

## **Context**

De voorgenomen verhuizing van de hoofdvestiging van het nationale expertise instituut voor wetenschappelijk ruimteonderzoek SRON naar Amsterdam zorgt voor een concentratie van kennis op het gebied van high-tech instrumentatie, wetenschappelijk onderzoek en onderwijs die uniek is in Europa. Door samen te werken met de in Amsterdam reeds gevestigde kennisinstellingen ontstaat een voedingsbodem voor grensverleggend interdisciplinair onderzoek en onderwijs, gedreven door wetenschappelijke "grand challenges". De synergie van excellent wetenschappelijk ruimteonderzoek en innovatieve hoogwaardige instrumentatie maakt dat de samenwerkende partijen over grote expertise en uitgebreide faciliteiten beschikken op het gebied van ontwerp, ontwikkeling en productie van geavanceerde instrumentatie, gedreven door de zeer ambitieuze eisen van het wetenschappelijk onderzoek. De ontwikkeling van deze instrumentatie vindt plaats in nauwe samenwerking met andere kennisinstellingen en de industrie, en versterkt zodoende ook de economische infrastructuur van de regio Amsterdam. De samenwerking tussen kennisinstellingen en industrie wordt nog verder versterkt door hen bijeen te brengen in een nieuw te vestigen high-tech infrastructuur faciliteit waarin expertise en faciliteiten worden gedeeld. Amsterdam versterkt met de komst van SRON ook zijn positie als bruggenhoofd naar internationale big science organisaties, die in Europa een aanjager zijn van hoogwaardige technologie. Deze belangrijke aspecten van de samenwerking zijn reeds uitgewerkt in de notities "Ruimteonderzoek in Science Park Amsterdam", en "Geavanceerde instrumentatie, speerpunt van de kennisinstellingen in Amsterdam", door W. Hoogland.

### **1. Missie**

Samenwerkende partijen, VU, UvA en SRON, stellen vast dat door samen te werken op een aantal wetenschappelijke thema's zij een vooraanstaande internationale positie op deze thema's kunnen opbouwen of verder versterken. Door instrumentontwikkeling, onderzoek en onderwijs op deze thema's bij elkaar te brengen ontstaat een unieke omgeving voor grensverleggend onderzoek. Doel van deze kaderovereenkomst is het op hoofdlijnen beschrijven van de *wetenschappelijke thema's* waarop VU, UvA en SRON zullen samenwerken en het vaststellen van de financiële kaders voor de ondersteuning vanuit VU en UvA van de inhoudelijke samenwerking. De beschreven samenwerking kan worden gezien als groeikern van waaruit verbreding naar andere thema's binnen VU, UvA en SRON gerealiseerd kan worden, en verbreding van de samenwerking met andere kennisinstellingen.

### **2. Deelnemende departementen/instituten**

- Binnen de FNWI en FALW, respectievelijk het Anton Pannekoek Instituut voor Sterrenkunde (UvA), en de afdeling Aardwetenschappen (VU)
- De directeurs van deze afdelingen/instituten hebben de primaire verantwoordelijkheid voor de wetenschappelijke samenwerking tussen SRON en UvA-VU.

### **3. Structurele financiële middelen**

- FNWI en FALW zullen structurele middelen ter hoogte van 360 k€ per jaar beschikbaar stellen (180 k€ UvA, 180 k€ VU)
- Deze structurele middelen zullen in-kind beschikbaar worden gesteld
- Open posities zullen worden ingevuld bij aanvang van de werkzaamheden van SRON in het Amsterdam Science Park

- Invulling en aanstelling van personen op deze posities zal gebeuren volgens de standaard procedures van UvA-VU

#### 4. Tijdelijke (kick-off) funding

- FNWI en FALW stellen tijdelijke (kick-off) ondersteuning ter beschikking ter hoogte van of 240 k€ per jaar voor een periode van 5 jaar
- Open posities zullen worden geormerkt in de context van het AAA Fellow programma van UvA en VU
- Invulling en aanstelling van deze posities zal gebeuren volgens de standard procedures van UvA-VU
- Invulling en aanstelling van personen op deze posities zal beginnen na ondertekening van een overeenkomst tussen UvA, VU, NWO en SRON

#### 5. Inspanningsverplichting voortzetting tijdelijke funding

VU en UvA zullen actief de voortzetting van de tijdelijke (kick-off) middelen stimuleren na de verhuizing van SRON naar Science Park Amsterdam. Dit zal worden bereikt door competitieve funding voorstellen van VU/UvA onderzoeksgroepen die gelieerd zijn aan het SRON programma.

