

Слънчеви петна и слънчев цикъл

д-р Росица Митева

ИКИТ-БАН

rmiteva@space.bas.bg

Наблюдения: с просто око



най-ранна рисунка на слънчеви петна е в The Chronicle of John of Worcester (medieval England) <https://link.springer.com/article/10.1007/s41116-017-0006-9>

Въпреки, че наблюдения на слънчеви петна са докладвани от Theophrastus of Athens (BC 400) и в Китай и Корея повече от хилядолетие преди това, не са запазени рисунки (има едва от AD 1400).

Двойка слънчеви петна - сянка и полусянка - наблюдавани от монаси на 8 декември 1128 (Worcester, England).

От латински "...from morning to evening, appeared something like two black circles within the disk of the Sun, the one in the upper part being bigger, the other in the lower part smaller. As shown on the drawing."

Наблюдения: с наземни телескопи

1611: Johannes Fabricius (Germany)

Първи публикува наблюденията си в *De Maculis in Sole Observatis* ("On the Spots Observed in the Sun"), но остават незабелязани от съвременниците му.

<http://galileo.rice.edu/sci/fabricius.html>

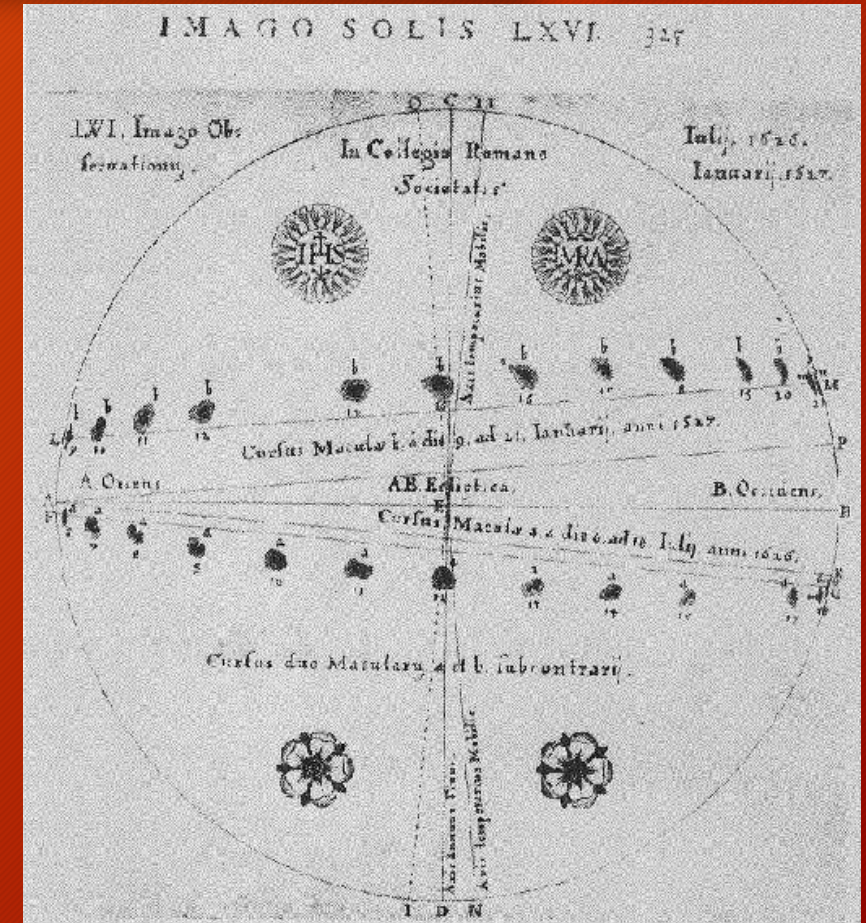
1612: Christoph Scheiner (Germany)

Публикува книгата *Tres Epistolae de Maculis Solaribus Scriptae ad Marcum Welserum* ("Three Letters on Solar Spots written to Marc Welser").

Предполага, че петната са спътници около Слънцето.

<http://galileo.rice.edu/sci/scheiner.html>

В известната си книга по оптика, '*Rosa Ursina*', Scheiner публикува много детайлни наблюдения на слънчеви петна и вече не ги описва като спътници като по този въпрос се съгласява с Галилео. Книгата става основен източник при наблюдения на слънчеви петна.



Наблюдения: с наземни телескопи

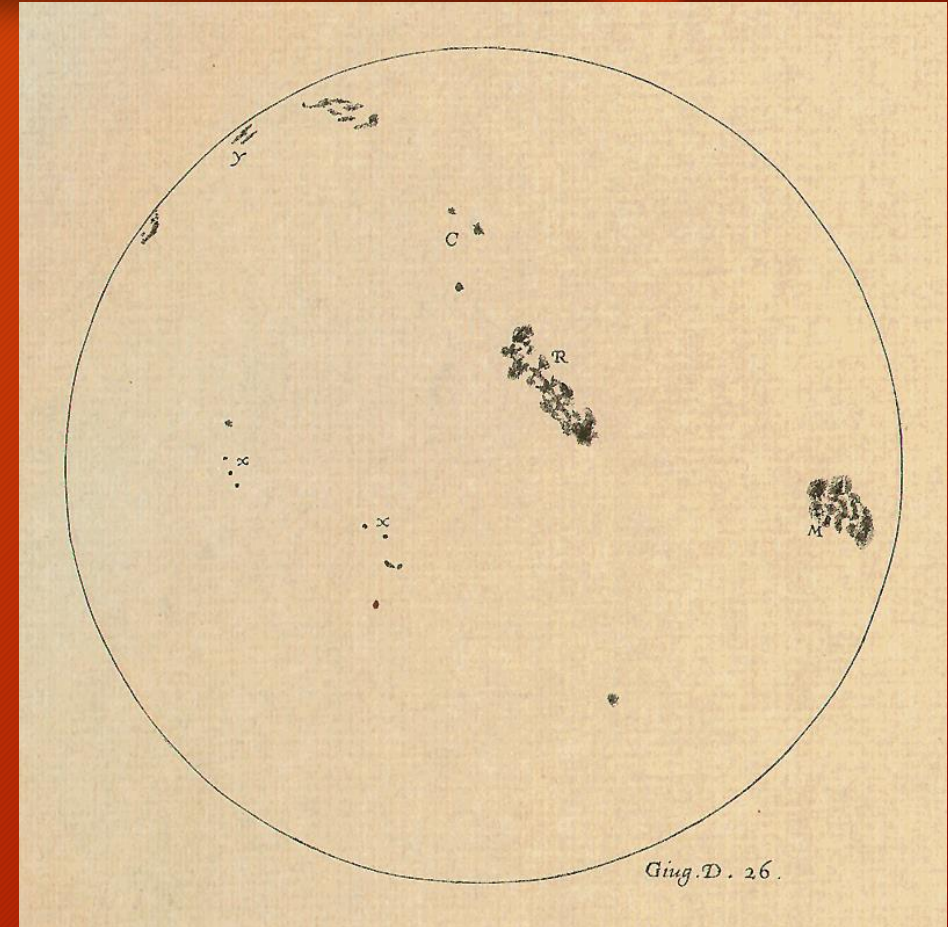
1610: Galileo

Наблюдения на слънчеви петна

1613: публикува рисунки на слънчеви петна в книгата си *'Istoria e Dimostrazioni intorno alle Macchie Solari'* (Letters on Sunspots to Marc Welser)

<http://galileo.rice.edu/sci/observations/sunspots.html>

<https://sunearthday.nasa.gov/2006/locations/galileo.php>



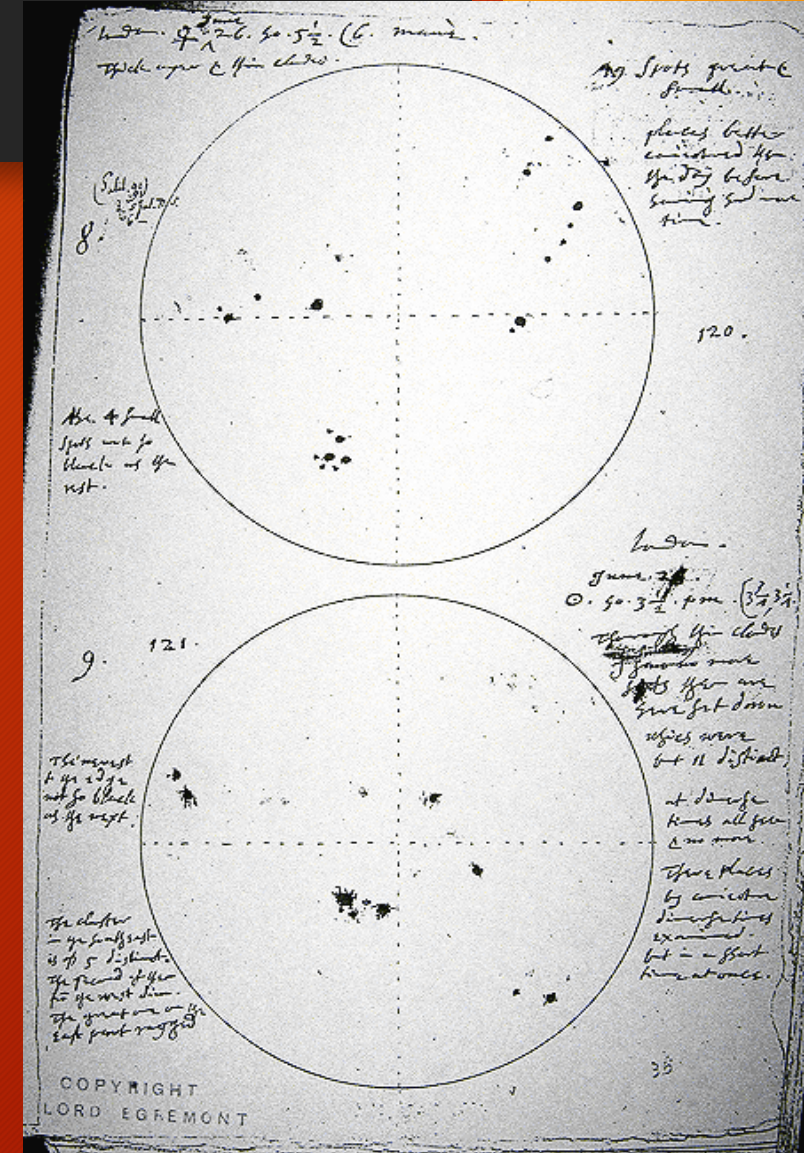
http://galileo.rice.edu/sci/observations/sunspot_drawings.html
26/06/1613

Наблюдения: с наземни телескопи

Thomas Harriot (England)

