



SOFIA – Mission Accomplished: wissenschaftliche Highlights

**Prof. em. Dr. Jürgen Stutzki
Institut für Astrophysik
Universität zu Köln**



Mission Accomplished: wissenschaftliche Highlights

- **worin war SOFIA einzigartig**
- **Zugang zum Ferninfraroten Spektralbereich (FIR)**
 - » **weitgehend ohne Einfluss der Erdatmosphäre, insbesondere bei hoher spektraler Auflösung**
(aber: bei breitbandigem Signal stört das warme Teleskop und die Rest-Atmosphäre
→ Kosmologie und Galaxien-Entwicklung bis ins frühe Universum → Satelliten-Missionen)
- **Möglichkeit der schnellen Weiterentwicklung von Instrumenten entsprechend den technologischen Entwicklungen**
 - » **wichtig im FIR, wo die technologischen Entwicklungen in den letzten beiden Dekaden rasant waren**
 - » **substantiell geringere Einschränkungen für die wissenschaftlichen Instrumente als auf Satelliten**
 - » **Gewicht, Volumen, elektrische Leistung**
- **zeitkritische Beobachtungen von weitgehend frei wählbaren „Stand“orten auf der Erde**

Besonderheit des FIR Spektralbereichs

- › **Atom- und Molekülphysik:**
 - » **Feinstruktur: Spin-Orbit-Kopplung der Elektronen, häufigste Elemente: C, O, N, ...**
 - » **wichtigste Kühl-Linien des sternbildenden ISM: [CII] 158 μm , [OI] 63 μm**
 - » **Hydride (ein oder mehrere Wasserstoff-Atome plus ein anderes Element: HD, CH, OH, NH₃,...:)**
kleines Trägheitsmoment → Rotations-Übergänge im FIR
 - » **Beginn der interstellaren Chemie**
- › **Maximum der Staubemission (50 bis einige 100 K); Polarisations-Eigenschaften des Staubes**



Mission Accomplished: wissenschaftliche Highlights

- worin war SOFIA einzigartig
 - Zugang zum Ferninfraroten Spektralbereich (FIR)
 - » weitgehend ohne Einfluss der Erdatmosphäre
(aber: bei breitbandigem Signal stört das warme Teleskop und die Rest-Atmosphäre
→ Kosmologie und Galaxien-Entwicklung bis ins frühe Universum → Satelliten-Missionen)
 - **Möglichkeit der schnellen Weiterentwicklung von Instrumenten entsprechend den technologischen Entwicklungen**
 - » **wichtig im FIR, wo die technologischen Entwicklungen in den letzten beiden Dekaden rasant waren**
 - » **substantiell größerer „envelope“ (geringere Einschränkung/Limitierung???) für die wissenschaftlichen Instrumente als auf Satelliten » Gewicht, Volumen, elektrische Leistung**
 - zeitkritische Beobachtungen von weitgehend frei wählbaren „Stand“orten auf der Erde

Principle Investigator (PI)-Instrumente ↔ Facility Instrumente

GREAT → **upGREAT/4GREAT**
FIFI-LS
EXES
~~CASIMIR~~

FORCAST
FIFI-LS
HAWC → **HAWC+**
HIPO
AIRES
HIRMES



wissenschaftliche Highlights: Instrumentenentwicklung

• **GREAT** (deutsches PI-Instrument)

- nutzte die Verzögerungen bis zum Start von SOFIA, um state-of-the-art FIR-Heterodyn-Technologie zu integrieren
 - waveguide-Mischer, digitale Spektrometer, höchste Frequenzen
- nutzte die SOFIA Möglichkeiten zur zügigen Frequenzerweiterung und um auf Multi-Pixel-Array aufzurüsten

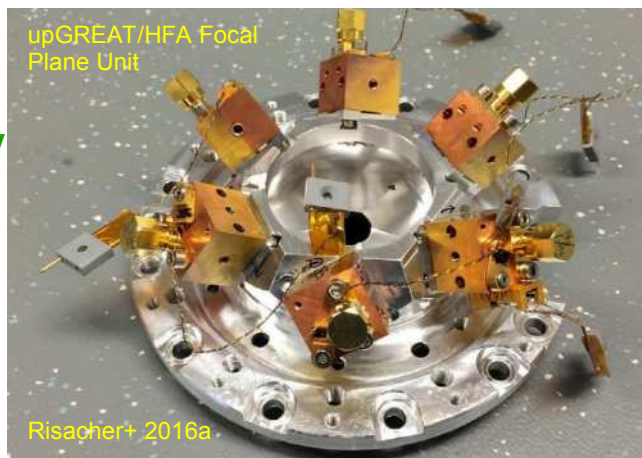
- → **upGREAT**:

- › **LFA: 80-fach**
schnellere [CII]-maps
→ **FEEDBACK legacy**

- › **GREAT/HFA:**
erstes Heterodyn
Instrument bei 4.7 THz
- QCL-LO etc.

