

Dr Huw Morgan

**Corona'r haul:
Astudiaeth o strwythur
atmosffer yr haul**

Gwerddon

CYFNODOLYN ACADEMAIDD CYMRAEG

Golygydd Yr Athro Ioan Williams

Corona'r haul: Astudiaeth o strwythur atmosffer yr haul

Dr Huw Morgan

Cyflwyniad

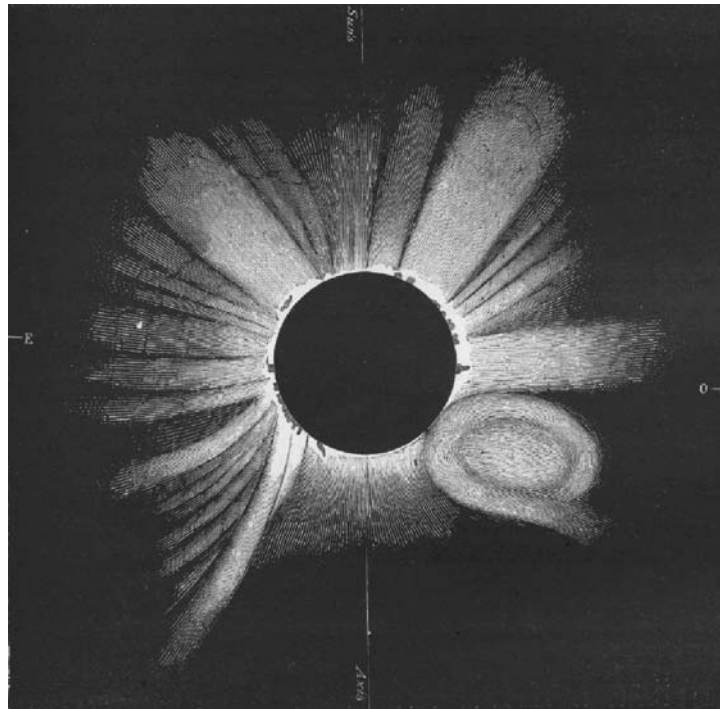
Proses araf, yn ymestyn dros ddegawdau ail hanner y 19eg ganrif, oedd i'r sefydliad gwyddonol Fictorianaidd sylweddoli bod cysylltiad uniongyrchol rhwng digwyddiadau ffrwydol ar yr haul a stormydd magnetig ar y ddaear. Er i'r seryddwr uchel ei barch Richard Carrington weld brychyn ar yr haul (*sunspot*) yn goleuo'n ddramatig a sydyn ym 1849, a'r ddaear yn nofio mewn storm fagnetig am ddiwrnodau yn dilyn yr arsylwad lwcus, roedd hi'n anodd i wyddonwyr y cyfnod gredu fod modd i'r haul greu y fath egni, ac i'r egni hwnnw drafaelu o'r haul i'r ddaear (Clark, 2007). Rydym nawr wrth gwrs yn gwybod bod nwy poeth (neu plasma) yn llifo'n ddioreth o arwyneb yr haul allan i'r gofod. Mae'r planedau i gyd yn nofio yn y nwy hwn, ac yn troelli yn atmosffer tenau yr haul. Yn agos i'r haul, fe elwir yr atmosffer yn 'gorona' oherwydd ei ymdebygrwydd i goron lachar yn ystod eclips llwyr o'r haul. Yn bellach allan i'r gofod, fe elwir y llif nwy yn 'wynt yr haul'. Mae symudiadau troellog a sydyn ar arwyneb yr haul yn medru arwain at ffrwydradau magnetig anferth. Mae'r ffrwydradau hyn yn saethu allan i'r gofod ac yn achlysurol mae'r ddaear yn sefyll yn eu llwybr. Ar yr adegau hyn mae miliynau o dunelli o nwy egniol yn bwrw atmosffer y ddaear, ar gyflymder o hyd at 2000km/s. Alldafliadau mas coronaidd (AMC, *Coronal mass ejections*) yw'r enw ar y ffenomen hon. Yn lwcus i ni, mae maes magnetig y ddaear yn gweithredu fel tarian, ac yn ein harbed rhag y gwaethaf o effaith andwyol y storm. Er hyn, mae stormydd o'r haul yn fygythiad mawr i loerennau a dynion gofod, gridiau pŵer ac awyrennau ar ledredau uchel, cyfathrebu radio a ffôn, a hefyd yn arwain at ffenomen brydferth Goleuadau'r Gogledd (yr aurora). Mae'n ffasiynol yn ddiweddar i labelu'r astudiad o'r corona, gwynt yr haul a stormydd o'r haul yn 'dywydd gofod'.

Er fod pwyslais mawr ym maes tywydd gofod ar astudio a deall y stormydd mwyaf o'r haul, mae llawer nad ydym yn gwybod am y corona tawel – y corona cefndirol a chyson sy'n llifo allan o'r haul i lenwi'r heliosffer (ardal fawr o'r gofod sy'n cwmpasu'r planedau a'r holl ardal leol o'r gofod lle mae'r haul yn dylanwadu). Un broblem yw dyfalu beth yw gwir siâp, neu strwythur, y corona. Nid gwrthrych unffurf crwn mohono; ceir strwythurau o ddwysedd amrywiol yn ymestyn i'r gofod o wahanol rannau o'r haul. Rydym yn gwybod hyn ar sail arsylwadau amrywiol, arsylwadau sydd yn gwella mewn safon o flwyddyn i flwyddyn. Cyn trafod strwythur y corona, a'r technegau amrywiol i'w ddyfalu, mae'r adran nesaf yn rhoi braslun o'r math o arsylwadau sy'n cael eu gwneud o'r corona.

Arsylwadau o'r corona

Lwc bur yw fod y lleuad a'r haul yn ymddangos yr un maint o'n persbectif ni ar y ddaear. Dyma'r rheswm dros wychder ffenomen yr eclips, pan mae'r lleuad yn digwydd gorchuddio gwyneb yr haul. Ar yr adegau hyn, mae'r golau llachar o'r haul yn cael

ei gysgodi, ac mae modd gweld gogoniant y corona â'r llygaid. Dyma'r unig fodd o weld y corona yn naturiol, gan ei fod oddeutu miliwn o weithiau yn llai llachar na'r haul ei hun. Mae ffenomen yr eclips wedi galluogi gwyddonwyr i astudio siâp y corona ers nifer o ganrifoedd. Cyn dyddiau ffotograffiaeth, byddai gofyn i seryddwr da i fod yn arlunydd â llygaid da, a byddai rhaid ceisio darlunio'r corona yn ystod ychydig funudau yr eclips. Mae delwedd ffigwr 1 yn dangos un darlun o'r fath, a wnaed yn ystod eclips 1860 (Eddy, 1974). Roedd yr eclips hwn yn arbennig oherwydd roedd yna AMC mawr o'r haul yn digwydd trafaelu trwy'r corona yn ystod yr eclips. Mae'r alldaflriad hwn i'w weld yn ffigwr 1 fel swigen gron gymleth yn ochr dde-orllewinol y corona. Ar y pryd, doedd dim amgyffred o alldaflriadau o'r haul, ac yn rhyfedd ddigon fe anwybyddwyd y siâp od gan wyddonwyr y cyfnod. Ond un nodwedd o'r corona oedd yn amhosib i'w hanwybyddu oedd siâp cymhleth y corona, a'r modd roedd y siâp yn newid o un eclips i'r llall. Mae arsylwadau eclips yn dal yn hynod o bwysig i wyddonwyr heddiw (gweler ffigwr 2), ac rwyf yn ystyried fy hun yn lwcus i fod yn rhan o dîm eclips yr Institute for Astronomy, Prifysgol Hawaii. Mae'r arsylwadau rydym yn eu gwneud yn cyson arwain at ddarganfyddiadau newydd o'r corona (gweler, er enghraifft, Habbal et al. (2007)).



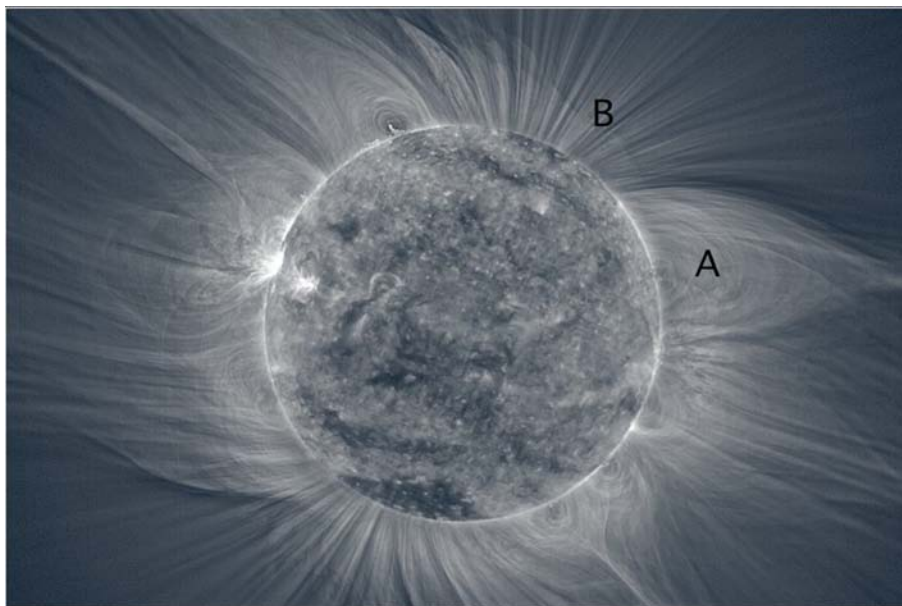
Ffigwr 1: Darlun a wnaed â llaw o eclips 1860 gan G. Tempel. Yn fuan wedi'r eclips enwog yma, dechreuwyd defnyddio ffotograffiaeth i gofnodi eclips yr haul. Sylwer ar y strwythur od gron i'r dde o'r cyhydedd ar y ochr orllewinol.