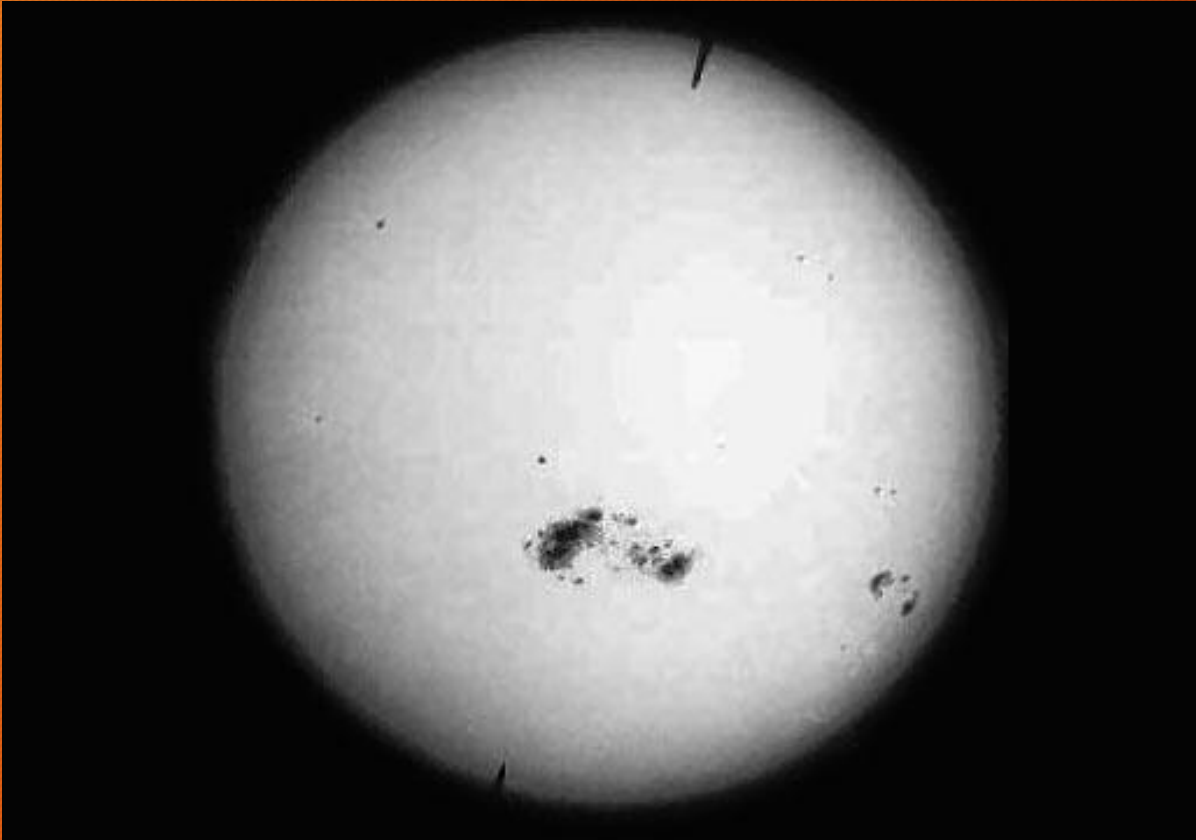
Прави наблюдения на слънчеви петна през декември 1610.
Няма публикувани наблюдения, освен рисунките.

<http://galileo.rice.edu/sci/harriot.html>



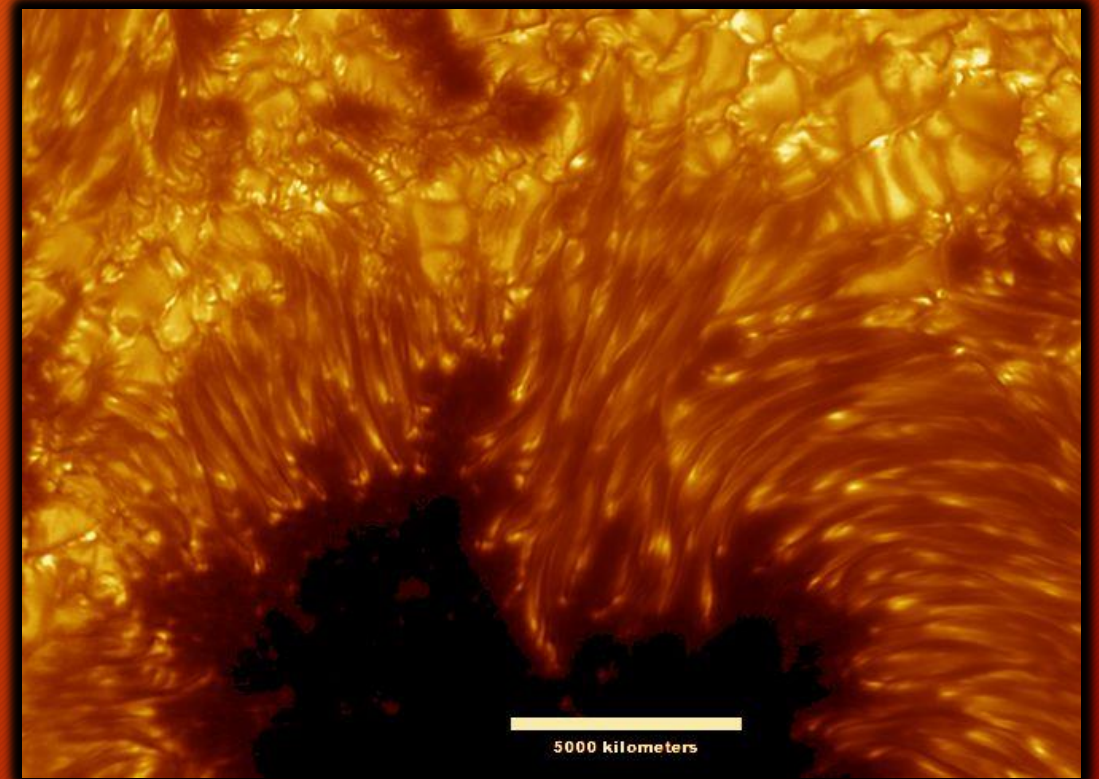
http://galileo.rice.edu/images/things/harriot_ss1.gif

Наблюдения: с наземни телескопи



07-04-1947

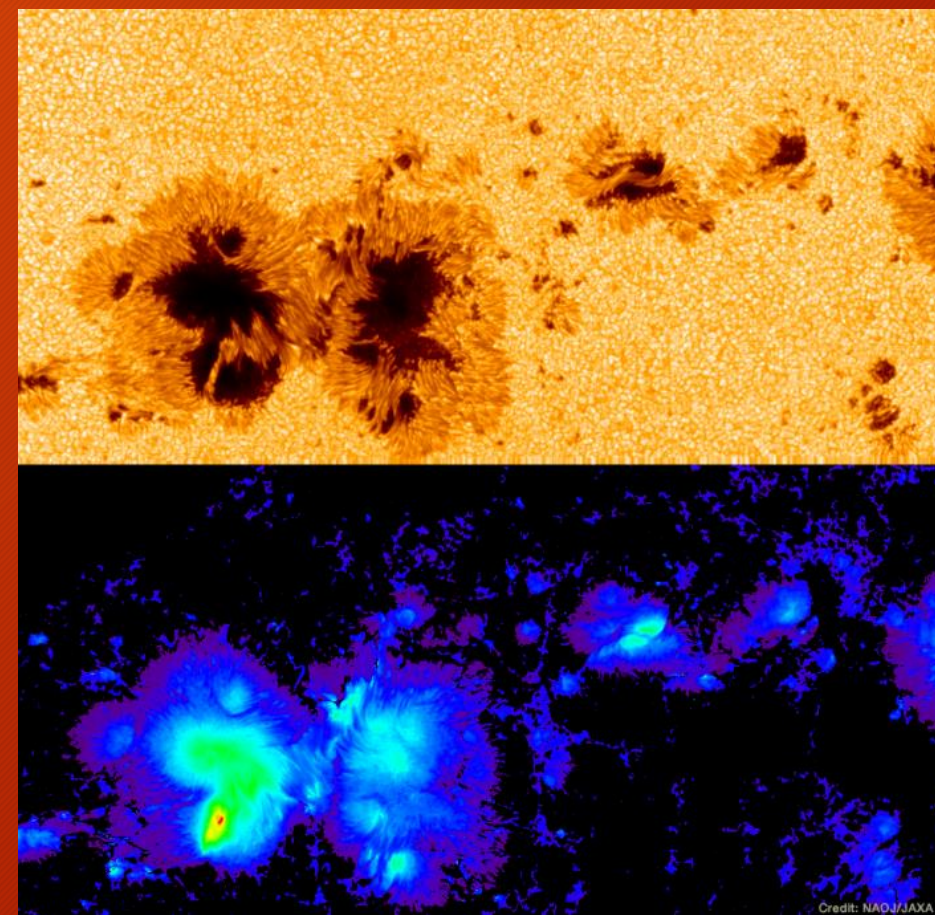
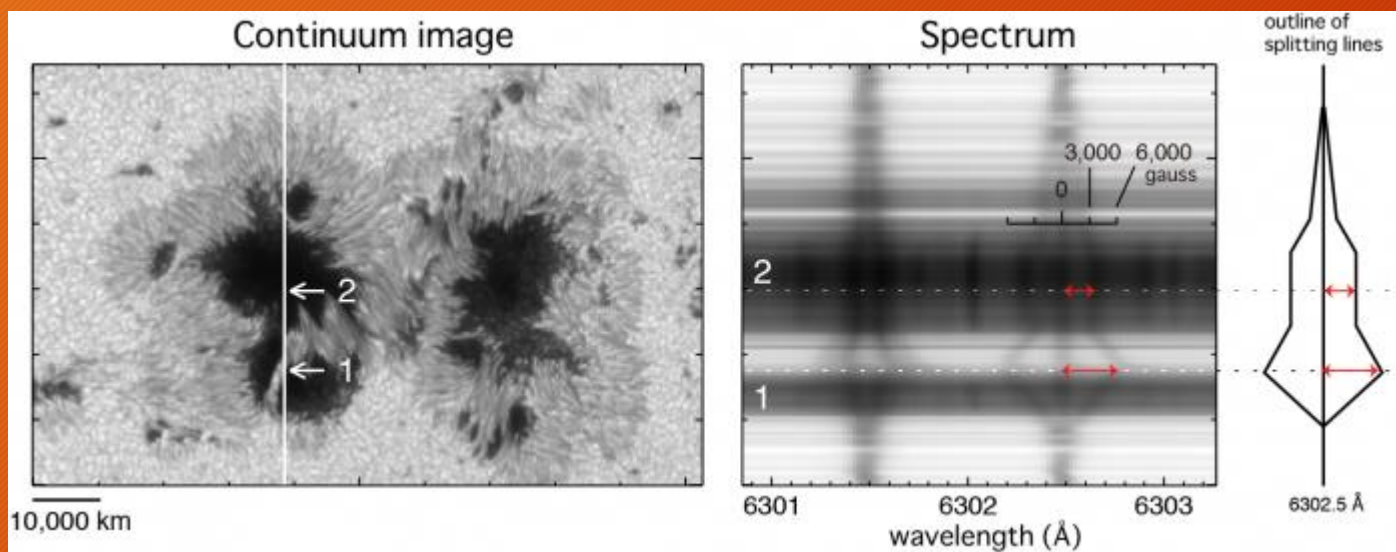
<https://sunearthday.gsfc.nasa.gov/2006/locations/firstdrawing.php>



