

Jeff Smith

**Model amldonfedd i
ddelweddu a dadansoddi
meysydd magnetig yng
nghorona'r Haul**

Gwerddon

CYFNODOLYN ACADEMAIDD CYMRAEG

Golygydd Yr Athro Ioan M. Williams

Model aml-donfedd i ddelweddu a dadansoddi meysydd magnetig yng nghorona'r Haul

Jeff Smith

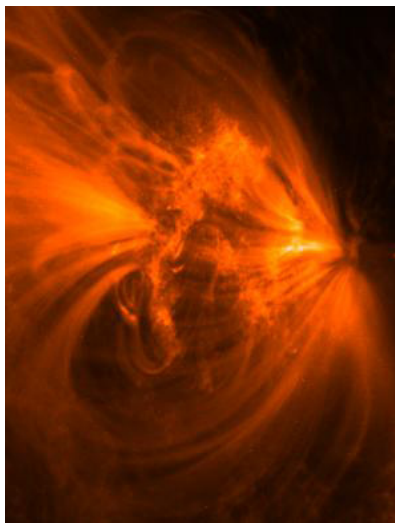
1. Cyflwyniad

Mae'r Haul yn hanfodol i'n bywydau, ond mae ein dealltwriaeth o'r prosesau pwysig sy'n digwydd arno'n parhau'n anghyflawn. Mae'r Haul yn fywiog iawn, ac wrth i egni a grëir y tu mewn i'r Haul ddianc i'r gofod, ymddengys meysydd magnetig cymhleth yng nghromosffer a chorona'r Haul (atmosffer yr Haul). Pan nad yw'r maes magnetig yn homogenaidd, gwelir llawer o strwythurau diddorol yn y cromosffer a'r corona, fel lwpiau'r corona a ffilamentau. Mae nodweddion y rhain, fel osgiliadau, symudiadau a ffrwydradau, yn ddiddorol.

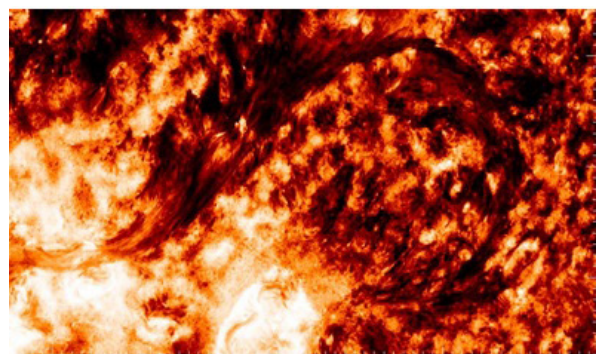
Gall y ffrwydradau posib gael effaith fawr ar y Ddaear. Yn 1851, bu ffrwydrad ar yr Haul a deithiodd tuag at y Ddaear (digwyddiad Carrington) a bu hwn yn gyfrifol am ddifrod sylweddol i'r rhwydwaith telegraff o ganlyniad i'r egni trydanol a ryddhawyd. Mewn byd sy'n fwy dibynnol ar dechnoleg drydanol a chyfathrebu electronig, mae'n hawdd gweld pwysigrwydd ehangu dealltwriaeth o'r prosesau a all arwain at ddigwyddiadau o'r fath.

2.1 Strwythurau yn y corona: rhagolwg

Dau o'r strwythurau amlycaf yn y corona yw lwpiau'r corona a ffilamentau. Mae lwpiau'r corona ar ffurf bwâu. Maent fel arfer yn cysylltu dwy ardal lle mae'r maes magnetig yn gryf, fel y gwelir yn ffigur 1. Mae ffilamentau, ar y llaw arall, yn strwythurau eithaf llorweddol, sy'n dilyn cyfeiriad maes magnetig ar yr Haul gyda'u hadfachau yn ymestyn i lawr tuag at yr arwyneb i'r cromosffer, fel y gwelir yn ffigur 2. Mae nifer o ffilamentau yn ymddangos fel crymion (*sigmoids*) ar y cromosffer ac mae lwpiau'r corona a'r ffilamentau weithiau'n ffrwydro.



Figur 1: Lwpiau'r corona, 2013-03-02 07:32:11



Figur 2: Ffilament, 2012-08-07 08:20:00

2.2 Ymchwil gynharach: rhagolwg

Gwnaethpwyd amrywiaeth eang o astudiaethau ar strwythurau o'r fath, gan gynnwys defnyddio modelau Meysydd Di-rym Aflinol (NLFFF; *non-linear force-free field*). Ceir trosolwg manwl o hyn yn Wiegelmann a Sakurai (2012). Datryswyd sawl problem ddamcaniaethol yn y maes gan ddulliau dadansoddol Low a Lou (1989) er na ellir eu cymhwyso i bob sefyllfa go iawn. Mae sawl awdur wedi anelu at fodelu sefyllfaoedd go iawn gan ddefnyddio amryw ddull; esbonnir hyn ym mhedwaredd adran y papur hwn. Er enghraifft, cynigiodd Wiegelmann (2003), Wheatland (2006), Tadesse et al. (2011) a Guo et al. (2012) fodelau lle llwyddodd rhai ohonynt i fodelu strwythurau'n gywir iawn. Defnyddiodd rhai fodelau magneto-ffrithiannol; e.e., llwyddodd Su et al. (2009) i fodelu ffêr (*flare*: alldafliad o lwyth o egni) mewn rhanbarth bywiog o'r Haul, a llwyddodd Kliem et al. (2013) i fodelu ffrwydrad yr arsylwyd arno ar 8 Ebrill 2008. Defnyddiodd eraill fodelau Magneto Hydro Dynamegol (MHD); e.e. llwyddodd Jiang a Feng (2013) i efelychu lŵpiau'r corona'n gywir iawn. Defnyddiodd eraill ddull Grad-Rubin, a chafwyd canlyniadau sy'n cyfateb yn dda i arsylwadau ym Malanushenko et al. (2012), er enghraifft. Yn weddol ddiweddar, cyflwynwyd dull blaenffitio (*forward-fitting*: dull sy'n cyrraedd y nod drwy gyfres o gamau bach) gan ddefnyddio arsylwadau uwchffioled eithafol (Aschwanden, 2013).

3. Offerynnau arsylwi

I raddau helaeth, mae dealltwriaeth o brosesau ar yr Haul yn ddibynnol ar offerynnau fel telesgopau ac ati. Wrth i delesgopau ddatblygu, daeth yn bosib gweld strwythurau ar yr Haul yn fwyfwy manwl. Er hynny, ceir sawl anhawster gyda thelesgopau'r Ddaear. Yn gyntaf, mae'r cyfnod y gallant arsyllu ar yr Haul yn parhau am ychydig o'r diwrnod yn unig. Yn ail, gall cymylau rwystro telesgopau rhag arsylwi'r Haul. Am y rhesymau hyn, lansiwyd yn lled ddiweddar sawl arsyllfa yn y gofod. Yr un mwyaf diweddar yw Arsyllfa Dynameg yr Haul (SDO: *Solar Dynamics Observatory*), sy'n darparu data am yr Haul mewn cydraniad gofodol ac amserol gwell nag erioed o'r blaen, gan ddefnyddio dau delesgop. Yn gyffredinol, mae'r SDO yn anfon tua 1.5 Tb o ddata yn ôl at y Ddaear bob dydd. Ystyrir dau arbrawf a gwblheir ar y SDO, sef cydosodiad delweddu'r atmosffer a delweddydd seismig a magnetig yr Haul.

3.1 Cydosodiad delweddu'r atmosffer

Mae Cydosodiad Delweddu'r Atmosffer (AIA: *Atmospheric Imaging Assembly*) yn tynnu llun mewn saith prif donfedd bob 12 eiliad, fel llun 4096x4096 picselel o'r Haul cyfan. Mae'r arsylwadau yn bennaf o'r cromosffer a'r corona, ond yn ymestyn i lawr hyd at arwyneb allanol ffotosffer yr Haul.

3.2 Delweddydd Seismig a Magnetig yr Haul

Mae Delweddydd Seismig a Magnetig yr Haul (HMI: *Helioseismic and Magnetic Imager*) yn darparu *magnetogram* mewn dau ddimensiwn o'r Haul cyfan bob 45 eiliad, fel llun 4096x4096 picselel. Er hynny, er mwyn defnyddio modelau NLFFF, mae angen data am y maes magnetig mewn tri dimensiwn. Mae'n bosibl defnyddio data gan yr HMI i greu magnetograffau fector 3D; mae'r rhain ar gael yn hawdd, ond dim ond bob 12 munud.

