

КОРОНАТА НА СЛЪНЦЕТО, НАБЛЮДАВАНА ПО ВРЕМЕ НА ВЕЛИКОТО СЕВЕРНОАМЕРИКАНСКО ПЪЛНО СЛЪНЧЕВО ЗАТЪМНЕНИЕ И МАКСИМУМА НА 25-ИЯ СЛЪНЧЕВ ЦИКЪЛ ОТ ТЕКСАС, САЩ

Пенка Стоева¹, Алексей Стоев^{1,2}, Мирослав Костов^{1,2}, Десислава Тенева^{1,2}

¹Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките

²Астрономическа обсерватория и Планетариум "Юрий Гагарин", Стара Загора

e-mail: penm@abv.bg, stoev52@abv.bg

Ключови думи: слънчево затъмнение, слънчев цикъл, корона в бяла светлина, реакция на атмосферата, коефициент на Лудендорф

Резюме: Докладваме предварителните резултати от научната експедиция до Тексас, САЩ, за наблюдение на Великото пълно слънчево затъмнение в Северна Америка на 8 април 2024 г. Експериментите бяха проведени в района на Кервил, на 70 км от гр. Сан Антонио.

Слънчевата корона в бяла светлина е наблюдавана с 400 mm обектив Canon EOS R8. Снимките са направени с различна експозиция – къса за вътрешната корона и дълга за външната корона. По този начин извличаме съставно изображение и можем да изследваме структурата на короната. Виждат се множество ясно изразени шлемовидни стримери на всички географски ширини, което е характерно за слънчев максимум.

Наблюдавахме и ефекта на затъмнението върху земната атмосфера. Измерената температура на разстояние 0.5 м над земята спада с 3.3°C, 11 мин и 14 сек след края на пълната фаза. Спадът е малък в сравнение с други затъмнения поради облачното време през целия ден.

При фаза 0.69 на слънчев цикъл 25 индексът на елиптичност на Ludendorff достига 0.14, което повтаря цикличните изменения, получени от предишни наблюдения.

Наблюденията на пълното слънчево затъмнение от 8 април 2024 г. ни дават възможност да изследваме структурата на слънчевата корона по време на този уникален максимум от цикъла на слънчевата активност 25 – първият след най-ниския 24-ти слънчев цикъл – и да го сравним с предишни наблюдения по време на различни фази от слънчев цикъл.

SOLAR CORONA OBSERVED DURING THE GREAT NORTH-AMERICAN TOTAL SOLAR ECLIPSE AND MAXIMUM OF THE 25TH COLAR CYCLE FROM TEXAS, USA

Penka Stoeva¹, Alexey Stoev^{1,2}, Miroslav Kostov^{1,2}, Desislava Teneva^{1,2}

¹Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora Department,

²Astronomical Observatory and Planetarium "Yuri Gagarin", Stara Zagora

e-mail: penm@abv.bg, stoev52@abv.bg

Keywords: Solar eclipse, Solar cycle, white light corona, atmospheric response, Ludendorf coefficient

Abstract: We report the preliminary results of the scientific expedition to Texas, USA for observation of the Great Total Solar Eclipse in North America on April 8, 2024. The experiments were conducted in the Kerrville area, 70 km from the city of San Antonio.

The corona in white light was observed with a 400mm Canon EOS R8 lens. The photos were taken with different exposure – short for the inner corona and long for the outer corona. In this way, we extract a composite image and can study the structure of the corona. Multiple distinct helmet-shaped streamers are visible at all latitudes, which is characteristic of a solar maximum.

We also observed the effect of the eclipse on the Earth's atmosphere. The measured temperature at a distance of 0.5m above the ground drops by 3.3°C, 11 min and 14 sec after the end of the full phase. The fall is small compared to other eclipses due to cloudy weather throughout the day.

At phase 0.69 of solar cycle 25, the Ludendorff ellipticity index reaches 0.14, which repeats the cyclic changes obtained from previous observations.

