

# Cronni Plasma o Bositronau

Hywel T. Evans a C. Aled Isaac

*Yr Adran Ffiseg, Coleg Gwyddoniaeth, Prifysgol Abertawe*

Cyflwynwyd: 30 Hydref 2020; Derbyniwyd: 11 Mehefin 2021

**Crynodeb:** Cyflwynir adolygiad o'r broses o gronni plasma o bositronau (gwrthelectronau). Disgrifir ffynonellau positronau a'r technegau a ddefnyddir i'w cymedroli, eu cronni a'u nodweddu, gydag enghreifftiau o'r data a gesglir gan ddefnyddio llinell baladr positronau Prifysgol Abertawe. Rhoddir cyfiawnhad dros astudio gwrthfater er mwyn egluro cyfansoddiad y bydysawd, yn ogystal ag ychydig o gyd-destun hanesyddol. Sonnir hefyd am y defnydd o bositronau y tu hwnt i ymchwil ffiseg sylfaenol.

**Allweddeiriau:** Ffiseg, gwrthfater, positron, cronni, plasma, anniwtral.

## Positron Plasma Accumulation

**Abstract:** A review of the process of accumulating a positron (antielectron) plasma is presented. Positron sources and techniques to moderate, accumulate and characterise positrons are described, with examples of data collected using the positron beamline at Swansea University. Motivation is given for studying antimatter to explain the composition of the universe, in addition to some historical context. The use of positrons beyond research in fundamental physics is also discussed.

**Keywords:** Physics, antimatter, positron, accumulation, plasma, non-neutral.

## 1 Rhagarweiniad

Ar ennyd y glec fawr, yn ôl ein dealltwriaeth, dylai mater a gwrthfater (*antimatter*) fod wedi cael eu creu mewn meintiau hafal. Os edrychwn ar y bydysawd, dim ond mater, fwy neu lai, sydd i'w weld ar ôl erbyn hyn. Nid yw ein model safonol o ffiseg gronynnau

yn egluro'r anghydbwysedd hwn a elwir yn 'anghymesuredd baryonau' (Farrar et al., 1993). Mae'r dirgelwch hwn ynghylch mater yn un o'r dirgelion mwyaf cyffrous ym maes ffiseg. Yn ogystal, mae bodolaeth 'mater tywyll' (de Swart et al., 2017) ac 'egni tywyll' (Peebles et al., 2003) hefyd yn awgrymu bod ffiseg newydd y tu hwnt i'r model safonol, felly mae'n debyg y bydd astudiaethau ar wrthfater yn ehangu ein dealltwriaeth o'r bydysawd.

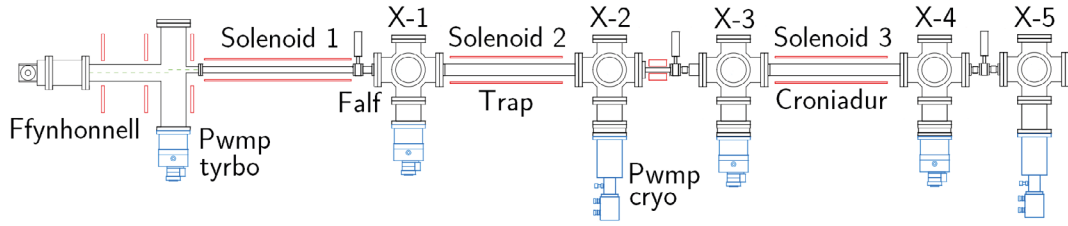
Rhagfynegwyd gwrthfater am y tro cyntaf yn 1931 gan Dirac. Wrth geisio uno damcaniaeth perthnasedd arbennig gyda mecaneg cwantwm darganfu fod datrysiadau negatif am egni electron (Dirac, 1931). Mae datrysiadau gydag egni negatif yn bwysig mewn mecaneg cwantwm ac felly nid oes modd eu hanwybyddu. Ystyriai Dirac fod y rhain yn cynrychioli 'twll' mewn môr o gyflyrau egni negatif, sydd fel arfer wedi'u llenwi yn ôl egwyddor gwahardd Pauli. Bydd y twll hwn yn ymddangos fel gronyn newydd, gyda gwefr bositif a fyddai'n difodi gydag electron.

Dim ond dwy flynedd yn ddiweddarach, darganfuwyd llwybr gronyn gyda gwefr ddirgroes ond â'r un màs ag electron, mewn llestr niwl gan Anderson (Anderson, 1933). Gwraidd y gronyn hwn oedd pelydryn cosmig. Nid oedd cysylltiad wedi'i wneud rhwng yr electron positif hwn a damcaniaeth Dirac am gyfnod, felly'r enw a roddwyd ar y gronyn hwn oedd 'positron' (*posi-tive elec-tron*), a gynrychiolir gan y symbol  $e^+$ .

Erbyn hyn, mae sawl defnydd wedi'i ddarganfod ar gyfer positronau. Un enghraifft mewn cyd-destun ymchwil yw sbectrosgopeg hyd oes difodiant positronau (*Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy* — PALS) (Siegel, 1980) i astudio solidau. Bodola positron mewn deunydd am amser cyfyngedig cyn ei ddifodiant, fel a ddangosir yn rhan 3, ac mae ei hyd oes yn dibynnu ar sawl priodwedd i'r deunydd, gan gynnwys ei strwythur a nifer y gwagleoedd neu ddiffygion. Mae hon yn dechneg ddefnyddiol i ganfod nodweddion solidau, sy'n sensitif a heb fod yn ddinistriol i'r deunydd.