Fodd bynnag, nid yw'r data ar gyfradd o 12 munud o gymorth mawr wrth geisio deall digwyddiadau sydyn, e.e. osgiliadau sy'n parhau am gyfnod byr o ychydig funudau. Yn ffodus iawn, ceir ffordd arall o gynrychioli prif nodweddion y maes magnetig mewn tri dimensiwn, sef drwy ddefnyddio'r *magnetogram* dau ddimensiwn yn unig sydd ar gael bob 45 eiliad. Anfantais y dull yw dirywiad sylweddol yng nghywirdeb y canlyniad sy'n colli sawl nodwedd fechan ond dylanwadol. Er hynny, mae'r dull hwn yn darparu prif nodweddion y maes magnetig ac yn osgoi effeithiau gwael sŵn (gwerthoedd dieithr i rai picselau sy'n sylweddol wahanol i werthoedd picselau eraill sydd union o'u hamgylch).

Yn y dull hwn, dadelfennir y *magnetogram* dau ddimensiwn a chaiff y maes magnetig ei gynrychioli yn nhermau elfennau bychain o gydrannau maes sydd oll â chryfderau magnetig a lleoliadau gwahanol mewn tri dimensiwn. Gelwir yr elfennau bychain magnetig hyn yn 'wefrau pwynt' yn yr erthygl hon. Trwy ddadelfennu'r *magnetogram* yn y modd hwn a defnyddio optimeiddiaeth Powell (Powell, 1964) er mwyn sicrhau'r amcangyfrif agosaf posib at y data creiddiol, gellid rhoi bras amcan o'r maes magnetig mewn tri dimensiwn bob 45 eiliad. Ceir manylion pellach o'r dull yn atodiad A o Aschwanden et al. (2013).

4. Modelu prosesau ar yr Haul

4.1 Pam modelu?

Gan fod yr SDO yn darparu data sydd mor fanwl, mae'n hawdd gofyn pam nad yw'n ddigon i ddefnyddio'r delweddau AIA yn unig i ddadansoddi dynameg strwythurau ar yr Haul. Ceir sawl anfantais i'r data AIA. Yr anfantais amlycaf yw'r ffaith mai mewn dau ddimensiwn yn unig y mae'r delweddau ar gael. Mae hynny'n achosi problemau wrth geisio deall yr hyn sydd yn y ddelwedd, ac yn galluogi i bethau nad ydynt o ddiddordeb mawr guddio pethau mwy diddorol. Yn ail, nid oes modd cyfrif faint o egni sydd gan strwythur ar unrhyw adeg, ac felly nid oes modd cyfrif faint o egni a ryddheir mewn ffrwydrad. Mae'n rhaid modelu felly er mwyn darganfod mwy am y nodweddion diddorol sydd ar yr Haul. Yn y papur hwn, disgrifir model sy'n addas ar gyfer lwpiau'r corona.

4.2 Y dybiaeth ddi-rym

Wrth fynd ati i fodelu ardal o'r Haul, rhaid gwneud tybiaethau er mwyn creu problem y gellir ei datrys.

Dechreuwn drwy nodi fod y maes magnetig \mathbf{B} yn ddi-dor, a gaiff ei fynegi'n fathemategol gan

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Ystyrir yn awr nwy wedi ei ïoneiddio (plasma) ym mhresenoldeb maes magnetig a thybiwn fod effaith y maes magnetig yn llawer iawn mwy nag effeithiau eraill gan gynnwys disgyrchiant a gwasgedd plasma. Os yw'r plasma mewn cydbwysedd, gellir dynodi'r sefyllfa'n fathemategol drwy

$$\mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0$$

Hwn yw'r cyflwr di-rym. Mae'r paramedr

$$\mathbf{j} = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B})$$

yn dynodi'r dwysedd cerrynt, a μ_0 yn dynodi athreiddedd gwactod (*vacuum permeability*).

Trwy gyfuno'r hafaliadau, cawn

$$\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} = 0$$

ac yna

$$(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} = 0.$$

Mae'r hafaliad hwn yn bwysig, oherwydd mae'n nodi bod $\nabla \times \mathbf{B}$ yn baralel i \mathbf{B} . Gan fod y ddau yn baralel, ysgrifennwn

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}, \text{ lle mae } \alpha \text{ yn baramedr sgalar.}$$

4.3 Gosod gwerth i α

Wrth fodelu, mae'n bosib gosod gwerth i α , er mwyn gwneud y cyfrifiadau er mwyn darganfod y maes magnetig yn haws a chynt. Ar gyfer y model symlaf (sef yr hyn a elwir yn y papur hwn yn 'maes potensial') gosodir α yn hafal i 0 ym mhob man, sy'n rhoi

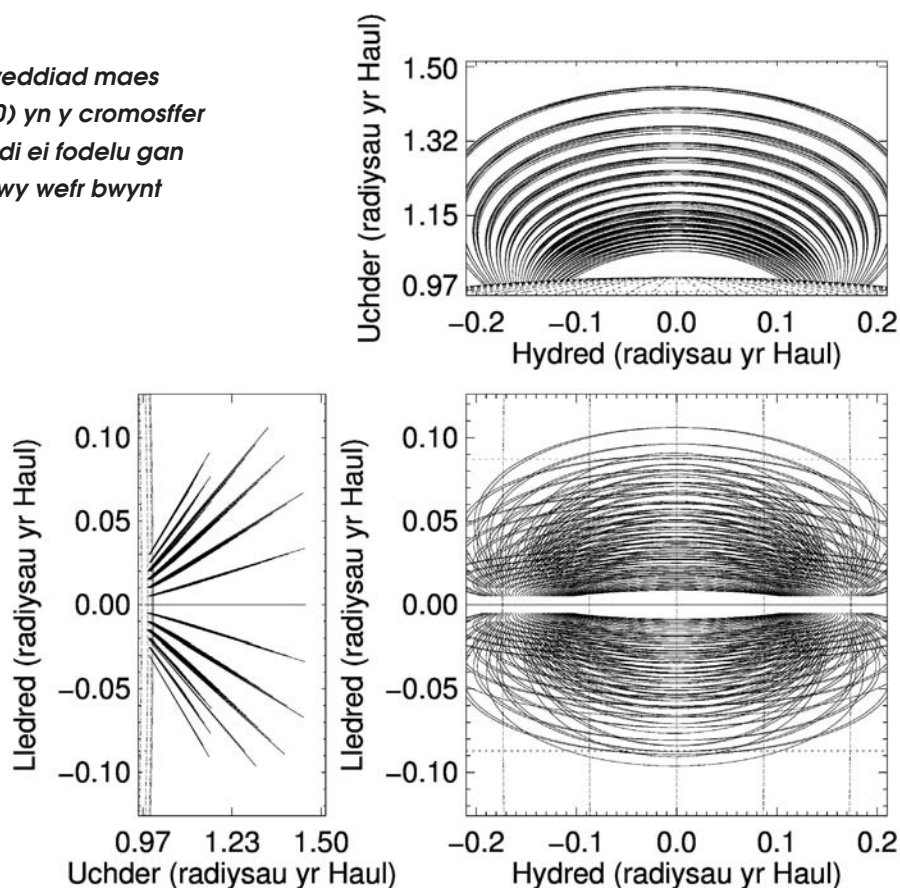
$$\nabla \times \mathbf{B} = 0.$$

Yn amlwg, mae'r model hwn yn syml iawn. Er mwyn darganfod ffurfweddiad \mathbf{B} yn y cromosffer a'r corona a roddir gan yr hafaliad, mae angen gosod gwerthoedd ffin ar gyfer y paramedr. Fel enghraifft o'r maes potensial, gosodir gwerthoedd gwefrau pwynt ar gyfer \mathbf{B} y ffotosffer fel 1000 G i un a -1000G i'r llall. Gellir yna ddarganfod y ffurfweddiad cyffredinol o \mathbf{B} sy'n ymestyn i'r cromosffer a'r corona. Dangosir y ffurfweddiad yn ffigur 3. Mae'r llinellau maes sy'n cysylltu'r ddwy wefr bwynt yn llawer sythach na'r hyn a welir mewn delweddau AIA, er enghraifft yr un yn Ffigur 1. Nid oes dirdroad yn llinellau'r maes magnetig a fodelwyd gydag $\alpha=0$, fel a geir yn y data go iawn.

Nodir hefyd mai yn y dirdroad y caiff egni rhydd ei storio (Chiueh & Zweibel, 1989). Yr egni hwn a ryddheir yn ystod ffrwydradau. Awgrymir felly, gan nad oes dirdroad yn y model, ni cheir egni rhydd ynddo. Mae hyn yn anfantais arall gan na fyddai'r model yn creu sefyllfa realistig ar gyfer ffrwydrad.

