



**Universiteit  
Leiden**  
The Netherlands

## **Untangling cosmic collisions: a study of particle acceleration and magnetic fields in merging galaxy clusters**

Osinga, E.

### **Citation**

Osinga, E. (2023, November 1). *Untangling cosmic collisions: a study of particle acceleration and magnetic fields in merging galaxy clusters*.

Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3655893>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3655893>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

# FRYSKE GEARFETTING

De Oerknal is it foarstelde begjin fan it Universum, wêrby't it hielal ynienen ûntstie yn in eksploazje fanút ien punt dat alle enerzjy hie dat der ea wie en ea wêze sil. Wylst it Universum útdyde en ôfkuolle, begûn matterje te klusterjen ûnder ynfloed fan swiertekraft. De earste stjerren, stjerrestelsels en groepen fan stjerrestelsels foarmen en it Universum begûn har op de aldergrutste skaal te foarmjen as in kosmysk spinreach. De measte stjerrestelsels libben yn de trieden fan dit reach, wylst bûten de trieden fan it web grutte lege romten ('holtes') binne. Op de knooppunten fan dizze trieden ûntstiene de grutste struktueren yn it hielal dy't noch troch swiertekraft by inoar hâlden wurde: klusters fan stjerrestelsels (ek wol klusters fan molkeweistelsels).

## KLUSTERS FAN STJERRESTELSLS

Hoewol de namme docht tinke dat it gewoanwei grutte groepen fan hûnderten stjerrestelsels binne, binne de stjerrestelsels it minst wichtige diel fan 'e klusters. Klusters bestean foaral út in tige hjit en tin gas, dat tusken de stjerrestelsels leit, yn it saneamde *yntra-kluster medium*<sup>8</sup>. Dit gas is foaral wetterstof en helium atomen, en omfettet mear as 90% fan de massa fan in cluster. De temperatuer fan it gas is sa heech (10 miljoen oant 100 miljoen graden Celsius) dat de elektroanen loskomen fan de atomen (ionisaasje). It gas is dan ek net mear sichtber op weachlingtes dy ús each kin sjen, mar stjoert röntgenstrieling út. Klusters fan stjerrestelsels kinne dus it bêste wurden sjoen as enoarme gaswolken (sjoch Figuer S.5, midden).



Figuer S.5: It kluster fan stjerrestelsels Abell 2256 op trije ferskillende weachlingtes. *Links*: allinnich de stjerrestelsels binne sichtber yn ynfread ljocht. *Midden*: yn it blau is de röntgenstrieling fan it hjitte gas tusken de stjerrestelsels sichtber. *Rjochts* it read toant de radiostrieling fan heech-enerzjyke laden dieltsjes yn it gas dy't om magnetyske fjilden bûge. Ynfread: neoWISE (Meisner et al., 2017), röntgen: XMM-newton (Rajpurohit et al., 2023), radio: LOFAR (Osinga et al., 2023a), byldoerlap: Frits Sweijen

<sup>8</sup>Hjir negeare wy tsjustere matterje, wat it grutste part fan de massa yn beslach nimt, mar net de fokus is fan dit ûndersyk. Mei tsjustere matterje derby hawwe klusters in totale massa fan hûnderten oant tûzenen biljoenen sinnesmassa's ( $> 10^{14} M_{\odot}$ ).

