СТРУКТУРА И ДИНАМИКА НА СЛЪНЧЕВАТА КОРОНА В БЯЛА СВЕТЛИНА ПО ВРЕМЕ НА НАМАЛЯВАЩАТА ФАЗА НА 11-ГОДИШНИЯ СЛЪНЧЕВ ЦИКЪЛ

Десислава Тенева

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: dessi_bg@yahoo.com

Ключови думи: *Слънчева корона, пълно слънчево затъмнение, слънчев минимум, слънчева активност*

Резюме: *Структурата и формата на слънчевата корона са променливи и зависят от нивото на слънчевата активност в рамките на 11-годишния слънчев цикъл. Фазата на намаляване на слънчевата активност е по-продължителна (6–7 години) и протича постепенно, за разлика от фазата на нарастване, при която активността се увеличава бързо и която е по-кратка (4–5 години). Анализът на тези фази е важен за изследването на произхода и еволюцията на слънчевите магнитни полета и на слънчевата активност. За низходящата фаза на слънчевия цикъл е характерно разширяването на полярните коронални дупки към по-ниски хелиографски ширини, което води до образуването на потоци от високоскоростен слънчев вятър.*

Изследваме формата и структурата на слънчевата корона в бяла светлина въз основа на снимки, получени при наземни наблюдения по време на пълните слънчеви затъмнения през 2006 и 2008 г., настъпили в низходящата фаза на 23-ия слънчев цикъл, както и през 2017 и 2019 г., настъпили в низходящата фаза на 24-ия слънчев цикъл. Изображенията на короната в бяла светлина са получени с помощта на обективи с параметри 250/2000 mm и 300 mm, както и на телескоп тип „Максутов–Касегрен“ с фокусно разстояние 2000 mm, оборудвани с цифрови камери с висока разделителна способност. Снимките са направени при различни времена на експозиция – от 1/2000 s до 5 s. Получените по време на затъмненията изображения на короната са сравнени с близки по време изображения във видимата област на спектъра, получени с коронографа LASCO на борда на космическата обсерватория SOHO.

Изчислените индекси на сплеснатост на Людендорф (Ludendorff) и фазата на слънчевия цикъл показват, че короната в бяла светлина е от междинен тип, характерен за периода преди слънчевия минимум.

STRUCTURE AND DYNAMICS OF THE WHITE-LIGHT SOLAR CORONA DURING THE DECLINING PHASE OF THE 11-YEAR SOLAR CYCLE

Dessislava Teneva

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: dessi_bg@yahoo.com

Keywords: *Solar corona, total solar eclipse, solar minimum, solar activity*

Abstract: *The structure and shape of the solar corona are variable and depend on the level of solar activity during the 11-year solar cycle. The declining phase of solar activity is longer (6–7 years) and progresses gradually, in contrast to the shorter rising phase (4–5 years), during which activity increases rapidly. The analysis of these phases is important for investigating the origin and evolution of solar magnetic fields and solar activity. The declining phase of the solar cycle is characterized by the expansion of polar coronal holes toward lower heliographic latitudes, leading to the formation of high-speed solar wind streams.*

We investigate the shape and structure of the white-light solar corona based on images obtained from ground-based observations during the total solar eclipses of 2006 and 2008, which occurred during the declining phase of Solar Cycle 23, and those of 2017 and 2019, which occurred during the declining phase of Solar Cycle 24. The white-light coronal images were obtained using lenses with specifications of 250/2000 mm and 300 mm, as well as a Maksutov–Cassegrain telescope with a focal length of 2000 mm, equipped with high-resolution digital cameras. The images were captured at various exposure times, ranging from 1/2000 s to 5 s. The coronal images obtained during the eclipses were compared with near-contemporaneous images in the visible spectral range acquired by the LASCO coronagraph aboard the SOHO space observatory.

The calculated Ludendorff flattening indices and the phase of the solar cycle indicate that the white-light corona exhibits an intermediate type, characteristic of the period preceding solar minimum.

Въведение

Космическите обсерватории предоставят изключителни възможности за изследване на физичните процеси в слънчевата корона. Наземните наблюдения по време на пълни слънчеви затъмнения дават възможност за изследване на най-вътрешните области на короната (Pasachoff, 2009). Това осигурява безценна информация за глобалното и локалното магнитно поле на Слънцето, както и за нагряването, структурата и динамиката на короната.