#### 6. Beschrijving wetenschappelijke thema's

De samenwerking spitst zich toe op een drietal inhoudelijke thema's, namelijk 1) aardatmosfeer en klimaat, 2) het hete en energetische heelal, en 3) exo-planetten, die hieronder en in de annex nader worden uitgewerkt. Deze thema's zijn gekozen op grond van de sterktes van de deelnemende partijen, en/of de overlappende prioriteiten binnen de desbetreffende onderzoeksgebieden van de deelnemende partijen.

##### Thema 1: Aardatmosfeer en klimaat

Met de voorgenomen komst van SRON en VU-ALW naar het Science Park Amsterdam ontstaat een unieke bundeling van expertises die baanbrekend onderzoek op het gebied van klimaat, en in het bijzonder de invloed van het menselijk handelen daarop, mogelijk zal maken. In onderstaande wordt aangegeven op welke terreinen de samenwerking tussen SRON en VU-ALW zich zal concentreren: de koolstofcyclus, en aerosolen & wolken. Beide onderwerpen staan volop in de belangstelling van het internationale klimaat- en luchtkwaliteitsdebat.

*Koolstofcyclus.* Wat is de verdeling van de bronnen en putten van de broeikasgassen en hoe veranderen deze in een veranderend klimaat? Om de koolstof cyclus en de invloed op klimaat te begrijpen, is het nodig om de bronnen en putten van de (broeikas)gassen methaan (CH<sub>4</sub>), kooldioxide (CO<sub>2</sub>) en koolmonoxide (CO) op mondiale schaal en zeer nauwkeurig te bepalen (CO is zowel luchtverontreinigend gas als een chemische voorloper van CO<sub>2</sub>). Het bepalen van concentraties van deze gassen uit satellietmetingen, grondmetingen, biosfeer-atmosfeer modellering en inverse modellering (het bepalen van de bronnen en putten uit de satellietmetingen) gaan hier hand in hand en moeten samen een beter begrip opleveren van de onderliggende processen. Het begrip van deze processen is voorwaarde voor voorspellingen van het toekomstige klimaat. De samenwerking zal het mogelijk maken de modellen gekoppeld aan toekomstige satellietmetingen (SRON) uit te breiden van mondiale schaal (SRON/IMAU) naar regionale schaal (VU). De Nederlandse overheid heeft in 2008 78 M€ geïnvesteerd in het satellietinstrument TROPOMI (lancering gepland eind 2016) en de bijbehorende data infrastructuur, waarvan SRON de TROPOMI GMES<sup>1</sup> dataproducten CO en CH<sub>4</sub> levert. Dit biedt de VU-SRON samenwerking een unieke uitgangspunt voor de wetenschappelijke exploitatie van deze dataproducten

---

<sup>1</sup> Global Monitoring for Environment and Security, programma van de Europese Commissie

**Aerosol.** Klimaatstudies laten zien dat aerosol de grootse bron van onzekerheid is op de verstoring van de stralingsbalans van de aarde (van de zelfde grootte als de gehele bekende bijdrage van CO<sub>2</sub>!). Om deze grote onzekerheid te reduceren is mondiaal - en dat kan alleen met satellieten - een zeer gedetailleerde typering van optische en microfysische eigenschappen van het aerosol noodzakelijk. Ook op gebied van luchtkwaliteit en volksgezondheid is gedetailleerde typering van aerosol van groot belang: hebben we het over aerosol van antropogene oorsprong (b.v. uitstoot t.g.v. verbranding, landbouw) of natuurlijk oorsprong (b.v. zeezout). SRON heeft als een van de weinige instituten in Europa ervaring opgebouwd met de typering van aerosol uit satelliet waarnemingen. Ook investeert SRON in een nieuw prototype instrument speciaal voor de nodige zeer gedetailleerde typering van aerosol. Dit biedt de VU-SRON een uniek uitgangspunt om gezamenlijk een toonaangevende rol te gaan spelen op gebied van onderzoek naar de impact van aerosol op klimaat en luchtkwaliteit.