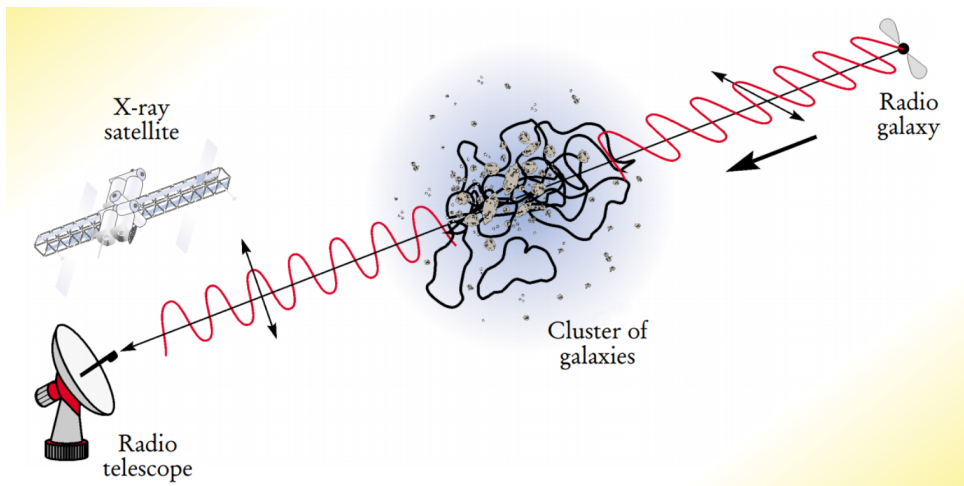
Klusters foarmje en groeie noch hieltyd, troch stof en gas oan te lûken út har omjouwing en troch botsingen mei oare klusters. Botsingen fan twa klusters binne enoarm enerzjyk en soargje derfoar dat it gas skodde en skokke wurdt. De laden dieltsjes yn it gas, protoanen en elektroanen (dy't fan inoar skieden binne om't it gas sa hjit is), kinne fersneld wurde ta faasjes dy't ticht by de ljochtfaasje lizze troch de skokweagen en turbulinsje yn it gas. Yn de oanwêzigens fan in magnetysk fjild wurde de elektroanen it meast ôfbûgd en sille se radiostrieling útstjitte. Dy radiostrieling is sichtber mei teleskopen lykas de *Low-Frequency Array* (LOFAR), wêrfan de kern yn Drenthe stiet. LOFAR is benammen geskikt foar dit soarte fan waarnimmingsen, omdat de dieltsjes foaral radiostrieling útstjoere by lege frekwinsjes, oftewol lange weachlingtes (sjoch Figuer S.5, rjochts).

Wy sjogge oer it algemien trije ferskillende klassen fan radiostrieling yn klusters. Earst binne der *radiohalo's*, grutte rûne radiostrukturen yn it midden fan klusters. De ljochtsterkte fan radiohalo's folget rûchwei de ferdieling fan it hjitte gas, dus se binne helderder yn it sintrum en wurde swakker nei de bûtenkant fan de klusters. Wy tinke dat radiohalo's benammen in dieltsjesfersnellingsproses sjen litte dat feroarsake wurdt troch de turbulinsje yn it gas. Twads binne der *radioskokken*, dy't sa neamd binne om't se lange en útstrekke strukturen hawwe dy't faak skokweagen yn it gas folgje. Hjir wurde elektroanen fersneld troch skokweagen dy't ûntstean by grutte botsingen fan klusters. As lêste komt der soms ek noch radiostrieling fan de stjerrestelsels. As in supermassyf swart gat, dat yn it sintrum fan hast alle stjerrestelsels leit, genôch matearje om him hinne hat, wurdt in stjerrestelsel aktyf neamd. In part fan 'e matearje om sa'n swart gat hinne wurdt opslokke, mar in part wurdt ek útstjitten yn de foarm fan twa ymminske fonteinen, of radiojets. Dy jets binne faak folle grutter as it stjerrestelsel sels, mei ôfmjittingen oant in pear miljoen ljochtjier<sup>9</sup>. As dizze stjerrestelsels mei jets troch it hjitte gas fan it kluster bewege, wurde jets faak ôfbûge en sjogge wy in ryk ferskaat oan foarmen. Radiojets komme net allinnich yn klusters foar, om't alle stjerrestelsels, ek dy bûten klusters, in aktyf swart gat hawwe kinne. Wol tinke wy dat de radiojets in wichtige boarne wêze kinne fan enerzjyke elektroanen dy't stadichoan troch it kluster ferspriede kinne en opnij fersneld wurde as klusters botse.

