

SPIRou @ CFHT

Exploring New Worlds Beyond the Solar System



JF Donati + the SPIRou engineering & science teams

SPIRou

Main Science Goals



planetary systems around nearby M dwarfs

detect & characterize planetary systems & habitability
model & filter activity to optimize detection
synergy w/ TESS, JWST, PLATO, CHEOPS, ELT...

magnetized star & planet formation

magnetic topologies of young stars & discs
young close-in giant planets / hot Jupiters
synergy w/ ALMA, SPHERE, JWST

many more science programmes

eg brown dwarfs, Solar System, ISM, galactic archeology

SPIRou Legacy Survey


300 CFHT nights over 4 years on two main topics

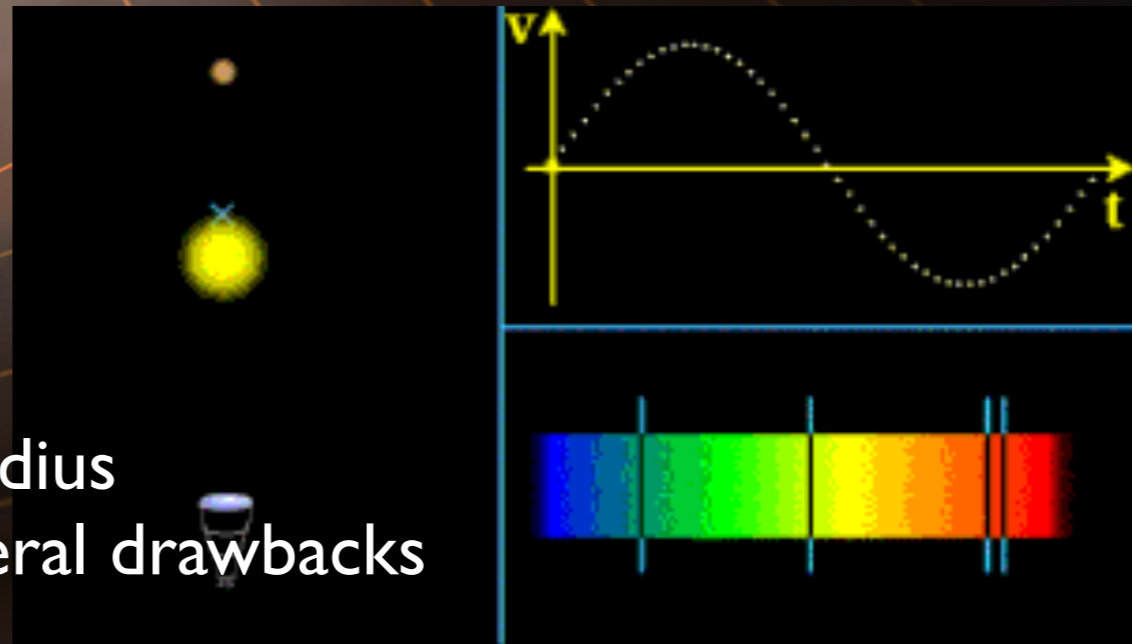


SPIRou

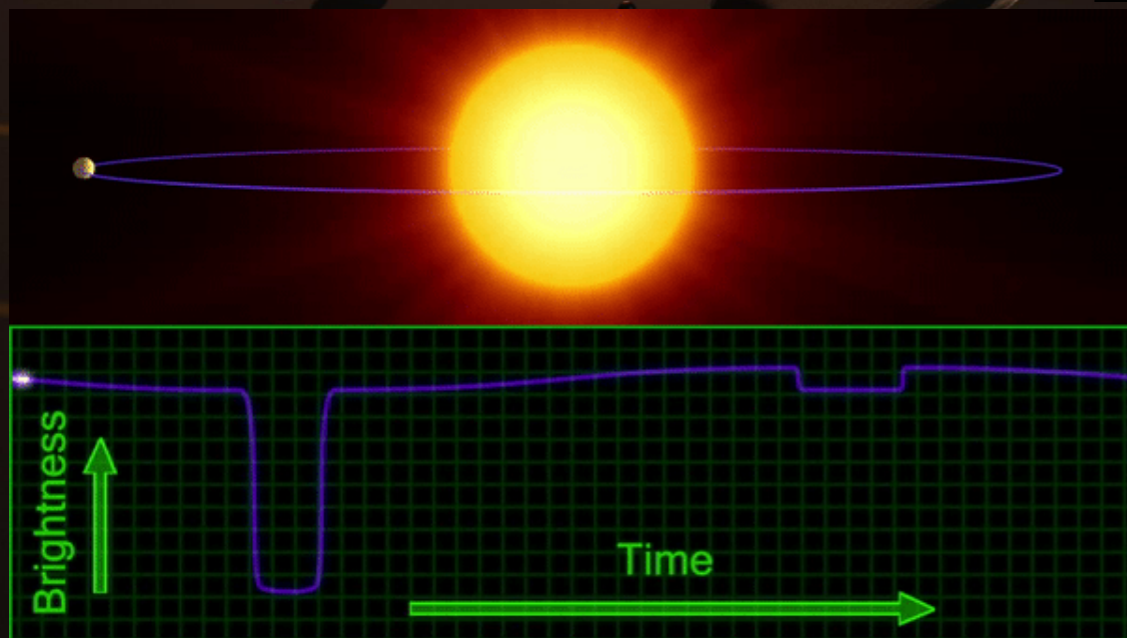
Detecting exoplanets



 **velocimetry**
reflex motion > planet mass



 **photometry**
planetary transits > planet radius
lots of detection despite several drawbacks

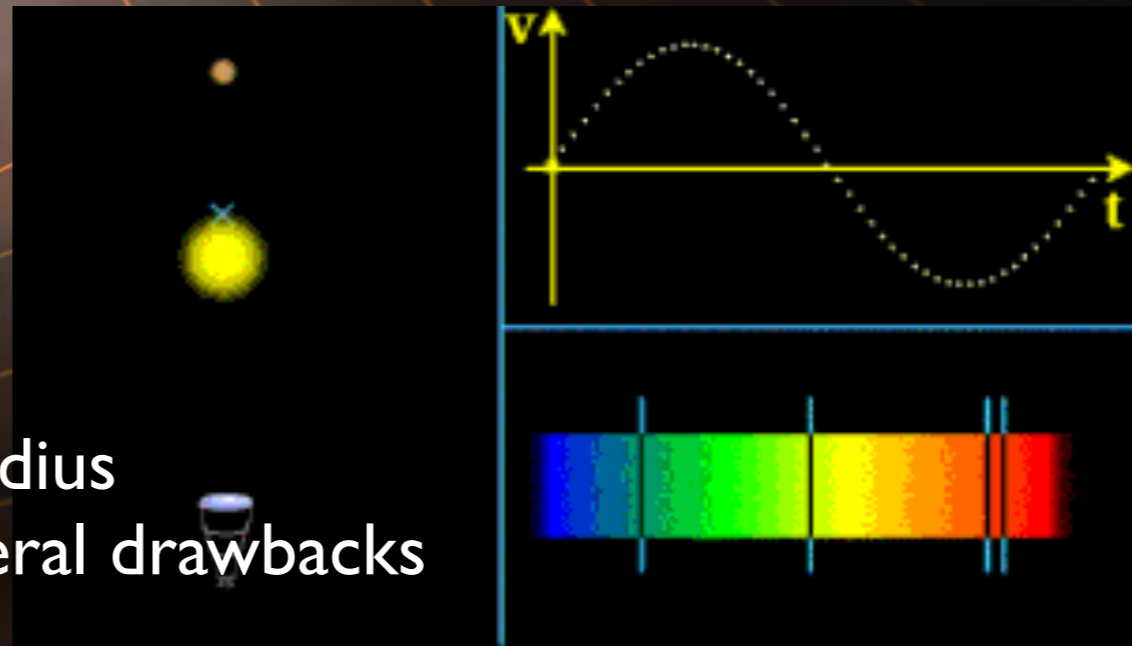


SPIRou

Detecting exoplanets

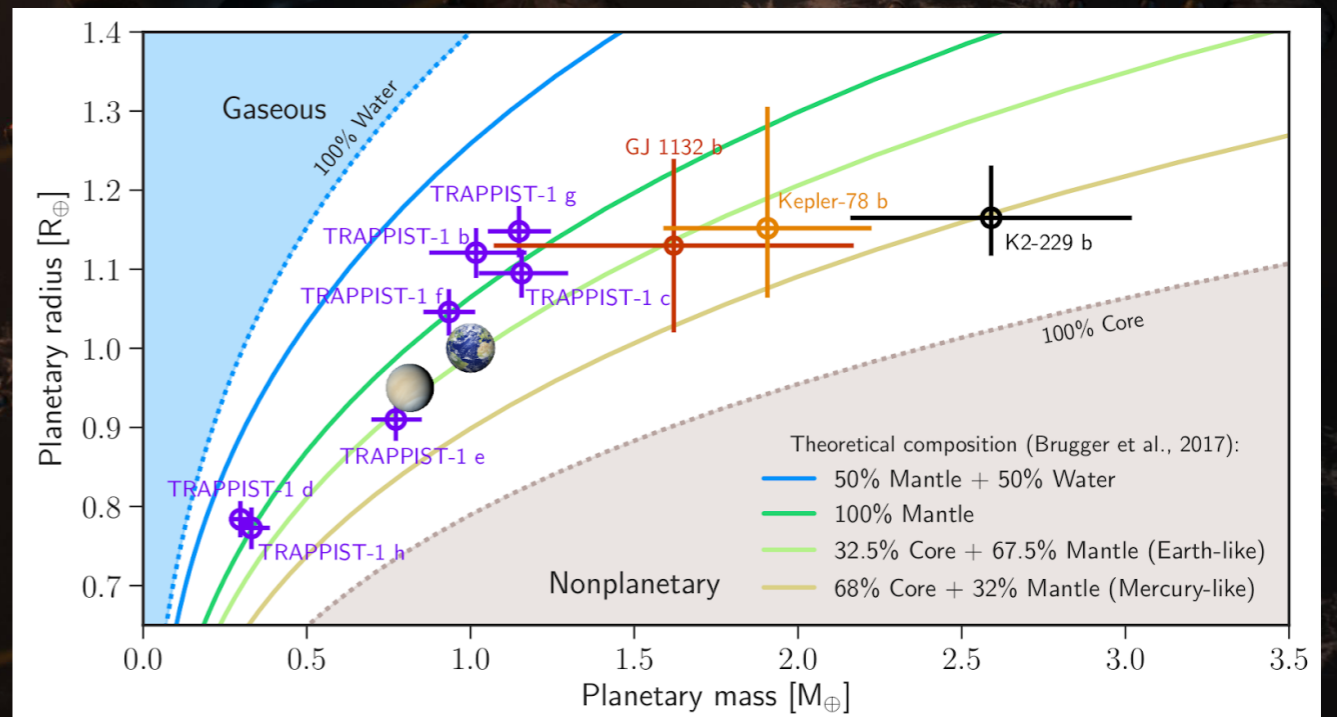


velocimetry
reflex motion > planet mass



photometry
planetary transits > planet radius
lots of detection despite several drawbacks