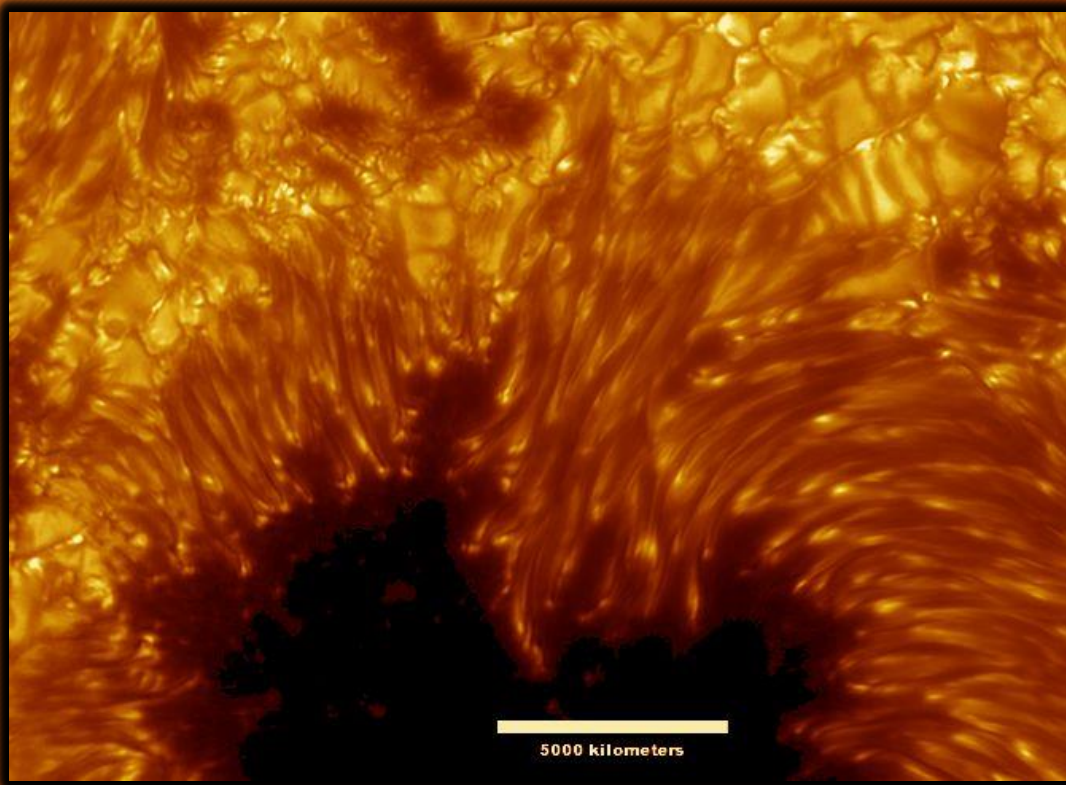
1-m Swedish Telescope, 15-07-2002, Royal Swedish Academy of Sciences, <http://www.isf.astro.su.se/>
<https://apod.nasa.gov/apod/ap110918.html>

Наблюдения: от спътници

Измерване на фотосферно магнитно поле (Hinode)



Наблюдателни характеристики



1-m Swedish Telescope, 15 Jul 2002, Royal Swedish Academy of Sciences, <http://www.isf.astro.su.se/>
<https://apod.nasa.gov/apod/ap110918.html>

Поява: на средни ширини в началото на всеки нов слънчев цикъл
Продължителност: 50% до 2 дни, 90% до 11 дни
Формиране: между отделни свръхгранули, по-често на групи или двойки от водещо и следващо петно

Пора [pore]

без полусянка, 1“-5“, 20-40% фотосферна светимост, >1500 G, няколко часа (изчезва или формира слънчево петно)

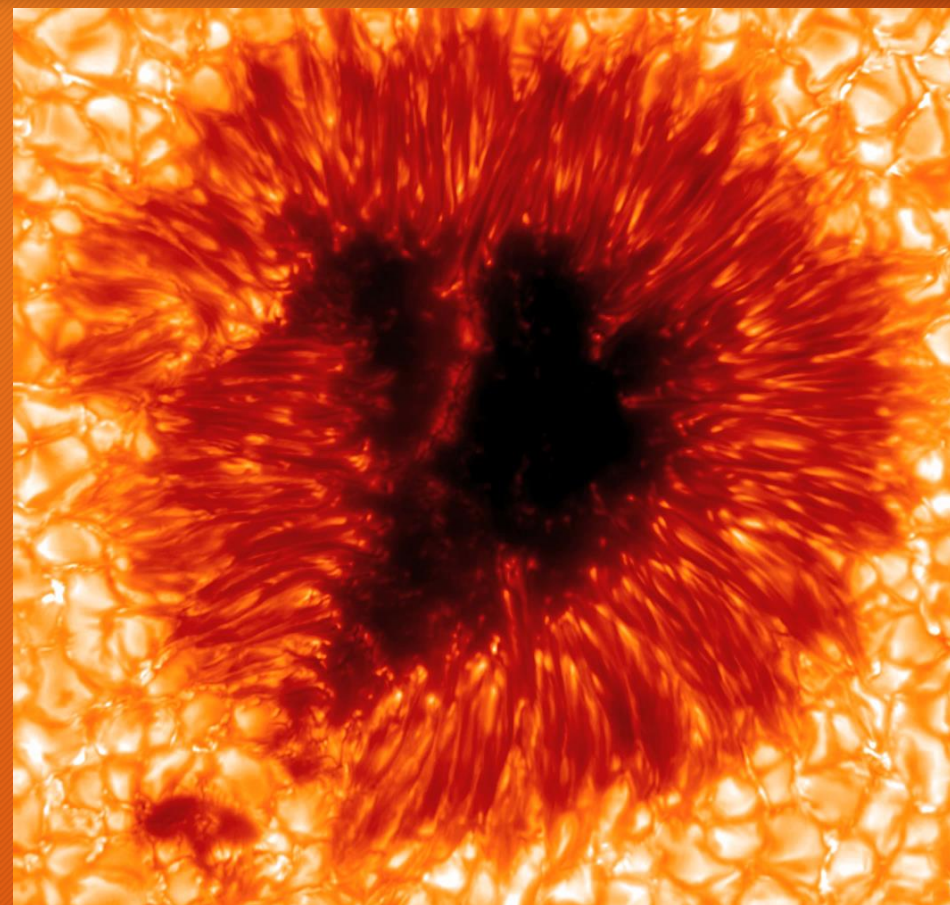
Слънчево петно: сянка [umbra]

среден диаметър 10000 km, магнитно поле до 4000 G (2000-3000 G), ~10% светимост, $T \sim 3300$ K (следва от измерената светимост)

Слънчево петно: полусянка [penumbra]

Радиални филаменти с дължина 1“-3“ и ширина 0.2“-0.3“, времетраене 40-45 min, движение към фотосферата 7-10 km/s, хоризонтално подредени, следват магнитните силови линии с наклон 25-30° към периферията на полусянката
Междинни стойности на магнитно поле, температура и светимост

Наблюдателни характеристики



1-m Swedish Telescope, 23-05-2010; 3954 Å
Vasco Manuel de Jorge Henriques, ISP(KVA), Stockholm

Празни места [void areas]

Неправилна форма, 1"-5", на места с липсваща грануляционна клетка, 70-75 % светимост

Ярки точки в сянката [umbral dots]

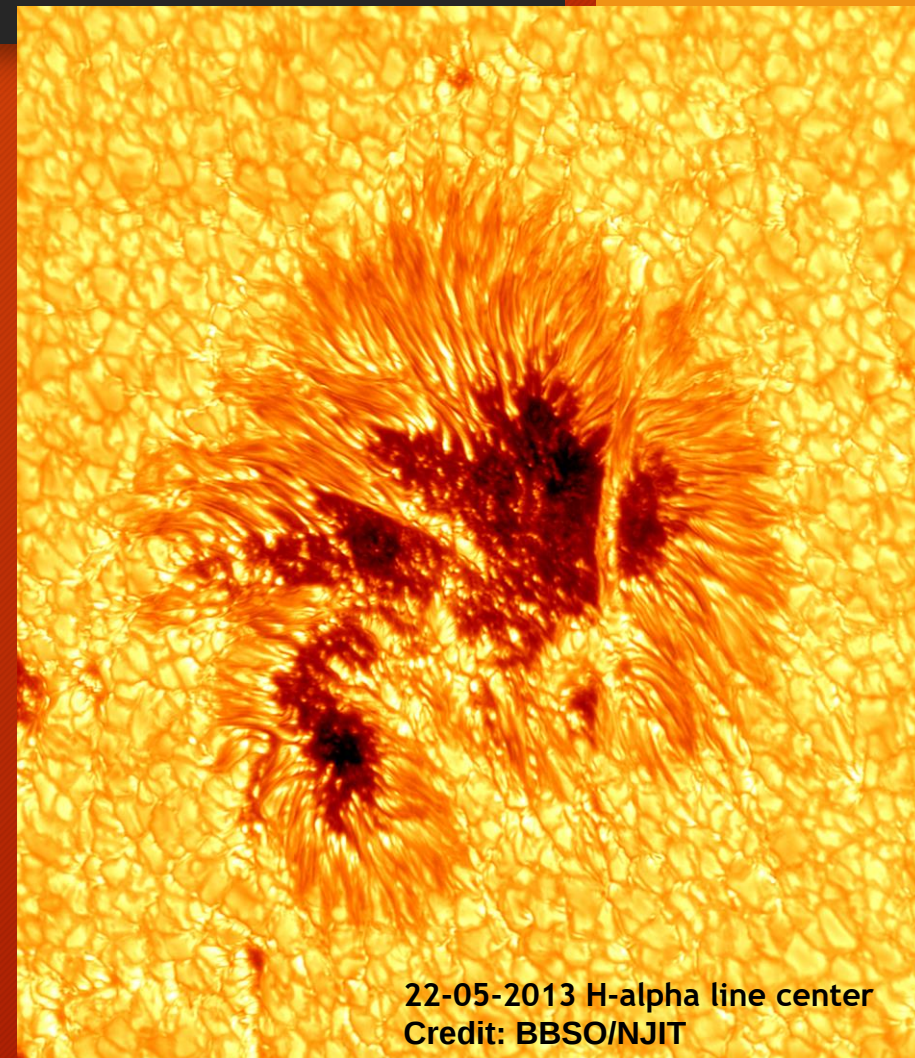
< 150-200 km, фотосферна яркост и T, вертикално движение 0.5 km/s, 1500 s