Пълно слънчево затъмнение настъпва някъде на Земята приблизително на всеки 18 месеца. При това явление Луната закрива напълно слънчевия диск. В този момент става видима структурата на короната – външната атмосфера на Слънцето, която при обичайни условия остава скрита поради значително по-яркото излъчване на фотосферата. Короната представлява обширна област от силно нагрята плазма, чието поведение се определя в значителна степен от магнитното поле на Слънцето. Когато фотосферата бъде закрита, короната се разкрива в пълния си блясък – като бледо перленосветло сияние, от което се простират коронални стримери, излизащи от слънчевата повърхност.

Оптичните наблюдения на короната в бяла светлина продължават да бъдат основен източник на информация за различните области на средната и външната слънчева корона. Короната в бяла светлина се състои от K-корона (от нем. Kontinuierlich – непрекъсната) и F-корона (от Fraunhofer – Фраунхоферова). K-короната се формира в резултат на разсейването на фотосферното излъчване от бързо движещите се коронални електрони, докато F-короната възниква при разсейването на фотосферната светлина от праховите частици в междупланетното пространство между орбитите на Меркурий и Земята (Stoeva et al., 2011).

Изследването на короната в бяла светлина е насочено преди всичко към изучаването на нейния най-ярък компонент – пояса на короналните стримери. Формата и структурата на слънчевата корона зависят от 11-годишния цикъл на слънчевата активност, поради което техният анализ е важен за изследването на произхода и еволюцията на слънчевите магнитни полета и слънчевата активност.

Короналните изхвърляния на маса (Coronal Mass Ejections, CMEs), слънчевите протуберанси и слънчевите изригвания са основните еруптивни явления, задвижвани от усуканите магнитни полета на Слънцето. Тези явления са тясно взаимосвързани и достигат максимална честота през най-активните фази на слънчевия цикъл (Simnett, 2000).

В данните от коронографа LASCO се открояват две области с повишена концентрация на коронални изхвърляния на маса: короналните пояси, разположени между области с противоположна магнитна полярност, на около 30° от неутралната линия на повърхността на източника (source surface), в близост до хелиосферния екватор, и веригите от коронални стримери, които разделят коронални дупки или области с отворени магнитни силови линии с еднаква полярност и се наблюдават на хелиографски ширини над 30°.

В близост до Слънцето короналните изхвърляния на маса от ниски хелиографски ширини се отклоняват предимно към екватора, докато тези от високи ширини се отклоняват към полюсите. Поради това при минимум на слънчевата активност и във възходящата фаза на слънчевия цикъл, когато преобладават короналните изхвърляния на маса от ниски ширини, първоначалното им отклонение по време на разпространението е предимно в екваториална посока. Траекторията на короналното изхвърляне на маса в близост до мястото на възникването му се определя от едромащабното магнитно поле на Слънцето (Fainshtein and Ivanov, 2010).

Низходящата фаза на слънчевия цикъл е по-продължителна – около 6–7 години, като през нея слънчевата активност постепенно намалява. За разлика от нея, възходящата фаза е по-кратка – приблизително 4–5 години, и се характеризира с бързо нарастване на активността. За низходящата (намаляващата) фаза е характерно разширяването на полярните коронални дупки към по-ниски слънчеви ширини, което води до формирането на потоци от слънчев вятър с висока скорост.

В настоящото изследване разглеждаме две пълни слънчеви затъмнения – през 2006 и 2008 г., настъпили в низходящата фаза на 23-ия слънчев цикъл, и две затъмнения – през 2017 и 2019 г., настъпили в низходящата фаза на 24-ия слънчев цикъл. Тези затъмнения представляват особен интерес, тъй като месечните стойности на числото на слънчевите петна за затъмненията през 2006 и 2017 г. са сходни, както и стойностите за затъмненията през 2008 и 2019 г., съответно. Освен това 24-ият слънчев цикъл се характеризира с четвъртата най-ниска интензивност сред слънчевите цикли, за които се водят систематични наблюдения от 1755 г. насам.

Висококачествените компютърно обработени изображения на слънчевата корона в бяла светлина, получени по време на затъмнение, позволяват да се разграничат дребномащабни структури с ъглови размери около 5 дъгови секунди или по-малки. Контрастът между тези структури е много слаб и те остават неразличими при стандартните експозиции (Koutchmy et al., 1988; Druckmüller et al., 2006).