- → **4GREAT**:

- › spektral 5-fach
multiplexed
→ **HYGAL legacy**



• **HAWC** (US Facility-Instrument)

- second generation instrument Runde: → **HAWC+** (Polarisations-Messungen)
 - → **legacy program zur Magnetfeldstruktur (FIELDMAP, SALSA, FIREPLACE, SIMPLIFI)**

• **FPI+**: verbesserter Focal Plane Imager des Teleskops (DSI/DLR-Beitrag)

- verbessertes Pointing, auch auf dunklen Himmelsfeldern
- ersetzte HIPO (Bedeckungs-instrument)

• **HIRMES**: wg. Kostenexplosion und SOFIA-shutdown nicht mehr realisiert

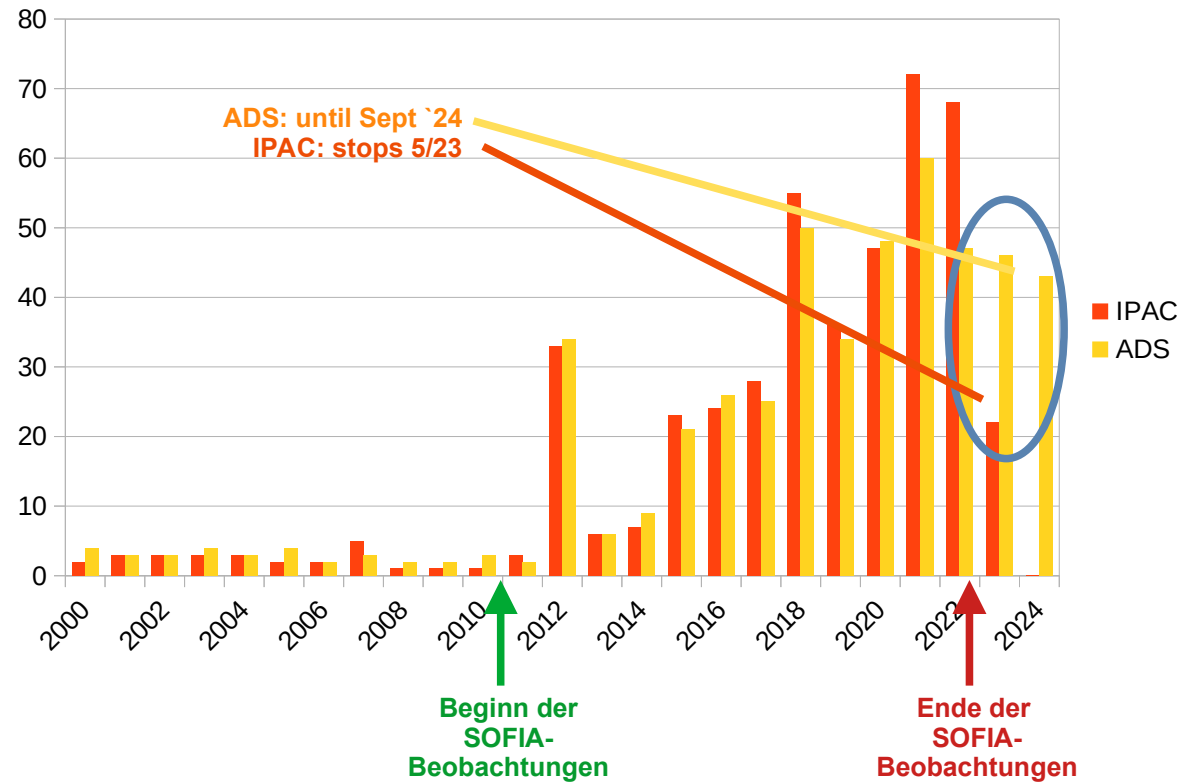


wissenschaftliche Highlights: astrophysikalische Publikationen

Zitat SOFIA Science Council (SSC), Dec 2013:

Ultimately, SOFIA will be evaluated on the basis of the number and quality of scientific papers produced, and not simply on the number of flight hours

SOFIA papers (science & observatory)





SOFIA Papers published in „Nature“

1. "Direct detection of atomic oxygen on the dayside and nightside of Venus", Hübers et al., 2023, Nature Communications, 14, 6812
2. "Accurate oxygen abundance of interstellar gas in Mrk 71 from optical and infrared spectra", Chen et al., 2023, Nature Astronomy, 7, 771
3. "Ionized carbon as a tracer of the assembly of interstellar clouds", Schneider, Nicola, et al., 2023/02, Nature Astronomy, 7, 546
4. "Low gas-phase metallicities of ultraluminous infrared galaxies are a result of dust obscuration", Chartab, Nima, et al., 2022/05, Nature Astronomy, 6, 844
5. "Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA", Honniball, C. I., et al., 2021, Nature Astronomy, 5, 121
6. "The magnetic field across the molecular warped disk of Centaurus A", Lopez-Rodriguez, Enrique, 2021, Nature Astronomy, 5, 604
7. "Magnetized filamentary gas flows feeding the young embedded cluster in Serpens South", Pillai, Thushara G. S., et al., 2020/08, Nature Astronomy, 4, 1195
8. "A heatwave of accretion energy traced by masers in the G358-MM1 high-mass protostar" Burns, R. A., et al., 2020/01, Nature Astronomy, 4, 506
9. "Astrophysical detection of the helium hydride ion HeH⁺", Güsten, Rolf, et al., 2019/04, Nature, 568, 357
10. "Disruption of the Orion molecular core 1 by wind from the massive star Θ 1 Orionis C", Pabst, C., et al., 2019/01, Nature, 565, 618
11. "Disk-mediated accretion burst in a high-mass young stellar object", Caratti o Garatti, A., et al., 2017/03, Nature Physics, 13, 276
12. "H₂D⁺ observations give an age of at least one million years for a cloud core forming Sun-like stars", Brünken, Sandra, et al., 2014/12, Nature, 516, 219