Ярки мостове в сянката [light bridges in umbrae]

фотосферен интензитет, разделят полусянката на няколко части, при добре формирани петна

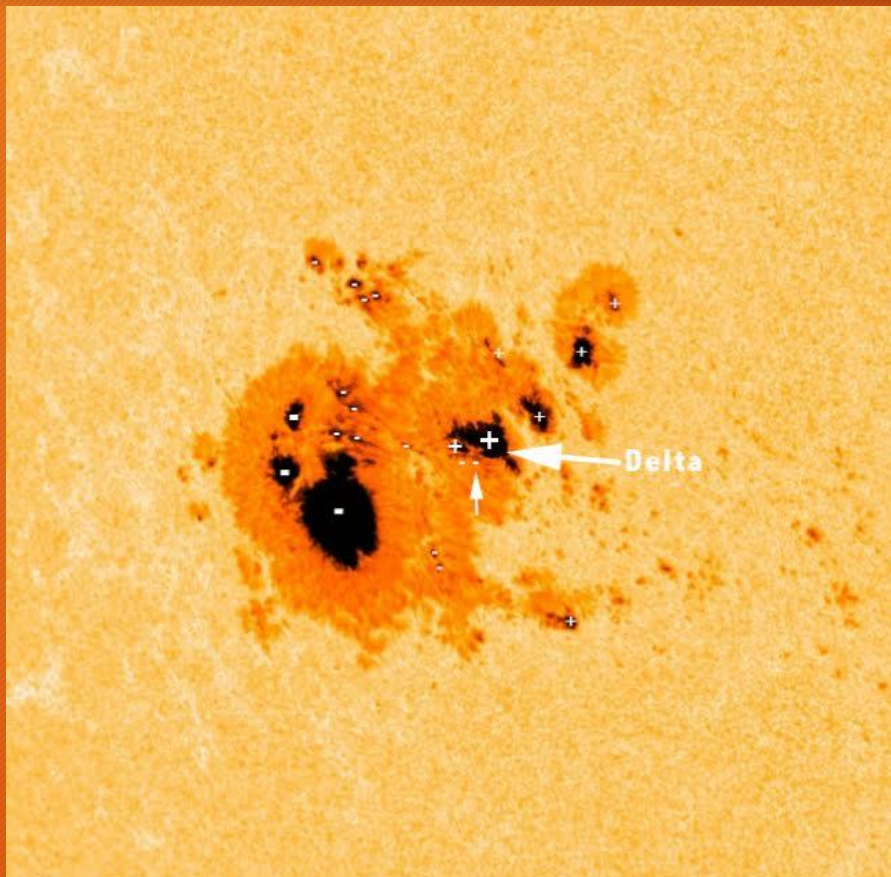
Вътрешни и външни ярки пръстени [inner and outer bright rings]

не се наблюдава при всички петна, част от блокираната енергия се депозира в областта около сянката и полусянката, съответно 3-7% по-висока светимост от фотосферата (50-100 K)



22-05-2013 H-alpha line center
Credit: BBSO/NJIT

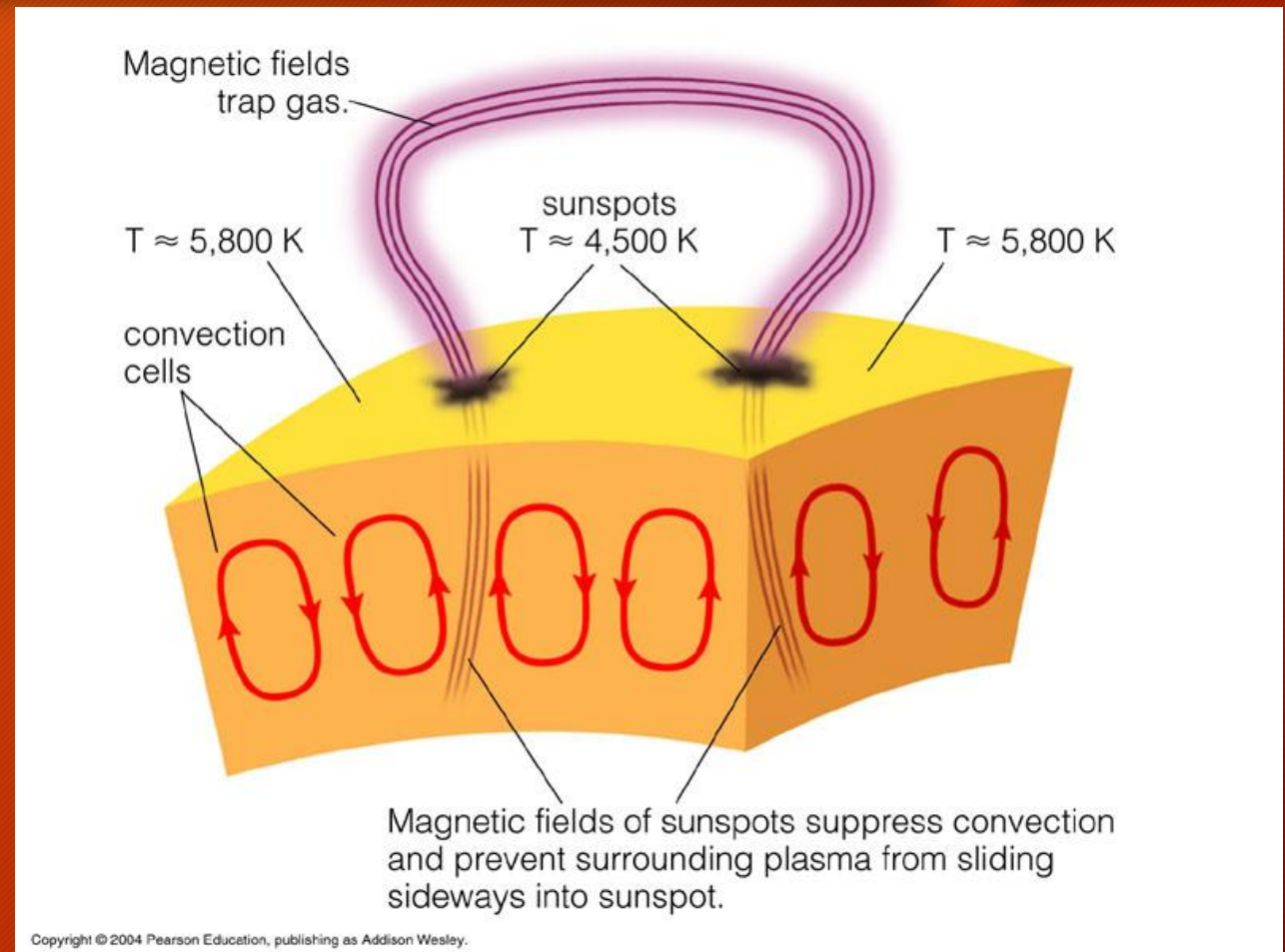
Формиране



Credit: NASA/SDO

<https://apod.nasa.gov/apod/ap141022.html>

Video: <https://youtu.be/J19vi8UPKck>



<http://scientificgamer.com/how-is-sunspot-formed/>

Класификация: Zürich (Waldmeier)

	I	II	III
A			
B			
C			
D			
E			
F			
G			
H			
I			

0° 10° 20° 30°

A-J

A: unipolar spot or group of small spots without penumbra (appearance)

B: symmetrical dipolar group with small spots without penumbra

C: asymmetrical dipolar group with a penumbra on one side

D: dipolar group with penumbrae on both sides. At least one of the principal spots has a simple structure. Extent $< 10^\circ$

E: like D but more complex structure and extent $> 10^\circ$, $< 15^\circ$

F: like E but extent $> 15^\circ$ and often many secondary spots and penumbrae between the main spots (maximum development)

G: large dipolar group with simple structure and no small secondary spots between the principal spot: Extent $> 15^\circ$ (decline of types F)

H: unipolar group with a single big spot with penumbra: extent $> 2.5^\circ$ (decline)

J: like H but extent $< 2.5^\circ$ (decline)

Класификация: McIntosh

Zpc

"Z ": the Zürich class

"p": descriptor for the penumbra of the main spot

x No penumbra (Z=A or B)

r Rudimentary or fragmentary penumbra < 3 arcsec

s Small and symmetrical, regular outline (cf. Zürich type J) < 2.5° (N-S)

a Small and asymmetrical, containing several umbrae (cf. Zürich type J) < 2.5° (N-S)

h Large and symmetrical (cf. Zürich type H) > 2.5° (N-S)

"c": descriptor of the distribution of spots inside the group

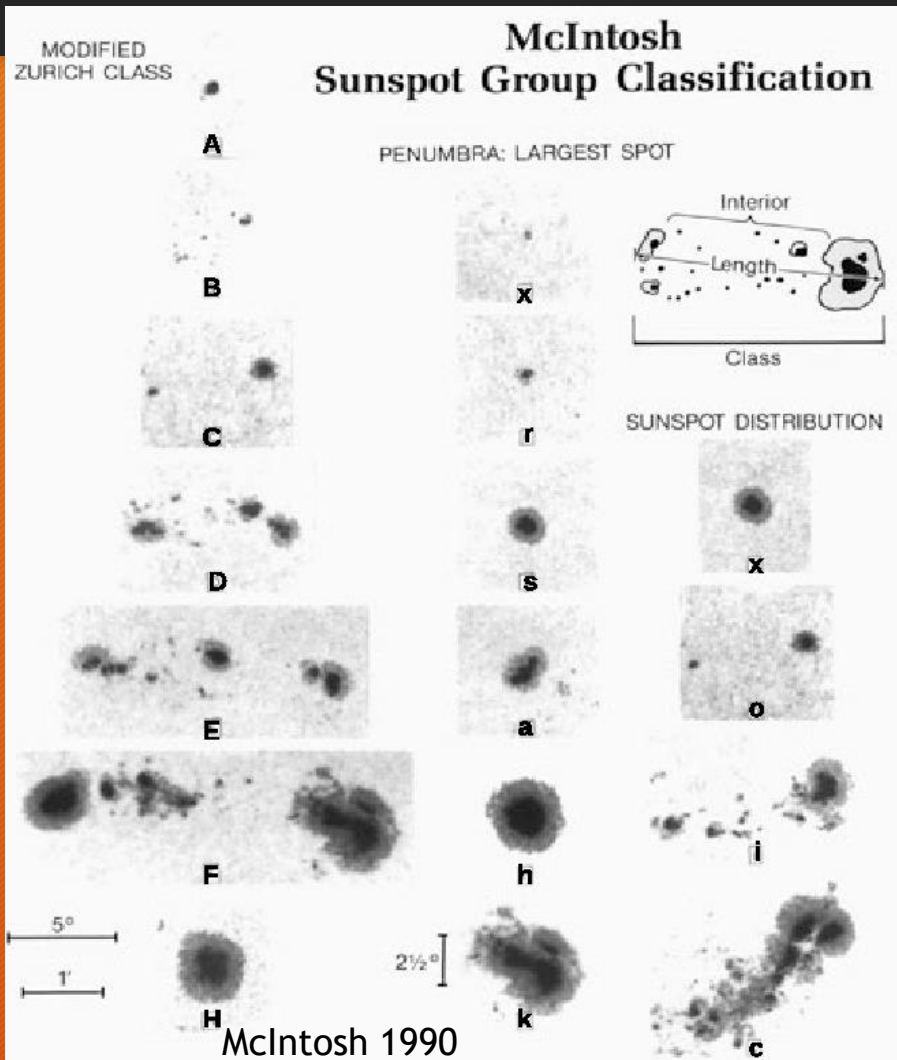
x Undefined (for classes A and H)

o = open No spots or few small spots between main spots (Eo and Fo contain the Zürich class G)

i = intermediate Many small spot between main spots, but none with developed penumbra

c = compact Many spots between main spot, and at least one with penumbra.