Er cywirdeb ac er mwyn darganfod faint o egni rhydd sydd mewn sefyllfa go iawn, mae angen caniatáu gwerthoedd i α nad ydynt o reidrwydd yn sero ac sy'n amrywio mewn gofod. Mae dulliau Meysydd Di-rym AfLlinol (NLFFF) yn caniatáu i'r paramedr amrywio'n aflinol heb gyfyngiad. Cymharodd Liu, Zhang a Su (2011) y model maes potensial â sawl model NLFFF yn fanwl, a chymharodd Mackay a van Ballegooijen (2009) fodelau NLFFF â modelau Meysydd Di-rym Llinol (LFFF, *Linear Force Free Field*, lle mae α yn gyson ym mhob man ond nid o reidrwydd yn sero). Dangoswyd bod modelau NLFFF yn llawer mwy realistig ac yn hanfodol er mwyn cynhyrchu efelychiad realistig gyda maes magnetig sy'n cytuno â strwythurau mewn delweddau ffilamentau, megis adfachau sy'n cysylltu'r ffilamentau â'r ffotosffer.

Ffigur 3: Ffurfweddiad maes potensial ($\alpha=0$) yn y cromosffer a'r corona wedi ei fodelu gan ddefnyddio dwy wefr bwynt



4.4 Trosolwg o fodelau NLFFF

Mae sawl dull NLFFF ar gael, oll â'u manteision a'u hanfanteision o ran eu cywirdeb, cyflymder cyfrifo, y mewnbynnau data sydd eu hangen ynghyd â chydaniad amserol. Mae'r rhan fwyaf ohonynt yn defnyddio data llawn am y maes magnetig mewn tri dimensiwn, ond y cydaniad amserol uchaf sy'n bosibl drwy'r dull hwn yw deuddeg munud. Trwy ddefnyddio maes magnetig mewn tri dimensiwn, gellir adeiladu model sy'n cyfateb yn agos i'r hyn a welir mewn arsylwadau. Ceir sawl dull a grëwyd er mwyn cyrraedd y nod hwn, ac eir ati i ddisgrifio sawl un isod.

Mae'r Dull Integru Cynyddol, a awgrymwyd yn gyntaf gan Nakagawa (1974), yn anelu at adeiladu maes magnetig y cromosffer a'r corona mewn tri dimensiwn trwy gychwyn o un lefel o'r cromosffer, cyfrifo'r cerrynt ac α , a mynd ati i ddefnyddio'r wybodaeth hon i amcangyfrif y maes magnetig ar y lefel nesaf. Trwy wneud hynny lawer gwaith, gellir adeiladu model o'r maes magnetig yn y cromosffer a'r corona mewn tri dimensiwn. Serch hynny, yn anffodus, gall y model hwn fod yn ansefydlog.

Mae'r Dull Grad-Rubin (Grad a Rubin, 1958) yn datrys problem fathemategol sydd wedi'i gosod yn dda. Defnyddir dosbarthiad o werthoedd α a phroses o iteru i gyrraedd y maes magnetig sy'n cyfateb orau i'r data. Fodd bynnag, mae'r gofyniad o wybod dosbarthiad α fel mewnbwn yn anfantais.

Cynigiwyd gan Chodura a Schlüter (1981) ddull amser-ddibynnol MagnetoHydroDynamig (MHD) y gellir ei ddefnyddio i gyrraedd math o gydbwysedd trwy gyfres o gamau dros gyfnod o amser, drwy ystyried dynameg, cyflymder, gludedd a maes trydanol y plasma.

Mae sawl awdur, e.e. Wiegelmann et al. (2003) wedi cynnig dulliau optimeiddiaeth i ddatrys y broblem, gan iteru dros amser i gydbwysedd. Cynhwysir mwy o dermau hefyd er mwyn anelu at ateb mwy cywir.

Yn ddiweddar, mae Aschwanden (2013) wedi anelu at fodelau newydd NLFFF fel nad oes angen data am y maes magnetig yn y ffotosffer mewn tri dimensiwn. Yma defnyddir magnetogramau dau ddimensiwn a lwpiau'r corona a arsylwyd. Ar draul cywirdeb, ceir cydraniad amserol o 45 eiliad, a gellir cyfrifo'r model yn llawer cynt na thrwy'r dulliau sy'n defnyddio data am y maes magnetig tri dimensiwn.

4.5 Côd Aschwanden: amlinelliad

Yn yr ymchwil hwn, defnyddiwyd codau NLFFF Aschwanden, gyda sawl addasiad ac estyniad i fodelu strwythurau'r maes magnetig yn y cromosffer a'r corona. Ymestynnir y gwaith hwn gan anelu at ddarganfod newidiadau yn strwythur ac egni'r system gyda chydrianiad amserol o 45 eiliad, a hefyd gan anelu at adeiladu delweddau mewn tri dimensiwn o lwpiau'r corona. Amlinellir cefndir y côd hwn mewn cyfrol dair rhan gan Aschwanden a Malanushenko (Aschwanden 2013, Aschwanden a Malanushenko 2013, Aschwanden 2013a). Mae'r codau hyn ar gael am ddim ar y gwasanaeth *solarsoft*, sef llyfrgell o feddalwedd a ddyfeisiwyd er mwyn astudio'r Haul.

Mae'r codau'n dechrau drwy ddadelfennu magnetogram dau ddimensiwn i wefrau pwynt, er mwyn amcangyfrif y maes magnetig mewn tri dimensiwn yn y ffotosffer. Bydd gan bob un o'r gwefrau bwynt lleoliad, cryfder magnetig a gwerth α o'u hunain, a dylent gynrychioli'r maes magnetig cyfan yn y ffotosffer. Ar ôl y cam hwn, gwyddys lleoliad a chryfder magnetig pob un wefr bwynt, ond ni wyddys beth yw dosbarthiad gwerthoedd α . Cyfrifir y maes potensial ($\alpha = 0$) ar gyfer y data yn y cromosffer a'r corona. Gellir yn awr ddefnyddio arsylwadau AIA wrth droed y lwpiau ger y ffotosffer a'u cymharu gyda'r maes potensial er mwyn darganfod y camaliniad ac amcangyfrif y dirdroad yn y ffotosffer. Diffinnir y camaliniad fel yr ongl rhwng cyfeiriadau'r maes potensial a'r lwpiau ar arwyneb y ffotosffer. Gellir yna ddarganfod dosbarthiad α yn yr ardal hon, gyda'r gwerthoedd yn lleoliadau'r gwefrau pwynt.

Gellir yn awr ddefnyddio'r pum paramedr – lleoliad pob gwefr bwynt (tri pharamedr), cryfder y maes magnetig B ym mhob un o'r lleoliadau, a gwerth α ym mhob lleoliad – fel gwerthoedd ffin ar waelod y cromosffer a'r corona i ddylunio llinellau'r maes magnetig sy'n ymestyn i'r cromosffer a'r corona. Gwneir y dylunio drwy ystyried camau bychain mewn gofod fel a ddisgrifir yn fanwl gan Aschwanden (2013). Mae'r broses yn rhoi gwerth a chyfeiriad y maes magnetig dros grid dychmygol sy'n ymestyn o arwyneb y ffotosffer i'r cromosffer a'r corona. Gellir yna gymharu'r maes magnetig a ddyluniwyd gyda'r strwythurau a arsylwir gan AIA yn y cromosffer a'r corona.

