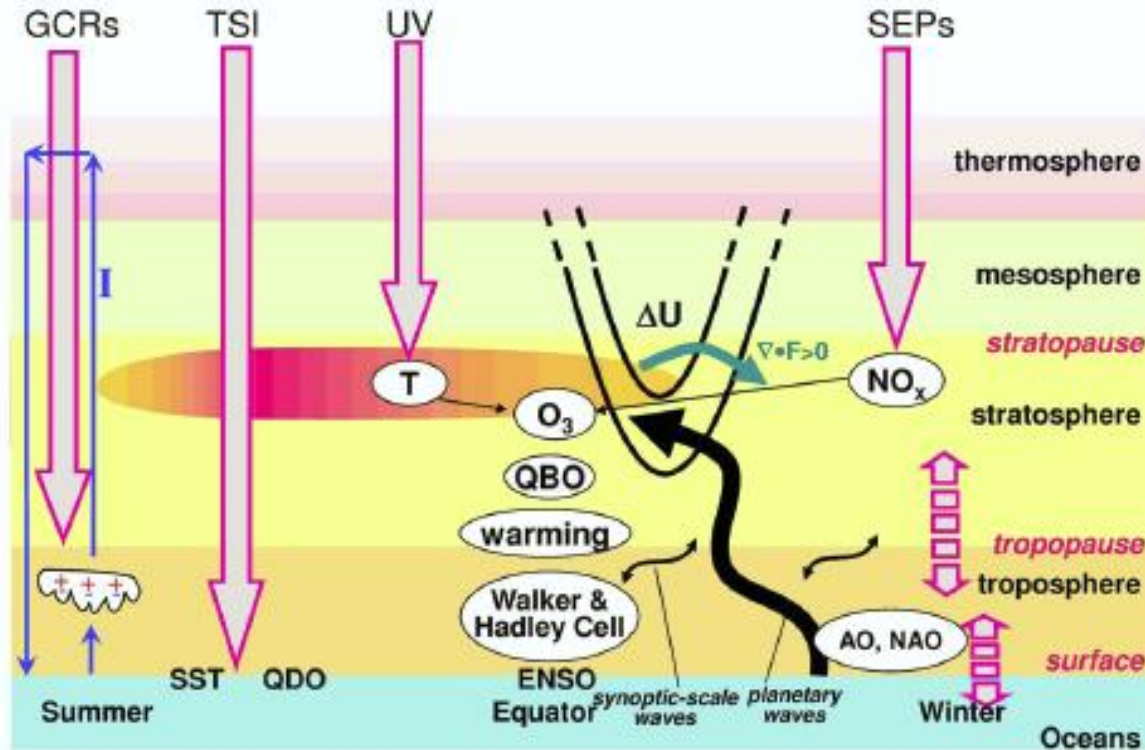


Figure 21. Schematic diagram of solar influence on climate based on *Kodera and Kuroda* [2002]. Shown are the direct and indirect effects through solar irradiance changes (TSI and UV) with respect to S_{max} as well as corpuscular radiation effects (energetic particles and GCRs). The two dashed arrows denote the coupling between the stratosphere and the troposphere and the coupling between the ocean and the atmosphere.