Dr Owen Wyn Roberts

Tyrfedd yng ngwynt yr Haul

Gwerddon

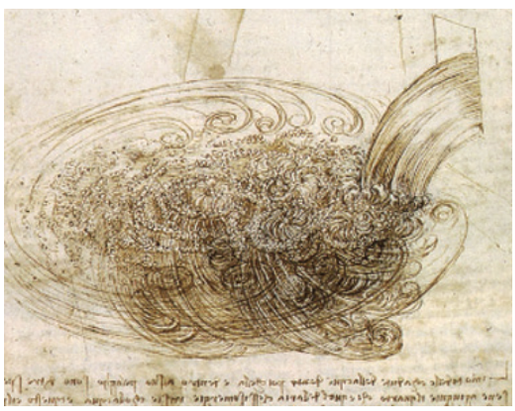
CYFNODOLYN ACADEMAIDD CYMRAEG

Golygydd: **Dr Anwen Jones**

Tyrfedd yng ngwynt yr Haul

Dr Owen Wyn Roberts

1. Cyflwyniad

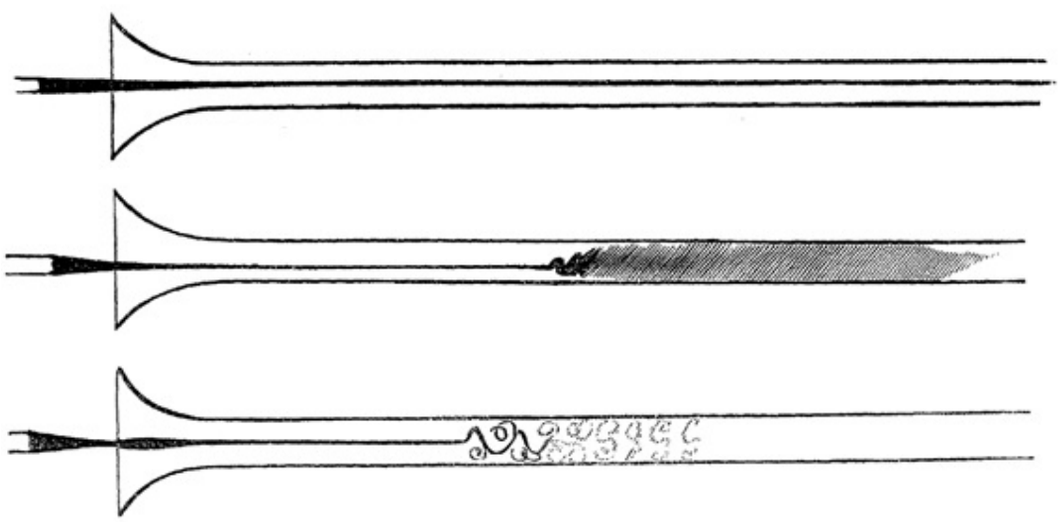


Ffigwr 1: Braslun Leonardo da Vinci

Bu tyrfedd yn un o'r problemau mwyaf ym meysydd Deinameg Llifyddion a Ffiseg ers pum canrif. Y person cyntaf i gofnodi ymchwil ar y testun oedd yr athrylith Leonardo da Vinci yn oes y Dadeni. Brasluniodd lawer o lifoedd tyrfol megis yr un yn Ffigwr 1, ac ysgrifennodd rai sylwadau ar y ffenomen.

Erbyn yr ugeinfed ganrif, yr oedd tyrfedd yn bwnc llosg yn y byd gwyddonol. Gwnaeth Osbourne Reynolds (1883) arsylwadau o dyrfedd o ddŵr mewn peipen dryloyw. Chwistrellodd ychydig o liw i ganol y beipen ac arsylwodd sut y newidiai'r llif gyda chyflymder y dŵr. Darganfu fod gan y dŵr yr hyn a elwir yn gyflymder critigol (gweler Ffigwr 2). Pan fo'r llif yn gyflymach na'r cyflymder critigol, dengys y llif rinweddau tyrfedd. Bellach, defnyddir y mesuryn Rhif Reynolds i fesur effaith y llif. Mae'r Rhif Reynolds yn baramedr diddimensiwn, a roddir gan y gymhareb o rymoedd inertiaidd i'r grymoedd gludiog yn y llifydd (ffrithiant yn y dŵr).

Wedi hyn, bu sawl ymdrech i ddeall tyrfedd. Yn y labordy, gwnaed arbrofion tebyg i arbrawf Reynolds (gweler adolygiad gan Frisch, 1995, a Mullin, 2011). Ceisiwyd hefyd ddisgrifio tyrfedd yn fathemategol, gan ddefnyddio a cheisio datrys hafaliadau llifyddion megis hafaliad Navier-Stokes (ail Ddeddf Newton ar gyfer llifyddion). Er hynny,



Ffigwr 2: Brasluniau o arbrawf Osbourne Reynolds (1883)

yn sgil natur aflinol yr hafaliad hwn, y mae'n amhosibl ei ddatrys am bob paramedr. Er y cafwyd sawl canlyniad mathemategol drwy ddadlau dimensiynol, yn ogystal â sawl arbrawf yn eu cefnogi, ni chafwyd hyd heddiw theori i esbonio tyrfedd yn gyflawn.

Y canlyniad mwyaf adnabyddus yw'r indecs sbectrol -5/3 a gafodd ei olrhain gan Andrey Kolmogorov (1941). Y mae'r indecs spectrol hwn yn dangos y ceir llif cyson o egni o eddïau mawr i rai llai, a'r amser nodweddiadol a'r llif yn cael eu rhoi gan 1/kv (amser trosiant eddi lle y mae k yn dynodi'r rhif ton, a v yn dynodi'r cyflymder), sef yr amser y cymera un eddi i chwalu i eddïau llai. Gwnaed nifer fawr o fesuriadau sbectrwm y tyrfedd mewn sawl arbrawf, yn cynnwys arbrofion mewn labordai a'r tu allan, megis mewn sianeli llanw (Grant, 1962). Er bod dadl Kolmogorov yn olrhain yr indecs spectrol, ac yn cael ei gadarnhau drwy arbrofion, ni cheir hyd yma theori gaeedig sy'n deillio o hafaliad Navier Stokes ac yn gorffen gyda'r indecs sbectrol.

Un o brif ddarganfyddiadau oes y gofod yw'r llif cyson o blasma (nwy wedi'i wefru) sy'n llifo allan o'r Haul i'r cyfrwng rhyngblanedol. Gwyddonydd o'r enw Parker oedd y cyntaf i gyhoeddi'r syniad hwn (Parker, 1958), er y'i hawgrymwyd eisoes gan rai. Yn ei bapur, awgrymodd Parker yn ychwanegol bod y llif hwn o ronynnau o'r Haul yn achosi ffonemenau stormydd magnetig ac awrorau ar y Ddaear.