4.6 Effeithiolrwydd y dull hwn

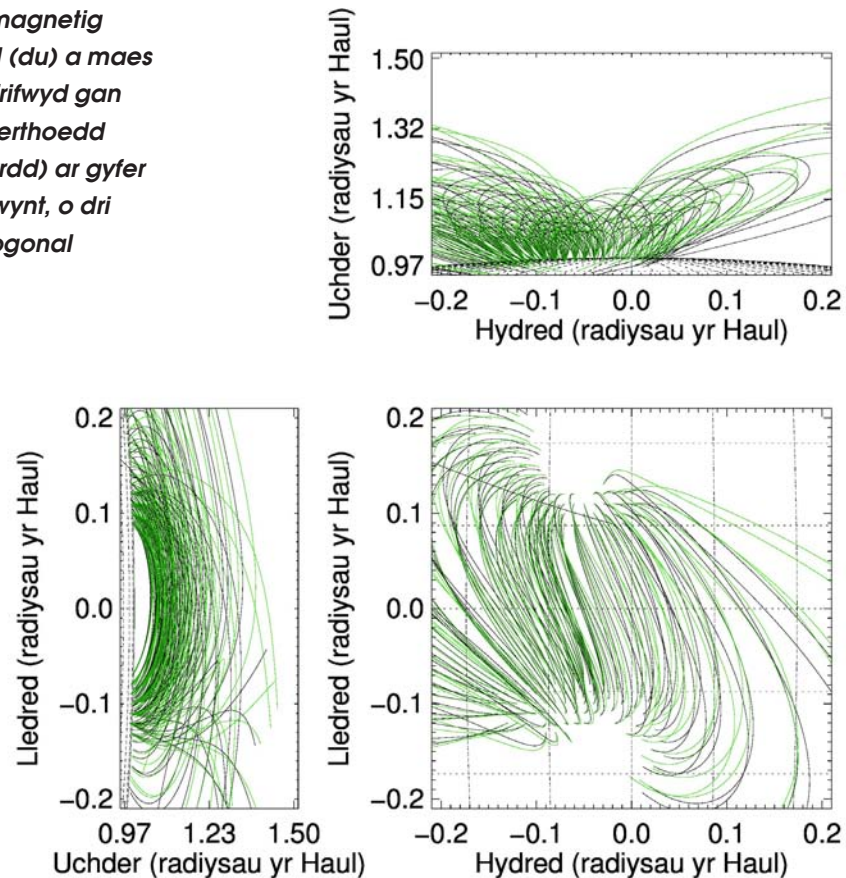
Fel unrhyw gynllun arall, mae angen sefydlu effeithiolrwydd y dull. Gwneir hynny trwy greu maes magnetig damcaniaethol yn nhermau gwefrau pwynt yn y ffotosffer lle y mae gwerthoedd α yn lleoliad y gwefrau pwynt yn wybyddus. Yna defnyddir y dull uchod i ddylunio'r maes magnetig yn y cromosffer a'r corona. Trwy gymharu'r maes magnetig a ddyluniwyd gyda'r maes potensial cyfatebol, gellir ail gyfrifo gwerthoedd α yn lleoliadau'r gwefrau pwynt. Gellir gweld a yw'r dull yn gweithio drwy gymharu'r

gwerthoedd α a gyfrifir â gwerthoedd gwreiddiol y paramedr, gyda chytundeb rhwng y gwerthoedd hynny yn dynodi llwyddiant y dull hwnnw. Gellir hefyd yn awr ail ddylunio'r maes magnetig gan ddefnyddio'r gwerthoedd newydd a gyfrifwyd ar gyfer α . Mae ffigur 4 yn efelychu sefyllfa gymhleth o bedair gwefr bwynt. Nodir eu cryfderau magnetig a chyfesurynnau eu lleoliadau yn y tabl oddi isod ynghyd â gwerthoedd gwybyddus α .

Cryfder maes magnetig G	Cyfesuryn x radiws Haul	Cyfesuryn y radiws Haul	Cyfesuryn z radiws Haul	α
1000	-0.10	-0.10	0.90	-5
-1000	-0.05	0.10	0.90	-5
1000	0.05	-0.05	0.90	-4
-1000	0.10	0.00	0.90	-4

Y gwerthoedd a gyfrifwyd ar gyfer α wrth ddefnyddio'r dull i ddylunio'r maes magnetig yw -4.54, -5.45, -4.68, -3.62 yn ôl eu trefn, sy'n agos at y gwerthoedd cychwynol yn y tabl. Dengys ffigur 4 fod y maes magnetig a efelychir gan ddefnyddio'r gwerthoedd a gyfrifwyd ar gyfer α hefyd yn cytuno â'r maes gwreiddiol a ddyluniwyd, gyda'r llinellau maes y dangos yr un ffurfweddiad.

Ffigur 4: Maes magnetig damcaniaethol (du) a maes magnetig a gyfrifwyd gan ddefnyddio gwerthoedd newydd α (gwyrd) ar gyfer pedair gwefr bwynt, o dri chyfeiriad orthogonal



5. Dull

5.1 Defnyddio data go iawn

Un fantais sydd i'r data a arddangosir gan y telesgop AIA yw bod lluniau ar gael mewn sawl tonfedd wahanol, megis 9.4 nm, 13.1 nm, 17.1 nm, 19.3 nm, 21.1 nm, 30.4 nm a 33.5 nm. Mae'r tonfeddi gwahanol yn canolbwyntio ar blasma sydd ar dymheredd gwahanol: mae'r donfedd 9.4 nm yn canolbwyntio ar blasma sydd ar dymheredd o tua 6.3 MK; y donfedd 13.1 nm yn canolbwyntio ar 0.4 MK, 10 MK a 16 MK; y donfedd 17.1 nm ar 0.63 MK; y donfedd 19.3 nm ar 1.2 MK a 20 MK; y donfedd 21.1 nm ar 2 MK; y donfedd 30.4 nm ar 0.05 MK, a'r donfedd 33.5 nm ar 2.5 MK. Yn gyffredinol wrth arsylwi lwpiau'r corona, gwelir gwahaniaethau geometrig yn y lluniau mewn tonfeddi gwahanol, ac ymddangosa'r lwpiau fel eu bod yn cyffwrdd ag arwyneb yr Haul (ffotosffer) ar onglau gwahanol yn y tonfeddi gwahanol. Wrth ystyried mai'r bwriad yw defnyddio'r ongl rhwng y maes magnetig lleol a thraed y lwpiau ger y ffotosffer i amcangyfrif α , mae'n amlwg felly y bydd y tonfeddi gwahanol yn rhoi gwerthoedd gwahanol ar gyfer α yn lleoliadau'r gwefrau pwynt.

Trafodir maes o law ddwy strategaeth i ddygymod â hynny. Yn gyntaf, ac yn arbennig wrth gyfrifo'r egni rhydd, mae ystyried y lwpiau o bob tonfedd gyda'i gilydd yn ddefnydd da o'r data, ac yn un sy'n lleihau dylanwad negyddol data camarweiniol. Yn ail, gellir ystyried yr anghydfod rhwng y tonfeddi gwahanol fel mantais, gan ddefnyddio'r tonfeddi gwahanol i greu hyd at saith model gwahanol o'r un ardal. Trwy ddylunio'r rhain mewn lliwiau gwahanol, creir posibilid i gymharu sut mae'r maes magnetig yn effeithio ar ddsbarthiad tymheredd y plasma.

5.2 Cyfrifo'r egni rhydd

Un o nodweddion pwysicaf unrhyw strwythur ar yr Haul yw ei egni rhydd. Nodwyd eisoes na cheir egni rhydd mewn maes potensial. Y maes potensial yw'r ffurfweddiad sydd â'r lleiaf posibl o egni, a dynodir yr egni hwn gan $E_{potensial}$. Yn gyffredinol, serch hynny, mae'r egni sydd gan unrhyw ffurfweddiad fel y gwelir ar yr Haul yn fwy nag $E_{potensial}$ a hynny oherwydd dirdroad sy'n storio rhywfaint o egni.

Gelwir yr egni sydd mewn ffurfweddiad go iawn yr egni amhotensial, $E_{amhotensial}$. Petai'r ffurfweddiad yn newid – ac mae'n ddigon clir mewn arsylwadau y ceir newidiadau dros amser yn y rhan fwyaf o ffurfweddiadau – bydd yr egni amhotensial yn newid. Mae newidiadau o'r fath fel arfer yn digwydd oherwydd ailgysylltiad magnetig neu ffrwydradau. Gelwir y gwahaniaeth rhwng egni'r maes amhotensial ($E_{amhotensial}$) ac egni'r maes potensial ($E_{potensial}$) yr egni rhydd yn E_{rhydd} , ac mae

$$E_{rhydd} = E_{amhotensial} - E_{potensial}$$

Dyma'r egni mwyaf y mae'n bosib i ffurfweddiad amhotensial ei gollu, cyn cyrraedd y ffurfweddiad potensial. Er bod yr arsylwadau'n awgrymu nad yw'n gyffredin i ffurfweddiadau gollu ei egni rhydd i gyd ar yr un pryd, mae mynd ati i amcangyfrif faint o egni a all ddianc yn ystod ffrwydrad yn bwysig wrth ddarogan tywydd y gofod.

Ystyrir maes magnetig yn y cromosffer a'r corona sy'n arddangos dirdroad. Nid yw α felly yn sero. Ystyrir ymhellach gydrannau'r maes magnetig amhotensial \mathbf{B} yn y cromosffer a'r corona er mwyn i un gydran fod yn baralel i'r maes magnetig potensial, $\mathbf{B}_{\text{paralel}}$, a'r llall yn berpendicwlar i'r maes magnetig potensial, $\mathbf{B}_{\text{perpendicwlar}}$. Yn nhermau fectorau, gellir ysgrifennu

$$\mathbf{B}_{\text{amhotensial}} = \mathbf{B}_{\text{perpendicwlar}} + \mathbf{B}_{\text{paralel}}$$

Yn ôl ei ddiffiniad, mae $\mathbf{B}_{\text{potensial}} = \mathbf{B}_{\text{paralel}}$

Darganfyddir yr egni sydd gan faes magnetig drwy'r hafaliad

$$E = \frac{1}{2\mu_0} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{B} \, dV = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 \, dV$$

Ile mai V yw'r cyfaint dan ystyriaeth, E yw'r egni a B yw maint y maes magnetig. Gellir felly gyfrifo'r egni rhydd:

$$E_{\text{amhotensial}} - E_{\text{potensial}} = \frac{1}{2\mu_0} \left(\int B_{\text{amhotensial}}^2 \, dV - \int B_{\text{potensial}}^2 \, dV \right)$$

Wrth ystyried cydrannau perpendicwlar a pharalel i'r maes potensial, gellir dangos bod

$$E_{\text{rhydd}} = \frac{1}{2\mu_0} \int B_{\text{perpendicwlar}}^2 \, dV$$

Hynny yw, mae'r egni rhydd yn dibynnu ar gydran berpendicwlar $\mathbf{B}_{\text{perpendicwlar}}$ yn unig.