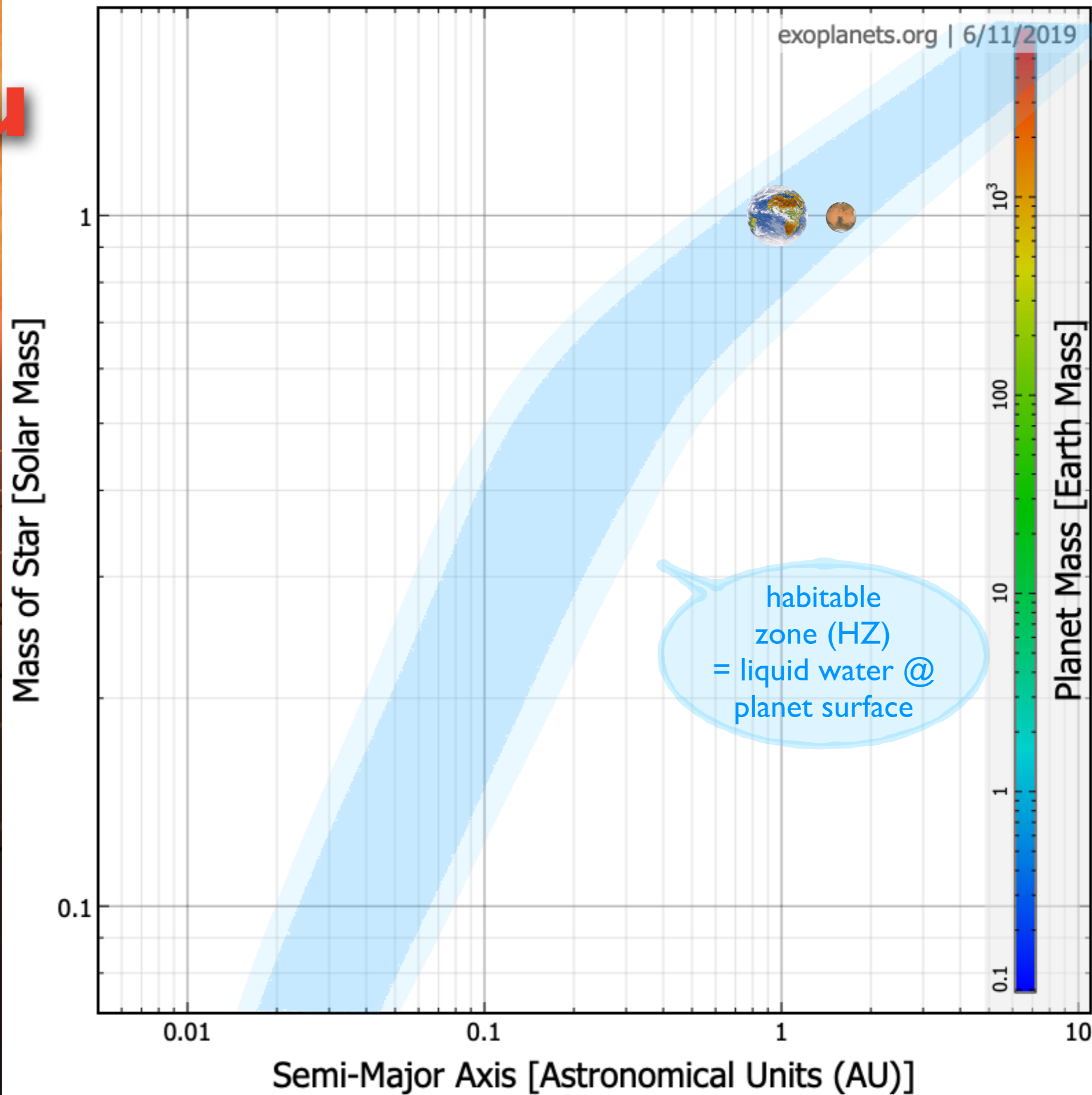
both
planet density & structure



SPIRou

Sun

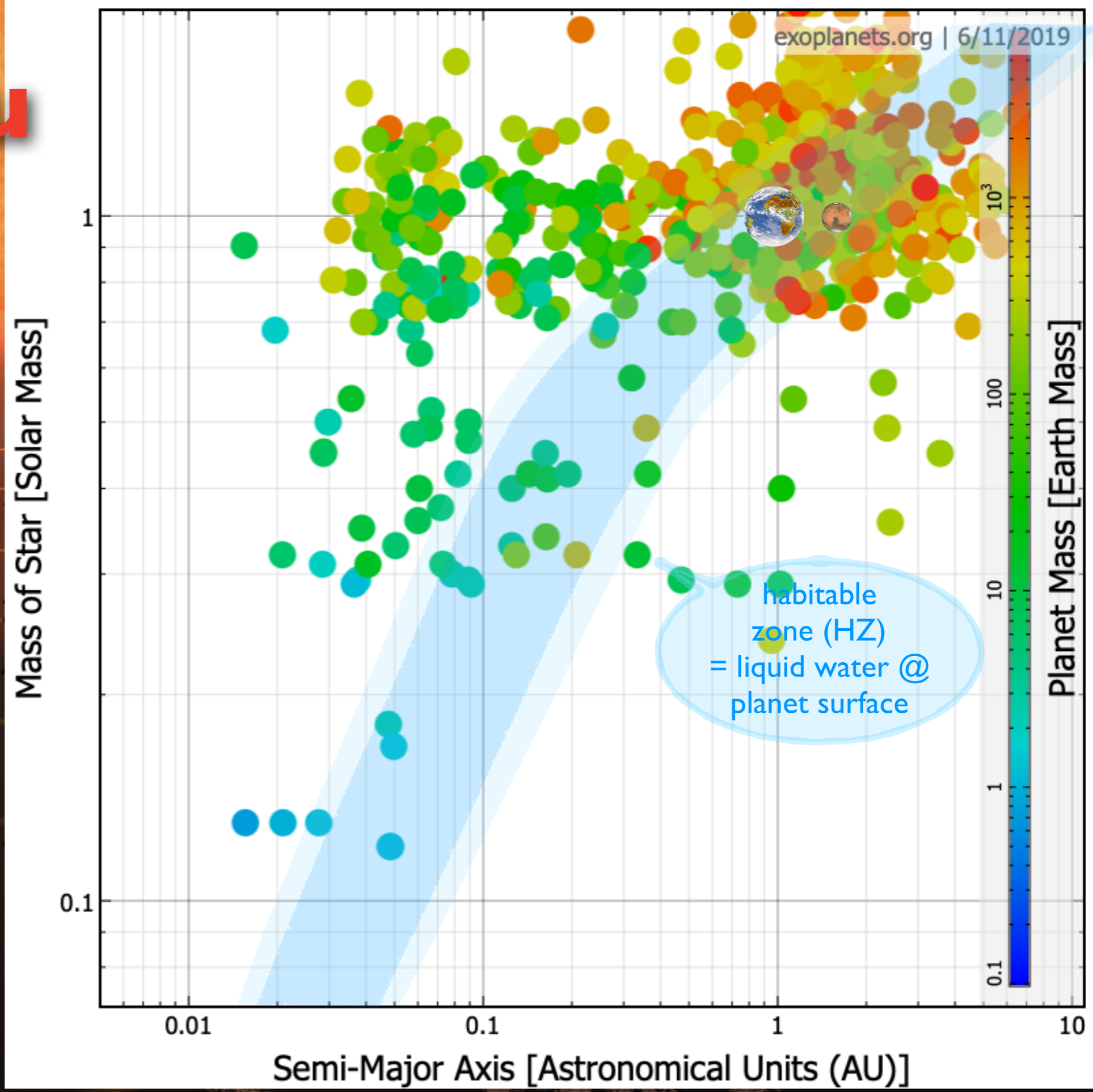
M
dwarfs



SPIRou

Sun