Y mae gwynt yr Haul yn cynnwys nifer o ïonau gwahanol (gronynnau a chanddynt wefr drydanol). Protonau, electronau a gronynnau alffa yw'r rhain yn bennaf, gyda rhai ïonau trymach. Yn wahanol i hylif niwtral, effeithir yr ïonau gan feysydd magnetig a thrydanol. Y mae'r plasma'n ddargludydd cerrynt da ac o dan rai amodau gall gludo maes magnetig yn y llif. O ganlyniad i hyn, gall llawer o donnau llinol fodoli yn y plasma, sydd heb unrhyw don gyfatebol mewn hylif niwtral, megis tonnau lle y mae maes magnetig yn bwysig.

Gall gwynt yr Haul fodoli mewn tri chyflwr: cyflym, araf a chymedrol. Y mae'r cyflwr cyflym yn gysylltiedig â mannau lle y mae maes magnetig yr Haul ar agor, sef ar begynau'r Haul ynghyd â lle y ceir ardaloedd llai o ddwysedd isel yn y corona, fel atmosffer yr Haul (am drafodaeth fwy trylwyr o'r corona, cyfeirier at Morgan, 2012). Yn gyffredinol, y mae cyflymder y gwynt cyflym yn 600-950 km s^{-1}. Y mae'r gwynt araf yn gysylltiedig ag ardaloedd ar arwyneb yr Haul lle y mae'r maes magnetig ar gau a lle y mae ganddo gyflymder o tua 300-450 km s^{-1}. Y mae'r trydydd math yn gysylltiedig ag alldafliadau màs o'r corona; y mae ei gyflymderau'n disgyn rhwng y ddau gyflwr arall ond y mae ei ddwysedd yn llawer mwy na'r ddau fath arall.

Y mae amlder y gwyntoedd hyn a'r lleoliad ar yr Haul lle y tarddant yn ddibynnol ar gylchrediad actifedd magnetig yr Haul. Y mae'r cylchrediad actifedd yn amrywio o actifedd isel i uchel ac yna'n ôl i isel dros gyfnod o tua 11 mlynedd. Yn ystod cyfnodau o actifedd isel, ceir gwynt araf o amgylch cyhydedd yr Haul a gwynt cyflym o amgylch y pegynau, ac y mae'r gwynt sy'n ganlyniad i alldafliadau màs corona yn brin iawn. Pan fo'r actifedd magnetig yn uchel, ceir gwynt cyflym ac araf o amgylch y cyhydedd. Daw'r gwynt araf a chyflym o bob rhan o'r arwyneb ac at hynny, ceir effeithiau alldafliadau màs o'r corona yn amlach.

Gellir meddwl am wynt yr Haul fel estyniad i'r corona sy'n ymestyn i mewn i'r cyfrwng rhyng-blanedol gan greu'r hyn a elwir yr Heliosffer, sydd fel swigen o blasma o gwmpas

yr Haul. Ceisiodd sawl gwyddonydd megis Birkeland esbonio ffenomen a weler yn yr ïonosffer (gweler Pryse, 2012, am drafodaeth ar yr ïonosffer) wrth honni eu bod yn ganlyniad i lif plasma'n dod o'r Haul. Honnodd gwyddonydd o'r enw Biermann yn ogystal mai gwynt yr Haul a achosai wyriad mewn cynffonnau comedau.

Serch hynny, Parker (1958) oedd y cyntaf i ddefnyddio'r term `gwynt yr Haul' ac i ysgrifennu hafaliadau ar gyfer y llif hwn, gan ddangos y gall y plasma lifo allan gyda'r maes magnetig. Er gwaethaf sawl darn o dystiolaeth gadarnhaol, nid oedd dehongliad Parker yn boblogaidd ymysg gwyddonwyr tan yr oedd yn bosibl i'w wireddu am y tro cyntaf gan longau gofod. Y cyntaf i wneud hyn oedd Gringauz, ar y llong ofod Sofiet Lunik 2 yn 1959, er y parhâi rhai i amau cywirdeb y data. Dinistriwyd pob amheuaeth gan Neugebauer, 1962, ac efo mesuriadau o long ofod Mariner 2. Yn fuan ar ôl i wynt yr Haul gael ei archwilio gan longau gofod yn y plasma (*in situ*), sylweddolodd gwyddonwyr y dengys lawer o nodweddion a arsylwyd eisoes mewn tyrfedd llif hylif niwtral. Erbyn hyn, y mae'n wybyddus mai plasma yw'r cyflwr mater baryonig mwyaf cyffredin yn y bydysawd, a bod llawer ohono'n dangos nodweddion tyrfedd. Y mae'r rhain yn cynnwys gwrthrychau astroffisegol mor fawr â gweddillion uwchnofa a disgiau ymgasglu o gwmpas tyllau du. Nid yw'r ffenomen o dyrfedd mewn plasma yn gyfyngedig i'r gofod ychwaith. Dengys y plasma a geir mewn adweithydd ymasiad yr un nodweddion hefyd, yn ogystal â llawer o blasma mewn labordai. Y mae tyrfedd yn ffenomen sy'n digwydd ar sawl graddfa wahanol, ar raddfa fach mewn arbrofion labordy ac ar raddfa fawr mewn perthynas â rhai o wrthrychau mwyaf y bydysawd.

Cwblheir llawer o ymchwil i blasma mewn labordai a deuwyd at sawl canlyniad pwysig, ond mae'n dasg anodd i'w chyflawni. Mewn labordy, y mae maint yr offer mesur yn debyg i faint paramedrau'r plasma sydd dan sylw, ac o ganlyniad, y mae'n anodd gwneud mesuriadau cywir. Fodd bynnag, os gyrrir offer i'r gofod, lle y mae meintiau paramedrau'r tyrfedd yn anferth a llawer gwaith mwy na'r lloeren, y mae'r broses o fesur yn llawer haws. O safbwynt hynny, gellid ystyried gwynt yr Haul a magnetosffer y Ddaear fel labordy plasma enfawr naturiol.

Er mwyn ymchwilio strwythur 3-D gwynt yr Haul ac er mwyn gallu gwahaniaethu rhwng newidiadau amserol a gofodol, y mae angen defnyddio o leiaf pedair lloeren megis y llongau Cluster (Escoubet, 1997). Y mae'r pedair lloeren Cluster yn hedfan mewn pyramid trionglog. Yr offer a ddefnyddir yn yr ymchwil hon yw'r Fluxgate Magnetometer (FGM) (Balogh et al., 2001) sy'n mesur dwysedd fflwcs y maes magnetig mewn tri chyfesuryn GSE ynghyd â'r Cluster Ion Spectrometer (CIS), sy'n rhoi gwybodaeth am gyflymder a dwysedd gronynnau'r plasma. Yn yr astudiaeth hon, y mae'r lloerennau tua 200km oddi wrth ei gilydd, sy'n ein galluogi i astudio tyrfedd ar feintiau radiws cylchdroi protonau.