Defnyddir positronau mewn nifer o astudiaethau ffiseg sylfaenol hefyd. Un defnydd yw ffurfio positroniwm, sef atom egsoftig o electron a phositron mewn cyflwr rhwym cwasisefydlog. Cynhyrfir positroniwm i gyflyrau Rydberg gan ddefnyddio laser a chyflawnir sbectrosgopeg i feintiolir atom egsoftig ac i ddeall ei strwythur (Cassidy, 2018). Gwneir hyn gan ddefnyddio sbectrosgopeg saethiad sengl hyd oes difodiant positronau (*Single-shot Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy* — SSPALS) (Deller, 2019), sy'n defnyddio pwls o bositronau yn hytrach na phositronau unigol fel PALS. Hyd yn hyn, mae'r dechneg yn ddefnyddiol er mwyn astudio positroniwm, ond rhagwelir y gellid gwella nodweddiad solidau yn y dyfodol.

Mae plasma o bositronau'n ddefnyddiol wrth gynhyrchu gwrth-hydrogen ( $\bar{H}$ ), atom cyfan o wrthfater. Ffurir gwrth-hydrogen o antiproton ( $\bar{p}$ ) a phositron, yn hytrach na phroton ac electron fel sydd mewn hydrogen arferol. Dangoswyd y dull mwyaf effeithlon o gynhyrchu gwrth-hydrogen gydag egni isel gan y cydweithrediad ALPHA (Charlton et al., 2013), gan gymysgu cwmwl o antiprotonau â phlasma o bositronau. Dim ond o'r arafydd antiprotonau yn CERN y cawn antiprotonau gydag egni digon isel i greu gwrth-hydrogen oer, felly mae sawl ymgyrch yn ogystal ag ALPHA sydd am gynhyrchu gwrth-hydrogen ar gyfer mesuriadau trachywir, e.e. ATRAP (Gabrielse et al., 2002), ASACUSA (Enomoto et al., 2010), GBAR (Pérez et al., 2015), ac yn y gorffennol ATH-



Ffigur 1: Sgematig o'r llinell baladr bositronau ym Mhrifysgol Abertawe (golygfa o'r ochr) sy'n dangos lleoliad y ffynhonnell ymbelydrol, system gwactod (du) gyda'r croesau pwmpio (X-1, X-2, ..., X-5), pypmpiau gwactod uchel (glas) a choiliau magnetig (coch). Addasiad o (Deller, 2013). Mae hyd y llinell baladr bositronau yn tua 7 m.

ENA (Amoretti et al., 2002).

Yn y papur hwn, cyflwynir adolygiad o rai technegau sefydledig i gronni, canfod a nodweddu plasma o bositronau. Cyflwynir hyn yng nghyd-destun ymchwil y grŵp positronau ym Mhrifysgol Abertawe, sydd hefyd yn rhan o'r cydweithrediad gwrth-hydrogen ALPHA (Gwefan ALPHA, 2020) yn CERN. Dangosir llinell baladr positronau Prifysgol Abertawe yn ffigur 1. Y tair prif ran a drafodir yw'r ffynhonnell ymbelydrol, y trap, a'r croniatur.

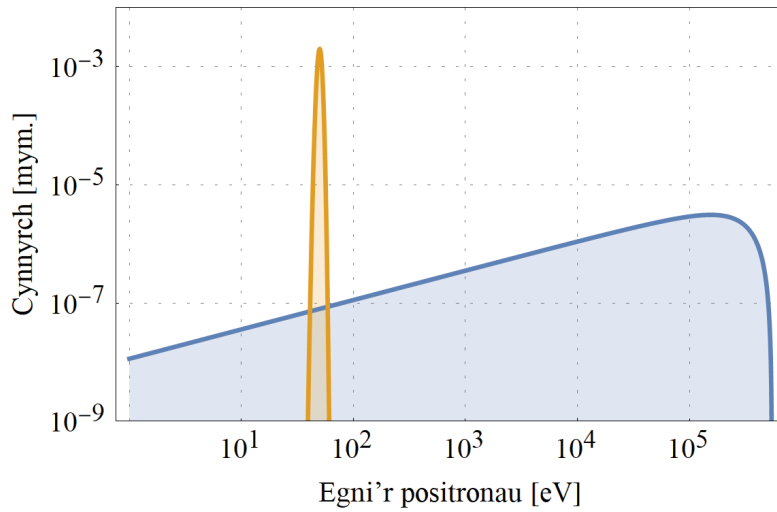
## 2 Ffynonellau positronau

Ceir tair prif ffordd o gynhyrchu positronau mewn cyd-destun ymchwil mewn labordy: o ffynonellau ymbelydrol, o gyflymyddion, a thrwy ddefnyddio laserau. I greu ffynhonnell ymbelydrol sy'n allyrru positronau, gellir defnyddio cyflymydd neu adweithydd niwclear. Defnyddir sodiwm-22 ( $^{22}\text{Na}$ ) fel ffynhonnell gan nifer o ymchwilwyr positronau ar draws y byd. Mae  $^{22}\text{Na}$  yn isotop artiffisial gyda hanner oes o 2.6 mlynedd, sy'n amser digon hir i osgoi angen ei amnewid yn aml, tra bo'r actifedd yn ddigon uchel ar gyfer arbrofion sy'n defnyddio positronau. Allyrrir positron a niwtrino ( $\nu_e$ ) trwy ddadfeiliad  $\beta^+$  (lle y mae proton yn trawsnewid yn niwtron) gan droi'n neon mewn cyflwr cynhyrfol<sup>†</sup> gyda hyd oes o 3.7 ps, cyn allyrru pelydryn gama ( $\gamma$ ) gydag egni nodweddiadol o 1.275 MeV wrth ddadfeilio i'r cyflwr isaf,

$$^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}^* + e^+ + \nu_e \quad (1a)$$

$$\hookrightarrow ^{22}\text{Ne} + \gamma. \quad (1b)$$

<sup>†</sup>Dynodir cyflwr cynhyrfol gan y symbol: \*.