Въведение

Короната е най-външната част от атмосферата на слънцето и се състои от плазма с много висока температура – около 2 милиона °С и екстремно ниска плътност. Тя постоянно променя формата и размерите си под действие на магнитното поле на слънцето. Под короната е разположена хромосферата – нееднороден по структура слой, който е непосредствено над фотосферата – видимата повърхност на слънцето, където наблюдаваме слънчевите петна, ярките факели и протуберансите. Температурата на фотосферата е 6000 °С, а в хромосферата тя нараства до 20000 °С, при което се формира интензивно излъчване в линиите на атомния водород и най-вече в H-алфа.

Короната на слънцето може да се наблюдава само по време на пълно слънчево затъмнение, тъй като нейната яркост е много по-слаба от яркостта на небето поради ниската плътност на веществото. Изследванията на структурата и динамиката на короната са важни защото във вътрешната ѝ част става изхвърлянето на маса и там се заражда слънчевият вятър – поток от плазма (предимно протони и електрони), пренасян в пространството от магнитното поле на слънцето. В различните региони на слънцето скоростта на плазмените потоци е различна и поради въртенето в пространството се получава спираловиден модел. Внезапните промени в скоростта на слънчевия вятър променят формата на земната магнитосферата и могат да създадат геомагнитни бури, които са причина за полярните сияния и смущенията в комуникациите на земята.

Короната в бяла светлина е резултат от разсейването на фотосферната светлина от електрони в короната и прах в междупланетното пространство. Орбиталните хелиосферни обсерватории SoHO и STEREO и спътниците Yohkoh, TRACE и CORONAS дават възможност за непрекъснато изследване на слънчевата корона и протичащите процеси, но те са по-близо до Земята отколкото е Луната и закриват от погледа точно вътрешна корона. Ето защо наземните наблюдения на пълните слънчеви затъмнения са толкова важни! При това естествено явление може да се научи много както за короната, така и за взаимното разположение на Земята, Луната и Слънцето.

Короналната светлина се състои от K-, F-, E-, T- корона. Тези компоненти се образуват по много различни механизми и имат много различни свойства. K- (Continuierlich) короната се получава от разсейване на фотосферната светлина от бързо движещи се свободни електрони (Томсъново разсейване); F- (Fraunhofer) корона – чрез разсейване на фотосферна светлина от прах в междупланетното пространство между орбитите на Меркурий и Земята; E-(Emission) согопа – чрез действително излъчване на радиация от силно йонизирани атоми и молекули в короната; T- (термична) корона – чрез топлинни (предимно инфрачервени) емисии на междупланетен прах, обикновено същият прах, който причинява F-короната. Основен източник на информация за далечните области на средната и външната корона все още остават оптичните наблюдения на така наречената корона в бяла светлина, образувана от K- и F-короната.

Слънчевите затъмнения са между две и пет всяка година. Много от тях се случват над океаните или отдалечени места и е много трудно да се наблюдават. Някои не са пълни, а са само частични или пръстеновидни. По този начин добра възможност за наблюдение на пълно слънчево затъмнение се появява само на всеки две или три години. Средната продължителност на пълната фаза е само две - три минути (до 7 мин.). Ето защо изучаването на промените в короната от едно наблюдение на затъмнение до друго ще начертае картината на нейната еволюция.

Основните характеристики на короната се контролират от промените в конфигурацията на глобалното магнитно поле на Слънцето. Ето защо изследванията на формата на слънчевата корона ни дават информация за дългосрочни вариации и структурата на неговите голямомащабни магнитни полета.

Екваториалната равнина на диполната компонента на слънчевото магнитно поле се разглежда като основна равнина на слънчевата корона с всички нейни характеристики. Позицията на тази равнина определя ориентацията на хелиосферния токов слой и външната слънчева корона в 3D пространството. Нейният наклон спрямо слънчевата екваториална равнина варира от почти нула при слънчевия минимум до почти 90° при слънчевия максимум, което е причината за коренно различния вид на короната.