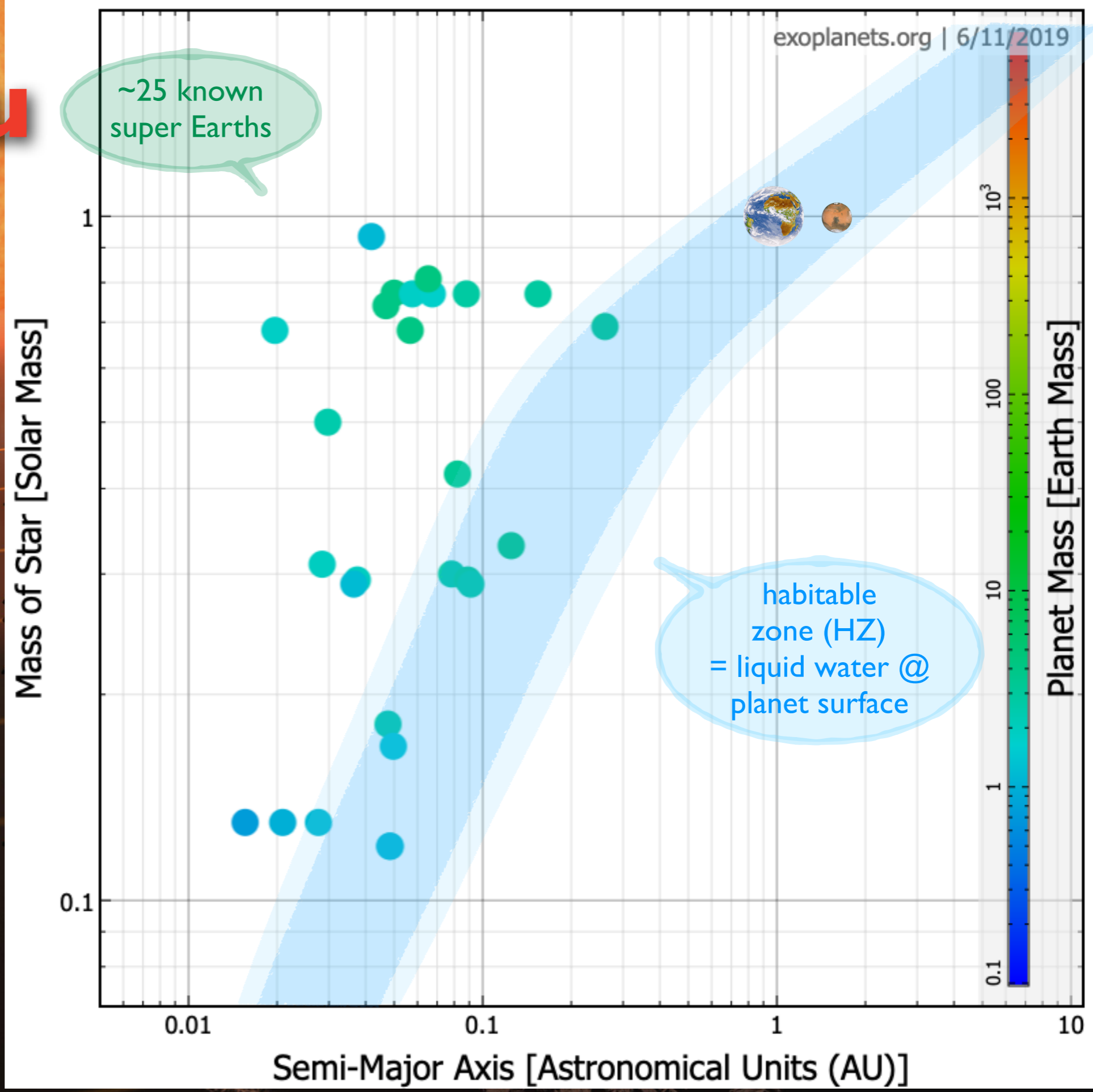
M
dwarfs



SPIRou

Sun

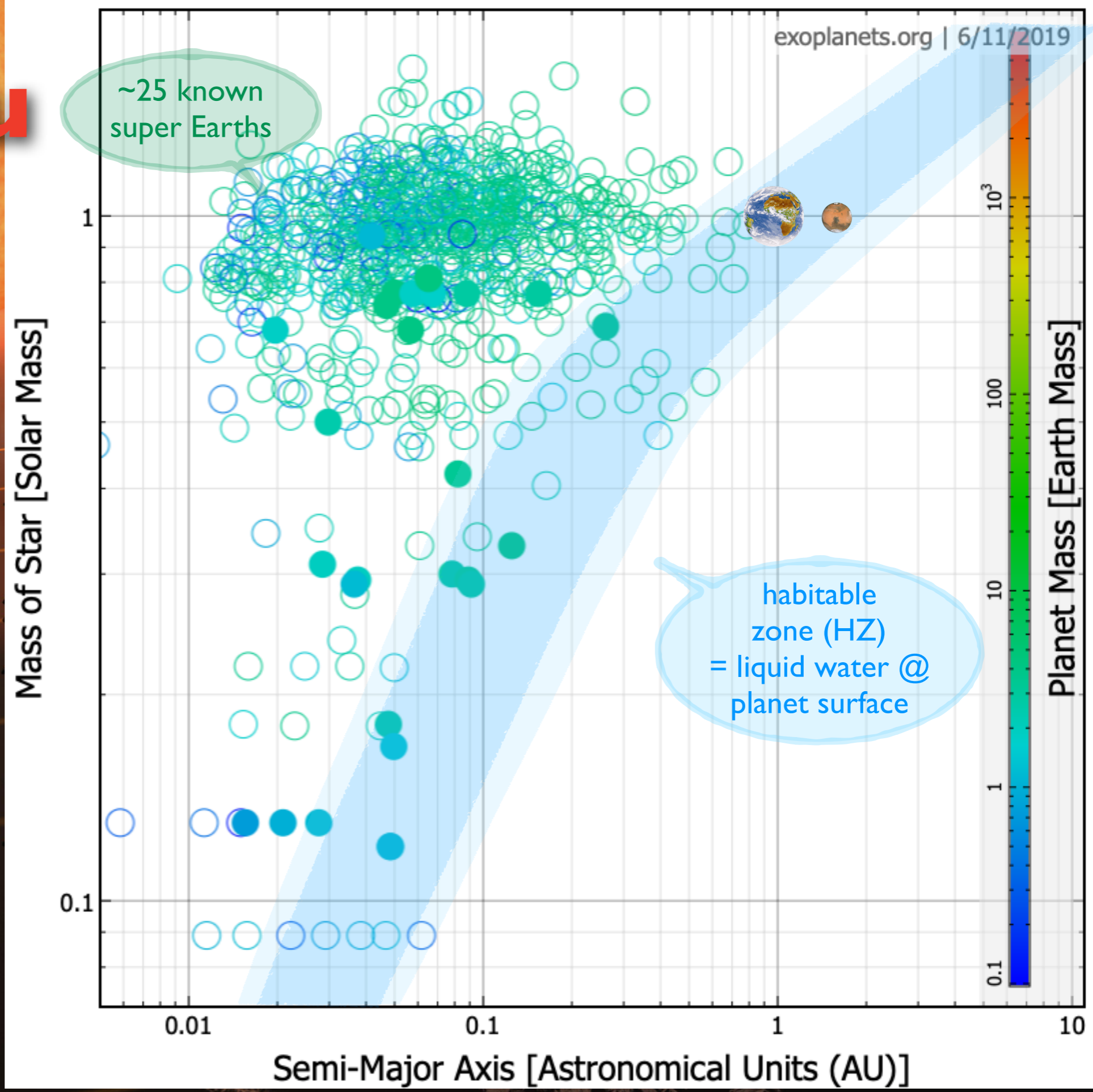
M
dwarfs



SPIRou

Sun

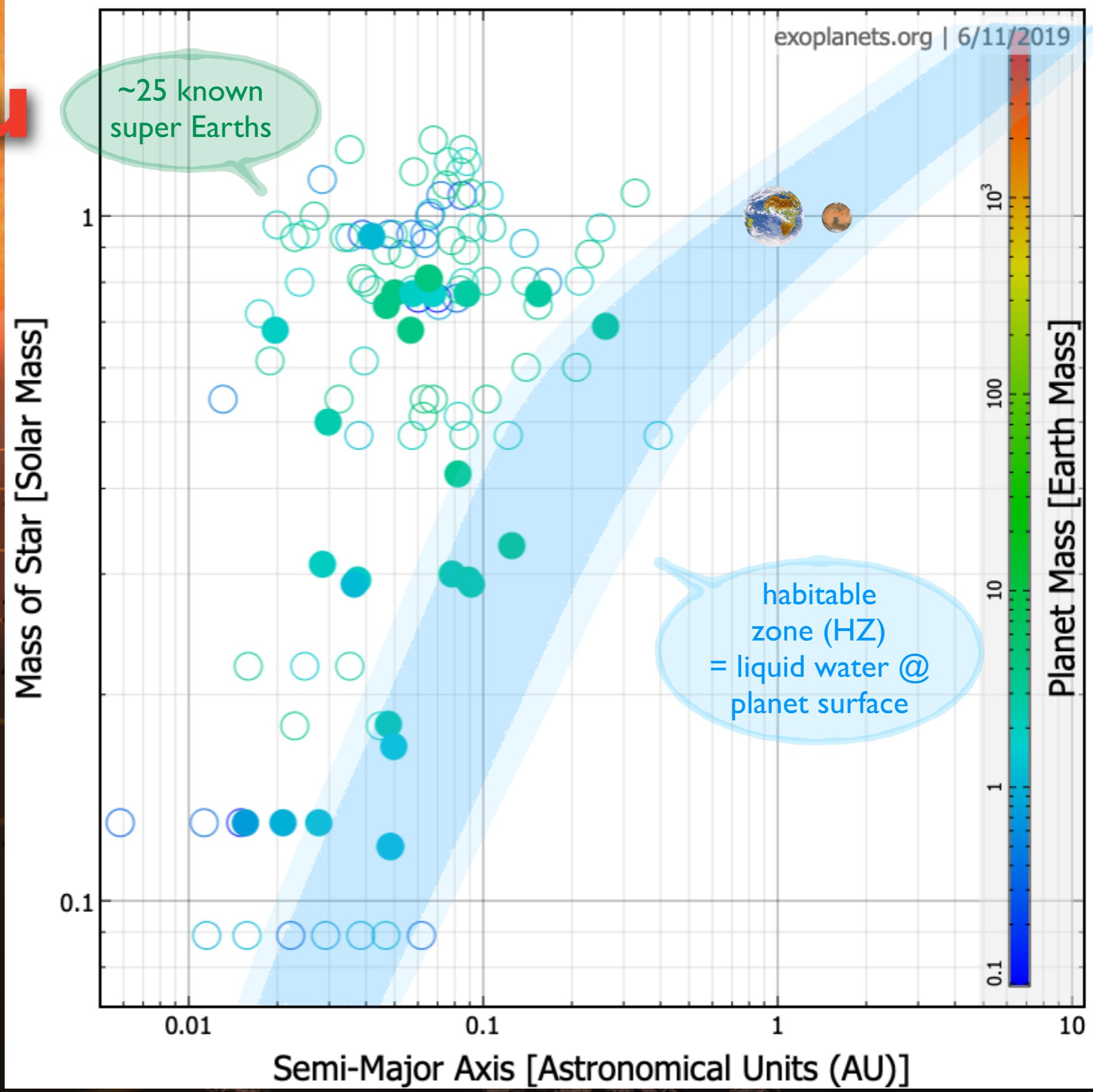