SOFIA Papers published in „Nature“

- | | | |
|--|----------------------|-----|
| 1. "Direct detection of atomic oxygen on the dayside and nightside of Venus“, Hübers et al., 2023, Nature Communications, 14, 6812 | GREAT | GT |
| 2. "Accurate oxygen abundance of interstellar gas in Mrk 71 from optical and infrared spectra“, Chen et al., 2023, Nature Astronomy, 7, 771 | FIFI-LS | OT |
| 3. "Ionized carbon as a tracer of the assembly of interstellar clouds", Schneider, Nicola, et al., 2023/02, Nature Astronomy, 7, 546 | GREAT | OT |
| 4. "Low gas-phase metallicities of ultraluminous infrared galaxies are a result of dust obscuration", Chartab, Nima, et al., 2022/05, Nature Astronomy, 6, 844 | FIFI-LS | OT |
| 5. "Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA", Honniball, C. I., et al., 2021, Nature Astronomy, 5, 121 | FORCAST | DDT |
| 6. "The magnetic field across the molecular warped disk of Centaurus A", Lopez-Rodriguez, Enrique, 2021, Nature Astronomy, 5, 604 | HAWC+ | OT |
| 7. "Magnetized filamentary gas flows feeding the young embedded cluster in Serpens South", Pillai, Thushara G. S., et al., 2020/08, Nature Astronomy, 4, 1195 | HAWC+ | OT |
| 8. "A heatwave of accretion energy traced by masers in the G358-MM1 high-mass protostar" Burns, R. A., et al., 2020/01, Nature Astronomy, 4, 506 | FIFI-LS
follow-up | OT |
| 9. "Astrophysical detection of the helium hydride ion HeH+ ", Güsten, Rolf, et al., 2019/04, Nature, 568, 357 | GREAT | GT |
| 10. "Disruption of the Orion molecular core 1 by wind from the massive star Θ 1 Orionis C", Pabst, C., et al., 2019/01, Nature, 565, 618 | GREAT | OT |
| 11. "Disk-mediated accretion burst in a high-mass young stellar object", Caratti o Garatti, A., et al., 2017/03, Nature Physics, 13, 276 | FIFI-LS | OT |
| 12. "H ₂ D ⁺ observations give an age of at least one million years for a cloud core forming Sun-like stars", Brünken, Sandra, et al., 2014/12, Nature, 516, 219 | GREAT | OT |



SOFIA Papers published in „Nature“

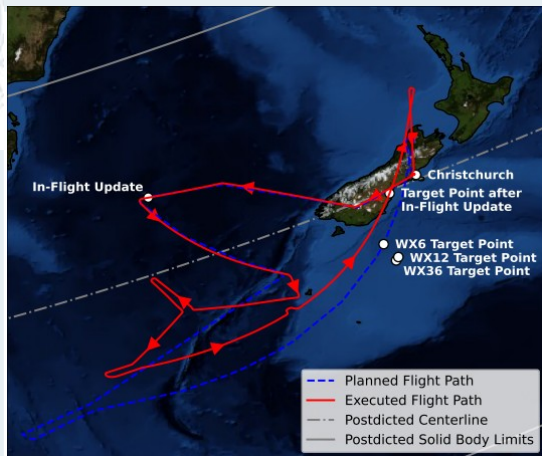
1. "Direct detection of atomic oxygen on the dayside and nightside of Venus“, Hübers et al., 2023, Nature Communications, 14, 6812	GREAT	GT
2. "Accurate oxygen abundance of interstellar gas in Mrk 71 from optical and infrared spectra“, Chen et al., 2023, Nature Astronomy, 7, 771	FIFI-LS	OT
3. "Ionized carbon as a tracer of the assembly of interstellar clouds“, Schneider, Nicola, et al., 2023/02, Nature Astronomy, 7, 546	GREAT	OT
4. "Low gas-phase metallicities of ultraluminous infrared galaxies are a result of dust obscuration“, Chartab, Nima, et al., 2022/05, Nature Astronomy, 6, 844	FIFI-LS	OT
5. "Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA“, Honniball, C. I., et al., 2021, Nature Astronomy, 5, 121	FORCAST	DDT
6. "The magnetic field across the molecular warped disk of Centaurus A“, Lopez-Rodriguez, Enrique, 2021, Nature Astronomy, 5, 604	HAWC+	OT
7. "Magnetized filamentary gas flows feeding the young embedded cluster in Serpens South“, Pillai, Thushara G. S., et al., 2020/08, Nature Astronomy, 4, 1195	HAWC+	OT
8. "A heatwave of accretion energy traced by masers in the G358-MM1 high-mass protostar“ Burns, R. A., et al., 2020/01, Nature Astronomy, 4, 506	FIFI-LS follow-up	OT
9. "Astrophysical detection of the helium hydride ion HeH+“, Güsten, Ralf, et al., 2019/04, Nature, 568, 357	GREAT	GT
10. "Disruption of the Orion molecular core 1 by wind from the massive star Θ 1 Orionis C“ Pabst, C., et al., 2019/01, Nature, 565, 618	GREAT	OT
11. "Disk-mediated accretion burst in a high-mass young stellar object“, Paratti o Caratti o Caratti, et al., 2017/03, Nature Physics, 13, 276	FIFI-LS	OT
12. "H ₂ D ⁺ observations give an age of at least one million years for a cloud core forming Sun-like stars“, Brünken, Sandra, et al., 2014/12, Nature, 516, 21	GREAT	OT

