

BRAIN-be 2.0 PORTAL Contract - B2/212/P1/PORTAL PhOtotrophy on Rocky habiTAbLe pLanets

INTRODUCTIE: Sterlicht is een efficiënte energiebron die al gedurende miljarden jaren wordt benut door het leven op aarde en die aan de basis ligt van trofische netwerken. Het zou daarom ook een essentiële rol kunnen spelen in biosferen elders in het heelal. Het onderzoeken van de universaliteit en diversiteit van fototrofe metabolische processen is een cruciale stap in het begrijpen van leven op kosmische schaal, wat het centrale doel is van astrobiologie. In de voorbije drie decennia zijn duizenden exoplaneten ontdekt, waaronder enkele tientallen potentieel levensvatbaar zijn. Het project “PhOtotrophy on Rocky habiTAbLe pLanets” (PORTAL) richt zich op het bestuderen van de levensvatbaarheid van rotsachtige planeten die een baan beschrijven rond sterren met lage massa ($<0,2 M_{\odot}$), en op de mogelijkheid om fototrofe levensvormen op dergelijke planeten te detecteren.

DOELSTELLINGEN: De doelstellingen zijn (1) het verschaffen van robuuste observationele eigenschappen van de fysische en stralingscondities aan het oppervlak van planeten die zich in de levensvatbare zone van de nabije dwergster TRAPPIST-1 bevinden, en (2) het gebruik van deze eigenschappen om de mogelijkheden van fototrofie in het infraroodspectrum en de detecteerbaarheid van de bijbehorende signaturen te onderzoeken. Dit onderzoek strekt zich uit van stalen afkomstig van de jonge aarde en hedendaagse extreme habitats tot gesimuleerde exoplaneetomstandigheden in een nieuw TRAPPIST-biodome, evenals tot rotsachtige exoplaneten die rond VLM-sterren draaien. Onze aanpak is multidisciplinair en verenigt expertise op het gebied van astrofysica, interne geofysica, atmosfeer-interieurdynamica, geologie, paleobiologie en microbiologie binnen een internationaal consortium van wetenschappers uit België, Frankrijk en Duitsland.

METHODEN: Aangezien het PORTAL-project zich richt op de levensvatbaarheid van exoplaneten en de mogelijkheid van fototrofe levensvormen, is het van nature multidisciplinair en vraagt het een synergistische aanpak. Het onderzoeksproject PORTAL omvat 9 wetenschappelijke werkpakketten (WP). WP 1–5 (levensvatbaarheid van TRAPPIST-1-exoplaneten), WP 6 (IR-fotosynthese op de moderne aarde), WP 7 (fotosynthese op de jonge aarde) worden parallel uitgevoerd om synergie te bevorderen en leveren data voor WP 8 (TRAPPIST-biodome) en WP 9 (mogelijkheid van fototrofie op rotsachtige exoplaneten rond sterren met lage massa). WP 8 (TRAPPIST-biodome) heeft gegevens nodig uit WP 1–7. WP 9 heeft gegevens nodig uit alle WP's 1–8. WP 1–5 leveren de eerste randvoorwaarden voor de biodome (WP 8) terwijl hun taken van het observeren en bestuderen van de TRAPPIST-1-planeten doorlopen. Drie verdere werkpakketten over coördinatie, projectbeheer en rapportering (WP10), gegevensbeheer (WP11), en verspreiding en gebruik van de resultaten (WP12) werden tijdens het hele project uitgevoerd.

RESULTATEN: PORTAL verbeterde ons begrip van het exoplanetenstelsel TRAPPIST-1. WP1 leverde nieuwe gegevens over de hoogenergetische stellaire omgeving die invloed heeft op een reductie van de atmosfeer en op fotochemie op de TRAPPIST-1-planetten. In het bijzonder heeft het geleid tot verfijnde metingen van de lichtkracht, effectieve temperatuur en metalliciteit van de ster en tot een karakterisering van fotosferische en chromosferische kenmerken. Een hoge frequentie van microflares ($\sim 10^{29}$ erg/flits) werd gevonden, en de rotatieperiode van de ster werd vastgesteld op ongeveer 3,3 dagen. WP1 bevestigde ook een significante magnetische activiteit en variabiliteit op korte tijdschalen, relevant voor de fotonen- en protonenuitstoot van de ster. Dit werk toont

bovendien aan dat TRAPPIST-1 kenmerken van intermediaire zwaartekracht vertoont ondanks zijn hoge leeftijd—een aanwijzing voor magnetische activiteit en andere nog ongekennde eigenschappen van de ster die directe gevolgen kunnen hebben voor planetaire transmissiespectroscopie. Deze studie heeft daarom ook nieuwe protocollen en methodes opgeleverd voor het beoordelen van stellaire contaminatie en het karakteriseren van het stralingsgedrag van actieve ultrakoele dwergen.