Yn nhridegau yr ugeinfed ganrif, fe ddyfeisiwyd y coronagraff gan y Ffrancwr Bernard Lyot (Lyot, 1932). Mae coronagraff yn ein galluogi i arsylwi'r corona y tu allan i eclips. Yn syml, telesgop yw coronagraff, gydag *occulter* i atal y golau llachar o'r haul – tebyg i eclips artiffisial (mae hyd yn oed y rhannau mwyaf llachar o'r corona dros filiwn o weithiau yn llai llachar na'r haul ei hun). Erbyn heddiw, mae'r coronagraffau gorau ar loerennau yn y gofod, yn rhoi arsylwadau o'r corona nifer o weithiau bob awr ar unrhyw

adeg. Lanswyd y llong ofod *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) ym 1995 yn benodol i arsylwi yr haul, y corona a gwynt yr haul. Un offeryn pwysig ar y lloeren yw'r *Large Angle Spectroscopic Coronagraph* (LASCO) (Brueckner et al., 1995). Coronograff yw LASCO, ac mae fy ngwaith ymchwil tomograffi yn seiliedig ar arsylwadau gwych yr offeryn pwysig hwn. Mae rhannau allanol y corona a ddangosir yn ffigwr 3 wedi eu prosesu o arsylwadau gan LASCO.

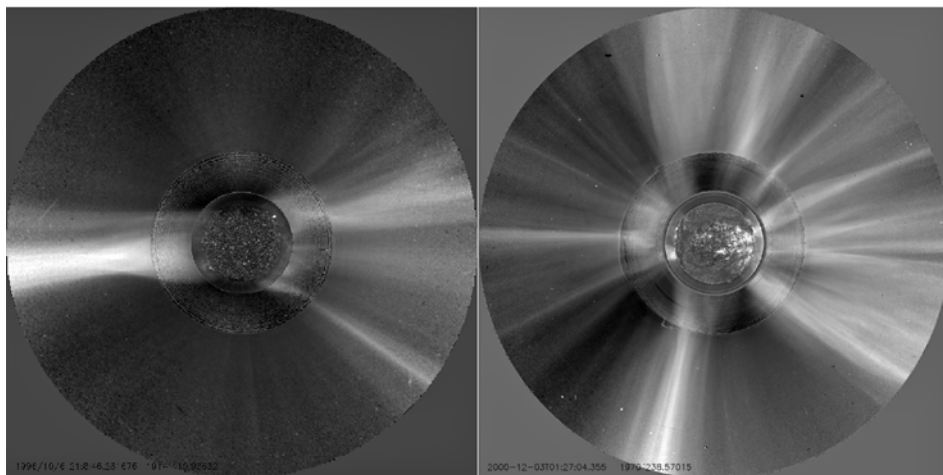
Cyflwyniad i strwythur y corona

Natur ddeuol sydd i'r corona. Ceir strwythurau sy'n cynnwys nwy o ddwysedd uchel, â chyflymder all-lif araf (~300km/s) sy'n tarddu o ardaloedd gerllaw strwythurau maes magnetig caeedig ar wyneb yr haul. Labelwyd ardal o faes magnetig caeedig yn 'A' yn ffigwr 2. Gelwir y rhannau llachar hyn o'r corona yn ffrydiau (*streamers*). Ceir hefyd strwythurau sy'n cynnwys nwy dwysedd isel ond ag all-lif cyflym (~800km/s) sy'n tarddu o ardaloedd eang o faes magnetig agored ar wyneb yr haul. Labelwyd un o'r ardaloedd hyn yn 'B' yn ffigwr 2, ac fe'u gelwir yn dyllau coronaidd. Gwellir esiamplau o ymddangosiad deuol y corona yn ffigwr 3, lle mae ffrydiau yn ymddangos yn llachar, a thyllau coronaidd yn ymddangos yn dywyll.



Ffigwr 2: Delwedd o'r haul a'r corona. Cyfunwyd arsylwadau o ddau offeryn gwahanol i greu y cyfanwaith hwn. Gwelir y corona mewn golau gweledol yn amgylchynu'r haul mewn manylder arbennig. Tynwyd y llun hwn yn ystod eclips llwyr yr haul ym mis Mawrth 2006 o anialwch y Sahara yn Libya, a phroseswyd y llun i bwysleisio'r manylion lleiaf. Mae disg yr haul ei hun yn arsylwad gan delesgop arbenigol (Extreme UltraViolet Imaging Telescope (EIT) ar long ofod SOHO) mewn golau uwchfioled a allyrwyd gan ionau haearn ar dymheredd uchel iawn (dros 1 miliwn K). Mae'n amlwg o'r llun hwn fel mae maes magnetig yr haul yn dominyddu strwythur y corona. Cyfeirir at labelau A a B yn y prif destun. Diolch i'r Athro Miloslav Druckmüller (Sefydliad Mathemateg, Prifysgol Technegol Brno, Gweriniaeth Siec) am ganiatâd i ddefnyddio'r ddelwedd hon.

Mae'r ddau llun yn ffigur 3 yn arddangos dau eithaf o ffurf y corona dros gylchred bywiogrwydd (*activity cycle*) yr haul, lle mae'r maes magnetig yn newid o siâp tebyg i ddeupol syml (fel sydd gan y ddaear neu fagned bar; gweler y ddelwedd ar y chwith o ffigur 3), i ffurf lawer mwy cymhleth (gweler y ddelwedd ar y dde o ffigur 3), yna nôl i ddeupol syml dros gyfnod o ~11 o flynyddoedd. Yn ystod y cylchred hwn, mae polaredd y maes magnetig yn newid o'r gogledd i'r de. Felly mae maes magnetig yr haul yn dylanwadu ar ffurf y corona ar raddfa enfawr. Mae'r dylanwad hwn i'w weld yn glir yn nelwedd ddramatig ffigur 2, delwedd sy'n awgrymu'n uniongyrchol bod yna faes magnetig yn ymestyn allan o'r haul i'r corona sy'n chwarae rhan bwysig yn llunio strwythur y corona. Yn ffigur 2 gwelir llinellau mân a llachar yn amlinellu siâp y maes magnetig cymhleth yma. Mae'r maes magnetig yn llwyr reoli llif a siâp y corona ger yr haul, *ond ar y foment does dim modd mesur y maes magnetig hwn yn uniongyrchol*. Ni allwn ond dynnu lluniau o ba mor llachar yw'r corona, a dyfalu beth yw strwythur y maes magnetig yn ôl y siapau a welir yn y delweddau. Ychwanegwch i'r broblem y ffaith bod llun yn beth dau ddimensiwn, hynny yw, yn achos y corona, yn ddelwedd fflat o rywbeth sydd mewn gwirionedd yn wrthrych cymhleth mewn tri dimensiwn. Mae'n amhosib felly penderfynu ar sail un llun beth yw gwir siâp y corona mewn tri dimensiwn. Mae'n rhaid cael cyfres o arsylwadau wedi eu gwneud dros gyfnod hir, lle mae'r haul (a'r corona) wedi troi ac yn cael ei arsylwi o nifer o onglau gwahanol. Fel y disgrifir yn yr erthygl hon, mae hyn yn ein galluogi i ddyfalu gwir strwythur 3D y corona trwy'r defnydd o dechnegau tomograffi.



Ffigur 3: Gwneir y delweddau hyn o'r corona drwy gyfuno arsylwadau o dri choronagraff arbenigol sydd yn edrych ar rannau gwahanol o'r corona, ac yna fe nythir eu harsylwadau i gael delwedd gyflawn o'r corona estynedig. Mae'r rhan fewnol, sy'n dangos disg yr haul ei hun, yn dangos allyriad mewn golau uwchfioled o ionau ar dymheredd poeth. Mae'r rhan nesaf wedi ei gwneud gan goronagraff ar ben mynydd Mauna Loa yn ynysoedd Hawaii ac mae'r cylch allanol o goronagraff LASCO ar loeren SOHO. Mae'r ddelwedd ar y chwith yn dangos y corona ar gyfnod o fywiogrwydd isel (yn ystod 1997), lle mae ffrydiau yn tueddu i ymddangos o amgylch y cyhydedd yn unig, ac ardaloedd mawr o ddwysedd isel (mannau tywyll yn y llun) uwchben pegynau'r gogledd a'r de. Mae'r ddelwedd ar y dde yn dyddio o gyfnod bywiogrwydd uchel (2000), pan oedd nifer fawr o ffrydiau yn ymddangos ar bob lledred. Proseswyd y lluniau hyn gan y dechneg NRGF (Morgan et al., 2006).

Tomograffi y corona

Mae'r corona yn optegol denau. Hynny yw, mae dwyster y plasma yn ddigon isel fel gall y rhan fwyaf helaeth o belydrau golau basio trwy'r corona heb ymyrraeth gan y plasma. Er hyn, mae ffractsiwn bach iawn o'r golau o'r haul yn rhyngweithio ag electronau rhydd a llwch yn y corona gan ymwasgaru i bob cyfeiriad, a dyma rydym yn ei fesur mewn arsylwad eclips neu goronagraff. Yn achos yr electronau, ymwasgaru Thomson yw'r enw ar y broses yma. Mae rhai o'r ffotonau yn gwasgaru i gyfeiriad ein telesgop ac yn cael eu mesur. Mae ardaloedd mwy dwys o'r corona yn cynnwys mwy o electronau ac felly'n fwy llachar nag ardaloedd llai dwys. Fel arfer, yn yr electronau yn unig y mae gennym ddiddordeb, felly rhaid defnyddio technegau amrywiol i gael gwared â'r golau a ddaw o'r llwch. Gweler, er enghraifft, Morgan & Habbal (2007c).