Слънчевата корона в бяла светлина се изследва въз основа на наклона на короналните стримери спрямо слънчевия екватор и на нейната елиптичност. За количествена характеристика на сплеснатостта се използва индексът на сплеснатост на Лудендорф, който служи като показател за дългопериодичните изменения на слънчевите магнитни полета.

Характеристики на пълните слънчеви затъмнения през 2006, 2008, 2017 и 2019 г.

Пълните слънчеви затъмнения (Total Solar Eclipses, TSE) са наблюдавани на различни места по света, избрани така, че да попадат в ивицата на пълното затъмнение. Короната в бяла светлина е наблюдавана с помощта на различни телескопи и камери при различни времена на експозиция. Експерименталните постановки и използваната наблюдателна апаратура са описани в Stoeva et al. (2018).

23-ти слънчев цикъл – минимум: август 1996 г.; максимум: ноември 2001 г.

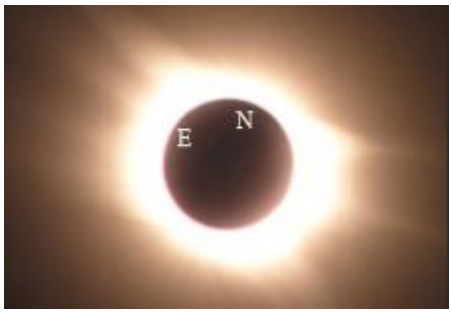
24-ти слънчев цикъл – минимум: декември 2008 г.; максимум: април 2014 г.; продължителност: точно 11 години.

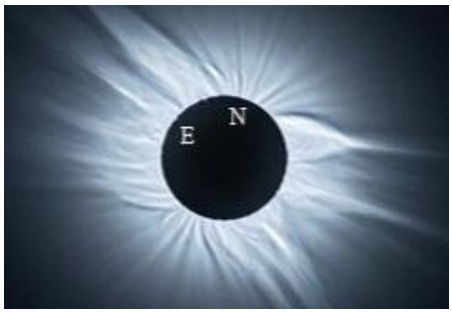
25-ти слънчев цикъл – минимум: декември 2019 г.; максимум: октомври 2024 г.

Наблюденията на пълното слънчево затъмнение от 29 март 2006 г. са проведени в близост до град Манавгат, Турция (φ = 36°45′27,59″ с. ш.; λ = 31°27′14,11″ и. д.; надморска височина: 2 m).

Пълно слънчево затъмнение от 29 март 2006 г. – 23-ти слънчев цикъл

- Времеви интервал след максимума на 23-тия слънчев цикъл (ноември 2001 г.): 4 години и 4 месеца.
- Времеви интервал до минимума на 24-тия слънчев цикъл (декември 2008 г.): 2 години и 9 месеца.
- Месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за март: 17,3.
- Изгладена месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за март: 27,4.





Пълното слънчево затъмнение от 2006 г. настъпва в периода на намаляване на слънчевата активност – в низходящата фаза на 23-тия слънчев цикъл, близо до неговия минимум.

При затъмнението през 2006 г. полярните коронални струи (polar plumes) са добре развити както в северното, така и в южното полукълбо на короната. Протуберансите, възникващи и развиващи се на средни хелиографски ширини (25°–45°), се очертават ясно в основата на някои големи куполообразни структури. Оста на симетрия на короналните стримери от тип „шлем“ (helmet streamers) е наклонена към слънчевия екватор. Отклоненията от радиалното направление в западното полукълбо (21°) са по-големи от тези в източното полукълбо (8°). Съставното изображение е изготвено от 16 негатива, заснети в бяла светлина при времена на експозиция от 1/2000 s до 5 s (Stoeva et al., 2008).

Пълно слънчево затъмнение от 1 август 2008 г. – 23-ти слънчев цикъл

Наблюденията са проведени в близост до град Бийск, Алтайски край, Русия (φ = 51°58′ с. ш.; λ = 84°57′ и. д.; надморска височина: 360 m).

- Времеви интервал след максимума на 23-тия слънчев цикъл (ноември 2001 г.): 6 години и 9 месеца.
- Времеви интервал до минимума на 24-тия слънчев цикъл (декември 2008 г.): 4 месеца.
- Месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за август: 0,3.
- Изгладена месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за август: 3,8.