M
dwarfs



SPIRou

Sun

M
dwarfs



SPIRou

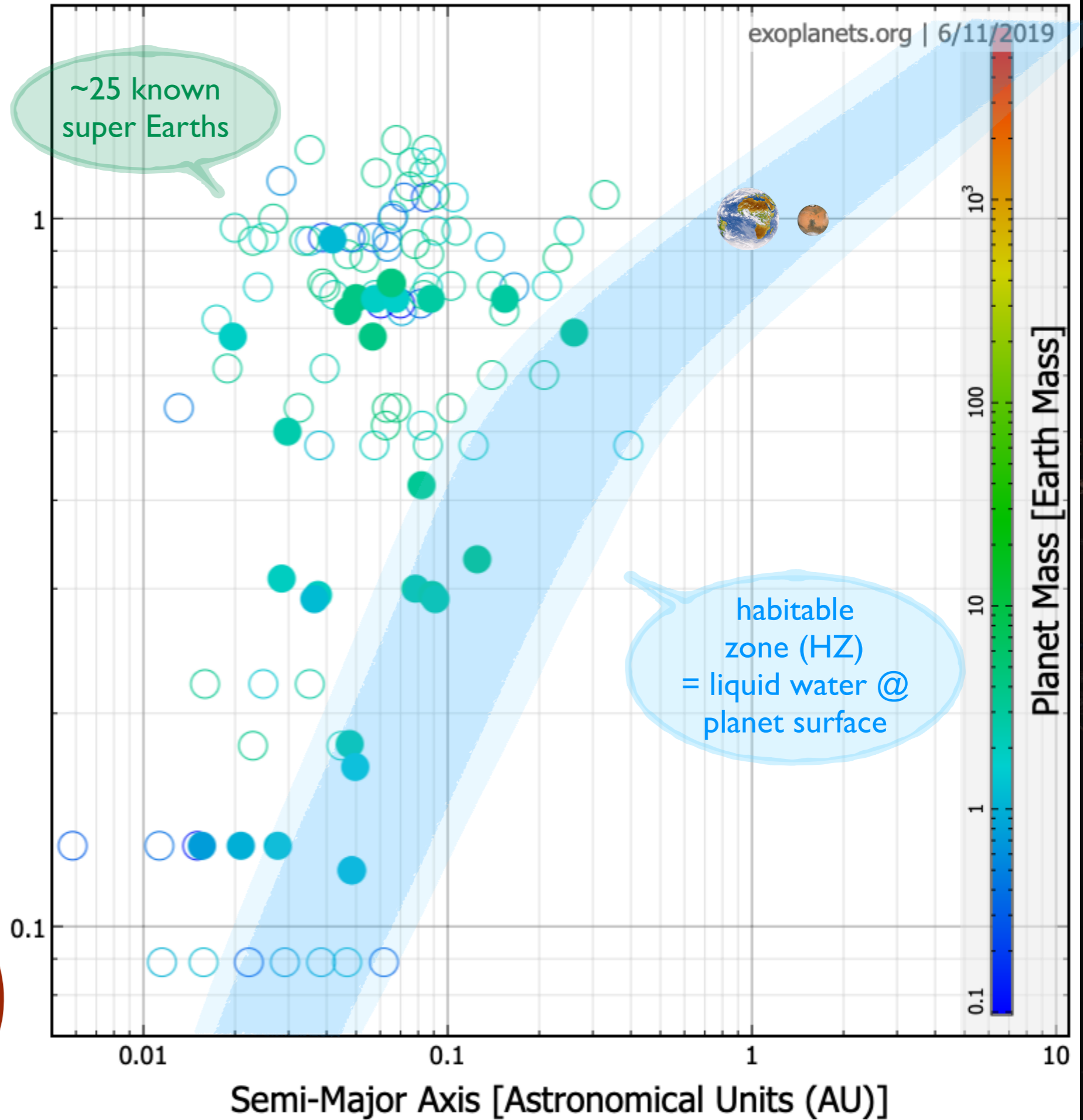
Sun

M
dwarfs

Trappist I



Mass of Star [Solar Mass]