	total (GT/OT)
GREAT:	5 (2/3)
FIFI-LS:	3 (0/3)
HAWC+:	2 (0/2)
FORCAST:	1 (0/1)

Fazit: die weiterentwickelten Instrumente ermöglichten die beste Wissenschaft



wissenschaftliche Highlights: Bedeckungs-Experimente



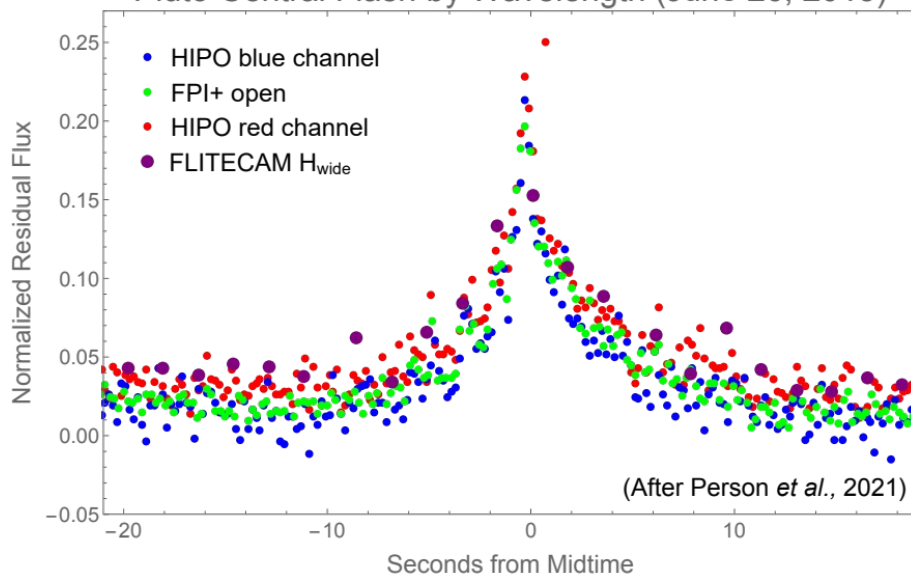
Beispiel: Pluto: Dunst in der Atmosphäre???

- "Haze in Pluto's atmosphere: Results from SOFIA and ground-based observations of the 2015 June 29 Pluto occultation", Person, M.J., et al., 2021, Icarus, 356, 113572

Extrem herausfordernde Beobachtungen wegen der hohen Präzision der geographischen Position und der Zeitpunkte

Koordiniert mit NASA New-Horizon Vorbeiflug an Pluto...

Pluto Central Flash by Wavelength (June 26, 2015)