## **Thema 2: Het hete en energetische heelal**

'*Wat zijn de fundamentele natuurwetten van het heelal?*' en '*wat is de oorsprong van het heelal en wat zijn de bouwstenen van het heelal?*' zijn fundamentele vragen in de astrofysica. Compacte objecten (neutronensterren en zwarte gaten) spelen een cruciale rol in de studie van materie onder extreme omstandigheden, en worden al lange tijd intensief bestudeerd door de wetenschappelijke staf van SRON en het Anton Pannekoek Instituut voor Sterrenkunde van de UvA, meer recentelijk ook in het kader van Grappa. Compacte objecten hebben ook grote invloed op de evolutie van melkwegstelsels, met name de superzware zwarte gaten in melkwegcentra. Het huidige paradigma is dat zulke superzware zwarte gaten worden gevormd door het samensmelten van zwarte gaten tijdens *galaxy mergers*, en door de accretie van gas in het melkwegstelsel. Accreterende superzware zwarte gaten zijn ook bekend als *Active Galactic Nuclei* (AGN), een van de meest extreme energiebronnen in het heelal. De evolutie van melkwegstelsels is op nog onduidelijke wijze gekoppeld aan de vorming en evolutie van de superzware zwarte gaten in het centrum van melkwegstelsels. Op nog grotere schaal worden clusters van melkwegstelsels gevormd, en dit proces wordt niet uitsluitend door donkere materie bepaald. Processen zoals *feedback* van AGN en supernovae op de omgeving moeten worden doorgrond om het huidige heelal te kunnen begrijpen. Het gas dat uit melkwegstelsels stroomt is verrijkt met producten van kernfusie in de kernen van (zware) sterren, en kan zo gebruikt worden om de stervormingsgeschiedenis van het heelal in kaart te brengen. Dit gas bevat naar schatting 40% van de baryonen in het heelal, maar is tot op heden nog niet gedetecteerd.

Er bestaat een grote mate van synergie tussen de astrofysica groep bij SRON en het API. Dit heeft in het verleden al geleid tot zeer succesvolle samenwerking op een aantal toonaangevende (kandidaat) ruimtemissies, zoals BeppoSax, ISO, Herschel, het LOFT voorstel, en de recentelijk door ESA geselecteerde *flagship* missie ATHENA. Door de verhuizing naar Amsterdam zal deze samenwerking nog verder intensiveren en de verwachting is dat door de aanwezigheid van wetenschappers met complementaire expertise er nieuwe dimensies kunnen worden toegevoegd. Dit is met name het geval voor de kennis op het gebied van instrumentbouw en van hete plasmas (SRON), en op het gebied van gamma-ray bursts, de zwaarste sterren in melkwegstelsels, supernovae, timing analyse van AGN en feedback fysica (Amsterdam, API en Grappa).

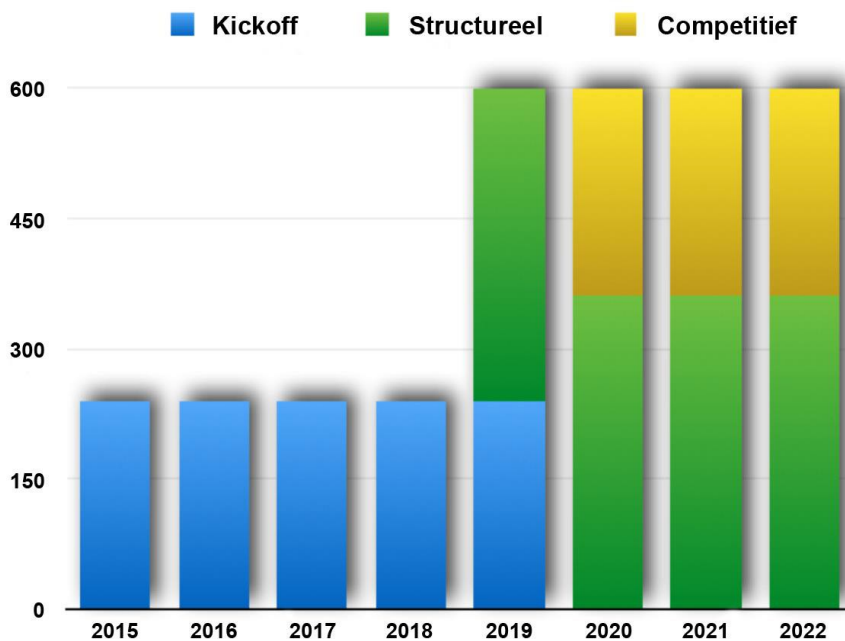
## **Thema 3: Exoplaneten – Are We Alone?**