SPIROU

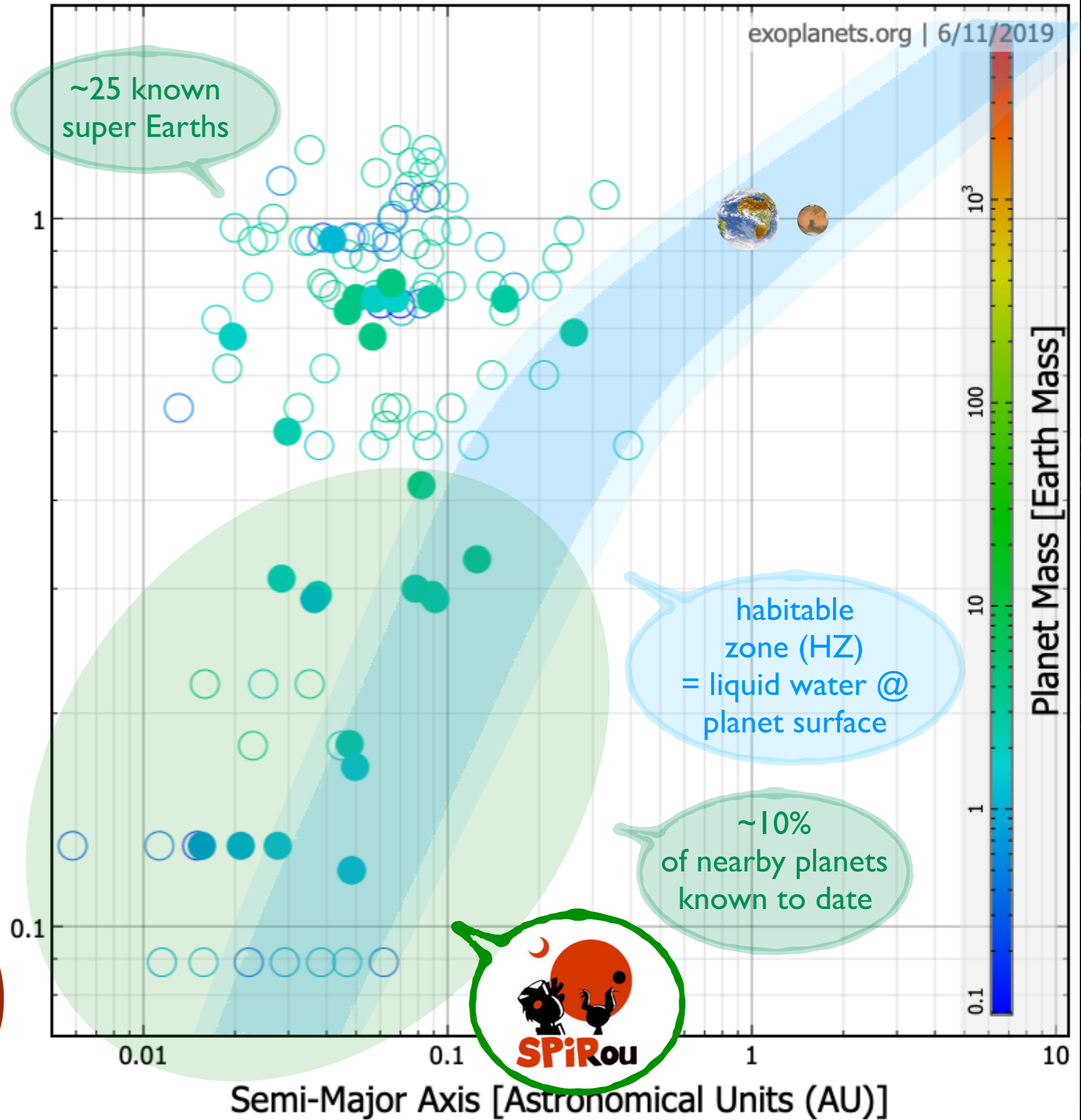
Sun

M
dwarfs

Trappist I



Mass of Star [Solar Mass]



SPIRou

Planetary Systems of nearby M Dwarfs



why M dwarfs?

our nearest neighbors, eg Proxima Cen
host 2.2+ planets per star, of which 0.5+ in the Habitable Zone (HZ)
compact HZs \leftrightarrow HZ planets easier to detect
need nIR velocimeter to maximize efficiency \leftrightarrow SPIRou
magnetic activity & flares \leftrightarrow spectropolarimetry

SPIRou

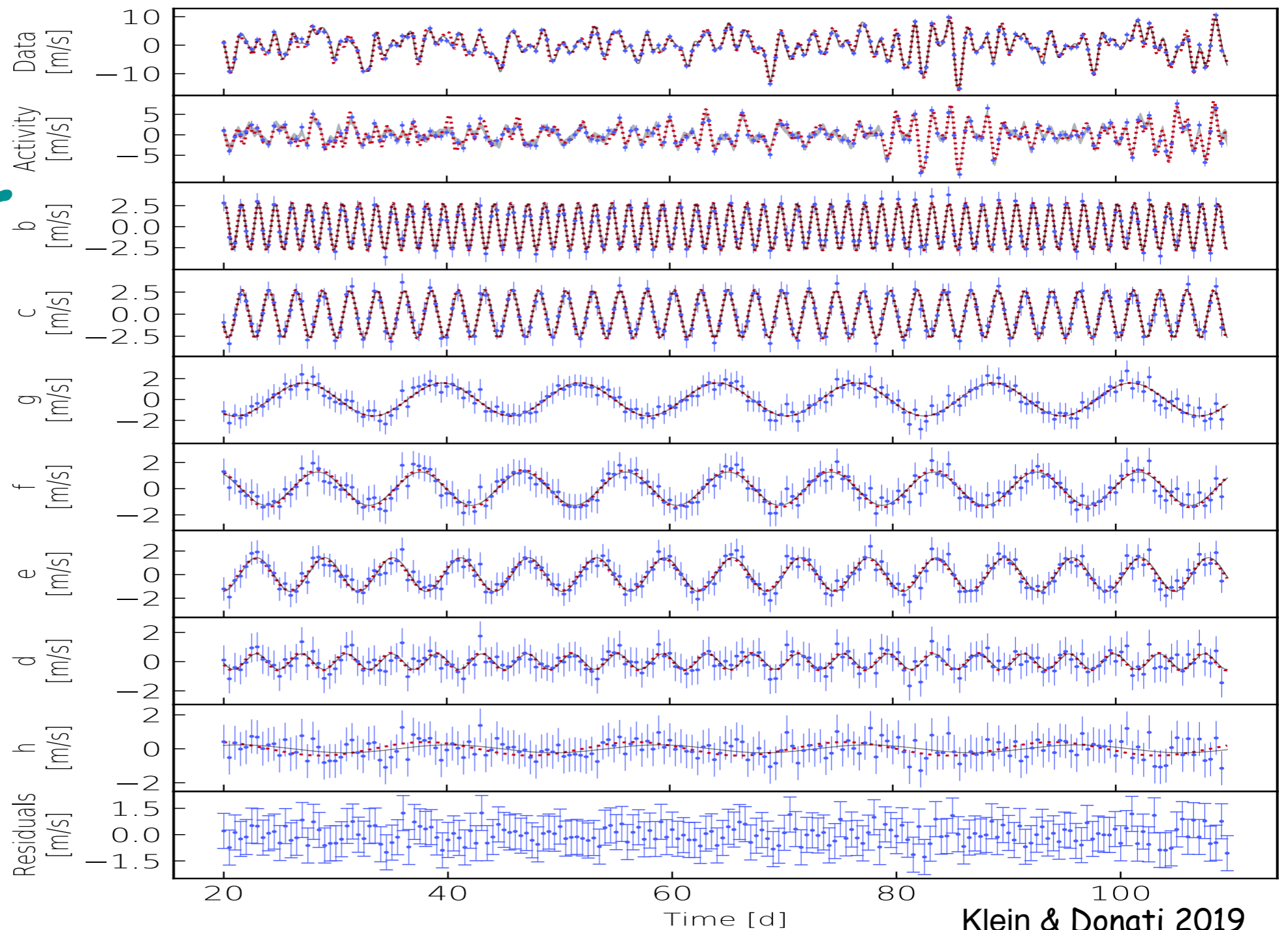
Planetary Systems of nearby M Dwarfs



Trappist-1

dominant activity

~5 planets revealed in filtered RVs



SPIRou

Planetary Systems of nearby M Dwarfs



👁️ why M dwarfs?