Er mwyn cyfrifo'r egni rhydd, ystyrir y grid tri dimensiwn y soniwyd amdano yn adran 4.5, sy'n ymestyn o arwyneb y ffotosffer ac yn cynnwys y cromosffer a'r corona ac integreiddir dros y grid i gyfrifo cyfanswm yr egni rhydd. Nid yw'r grid yn ymestyn yn uwch na 0.15 radiws yr Haul uwchben arwyneb yr Haul gan nad yw'r dybiaeth ddi-rym yn gymwys uwchlaw hyn. Rhwir manylion ei baramedrau yn adran 6.1. Yn y broses, tybir bod y maes magnetig yn gyson mewn picselel o'r grid a chyfrifir gwerth yr egni rhydd ym mhob picselel. Cyfrifir hefyd egni'r maes potensial ac egni'r maes amhotensial.

Gan y ceir data arbrolfol o'r magnetogramau a delweddau AIA bob 45 eiliad, yna gellir defnyddio'r model i gyfrifo'r egni rhydd bob 45 eiliad ac edrych ar y newidiadau yn yr egni.

6. Enghraifft: 08:00-09:00 ar 11 Tachwedd 2011

Arsylwyd system o lwpiau'r corona ar dde-ddwyrain yr Haul ar fore 11 Tachwedd 2011. Mae'r data AIA yn awgrymu y ceir osgiliadau yn y system hon, ynghyd ag o leiaf un alldaflad mäs, sy'n glir iawn. Drwy fodelu'r system hon bob 45 eiliad, gellir ehangu ein dealltwriaeth o ddynmeg ac egni'r system.

6.1 Paramedrau

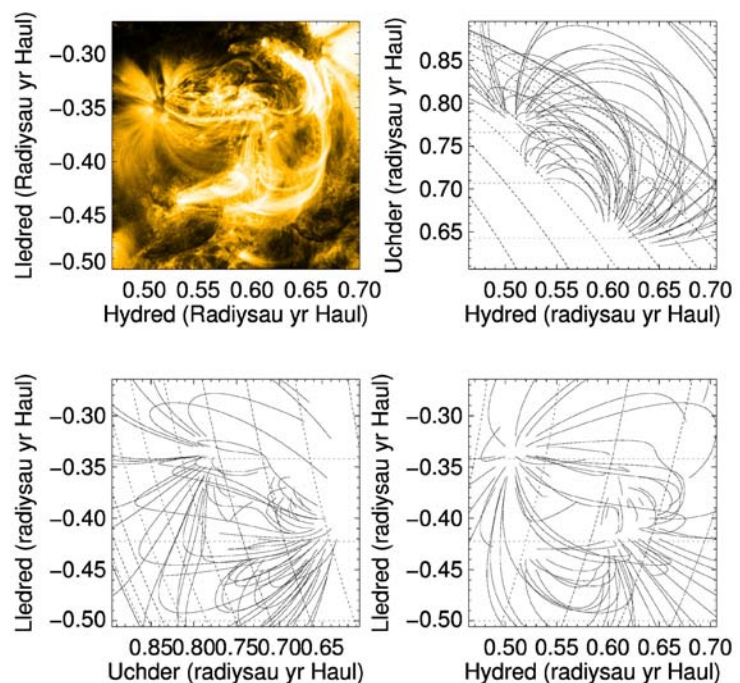
Amcangyfrifir y maes magnetig gan 50 o wefrau pwynt. Er nad oes modd cynnwys cymhlethdod cyfan y maes magnetig drwy ddefnyddio 50 o wefrau pwynt, mae'r symleiddio yn cynrychioli'r sefyllfa'n deg. Mae'r grid yn ymestyn dros ardal sy'n 0.2

radiws yr Haul mewn hydred, 0.2 radiws yr Haul mewn lledred a 0.15 radiws yr Haul mewn uchder. Ei gydraniad gofodol yw 0.001 radiws yr Haul. Mae hyn yn rhoi rhwydwaith o gelloedd 200 cell mewn hydred x 200 cell mewn lledred x 150 cell mewn uchder, a chyfanswm o chwe miliwn cell. Mae'r cydraniad gofodol yn caniatáu i α newid ar draws yr ardal. Darganfyddir gwerthoedd α yn lleoliadau'r gwefrau pwynt gan ddefnyddio'r dull a amlinellwyd eisoes.

6.2 Modelu'r maes magnetig

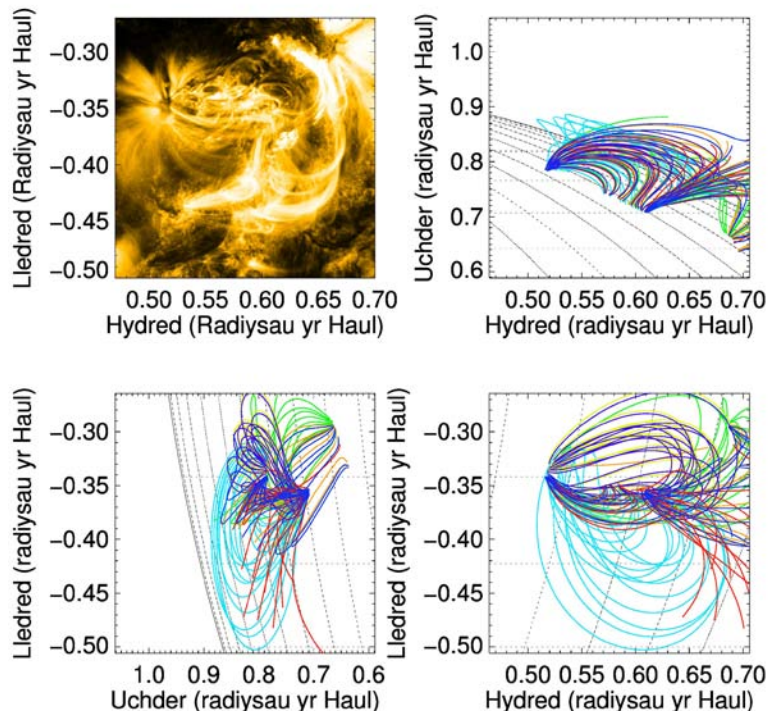
Trwy ddefnyddio bob un o'r saith prif donfedd, adeiladir model o'r maes magnetig yn y cromosffer a'r corona gan dybio bod y lwpiau i gyd yn dilyn llinellau'r maes magnetig yn y cromosffer a'r corona. Fel arfer, defnyddir tua 250 o lwpiau i amcangyfrif α yn lleoliad pob gwefr bwynt. Po fwyaf o lwpiau a ystyrir, y mwyaf cywir yw'r amcangyfrif, ac mae 250 yn rhoi canlyniad derbyniol fel y dangosir maes o law. Isod, yn ffigur 5, gwelir enghraifft o'r maes magnetig am 08:40:30 ar 11 Tachwedd 2011 o dri chyfeiriad orthogonol, ynghyd â delwedd AIA yn nhonfedd 17.1 nm ar yr un pryd, er mwyn cymharu. Ymddengys fod llinellau'r maes magnetig yn y graff hydred-lledred yn cyfateb gydag arsylwadau'r AIA, yn neilltuol wrth droed y lwpiau yng nghornel dop chwith y ddau banel. Wrth edrych yn ofalus ar y paneli, gwelir hefyd llinellau maes yng nghornel dop dde'r panel de gwaelod sy'n cyfateb i'r lwpiau yng nghornel dop dde'r panel top ar y chwith. Yn yr un modd, gwelir llinellau maes ar waelod a chwith y panel gwaelod ar y dde sy'n cyfateb yn dda i'r lwpiau a arsylwyd yn y panel top ar y chwith o ran eu dyluniad a'u siâp. Mae'r model hwn, serch hynny, yn llawer gwell nag arsylwadau'r AIA o ran rhoi uchderau'r lwpiau gwahanol. Mae'r ddau banel arall yn efelychu arsylwadau gan ddefnyddio uchder. Ymddengys bod llawer o'r lwpiau yng nghanol yr amrediadau hydred a lledred. Gwelir hefyd amrediad yn uchderau'r lwpiau, a nodir yn neilltuol bod rhai o'r lwpiau hyn yn rhy fyr i'w gweld yn y delweddau AIA.