In WP2 suggereren atmosferische modellen met oppervlakedrukken ≥ 1 bar en efficiënte broeikas effecten dat TRAPPIST-1 b waarschijnlijk geen substantiële atmosfeer bezit, terwijl TRAPPIST-1 c mogelijk een dunne, O_2 -gedomineerde atmosfeer arm aan broeikasgassen heeft of geen atmosfeer en een meer reflecterend oppervlak. Deze resultaten wijzen op uiteenlopende evolutionaire paden of processen van atmosferisch verlies ondanks vergelijkbare samenstellingen. De metingen leggen strikte voorwaarden op aan atmosferisch behoud in het binnengebied van het TRAPPIST-1-systeem.

WP3 richtte zich op de fundamentele vraag of de TRAPPIST-1-planeten atmosferen kunnen opbouwen en behouden via gasuitstoot uit hun binnenste. Dit proces is cruciaal voor levensvatbaarheid en wordt bepaald door de interne structuur, samenstelling en thermische evolutie van de planeten, die sterk worden beïnvloed door getijdenverwarming. De belangrijkste verwezenlijking was het succesvol koppelen van interne-structuur- en getijdenmodellen aan simulaties van thermische evolutie, zowel via een 1D-geparametriseerd model (voor efficiënte verkenning van de parameter ruimte) als via de 2D-mantelconvectiecode CHIC (voor het modelleren van ruimtelijke verdeling en transport van vluchtige stoffen). Dit maakte het mogelijk de thermische evolutie en vooral de outgassing-geschiedenis van de planeten over miljarden jaren te simuleren. Voor de hete binnenplaneten (zoals TRAPPIST-1b) hangt het evolutionaire pad af van de initiële thermische toestand, de efficiëntie van mantelafkoeling, radioactieve verwarming en rheologie. Planeten die matige getijdenverwarming ervaren (zoals TRAPPIST-1d) kunnen veel sneller een secundaire atmosfeer ontwikkelen (binnen ~ 1 miljard jaar) dan een planeet zonder getijdenverwarming.

In WP4 tonen 3D-modelleringsresultaten aan dat TRAPPIST-1b waarschijnlijk geen atmosfeer bezit, terwijl TRAPPIST-1c mogelijk een dunne atmosfeer heeft. Voor de overige TRAPPIST-1-planeten tonen onze modellen aan dat huidige JWST-waarnemingen compatibel blijven met meerdere scenario's: geen atmosfeer, zeer dunne atmosferen, of atmosferen met wolkendecken op grote hoogte. In het bijzonder benadrukken 3D-simulaties de rol van wolken in het afvlakken van transmissiespectra, waardoor extra waarnemingen nodig zijn om moleculaire kenmerken te identificeren.

In WP5 werd met behulp van een gekoppeld fotochemisch-klimaatmodel (Generic-PCM) onderzocht hoe de UV-flux van de ster zich door oxiderende atmosferen voortplant en hoe dit de omstandigheden aan het oppervlak en in de ondergrond beïnvloedt. Onder bepaalde UV-condities kan bestraling door M-dwergen efficiëntere ozonvorming en eerdere atmosferische oxidatie bevorderen dan op aarde, wat ook de kans op detectie van ozon met JWST zou kunnen vergroten. Deze studies benadrukken de noodzaak van een betere karakterisering van de stralingsomgeving van TRAPPIST-1. Strakkere beperkingen op UV-fluxen en temporele variabiliteit zijn essentieel voor betrouwbaar atmosferisch chemisch modelleren, voor het evalueren van levensvatbaarheid en voor het onderscheiden van biotische en abiotische oxygenatiescenario's op TRAPPIST-1e en vergelijkbare planeten.