Короната при минимум в слънчевата активност е много по-слаба от короната при максимум поради липсата на големи активни области. Короната е източникът на бързия и бавен слънчев вятър и на преходни събития като изригвания, струи, нишки и изхвърляне на коронална маса (CME). Преходните събития могат значително да променят структурата на короната, тъй като особено короналните изхвърляния на маса често водят до глобална магнитна реорганизация.

Короналните структури са ярки (аркади, примки, шлемовидни ленти) или тъмни (коронални дупки). Плътността и температурата на плазмата силно зависят от топологията на магнитното поле: ярките образувания имат затворени магнитни структури (биполарни и активни области), докато тъмните коронални дупки имат „отворена“ магнитна структура към междупланетното магнитно поле. „Шлемовете“ са свързани със слънчеви активни региони и са центрирани върху слънчеви петна или протуберанси. Над шлема дълга права лента продължава навън и остава неусукана дори до разстояние над 12 слънчеви радиуса.

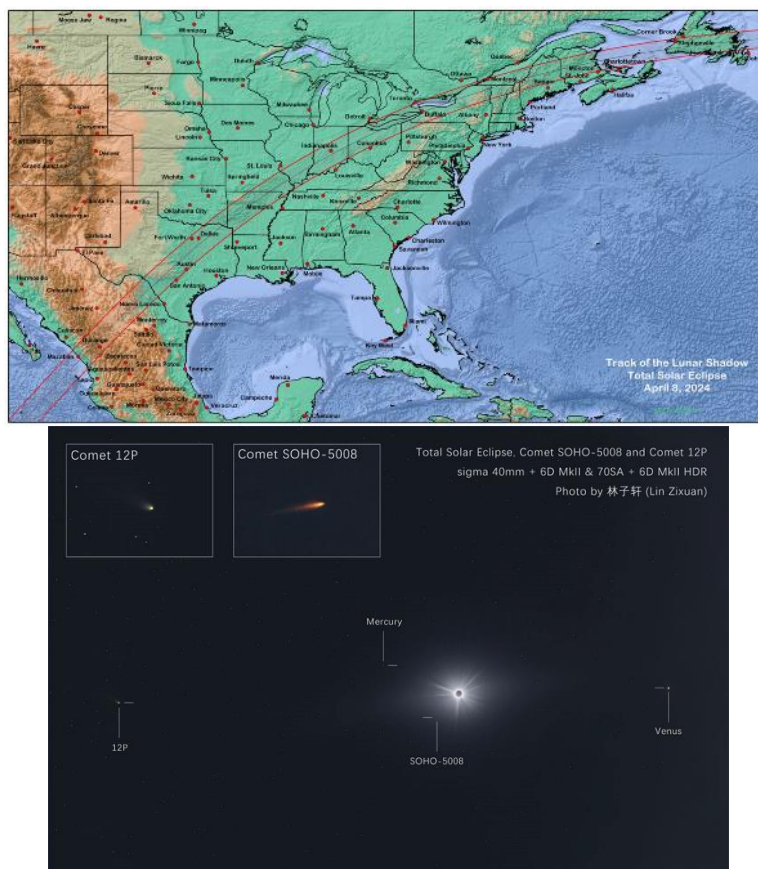
Слънчево затъмнение настъпва, когато новата луна е разположена точно между Земята и слънцето и хвърля сянката си върху Земята. Освен това, луната трябва да е със същия размер като слънцето или малко по-голяма, така че дисковете напълно да се покриват и да се види външната атмосфера на слънцето, короната. Това зависи

от разстоянието на Луната от Земята. Орбитата на Луната около Земята има елипсовидна форма, така че всеки месец тя преминава през най-далечната точка от Земята - апогея и най-близката - перигея, което я прави да изглежда малко по-малка или малко по-голяма от средното.

Нашите наблюдения следват предишните ни програми за изследване на структурата и динамиката на бялата и монохроматична корона [1–6], за отговора на земната атмосфера [7, 8], за обучението чрез научни експерименти и разпространение на занаята [9].