Ceir sawl dehongliad cyfredol am natur y tyrfedd ar feintiau sy'n agos i faint radiws cylchdroi protonau. Er bod tyrfedd yn ffenomen aflinol, os yw'r tyrfedd yn `wan', y mae'n bosibl y gellir modelu'r tyrfedd gan donnau llinol (Goldreich a Sridhar, 1995). Honna rhai (Sahraoui, 2010, Salem, 2012) y gellir disgrifio'r tyrfedd fel tonnau llinol Alfvén Cinetig, tra honna eraill ei fod yn ymffurfio fel tonnau chwibanol (*whistler*). At hynny, ceir gwyddonwyr a honna ei fod yn amhosibl disgrifio'r tyrfedd fel un math o don yn unig, a hwyrach mai arosodiadau nifer o donnau llinol neu donnau aflinol sy'n bresennol (Narita, 2011). Ceir syniadau eraill hefyd, e.e. ei fod yn bosibl bod gwynt yr Haul hefyd

yn cynnwys strwythurau 2-D megis lleiniau cerrynt (Perri, 2012) neu fortecsau magnetig, neu hyd yn oed donnau llinol a strwythurau 2-D (Roberts, 2013). Y mae fortecsau Alfvén yn strwythurau a geir mewn plasma, sy'n debyg i seiclonau mewn atmosffer. Y maent yn ddatrysiadau o'r hafaliadau magnetohydrodynameg (MHD) anghywasg, a phan fo lloeren yn croesi'r fortecsau, ceir newidiadau yn y maes magnetig sy'n amrywio yn ôl y pwynt ar y fortecs lle y mae'r lloeren yn eu croesi.

Yn yr erthygl hon, trafodir fortecsau MHD (Petviasvilli a Pokhotelov, 1992, ac Alexandrova, 2006) er bod mathau gwahanol i'w cael, megis fortecsau drifft sy'n ganlyniad i blasma nad yw'n unffurf (Sundkvist, 2005), neu fortecsau Kelvin-Helmholtz, sy'n ganlyniad i'r ansefydlogrwydd Kelvin-Helmholtz (Hasegawa, 2004). Yn yr erthygl hon, trafodir y fortecsau o'r math MHD yn unig.

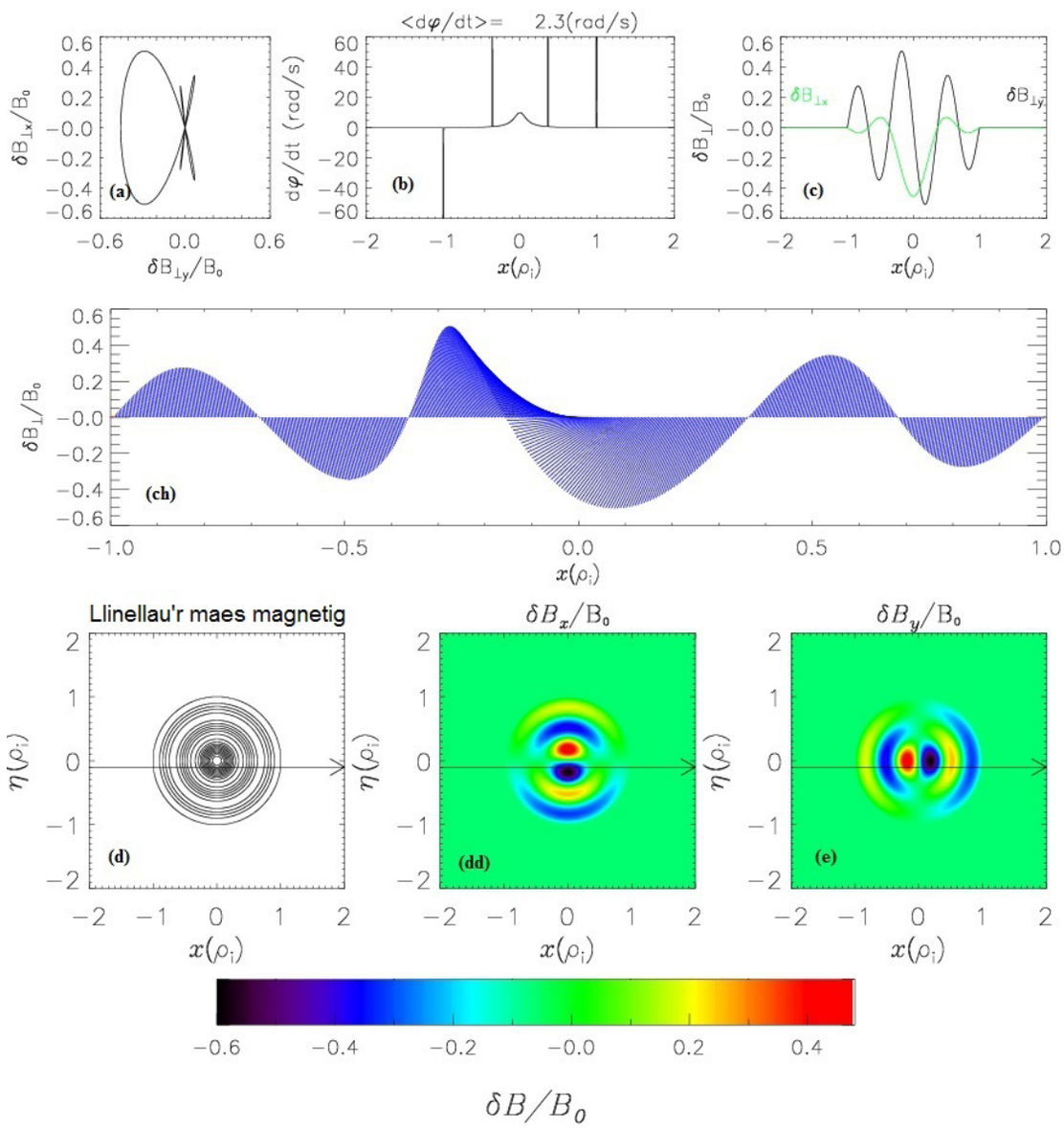
Yn ail ran yr erthygl, trafodir fortecsau Alfvén. Cyflwynir model o ddau groesiad o'r fortecsau Alfvén ar gyfer fortecsau monopol a deupol ac wedyn, yn rhannau tri a phedwar, cyflwynir technegau dadansoddi ar gyfer data gwynt yr Haul yn ogystal â data o bedwar ysbaid o wynt cyflym yr Haul. Yn rhan pump, dangosir canlyniadau'r technegau, ac yn rhan chwech trafodir y canlyniadau ynghyd â'r ddau ddehongliad ynghylch fortecsau a thonnau llinol.