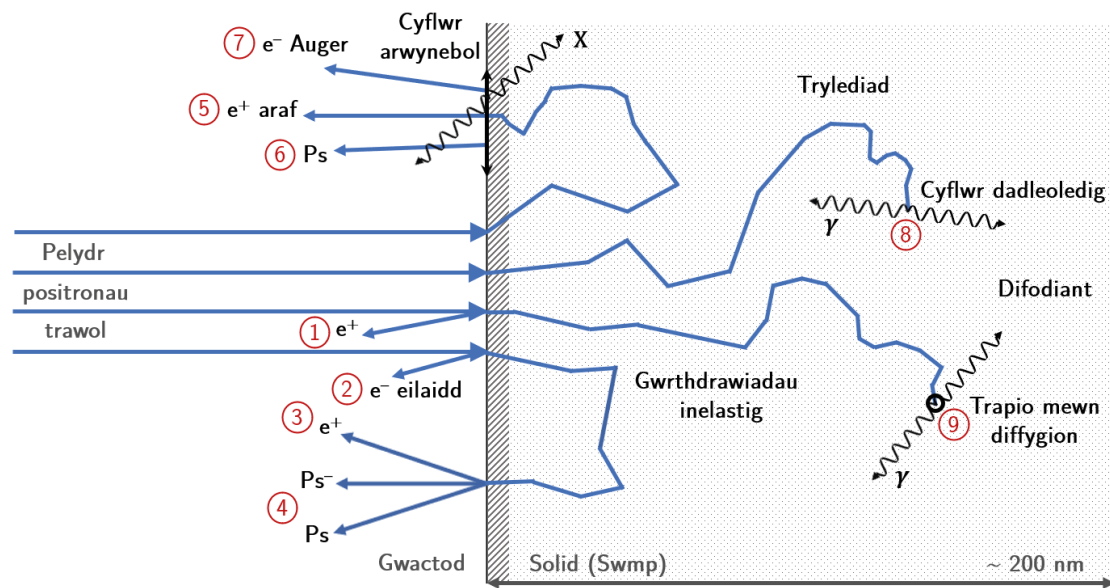


Ffigur 2: Cymhariaeth o sbectrwm egni nodweddiadol positronau o ffynhonnell ymbelydrol sodiwm-22 (glas) gyda phositronau wedi'u cymedroli (oren) ar raddfa log-log. Wrth gymedroli, gwelir lleihad yn lled y dosbarthiad egni gan gynyddu nifer y positronau gydag egni penodol.

Yr ail brif ffordd o gynhyrchu positronau yw gyda chyflymyddion, lle defnyddir meysydd amleddau radio i gyflymu electronau y tu hwnt i'r trothwy egni, a'u taro i mewn i darged er mwyn creu positronau egniol trwy gynhyrchiad pâr. Cynhyrchir ffotonau gama *bremsstrahlung*, o ganlyniad i arafiad yr electronau yn ystod y gwrthdrawiad, gydag egni uwch na'r trothwy egni, sydd felly yn gallu cynhyrchu electron a phositron mewn pâr (Coleman, 2000). Mae egni'r ffoton,  $E$ , yn cael ei drawsnewid yn fâs,  $m$ , yn ôl hafaliad enwog Einstein,  $E = mc^2$ , lle mai  $c$  yw cysonyn buanedd golau mewn gwactod. Yn aml, dewisir cyflymydd llinol e.e. yn yr arbrawf GBAR (Gwefan GBAR, 2020).

Y trydydd ffordd o gynhyrchu positronau yw drwy ddefnyddio laser. O yrru pwls laser trwy nwy, i'oneiddir y nwy gan y maes trydanol a chrëir plasma o electronau sy'n cael eu cyflymu i daro targed (Sarri et al., 2013), sy'n cynhyrchu positronau yn yr un modd â'r cyflymyddion.

Ffurfir positronau hefyd gan dyllau du a sêr niwtron (Wardle et al., 1998), ac fe'u gwelir mewn rhai pelydrau cosmig sy'n teithio trwy'r bydysawd. Yn ogystal, maent yn gallu ffurfio'n agosach at y Ddaear o ganlyniad i'r meysydd trydanol cryf yn ystod storm fellt (Briggs et al., 2011), ond maent yn rhy egniol i'w cronni i gynnal arbrofion trachywir.

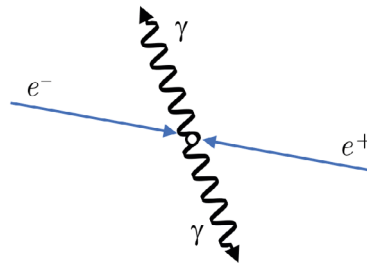


Ffigur 3: Rhyngweithiad positronau â deunydd: ar yr arwyneb gellir (1) adlewyrchu a diffreithio neu (2) achosi allyriad eilaidd. Cyn thermoliad, (3) allyrrir positronau o'r solid yn epithermol, neu (4) fel positroniwm. Ar ôl thermoliad a thrylediad yn ôl i'r arwyneb, allyrrir (5) positronau sydd wedi'u cymedroli (am ddeunydd gyda ffwythiant gwaith negatif) neu (6) bositroniwm thermol. Gall difodiant o gyflwr arwynebol achosi (7) allyriad electronau Auger a phelydrau-X. Yn y swmp (*bulk*), mae positronau (8) yn difodi o gyflwr dadleoedig yn y ddellten neu (9) pan y'u delir mewn diffygion.