Ffigur 5: Arsywadau AIA (panel top ar y chwith) a'r maes magnetig a fodelwyd (paneli eraill) ar 08:40:30, 11 Tachwedd 2011



6.3 Modelu gan ddefnyddio'r gwahanol donfeddi

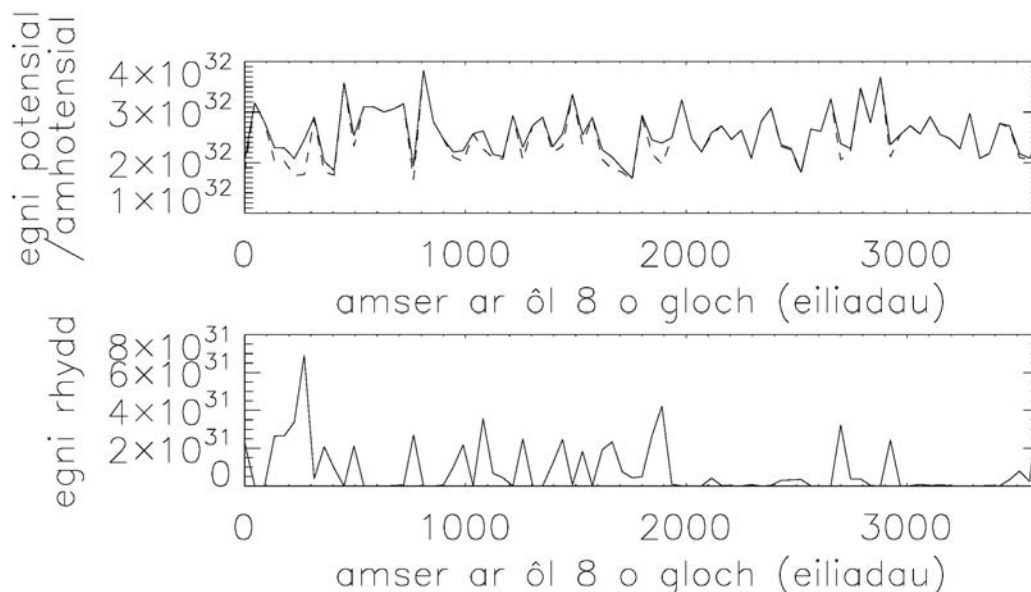
Defnyddir y lwpiau a welir yn y tonfeddi gwahanol er mwyn amcangyfrif y paramedr. Gwneir hyn gan ystyried pob tonfedd ar wahân, a cheir dosbarthiad o werthoedd ar gyfer α ar gyfer pob tonfedd ynghyd â dyluniad o'r maes magnetig yn y cromosffer a'r corona. Rhydd y dyluniad o'r maes magnetig ar gyfer un donfedd ddarlun damcaniaethol o ddosbarthiad y plasma ar y tymheredd sy'n cyfateb i'r donfedd honno. Gan fod y tonfeddi gwahanol yn cyfateb i dymereddau gwahanol, gellir yna eu defnyddio i gael model tri dimensiwn o'r plasma ar y tymereddau gwahanol. Wrth ystyried newidiadau dros gyfnod o amser, gellir ymhellach ddylunio dynameg ffurfweddiad y plasma. Anfantais fawr y dull hwn o ystyried pob tonfedd ar wahân yw bod nifer y lwpiau sydd ar gael yn y data i amcangyfrif pob dosbarthiad o werthoedd α yn gymharol fychan. Pe ystyrir yr holl donfeddi gyda'i gilydd, mae nifer y lwpiau'n sylweddol uwch, ond yma ystyrir cyfartaledd y gwerthoedd ar gyfer α ac ni cheir gwybodaeth am ffurfweddiad y plasma ar dymereddau gwahanol. Wrth ystyried y tonfeddi ar wahân, gall niferoedd bychain y lwpiau ar brydiau arwain at ffurfweddiadau eithaf rhyfedd ar gyfer y plasma drwy roi gwerthoedd anghredadwy o uchel neu isel i α . Serch hynny, gwelir enghraifft yn ffigur 6 lle mae'r dyluniad o'r maes magnetig mewn ardal (ar ledredau isel) yn cael ei ddynodi gan y lliw glas golau i gynrychioli'r donfedd 13.1 nm. Felly, gellir dod i'r casgliad fod tymheredd yr ardal hon yn cyfateb yn bennaf i dymereddau'r donfedd 13.1 nm, sy'n gynhesach yn gyffredinol na thymereddau'r tonfeddi eraill. Yn y modd hwn, gellir dod i gasgliadau am ymddygiad y plasma ar dymereddau gwahanol neu ddosbarthiad tymheredd y plasma. Yn y delweddau a gynhyrchir gan y dull hwn, dylunnir y tonfeddi gwahanol gan liwiau safonol data AIA: 9.4 nm gan wyrdd, 13.1 nm gan las golau, 17.1 nm gan felyn, 19.3 nm gan frown, 21.1 nm gan borffor, 30.4 nm gan goch a 33.5 nm gan las tywyll.



Ffigur 6: Arsyllwadau AIA (panel top ar y chwith) a'r maes magnetig, a fodelwyd am 08:44:15 ar 11 Tachwedd 2011. Ymddengys fod y plasma ar ledredau isel yn cyfateb i dymereddau'r donfedd 13.1 nm (glas golau).

6.4 Yr egni rhydd a'i berthynas ag arsylwadau

Dengys ffigur 7 yr egni potensial (panel uchaf, llinell doredig), yr egni amhotensial (panel uchaf, llinell ddi-dor) a'r egni rhydd (panel isaf) a gyfrifwyd o'r modelu bob 45 eiliad.

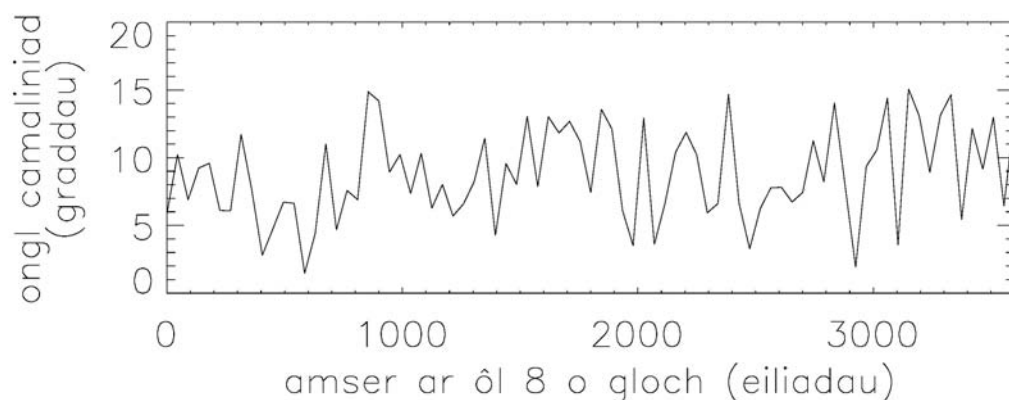


Ffigur 7: Yr egniau gwahanol (unedau: erg) a fodelwyd dros gyfnod o un awr

Mae'r egni a amcangyfrifwyd o'r model yn newid llawer gormod, efallai o ganlyniad i'r tybiaethau a wnaed, ond gwelir sawl nodwedd ddiddorol. E.e., tua chwarter i naw o'r gloch (2700 eiliad), gwelwyd cwmp yn yr egni rhydd o 3.22×10^{31} erg i 3.68×10^{30} erg. Yn yr arsylwadau AIA ar yr adeg hon, ffrwydrodd un o'r lwpiau gan agor. Dilynwyd hyn gan newid ffurfweddiad yn yr arsylwadau. Gyda'n hamcangyfrifon am yr egni rhydd cyn ac ar ôl y ffrwydrad, gellir amcangyfrif yr egni rhydd a ryddhawyd fel tua 2.85×10^{31} erg. Fodd bynnag, nid arsylwyd unrhyw ddigwyddiadau yn cyfateb i sawl gostyngiad arall mewn egni rhydd a welir yn y graff.