2. Modelu Fortecs Alfvén

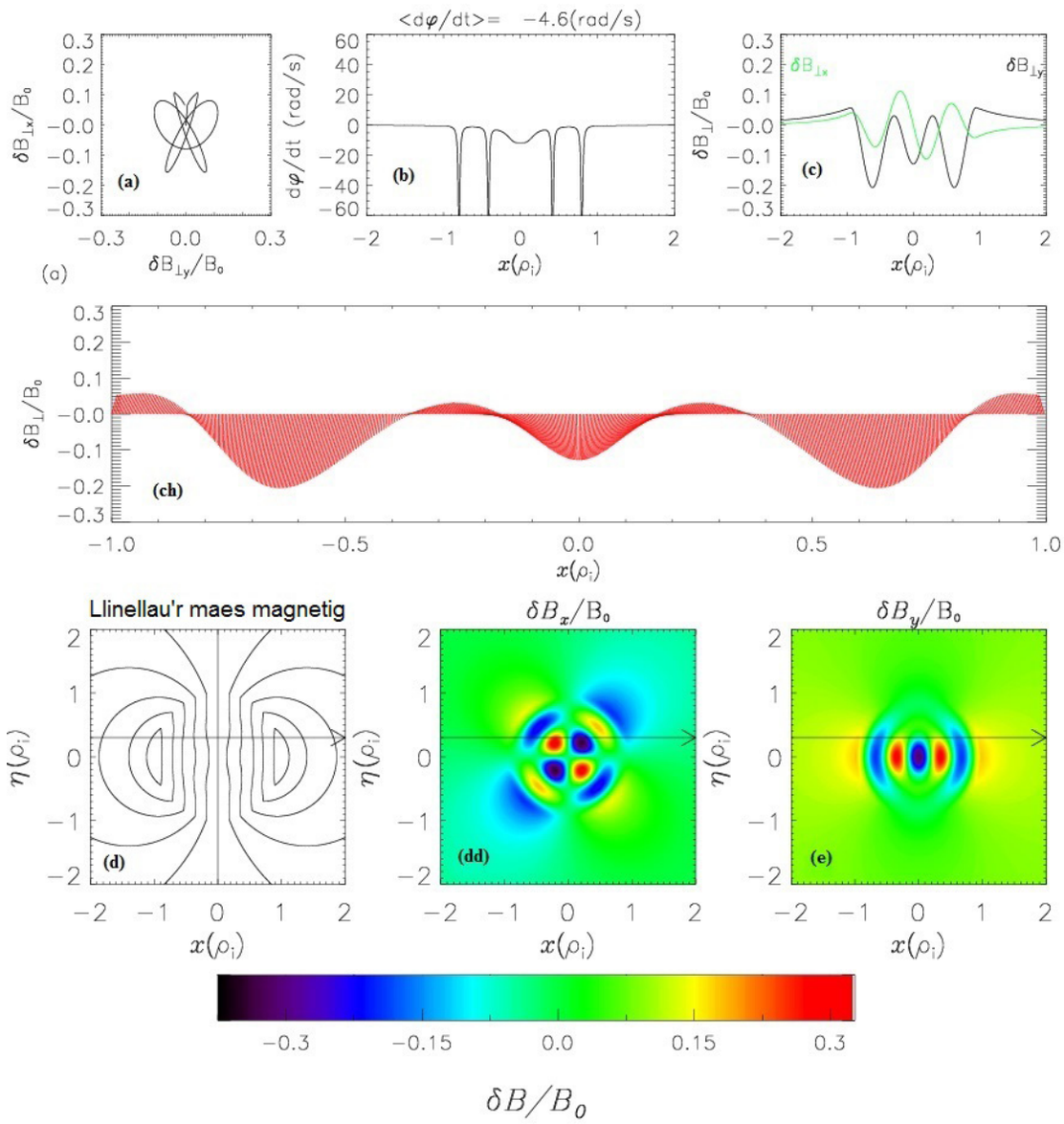
Trafodwyd fortecsau Alfvén yn drylwyr mewn Ffiseg plasma gan nifer o awduron. Honna rhai y gellir meddwl amdanynt fel gwrthran i seiclonau mewn atmosffer niwtral, ond eu bod yn bodoli mewn plasma. Fe'u harsylwyd yn magnetowain (*magnetosheath*) y Ddaear (Alexandrova, 2006) ac yn magnetosffer y blaned Sadwrn (Alexandrova a Saur, 2008). Seiliwyd y model hwn ar hafaliadau delfrydol MHD anghywasg, sy'n tybio bod δB paralel ~0. Caiff y modelau eu holrhain yn drylwyr yn Petviasvilli a Pokhotelov, 1992, ac Alexandrova, 2006.

Y mae'r rhain yn strwythurau hir tebyg i bibell wedi'u ffurfio o gwmpas y maes magnetig cefndirol a geir mewn dau brif fath, sef monopol a deupol. Y mae fortecsau monopol wedi'u cyfunioni â'r maes magnetig B0, tra bod fortecsau deupol wedi'u gwyro o'r maes magnetig ag onglau bach (dangosir model fortecs deupol sydd wedi'i wyro pedair gradd o'r maes magnetig yn Ffigwr 4). Dangosir model o loeren yn croesi'r ddau fath yn ffigyrau 3 a 4. Dengys ffigyrau 3a a 3b y polareiddiad yn y plân sy'n berpendicwlar i B0, tra bod ffigyrau 3b a 4b yn dangos mesuriad o sut y mae'r fector yn troi. Dengys ffigyrau 3c a 4c y gyfres amser a fesurir wrth i'r lloeren groesi'r fortecs. Noder bod y newidiadau yn y maes magnetig yn y trydydd cyfeiriad (yng nghyfeiriad y maes magnetig) yn sero (heb ei ddangos); dyma un o'r tybiaethau y seilir y model arni, ac un o'r tybiaethau a wna'r model. Dengys Ffigwr 3ch y troadau yn y maes. Y mae'r tri ffigwr olaf yn dangos y model: dengys Ffigwr 3d linellau'r maes magnetig a dengys Ffigwr 3dd a 3e drawstoriadau o'r fortecs, gyda'r llinell yn dangos llwybr y lloeren drwy'r fortecs.

Fel y gwelir yn y ddau ffigwr hwn, y mae'r polareiddiad yn y maes magnetig a achoswyd gan y fortecs, a welir gan y lloeren, yn dangos troadau sy'n gydlynol (Volwerk, 1996).



Ffigwr 3: Croesi fortecs monopol. Mae Ffigwr 3a yn dangos hodograff, 3b yn dangos cyfeiriad troi, 3c yn dangos y newid yn sgil croesi'r fortecs, a Ffigwr 3ch yn dangos llinellau'r meysydd magnetig. Mae Ffigwr 3d yn dangos llinellau'r maes magnetig, a Ffigwr 3dd a 3e yn dangos y newidiadau yn ôl gofod, gyda'r llinellau'n dangos taflwybr lloeren.



Ffigwr 4: Croesi fortecs deupol. Mae Ffigwr 4a yn dangos hodograff, 4b yn dangos cyfeiriad troi, 4c yn dangos y newid yn sgil croesi'r fortecs, Ffigwr 4ch yn dangos llinellau'r maes magnetig, Ffigwr 4d yn dangos llinellau'r maes magnetig, Ffigwr 4dd a 4e yn dangos newidiadau yn ôl gofod, a'r llinellau'n dangos taflwybr lloeren.

3. Technegau dadansoddi

Er mwyn astudio'r tyrfedd yng ngwynt yr Haul, defnyddir dwy dechneg: un sy'n dod o hyd i'r fector ton (k) cryfaf ar amledd penodedig (ω) (techneg o'r enw k-filtering (Pincon, 1990)), a'r llall sy'n archwilio sut y polareiddiwyd y tonnau, sef sut y mae maint y maes yn cylchdroi yn y plân y mae'r don yn teithio arno (*polarization analysis*).