Наблюдения и методи

На 8 април 2024 г. Луната се покрива 100% от слънчевия диск. Големината на слънчевото затъмнение е частта от диаметъра на слънцето, покрит от луната, която бе 1,0566 [10]. Тогава, на територията на Тихия океан, Мексико, САЩ, Канада и Атлантическия океан преминава сянката на Великото Северо-Американско пълно слънчево затъмнение. Тя пресича четири мексикански щата Синалоа, Наярит, Дуранго и Коауила, преди да премине над 15 щата на САЩ: Тексас, Оклахома, Арканзас, Мисури, Илинойс, Кентъки, Тенеси, Мичиган, Индиана, Охайо, Пенсилвания, Ню Йорк, Върмонт, Ню Хемпшир и Мейн. След това преминава през Канада, като пълното затъмнение е наблюдавано в шест канадски провинции: Онтарио, Квебек, Ню Брънзвик, остров Принц Едуард, Нова Скотия и Нюфаундленд [11].



Фиг. 1. Пътят на пълното слънчево затъмнение на 8 април 2024 г., който пресича САЩ и небето по време на пълното слънчево затъмнение на 8 април 2024 г. [12]

Великото Северо-Американско пълно слънчево затъмнение е интересно с това, че минава през цяла Северна Америка и е почти два пъти по-дълго от Великото Американско затъмнение през 2017 г. (2 мин. и 38 сек.). Освен това, слънцето е близо до максимума в своята активност през 25-тия, 11-годишен Слънчев цикъл когато короната е сферично симетрична. Друг интересен факт е, че по време на пълната фаза могат да се видят планетите Юпитер, Венера, Сатурн и Марс. Очакваше се да се види и кометата 12P/Понс-Брукс, но тя се оказва доста слаба и вместо нея бе наблюдавана току-що откритата (сутринта на 8 април 2024г.) от астроном – любител комета SOHO-5008 по изследване на изображения от обсерваторията SOHO. Няколко часа след снимката кометата се разпада в лъчите на слънцето. Наблюденията на такива „слънчеви“ комети от земята са изключително редки и фотографията на 5008-ата комета, открита от SOHO- става възможна само благодарение на пълното слънчево затъмнение.

За наблюдение на пълното слънчево затъмнение специално бе организирана експедиция до град Кервил, щат Тексас, САЩ, разположена в линията на тоталитета (Фиг. 1). Координатите на мястото на наблюдение и характеристиките на затъмнението са следните:

Географска ширина: N 30° 03'16.6", Географска дължина: W 099° 01'35.3"

Надморска височина: 581 m, Начало на затъмнението: 20:14:43 UT,

Край на затъмнението: 22:55:29 UT, Максимална фаза: от 21:32:07 UT до 21:36:31 UT

Височина на слънцето в максималната фаза: 67.5°

Пълна фаза: 4 min 24 sec, Ширина на Лунната сянка: 193.4 km

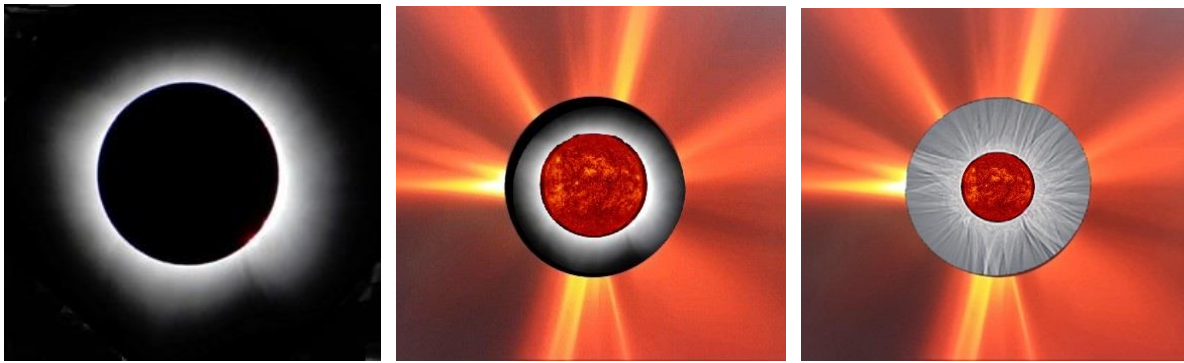
Слънчевата корона в бяла светлина е наблюдавана с 400 mm обектив Canon EOS R8. Снимките са направени с различна експозиция – къса за вътрешната корона и дълга за външната корона (Фиг. 2). По този начин можем да получим съставно изображение и да изследваме структурата на короната в бяла светлина. За емисионната корона беше използвана камера Canon EOS 80D с тясноивичен интерференчен филтър на дължината на вълната на зелената коронална линия на 14-кратно йонизираното желязо Fe XIV 530,3 nm. Камерата за цялото небе (All sky camera) Digital SLR Camera for Canon EOS 750 D Meike 8 mm, F/3.5 беше използвана за заснемане на изображение на 360-градусовия ореол около сянката на луната на хоризонта, по време на пълното слънчево затъмнение. Температурата на въздуха по време на затъмнението бе измерена на височина 0,5 m.