7. Trafodaeth

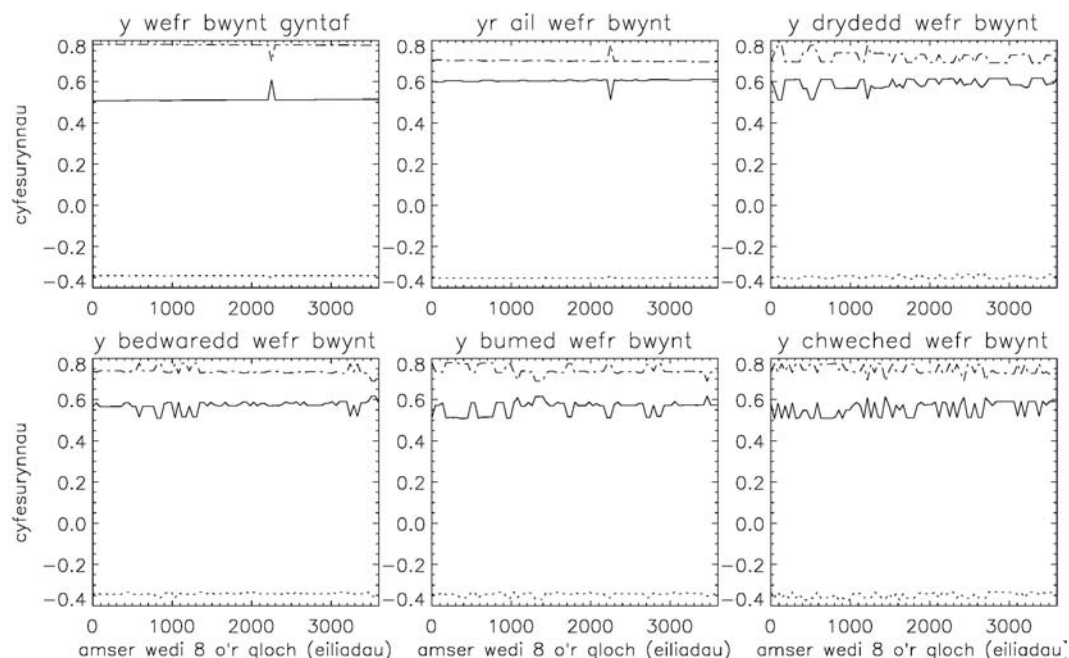
Ymddengys y gall y dull hwn gynyddu dealltwriaeth o lwpiau yn y cromosffer a'r corona. Gellir ei ddefnyddio i amcangyfrif yr egni rhydd a gollir drwy ffrwydradau fel yn yr enghraifft am tua chwarter i naw o'r gloch yn yr arsylwadau AIA. Un modd o asesu dull NLFFF yw drwy edrych ar y camaliniad rhwng y maes magnetig a ddyluniwyd gan ddefnyddio'r dull NLFFF a'r lwpiau a arsylwyd. Mesurir y camaliniad gan yr ongl rhwng cyfeiriadau'r maes magnetig a ddyluniwyd a'r lwpiau ar arwyneb y ffotosffer. Cyfrifir gwerth yr ongl ar gyfartaledd dros ddelwedd benodol. Yn naturiol, mae gwerth yr ongl ar gyfartaledd yn newid dros amser, a dangosir cyfartaledd yr ongl camaliniad ar gyfer yr enghraifft fel ffwythiant amser yn ffigur 8. Gellir yna gael mesuriad o gyfartaledd y camaliniad dros y cyfnod o awr h.y. cyfartaledd yr onglau yn y ffigur, a chafwyd gwerth o 8.78° . Sylwir hefyd o'r ffigur nad oedd yr ongl camaliniad yn fwy na 17° .



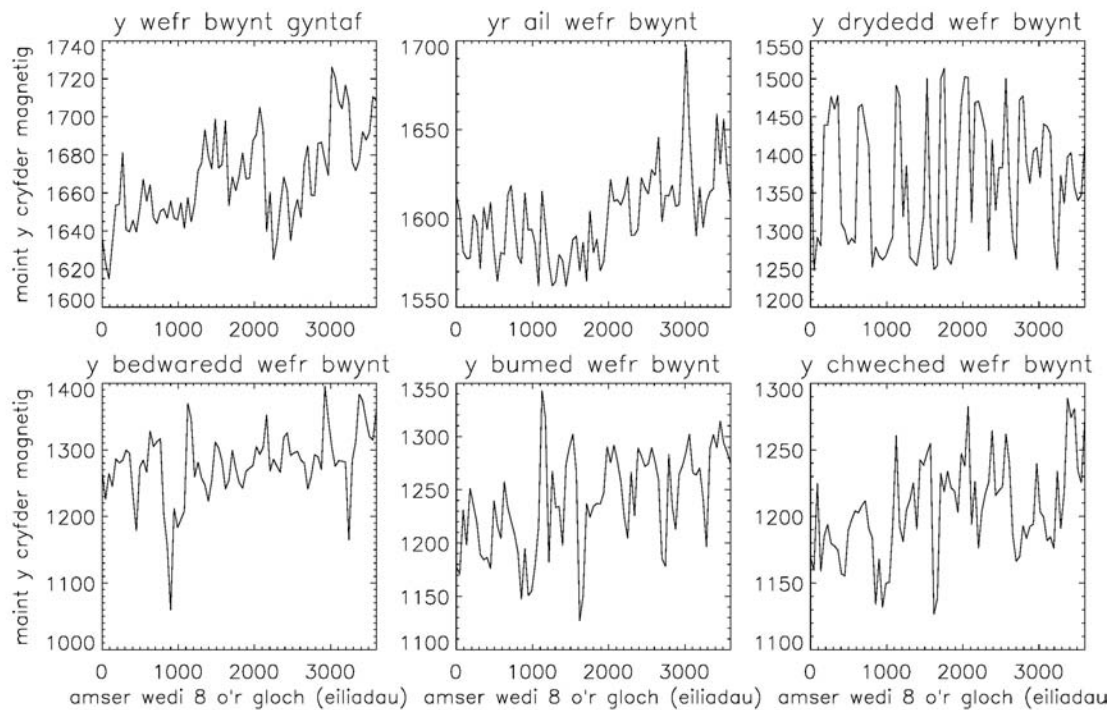
Ffigur 8: Cyfartaledd yr ongl camaliniad fel ffwythiant amser dros gyfnod o awr

Gellir hefyd asesu'r dull drwy edrych yn fanylach ar y gwefrau pwynt a'r nodweddion cysylltiedig.

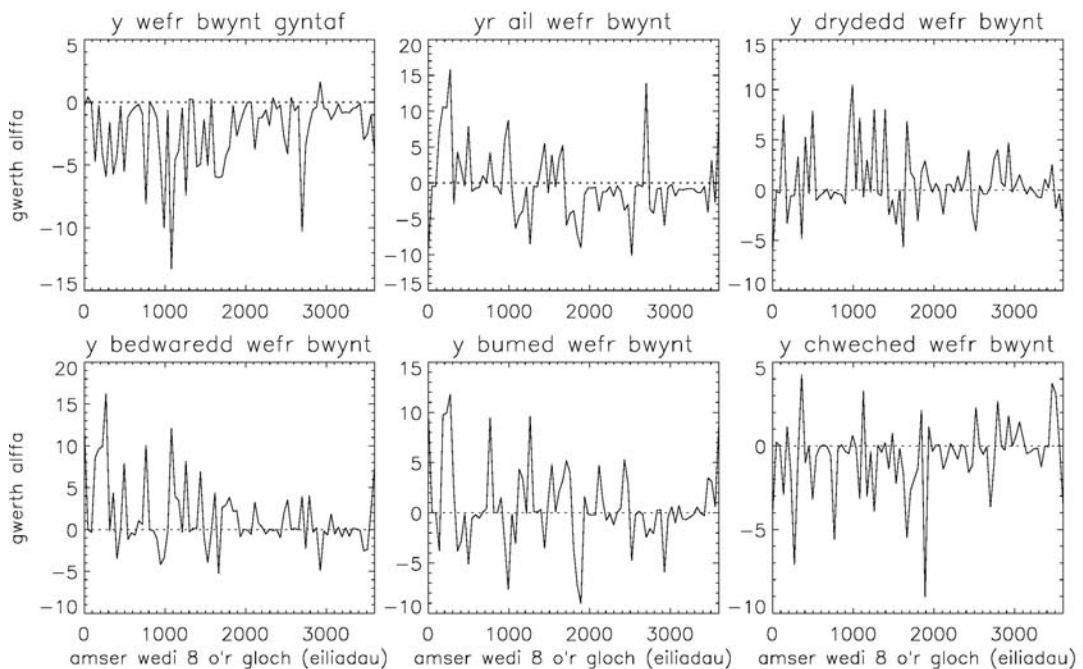
Roedd dadelfennu *magnetogram* 2D i sawl gwefr bwynt yn allweddol i'r dull a ddefnyddiwyd. Yn ffigurau 9 a 10, dangosir sut y newidiodd cyfesurynnau a maint cryfder magnetig y chwe gwefrau bwynt cryfaf yn yr enghraifft dros gyfnod o awr. Yn ffigur 9, dangosir cyfesurynnau'r chwe gwefr bwynt, gyda'r wefr bwynt gryfaf yn y panel cyntaf a'r gwanaf yn y panel olaf. Yn naturiol, gyda threigl amser mae'n bosibl nad yr un chwe gwefr bwynt a ystyrir fel y chwe cryfaf ac mae'n fwy tebygol y bydd eu trefn yn y panelau'n newid. Dynodir cyfesuryn-x y gwefrau pwynt gan y llinell doredig fân (dotiau), dynodir cyfesuryn-y gan y llinell ddi-dor, a dynodir cyfesuryn-z gan y llinell doredig.