Mae tomograffi yn defnyddio cyfres o fesuriadau wedi eu cymryd o sawl ongl i gyfrifo siâp 3D gwrthrych. Mae nifer o dechnegau tomograffi wedi eu haddasu eisoes i gymhwysu tomograffi ar y corona. Cyfeiriwn y darllynydd at waith Frazin (2000), lle rhoddir braslun o hanes y maes, a'r technegau cyffredin cyfoes. Gelwir tomograffi yr haul yn Tomograffi Cylchdroadol yr Haul (TCH, *Solar Rotational Tomography*). Mewn tomograffi meddygol, mae cyfres o luniau (lluniau pelydr-X, er enghraifft) yn cael eu tynnu o nifer o onglau o amgylch y claf. Gyda'r corona, nid oes nifer o delesgopau yn amgylchynu'r haul yn edrych o amryw onglau, felly rhaid aros i'r haul a'r corona droelli yn araf. Gan fod coronagraff yn arsylwi y corona cyfan (hynny yw, yr ochr ddwyreiniol, sy'n troelli tuag atom, a'r ochr orllewinol, sy'n troelli i ffwrdd), does dim angen ond hanner cylchdro (tua 14 diwrnod) i greu map o strwythur y corona. Mae nifer o broblemau yn perthyn i unrhyw dechneg TCH. Yn fras:

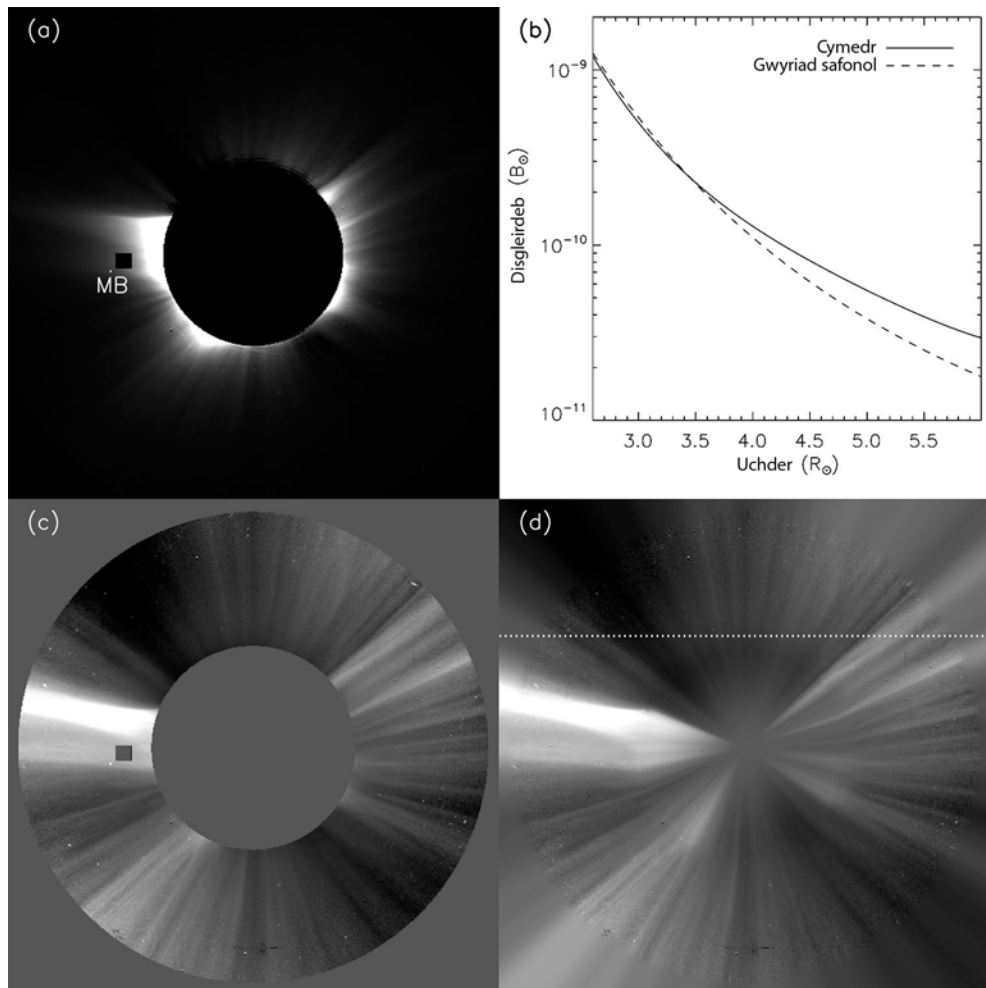
- Bydd strwythur y corona yn newid yn raddol dros y cyfnod hanner-cylchdro. Yn gyffredinol, nid yw technegau tomograffi yn gallu dygymod â hyn.
- Mae AMC mawr yn medru digwydd sawl gwaith mewn diwrnod, a gall hyn ddifetha'r broses domograffi wrth i'r strwythurau llachar basio'n gyflym drwy ddelweddau'r coronagraff.
- Does dim modd arsylwi y corona cyfan ar yr un pryd. Mewn unrhyw arsylwad, ni wêl y coronagraff ond rhan o'r corona (er enghraifft, mae un rhan fawr o'r corona yn cuddio y tu ôl i'r haul). Mae hyn yn achosi cur pen mawr i dechnegau tomograffi.
- Mae disgleirdeb y corona yn disgyn yn serth gyda phellter o'r haul (ffactor o $\sim 10^3$ neu fwy rhwng uchder o 2.2 a $6R_{\odot}$). Mae hyn yn arwain at ansadrwydd mawr yn nhechnegau tomograffi. Yn syml, ystyriwch wall neu ansicrwydd o 1 y cant yn agos i'r haul. Mae'r gwallau hyn yn ddeg gwaith mwy disglair na mesuriad yn bell o'r haul, ac mae tomograffi yn dibynnu ar gymharu'r disgleirdeb yn bell ac yn agos o'r haul.

Mae'r adran hon yn rhoi crynodeb o'r technegau a ddatblygwyd i oresgyn rhai o'r problemau hyn. Rhoddir disgrifiad mwy manwl yn Morgan et al. (2009).

Yr hyn sy'n galluogi'r dechneg domograffi i lwyddo yw set o dechnegau prosesu delwedd a ddatblygwyd yn arbennig ar gyfer lluniau coronagraffig, a elwir yn dechneg NRGF, ac a ddisgrifir mewn manylder gan Morgan et al. (2006). Fel y crybwyllwyd eisoes, mewn unrhyw ddelwedd o'r corona, mae yna gwmp serth yn y disgleirdeb gyda phellter o'r haul. Mae hyn yn ei gwneud hi'n anodd os nad yn amhosibl i astudio strwythur y corona. Mae'r dechneg NRGF yn gwastatu'r cwmp serth mewn ffordd gywir a theg, gan ddatgelu gwir strwythur y corona ar raddfeydd mawr a bach. Yn ffigwr 4a, dangosir delwedd coronagraffig LASCO C2 heb y dechneg NRGF. Ar gyfer y ddelwedd hon, rwyf wedi calibreiddio'r data a diddymu'r golau o'r llwch yn y corona (yr F-gorona). Mae'r ddelwedd hon yn dangos yn glir pa mor llachar yw'r corona ger yr haul, ac fel mae'r disgleirdeb hwn yn cwmpo'n sydyn gydag uchder. Gallwn gymryd unrhyw ddelwedd coronagraffig, a mesur y cwmp cyfartalog o ddisgleirdeb fel ffwythiant o'r pellter o ganol yr haul. Mae ffigwr 4b yn dangos y mesur hwn. Gallwn hefyd fesur yr ystod o ddisgleirdeb o amgylch y cyfartaledd, ac felly gyfrifo gwriad safonol fel ffwythiant o'r uchder. Dangosir hyn hefyd yn ffigwr 4b. Un ffordd naif o ddiddymu'r cwmp mewn disgleirdeb yn nelwedd 4a fyddai tynnu y cwmp cyfartalog. Y broblem gyda'r dechneg hon yw y byddai'r ystod rhwng ardaloedd llachar a thywyll ar uchder penodol yn fawr ger yr haul, ac yn fach ymhell o'r haul. Yn wir, gallwn weld o 4b fod yr ystod mewn disgleirdeb mor uchel â'r cyfartaledd ger yr haul, ac yn cwmpo'n fwy serth na'r cyfartaledd gydag uchder. Techneg lawer mwy effeithiol yw tynnu'r cyfartaledd, a'i rannu gan y gwriad safonol:

$$\tilde{B} = (B_i - \langle B \rangle) / \sigma(\rho),$$

Ile ρ yw'r pellter o ganol yr haul mewn delwedd, B_i yw'r disgleirdeb gwreiddiol a \tilde{B} yw'r disgleirdeb wedi ei drawsnewid, neu ei normaleiddio. $\langle B \rangle$ a σ yw'r cyfartaledd a'r gwriad safonol mewn disgleirdeb fel ffwythiannau o ρ (dangosir y rhain yn ffigwr 4b). Canlyniad y broses syml hon yw delwedd 4c. Mae'r disgleirdeb wedi ei normaleiddio i gyfartaledd o 0 a gwriad safonol o 1 ar bob uchder. Wedi'r broses hon, gwelwn yn nelwedd 4c strwythur yn ymestyn trwy'r corona, strwythur sydd yn agos iawn at fod yn strwythur reiddiol ar bob uchder. Mae'r broses NRGF yn cael ei defnyddio'n gyson fel techneg prosesu delweddau safonol, ac wedi profi ei gwerth yn barod wrth ddatgelu gwir strwythur y corona (Morgan & Habbal (2007a, 2007b, 2010c); He et al. (2009); Wang et al. (2010); Kienreich et al. (2009); Lugaz et al. (2009); Frazin et al. (2009); Habbal et al. (2007, 2011), er enghraifft). Datblygir y broses ymhellach gan Druckmüllerová et al. (2011) drwy ddefnyddio dadelfeniad Fourier o ddisgleirdeb y corona. Mae'r NRGF yn gam hollbwysig o'r dechneg tomograffi.