### 3 Cymedroli positronau

Pan ffurfir positronau, mae ganddynt egni cinetig cyfartalog uchel gydag amrediad mawr. Er enghraifft, mae'r dosbarthiad egni cinetig sydd gan bositronau yn cael ei allyrru o ffynhonnell sodiwm-22 rhwng 0 a 546 keV. Mae'r rhan fwyaf o'r rhain yn rhy egniöl i gael eu rheoli'n effeithlon, felly defnyddir cymedrolydd (*moderator*) i'w harafu gan gynyddu nifer y positronau sydd ag egni isel, fel a ddangosir yn ffigur 2. Defnyddir dau brif fath o gymedrolydd: un yw'r cymedrolydd solid nwy prin (*Rare Gas Solid* — RGS), a'r llall yw'r cymedrolydd ffoil metel.

Cymedrolydd RGS o e.e. neon yw'r math o gymedrolydd a ddefnyddir yn y gwaith hwn. Cedwir ffynhonnell ymbelydrol ar dymheredd isel, o tua 7 K ( $-266.15^{\circ}\text{C}$ ) i neon, sy'n galluogi haen denau o nwy prin i ddyddodi. Mewnblennir rhai positronau o'r dadfeiliad  $\beta^{+}$  i'r RGS a chollir egni cinetig trwy gyffroad, ÷oneiddiad a gwasgariad ffononau (*phonon scattering*), nes bydd eu hegri yn rhai eV uwchben thermoliad. Gwelir rhyng-



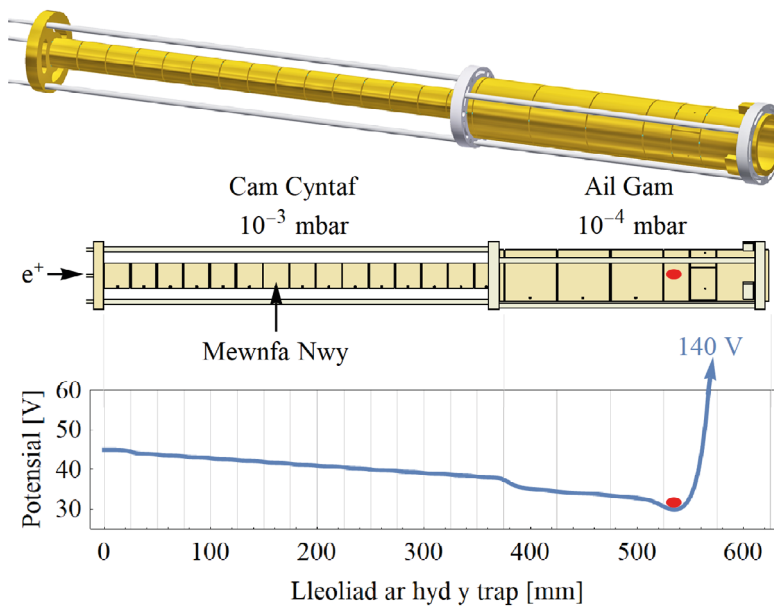
Ffigur 4: Diagram o ddifodiant positron ac electron i gynhyrchu dau ffoton gama gydag egni o 511 keV yr un.

weithiad positron â deunydd yn ffigur 3. Gan fod mäs positron yn llawer llai na mäs atom RGS, bydd un rhyngweithiad o wasgaru ffononau yn achosi colli ychydig o egni. Unwaith mae egni'r positronau yn llai na bwlch band yr RGS, gwasgaru ffononau yw'r unig broses sy'n gallu colli egni pellach. Felly, tryleda rhai positronau trwy'r cymedrolydd, ac os cyrhaeddir arwyneb RGS gydag egni sy'n fwy na ffwythiant gwaith y deunydd, cânt eu hallyrru o'r solid. Mae ffwythiant gwaith cymedrolydd arwyneb RGS yn bositif i bositronau, felly mae angen iddynt gael digon o egni i oresgyn rhwystr potensial cyn cael eu hallyrru. Lled y dosbarthiad egni ar ôl allyriad o gymedrolydd RGS yw rhai eV. Gan fod cymedrolydd da o RGS tua 1% yn effeithlon (Mills et al., 1986), ni chroennir y rhan fwyaf o bositronau a allyrrir o ffynhonnell ymbelydrol.

Yr ail fath o gymedrolydd, sy'n cael ei ddefnyddio mewn rhai arbrofion eraill, yw'r ffoil o fetel twngsten. Gan fod twngsten yn ddargludydd, mae'r rhan fwyaf o egni cinetig y positronau yn cael ei golli trwy ioneiddiad, felly nid yw'r positronau yn gallu tryledu mor bell trwy'r deunydd. Mewn cyferbyniad â RGS, mae ffwythiant gwaith arwyneb twngsten yn negatif i bositronau, felly nid oes angen iddynt oresgyn rhwystr potensial cyn cael eu hallyrru i'r gwactod. O ganlyniad, mae'r dosbarthiad egni tua 25 meV, sydd yn fwy delfrydol na'r cymedrolydd RGS, ond mae'r broses yn llai effeithlon gyda thua 0.1% (Vehanen et al., 1983). Serch hynny, mewn nifer o arbrofion, penderfynir defnyddio cymedrolydd metel gan dderbyn y bydd nifer is o bositronau araf, er mwyn cael llai o amrywiad egni. Yn ogystal, mae cymhelliant arall dros ddewis cymedrolydd twngsten, gan fod angen 'aildyfu' cymedrolydd RGS yn aml a'i gadw ar dymheredd isel iawn, sy'n cymhlethu'r dasg wrth ddibynnu ar fwy o dechnoleg (e.e. cywasgydd).