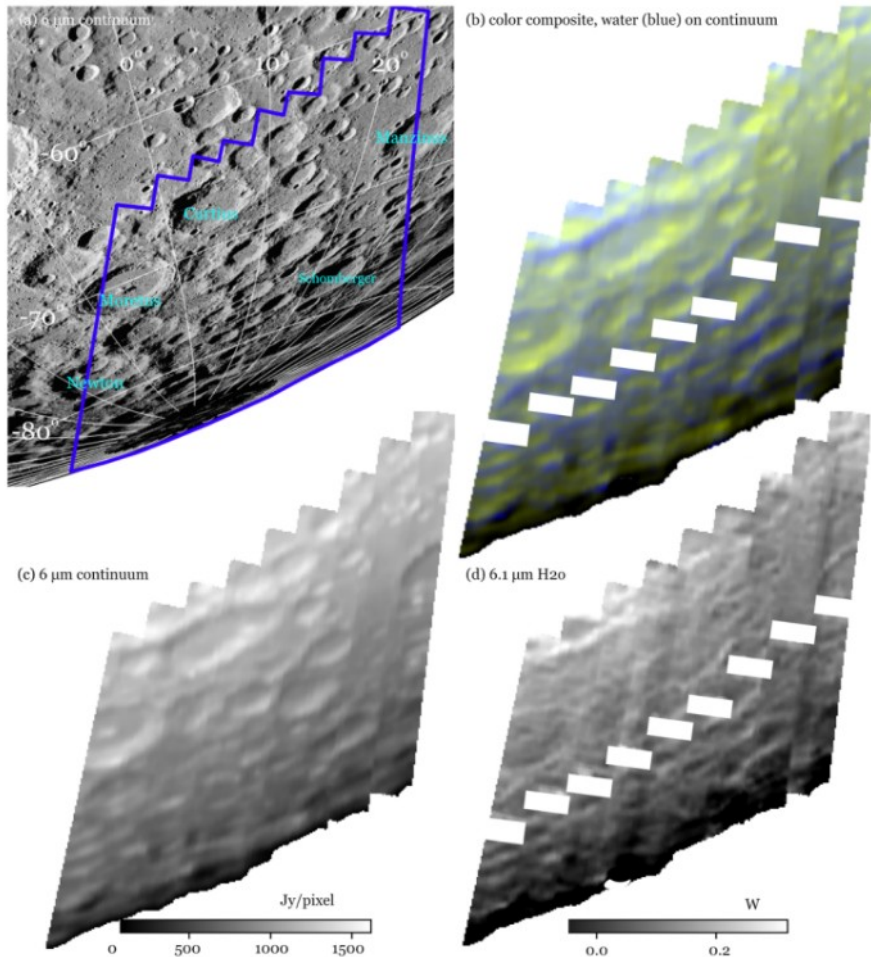


SOFIA-Beobachtungen

- links oben:
Flugplan während des 2015 Neuseeland-Deployments
- links unten:
"central flash" bei verschiedenen Wellenlängen, beobachtet mit den verschiedenen Instrumenten auf SOFIA



wissenschaftliche Highlights: Wasser auf dem Mond



• "Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA", Honniball, C. I., et al., 2021, Nature Astronomy, 5, 121

"Regional Map of Molecular Water at High Southern Latitudes on the Moon Using 6 μm Data From the Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy", Honniball, C. I., et al., 2022, GeoRL, 4997786H

"The Distribution of Molecular Water in the Lunar South Polar Region Based upon 6 μm Spectroscopic Imaging", Reach, William T., et al., 2023, Planetary Science Journal, , 4

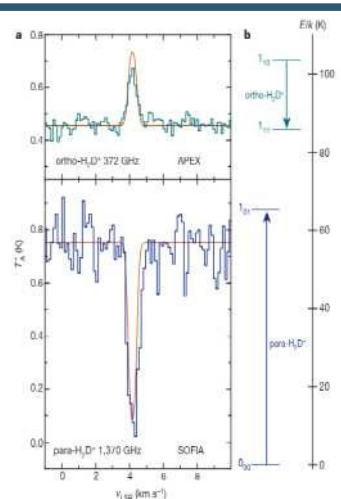
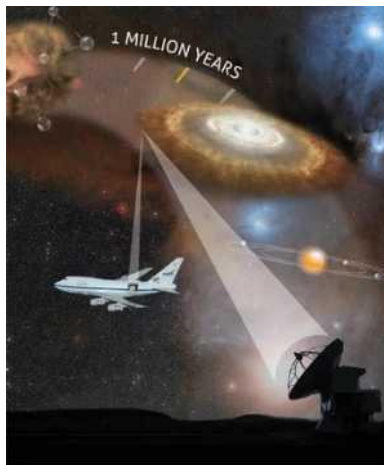
nützliche Daten für NASA Artemis-Program
(leider mit der Beendigung von SOFIA obsolet)

FORCAST-Beobachtungen

- a) links oben:
optische Aufnahme (LRO) des Mondes bei ähnlicher Illumination wie am Tag der SOFIA-Beobachtung;
blauer Rahmen: beobachtetes Feld
- b) rechts oben:
grün: 6 μm Kontinuum: Wärmestrahlung des Mondes
blau: 6.1 μm Intensität der Wasser-Emissions-Bande
- c) links unten:
Grauskala der Kontinuums-Emission
- d) rechts unten:
Grauskala der Wasser-Emission

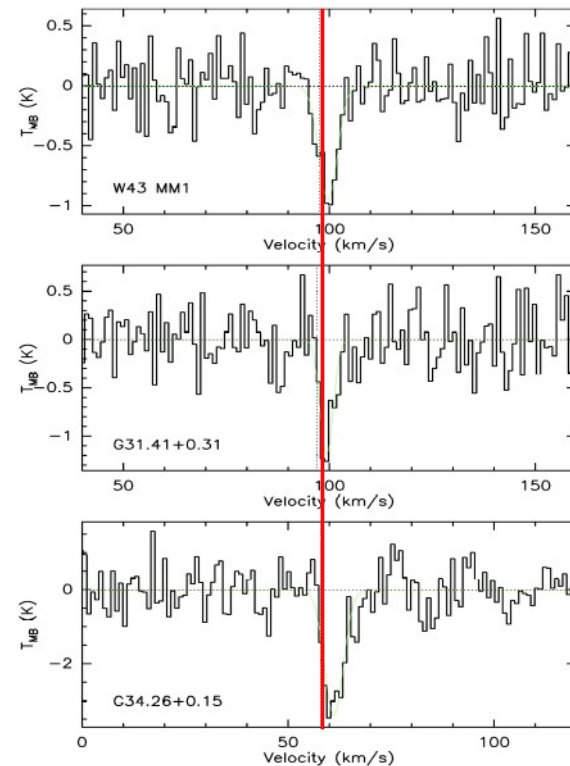
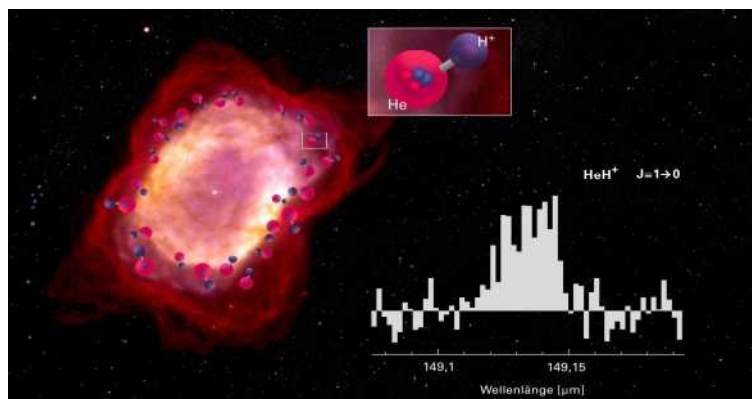