The whole group may be contained in a single huge penumbra



(магнитна) Класификация: Mount Wilson

α - β - γ - δ

α : A unipolar sunspot group.

β : A sunspot group that has a positive and a negative polarity (or bipolar) with a simple division between the polarities.

γ : A complex region in which the positive and negative polarities are so irregularly distributed that they can't be classified as a bipolar Sunspot group.

β - γ : A bipolar sunspot group but complex enough so that no line can be drawn between spots of opposite polarity.

δ : The umbrae of opposite polarity in a single penumbra.

β - δ : A sunspot group with a general beta magnetic configuration but contains one (or more) delta sunspots.

β - γ - δ : A sunspot group with a beta-gamma magnetic configuration but contains one (or more) delta sunspots.

γ - δ : A sunspot group with a gamma magnetic configuration but contains one (or more) delta sunspots.

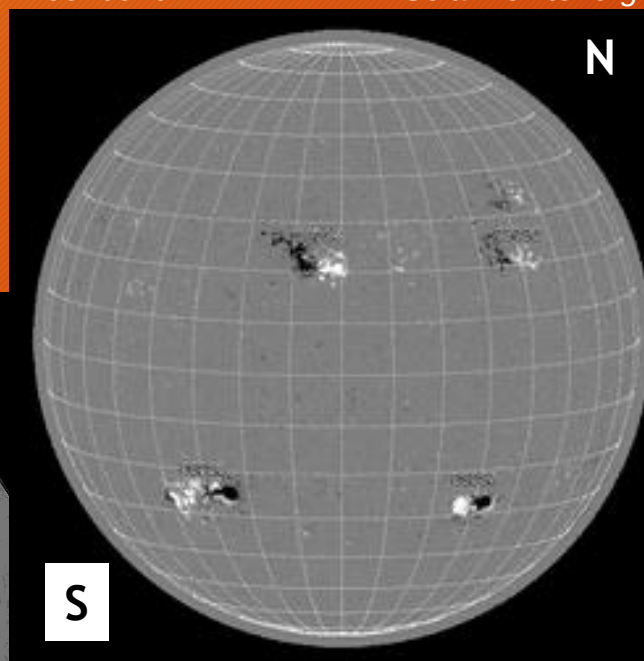
Допълнителна информация:

<http://sidc.oma.be/educational/classification.php>

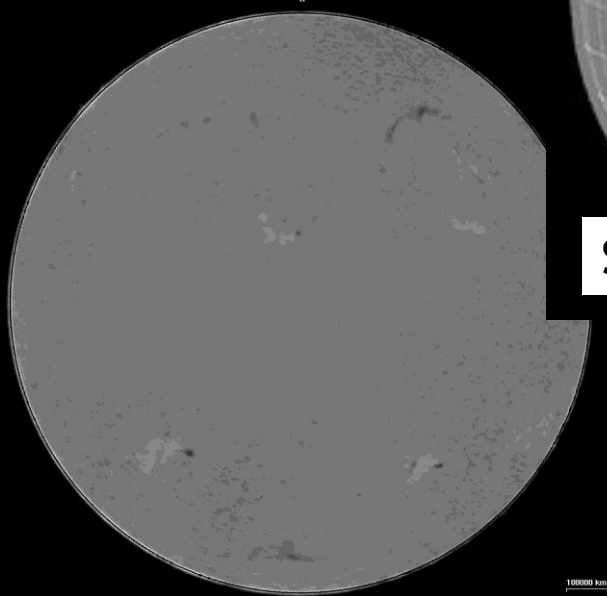
Наблюдения - оптично и с магнитограми

19970910

SolarMonitor.org



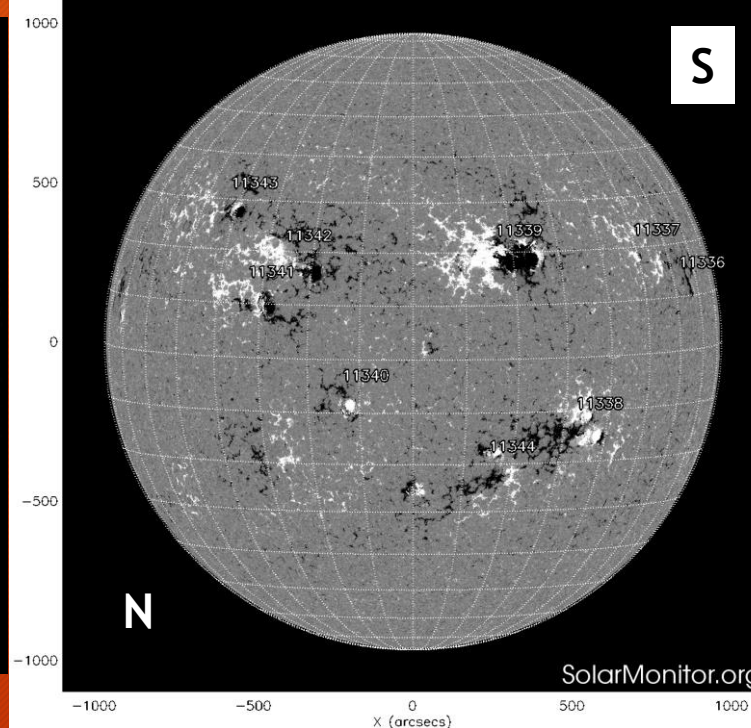
KANZELHOEHE SOLAR OBSERVATORY (Austria)
Ha 1997-09-10T13:25:04Z



S

Конвенция
Бял цвят,
N-полярност,
посока от повърхността навън,
положителен знак

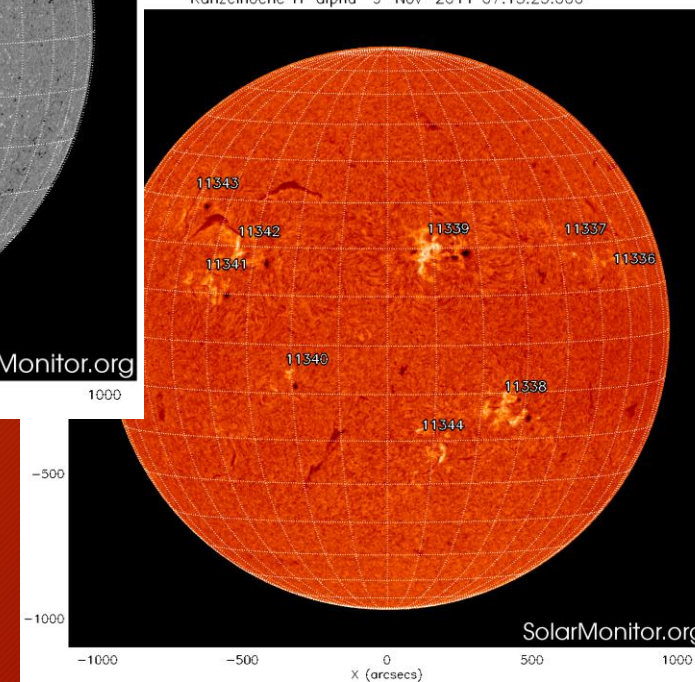
SDO HMI Magnetogram 9-Nov-2011 20:34:58.700



S

N

Kanzelhoehe H-alpha 9-Nov-2011 07:13:23.000



SolarMonitor.org

Емпирични закономерности

➤ Spörer's law

Слънчевите петна се появяват в области $\pm 35(45)^\circ$ и с течение на времето новите петна се появяват на по-ниски ширини близо до хелио-екватора като не го достигат

➤ Joy's law

Водещото петно е по-близо до екватора
Наклонът на двойката петна ключва ъгъл с хелиоширината, който намалява с появата на по-ниски ширини

➤ Hale's law

Водещото петно е винаги с полярността на полусферата, в която се намира, следващото петно е с противоположна полярност

➤ Ефект на Уилсън

Скриване на част от полусянката при наблюдения близо до лимба

➤ Ефект на Евершед

Хоризонтален поток на плазма от полусянката към периферията

Водещото петно е по-голямо и с по-дълъг живот.

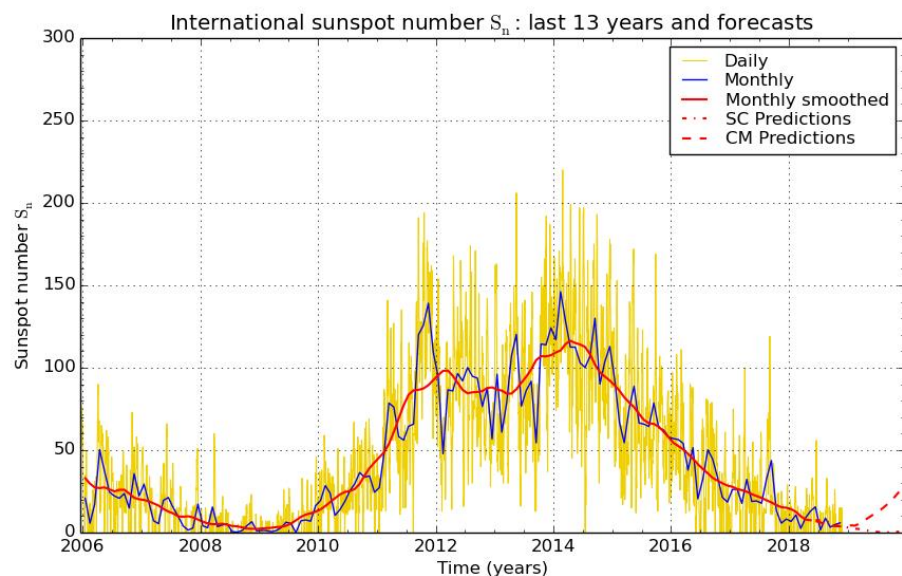
Често сл. цикъл има два максимума.

Има застъпване между два цикъла с 2-3 години.