I reoli positronau, defnyddir meysydd electromagnetig, a chynhyrchir paladr o bositronau araf y gellir ei hystyried fel ffynhonnell cerrynt union (*direct current* — DC). Yn yr achos hwn, mae tua 100,000  $e^+$ /s, sy'n cyfateb i 0.016 pA o gerrynt. Gyda'r dull hwn, mae'n bosib gwneud astudiaethau manwl e.e. o ryngweithiad positron gydag arwyneb (Schultz et al., 1988). Er mwyn cynyddu'r arddwysedd ymhellach i arbrofion eraill, defnyddir meysydd electromagnetig sy'n newid mewn amser i glystyru a chynhyrchu pylsiau dwys o bositronau â lled amser o lai na nanoeiliad, e.e. i ffurfio positron-iwm, fel yn achos y gwaith hwn.

Pan fo positron ac electron yn cwrdd, maent yn difodi. Cynhyrha'r difodiant hwn ddau ffoton gama sydd ag egni nodweddiadol o 511 keV, sy'n teithio mewn llinellau syth

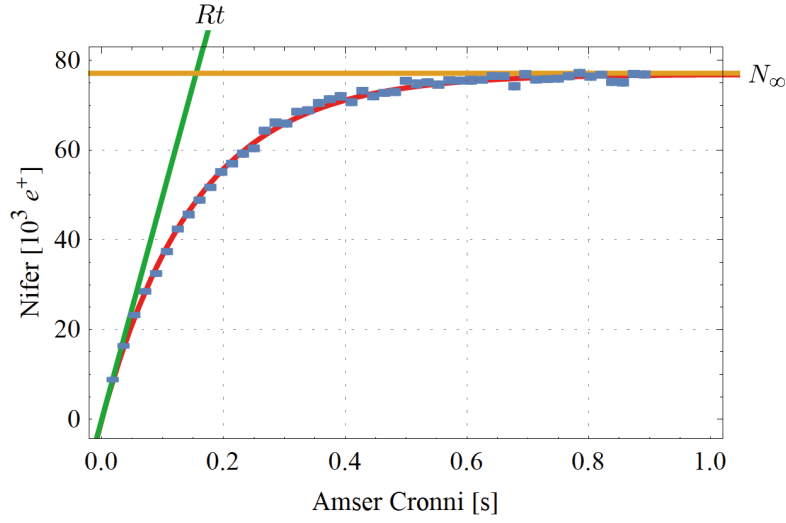


Ffigur 5: (Top:) Lluniad o'r trap gyda'r electroddau silindrog aur yn eu ffrâm. (Canol:) Trawstoriad o'r trap, gyda lleoliad y fewnfa nwy trapio sef nitrogen, a'r gwasgedd yn y ddau gam, gyda lleoliad cwmwl o bositronau wedi'i liwio'n goch. (Gwaelod:) Y potensial trydanol ar hyd echelin y trap o ganlyniad i'r folteddau a osodwyd ar yr electroddau, gyda chwmwl o bositronau wedi'i liwio'n goch yng ngwaelod y pant. Gellir lleihau'r 140 V ar yr electrod olaf er mwyn gostwng y rhwystr ar ddiwedd y trap ac allyrru'r positronau.

fel y dangosir yn ffigur 4. Gellir canfod ffotonau gama mewn amryw o ganfodyddion gwahanol (Knoll, 2010). Yn y gwaith hwn, defnyddir fflachenwyr (*scintillators*), megis cesiwm iodid (CsI) a sodiwm iodid (NaI), sy'n trawsnewid y ffotonau gama yn olau gweledol neu uwchfioled. Cesglir y golau gan diwb ffotoluosi (*photomultiplier tube* — PMT) sydd yna'n cynhyrchu electronau trwy'r effaith ffotodrydanol. Cyfrifir nifer yr electronau a gynhyrchwyd i ganfod nifer y positronau a ddifodwyd.

## 4 Trapio positronau

Disgrifir y trap positronau yn fwy manwl yng nghyfeirnod (Clarke et al., 2006), ond defnyddir trap silindrog Penning yn y gwaith hwn. Wrth osod folteddau ar yr electroddau silindrog, cynhyrchir potensial trydanol sy'n creu rhwystr echelinol, fel y dengys ffigur 5. Daw rhwystr rheiddiol o solenoidau sy'n cynhyrchu maes magnetig sy'n baralel i echelin y trap. I drapio positronau, mae nwy trapio nitrogen ( $N_2$ ) yn cael ei fewnfwydo i'r trap.



Ffigur 6: Cronlin gronni sy'n dangos nifer y positronau sydd yn y trap. Y llinell goch yw hafaliad 3 wedi'i ffitio i'r data, i roi  $R = (498 \pm 4) \times 10^3 e^+/s$  a  $\tau = (0.155 \pm 0.001) s$ , sy'n golygu bod  $N_\infty = (77.2 \pm 0.8) \times 10^3 e^+$ , sef y llinell oren. Mae pob pwynt yn gymedr o bedwar ailadroddiad wedi'i blotio gyda'r cyfeiliornad safonol.