Darpara'r offer FGM ddeuddeg cyfres amser ar gyfer y maes magnetig yng ngwynt yr Haul. Darpara'r pedair llong faes magnetig mewn tri chyfeiriad; x, y, z (lle mae x yn y cyfeiriad tua'r Haul oddi wrth y lloeren, z i begwn gogledd yr Haul ac y o'r lluoswm fectoraidd o'r ddau gyfeiriad arall). Gyda'r data hwn, gallwn ddefnyddio techneg a elwir yn `k-filtering'. Y mae i'r dechneg hon rai gofynion llym, ac y mae angen bod yn ofalus wrth ddadansoddi canlyniadau. I ddechrau, y mae'n rhaid i'r llongau gofod fod mewn ffurfweddau agos iawn i byramid sylfaen triongl perffaith. Ceir dau baramedr i ddisgrifio'r pyramid; `gwastadrwydd' (*planarity*) i ddisgrifio pa mor wastad ydyw, ac `ymestyniad' (*elongation*) i ddisgrifio pam mor hir ydyw (Robert, 1998). Y mae'n rhaid i'r ddau fod yn llai na 0.1. Os yw'r paramedrau hyn yn rhy fawr, y mae'n achosi diffyg samplu mewn un rhan o ofod, a all greu canlyniadau ffug. Yn ogystal, gan fod yn rhaid i'r cyfresi amser fod yn ergodig, nid yw'n bosibl defnyddio data os ceir newidiadau cyflym yn y cyfresi, fel siociau.

Allbwn y dechneg hon yw sbectrwm pŵer mewn tri dimensiwn yng ngofod k, P (ω_{sc}, k) ac amledd y don yn ffrâm y lloeren ω_{sc} P (ω_{sc}, k). Dynoda k y fector ton, k=2π($\frac{1}{\lambda_x}+\frac{1}{\lambda_y}+\frac{1}{\lambda_z}$), dynoda λ y donfedd yn y tri chyfeiriad cartesaidd, a dynoda ω_{sc} yr amledd yn ffrâm y llong ofod. Wrth gymryd y gwerth mwyaf yn y sbectrwm hwn, ceir fector ton mewn tri dimensiwn am un gwerth amledd yn ffrâm y llong ofod. Er mwyn canfod yr amledd yn ffrâm gwynt yr Haul, defnyddiwn hafaliad 1 er mwyn trawsffurfio i ffrâm gwynt yr Haul ω_p. Felly cawn ganfod y fector ton a'r amledd yn ffrâm gwynt yr Haul a phlotio'r berthynas gwasgariad:

$$\omega_p = \omega_{sc} - \mathrm{kv} \quad (1)$$

Yr ail dechneg a arddangosir yn yr erthygl hon yw dadansoddiad polareiddio. Y mae hon yn dechneg sy'n archwilio sut y newidia maint y maes magnetig yn y plân y mae'r don yn teithio arno. Yn yr astudiaeth hon, archwilir y polareiddiadau mewn dau blân: y mae un plân yn berpendicwlar i'r fector ton k (sydd wedi'i ddarganfod wrth ddefnyddio k-filtering), ac y mae'r llall yn y plân sy'n berpendicwlar i'r maes magnetig cefndirol B0.

Er mwyn gallu dadansoddi'r gyfres amser yn y ffordd hon, y mae angen defnyddio hidlydd pasio band amleddau er mwyn sicrhau mai amrediad bach o amleddau'n unig sy'n bresennol yn y gyfres. Defnyddir trawsffurfiadau ton fechan (*wavelet*) (Torrence a Compo, 1998) fel hidlydd naturiol i alluogi hyn.

Ar ôl hidlo'r signal, cynhyrchir hodograff ac ymchwilir i'r ffordd y mae'r fector yn cylchdroi yn y ddau blân, a hynny er mwyn ceisio dysgu rhywbeth am natur y tyrfedd.

4. Data

Yma, dadansoddir data o bedair ysbaid amser gwahanol rhwng 31 Ionawr a 29 Chwefror 2004 tra bod y lloerennau yng ngwynt cyflym yr Haul. Dangosir tabl o baramedrau plasma ac ymffurfion lloerennau yn Nhabl 1. Dynodir paramedrau'r plasma fel a ganlyn: B yn dynodi nerth y maes magnetig, n yn dynodi dwysedd, β yn dynodi paramedr beta plasma (cymhareb rhwng gwasgedd paralel thermol ïonau a gwasgedd magnetig), v_f yn dynodi cyflymder gwynt yr Haul, fci yn dynodi radiws cylchu protonau, vA yn dynodi cyflymder Alfvén, E yn dynodi ymestyniad, P yn dynodi gwastadrwydd (dau baramedr yn disgrifio siâp pyramid y lloerennau), θVB yn dynodi'r ongl rhwng cyflymder a maes magnetig, T_{iperp}/T_{ipar} yn dynodi anisotropedd tymheredd, T_e/T_i yn dynodi cymhareb tymheredd electronau i ïonau, ρ yn dynodi radiws cylchu thermol ïonau, D_i yn dynodi radiws Larmor, a Nalpha'n dynodi canran gronynnau alffa.