our nearest neighbors, eg Proxima Cen
host 2.2+ planets per star, of which 0.5+ in the Habitable Zone (HZ)
compact HZs ➡ HZ planets easier to detect
need nIR velocimeter to maximize efficiency ➡ SPIRou
magnetic activity & flares ➡ spectropolarimetry

👁️ planet search / PS & transit follow-up / TF

PS: observe ~80 nearby M dwarfs w/ ~200 visits per star

➡ yield ~80 planets, ~25 Earth-mass ones, ~8 in HZ

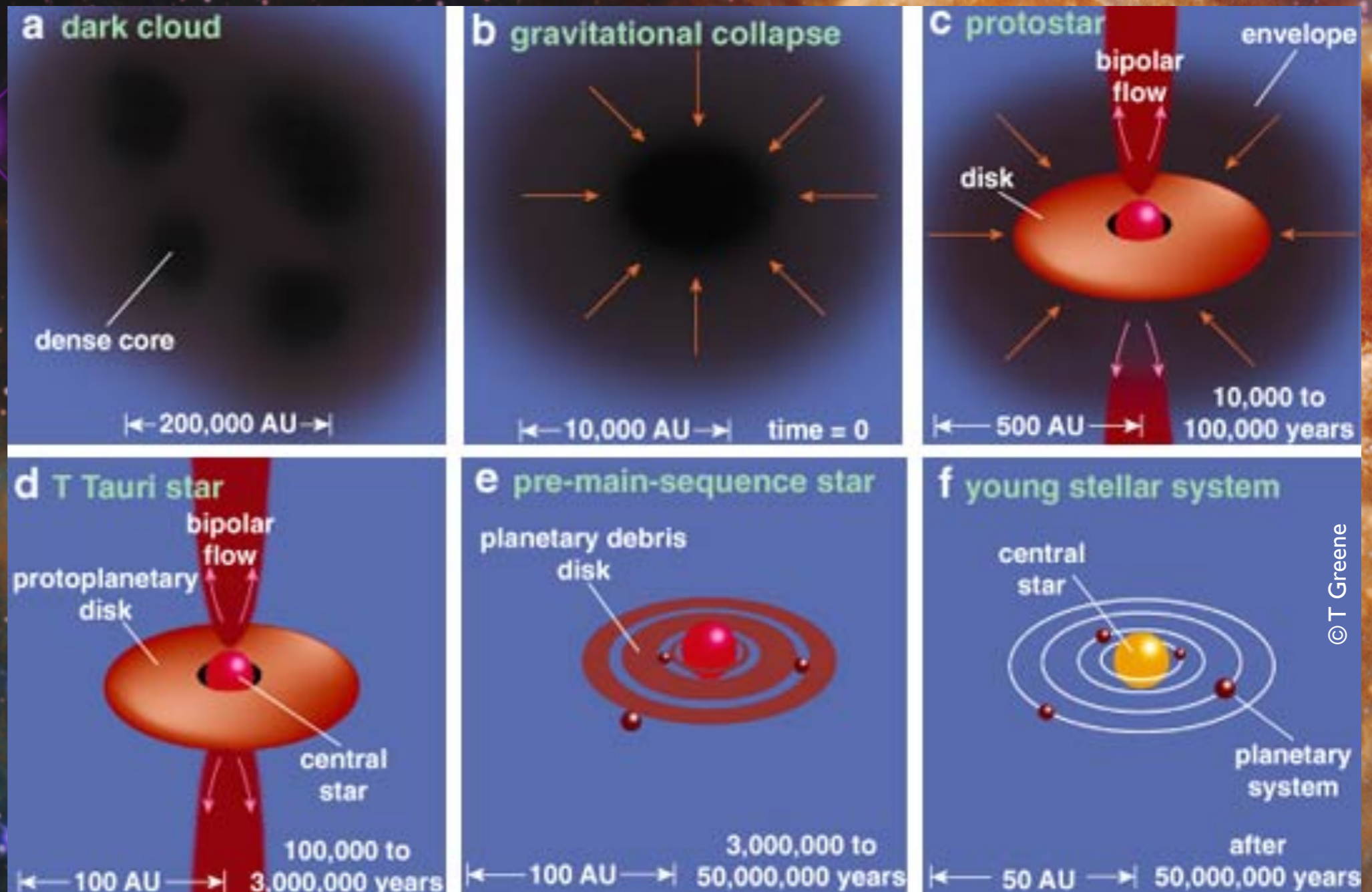
TF: follow ~50 M dwarfs w/ transiting planets (eg TESS)

➡ determine mass & bulk density

➡ characterize atmospheres of close-in giants

SPIRou

Star / Planet Formation

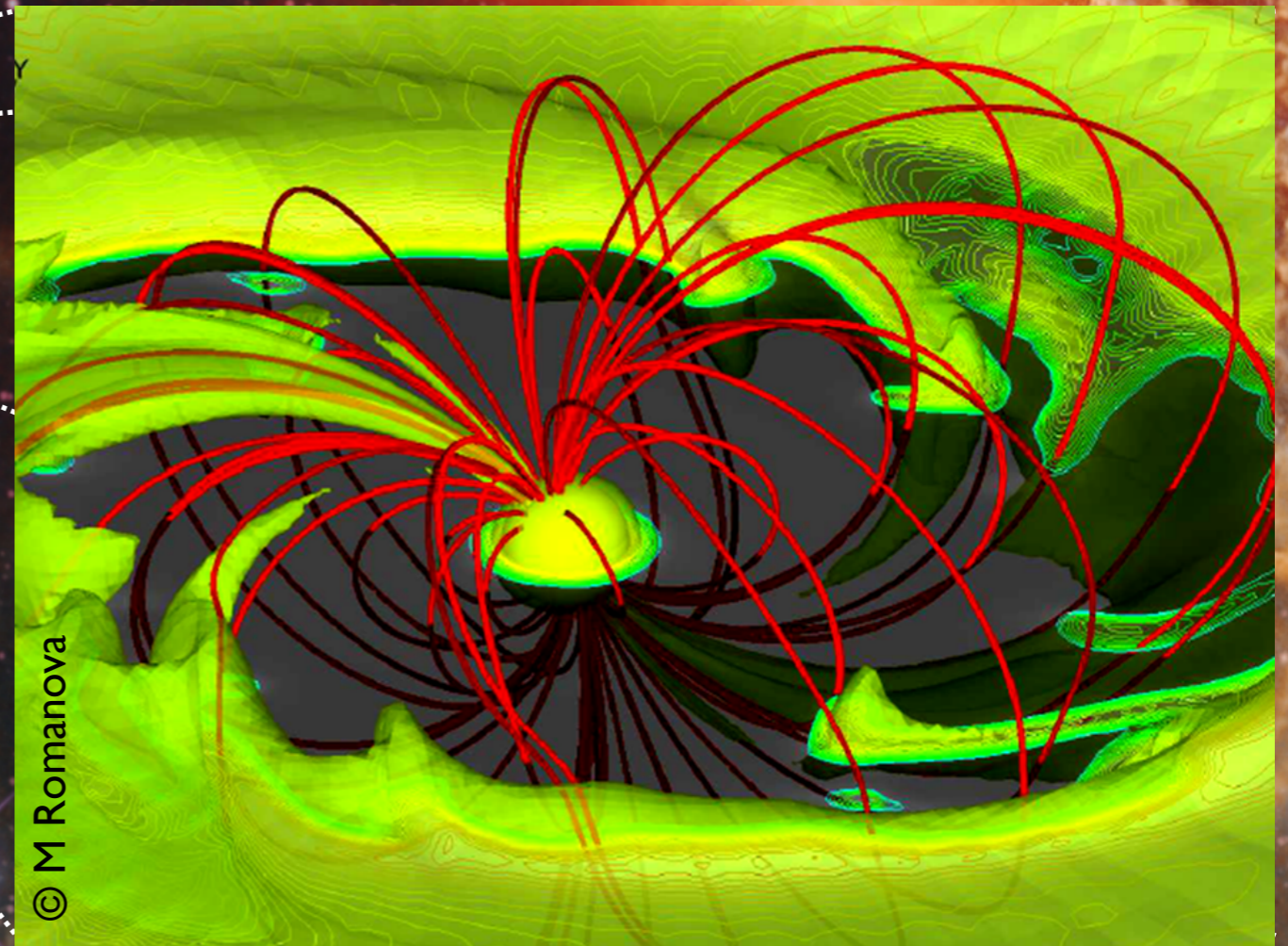
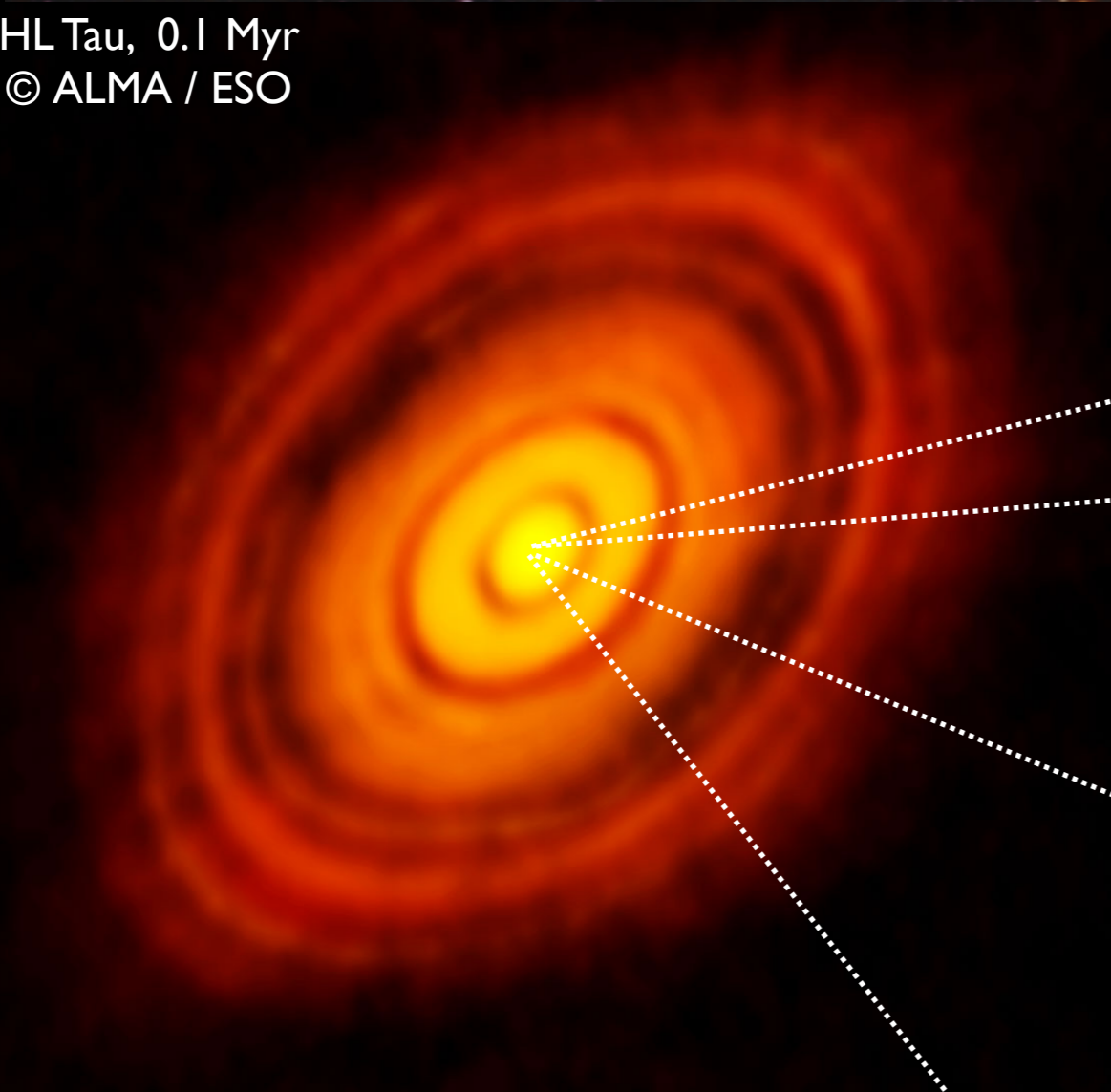