wissenschaftliche Highlights: interstellare Chemie



Das Verhältnis von ortho- (oben; APEX) und para- (unten; SOFIA) H_2D^+ ändert sich durch Spin-Flip-Übergänge über Millionen von Jahren und erlaubt so die Bestimmung des Alters der protostellaren Wolke (Brünken et al., 2014, Nature 516, 219)

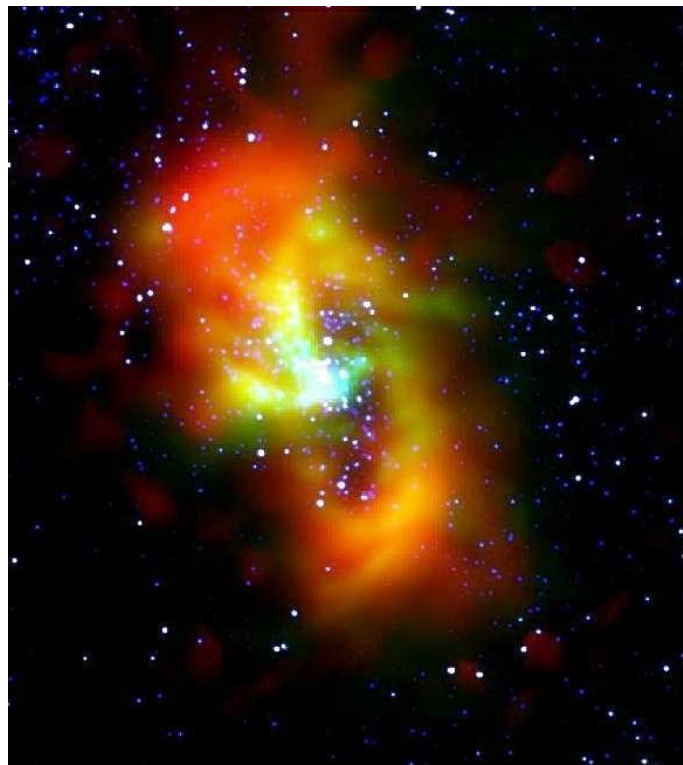
HeH^+ war mutmaßlich das erste Molekül im Weltall nach dem Urknall. Es wurde mit SOFIA erstmals im Weltall nachgewiesen, in einem sog. planetaren Nebel (Güsten et al., 2019, Nature 568, 357)



FIR-Absorptions-Spektren von Ammoniak in den Hüllen eingebetteter Protosterne: die systematische Rotverschiebung der Linie gegenüber der systemischen Geschwindigkeit belegt den Kollaps der Hülle (Wyrowski et al., 2012, A&A 542, L15)



wissenschaftliche Highlights: die zirkum-nukleare Scheibe im Zentrum der Milchstraße



Staub-Kontinuum (grün: FORCAST; Lau et al., 2013, ApJ, 775, 37) und Spektrallinie von neutralem Sauerstoff (rot: FIFI-LS; Iserlohe et al., 2019/11, ApJ, 885, 169)