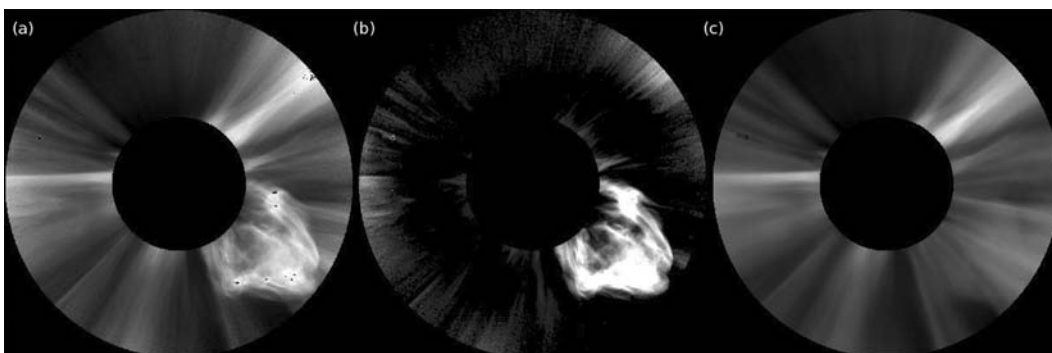


Ffigwr 4: Yn (a), (c) a (d) dangosir delwedd goronograffig LASCOS C2 ar wahanol lefelau o brosesu. Yn (a) dangosir arsylwad a wnaethpwyd ar 2007/03/27 13:53. Sylwer fel mae disgleirdeb y corona yn cwmpo'n gyflym yn ôl pellter o'r haul. Mae nam arsylwad wedi ei labelu'n 'MB'. (c) Yr un ddelwedd ag (a), ond wedi ei phrosesu gyda'r dechneg NRGF. Fel y gwelir, mae'r broses NRGF yn gwastatu'r cwmp mewn disgleirdeb a welir yn (a), gan ddatgelu manylion strwythurol y corona ar bob uchder. (d) yw'r ddelwedd orffenedig, gyda'r nam a labelir 'MB' yn (a) a (b) wedi ei gywiro, ffilter glanhau wedi ei gynnwys, a phellteroedd o'r haul yn llai na $2.6R_{\odot}$ ac yn uwch na $6R_{\odot}$ wedi eu llenwi ag allosodiad rheiddiol (radial extrapolation). Mae'r llinell barhaol yn (b) yn dangos y cwmp mewn disgleirdeb yn ôl pellter uwchben yr haul. Cyfartaledd yw hwn o nifer fawr o arsylwadau. Mae'r llinell doredig yn dangos y gwriad safonol mewn disgleirdeb (mesur o'r ystod mewn disgleirdeb o amgylch y cyfartaledd). Defnyddir y cyfartaledd a'r gwriad gan y broses NRGF i wastatu'r ddelwedd yn (a), i roi delwedd (c). Mae'r llinell lorweddol dotiog yn (d) yn berthnasol i'r drafodaeth ar y dechneg domograffi.

Cyn y broses domograffi, rhaid glanhau y delweddau â ffilterau arbennig, a rhaid hefyd lenwi ardaloedd mawr o'r ddelwedd sydd heb ddata. Dangosir delwedd orffenedig yn 4d. Sylwer yn 4a a 4c, fod ardal fawr gron yng nghanol y delweddau nad yw'n cynnwys data. Mae hyn oherwydd ocwltwr y telesgop sy'n cysgodi'r ddelwedd rhag

golau uniongyrchol o'r haul. I atal namau yn y broses domograffi, rhaid llenwi'r ardal hon â strwythur ffug. Dengys ffigwr 4d y wir strwythur reiddiol a welir yn 4c yn ymestyn yn artiffisial i ganol yr haul, ac i ardaloedd sy'n uwch nag y mae'n bosib eu gweld mewn gwirionedd gyda LASCO C2. Mae hyn yn gymorth i'r broses domograffi.

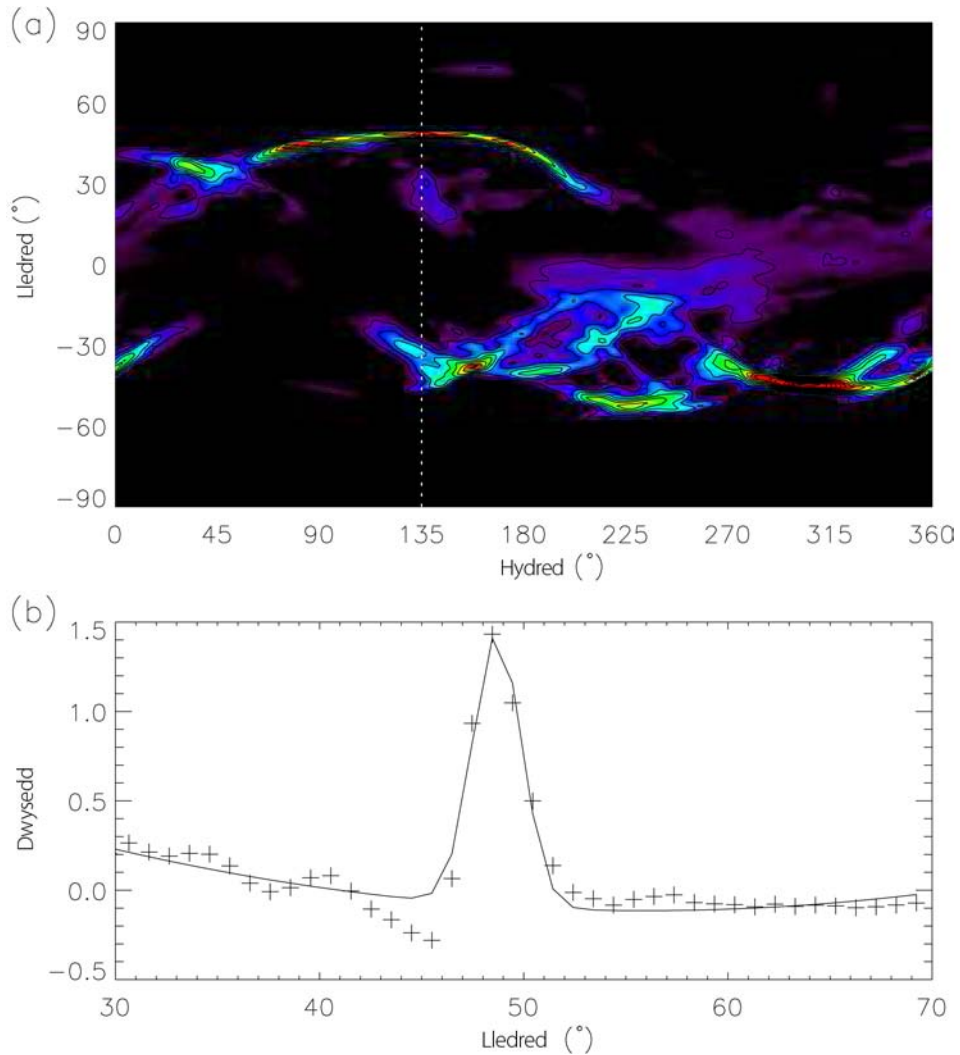
Cam arall pwysig wrth brosesu'r delweddau yw gwaredu'r alldafliadau sy'n medru digwydd sawl gwaith y dydd, ac sy'n medru dinistrio'r broses domograffi. Mae'r broses yn rhannu'r arsylwad i ddwy gydran: cydran ddeinamig sy'n cynnwys yr AMC a sŵn, a chydran lonydd sy'n cynnwys yr holl strwythur ar raddfa fawr (ffrydiau, er enghraifft). Ar gyfer tomograffi, y gydran dawel sy'n bwysig wrth gwrs, ond mae'r gydran ddeinamig yn addas ar gyfer sawl maes astudiaeth tu hwnt i gwmpas yr erthygl hon (gweler Byrne et al. (2011), er enghraifft). Mae fersiwn cyntaf y dechneg hon wedi ei ddisgrifio yn Morgan & Habbal (2010a), gyda datblygiad mwy safonol yn Morgan et al. (2011). Rhoddir enghraifft o'i gymhwysiad i ddelwedd LASCO yn ffigwr 5. Gellir gweld yn glir y byddai unrhyw AMC llachar fel y gwelir yn 5a yn medru amharu â'r broses domograffi, felly mae'r dechneg wahanu yn hanfodol i lwyddiant tomograffi coronaidd.



Ffigwr 5: Esiampl o broses gwahanu delwedd. (a) Delwedd NRGF o arsylwad LASCO C2 a wnaethpwyd yn 2002/08/22 02:06. Mae AMC mawr yn glir yn y de-orllewin. (b) Y gydran ddeinamig sy'n cynnwys yr AMC a digwyddiadau bach eraill (yn ogystal â sŵn). (c) Y corona tawel heb y gydran ddeinamig. Mae'r ddelwedd lân hon yn addas ar gyfer tomograffi.