Фиг. 2. Апаратура за наблюдение на пълното слънчево затъмнение на 8 април 2024 г., разположена близо до град Кервил, щат Тексас, САЩ

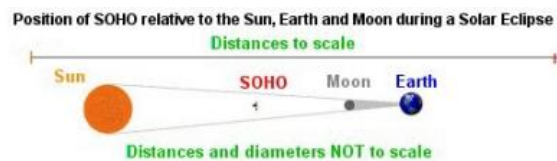
Резултати

Короната на слънцето в бяла светлина: Короната на слънцето в бяла светлина се вижда на Фиг. 3.



Фиг. 3. Комбинация от изображение на короната (черно-бяло) на 8 април 2024, което заобикаля изображението, получено от SDO (AIA) - 4 телескопа на борда на Обсерваторията за слънчева динамика (SDO) на НАСА - в емисията на хелия при 304Å (HeII) в ултравиолетовата област. И двете изображения са вътре в затъмняващия диск на C2 коронографа на инструмента LASCO на Военноморската изследователска лаборатория, монтиран на Слънчевата и Хелиосферна обсерватория (SoHo) – проект на Европейската Космическа Агенция (ESA) и Националното Управление по Въздухоплаване и Изследване на Космическото Пространство на САЩ (NASA).
 Ляво – Кервил, дясно – съставно изображение на Петер Хоралек от Дуранго, Мексико - HDR - заснемане с висок динамичен обхват (експозиция от 1/4000 s до 2 s с 200 mm обектив и от 1/500 s до 4 s с 1100 mm обектив). Използвани са общо 83 изображения [13].

Това комбинирано изображение на затъмнението в бяла светлина, в ултравиолета и изображението от изкуственото затъмнение, получено чрез използване на диск, който закрива ярката светлина от слънцето (Фиг. 3) е в основата за нашия анализ на голямомасштабната структура на короната в бяла светлина. Изображенията C2 показват короната на разстояние до $12 R_{\odot}$ (8,4 милиона километра от Слънцето).



Фиг. 4. Местоположението на спрямо Слънцето, Земята и Луната по време на слънчево затъмнение

SOHO се намира в първата точка на Лагранж (Фиг. 4) и поради това не може да наблюдава затъмнението. Приборите, обаче, продължават да събират изображения както на короната, така и на повърхността на слънцето преди, по време и след затъмнението, което добавя ценна информация към тълкуването на изображенията, получени от наземни инструменти.

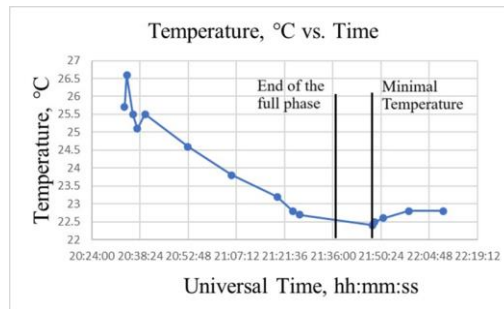
Съставното изображение от Фиг. 3 дава възможност да проследим характерните особености на короната от повърхността на слънцето (HeII) през вътрешната и средна корона (короната в бяла светлина) до $12 R_{\odot}$ (C2 коронографа на LASCO). Виждаме множество ясно изразени шлемовидни стримери на всички географски ширини, което е характерно за слънчев максимум. Това пълно слънчево затъмнение е на възходящия клон на 25-ия слънчев цикъл, подобно на пълното слънчево затъмнение на 11 август 1999 г. (23-ти слънчев цикъл) и на 14 ноември 2012 г., наблюдавано в Австралия по време на 24-ия слънчев цикъл, който се оказва с най-нисък максимум.