SPIRou

Magnetized Star / Planet Formation



HL Tau, 0.1 Myr
© ALMA / ESO



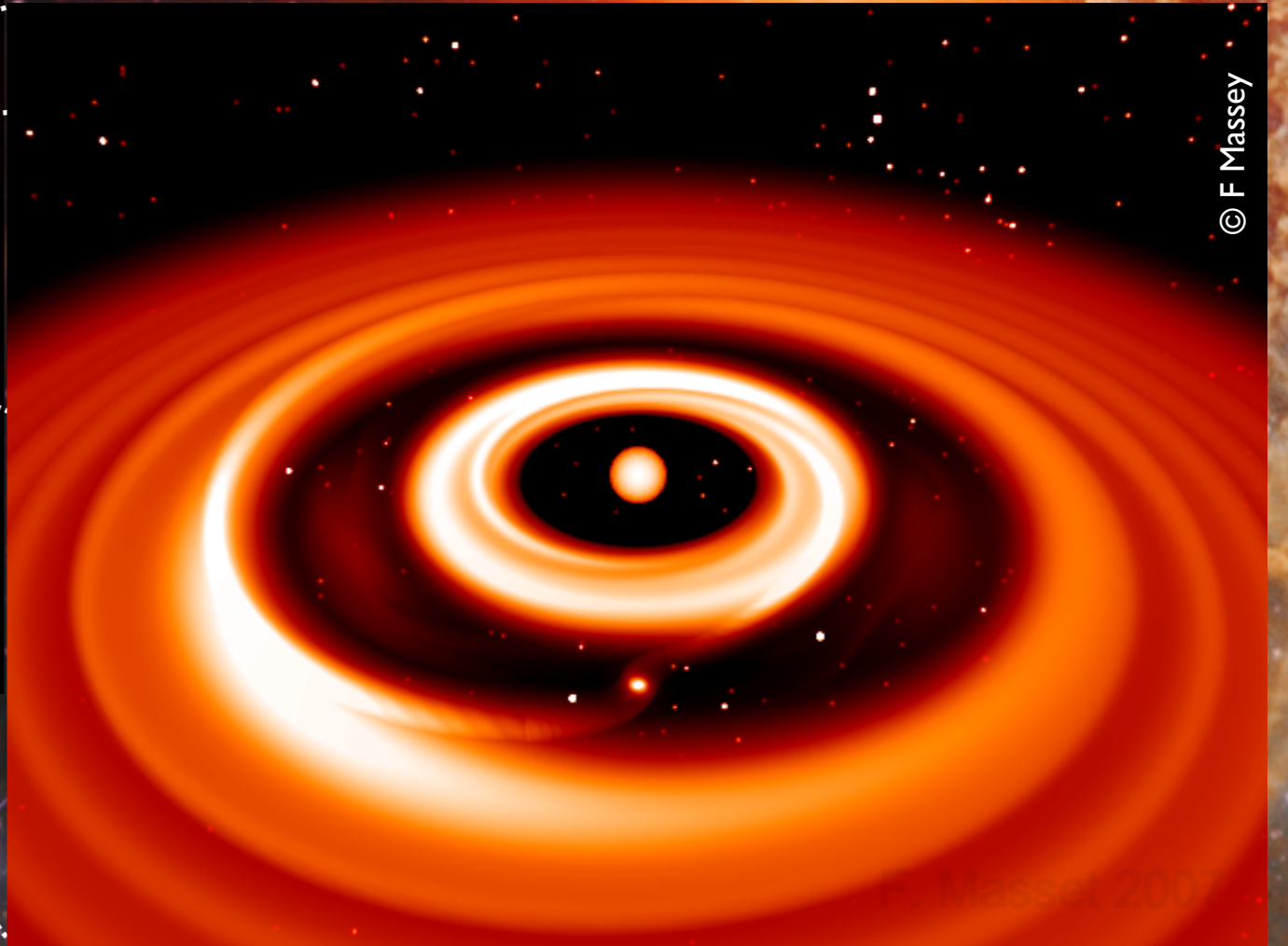
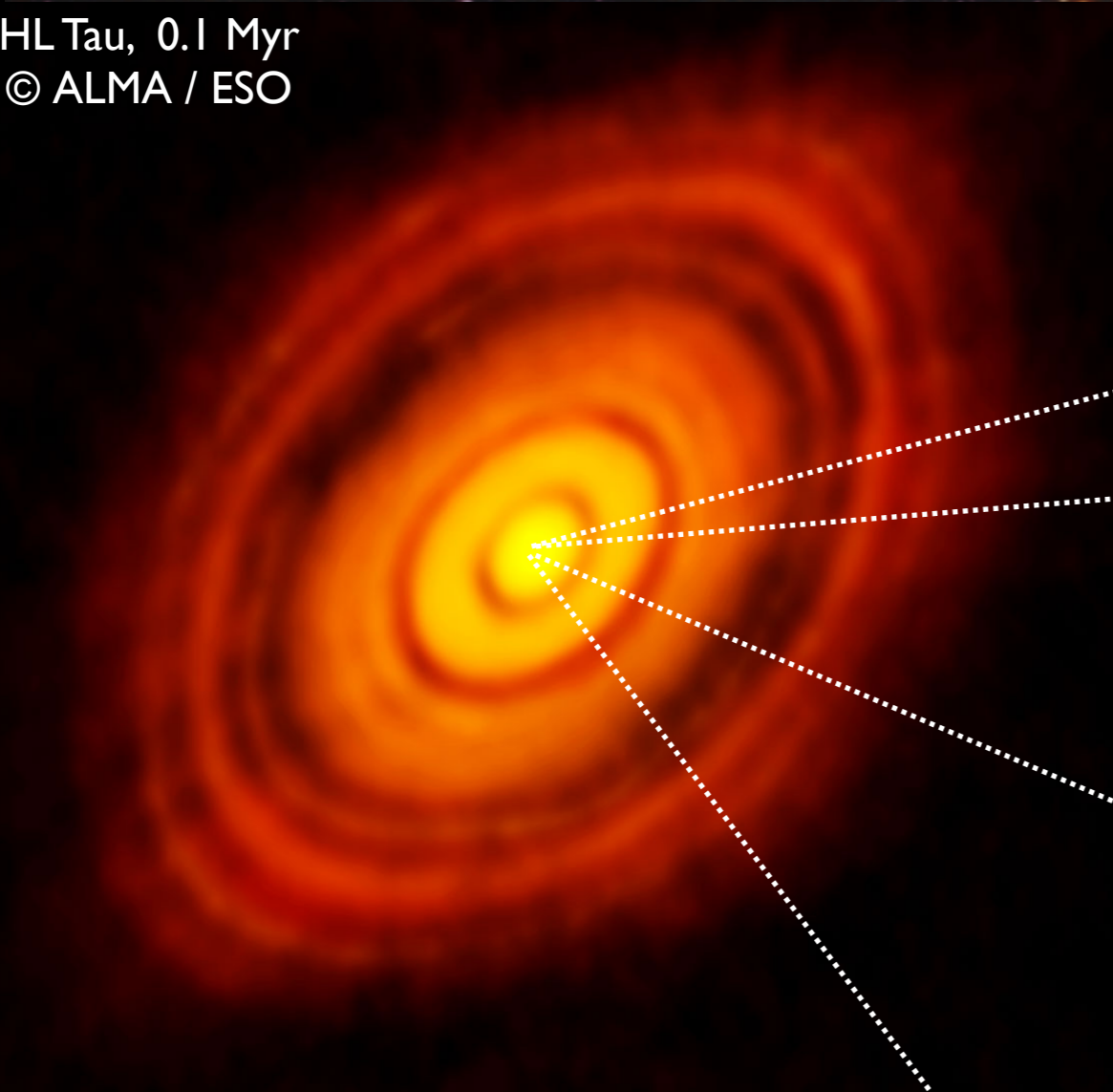
© M Romanova