Defnyddir cyfres o luniau tebyg i ffigwr 4d fel mewnbyn ar gyfer techneg domograffi Fourier. Mae tomograffi Fourier yn seiliedig ar Theorem Tafell Fourier (*Fourier Slice Theorem*, gweler Kak & Slaney (2001)). Mae hon yn theorem gymharol syml sy'n ein galluogi i adeiladu llun 3D o wrthrych os ceir nifer o luniau wedi eu tynnu o nifer o onglau gwahanol yn amgylchynu'r gwrthrych. Mae'r technegau prosesu delweddau a'r tomograffi wedi eu datblygu trwy arbrofi a threialu dros y blynyddoedd. Does dim sail mathemategol cwbl gadarn i'r dechneg, ond y canlyniad yn y diwedd yw mapiau defnyddiol sy'n dangos dosbarthiad strwythurau yn y corona. Fel yr esbonir ymhellach ym Morgan et al. (2009), mae gan y mapiau gwerth cyfartalog o 0 a gwyriad safonol o 1. Maent felly wedi eu normaleiddio'n debyg i'r delweddau mewnbyn ac nid dwysedd electron absoliwt yw canlyniad y mapiau. Maent yn defnyddiol felly ar gyfer astudiaeth o ddosbarthiad y dwysedd ond nid yn uniongyrchol i astudio'r dwysedd

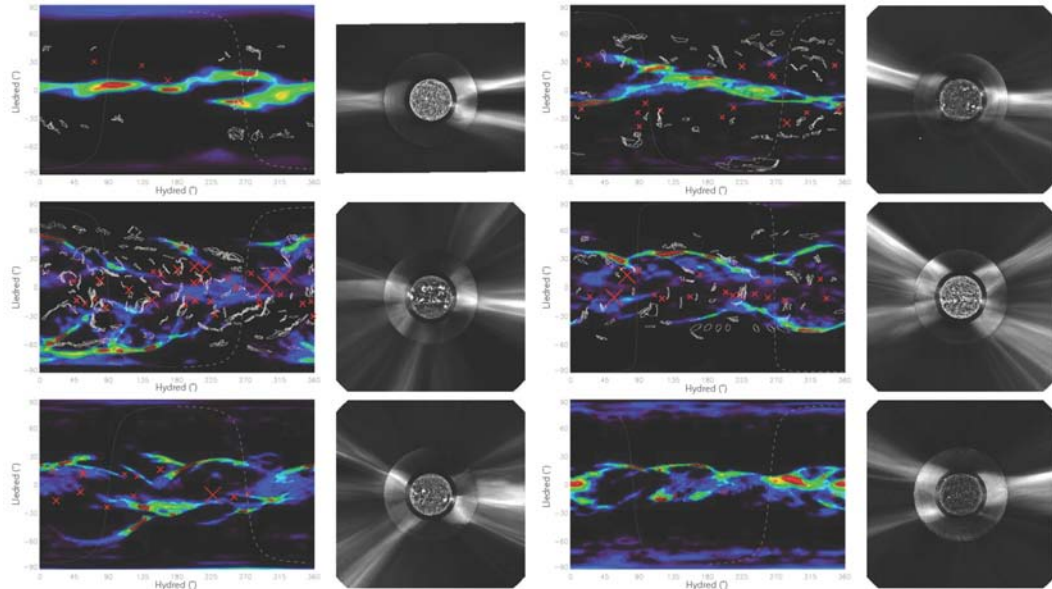
Strwythur 3D y corona o 1996 hyd at 2010



Ffigwr 6: (a) Map tomograffi ar gyfer CR2010. Mae hwn yn fap hydred (echel x) a lledred (echel y) ar gyfer uchder o $4R_{\odot}$. Coch (du) yw'r dwysedd uchaf (isaf). Cyfeirir at y llinell wen ddotiog yn y testun. (b) Toriad o'r dwysedd ar hyd hydred o 135° a lledredau $30-70^{\circ}$. Mae'r croesau yn dangos y gwerthoedd tomograffi, a'r llinell soled yn dangos swm o Gaussfurf a ffwythiant llinol o ledred.

Mae ffigwr 6a yn dangos map o strwythur y corona ar uchder o $4R_{\odot}$ (o ganol yr haul). Yn debyg i fap o'r byd, mae'n dangos hydred-lledred, ac mae ardaloedd o ddwysedd uchel mewn lliw gwyrdd-melyn-coch (coch yw'r dwysedd uchaf). Mae ardaloedd mawr lle nad oes unrhyw strwythur arwyddocaol uwchben lefel y sŵn wedi eu lliwio'n unffurf ddu. Gwelwn fod yr ardaloedd o ddwysedd uchel yn tueddu i alinio mewn llinellau tenau hir sy'n fras-gyfochrog i linellau lledred cyson. Wrth gwrs, mewn tri dimensiwn, mae'r llinellau hyn yn lleiniau cul o ddwysedd uchel sy'n ymestyn allan yn rheiddiol i'r gofod. Dangosir yn ffigwr 6b doriad ar draws y map dwysedd ar hydred o 135° (ar y llinell wen ddotiog yn 6a). Rhwng lledred o 30° a 70° yr unig strwythur bwysig yw'r llain dwysedd uchel. Mae'r plot hwn yn dangos yn union pa mor denau yw'r llain: ychydig

raddau mewn lledred yn unig yw (Morgan & Habbal, 2010b, 2010c; Richie-Halford et al., 2009). Yn wir, gall fod y llain yn gulach na'r hyn a ddangosir yma. Byddai unrhyw symudiad o'r llain dros y cyfnod arsylwi yn creu adluniad tomograffaid llai eglur, a strwythurau wedi eu taenu dros ardal letach na'r gwir strwythur.



Figwr 7: Y golfn gyntaf a'r drydedd – mapiau tomograffi o'r corona ar gyfer cylchdroad Carrington 1912 (1996/08/08), 1933 (1998/03/03), 1988 (2002/04/12), 2017 (2004/06/11), 2033 (2005/08/21) a 2055 (2007/04/14). Fel y map yn ffigwr 6, dangosir yma y dwysedd ar uchder o $4R_{\odot}$. Mae'r croesau coch yn dangos lleoliad brychau haul ar y ffotosffer, gyda maint y groes yn cyfleu maint y brych. Mae'r amlinellau gwyn yn dangos dosbarthiad ffilamentau yn y corona isaf un. Bwndeli cymhleth o faes magnetig yn caethiwo ac ynysu nwy oer ($\sim 10^4 K$) yw ffilamentau, yn codi'n achlysurol o'r cromosffer allan i'r corona. Mae Morgan & Habbal (2007a) yn dangos fod ffilamentau yn medru ffurfio sail dilys ar gyfer lleoliad tarddiad ffrydiau dwysedd uchel ger yr haul. Mae'r llinell doredig fras (mân) yn dangos lle mae ystlys orllewinol (ddwyreiniol) yr haul yn gorwedd ar gyfer y ddelwedd goronaidd yn y golfn ar y dde. Mae'r delweddau o'r corona yn yr ail a'r bedwaredd golfn yn dangos llun nodweddiadol o'r corona sy'n cyfateb i'r mapiau. Maent wedi eu cyfansoddi o arsylwadau tri offeryn gwahanol: arsylwad Uwch-Fioled Eithafol (UFE) o ddisg yr haul a'r corona isaf gan yr Extreme Ultraviolet Imaging Telescope (EIT/SOHO), y corona isaf mewn golau gwyn gan goronagraff MKIV y Mauna Loa Solar Observatory (MLSO) yn Hawaii, a'r corona estynedig gan LASCO C2. I weld y gyfatebiaeth rhwng y map dwysedd a'r ddelwedd goronaidd, cyfeirwch at y rhes dop. Gwelir yn y ddelwedd goronaidd fod ffrydiau llachar (dwysedd uchel) yn rhannu'n ddwy ffrwd yn y gorllewin, ond yn un ffrwd ddi-dor yn y dwyrain. Yn y map dwysedd, gwelir y llinell doredig fras (sydd yn dangos safle ystlys orllewinol yr haul) yn croesi dwy gangen o ffrwd dwysedd uchel, a'r llinell doredig fân (yr ystlys ddwyreiniol) yn croesi un ffrwd ddwys ger y cyhydedd yn y dwyrain.

Mae Morgan & Habbal (2010c) yn cyflwyno am y tro cyntaf ddisgrifiad manwl o strwythur tri-dimensiwn y corona i nifer o gylchdroadau Carrington¹ dros yn agos at gylchred gweithgaredd cyfan (1996-2009). Mae ffigur 7 yn dangos sawl enghraifft o fapiau tomograffi dros y cyfnod hir hwn, ynghyd â lluniau addas o'r corona sy'n cyfateb i'r mapiau. O astudio nifer o fapiau tebyg, gallwn ddod i sawl casgliad ynglŷn â strwythur y corona:

- Mae ffrydiau coronaidd dwysedd uchel bron o hyd yn lleiniau cul, yn estynedig mewn hydred, ac yn cefnogi'r syniad o leiniau plasma. Ar $4R_{\odot}$ mae'r lleiniau yn gul iawn, ac iddynt drwch onglog o tua 2.8° .
- Mae ffrydiau mawr, sefydlog yn gysylltiedig â'r un ffurfweddiad magnetig ar y ffotosffer sy'n sail i'r ffilamentau mwyaf.
- Yn ystod y rhan fwyaf o gyfnodau, mae dwy ffrwd fawr sefydlog yn estyn o ledredau canol (yn y De a'r Gogledd). Ar adegau o fywiogrwydd isel ar yr haul, mae'r ffrydiau yn aml yn plygu at y cyhydedd ac yn ymuno ar uchder isel yn y corona (oddeutu $2 R_{\odot}$). Ar unrhyw adeg arall, mae'r ddwy ffrwd ar wahân, ac yn llunio lleiniau dwysedd uchel gwahanol yn y corona estynedig (un yn y Gogledd a'r llall yn y De). Am gyfnodau hir lle mae bywiogrwydd yr haul yn codi neu'n gostwng, mae'r ffrydiau â thuedd i blygu tuag at y cyhydedd yn hytrach na chodi'n rheiddiol i'r corona. Yn ystod cyfnod mwyaf bywiog yr haul, mae'r ffrydiau'n codi'n rheiddiol o'u tarddiad ar yr haul.
- Mae tarddiad pegynol ffrydiau yn aml uwchben y corun o ffilamentau sefydlog sy'n amgylchynu'r pegynau, neu yn gysylltiedig â'r llinellau magnetig niwtral sy'n tanlinellu'r ffilamentau hyn. Ceir tarddiadau ffrydiau ger y cyhydedd uwchben ffilamentau bach neu ardaloedd magnetig bywiog, neu eto uwchben y llinellau magnetig niwtral sy'n tanlinellu'r nodweddion strwythurol hyn (gweler Morgan & Habbal (2007a) neu Morgan & Habbal (2007b)).
- Mae strwythurau dwysedd uchel sy'n codi o ardaloedd magnetig bywiog ger y cyhydedd yn codi fel rhan o darddiadau cyhydeddol ffrydiau mawr sefydlog, neu yn ffurfio ffrydiau ansefydlog ger y cyhydedd, heb gysylltiad â'r strwythur sefydlog tawel o ffrydiau ar ledred canolig neu uchel (gan ffurfio, o bryd i'w gilydd, felly, dair llain o ddwysedd uchel ar yr un hydred).
- Yn wahanol i'r gred gyffredin, nid yw'r corona yn dangos strwythur syml o un llain dwysedd uchel yn ymestyn o amgylch yr haul. Gall dwy neu hyd yn oed dair llain dwysedd uchel o blasma rannu'r un ardal hydred. Mae hyn yn anghyson â'r cysyniad cyffredin o'r cysylltiad rhwng dosbarthiad y maes magnetig a mater yn y corona, ond yn gyson â syniadau mwy diweddar sy'n esbonio'r cysylltiad pwysig hwn. Esbonnir hyn mewn mwy o fanylder yn yr adran nesaf.