'*Hoe uniek is de Aarde?*', '*Bestaat er leven elders in het universum?*' en '*Hoe ontstaan en veranderen planeten en planetenstelsels?*' zijn centrale vragen, niet alleen in de sterrenkunde, maar ook voor de vraag naar de oorsprong van de mens. Het onderzoek naar exoplaneten is relatief jong, omdat pas 20 jaar geleden de eerste planeten buiten het zonnestelsel zijn ontdekt. Planeten ontstaan in protoplanetaire schijven rond jonge sterren in een dynamische omgeving die de samenstelling en grootte van planeten beïnvloedt en die ook medebepalend is voor de architectuur van het vormende planetenstelsel. Het blijkt dat de diversiteit van planetaire systemen onverwacht groot is en dat ons eigen zonnestelsel geen prototype is, maar gewoon één van veel verschillende realisaties. Het is nu al duidelijk dat het aantal exoplaneten zeker even groot is als het aantal sterren in ons melkwegstelsel. Exoplanetair onderzoek is op dit moment aan het overschakelen van

gefocusseerd op ontdekking naar gefocusseerd op karakterisatie van exoplaneten, door middel van spectroscopie. De vorming en ontwikkeling van exoplaneten levert uitdagingen voor aardwetenschappers en astronomen. De interactie van het inwendige van een planeet, het planeetoppervlak, en ook van een mogelijke biosfeer, met de atmosfeer van een planeet is bepalend voor de analyse van planeetwaarnemingen die in de toekomst steeds kleinere planeten zullen bereiken. Het uiteindelijke doel zal de ontdekking van 'biomarkers', dus indicatoren voor het bestaan van leven, in de atmosfeer van exoplaneten zijn.

Er bestaat al een groeiende synergie tussen SRON, API aan de UvA en aardwetenschappen aan de VU voor onderzoek naar exoplaneten. SRON heeft exoplaneten gedefinieerd als een nieuwe programmalijn. API en SRON hebben recentelijk twee nieuwe onderzoekers op het gebied van exoplaneten aangesteld, als start van de toekomstige nauwe samenwerking. API onderzoekt protoplanetaire schijven en het ontstaan van planeten door een synthese van waarnemingen en numerieke simulaties. De structuur van protoplanetaire schijven wordt waargenomen met internationale faciliteiten in de ruimte, zoals ISO en HERSCHEL en de geplande SPICA missie, allen met significante bijdragen van SRON. Deze waarnemingen van de ruimte worden aangevuld met waarneming van de grond, zoals ESO VLT met instrumenten als SPHERE, XSHOOTER, en MATISSE, met medewerking van API onderzoekers. Aardwetenschappen aan de VU bestudeert de vorming en differentiatie van planetaire lichamen en zal zo waardevolle informatie over rotsachtige planeten bijdragen. API en VU onderzoekers zijn begonnen met gezamenlijk onderzoek naar relaties tussen transportprocessen in planetaire stofschijven en de daaruit voortvloeiende samenstelling van rotsachtige exoplaneten. VU en UvA onderzoeken levensvormen die extreme omstandigheden kunnen weerstaan; Dit thema verbreedt naar onderzoek naar de basisprocessen en het ontstaan van leven, op zoek naar het antwoord op de vraag 'Are We Alone?'.

NWO heeft in 2013 geïnvesteerd in een netwerk voor (exo)planeetonderzoek en zo het belang hiervan voor het Nederlandse onderzoeklandschap bevestigd. Wereldwijd is onderzoek naar exoplaneten een onderwerp van stijgende zichtbaarheid en belang. De komst van SRON betekent een unieke kans om Amsterdam als een sterke speler op de kaart de zetten.



kickoff	= geormerkt voor SRON domein
structureel	= structureel voor SRON domein
competitief	= inspanningsverplichting (intern & extern) van aan SRON gelieerde onderzoeksgroepen van VU en UvA

# Appendix: more extended description of the science themes

## Earth Atmosphere and Climate

Here we focus on interactions between the Earth's biosphere and atmosphere. We describe more specifically a number of research areas where future synergies are promising and what is needed to valorize these synergies.

### *Research on the Earth Carbon Cycle: Understanding the impact on climate change and air quality*

The research at SRON on the global carbon cycle is carried out in collaboration with several Dutch institutes, including - among others - IMAU, VUA, TNO, and WUR. Within the carbon cycle theme, the ongoing and planned activities cover three main fields of interest, centered around the climate and air quality relevant gases CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and CO. The focus on CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> has a high potential for the future, as the quality of data products from remote sensing is rapidly improving, so that analysis will become useful not only for global budget studies, but also for process based studies and verification in the context of the UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) protocols.