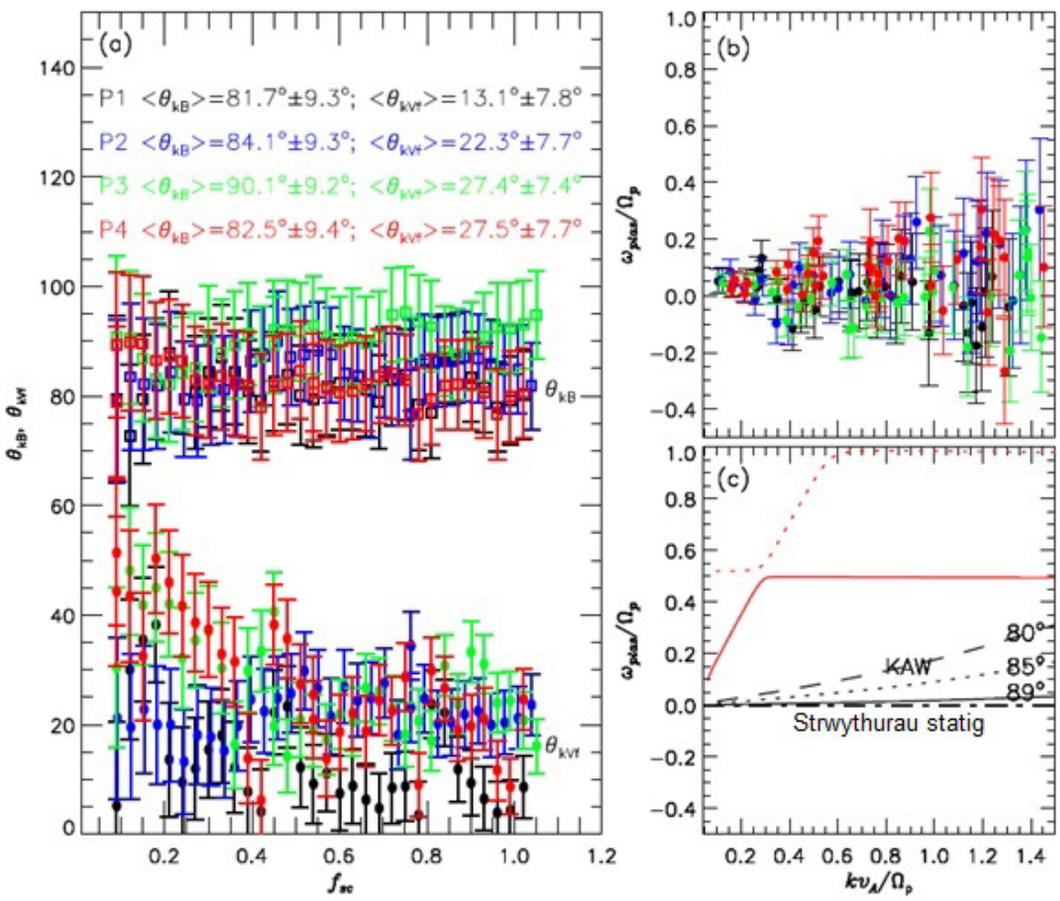
Tabl 1

	31 Ionawr	31 Ionawr	29 Chwefror	29 Chwefror
	14:30-14:40	14:45-14:55	04:10-04:20	04:25-04:35
B(nT)	8.45	7.97	9.56	9.34
$n(cm^{-3})$	3.47	3.25	2.88	2.73
β	0.62	0.72	0.73	0.67
v_f (kms^{-1})	613	609	646	657
fci	0.129	0.122	0.146	0.142
vA	99.1	96.2	123.1	123.4
E	0.05	0.04	0.01	0.02
P	0.07	0.06	0.03	0.01
θVB	75.1	66.6	78.6	84.1
T_{iperp}/T_{ipar}	1.41	1.28	1.26	1.46
T_e/T_i	Ddim ar gael	Ddim ar gael	0.37	0.39
ρ_i	115	121	129	137
D_i	122	126	134	138
Nalpha	1.4%	1.3%	0.38%	0.2%

5. Canlyniadau

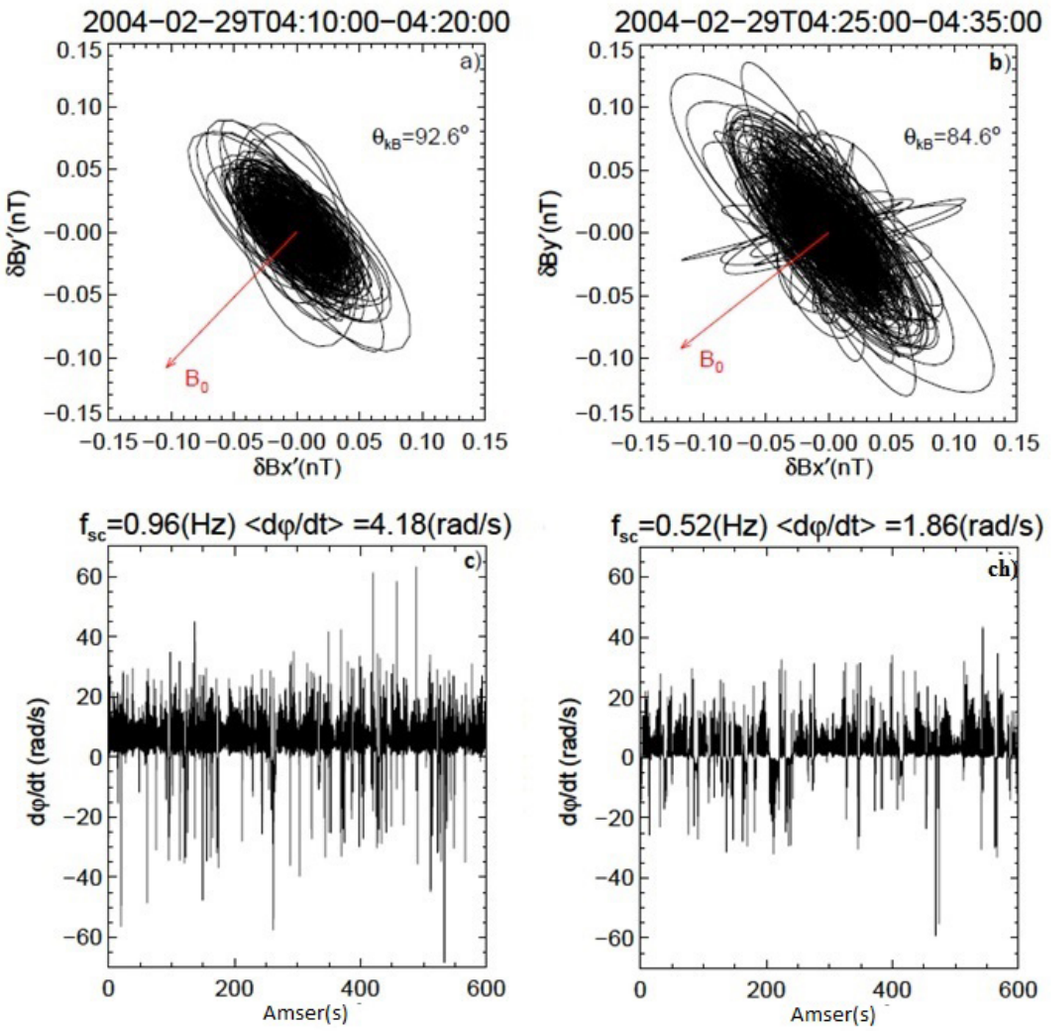
Dangosir canlyniadau o'r dechneg k-filtering yn Ffigwr 5. Dengys Ffigwr 5a yr ongl a geir rhwng y fector ton a'r maes magnetig cefndirol, yn ogystal â chyfeiriad cyflymder gwynt yr Haul. Gellir gweld bod yr onglau a ffurfia'r tyrfedd a'r maes magnetig yn agos iawn at fod yn berpendicwlar i'w gilydd, sy'n cyfateb â'r theori. Hefyd, gellir gweld y ceir ongl sylweddol rhwng y tyrfedd a chyflymder gwynt yr Haul, a gallai dibynnu ar amcangyfrifiad Taylor achosi gwallau. Dengys Ffigwr 5b a 5c berthynas gwasgariad (sut y perthyna'r amledd a'r fector ton i'w gilydd, e.e. sut y mae'r don yn gwasgaru ac yn newid amledd) y tonnau, gyda 5b yn dangos y data a fesurwyd, a 5c yn dangos

perthnasau gwasgariad o theori Vlasov llinol. O'r ffigyrau hyn, y mae'n glir na ellir disgrifio'r tyrfedd gan donnau cyflym Cinetig, tonnau chwibanol, neu donnau Bernstein (cromliniau coch Ffigwr 5c). Er na ellir gweld un berthynas gwasgariad yn glir, y mae'n bosibl disgrifio'r tyrfedd fel arosodiad o donnau Alfvén Cinetig. Y mae hefyd yn bosibl bod y rhain yn strwythurau 2-D sydd ag amledd o ω=0 ar gyfartaledd yn ffrâm y plasma.