Пълното слънчево затъмнение от 2008 г. също настъпва в низходящата фаза на слънчевия цикъл, като се има предвид, че 24-ят слънчев цикъл започва през декември 2008 г.

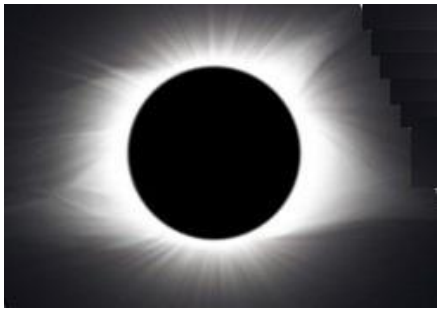
При затъмнението през 2008 г. короналните структури също се очертават ясно върху съставното изображение на короната в бяла светлина. Те се наблюдават в диапазона на хелиографските ширини от 19° до 48°. Отклоненията от радиалното направление в западното полукълбо (9°) са по-малки от тези в източното полукълбо (12°–18°).

„Голямото американско затъмнение“ (The Great American Eclipse) е първото пълно слънчево затъмнение, преминало през континенталната част на САЩ от 99 години насам. Ивицата на пълното затъмнение пресича страната от запад на изток – от щата Орегон до Южна Каролина. Пълната фаза на затъмнението започва в 13:06:19 ч. тихоокеанско лятно време (PDT), съответстващо на 20:06:19 ч. координирано универсално време (UTC). Най-голямата продължителност на пълната фаза е 2 минути и 41,6 секунди и е регистрирана в Карбъндейл, щата Илинойс.

За голямо слънчево затъмнение се говори, когато оста на лунната сянка преминава на най-малко разстояние от центъра на Земята. Затъмнението настъпва преди минимума между 24-ия и 25-ия слънчев цикъл. В сравнение с предходните седем слънчеви цикъла 24-ият цикъл се характеризира със сравнително ниска амплитуда на слънчевата активност.

Пълно слънчево затъмнение от 21 август 2017 г. – 24-ти слънчев цикъл

- Времеви интервал след максимума на 24-тия слънчев цикъл (април 2014 г.): 3 години и 4 месеца.
- Времеви интервал до минимума на 25-ия слънчев цикъл (декември 2019 г.): 2 години и 4 месеца.
- Месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за август: 32,6.
- Изгладена месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за август: 19,6.



Слънчевата корона в бяла светлина, Сейлъм, щата Орегон, САЩ. Снимка, направена от екипа на проф. Пасахоф от колежа „Уилямс“ в Портланд, щата Орегон.

Съставните изображения показват един ярък коронален стример от тип „шлем“ над източния край на слънчевия диск и два много ярки стримера от същия тип над западния край, отклонени към слънчевия екватор. Наблюдават се също тесни лъчеви структури, ориентирани почти радиално, както и полярни коронални дупки, изпълнени с полярни струи (polar plumes) (Pasachoff and Rusin, 2022).

За наблюдение на затъмнението е организирана специална експедиция до град Кинес, провинция Сан Луис, Аржентина, разположен в ивицата на пълното затъмнение.

Затъмнението е особено интересно, тъй като настъпва в период на много ниска слънчева активност – минимумът на низходящата фаза на 24-тия слънчев цикъл все още не е достигнат. Друга особеност на затъмнението е, че при много ниска слънчева активност

короната е силно издължена, а изригванията, които при максимума на слънчевата активност обикновено се сливат визуално с големите коронални структури и трудно се разграничават, могат да бъдат изследвани подробно.

Допълнителна трудност при наблюденията е обстоятелството, че затъмнението започва в късните следобедни часове, когато Слънцето и Луната се намират близо до хоризонта, където атмосферният слой, през който преминава светлината, е по-дебел.

Пълно слънчево затъмнение от 2 юли 2019 г. – 24-ти слънчев цикъл

- Времеви интервал след максимума на 24-тия слънчев цикъл (април 2014 г.): 5 години и 3 месеца.
- Времеви интервал до минимума на 25-ия слънчев цикъл (декември 2019 г.): 5 месеца.
- Месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за юли: 0,9.
- Изгладена месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за юли: 3,5.