An important research priority is to infer the global sources and sinks of CH<sub>4</sub>, CO, and CO<sub>2</sub>, from satellite retrievals using the atmospheric inverse modeling technique. Geophysical data are retrieved from the satellite instruments SCIAMACHY (CH<sub>4</sub>, CO), and GOSAT (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) at SRON, to be extended to in the future to OCO-2 (CO<sub>2</sub>), TROPOMI (CO, CH<sub>4</sub>), Sentinel-5 (CO, CH<sub>4</sub>) and CarbonSat (CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>) or MicroCarb (CO<sub>2</sub>). Except for the latter two, all other missions have been approved for full execution.

The research at VUA focusses on regional land-surface models. A future close cooperation between VUA and SRON gives great opportunities to extend the above specified approach of satellite retrievals and inverse modeling from global to regional scales using meso-scale models used at VUA. Regions of special interest are those that are important for understanding natural feedbacks to climate change and are not well covered by in situ networks, such as Siberia and tropical South America.

A promising approach is to combine the strengths of different data products.. The remote sensing of soil moisture and standing water using the microwave imagers SSM/I and SMOS is happening at VU. The relation between permafrost dynamics and methane emissions is investigated in ongoing field experiments in Kytalyk, Siberia (VUA).

Similarly, important additional constraints can be derived from joint analyses of atmospheric gases. An important example is CO, which specifically addresses the land use change (tropical deforestation) component of CO<sub>2</sub>. The global fire emission database GFED, developed at VUA, has successfully been combined with SRON retrievals of SCIAMACHY CO in the past, and has great potential in joint application with TROPOMI and Sentinel-5 CO. Further constraints on biomass burning may come from NO<sub>2</sub> and aerosols measurements (under investigation at VUA, see also other collaboration SRON/VUA on aerosols). A powerful approach for adding source specific information is through isotope analysis. A main priority of isotope research is to better characterize newly discovered sources of methane in the Arctic.

Currently VUA and SRON are already successful in acquiring EU (e.g. GeoCarbon) and national grants (e.g. NWO-GO) for the joint VUA-SRON research. A future collaboration as described above will strongly enhance these possibilities.

### **Global carbon and hydrological cycles.**

Using satellite-derived observations of XCO<sub>2</sub>, fluorescence, and HDO several key characteristics of the global carbon and hydrological cycles –which are coupled to a large extent- can be better constrained yielding potential new scientific insights in the response of vegetation to changes in climatic conditions.

### **Emission from and characterization of biomass burning events**

Biomass burning events are often observed from space, but observations of CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> (and XCO<sub>2</sub>) as well as aerosols can provide crucial information about the characteristics of these events and have the potential to better constrain emissions.

#### **Wetland emissions of CH<sub>4</sub> using a.o. microwave data on surface wetness**

SRON and VU developed a process model of CH<sub>4</sub> emissions from wetlands. There is a large interest in this subject because wetlands are a major source and climate change (especially in the boreal regions due to Arctic amplification) may change wetland dynamics and thus CH<sub>4</sub> emissions. The research at VU and SRON in this field is highly complementary, with VU focusing on boreal/arctic wetlands and SRON focusing on the tropics.

#### **Collaboration facilitating model developments**

Atmospheric transport and chemistry represents the link between the bottom-up focus of the VU and the measurements of atmospheric composition made by SRON. Both SRON and VU use the TM5 model for this, mostly on a global scale. In addition, VU runs the regionally focused WRF-Chem and RAMS models. While both institutes run these models, stronger collaboration would greatly enhance the forming of a dedicated modeling group.

#### *Aerosol research: understanding the impact on climate change and air quality*

Anthropogenic aerosols are believed to cause the second most important anthropogenic forcing of climate change after greenhouse gases. The magnitude of this forcing represents the largest reported uncertainty in the most recent (4th) assessment of the International Panel on Climate Change (IPCC). The VU has expressed the ambition to contribute to this field of research in collaboration with SRON and IMAU. Within a VU-SRON-IMAU collaboration the VU can make a significant contribution here given the available expertise on land-atmosphere interaction next to the global chemical transport modeling by IMAU. Land use in general but in particular the topic of biomass burning has the perspective for fruitful collaboration between the VU and SRON. The VU has the ambition to extend their biomass burning modeling activities to include aerosols. Here, in first instance the focus will be on regional scale modeling, and as a next step global modeling, while SRON has strong expertise on satellite remote sensing of aerosol microphysical and optical properties. An externally funded project at SRON has recently started to use this information to calculate the Global Direct Aerosol Radiative Forcing. Also the research at the VU on the hydrological cycle has perspective for collaboration in the field of aerosols. There is a clear link between aerosols and the hydrological cycle as aerosols affect cloud formation and precipitation. Thus, the collaboration will enhance research on understanding the coupling between climate and air quality by cloud – aerosol – fire interactions.