## MAGNETYSKE FJILDEN

It feit dat wy radiostrieling sjen komme fan klusters betsjut dat der magnetyske fjilden moatte wêzen yn it gas. Dat komt om't de radiostrieling de skaaimerken hat fan synchrotronstrieling, dy't útstjoerd wurdt troch laden dieltsjes yn in magnetysk fjild. It is lykwols in grut mystearje hoe't dizze magnetyske fjilden ûntstien en ûntwikkele binne yn de romte tusken de stjerrestelsels. De bêste teory is dat de magnetyske fjilden yn klusters stadichoan groeid binne by it foarmingsproses fan klusters fanút in swak magnetysk fjild, dat al oanwêzich is by it ûntstean fan de klusters. Mar de oarsprong fan it earste magnetyske fjild is noch net fêststeld. Der binne twa tinkwizen foar de oarsprong fan de magnetyske fjilden. Se kinne in fûneminteel diel fan it Universum wêze, makke krekt nei de Oerknal of by de foarming fan de earste strukturen yn it hielal (*de fûnemintele oarsprong*), of se kinne letter yn de romte slingere wurde troch supernova-eksplaozjes en aktive stjerrestelsels (*de*

<sup>9</sup>Om dizze ûnbefetlike skaal dochs wat kontekst te jaan: de ôfstân fan de Ierde oant de Sinne is likernôch 8 ljochtminuten, en de ôfstân fan de Ierde ta it sintrum fan de Molkewei is likernôch 26.000 ljochtjier.



Figuer S.6: In yllustraasje fan it Faraday-effekt. In fier aktyf stjerrestelsel stjoert polarisearre radiostrieling út mei in elektryske fjildweach yn in bepaalde hoeke. As de weach it magnetyske gas fan it kluster berikt, wurdt de hoeke draaid, ôfhinklik fan de weachlinge fan it ljocht en de eigenskippen fan it gas. Dizze rotaasje is te sjen mei in radioteleskoop dy't op ferskillende weachlingtes waarnimt. Ôfbylding: Philipp P. Kronberg, Physics Today, Desimber 2002.

*astrofysyske oarsprong*). Wat de oarsprong ek is, magnetyske fjilden hawwe in wichtich effekt op hoe't enerzjy troch it hjitte gas ferfierd wurdt, en hoe't dieltsjes fersneld wurde by botsingen fan klusters. Oer de eigenskippen fan de hjoeddeiske magnetyske fjilden is lykwols net folle bekend. De meast effektive metoade om de eigenskippen fan magnetyske fjilden yn klusters fêst te stellen, is troch it Faraday-effekt (sjoch Figuer S.6). Om't ljocht in elektromagnetyske weach is, mei in elektryske en in magnetyske fjildweach dy't leadrjocht steane op de bewegingsrjochting (en leadrjocht op inoar), binne der in protte mooglike oriïntaasjes fan de elektryske fjildweach. As dit mar ien spesifike oriïntaasje hat, neame wy it ljocht (lineêr) polarisearre. De polarisaasjehoeke wurdt draaid als ljocht troch in magnetysk gas giet, lykas dy yn klusters. Hoefolle graad de hoeke draait hinget ôf fan de krêft fan it magnetyske fjild, de tichtens fan de frije elektroanen yn it gas, en de weachlinge fan it ljocht. Troch op ferskate weachlingtes tagelyk te observearjen mei in radioteleskoop, en in röntgenteleskoop te brûken om de tichtens fan de frije elektroanen te bepalen, kinne eigenskippen fan it magnetysk fjild ôflaat wurde. In probleem mei stúdzjes fan it Faraday-effekt is lykwols dat polarisearre radioboarnen frij seldsum binne, en dêrom binne tige djippe observaasjes fan neiste klusters nedich om genôch polarisearre radioboarnen te finen. As alternatyf kinne waarnimmings fan ferskate clusters boppe inoar steapele wurde. Mei de (grif sterke) oanname dat alle clusters likernôch itselde syn, kinne dan trochsneed eigenskippen fan it magnetysk fjild yn clusters bepaald wurde.