Ffigwr 5: Dengys 5a yr onglau y teithia'r tyrfedd arnynt, o'u cymharu â B0 a chyflymder gwynt yr Haul. Dengys 5b y berthynas gwasgariad, dengys 5c berthnasau gwasgariad tonnau o theori Vlasov llinol, a dynoda'r cromliniau coch donnau Bernstein. Addaswyd o waith Roberts et al. (2013)

Er mwyn ymchwilio i'r tyrfedd hwn, ystyriwn bolareiddiad yn y ddau blân fel yr esboniwyd yn yr adran ar dechnegau dadansoddi. Dengys Ffigwr 6 y polareiddiad yn y plân sy'n berpendicwlar i'r fector ton ar ddau amledd gwahanol (sydd ag onglau mwy a llai na 90°) mewn dau gyfnod gwahanol. Gellir gweld yn Ffigwr 6a a 6b eu bod wedi'u polareiddio'n eliptigol yn berpendicwlar i'r maes magnetig. Dengys ffigyrau 6c a 6d fesuriad o sut y maent yn troi; os yw $\frac{d\varphi}{dt}$ yn bositif, y mae'r cylchdroi yn bolareiddiad llaw dde. Yn yr un modd, os yw $\frac{d\varphi}{dt}$ yn negatif, y mae'r cylchdroi yn bolareiddiad llaw chwith. Disgwylir i'r cyfeiriad i donnau Alfvén Cinetig newid i fod yn fwy neu'n llai na θ=90°, ond ni welir hyn. Y mae'n bosibl bod y cyfeiliornadau'n rhy fawr i allu dweud a yw'r don yn uwch neu'n is na 90°, ond y mae'n bosibl hefyd fod hyn yn datgelu gwendid yn yr honiad mai tonnau Alfvén Cinetig a geir yn y tyrfedd o'r meintiau hyn.



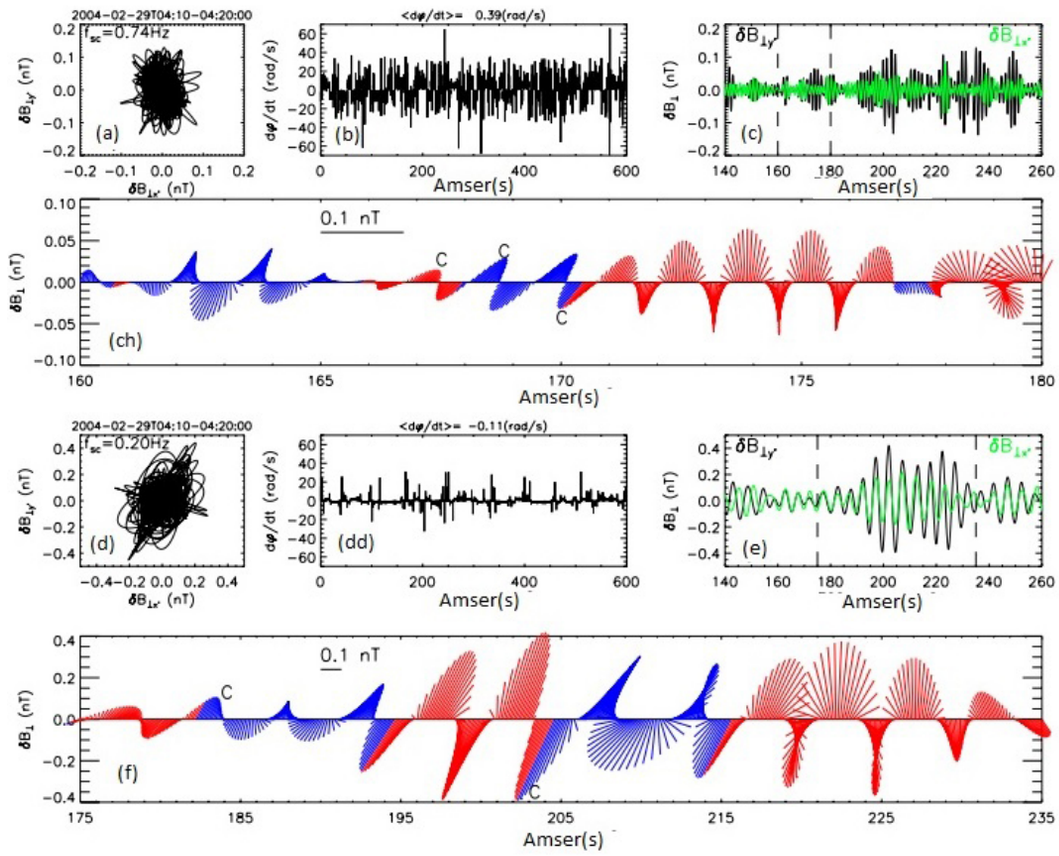
Ffigwr 6: Dengys 6a a 6b hodograff yn y plân sy'n berpendicwlar i k. Dengys 6c a 6ch y ffordd y maent yn troelli, gyda'r maint positif i'r dde a'r maint negatif i'r chwith. Wedi'i addasu o waith Roberts et al. (2013)

Er mwyn ymchwilio ymhellach i'r polareiddio, ystyriwyd y plân sy'n berpendicwlar i'r maes magnetig fel a welir yn Ffigwr 7. Dengys 7a a 7d y polareiddiad, a dengys 7b a 7dd y ffordd y mae'r rhain yn troelli. Dengys 7c a 7e y gyfres amser sydd wedi'i hidlo, ynghyd â'r llinellau fertigol sy'n dangos yr ardal a ddangosir yn 7ch a 7f.

Yn y plân hwn, y mae'n bosibl i'r polareiddiad fod naill ai'n bositif neu'n negatif, heb fod y polareiddiad a thonnau Alfvén Cinetig yn gwrth-ddweud ei gilydd. Yn wir, os yw'r honiad o bresenoldeb tonnau Alfvén Cinetig yn wir, dylai cyfeiriad y polareiddiadau fod ar hap. Yn 7ch a 7f, gwelir ardaloedd a chanddynt lawer o droadau cydlynol, sy'n arwydd o fortecsau fel y dangoswyd yn adran 2, sy'n dangos model o'r fortecs.

Y mae absenoldeb newid mewn polareiddiad yn y plân sy'n berpendicwlar i k yn wendid yn yr honiad mai tonnau Alfvén Cinetig sy'n bresennol. Yn ogystal â'r gwendid hwn, y mae cydran fach o'r tonnau yng nghyfeiriad k. Disgwylir i'r gydran hon fod yn 0 ym mhresenoldeb ton Alfvén Cinetig.

Hefyd, ceir gwendid yn y dehongliad fortecs; heb gydran yn y cyfeiriad sydd gyfochrog â B0, y mae'n anodd esbonio'r polareiddiadau cryf yn y plân sy'n berpendicwlar i k. Y mae modelau heddiw o fortecsau Alfvén yn ddibynnol ar hyn, ac y mae angen theorïau newydd o fortecsau sy'n cynnwys y gydran hon.