¹ Mae cylchdroadau Carrington yn cyfrif cylchdroadau'r haul ac yn para oddeutu 27 diwrnod fel yr arsylwir o'r ddaear. Gan mai pelen o nwy yw'r haul mae gwahanol ardaloedd o'r haul yn troelli ar wahanol cyfraddau. Mae cylchdroad Carrington wedi ei seilio ar gyfradd gylchdroi brychau haul ger y cyhydedd.

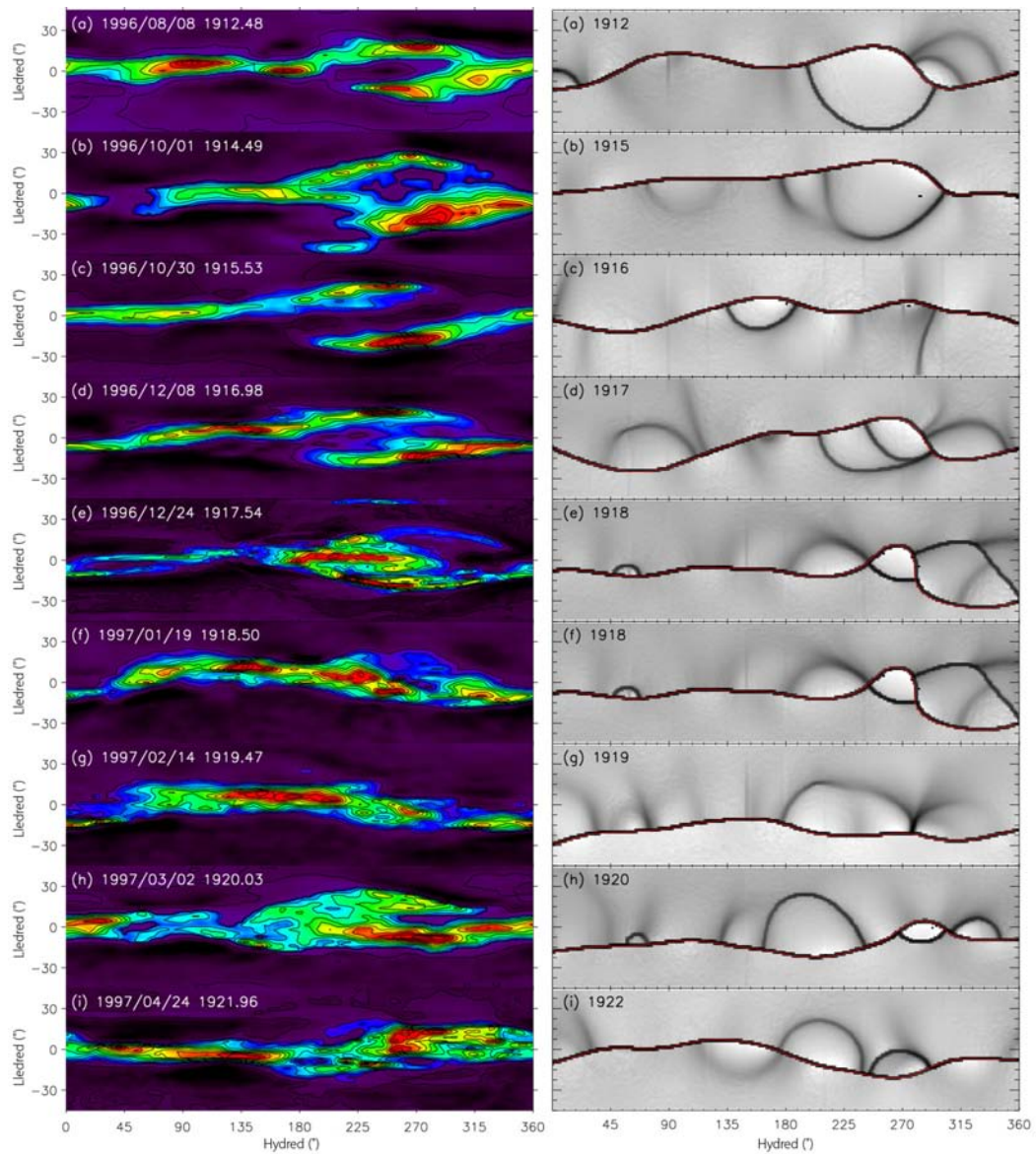
- Mae yna newid hynod o sydyn o strwythur syml y corona yn ystod cyfnod bywiogrwydd isel yr haul (1996/1997) i'r corona yn ystod y cyfnod bywiogrwydd uchel. Mae'r newid yn digwydd mewn cyfnod o ychydig wythnosau rhwng cylchdroad Carrington 1931-1934. Mae'r newid o gorona'r bywiogrwydd uchel yn ôl i fywiogrwydd isel yn un mwy graddol, yn digwydd dros nifer o flynyddoedd.

Y cysylltiad â'r maes magnetig

Beth yw'r strwythur magnetig sy'n sail i'r lleiniau dwys sy'n ffurfio strwythur y corona? Dangoswyd uchod fod y lleiniau yn bodoli trwy bob cyfnod o gylchred strwythurol y corona. Maent yn gorwedd mewn manau lle mae'r llinellau maes magnetig yn codi o ardaloedd wedi eu gwasgaru ar yr haul, ac yn ymuno ar uchder o $\sim 2 R_{\odot}$ neu fwy i greu y lleiniau. Mae casgliad o linellau maes magnetig agored (h.y. sy'n ymestyn yn bell i'r gofod rhyngblanedol) yn ffurfio llain dwysedd uchel yn y corona estynedig. Wrth ddilyn yr ymgasgliad hwn i lawr at yr haul, maent yn dechrau gwahanu ar uchder o $\sim 2.5 R_{\odot}$, ac yn gwasgaru'n fwyfwy wrth nesu at yr haul. Mae'r llinellau maes hyn yn pontio dros ardaloedd eang o'r corona isaf, ac mae'n arferol i'r ardaloedd sy'n gorwedd o dan y bwâu fod â chasgliadau cymhleth ac enfawr o ddolennau magnetig caeëdig. Gelwir mesur o'r gwerth hwn o wahaniad y maes magnetig gydag uchder yn gydgyfeiriant, yn yr ystyr fod llinellau maes yn plygu a chydgyfeirio wrth godi o'r haul.

Dengys ffigwr 8 fel mae mapiau o gydgyfeiriant, a gynhyrchir o fodel magnetig, yn cymharu gyda strwythur dwysedd a gynhyrchir o'r tomograffi. Mae'n eithaf amlwg mewn nifer o'r mapiau fod cyfatebiaeth dda rhwng strwythur dwysedd y corona a'r cydgyfeiriant. Cydgyfeiriant felly yw'r modd cywir o ddehongli maes magnetig y corona. Hwn yw'r cysyniad newydd o'r cysylltiad rhwng y maes magnetig yn y corona a'r dosbarthiad o blasma. Yn y gorffennol, a than yn ddiweddar iawn, roedd nifer yn credu fod y ffrydiau dwysedd uchel yn gyfyngedig i fannau lle roedd y maes magnetig yn sero (h.y. un llain gul yn amgylchynu'r haul lle roedd y maes magnetig yn symud o bositif i negatif). Mae'r gwaith tomograffi hwn, a gwaith gan eraill (Wang et al., 2007) yn tansellio'r syniad gor-symbl hwn, ac yn profi fod sail mwy cyffredinol i'r berthynas.

Mae Morgan (2011a) yn mynd ymhellach ac yn defnyddio mapiau ffigwr 8 i ddangos fod modd i'r strwythurau dwysedd uchel 'lithro' yn hydredol ar hyd y strwythur magnetig. Mae'r dwysedd uchel yn gaeth i fframwaith y strwythur magnetig, ond yn rhydd i symud ar hyd y fframwaith hwn. Gyda gwell arsylwadau a thechnegau modelu yn y dyfodol, bydd modd adeiladu ar y gwaith hwn a gwella'n dealltwriaeth o'r berthynas rhwng maes magnetig a strwythurau dwysedd yn y corona.



Figwr 8: Colofn chwith: cyfres o fapiau dwysedd tomograffi yn dangos fel mae'r lleiniau dwysedd uchel ger y cyhydedd yn newid dros gyfnod o oddeutu blwyddyn (1996-97). Colofn dde: mapiau o fodel magnetig coronaidd sy'n cyfateb i'r un amseroedd â'r mapiau tomograffi. Defnyddir techneg allosodiad magnetig i fapio maes magnetig arwynebedd yr haul i oddeutu'r pwynt lle mae'r corona yn gwbl reiddiol ($\sim 2.5R_{\odot}$). Trwy ddilyn llinellau maes magnetig o'r pwynt rheiddiol i'r haul, gallwn fapio'r gwahaniad onglog rhwng y llinellau maes. Mae'r ardaloedd tywyll yn y mapiau hyn yn dangos ardaloedd â gwahaniad uchel, h.y. mae'r llinellau maes sy'n cwrdd ar y pwynt hwn yn y corona wedi codi o ardaloedd sydd ymhell oddi wrth ei gilydd ar yr haul. Gelwir y mesur hwn yn gydgyfeiriant. Mae'r llinell goch yn dangos lle mae llinellau maes â pholaredd gwahanol yn cwrdd.