Ffigur 9: Cyfesurynnau'r chwe gwefr bwynt cryfaf fel ffwythiant amser dros gyfnod o un awr



Figur 10: Newid yng nghryfder magnetig y chwe gwefr bwynt cryfaf dros gyfnod o awr



Figur 11: Newidiadau yng ngwerth α am bob un o'r chwe gwefr bwynt cryfaf dros gyfnod o awr

Mae'r gwefrau pwynt yn aros fwy neu lai yn yr un lleoliad drwy'r amser, sy'n awgrymu cysondeb yn y lleoliad lle mae'r maes magnetig yn gryf. Lle ceir newidiadau, gellir eu hesbonio yn nhermau'r newid yn nhrefn y gwefrau yn y paneli ar sail cryfder magnetig. Fodd bynnag, gwelir yn ffigur 10 y cafwyd newidiadau sylweddol yng nghryfder y gwefrau pwynt dros y cyfnod o amser, sy'n awgrymu nad yw'r sefyllfa'n gyson â'r hyn a ddisgwylir mewn sefyllfa lle nad oes ffrwydrad. Ystyriwyd hefyd mwy na chwe gwefr bwynt i weld a fyddai hyn yn rhoi cryfder mwy cyson, ond amrywiol fu'r canlyniadau yma hefyd.

Dengys ffigur 11 y gwerthoedd a gyfrifwyd ar gyfer α ar gyfer y chwe gwefr bwynt cryfaf dros y cyfnod o awr. Gwelir mewn ambell banel fod α yn newid o fod yn sylweddol positif i sylweddol negatif (neu fel arall) dros 45 eiliad – sef y cydraniad amserol – a oedd yn annisgwyl. Down i'r casgliad felly, er y gall y dull fod yn ddefnyddiol er mwyn esbonio dynameg ffurfweddadau lwpiau'r Haul, fod angen bod yn ofalus wrth ddechongli'r canlyniadau.

8. Casgliad

Llwyddodd y dull hwn i greu delweddau mewn tri dimensiwn o strwythurau a ffurfweddadau lwpiau'r Haul, rhywbeth na ellir ei wneud gyda delweddau AIA yn unig. Pan welir y fath ddelweddau mewn dau ddimensiwn, maent yn aml yn cyfateb yn dda i'r delweddau AIA, a gallwn eu defnyddio i amcangyfrif uchder y lwpiau gwahanol, rhywbeth sy'n amhosibl gyda delweddau AIA yn unig. Mae'r dull hwn hefyd yn darparu golwg ar ddisbarthiad tymereddau plasma'r cromosffer a'r corona trwy ddefnyddio delweddau AIA mewn tonfeddi gwahanol ar wahân, er y nodir nad yw'r dull yn hollol ddibynadwy o ganlyniad i brinder data. Rhoddodd y dull syniad bras am yr egniâu a oedd yn gysylltiedig â'r maes magnetig ynghyd â'r newidiadau a ddigwyddodd iddynt dros amser. Yn neilltuol, gwelwyd gostyngiad sylweddol yn yr egni rhydd mewn ffrwydrad. Er nad yw'r dull yn hollol ddibynadwy er mwyn amcangyfrif newidiadau yn yr egni rhydd, mae'n argoeli'n dda ar gyfer dulliau newydd o'r fath yn y dyfodol. Y cam nesaf fydd datblygu dulliau eraill mwy dibynadwy er mwyn modelu systemau o'r fath gyda chydraniad amserol o 45 eiliad.

Diolchiadau a chydabyddiaethau

Cyllidir fy ymchwil gan y Cyngor Adnoddau Gwyddoniaeth a Thechnoleg (STFC). Hoffwn ddiolch i'm harolygydd, Xing Li, am ei gymorth.

Llyfryddiaeth

- Aschwanden, M. (2012), 'Nonlinear Force-Free Magnetic Field Fitting to Coronal Loops with and without Stereoscopy', *The Astrophysical Journal*, 763, 115-32.
- Aschwanden, M. (2013), 'A Nonlinear Force-Free Magnetic Field Approximation Suitable for Fast Forward-Fitting to Coronal Loops. I. Theory', *Solar Physics*, 287, 324-44.
- Aschwanden, M., a Malunashenko, A. (2013), 'A Nonlinear Force-Free Magnetic Field Approximation Suitable for Fast Forward-Fitting to Coronal Loops. II. Numeric Code and Tests', *Solar Physics*, 287, 345-67.
- Aschwanden, M. (2013a), 'A Nonlinear Force-Free Magnetic Field Approximation Suitable for Fast Forward-Fitting to Coronal Loops. III. The Free Energy', *Solar Physics*, 287, 369-89.
- Chiueh, T., a Zweibel, E. G. (1989), 'Stability of Stressed Current Tubes and Energy Storage in the Solar Corona', *The Astrophysical Journal*, 338, 1158-70.
- Chodura, R., a Schlüter, A. (1981), 'A 3D code for MHD equilibrium and stability', *Journal of Computational Physics*, 41, 68-88.
- Grad, H., a Rubín, H. (1958), 'Hydromagnetic Equilibria and Force Free Fields', *Peaceful Uses of Atomic Energy*, 31, 190-97.
- Guo Y., Ding, M., Liu, Y., et al. (2012), 'Modeling Magnetic Field Structure of a Solar Active Region Corona Using Nonlinear Force-Free Fields in Spherical Geometry', *The Astrophysical Journal*, 760, 47-61.
- Jiang, C., a Feng, X. (2013), 'Extrapolation of the Solar Coronal Magnetic Field from SDO/HMI Magnetogram by a CESE-MHD-NLFFF code', *The Astrophysical Journal*, 769, 144-56.
- Kliem, B., Su, Y., van Ballegoijen, A., et al. (2013), 'Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Eruption on 2010 April 8', *The Astrophysical Journal*, 779, 129-46.
- Liu, S., Zhang, H., a Su, J. (2011), 'Error Analysis Regarding the Calculation of Nonlinear Force-Free Field', *Solar Physics*, 270, 89-107.
- Low, B., a Lou, Y. (1989), 'Modeling Solar Force-Free Magnetic Fields', *The Astrophysical Journal*, 352, 343-52.
- Mackay, D., a van Ballegoijen, A. (2009), 'A Non-Linear Force-Free Field Model for the Evolving Magnetic Structure of Solar Filaments', *Solar Physics*, 260, 321-46.
- Malanushenko, A., Schrijver, C., DeRosa, M., et al. (2012), 'Guiding Nonlinear Force-free Modeling Using Coronal Observations: First Results Using a Quasi-Grad-Rubin Scheme', *The Astrophysical Journal*, 756, 153-71.
- Nakagawa, Y. (1974), 'Dynamics of the Solar Magnetic Field. I. Method of Examination of Force-Free Magnetic Fields', *The Astrophysical Journal*, 190, 437-40.
- Powell, M. J. D. (1964), 'An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives', *The Computer Journal*, 7 (2), 155-62.
- Su, Y., van Ballegoijen, A., Lites, B., et al. (2009), 'Observations and Nonlinear Force-Free Field Modeling of Active Region 10953', *The Astrophysical Journal*, 691, 105-14.

Tadesse, T., Wiegelmann, T., Inhester, B., et al. (2014), 'A Comparison Between Nonlinear Force-Free Field and Potential Field Models Using Full-Disk SDO/HMI Magnetogram', *Solar Physics*, 289, 831-45.

Wheatland, M. (2006), 'A Fast Current-Field Iteration Method for Calculating Nonlinear Force-Free Fields', *Solar Physics*, 238, 29-39.

Wiegelmann, T. (2003), 'Optimization Code With Weighting Function for the Reconstruction of Coronal Magnetic Fields', *Solar Physics*, 219, 87-108.

Wiegelmann, T., a Sakurai, S. (2012), 'Solar Force-Free Magnetic Fields', *Living Reviews in Solar Physics*, 9, 317-65.