Mae'n rhaid i'r positronau oresgyn brig yn y potensial ar ddechrau'r trap; yna wrth deithio ar hyd y trap, maent yn colli tua 9 eV yr un yn ystod gwrthdrawiadau (Murphy et al., 1992), gan gynhyrfu moleciwl nitrogen. Yn dilyn hyn, nid oes gan y positronau ddigon o egni bellach i oresgyn y brig yn y potensial ac felly bydd y positronau yn cael eu trapio. Ar ôl nifer o wrthdrawiadau gyda'r nitrogen, bydd y positronau'n cronni yng ngwaelod pant y potensial. Os gostyngir y foltedd uchel sydd ar yr electrod olaf, allyrra'r gronynnau o'r trap. Gellir cronni tua 100,000 o bositronau mewn 1 s yn y system hon, gan ddibynnu ar nifer y positronau sydd yn y paladr, a gwasgedd y nwy a ddefnyddir.

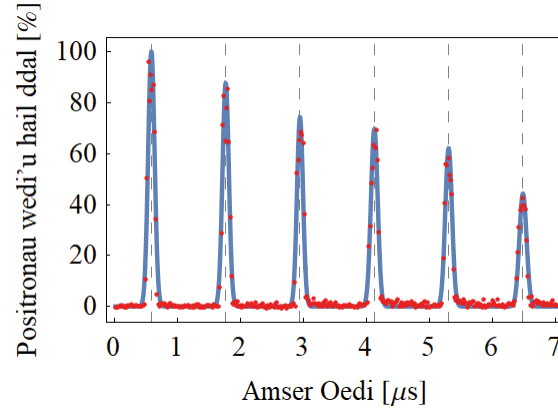
Nodweddir ymddygiad y trap gan ddefnyddio model syml gyda nifer fach o baramedrau. Ystyriwn fod y positronau'n cael eu trapio ar gyfradd  $R$  o'r pelydr cerrynt union. Os bydd positron yn parhau yn y trap am amser  $\tau$  cyn cael ei golli, yna disgrifir nifer y positronau sydd yn y trap,  $N$ , gan

$$\frac{dN}{dt} = R - \frac{N}{\tau}. \quad (2)$$

Mae'r hyd oes meidrol,  $\tau$ , yn ymddangos oherwydd difodiant a gwasgariad ar y nwy trapio ac amherffeithiadau yn y meysydd trydanol a magnetig. Wrth ddatrys hafaliad 2 gan honni nad oes positronau yn y trap ar y dechrau,  $N(0) = 0$ , cawn

$$N(t) = R\tau(1 - e^{-t/\tau}). \quad (3)$$





Ffigur 7: Amrywiwyd yr amser oedi rhwng allyrru'r positronau o'r trap a'u dal yn y croniadur, gan fesur nifer y positronau a ddaliwyd. Mae'r data wedi'u ffitio â chyfres o chwe brig Gaussaidd anghyfyngedig, sef y llinell las, lle y mae'r amser cyfartalog rhwng pob brig yn  $(1.178 \pm 0.002) \mu\text{s}$ . Gall positronau gael eu gwrthyrru gan botensial heb ei ostwng, a sboncio yn ôl ac ymlaen rhwng y trap a'r croniadur cyn cael eu dal yn ddiweddarach.

Yn ymarferol, mae'r paramedrau  $R$  a  $\tau$  yn cael eu hechdynnu o ffit y gromlin cronni fel y dengys yn ffigur 6. Wrth edrych ar hafaliad 3, am amseroedd hir ( $t \rightarrow \infty$ ) gwelir bod nifer y gronynnau yn y trap yn dirlenwi wrth i gyfradd trapio'r positronau ddod yn hafal i'r gyfradd golled ( $dN/dt \rightarrow 0$ ). Wrth ddirlenwi'r trap cawn  $N_\infty$  o bositronau, lle y mae

$$N_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} N = R\tau. \quad (4)$$

Dangosir hyn yn ffigur 6 fel llinell oren. Heb yr hyd oes meidrol, byddai nifer y positronau yn y trap yn cynyddu'n llinol fel  $N(t) = Rt$ , fel y dengys ffigur 6 gan y llinell werdd.

## 5 Cronni tuag at blasma anniwtral

Goresgynnir y cyfyngiad ar nifer y positronau sy'n gallu cael eu casglu,  $N_\infty$ , trwy stacio nifer o 'gymylau' o'r trap i'r croniadur lle y mae'r gwasgedd yn llawer is. Gellir stacio dros 150 o gymylau yn y croniadur, sy'n cyfateb i tua 20 miliwn o bositronau. Gyda dwysedd digon uchel, ffurfir plasma anniwtral o bositronau.

Mewn plasma anniwtral, mae maes trydanol hunangynhyrchiol pwysig, ac mae dwysedd uchel y gronynnau gwefredig yn achosi sgrinio Debye, lle y mae effaith maes trydanol allanol y trap yn cael ei wanhau o fewn y plasma gan y meysydd mewnol cryf. Gall hyn achosi ansefydlogrwydd, sy'n golygu bod dynameg y plasma'n anoddach i'w darogan a'i rheoli.