Слънчевата корона в бяла светлина по време на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019 г., Аржентина (фотоапарат Canon 700D с обектив с фокусно разстояние 300 mm и неутрален филтър).

По време на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019 г. се наблюдава протуберанс в хромосферата на средни хелиографски ширини. Той представлява структура, формирана от сложно преплетени магнитни силови линии, които задържат плътни концентрации от слънчева плазма над слънчевата повърхност. Магнитните му структури са закрепени към видимата слънчева повърхност и се простират навън, преминавайки през хромосферата и достигайки до короната.

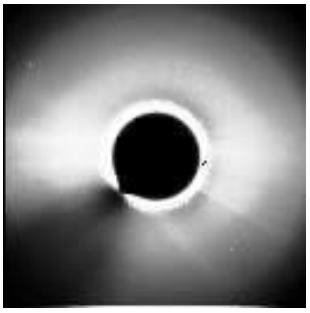
Резултати и анализ

Полярните коронални струи (polar plumes), куполообразните структури и короналните структури от тип „шлем“ (helmet structures) са основните морфологични образувания в слънчевата корона. Те се открояват ясно в съставни изображения, съставени от различен брой негатива, заснети в бяла светлина при различни времена на експозиция (Stoev et al., 2002; Stoeva et al., 2008).

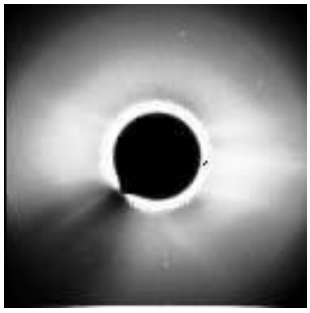
За да изследваме времето на живот на короналните структури, сравнихме изображения на короната в бяла светлина, получени с коронографа SOHO/LASCO C2, който регистрира короната на разстояния приблизително от 1,5 до 6 слънчеви радиуса. Изображенията са подбрани през интервал, равен на една четвърт от периода на слънчевото въртене: за деня на затъмнението, както и за 7 дни преди и 7 дни след него (Stoeva, Stoev, Kuzin, 2012; SOHO/LASCO – данни от наблюденията).

Наблюдаваните структурни изменения в изображенията от LASCO могат да бъдат резултат както от динамични промени в короната, така и от въртенето на Слънцето.

Това са три изображения, получени с коронографа LASCO C2 на борда на космическата обсерватория SOHO, заснети през интервали, равни на една четвърт от периода, за пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) през 2006 г. Седем дни преди затъмнението в източното и западното полукълбо на Слънцето все още не се наблюдават добре развити коронални стримери.

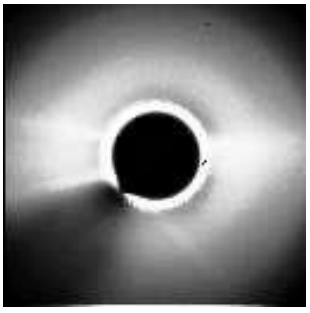

22 март, 2006

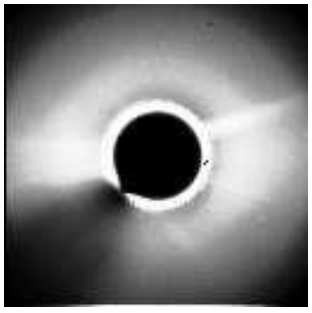

29 март, 2006

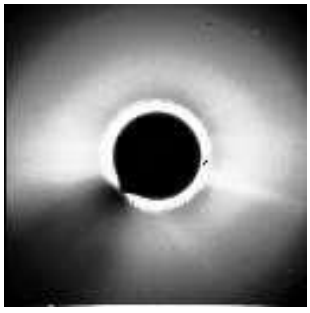

05 април, 2006

Короната в бяла светлина, наблюдавана с коронографа LASCO C2 на борда на космическата обсерватория SOHO, е представена чрез изображения, получени през интервали, равни на една четвърт от периода, за пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) през 2006 г.

На изображенията, получени във връзка със затъмнението през 2008 г., се наблюдават промени в пространственото разположение и яркостта на короналните стримери.