Cylchdroi'r corona

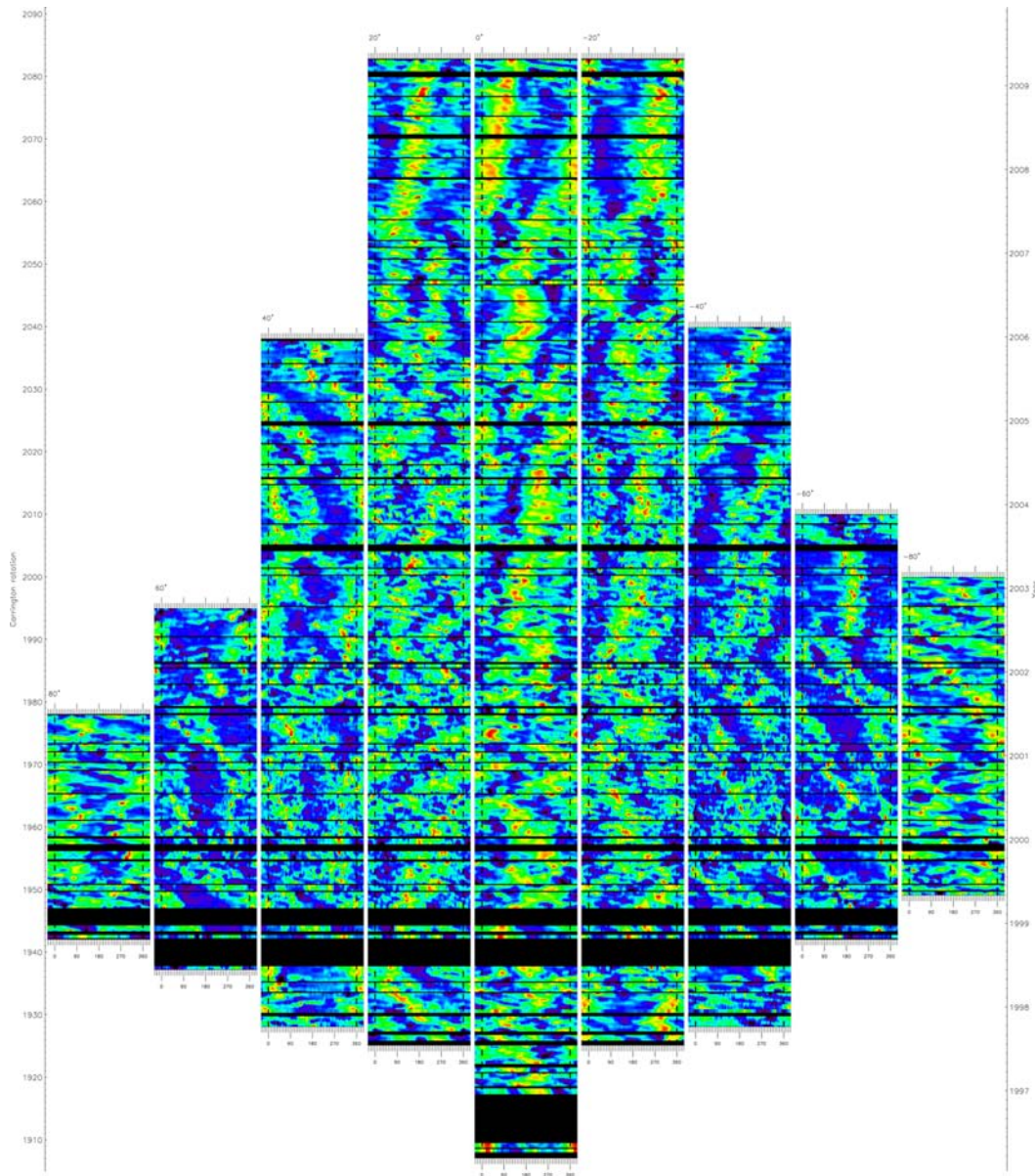
Mae mesur graddfa gylchdroi y corona yn fesuriad anodd iawn. Yn hanesyddol, rhaid oedd dewis pwynt yn y corona a mesur disgleirdeb golau o'r pwynt hwnnw dros gyfnod hir (blwyddyn neu fwy). Byddai'n rhaid cymhwysu technegau'r gydberthynas â'r signal hirdymor hwn i ddyfalu'r raddfa gylchdroi. Mae nifer o wendidau i'r technegau hyn a elwir yn dechnegau modyliad fflwcs. Yn gyntaf, does dim trafodaeth ynghylch y strwythur 3D sy'n creu'r modyliad. Mae'r signal ar unrhyw foment o arsylwi yn integreiddiad o linell olwg estynedig trwy nifer o strwythurau amrywiol yn y corona. Wrth wyllo sut y mae'r signal yn modylu dros amser, ceir mesur llyfn o'r gwir newid. Dominyddir unrhyw fodyliad gan lond llaw o ardaloedd o ddisgleirdeb uchel. Er hyn, gan mai modyliad fflwcs oedd yr unig dechneg bosib i fesur y cylchdroi, dyna a ddefnyddir ers degawdau. Gyda'r technegau tomograffi a gyflwynir yn yr erthygl hon mae modd cyfrifo strwythur 3D y corona ar unrhyw adeg o gylchred bywiogrwydd yr haul, ac mae modd, am y tro cyntaf, fesur graddfeydd cylchdroi'r corona bron yn uniongyrchol.

Dros y cyfnod 1996-2010, rydym wedi creu oddeutu 10^4 o fapiau tomograffi. Mae hyn yn ein galluogi i greu darlun eithaf manwl o newidiadau amserol yn y corona. Mae'r newidiadau hyn yn cynnwys newidiadau strwythurol a newidiadau oherwydd graddfeydd cylchdroi sy'n wahanol i raddfa Carrington. Mae'r dechneg domograffi yn tybio fod y corona yn cylchdroi ar raddfa Carrington o 13.1°d^{-1} (gradd y dydd) fel modd i ôl daflunio'r arsylwadau trwy'r adluniad 3D. Mewn gwirionedd, mae graddfa gylchdroi'r haul a'r corona yn medru amrywio o raddfa Carrington. Nam bach yw hwn o'i gymharu â namau eraill yn y broses domograffi, ond un canlyniad o osod graddfa gylchdroi bendant yw y bydd strwythurau nad ydynt yn cylchdroi ar graddfa Carrington yn graddol symud o un map tomograffi i'r llall gydag amser. Dangosir hyn yn ffigur 9, lle gwelir mewn manylder sut mae strwythur y corona yn newid dros y gylchred fywiogrwydd ddiwethaf (1996-2010). Mae llawer o wybodaeth o fewn y ffigur hwn, ac mae manylion llawn yr astudiaeth i'w cael yn Morgan (2011b).

Trwy ddefnyddio techneg cydberthynas ynghyswllt y strwythur yn ffigur 9, gallwn gasglu gwybodaeth am y raddfa gylchdroi. Os ydym yn cyfartalu'r gwerthoedd hyn dros yr 14 blynedd, cawn ganlyniadau bron yr un fath â chanlyniadau blaenorol yn seiliedig ar dechnegau modyliad fflwcs, hynny yw, graddfeydd cylchdroi ychydig yn gyflymach na graddfa Carrington ger y cyhydedd, gan arafu i oddeutu ($\sim 0.5^\circ\text{d}^{-1}$) tuag at ledredau uwch. Mae'r corona, felly, yn ôl astudiaethau sy'n cyfartalu mesuriadau dros gyfnodau hir iawn, yn cylchdroi yn fwy anhyblyg nag arwynebedd yr haul. Mae'n od meddwl fod y corona, sy'n gysylltiedig â'r haul trwy'r maes magnetig sy'n codi o'r ffotosffer, yn medru troelli ar gyflymder gwahanol i'r haul. Golyga hyn fod tensiwn yn medru adeiladu, a bod ailgysylltu magnetig yn bwysig mewn rhai ardaloedd (lle mae llinellau fflwcs magnetig yn torri ac yn ailgysylltu i greu ffurf newydd). Golyga hefyd fod elfennau bach o'r maes magnetig caeedig sy'n codi o'r haul yn cylchdroi ar raddfa araf sydd yn fwy tebyg i'r haul, tra bod yr elfennau ar raddfa fwy, y maes magnetig 'agored' sy'n ymestyn ac yn ffurfio'r corona estynedig ei hun, yn medru troelli ar gyflymder uwch.

Ond mae cyfartalu'r graddfeydd cylchdroi dros y gylchred fywiogrwydd yn cuddio llawer o'r nodweddion diddorol sy'n digwydd dros gyfnodau amser byr. Yn wir, ar rai

adegau, nid yw'r corona'n cylchdroi'n anhyblyg o gwbl. Mae graddfeydd cylchdroi Carrington yn goruchafu ond, ar nifer o adedgau, mesurir graddfeydd cylchdroi o-3 i 3°d^{-1} , sydd yn hynod. Gall graddfeydd amrywio'n enfawr hyd yn oed rhwng lledredau agos ar yr un amser. Mae hyn yn codi cwestiynau dyrys ynglŷn â chywirdeb dehongliadau astudiaethau blaenorol. Gall graddfeydd cylchdroi aros yn sefydlog, newid yn araf, neu newid yn sydyn. Rydym yn colli'r manylion hyn wrth fesur dros gyfnodau hir o amser.



Figwr 9: Darlun hir-dymor o strwythur y corona. Mae pob colofn yn dangos map ar gyfer lledred arbennig. Mae amser yn rhedeg o'r gwaelod i'r brig. Mae echel lorweddol pob colofn yn dynodi'r hydred o amgylch yr haul. Os yw strwythur yn cylchdroi'n sefydlog am amser hir gyda'r haul ar raddfa Carrington, byddai'n disgrifio llinell fertigol i lawr colofn. Os yw'n troelli'n gyflymach (arafach) na graddfa Carrington, bydd yn gwyro i'r de (chwith).