## **The Hot and Energetic Universe**

***The energetic Universe: Black hole physics and BH evolution:*** The theory of General Relativity, verified to exquisite accuracies in the weak-field regime, e.g., in our Solar system, predicts large effects on the motion of matter under the influence of strong-field gravity. Probing effects of strong field gravity in situ, can be performed by direct observation of regions within a few Schwarzschild radii of black holes (BH) and requires X-ray observations. In addition to the importance of strong-field gravity for fundamental physics, there is the wider astrophysical significance of understanding BH accretion. It is central to our understanding of the Cosmos. Deep, wide X-ray surveys are needed to reveal accreting supermassive black holes at  $z=6-10$ , even if they are obscured, providing the most reliable census of accretion activity in the early Universe. The role of black hole feedback in the subsequent evolution of galaxies is thought to be profound: the energy output of the black hole is in principle sufficient to expel all the gas in a galaxy. Accretion powered X-rays will provide critical information about black hole and galaxy co-evolution by quantifying the energetics of black-hole feedback and the properties of nuclear obscuration. Ultimately this feedback must be triggered from accretion processes close

to the black hole event horizon. There, X-rays map the inner regions of the accretion flows, to determine the relationship between accretion and ejection processes and the ultimate cause of feedback.

*Accretion onto a black hole* mainly depends on the mass and spin of the black hole and on the mass accretion rate. The accretion process and the related jet formation are poorly understood, although significant progress has been obtained over the last years, intimately linking the jet outflow to the properties of the accretion inflow. Combined spectral and timing analysis (expertise of SRON and API, respectively) will open new possibilities and this approach can also be applied to accretion onto black holes in X-Ray Binaries. The *evolution of massive stars*, the supernova explosion, and their bearing on the mass of the black holes formed out of these stars is still a puzzle. The nature of ultra-luminous X-ray sources (ULXs) may help us to understand this. If stellar mass black holes can be significantly more massive than 10 - 15 solar masses (e.g. of order hundred solar masses), the ULXs could be massive stellar black holes accreting at a high rate. These massive stellar-mass black holes, as well as even more massive intermediate mass black holes, are thought to play an important role in the build-up of super-massive black holes (SMBHs). When (massive) black holes merge they obtain a recoil kick due to the presence of asymmetric gravitational wave emission in the merger process. The properties of recoiling (super-massive) black holes will allow us to investigate the magnitude of the recoil kicks, which depend amongst other things on the black hole spin. Measuring black hole spins, in turn, provides input to the cosmology simulations as well as predictions for future space-based gravitational wave detectors. As explained above, the co-evolution of black holes and the galaxies in which they exist, and how e.g. black hole outflows feedback into arresting the growth of galaxies, are a topic of growing interest at API.

Therefore we expect that there are various ways in which the co-location of SRON and the UvA-API will strengthen the science: the knowledge about the diagnostic features in photo-ionized plasma's will be combined with detailed modeling of relevant sources, a multi-wavelength approach will be strengthened by the collaboration between a larger and more diverse group of scientists while using the expert knowledge in the different fields.

***The hot Universe: chemical evolution and the formation of the largest scale structures in the Universe:*** to understand the Hot Universe, we must determine the physical evolution of clusters and groups of galaxies from their formation epoch at  $z \sim 3$  to the present day. This evolution is traced by X-ray observations, which map the gas mass, motions, thermodynamics and chemical composition of the hot gas. Such measurements uniquely reveal the growth of these largest structures while they accrete gas from the cosmic web of the intergalactic medium. They also show when and how energy is injected into the hot medium, how the heavy elements were formed and are distributed in the Universe, and the role of feedback from supermassive black holes in shaping the intracluster medium. The endpoints of these evolutionary processes are today's massive clusters of galaxies, the largest bound structures in the Universe. At even larger scales, the locations and kinematics of the missing baryons predicted to reside in the warm hot phase of the intergalactic medium and providing a tracer of the large scale dark matter structures of the local Universe, can only be fully revealed in X-rays. Although the Japanese satellite Astro-H, launched in February 2016, was lost 6 weeks after launch, the single high resolution X-ray spectrum of a galaxy cluster it provided shows the potential of this type of data. The planned ESA mission Athena (2028) will boost this field and a number of topics of great interest to researcher of the API and SRON will be accessible: *The physics of shocks and hot plasma* is till poorly known and need to be studied in the relevant sources (SNR, colliding stellar winds, cluster of galaxies) by multiple probes including ground and space-based instruments. *Chemical evolution and large scale structure* reveal the role of processes such as galactic winds, AGN feedback and ram-pressure stripping and are also a measure for the Initial Mass Function of star formation. X-ray observations will provide the abundances and physical properties of elements in clusters of galaxies that can be compared to model predictions of nucleosynthesis yields. A large fraction of the baryons (40%) in the Universe remains undetected and is presumed to be in *the Warm-Hot Intragalactic Medium (WHIM)*. The WHIM consists of filaments of gas that have collapsed and shock-heated since  $z \sim 1$  connecting clusters of galaxies. This WHIM cannot be detected in the optical but should be observable with the future generation of X-ray satellites.