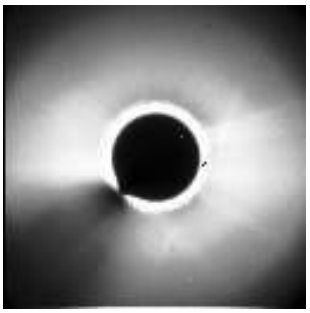

25 юли, 2008

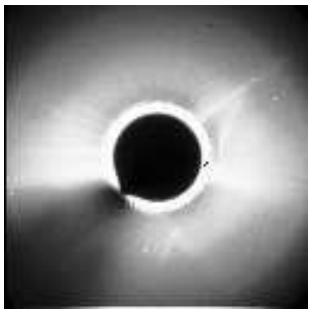

01 август, 2008

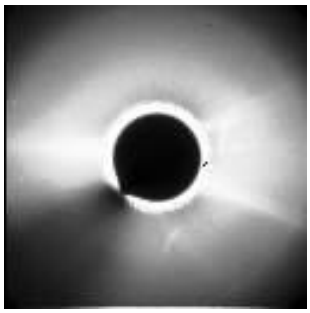

08 август, 2008

Короната в бяла светлина, наблюдавана с коронографа LASCO C2 на борда на космическата обсерватория SOHO, е представена чрез изображения, получени през интервали, равни на една четвърт от периода, за пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) през 2008 г.

При затъмнението през 2017 г. не се наблюдават съществени изменения в структурата на слънчевата корона.

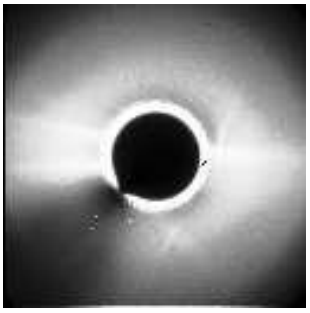

14 август, 2017


21 август, 2017


28 август, 2017

Короната в бяла светлина, наблюдавана с коронографа LASCO C2 на борда на космическата обсерватория SOHO, е представена чрез изображения, получени през интервали, равни на една четвърт от периода, за пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) през 2017 г.

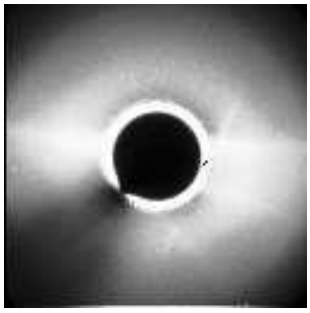
При пълното слънчево затъмнение през 2019 г., настъпило непосредствено преди минимума на слънчевата активност през декември 2019 г., се наблюдават коронални структури, разположени в непосредствена близост до равнината на хелиосферния екватор.



26 юни, 2019



2 юли, 2019



9 юли, 2019

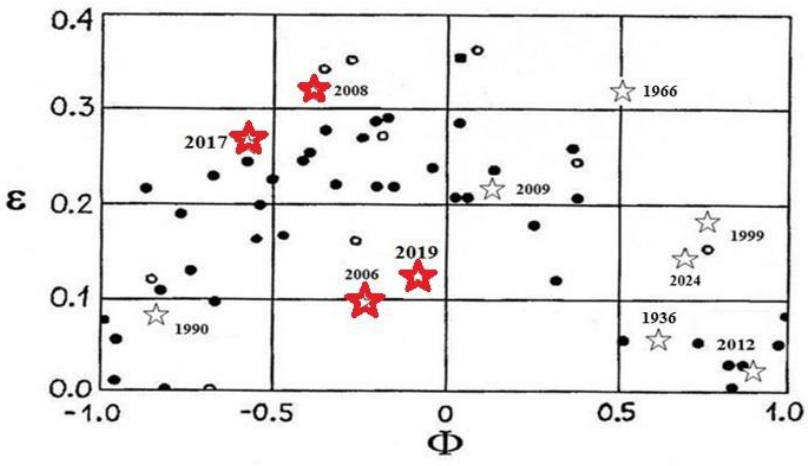
Короната в бяла светлина, наблюдавана с коронографа LASCO C2 на борда на космическата обсерватория SOHO, е представена чрез изображения, получени през интервали, равни на една четвърт от периода, за пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) през 2019 г.

Индексът на сплеснатост на Лудендорф е резултат от пространственото разпределение на едромащабните структури в бялосветлинната слънчева корона, сред които са короналните стримери и короналните дупки. Поради това той е свързан с магнитните полета на фотосферата, получени чрез екстраполация.