Wrth drosglwyddo cwmwl o bositronau o'r trap i'r croniadur, mae amseru da yn bwysig i geisio ail-ddal y positronau i gyd. Arbrofwyd wrth amrywio'r oedi rhwng allyrru'r positronau o'r trap, a'u dal yn y croniadur cyn eu canfod. Yn ffigur 7, gwelir bod oediad cyfartalog o  $(0.589 \pm 0.001) \mu\text{s}$  cyn i'r positronau gael eu dal yn y brig cyntaf, sy'n rhoi'r nifer uchaf o bositronau. Dyma'r amser hedfan o'r trap i'r croniadur. Os na chaiff y positronau eu dal yn y croniadur, byddant yn adlewyrchu yn ôl ac ymlaen rhwng y trap a'r croniadur. Gwelir hyn yn ffigur 7 fel cyfres o frigau sydd ar gyfartaledd o  $(1.178 \pm 0.002) \mu\text{s}$  ar wahân (dwywaith yr amser hedfan o'r trap i'r croniadur). Collir positronau yn ystod y broses hon, felly gwelir gostyngiad yn y nifer (uchder y brig) gydag amser. Er mwyn dal y nifer fwyaf o bositronau, amserir i ddal y positronau yn y croniadur ar y tro cyntaf. Gwelir hefyd fod lled amser y brig yn ehangu wrth i'r amser teithio gynyddu gan fod gwahanol egnïon (ac felly buaneddau) i'r positronau.

Er bod y gwasgedd yn gymaint is yn y croniadur, mae'r positronau'n parhau i gael eu colli oherwydd anghymesureddau yn y meysydd trydanol. Os ystyriwn hafaliad 2 heb y term trapio (h.y.  $R = 0$ ), gwelwn fod nifer y positronau sydd ar ôl yn y trap,  $N(t)$ , yn ymddwyn fel:

$$N(t) = N(0)e^{-t/\tau}, \quad (5)$$

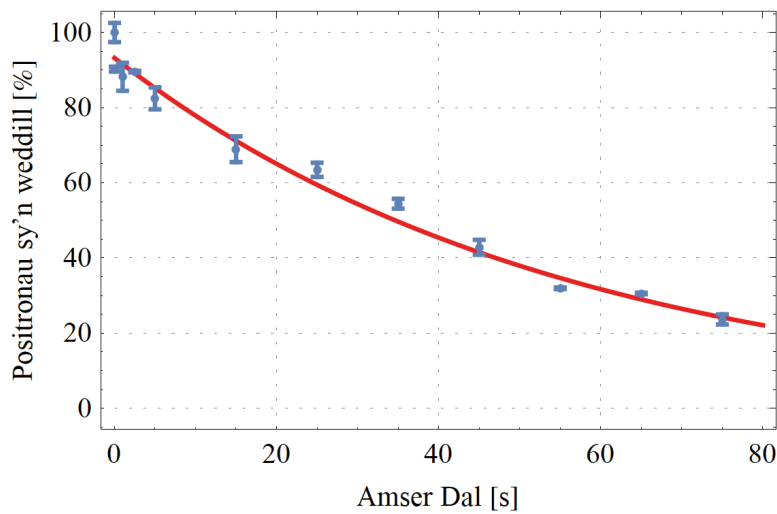
lle mai  $N(0)$  yw nifer y gronynnau cychwynnol wedi'u trapio. Amrywir yr amser dal yn y trap a chyfrifir y nifer sy'n weddill i ddarganfod yr hyd oes yn y croniadur,  $\tau$ , o hafaliad 5. Dangosir enghraifft o hyn yn ffigur 8, lle y mae hyd oes y positronau yn y croniadur yn  $\tau = (55.6 \pm 1.5) \text{ s}$ .

I gyfrifo cyfanswm y nifer fwyaf o bositronau y gellir eu cronni gyda'r system hon, defnyddiwyd  $N = (36,698 \pm 414) e^+$  ar ôl cronni am  $t = 0.1 \text{ s}$  yn y trap o ffigur 6, gyda'r hyd oes yn y croniadur o ffigur 8. Wrth dybio bod pob positron yn cael ei drosglwyddo'n llwyddiannus, cawn gyfanswm o  $N_c = N\tau/t = (2.04 \pm 0.06) \times 10^7 e^+$ , sy'n ddigonol i gronni plasma o bositronau.

## 6 Casgliad

Yn yr erthygl hon, cyflwynwyd cymhelliant dros gynnal astudiaethau gwrthfater i ehangu ein dealltwriaeth o'r bydysawd. Rhoddwyd trosolwg o fathau o ffynonellau, sut i gymedroli egni positronau a'u trapio, a rhai o'r technegau sefydledig i gronni plasma o dros 20 miliwn o bositronau. Ni thrafodwyd cywasgiad gan wal cylchdröol (*rotating wall compression*), sef prif gyfraniadau arloesol yr awduron at y maes (Isaac et al., 2011; Isaac, 2013), ond rhoddwyd cyd-destun a gosodwyd sylfeini. Mae'r wal gylchdröol yn dechneg bwysig i ymestyn hyd oes gronynnau gwefredig mewn trap a chynyddu'r dwysedd. Mae trafodaeth fanwl ar y dechneg o ddefnyddio wal gylchdröol y tu hwnt i gwmpas yr erthygl hon.