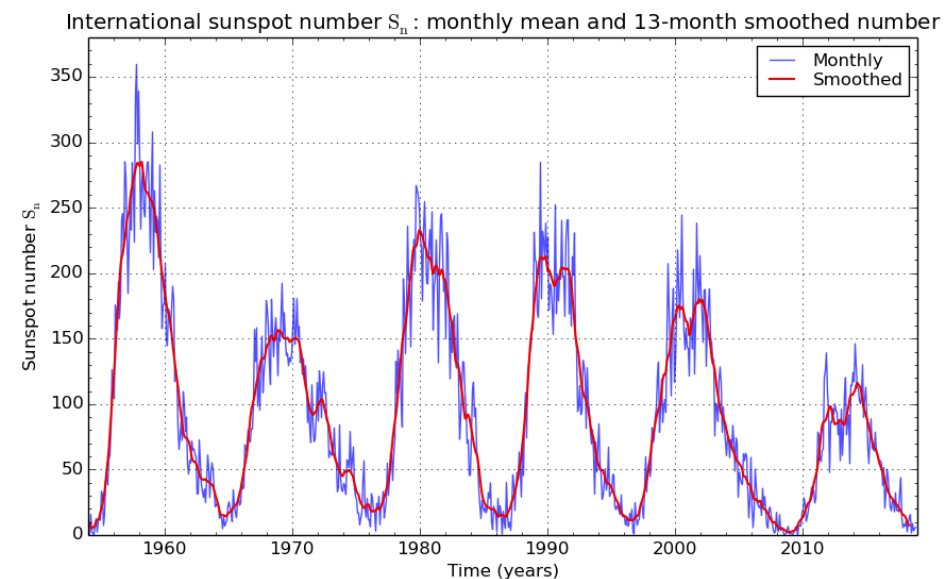
По наблюдения на периода на преминаване на сл. петна по диска - на различни хелио-ширини, *Scheiner* открива диференциалното въртене (25 дни при екватора до 35 - при полюсите). Също така измерва наклона на оста на въртене на Слънцето спрямо еклиптиката 7.5° .

Carrington определя среден синодичен период (27.28 дни):
Carrington rotation

Брой слънчеви петна: число на Wolf



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2018 December 1



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2018 December 1

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

g - брой групи петна

n - брой индивидуални петна

k - корекция на наблюдателя

Други индекси

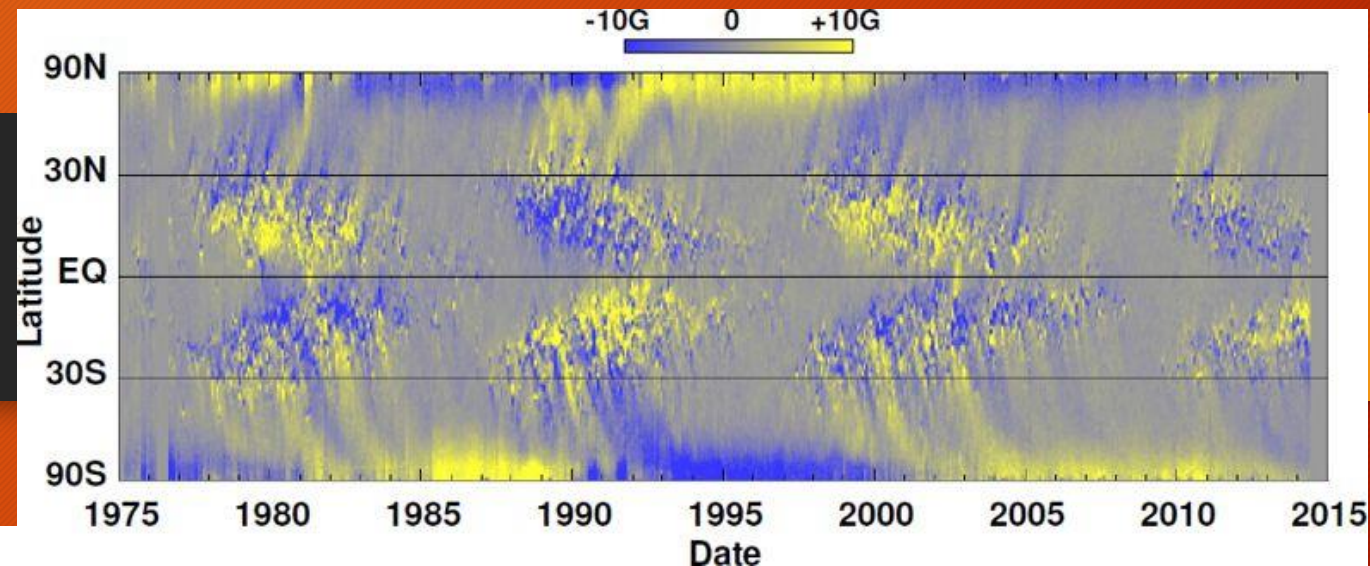
Flare index: $Q = Importance_{H\alpha} \cdot time$ (мярка за цялата излъчена енергия)

F10.7 index (излъчване на потока на 2800 MHz), изостава с 1 месец от R

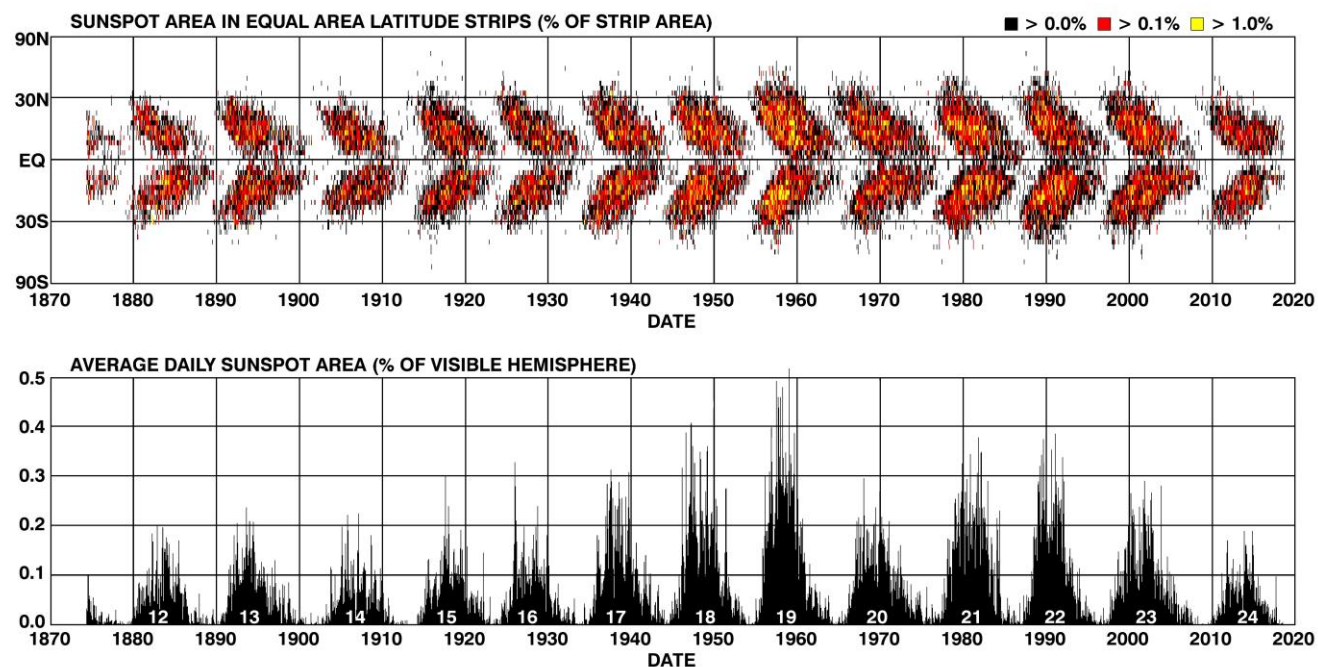
Coronal index (излъчване на зелената линия FeXIV, 5303 Å)

Sunspot area (физичен, оценка за нова поява на магнитен поток)

Слънчева активност



DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



<http://solarcyclescience.com/solarcycle.html>

HATHAWAY 2018/09

<https://link.springer.com/article/10.1007/lrsp-2015-4>

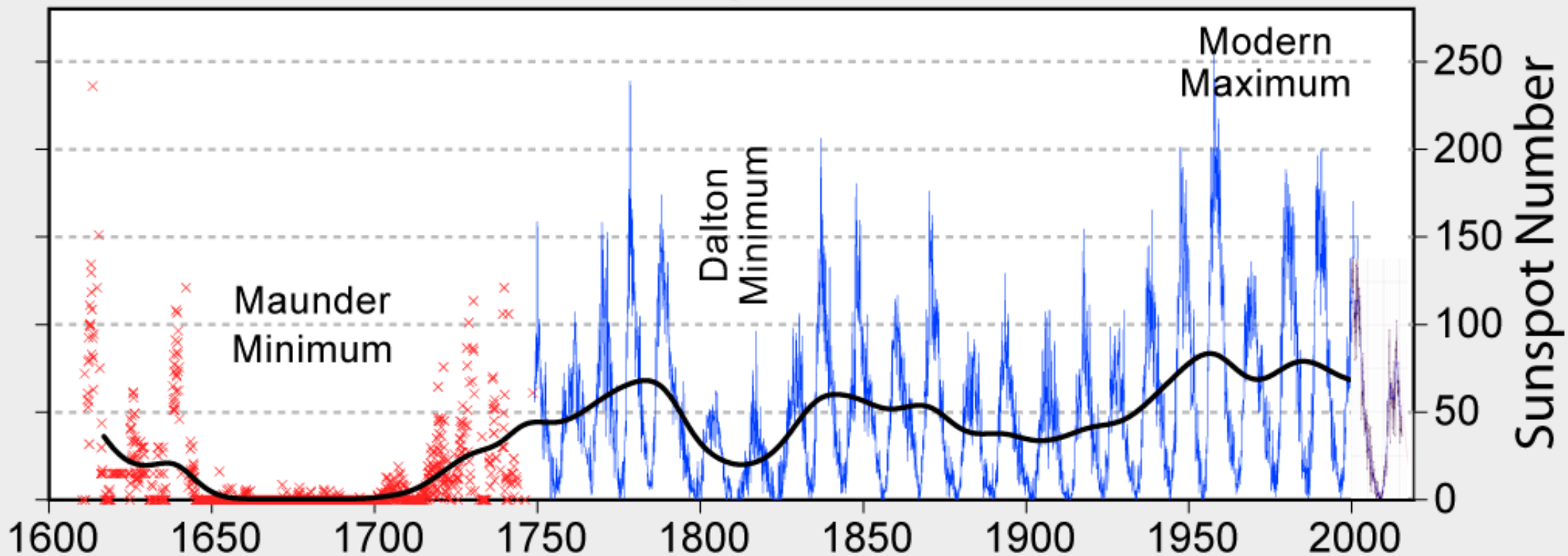
Waldmeier's rule

По-интензивни цикли достигат максимум по-бързо (по-къса фаза на нарастване), в сравнение с по-слаби цикли