Casgliadau

Mae rhaid'n dehongli strwythur y corona yng ngolau cydadweithau cymhleth rhwng cylchdroi gwahaniaethol y ffotosffer, y lledredau a'r strwythurau gwahanol lle mae ffrydiau coronaidd yn tarddu ar y ffotosffer, y graddfeydd o ailgysylltu magnetig, aliniad cymharol maes magnetig agored a chaeëdig yn y corona isaf, aliniad cymharol lleiniau dwysedd uchel y ffrydiau yn y corona a'u holion traed ar y ffotosffer, ac adwaith y corona ar raddfa fawr i ailffurfweddiadau ar y ffotosffer. Mae'n berthynas gymhleth iawn i'w hastudio, yn enwedig gan ein bod yn gorfod arsylwi o bellter. Mae fel ceisio modelu systemau tywydd y ddaear ond heb y mesuriadau manwl sydd yn ofynnol i ddisgrifio'r system. Yn y dyfodol, mae gobraith y bydd cydadwaith o'r fath, neu fersiwn mwy syml o'r cydadwaith, yn cael ei arsylwi mewn modelau mwy soffistigedig lle bydd ffenomen gymhleth yn cael ei hefelychu. Mae canlyniadau'r tomograffi a ddisgrifir yma yn codi cwestiynau newydd ynglŷn â'r cysylltiad rhwng yr haul a'r corona, ac yn creu sialens newydd i ddehongli esblygiad strwythur y corona. Mae hefyd yn darparu fframwaith mwy cywir a manwl i osod cyfyngiadau angenrheidiol ar fodelau, ac yn ysbrydoliaeth i ddatblygu modelau mwy uchelgeisiol neu realistig o'r corona ar raddfeydd mawr.

Y dyfodol

Rhaid seilio ein gobeithion parthed ein dealltwriaeth o strwythur y corona ar gynlluniau pendant a phosib o arsylwadau newydd. Yn ddiweddar iawn, mae'r Atmospheric Imaging Assembly ar y llong ofod Solar Dynamic Observatory yn casglu lluniau anhygoel o fanwl o'r corona isaf mewn golau UwchFioled Eithafol (UFE). Does dim amheuaeth bydd yr offeryn hwn yn agor ein llygaid i nifer o ffenomenau newydd, ac yn gymorth i astudio strwythur a deinameg y corona isaf. Ond nid yw'n ddefnyddiol iawn i'r corona estynedig gan fod tanbeidrwydd y golau UFE yn syrthio i oddeutu $0.5R_{\odot}$ neu lai uwchben yr haul. Siomedig iawn yw safon y lluniau a gesglir gan coronagraffau y cyrch STEREO. Dylai'r coronagraffau hyn fod yn gaffaeliad anferthol i faes strwythur y corona gan fod STEREO yn cynnwys dwy long ofod yn arsylwi'r corona o ddwy ongl wahanol. Wedi eu huno gyda data o LASCO, mae arsylwadau cydamserol o dair ongl yn digwydd er 2006. Mewn egwyddor byddai hyn yn galluogi creu mapiau 3D manwl a chywir iawn o'r corona tawel, ac o ddogwyddiadau deinameg. Yn anffodus, am nifer o resymau, mae'r data o STEREO o safon isel ac mae'n anodd iawn cynnal astudiaeth wyddonol ohonynt.

Yn y degawdau i ddod, mae gobraith am gyrch a fydd yn gyrru llong ofod i grombil y corona, yn agosach o lawer i'r haul nag unrhyw gyrch blaenorol. Byddai modd wedyn mesur dwysedd, tymheredd, a'r maes magnetig yn uniongyrchol (*in situ*), gan ateb nifer o gwestiynau dyrys am y corona. Mae Morgan et al. (2008) yn modelu rhai o'r arsylwadau posib o long ofod o'r fath. Mae gobraith hefyd am gyrchoedd eraill fydd yn cynnwys coronagraffau newydd o safon uchel.

Yn y cyfamser, mae AIA/SDO yn darparu toreth o ddata anhygoel o'r corona isaf un, ac felly mae'n rhaid inni fel cymuned o seryddwyr sy'n astudio'r haul, droi at yr offeryn hwn er mwyn ceisio dehongli ac esbonio rhai o'r ffenomenau newydd a ddatgelir o ddydd i ddydd. Rhaid hefyd fanteisio ar ddatblygiadau mawr y byd cyfrifiadurol i fodelu'r corona mewn ffyrdd mwy realistig a manwl, a thrwy hynny, daro goleuni ar rai o ddirgelion y corona prydfarth.

Cydnabyddiaeth

Hoffwn ddiolch i Dr Eleri Pryse am arfarniad manwl ac awgrymiadau gwerthfawr i wella'r cyhoeddiad hwn. Mae'r data SOHO/LASCO a ddefnyddir wedi eu cynhyrchu gan gonsortiw m o'r Naval Research Laboratory (UDA), Max-Planck-Institut f r Aeronomie (Almaen), Laboratoire d'Astronomie (Ffrainc), a Phrifysgol Birmingham (Lloegr). Mae SOHO yn brosiect o gydweithrediad rhyngwladol rhwng ESA a NASA. Mae'r data ardaloedd bywiog yn tarddu o adroddiadau heulog a baratowyd gan Adran Fasnach yr Unol Daleithau, NOAA, Space Weather Prediction Center ac Awyrlu yr UDA o data NOAA. Darperir yr wybodaeth ar y ffilamentau gan L'Observatoire Paris yn Meudon. Cynhyrchir yr allosodiadau MTAP gan Arsyllfa Solar Wilcox a Phrifysgol Stanford gyda diolch i J.T. Hoeksema. Cefnogir Arsyllfa Wilcox gan NASA, yr NSF ac ONR.

Llyfryddiaeth

Brueckner, G. E., Howard, R. A., Koomen, M. J., et al. (1995), *Sol. Phys.*, 162, 357.

Butala, M. D., Frazin, R. A., & Kamalabadi, F. (2005), *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 110, 9.

Byrne, J., Morgan, H., & Habbal, S. R. (2012), *Astroph. J.*, 752 (2), 145.

Clark, S. (2007), ESA Special Publication, Vol. 446, *The Sun Kings* (Princeton University Press).

Druckmüllerová, H., Morgan, H., & Habbal, S. R. (2011), *Astroph. J.*, 737, 88.

Eddy, J. A. (1974), *Astron & Astroph.*, 34, 235.

Frazin, R. A. (2000), *Astroph. J.*, 530, 1026.

Frazin, R. A., Butala, M. D., Kemball, A., & Kamalabadi, F. (2005), *Astroph. J.*, 635, L197.

Frazin, R. A., Jacob, M., Manchester, W. B., Morgan, H., & Wakin, M. B. (2009), *Astroph. J.*, 695, 636.

Habbal, S. R., Druckmüller, M., Morgan, H., et al. (2011), *Astroph. J.*, 734, 120.

Habbal, S. R., Morgan, H., Johnson, J., et al. (2007), *Astroph. J.*, 663, 598.

He, J., Marsch, E., Tu, C., & Tian, H. (2009), *Astroph. J.*, 705, L217.

Kak, A. C. & Slaney, M. (2001), 'Principles of Computerized Tomographic Imaging', Vol. *Classics in Applied Maths* 33 (SIAM).

Kienreich, I. W., Temmer, M., & Veronig, A. M. (2009), *Astroph. J.*, 703, L118.

Linker, J. A., Mikić, Z., Biesecker, D. A., et al. (1999), *J. Geophys. Res.*, 104, 9809.

- Lugaz, N., Vourlidas, A., Roussev, I. I., & Morgan, H. (2009), *Sol. Phys.*, 256, 269.
- Lyot, B. (1932), *Zschriff fur Astrophysik*, 5, 73.
- Morgan, H. (2005), thesis PhD, Prifysgol Cymru.
- Morgan, H. (2011)a, *Astroph. J.*, 738, 190.
- Morgan, H. (2011)b, *Astroph. J.*, 738, 189.
- Morgan, H., Byrne, J., & Habbal, S. R. (2012), *Astroph. J.*, 752 (2), 144.
- Morgan, H., Fineschi, S., Habbal, S. R., & Li, B. (2008), *Astron & Astroph.*, 482, 981.
- Morgan, H. & Habbal, S. (2010)a, *Astroph. J.*, 711, 6
Morgan, H. & Habbal, S. (2010)b, Twelfth International Solar Wind Conference, 1216, 691.
- Morgan, H. & Habbal, S. R. (2007)a, *Astron & Astroph.*, 464, 357.
- Morgan, H. & Habbal, S. R. (2007)b, *Astron & Astroph.*, 465, L47.
- Morgan, H. & Habbal, S. R. (2007)c, *Astron & Astroph.*, 471, L47.
- Morgan, H. & Habbal, S. R. (2010)c, *Astroph. J.*, 710, 1.
- Morgan, H., Habbal, S. R., & Woo, R. (2006), *Sol. Phys.*, 236, 263.
- Quémerais, E. & Lamy, P. (2002), *Astron & Astroph.*, 393, 295.
- Richie-Halford, A. C., Iess, L., Tortora, P., et al. (2009), *Space Weather*, 7 (12).
- Saez, F., Zhukov, A. N., Lamy, P. & Llebaria, A. (2005), *Astron & Astroph.*, 442, 351.
- Saito, K., Poland, A. I., & Munro, R. H. (1977), *Sol. Phys.*, 55, 121.
- Schatten, K. H., Wilcox, J. M., & Ness, N. F. (1969), *Sol. Phys.*, 6, 442.
- van de Hulst, H. C. (1950), *Bull. Astronom. Inst. Netherlands*, 11, 135.
- Wang, Y., Cao, H., Chen, J., et al. (2010), *Astroph. J.*, 717, 973.
- Wang, Y.-M. & Sheeley, Jr., N. R. (1992), *Astroph. J.*, 392, 310.
- Wang, Y.-M., Sheeley, Jr., N. R., & Rich, N. B. (2000), *Geophys. Res. Let.*, 27, 149.
- Wang, Y.-M., Sheeley, Jr., N. R., & Rich, N. B. (2007), *Astroph. J.*, 658, 1340.