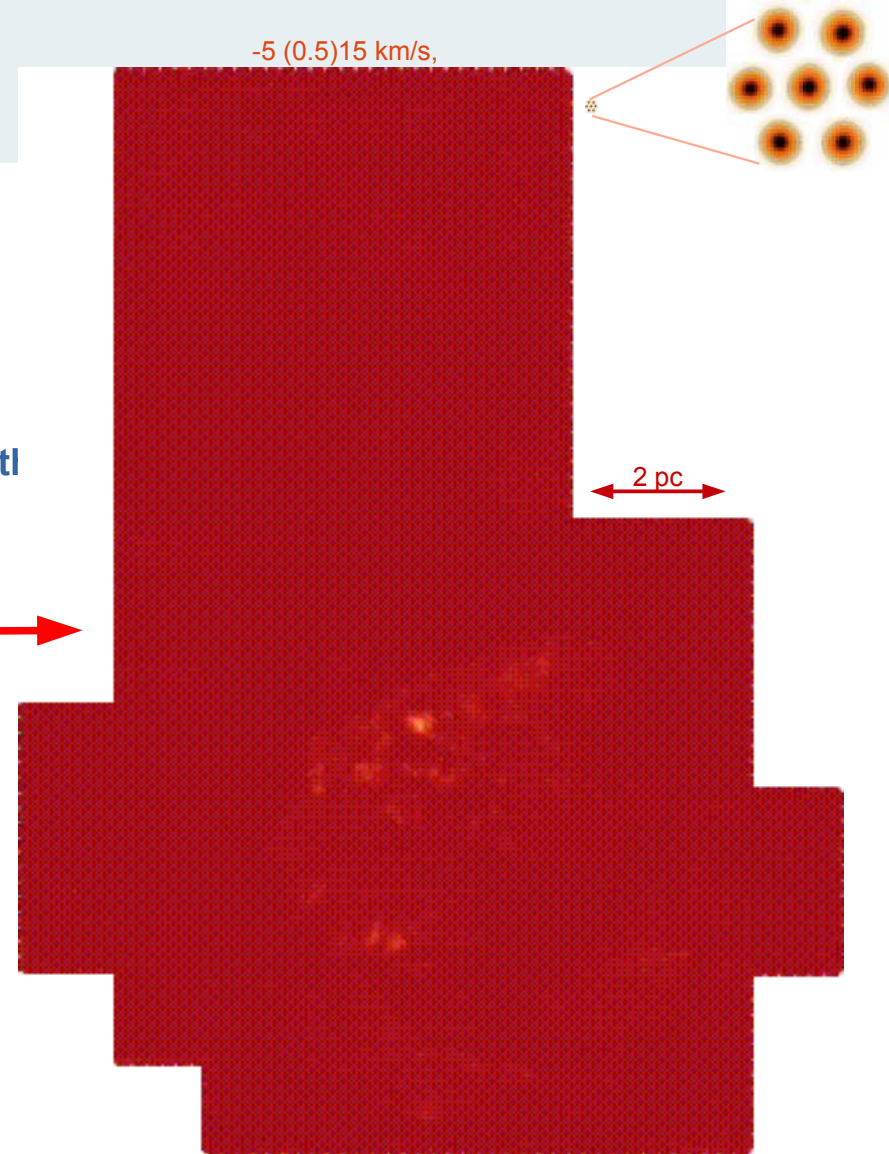
HAWC+ misst die spirale Struktur des Magnetfelds der zirkum-nuklearen Scheibe. Diese behindert den Materie-Einfall auf das zentrale schwarze Loch (Guerra, Schmelz et al., in prep.; see also Askaya & Hoang, 2023, MNRAS 522, 4196)

wissenschaftliche Highlights: Geschwindigkeits-aufgelöste Beobachtungen mit upGREAT/SOFIA in der [CII]-Feinstrukturlinie

einzigartiger Zugang zur Dynamik der
Stern-bildenden Wolken

SOFIA large impact proposals (cycle-4/5/6)
alle mit upGREAT

- “A complete velocity resolved 3-D [CII] map of the M51 grand-design spiral galaxy”
(PIs: Pineda/Stutzki; 72 hrs; obs: 2016-2019)
- “The large scale [CII] emission from the Orion molecular cloud”
(PI: Tielens; 35 hrs; obs: 2017)
- “Dense Neutral Gas in the Galaxy's Central Molecular Zone”
(PIs: Harris/Güsten; 45 hrs; obs: 2018-2021)
- “30 Dor [CII] survey”
(PI: Tielens; 32 hrs; obs: 2018-2021)
- **SOFIA cycle-7/8: legacy programs**
 - FEEDBACK (Tielens & Schneider):
[CII] maps of 20 massive MW star forming regions