<http://solarcyclescience.com/bin/bfly.jpg>

Слънчева активност

400 Years of Sunspot Observations



Слънчева активност - цикли

➤ Schwabe

11 (8-13) години: при обработка на брой слънчеви петна
2018 е в края на СЦ 24 като броенето започва с конвенция от 1756

➤ Hale

22-годишен цикъл на смяна на магнитната полярност
става в максимума на слънчевата активност (на цикъла на Швабе)

Дългосрочни

➤ Gleissberg

90 (60-120) години: вариация на амплитудата на 11-год. цикли

➤ Suess - de Vries

205-210 години: индиректно получен при изследване на изотопи

➤ Eddy

600-700 години, 1000-1200 години: изотопи

➤ Hallstatt

➤ 2000-2400 години: изотопи

Вариации

Минимуми

➤ Wolf min

1300-1400, потвърдени от изотопи ^{10}Be , ^{14}C

➤ Spörer min

1450-1540, потвърдени от изотопи ^{10}Be , ^{14}C

➤ Maunder min

1645-1715

➤ Dalton min

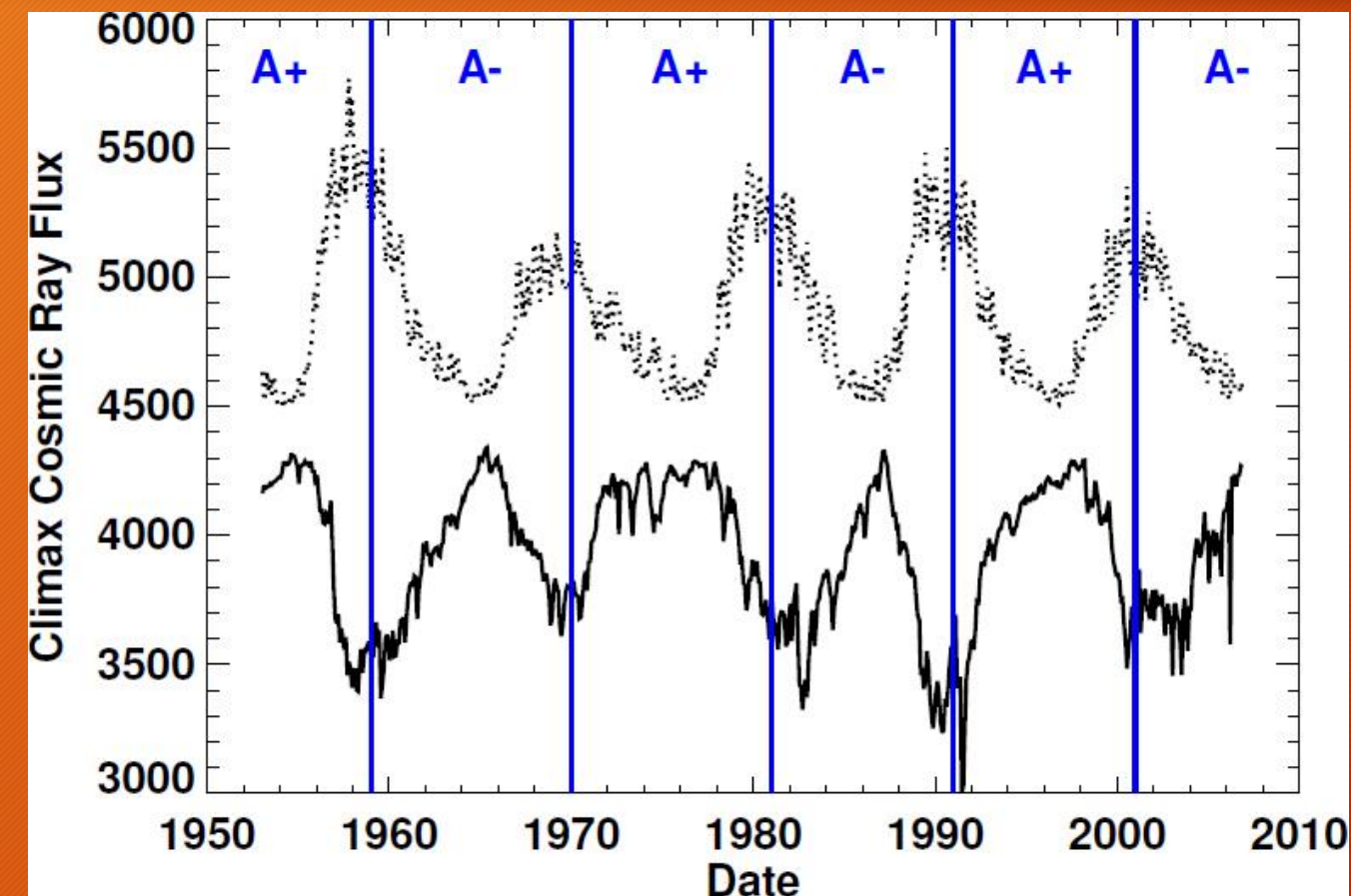
1790-1820, съставен от два сл. цикъла с много ниска активност

Максимуми

➤ Modern max

1880-1910

Слънчеви петна и галактични космични лъчи



A+ положительна магнитна полярност на северния хелиографски полюс

A- отрицателна магнитна полярност

Антикорелация поради екраниращото действие на слънчевото магнитно поле

Изостава от индекса за слънчева активност с 6 до 12 месеца (Forbush 1954), но има съществени разлики между четни и нечетни слънчеви цикли.

Слънчеви петна и други слънчеви събития

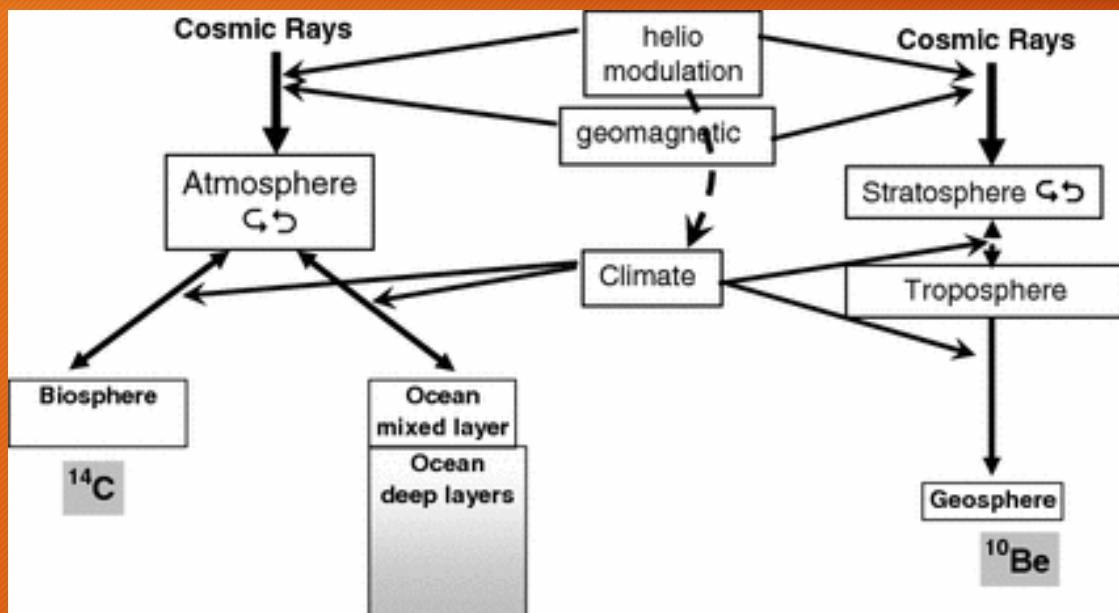
Корелация, във фаза с поведението на слънчевия цикъл

- ✓ Flares
- ✓ CMEs
- ✓ Solar energetic particles
- ✓ Geomagnetic storms, auroras

Антикорелация

- ✓ Faculae
- ✓ X-ray bright points
- ✓ Coronal holes
- ✓ Galactic cosmic rays

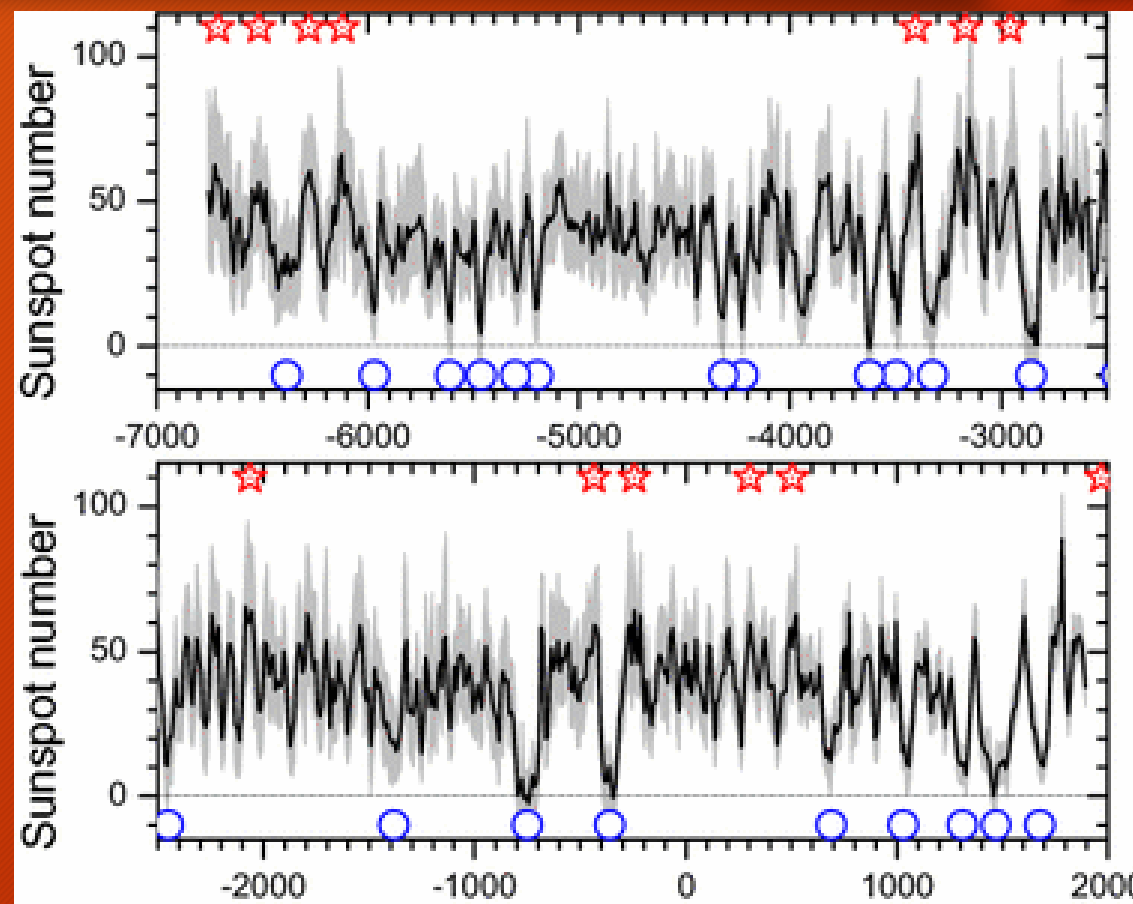
Реконструкция на слънчеви цикли



Само индиректно, по изотопи:

^{14}C (дървесни пръстени, време на полуразпад 5730 год., адекватен индекс до 1950 заради последвали ядрени опити)

^{10}Be (ледени сондажи, 1.5 мил. год.)