These are all areas that are studied by experts at SRON and API with very complementary expertise. Combining the astrophysical interest in SRON and the UvA-API with the expert knowledge of SRON about the properties of

hot plasma's and the relevant instrumentation (possibly a re-flight of in 2020-2021, and Athena) will open new and exciting opportunities.

**The time variable Universe** The coming decade is one where time-domain astronomy will be (re)-established as one of the main fields in astronomy. Finally it is possible to address key physics questions by studying the extreme time-variable events in the Universe as the computational power has become sufficient to sift through the large volumes of data that need to be analyzed to find these interesting, sometimes brief, events. At the same time the current detectors provide enough diagnostic information that these events can be studied meaningfully. Related to that, the value of designing a multi-wavelength experiment has been realized in the second part of the 20<sup>th</sup> century. New facilities like LOFAR, MeerKAT, SKA in the radio band, LSST, PanSTARRS, iPTF, BlackGEM, and Gaia in the optical will focus to a large extent on the science to be done with time-domain astronomy. Within this context *Gamma-ray bursts* (GRBs) are the most luminous transient sources in the universe by far. They originate from extreme gravitational collapse and the physics of the densest, highly magnetized and energetic regions we can have, and therefore they probe among the most extreme manifestations of the laws of physics. In addition, their extreme brightness and very high redshift allows us to use them as 'backlights' to probe the entire universe between them and us with a sightline sometimes of 13 billion light years. Specifically, high-resolution X-ray spectroscopy of GRBs is one of the few known ways to probe the evolution of metal enrichment in the intergalactic medium. This will tell us about the joint history of star formation, ionization, and gas mixing in the universe. Timing data for *Neutron stars* allow us the study of ultra-dense matter (quark-gluon plasmas) in de density regimes which can not be studied on the ground and has an impact at a much larger scale than astrophysics only. To constrain the equation of state of ultra-dense matter, a combination of spectral and timing analysis in the X-ray band is required. Continuously *new transient phenomena* are discovered such as Rotating Radio Transients (RRAT), Fermi-detected millisecond pulsars, Lorimer bursts, the Galactic Centre burper (Low-Frequency Radio Transient), GRB-like fast Galactic X-ray transients, tidal disruption of a star by a black hole, etc. They show that Nature has not yet exhausted her bag of riddles for us in this area, and yet much is to be learnt from combining wide-field alert systems in space for such high-energy phenomena with ground- and space-based follow up instruments. Combining the experience and reputation of SRON in this field (e.g. wide field monitor on BeppoSAX) and the leading role of the API scientists in the field of time variable compact sources will allow us up to pick the scientific fruits of this (re)-emerging of the field of time-domain astronomy.

## Exoplanets: Are we alone?

The preponderance of life in the Universe, and whether humanity might ever find itself able to detect life elsewhere, is one of the most salient and challenging questions not only of modern astronomy, but of all of modern science. Ultimately our ability to answer it depends on progress in astronomy, earth science and atmospheric physics, chemistry and biology, in concert with each other. Several elements that may form a basis for such a program exist within the two Universities in Amsterdam. The build-up of collaboration between Natural Sciences of VU and UvA in the context of the Amsterdam Academic Alliance, in combination with the complementary research and development concentration resulting from the establishment of SRON at Science Park Amsterdam provides a unique and unprecedented opportunity to establish in Amsterdam a world-class centre for the study of this ultimate question.

### *Background*

Both planetary science and exoplanetary science have made great progress over the past decades. Missions to Mercury, Venus, the Moon, Mars, asteroids, and the outer planets and their moons have revolutionised our knowledge of the formation, evolution, and present-day properties of the interior, surface, atmospheres and exospheres of many bodies in our solar system. Potentially habitable zones have been identified and characterised on Mars and in the interiors of icy moons, and a plethora of biomarkers have been proposed and studied, based on remote sensing observations, in situ observations from landers, and detailed, Earth-based analyses of meteorite and dust samples.