## DIT PROEFSKRIFT

Dit proefskrift ûndersiket it dieltsjesfersnellingsproses en de magnetyske fjilden dy't liede ta de radiostrieling yn klusters fan stjerrestelsels. Begrip fan dizze ûnderwerpen sil

ús helpe mear te learen oer it proses fan klusterfoarming, om't klusterbotsingen sterk ferbûn binne oan it fersterkjen fan it magnetysk fjild en it fersnellen fan dieltsjes. It dieltsjesfersnellingsproses kin it bêste bestudearre wurde by lege frekwinsjes ( $\sim 100$  MHz), wêrfoar LOFAR by útstek geskikt is. Magnetyske fjilden, oan 'e oare kant, wurde it bêste ûndersocht by hegere frekwinsjes ( $\sim 1000$  MHz), om't it Faraday-effekt sa sterk wurdt by legere frekwinsjes dat de polarisaasje eigenskippen ferlern gean. Dêrom wurdt yn dit proefskrift The Karl G. Jansky Very Large Array (VLA), in teleskoop yn New Mexico, brûkt om de magnetyske fjilden yn klusters better te begripen.

Yn **Haadstik 2** wurdt de oriïntaasje fan radiojets fan aktive stjerrestelsels ûndersocht. Eardere ûndersiken hawwe útwiisd dat de oriïntaasje fan radiojets net willekeurich is oer grutte stikken fan de himel, mar dat jets fan stjerrestelsels dy't tichter byinoar ferskine yn 'e himel faak yn deselde rjochting wize. Dit soe sterke gefolgen hawwe foar de foarming fan de struktuer fan it Universum. Mar, lytse systematyske mjitflaters kinne liede ta ferkearde resultaten. It is dêrom wichtich om ek de ôfstân fan de radiojets oan 'e Ierde mei te nimmen (troch de readferskowing fan it aktive stjerrestelsel) en te mjitten oft de jets dy't fysyk ticht byinoar steane (yn 3D) echt yn deselde rjochting wize of dat allinne sa lykje te dwaan oan 'e himel (yn 2D). Troch in stekproef te nimmen fan 7.555 dúdlike radiojets út 'e *LOFAR Two Meter Sky Survey* (LoTSS) wurdt de nulhypoteze hifke dat de radiojets gjin foarkarsrjochting hawwe yn 3D en 2D. Wy fine bewiis dat de nulhypoteze net kloppet yn 2D, wat betsjut dat radiojets fan stjerrestelsels dy't ticht byinoar likje oan de himel in foarkarsrjochting hawwe. Wy fine lykwols gjin bewiis dat de nulhypoteze yn 3D ferkeard is, wat derop wiist dat der wierskynlik ûnbekende systematyske mjitflaters yn de data sitte en de oriïntaasje fan de jets yn it Universum wier willekeurich is op grutte ôfstannen.

Yn **Haadstik 3** wurdt ûndersocht oft lytsere klusters fan stjerrestelsels, mei legere massa en dêrtroch minder enerzjike botsingen as oant no ta ûndersocht binne, dochs noch altyd radiostrieling yn de foarm fan radiohalo's útstjitte kinne. Wy analysearren de djipste radiokaarten dy't ea makke binne op 'e frekwinsje fan 150 MHz, as ûnderdiel fan 'e *LOFAR Two Metre Sky Survey Deep Fields*. De waarnimmingsen lieten sjen dat der in kluster wie mei in relatyf lege massa (mar 300 biljoenen sinnemassa's), ek noch op in frij hege readferskowing ( $z=0.77$ ), dy 't in radiohalo sjen liet. Ek yn in oare kluster mei in wat legere massa is in mooglike deteksje dien. Yn kombinaasje mei boppegrinzen dy't steld wurde kinne foar klusters dêr't gjin radiostrieling wei kaam, wiene de resultaten yn oerienstimming mei de bekende relaasje tusken kluster massa en radiohalo ljochtsterkte, al wie de stekproef lyts.