Grand max

Grand min

Прогнозиране - 24

Pesnell (2008)
https://www.researchgate.net/publication/225505111_Predictions_of_Solar_Cycle_24

13-month smoothed
2014.5: 113.3

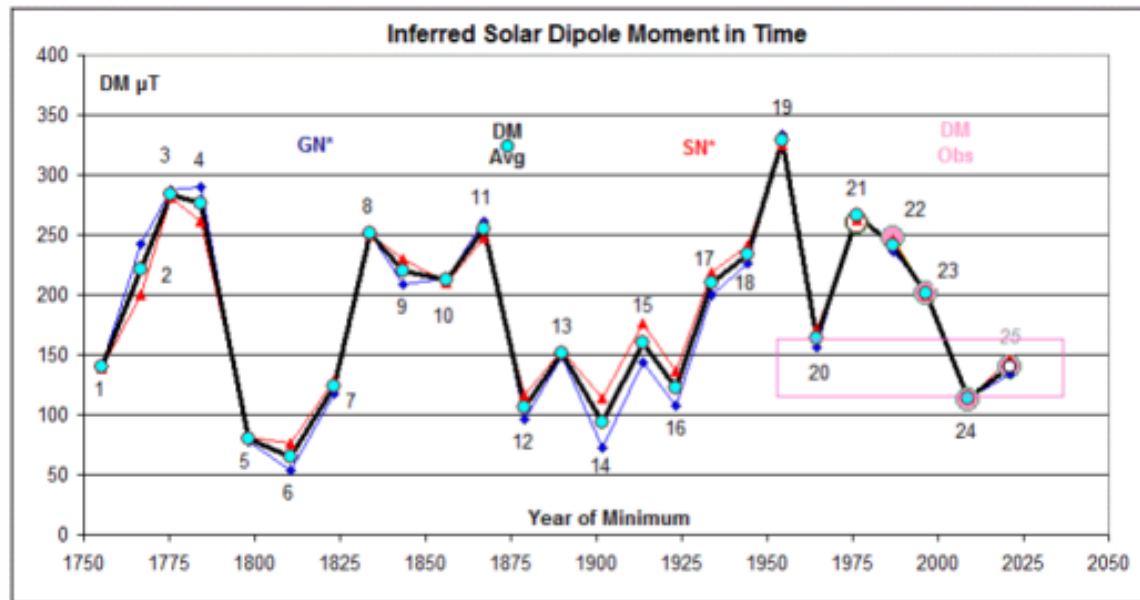
<http://www.sidc.be/silso/datafiles#total>

Predicted maximum		Category ¹ and summary		Author and date
R_{24}	Timing			
115 ± 30	–	P	Number of disturbed days	Rabin (2007)
115 ± 28	2010.5	P	Precursor + nonlinear dynamics	Sello (2006) ⁴
115 ± 15	–	P	Area of high-latitude unipolar regions	Tlatov (2006)
115 ± 13	–	P	Large-scale magnetic field, presented at October panel meeting	Tlatov (2006)
114.8 ± 17.4	–	C	Cycle $n + 1 \propto$ decline of $n - 2$	Du and Du (2006)
114 ± 43	–	C	Mean of cycles 1–23	Prochasta (2006)
112	–	S	Combined empirical mode decomposition and autoregression	Xu <i>et al.</i> (2008)
111 ± 18	–	P	Minimum value of Ap	Thompson (2008)
110 ± 65	2/2011	C	Modified McNish–Lincoln model (MSAFE)	Euler and Smith (2006)
110 ± 15	–	S	Transfer function model	de Meyer (2003)
110 ± 11	2012	S	Autoregressive model	Hiremath (2008)
110 ± 10	–	P	Dipole–octupole magnetic moments	Tlatov (2006)
108 ± 38	2011	C	Skewness of previous cycles separated into even/odd cycles	Lantos (2006)
105 ± 9	2010–2011	S	Extrapolation of dominant spectral components found by MEM	Kane (1999)
101 ± 20	2012.5	S	Autoregressive, linear prediction	Current work
83.2–119.4	2012.21	C	Statistical characteristics of solar cycles	Wang <i>et al.</i> (2002) ⁵
91.9 ± 27.9	2011.04	S	Autoregressive, moving average	Roth (2006)
90.7 ± 9.2	–	P	Number of spotless days at minimum	Hamid and Galal (2006)
90 ± 10	8/2012	–	Panel consensus prediction (low)	

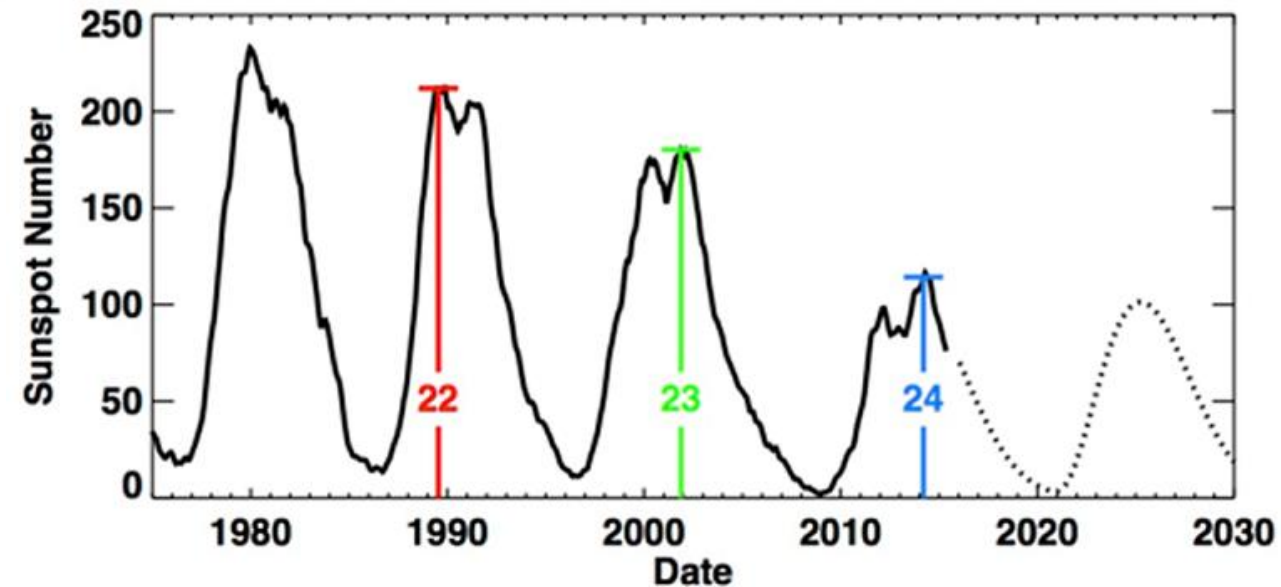
Predicted maximum		Category ¹ and summary		Author and date
R_{24}	Timing			
185	2010–2011	C	Projection of last five cycles (JSC)	Horstman (2005)
180 ± 32	–	P	Disturbed days (panel)	Thompson (1993) ²
180	2014	S	Modified global minimum analysis	Tsirulnik, Kuznetsova, and Oraevsky (1997)
152–197	–	P	Integral of sunspot number used as precursor	Podladchikova, Lefebvre, and Van der Linden (2006)
155–180	–	D	Modified flux-transport dynamo model calibrated with historical run of sunspot area	Dikpati, de Toma, and Gilman (2006)
160 ± 25	–	P	Analysis of aa index	Hathaway and Wilson (2006)
160 ± 54	2010.6	R	$R_{24} = R_{22}$ (even–odd)	Current work
148	–	P	aa at minimum (panel)	aa_min (2006)
145	2009.96	N	Neural network forecast	Maris and Oncica (2006)
145 ± 30	2010	D	Fast meridional circulation speed during cycle 22 leads to a strong solar cycle 24	Hathaway and Wilson (2004)
145	2011–2012	N	Spectral analysis and neurofuzzy modeling	Gholipour <i>et al.</i> (2005)
144	–	P	aa during decline of 23	Jain (2006)
142 ± 24	–	P	aa at solar minimum	Kane (2007)
140 ± 20	2011.80	–	Panel consensus prediction (high)	
140	2012.5	P	Disturbed days analysis	Chopra and Dabas (2006)
135 ± 20	–	P	aa/ R_z precursor (panel)	Modified Feynman (2006) ³
134 ± 50	2011.7	C	Based on average of the last eight solar cycles	Kennewell and Patterson (2006)
133	2009.5	C	Statistics of $\sqrt{R_z}$	Tritakis, Mavromichalaki, and Giouvanellis (2006)
130 ± 15	–	P	Complexity of H α synoptic charts	Tlatov (2006)
124 ± 30	–	P	Value of aa at solar minimum	Nevanlinna (2007)
124 ± 23	–	P	Number of disturbed days in Ap	Dabas <i>et al.</i> (2008)
124	–	C	Statistics of equal phase average	Khramova, Krasotkin, and Kononovich (2002)
122 ± 6	2010.88	C	Statistical analysis of cycle parameters	Kim, Wilson, and Cucinotta (2006)
120 ± 60	2011.167	C	Modified McNish–Lincoln model (MSAFE)	Euler and Smith (2006)
120 ± 45	2010.0	R	$R_{24} = R_{23}$ (inertial)	Current work
120 ± 25	–	P	Behavior of aa (panel)	aa_4yr (2006)
116 ± 13.2	2012–2013	S	Spectral analysis of R_z	Echer <i>et al.</i> (2004)
115 ± 40	2011.3	C	$R_{24} = R_{z,ave}$ (average)	Current work

Прогнозиране - 25

The Prediction (At Last)



SC25 will be somewhere between SC24 and SC20, provided the Polar Field Precursor Relationship holds.



<http://solarcyclescience.com/forecasts.html#Cycle24Prediction>

Источници

Living Reviews in Solar Physics

Напр.

<https://www.springer.com/gp/livingreviews/solar-physics/lrsp-articles>