The past two decades have seen the number of known planetary systems expand from just one, the in which we live, to many hundreds: the possession of planets is a common property of stars, and thus other worlds number of order 100 billion even only in our Galaxy. Observations indicate that a vast variety of places exist in the Universe where the rise and sustained presence of life should be possible. At the moment, we can derive the most basic characteristics of these planets, such as orbits and estimated surface temperatures, as well as masses, radii, and mean densities, containing information about the composition and internal structure of the planets. For a few cases, at the very limits of current capabilities, has it been possible to measure further properties, such as some chemical constituents of their atmospheres, and even a wind speed.

Much more detailed characterizations of planets and exoplanets will become possible in the next decade. European missions to Mercury, Mars, and the Jovian moons are currently in preparation. The European Extremely Large Telescope (E-ELT) will make it possible to obtain the first direct images of rocky exoplanets with the EPICS and METIS instruments, both of which have major Dutch involvement. Ultimately, we will be able to characterize their surfaces and/or atmospheres and compare them to planets in our own solar system. The interpretation and understanding of this wealth of data from these and other upcoming missions will require the development of new, highly cross-disciplinary and interdisciplinary research approaches. Astronomical observations need to be combined with knowledge from the fields of earth science, biology, and chemistry to provide a coherent framework to understand planetary system formation and evolution – to ultimately answer the question 'Are we alone?'. Because of their highly complementary expertise in space instrumentation, experimentation, numerical simulations, and astronomical observations the UvA-VU-SRON collaboration is perfectly placed to develop a world-class exoplanetary science center.

For the foreseeable future, planetary atmospheres will be the main determinant for the emitted and reflected light as well as chemical signature from a planetary atmosphere. In this context, it is of great importance that the study of the atmosphere of our own Earth and its neighbours has also taken a great leap forward, stimulated of course by the high societal impact of global warming and climate change and the need to understand the contributions of many effects – especially anthropogenic ones, with complex interplays between the planet, its geosphere, hydrosphere, biosphere and atmosphere. Taking our understanding of the Earth and solar system planets and extrapolating this to the very different and very diverse circumstances of exoplanets will be challenging and exciting. By learning how to do this, we will be able to understand what the signatures mean that astronomers can extract with great pains from other solar systems.

Examples for planned research topics in the UvA-VU-SRON collaboration include:

### **Formation and evolution of rocky exoplanets**

Rocky exoplanets form in the regions of protoplanetary disks that are relatively close to the star. In these regions, the abundance of solids made of volatiles like water, CO and similar ice-forming species is low because of the large temperatures that are present as a result of the production of accretional heat as well as disk irradiation from the central star. Planets forming in these regions will consist of the materials that are still stable at the environmental circumstances. To understand the internal structure of such planets, it is necessary to study the resulting mixtures of chemical elements and the conditions present inside such planets, i.e. high pressure and temperature. This opens the door for a direct collaboration between the planet formation group at API and the high-pressure laboratory at the VU. SRON fits in because it will help to develop instrumentation that will in the future make the detection and further characterization of such planets possible. UvA/VU/SRON are already starting up this collaboration with a joint PhD student (started in September 2014).

### **Exoplanet atmospheres**

The study of exoplanet atmospheres is the key prerequisite for observational access to the properties of exoplanet. The atmosphere of a planet is the component that interacts with light and imprints its composition onto the radiation reflected and emitted by the atmosphere. Current and future observatories and space missions attempt to separate photons that come from the planet from stellar photon, using a variety of

techniques. The key problem in all these experiments is to suppress the radiation from the star as much as possible, so experiments use coronagraphs, differential techniques (spectral, angular, polarimetric) to gain access to the few photons that carry the planetary signal. To make the most of this limited information, models of (exo)planet atmospheres are needed that predict the strength of absorption lines and other emission as a function of properties. SRON is currently hiring a modeling expert to study radiative transfer in exoplanetary atmospheres. API has currently a PhD student constructing a new (Monte Carlo) radiative transfer code for exoplanet atmospheres. API has hired an observational astronomer who will be key in future instruments and missions to detect and further characterize exoplanets. Future missions include the James Webb Space telescope, scheduled for launch in 2018, the Plato mission (planned launch 2025), the ESA/JAXA mission SPICA that is considered for the ESA M5 call and may contain an exoplanet component, as well as many ground-based instruments like SPHERE on the VLT. From the VU, expertise in the properties and physics of planetary atmospheres will directly flow into these projects.