Un nod hirsefydlog yn y maes yw cynyddu dwysedd y positronau, a dyma yn bennaf nod y technegau a drafodwyd. Gall cynyddu dwysedd y positronau arwain at ddatblygiadau yn y gwaith a grybwyllwyd yn rhan 1, yn ogystal ag arbrofion eraill fel y canlynol. Ceisia'r arbrawf GBAR greu ïon positif o wrth-hydrogen ( $\overline{\text{H}}^+$ ) gan ddefnyddio



Ffigur 8: Daliwyd positronau yn y croniadur heb groniad pellach am hyd at 75 s. Trwy ffitio hafaliad 5 sef y llinell goch, ceir hyd oes o  $\tau = (55.6 \pm 1.5)$  s. Mae pob pwynt yn gymedr o dri ailadroddiad wedi'i blotio gyda'r cyfeiliornad safonol. Gan fod gwasgedd y croniadur yn is na'r trap, mae llai o golled o ran positronau, sy'n golygu hyd oes hirach.

plasma o  $10^{10}$  o bositronau; hon fyddai'r nifer fwyaf a gronnwyd erioed. Bu cynyddu dwysedd positronau hefyd yn hanfodol i greu ac astudio moleciwlau positroniwm, fel deupositroniwm ( $\text{Ps}_2$ ) (Cassidy et al., 2007). Gall cynyddu dwysedd ac oeri cwmwl o bositronau arwain at gyddwysiad Bose-Einstein (*Bose-Einstein Condensate* — BEC) o bositroniwm a all arwain at laser o belydrau gama (Mills et al., 2004).

## Cydnabyddiaeth

Cefnogwyd doethuriaeth Hywel Turner Evans gan ysgoloriaeth ymchwil y Coleg Cymraeg Cenedlaethol (YSG17/04), ac ysgoloriaeth ymchwil y Coleg Gwyddoniaeth, Prifysgol Abertawe.

## Llyfryddiaeth

ALPHA, <<http://alpha.web.cern.ch>>[Cyrchwyd: 30 Hydref 2020].

Amoretti, M., et al. (2002), 'Production and detection of cold antihydrogen atoms', *Nature*, 419 (6906), 456–9.

Anderson, C. D. (1933), 'The positive electron', *Physical Review*, 43, 491–4.

- Briggs, M. S., et al. (2011), 'Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with fermi gbm', *Geophysical Research Letters*, 38 (2).
- Cassidy, D. B. (2018), 'Experimental progress in positronium laser physics', *European Physical Journal D*, 72 (3).
- Cassidy, D. B. a Mills, A. P. (2007), 'The production of molecular positronium', *Nature*, 449 (7159), 195–7.
- Charlton, M., et al. (2013), 'Gwrth-hydrogen mewn potel (supplementary data)', *Physics Education*, 48 (2), 212–20.
- Clarke, J., et al. (2006), 'Design and operation of a two-stage positron accumulator', *Review of Scientific Instruments*, 77 (6), 063302.
- Coleman, P. (2000), *Positron Beams and Their Applications*, (World Scientific).
- de Swart, J. G., Bertone, G., a van Dongen, J. (2017), 'How dark matter came to matter', *Nature Astronomy*, 1 (3), 0059.
- Deller, A., 'Positron accumulation and laser excitation of the positronium atom', Traethawd PhD, Prifysgol Abertawe, 2013.
- Deller, A. (2019), 'SSPALS: A tool for studying positronium' *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 922, 91–7.
- Dirac, P. A. M. (1931), 'Quantised singularities in the electromagnetic field', *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 133 (821), 60–72.
- Enomoto, Y., et al. (2010), 'Synthesis of cold antihydrogen in a cusp trap', *Physical Review Letters*, 105 (24), 1–4.
- Farrar, G. R. a Shaposhnikov, M. E. (1993), 'Baryon asymmetry of the universe in the minimal standard model', *Physical Review Letters*, 71 (1), 210.
- Gabrielse, G., et al. (2002), 'Background-free observation of cold antihydrogen with field-ionization analysis of its states', *Physical Review Letters*, 89 (21), 2–5.
- GBAR, <<http://gbar.web.cern.ch>>[Cyrchwyd: 30 Hydref 2020].
- Isaac, C. A. (2013), 'Motional sideband excitation using rotating electric fields', *Physical Review A*, 87 (4), 1–7.
- Isaac, C. A., et al. (2011), 'Compression of positron clouds in the independent particle regime', *Physical Review Letters*, 107 (3).
- Knoll, G. F. (2010), *Radiation Detection and Measurement*, (Wiley).
- Mills, A. P., Cassidy, D. B., a Greaves, R. G. (2004), 'Prospects for making a Bose-Einstein-condensed positronium annihilation gamma ray laser', *Materials Science Forum*, 445–6, 424–9.
- Mills, A. P. a Gullikson, E. M. (1986), 'Solid neon moderator for producing slow positrons', *Applied Physics Letters*, 49 (17), 1121–3.
- Murphy, T. J. a Surko, C. M. (1992), 'Positron trapping in an electrostatic well by inelastic collisions with nitrogen molecules', *Physical Review A*, 46, 5696–705.

- Peebles, P. J. E. a Ratra, B. (2003), ‘The cosmological constant and dark energy’, *Reviews of Modern Physics*, 75(2), 559–606.
- Pérez, et al. (2015), ‘The GBAR antimatter gravity experiment’, *Hyperfine Interactions*, 233 (1-3), 21–7.
- Sarri, G., et al. (2013), ‘Table-top laser-based source of femtosecond, collimated, ultrarelativistic positron beams’, *Physical Review Letters*, 110, 255002.
- Schultz, P. J. a Lynn, K. G. (1988), ‘Interaction of positron beams’, *Reviews of Modern Physics*, 60 (3), 701–79.
- Siegel, R. W. (1980), ‘Positron Annihilation Spectroscopy’, *Annual Review of Materials Science*, 10 (1), 393–425.
- Vehanen, A., et al. (1983), ‘Improved slow-positron yield using a single crystal tungsten moderator’, *Applied Physics A*, 32 (3), 163–7.
- Wardle, J. F. C., et al. (1998), ‘Electron-positron jets associated with the quasar 3C279’, *Nature*, 395 (6701), 457–61.