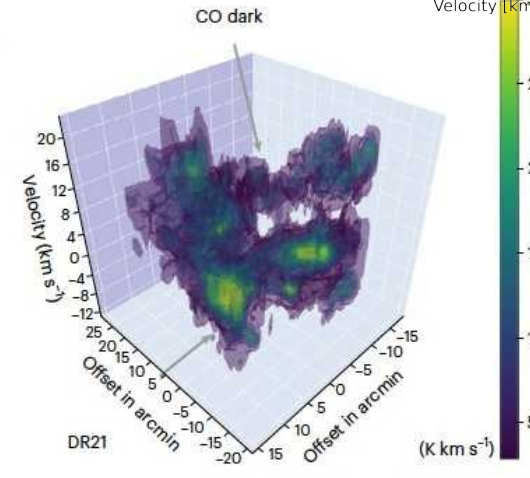
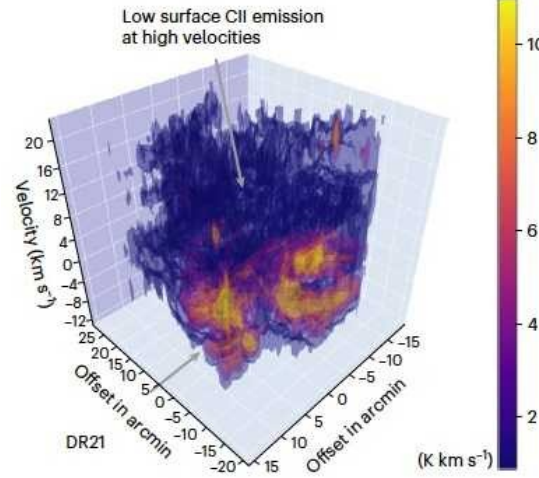
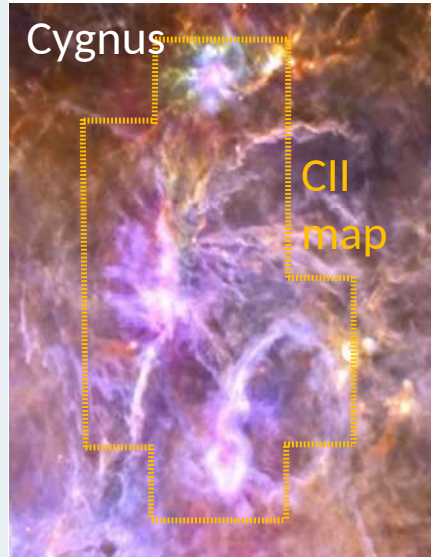
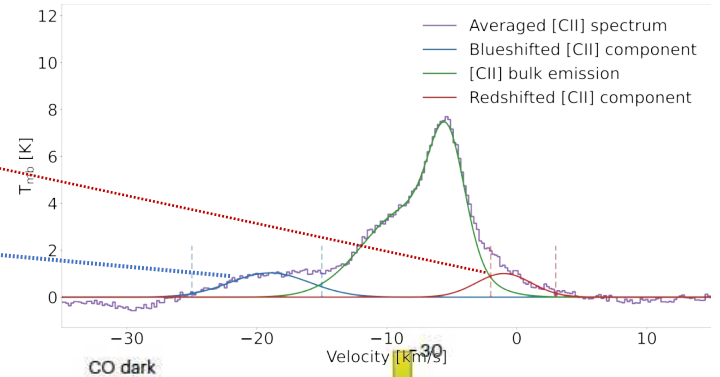
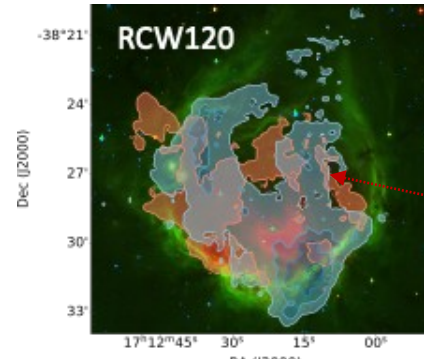


SOFIA legacy program FEEDBACK (PIs N. Schneider (I. Physik, Köln) + A. Tielens (Univ. Maryland/Leiden))

Beobachtungen von 11 galaktischen Sternentstehungsregionen in den Linien von ionisiertem Kohlenstoff [CII] 158 μm

→ bis jetzt (Nov `24: 11 Veröffentlichungen, 3 in Vorbereitung

Entdeckung von schnellen ($>10 \text{ km/s}$) expandierenden Schalen in CII, die durch **Sternwinde** getrieben werden. (Luisi et al., 2021, Science Advances, 9 Pabst et al. 2020, A&A 639, 2)



Molekülwolken bilden sich schnell (1 Myr) durch die Interaktion von **atomaren Flüssen** die man auch in CII sieht. (Schneider et al. 2023, Nature Astronomy 7)

atomic flows (CII, HI)



molecular clouds (CO, H₂)



Mission accomplished (?)

- **SOFIA hatte**
 - › 108 Flüge in basic/early science (inklusive Observatorium-Testflüge)
 - › 813 Flüge in den 9 Jahren Science Operation (inklusive Observatorium/Instrument-Testflüge)
- bisher gut 360 referierte Publikationen
- davon 12 in Nature

- **größte wissenschaftliche Erfolge dank der weiterentwickelten Instrumenten**

- **vorzeitiger Shutdown aus NASA/DLR programmatischen Gründen passierte zu einem Zeitpunkt stabiler wissenschaftlicher Produktivität**
 - mit einem koordinierten und langsamen ramp-down wären sicher noch weitere Highlights dazugekommen...
 - ein science peer review wäre fair gewesen...
 - » hier nicht abgedeckt
 - » EXES Ergebnisse: Wasser-Isotope auf Mars, Chemie und Anregung in proto-stellaren Scheiben
 - » FIFI-LS: extragalaktische Feinstrukturlinien, Galaxienentwicklung
 - » GREAT: [¹³CII], optische Tiefe der [CII]-Emission
 - » HYGAL: Hydride im diffusen interstellaren Medium als Grundlage der insterstellaren Chemie
 - » ...
 - » siehe auch:

Zinnecker, H. und Krabbe, A., „The Future of Far-Infrared Astronomy beyond SOFIA“, Proceedings of the 7th Chile-Cologne-Bonn Symposium, 2023, p. 341 (Liste der Science Highlights im Anhang)