Степента на сплеснатост на слънчевата корона, която достига максимални стойности при минимум на слънчевата активност и обратно — намалява при повишаване на активността, може да се разглежда като косвена характеристика на полярното магнитно поле на Слънцето. Според теорията на динамото това поле също достига максималната си интензивност при минимума на слънчевата активност.

Таблица 1. Сплеснатостта на слънчевата корона ε и фазата на слънчевия цикъл Φ за пълните слънчеви затъмнения през 2006 и 2008 г., настъпили във фазата на спад на 23-ия слънчев цикъл, и за пълните слънчеви затъмнения през 2017 и 2019 г., настъпили във фазата на спад на 24-ия слънчев цикъл.

Изгладени месечни стойности на броя на слънчевите петна за година	**март 2006** 27.4	**август 2008** 3.8	**август 2017** 19.6	**юли 2019** 3.5
ε	0.098	0.320	0.27	0.13
Φ	- 0.25	- 0.04	- 0.60	- 0.08
Вид на короната	2 години и 9 месеца преди минимума (декември 2008 г.)	4 месеца преди минимума (декември 2008 г.)	2 години и 4 месеца преди минимума (декември 2019 г.)	5 месеца преди минимума (декември 2019 г.)



Индексите на сплеснатост на слънчевата корона ε като функция на фазата на слънчевия цикъл Φ за пълните слънчеви затъмнения през 2006, 2008, 2017 и 2019 г. са представени с червени звездички.

Литература:

1. Druckmüller, M., Rušin, V., Minarovjech, M., Saniga, M.: 2006, Contrib. Astron. Obs. Skaln. Pleso 36, 31.
2. Fainshtein V.G., Ivanov E.V., Relationship between CME Parameters and Large-Scale Structure of Solar Magnetic Fields, Sun and Geosphere, 2010; 5(1): 28–33 ISSN 1819-0839.
3. https://lasco-www.nrl.navy.mil/index.php?p=get_data
4. Koutchmy, O., Koutchmy, S., Nitschelm, C., Sykora, J., Smartt, R.S.: 1988, Image processing of coronal pictures. In: Altrock, R.C. (ed.) Solar and Stellar Coronal Structure and Dynamics, Proc. 9th Sac Peak Summer Workshop, NSO, Sunspot, 256.
5. Pasachoff Jay, 2009, Solar eclipses as an astrophysical laboratory, Nature, Vol 459j11 June 2009jdoi:10.1038/nature07987.
6. Pasachoff, J., Rusev, V., 2022, White-Light Coronal Imaging at the 21 August 2017 Total Solar Eclipse, Solar Physics (2022) 297:28, https://doi.org/10.1007/s11207-022-01964-z.
7. Simnett, G.M., The relationship between prominence eruptions and coronal mass ejections, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 62, Issue 16, 2000, Pages 1479-1487, ISSN 1364-6826, https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00088-2.
8. Stoeva, P., A. Stoev, S. Kuzin, “White light corona at different phases of the solar cycle”, Sun and Geosphere, 6(1), 2011, pp. 33–35, ISSN 1819-0839.
9. Stoeva P., A. Stoev, S. Kuzin, Solar Corona In White Light During Five Total Solar Eclipses, Sun and Geosphere, The International Journal of Research and Applications,Vol.7 - No.1 – 2012, pp. 81–84, Editor-in-Chief: Atila Ozguc, Guest Editors: Katya Georgieva, Vladimir Obridko, Georgeta Maris, Tamara Breus, Rositza Koleva, Yurdanur Tulunay, ISSN: 1819-0839.
10. Stoeva, P., A. Stoev, S. Kuzin, Y. Shopov, N. Kiskinova, N. Stoyanov, A. Pertsov,” Investigation of the white light coronal structure during the total solar eclipse on March 29, 2006”, International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System, Varna, Bulgaria, 17–22 September 2006, doi:10.1016/j.jastp.2007.08.051, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics v. 70, 2008, pp. 414–419.
11. Stoeva Penka, Alexey Stoev, Sergey Kusin, Beshir Marzouk, Andrey Pertsov, Mohamed Semeida, 2018, Structure and dynamics of the solar corona observed during different phases of the solar cycle, 41st Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", March 12-16, 2018 , Apatity, Russia, Proceedings of the 41st Annul Seminar, http://pgia.ru/seminar, pp 69-75. ISSN 2588-0039.