WP6 richtte zich op het identificeren van het bruikbare lichtspectrum nabij het infrarood en op het karakteriseren van biochemische en ecologische strategieën die door aardse organismen zijn ontwikkeld om IR-fotonen te benutten en zich te beschermen tegen intense UV-straling. Een breed scala aan anoxygene en oxygenische fotosynthetische micro-organismen van de aarde werd onderzocht onder zichtbaar en IR-licht, wat het mogelijk maakte overlevingspercentages en pigment-samenstellingen van geselecteerde stammen te bepalen. Ook fotosynthetische activiteit onder IR-straling (met en zonder zichtbaar licht) werd in detail bestudeerd. De gebruikte methoden omvatten metingen van fotosynthetische activiteit via fluorimetrie en absorptiespectroscopie, pigmentanalyse via HPLC, eiwit-pigmentassociaties via native gelelektroforese en specifieke genetische markers via PCR. Parallel werd het genoom van IR-aangepaste bacteriën gesequenced om orthologe en paraloge eiwitsequenties te identificeren die betrokken zijn bij de kern van hun fotosynthetische apparaat. De evolutionaire geschiedenis van deze gensequenties werd onderzocht via fylogenie.

In WP7 boekte PORTAL ook belangrijke vooruitgang in ons begrip van fototrofie op de moderne en jonge aarde. Ontdekkingen omvatten claden van cyanobacteriën en microalgen die in staat zijn tot fotosynthese in het IR-bereik door hun fotosystemen aan te passen of door andere chlorofylen te gebruiken. PORTAL levert ook nieuwe inzichten op over belangrijke evolutionaire stappen in de vroege evolutie van leven en fotosynthese op de jonge aarde, zoals de oudste intracellulaire resten van thylakoïden—de membranen waar oxygenische fotosynthese plaatsvindt in cyanobacteriën (1,75 Ga), intracellulaire porfyrienen als resten van chlorofylen in multicellulaire cyanobacteriën en algen (1 Ga), en de oudste eukaryote cellen (1,75 Ga). Het project draagt ook bij aan het onderzoek naar enkele van de oudste fossiele cellen en microbiële matten (ca. 3,45–3,2 Ga).

Door multidisciplinaire kennis uit WP1–7 te combineren, levert WP8 een nieuw instrument (een biodome) om de mogelijkheid van fototrofie in het infrarood te onderzoeken. In dit systeem kan oxygenische fotosynthese door modelorganismen van de aarde worden uitgevoerd en gemeten onder gecontroleerde TRAPPIST-1-achtige atmosferische en lichtomstandigheden. Ook de mogelijkheid om biosignalen op afstand te detecteren kan ermee worden geëvalueerd. Dit platform is ook nuttig voor het onderzoeken van andere buitenaardse condities en omstandigheden op de jonge aarde en voor educatie en outreach. In WP9 heeft PORTAL bijgedragen aan discussies over levensvatbaarheid van exoplaneten rond sterren met zeer lage massa en de noodzaak aangetoond verder onderzoek te verrichten naar mogelijke biosignalen van fototrofie in diverse exoplaneetstelsels, evenals naar de oorsprong en vroege evolutie van dit succesvolle metabolisme op de jonge aarde.

CONCLUSIES: PORTAL heeft onze kennis over het TRAPPIST-1-exoplanetenstelsel verbeterd. De nieuwe, sterke randvoorwaarden op de bestralingssterkte op het oppervlak van de TRAPPIST-1-planetten werden gebruikt om de mogelijkheden van fototrofie in het infrarood te onderzoeken. PORTAL heeft ook belangrijke vooruitgang geboekt in ons begrip van fototrofie op de moderne aarde en in cruciale vroege evolutionaire stappen van het leven en de fotosynthese op de jonge aarde. Tenslotte heeft PORTAL geleid tot discussies over de levensvatbaarheid van planeten rond sterren met zeer lage massa en tot de ontwikkeling van een nieuw experimenteel platform (een biodome) om de mogelijkheid van fototrofie in het infrarood en de detectie van mogelijke biosignalen te onderzoeken. **Keywords** Bewoonbaarheid, biosignalen, fototrofie, infrarood licht, TRAPPIST-1, atmosfeer, modellen, biodome, exoplaneten, vroege aarde, microfossielen, cyanobacteriën, algen.