Yn **Haadstik 4** wurdt LOFAR ta it uterste dreun, mei observaasjes fan it kluster fan stjerrestelsels Abell 2256 oant de uterst lege frekwinsje fan 16 MHz. Dit is lestich om't de boppeste leech fan de atmosfear, de ionosfear, radiostrieling op lege frekwinsjes sterk ôfbûgd en fan rjochting feroaret. Lykwols slagget it om goede kwaliteit LOFAR bylden fan Abell 2256 tusken 16 en 168 MHz te meitsjen, wêryn wy de radioskok, radiohalo en ferskate oare radioboarnen detektarre en ûnderskiede. Troch fergeliking mei literatuergegevens op hegere frekwinsjes, mjitte wy it yntegrearre spektrum fan de radiohalo op tusken 24 en 1500 MHz en de radioskok tusken 24 en 3000 MHz. Beide fertoane se ienfâldige machtswetten, wêrby 't de radiostrieling  $S$  fûler wurdt by leagere frekwinsje  $\nu$  as  $S \propto \nu^\alpha$ , mei  $\alpha = -1,56 \pm 0,02$  foar de radiohalo en  $\alpha = -1,00 \pm 0,02$  foar de radioskok. Ek wurdt in nije boarne fan âld radioplasma detearre mei in ekstreem steil spektrum ( $\alpha = -1,90 \pm 0,1$ )

dy't mist wie op hegere frekwinsjes. As lêste wurdt in model foar it generearen fan de radiohalo hifke mei de kombinaasje fan radio- en gammastrieling waarnimmingsen.

Yn **Haadstikken 5 en 6** wurde waarnimmingsen fan 124 klusters mei de VLA radioteleskoop presintearre. It doel fan dizze waarnimmingsen is om statistysk de eigenskippen fan it magnetysk fjild fan klusters ôf te lieden troch de klusters opinoar te steapeljen. Der binne yn totaal 819 polarisearre radioboarnen fûn, wêrfan 't it Faraday-effekt bepaald is. **Haadstik 5** presintearret de analyse fan de depolarisaasje fan de radiosinjalen. Foar it earst wurdt in dúdlike trend waarnommen dêr't polarisearre boarnen efter klusters (lykas yn Figuer S.6) stadichoan mear depolarisearje neigeraden dat de projektarre ôfstân ta it sintrum fan it kluster ôfnimt. Mei help fan röntgengegevens fan de saneamde *Chandra* teleskoop wurde teoretyske modellen ferlike mei de data, en wurde sa de eigenskippen fan de magnetyske fjilden fêststeld. **Haadstik 6** ferbetteret dizze analyse troch ynformaasje fan de Faraday-rotaasje fan de polarisaasjehoekes ta te foegjen. Wy sjogge in dúdlike tanimming yn de fariânsje fan de rotaasjemjitten nei it sintrum fan klusters, yn oerienstimming mei in trochsneed magnetyske fjildsterkte fan sa likernôch  $3 \mu\text{G}$ . Troch de depolarisaasje en rotaasjemaat te kombinearjen en te ferlykjen mei in model, wurdt de bêste oerienstimming fûn foar in magnetysk fjild mei in sintrale sterkte fan  $B = 5 \mu\text{G}$  dat ôfnimt mei de tichtens  $n$  fan it hjitte gas as  $B \propto n^{0.5}$ . Yn it bêst oerienkommende model fluktuearret it magnetysk fjild op skalen fan mear as in miljoen ljochtjier, wat tsjut op turbulinsje dy 't op grutte skalen opwekt wurdt, bygelyks troch botsingsen fan klusters.