Формата на короната е сферично симетрична, типична за максимум в слънчевата активност. Месечният брой на слънчевите петна за 8 април 2024 г. е 137 [14].

За съжаление, не успяхме да получим ясни изображения в зелената коронална линия и на ореола около сянката на луната на хоризонта поради високата облачност.

Реакция на приземната атмосфера

Интересно е да се изследва реакцията на атмосферата и климатичните промени, когато падащата слънчева радиация рязко намалява по време на пълно слънчево затъмнение. Атмосферната температура и налягане се променят бързо, което води до метеорологични аномалии.

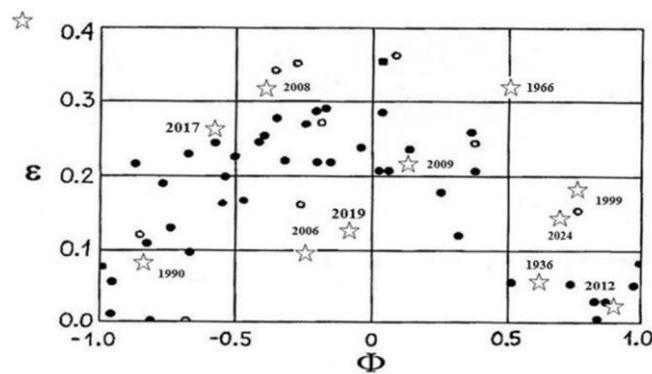


Фиг. 5. Зависимост на температурата от времето

Измерената по време на затъмнението температурата на разстояние 0.5 m над земята спада с 3.3°C 11 мин и 14 сек след края на пълната фаза (Фиг. 5). Спадът е малък в сравнение с други затъмнения поради облачното време през целия ден [8].

Коефициент на елиптичност

Индексът на Лудендорф (коефициент на елиптичност) е първият количествен параметър, въведен за анализ на глобалната структура на слънчевата корона. Той се увеличава монотонно от лимба до известно разстояние r , което варира от затъмнение до затъмнение в диапазона от $\sim 1,4 R_{\odot}$ до $\sim 2,2 R_{\odot}$ и е чувствителен към съществуването на коронални стримери на големи хелиографски ширини. Този коефициент на елиптичност показва, че короната е много кръгла при слънчев максимум, когато стримерите излизат от толкова много географски ширини, и е много по-елипсовидна при слънчевия минимум, когато само няколко стримера се виждат около екватора. По този начин коефициентът на елиптичност на Лудендорф показва цикъла на слънчевата активност. При фаза 0.69 на цикъл 25 индексът на елиптичност на Ludendorff достига 0.14 (Фиг. 6), което повтаря цикличните изменения, получени от наблюденията от 1851 г. насам [15, 16].



Фиг. 6. Коефициентът на елиптичност на слънчевата корона ϵ като функция на фазата на слънчевия цикъл Φ за 11 пълни слънчеви затъмнения са показани като бели звезди. Другите данни са за 51 слънчеви затъмнения [17].

Индексът на елиптичност на слънчевата корона, който е най-голям при минимум на активност и обратно, може да се разглежда като косвена характеристика на магнитно поле на Слънцето на двата полюса (полярното магнитно поле), което също е най-голямо при минимум според теорията на динамото. По време на слънчевия минимум магнитното поле на слънцето е близо до дипол, с един северен полюс и един южен полюс, подобно на магнитното поле на Земята. Но докато се движи към слънчевия максимум, магнитното поле на слънцето става по-сложно, без ясно разделяне на северния и южния полюс. Когато премине слънчевия максимум и настъпи слънчевият минимум, слънцето се връща към диполно магнитно поле с обръната полярност.