Ffigwr 7: Y mae 7a a 7d yn dangos hodograff; 7b a 7dd yn dangos cyfeiriad troelli; 7c a 7e yn dangos cyfres amser wedi'i hidlo, 7ch a 7f yn dangos hodograff lle y mae coch yn dynodi cylchdroad i'r dde a glas yn dynodi cylchdroad i'r chwith. Wedi'i addasu o waith Roberts et al. (2013)

6. Casgliadau

Y mae'r astudiaeth ar newidiadau gofodol ac amserol yn rhinweddau gwynt yr Haul trwy ddefnyddio lloerennau Cluster a'r dechneg k-filtering yn hanfodol er mwyn ymestyn ein dealltwriaeth o dyrfedd mewn plasma magnetig. Dangosir bod amledd y tyrfedd yn ffrâm y plasma'n fach o'i gymharu â'r amledd cylchdroi protonau. Y mae'n bosibl bod tonnau Alfvén Cinetig yn gorchfygu'r tyrfedd ar feintiau agos i radiws cylchdroi'r protonau. Yn ogystal, y mae'n bosibl bod strwythurau 2-D yn bresennol. Y mae hodograff yn dangos nifer o droelliadau cydlynol sy'n arwydd o fortecsau, a gellir modelu rhai o'r toniannau sy'n bresennol yng ngwynt yr Haul gyda fortecs Alfvén. Gan fod y data'n dangos y ceir tonnau yng nghyfeiriad y maes magnetig cefndirol, bydd gwaith pellach yn datblygu model o fortecs Alfvén, gan gynnwys elfen gywasgadwy. Bydd datblygu model o'r fath yn arwain at ddehongliad dwfn a chywirach o natur tyrfedd yng ngwynt yr Haul.

Cydnabyddiaethau

Mae'r awduron yn hynod o ddiolchgar i Dr Eleri Pryse a Dr Huw Morgan am eu cymorth wrth ysgrifennu'r erthygl hon. Ariennir ymchwil Owen Roberts gan gynllun APRS ym Mhrifysgol Aberystwyth.

Llyfryddiaeth

Alexandrova, O., a Saur, J. (2008), 'Alfvén Vortices in Saturn's Magnetosheath: Cassini Observations', *Geophysical Research Letters*, 35 (15), L15102.

Alexandrova, O., Mangeney, A., Maksimovic, M., et al. (2006), 'Alfvén Vortex Filaments Observed in Magnetosheath Downstream of a Quasi-perpendicular Bow Shock', *Journal of Geophysical Research*, 111, A12208.

Balogh, A., Carr, C. M., Acuna, M. H., et al. (2001), 'The Cluster Magnetic Field Investigation: Overview of In-flight Performance and Initial Results', *Annales Geophysicae*, 19, 1207–17.

Biermann, L. (1951), 'Kometenschweife und solare Korpuskularstrahlung', *Zeitschrift für Astrophysik*, 29, 274–86.

Birkeland, K. (1913), *The Norwegian Aurora Polaris Expedition 1902-1903* (Christiania: Aschehoug).

Escoubet, C. P., Fehringer, M., a Goldstein, M. (2001), 'Introduduction: The Cluster Mission', *Annales Geophysicae*, 19, 1197–200.

Frisch, U. (1995), *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov* (Cambridge: Cambridge University Press).

Grant, H. L., Stewart, R. W., a Moilliet, A. (1962), 'Turbulence Spectra from a Tidal Channel', *Journal of Fluid Mechanics*, 12, 241–68.

Gringauz, K. I., Bezrukikh, V. V., Ozerov, V. D., et al. (1962), 'The Study of Interplanetary Ionized Gas, High-Energy Electrons and Corpuscular Radiation of the Sun, Employing Three-Electrode Charged Particle Traps on the Second Soviet Space Rocket', *Planetary and Space Science*, 9, 103–7.

Hasegawa, H., Fujimoto, M., Phan, T. D., et al. (2004), 'Transport of Solar Wind into Earth's Magnetosphere through Rolled-up Kelvin-Helmholtz Vortices', *Nature*, 430 (7001), 755–8.

Kolmogorov, A. N. (1941), 'On the Degeneration of Isotropic Turbulence in an Incompressible Viscous Fluid', *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 32, 19–21.

Kolmogorov, A. N. (1991a), 'Dissipation of Energy in the Locally Isotropic Turbulence', *Proceedings of the Royal Society*, 434 (1890), 15–17.

Kolmogorov, A. N. (1991b), 'The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers', *Proceedings of the Royal Society*, 434 (1890), 9–13.

Morgan, H. (2012), 'Corona'r Haul: Astudiaeth o Strwythur Atmosffer yr Haul', *Gwerddon*, 10/11, 64–82.

Mullin, T. (2011), 'Experimental Studies of Transition to Turbulence in a Pipe,' *Annual Review of Fluid Mechanics*, 43, 1–24.

Neugebauer, M., a Snyder, C. W. (1962), 'Solar Plasma Experiment', *Science*, 138, 1095–7.

Narita, Y., Gary, S. P., Saito, S., et al. (2011), 'Dispersion Relation Analysis of Solar Wind Turbulence', *Geophysical Research Letters*, 38, L05101.

Parker, E. N. (1958), 'Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields', *The Astrophysical Journal*, 128, 664–76.

Petviashvili, V., a Pokhotelov, O. A. (1992), *Solitary Waves in Plasmas and in the Atmosphere* (Amsterdam: Gordon & Breach Science Publisher).

Perri, S., Goldstein, M., Dorelli, J., et al. (2012), 'Detection of Small-Scale Structures in the Dissipation Regime of Solar-Wind Turbulence', *Physical Review Letters*, 109, 191101.

Pincon, J. L., a Lefeuvre, F. (1991), 'Local Characterization of Homogeneous Turbulence in a Space Plasma from Simultaneous Measurements of Field Components at Several Points in Space', *Journal of Geophysical Research*, 96, 1789–802.

Reynolds, O. (1883), 'Experimental Investigation of the Circumstances which Determine whether the Motion of Water shall be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 174, 935–82.

Robert, P., Roux, A., Harvey, C., et al. (1998), 'Tetrahedron Geometric Factors', yn Paschmann, G., a Daly, P. (goln), *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data* (Bern: ISSI), tt. 323–30.

Roberts, O. W., Li, X., a Li, B. (2013), 'Kinetic Plasma Turbulence in the Fast Solar Wind Measured By Cluster', *The Astrophysical Journal*, 769, 58.

Sahraoui, F., Goldstein, M., Belmont, G., et al. (2010), 'Three Dimensional Anisotropic κ Spectra of Turbulence at Subproton Scales in the Solar Wind', *Physical Review Letters*, 105, 131101.

Salem, C. S., Howes, G. G., Sundkvist, D., et al. (2012), 'Identication of Kinetic Alfvén Wave Turbulence in the Solar Wind', *The Astrophysical Journal Letters*, 745, L9.

Sridhar, S., a Goldreich, P. (1994), 'Toward a Theory of Interstellar Turbulence. 1: Weak Alfvénic Turbulence', *The Astrophysical Journal*, 432, 612–21.

Sundkvist, D., Krasnoselskikh, V., Shukla, P. K., et al. (2005), 'In Situ: Multi-satellite Detection of Coherent Vortices as a Manifestation of Alfvénic Turbulence', *Nature*, 436, 825–8.

Torrence, C., a Compo, G. P. (1998), 'A Practical Guide to Wavelet Analysis', *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61–78.

Volwerk, M., Louarn, P., Chust, T., et al. (1996), 'Solitary Kinetic Alfvén Waves: A Study of the Poynting Flux', *Journal of Geophysical Research*, 101, 13335.