Литература:

1. 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, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* ISSN: 1364-6826, v. 70, 2008, pp. 414–419.
2. Shopov, Y. Y., D. A. Stoykova, K. Stoitchkova, L. T. Tsankov, A. Tanev, Kl. Burin, St. Belchev, V. Rusanov, D. Ivanov, A. Stoev, P. Muglova, I. Iliev, Structure of the solar dust corona and its interaction with the other coronal components, *JASTP*, ISSN: 1364-6826, v. 70, 2008, pp. 356–364.
3. Stoeva P. V., Stoev A. D., Kuzin S. V., White light corona at different phases of the solar cycle, *Sun and Geosphere*, 6(1), 2011, pp. 33–35, ISSN 1819-0839.
4. Stoeva P., A. Stoev, S. Kuzin, Solar Corona In White Light During Five Total Solar Eclipses, *Sun and Geosphere*, Vol.7 (1), 2012, pp. 81–84, ISSN: 1819-0839.
5. Marzouk Beshir, Stoeva Penka and Stoev Alexey, White Light Coronal Structures and Flattening During Six Total Solar Eclipses, Elsevier Press, *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, *SJR Directory of Open Access Journals (DOAJ)*, 2016, 5, pp. 297–300, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.08.003>.
6. Stoeva Penka, Alexey Stoev, Sergey Kuzin, Beshir Marzouk, Andrey Pertsov, Mohamed Semeida, 2018, Structure and dynamics of the solar corona observed during different phases of the solar cycle, *Proceedings of the 41st Annual Seminar*, <http://pgia.ru/seminar>, pp. 69–75. ISSN 2588-0039.
7. Stoev Alexey D. , Penka V. Stoeva, Nadya Kiskinova, and Nikolay Stoyanov, Evolution of the basic micrometeorological parameters during the total solar eclipse of 29 March 2006 at Manavgat, Turkey, Gennadii G. Matvienko and Victor A. Banakh Editors, *Proceedings of SPIE, Atmosphere Physics*, ISSN 0277-786X, Vol. 6936, pp. 517–521, 69361Z (2008); DOI link: <http://dx.doi.org/10.1117/12.783768>.
8. Stoev A., Stoeva P., Kuzin S., Total Solar Eclipses and Atmospheric Boundary Layer Response, *Sun and Geosphere*, *The International Journal of Research and Applications*, Vol.7 - No.1 – 2012, pp. 103–107 ISSN: 1819-0839.
9. Stoev A.D., Stoeva P.V., Amateur observations of solar eclipses and derivation of scientific data, 36th COSPAR Scientific Assembly. Beijing, China. 16-23 July 2006. *J. Adv. Space Res.*, doi link: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2008.07.009>, *Advances in Space Research* v 42, issue 11 (2008) pp. 1806–1813, ISSN 02731177, 18791948.
10. Големина на слънчевото затъмнение - EclipseWise.com
11. Littmann M. and Espenak F., 2023, *Totality: The Great North American Eclipse of 2024*, Oxford University Press, ISBN-13 978-0198879084.
12. Небето по време на пълното слънчево затъмнение на 8 април 2024 г. - <https://www.astronet.ru/db/msg/1926494>
13. Съставно изображение на Петер Хоралек - <https://www.petrhoralek.com/?p=24033>
14. Брой слънчеви петна - <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
15. Pasachoff J. et al., Images and Spectra of the 2017 Total Solar Eclipse Corona From Our Oregon Site, *Frontiers in Astronomy and Space Science*, 2018, doi: 10.3389/fspas.2018.00037.
16. Pasachoff Jay M., Rušin Vojtech, White-Light Coronal Imaging at the 21 August 2017 Total Solar Eclipse, *Solar Physics*, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11207-022-01964-z>.
17. Gulyaev, R. "Solar cycle variation of the solar corona shape. A new outlook", *Astron. Astrophys. Transactions*, 13, 1997, pp. 137–144.