SPIRou

Magnetized Star / Planet Formation



HL Tau, 0.1 Myr
© ALMA / ESO



SPIRou

Magnetized Star / Planet Formation



magnetic fields of newborn stars & discs

tomographic magnetic imaging of PMS stars

magnetized accretion patterns & star-disc interactions

➤ survey ~100 T Tauri stars & protostars

need nIR spectropolarimeter w/ K band

obvious synergy with ALMA

young close-in giant planets

formation / migration of hot Jupiters

early architecture of planetary systems

filter activity to unveil planet signals

➤ survey ~50 disc-less T Tauri stars

SPIRou

Main Science Requirements



high-resolution nIR spectroscopy

spectral domain 0.98-2.35 μm (YJHK)

spectral resolving power 70k

peak SNR ~ 100 in 1 hr on M dwarf w/ $H \sim 11$

thermal noise $<$ stellar flux @ 2.33 μm for $H < 9.5$

precision velocimetry

RV precision ~ 1 m/s rms

spectropolarimetry

circular & linear polarimetry

circular \leftrightarrow linear crosstalk $< 2\%$

SPIRou

Instrument Modules



① **cryogenic high-resolution nIR spectrograph**

cooled down at 75K & stabilized at better than 1mK
échelle spectrograph with dual-pupil fully-dioptic design
H4RG science grade detector

② **Cassegrain module & calibration unit**

achromatic polarimeter w/ ZnSe 1/4-wave Fresnel rhombs,
atmospheric disp corrector (ADC) & image stabilisation unit (ISU)
calibration unit providing light from calibration lamps

③ **fluoride (ZBLAN) fiber link**

purified ZBLAN w/ attenuation < 1 dB/km
octogonal fibers & pupil slicer to feed spectrograph

SPIROU

Instrument Modules



LE LABO

Scénario, Dessin & Couleur
JEAN-YVES DUHO

SPIROU

LE SPECTROPOLARIMÈTRE INFRAROUGE

EN CE MOMENT, IL Y A DES SCIENTIFIQUES QUI SONT EN TRAIN DE CONSTRUIRE UNE MACHINE TRÈS SOPHISTIQUEE...

... QUI VA S'APPELER SPIROU.

C'EST UNE BLAQUE?

PAS DU TOUT.

SPIROU EST LE NOM D'UN APPAREIL DE MESURE DE LA LUMIÈRE: UN SPECTROPOLARIMÈTRE.

INFRAROUGE.

IL VA NOUS SERVIR À OBTENIR DES INFORMATIONS SUR LA NAISSANCE DES ÉTOILES, OU SUR D'AUTRES PLANÈTES QUI SERAIENT SEMBLABLES À LA TERRE, MAIS HORS DU SYSTÈME SOLAIRE.

CET APPAREIL EST COMPOSÉ DE 2 PARTIES: LE POLARIMÈTRE ET LE SPECTROGRAPHE.

Jean-François, Astro-Physicien.

ÇA, C'EST LE POLARIMÈTRE.

GROS COMME UNE MACHINE À LAVER À PEU PRÈS.

C'EST MOI!

UN APPAREIL QUI PERMET D'ANALYSER LES MODES DE VIBRATION DE LA LUMIÈRE DES ÉTOILES...

... CAPTÉE PAR LE TÉLESCOPE.

ON L'ACCROCHE EN-DESSOUS DU TÉLESCOPE,

QUI FONCTIONNE UN PEU COMME UN ENTONNOIR OPTIQUE...

... QUI COLLECTE LA LUMIÈRE ET L'INJECTE DANS L'INSTRUMENT.

COMMENT TOUT SAVOIR SUR LES EXOPLANÈTES, LES NAINES ROUGES, LA NAISSANCE DES ÉTOILES...

GRÂCE À LEUR CODE-BARRE.

SPIROU, LE DERNIER MODÈLE D'ENREGISTREUR CODE-BARRE ASTROPHYSIQUE.

(*) TÉLESCOPE CANADA FRANCE HAWAII

ET VOILÀ LE SPECTROGRAPHE, QUI REÇOIT LA LUMIÈRE PAR FIBRE OPTIQUE.

IL VA LA DÉCOMPOSER EN COULEURS ÉLÉMENTAIRES.

ÇA VA NOUS PERMETTRE DE CONNAÎTRE LA TEMPÉRATURE DES ÉTOILES, LEUR MASSE, LEUR TAILLE, LEUR DISTANCE, MAIS AUSSI LEUR VITESSE PAR RAPPORT À LA TERRE.

TOUT ÇA AVEC SEULEMENT LA LUMIÈRE!

C'EST GRAND.

ET SI CES ÉTOILES ONT DES PLANÈTES AUTOUR D'ELLES, ON POURRA LES DÉTECTER?

OUI, AVEC LEUR VARIATION DE VITESSE.

LE SPECTROGRAPHE EST PLONGÉ DANS UN CRYSTAT, UNE CUVE À LA TEMPÉRATURE DE L'AZOTE LIQUIDE.

-200°!

ON A BESOIN DE CETTE TEMPÉRATURE POUR OBSERVER DANS L'INFRAROUGE.

CAR C'EST LÀ QUE LES NAINES ROUGES... ÉMETTENT L'ESSENTIEL DE LEUR LUMIÈRE.

... CES ÉTOILES MOINS MASSIVES ET PLUS FROIDES QUE LE SOLEIL...

ET ENSUITE, AU BOUT DES ORDINATEURS!

C'EST UN PEU COMPLIQUÉ, TOUT ÇA, MAIS QUAND ON OBSERVE UNE ÉTOILE À DES DIZAINES D'ANNÉES-LUMIÈRE* DE LA TERRE, ON N'A PAS 36 SOLUTIONS...

UN PEU COMME UN RADAR SUR LA ROUTE!

(*) UNE ANNÉE-LUMIÈRE: 10 000 MILLIARDS DE KILOMÈTRES.

AVEC TOUT ÇA, ON OBSERVE LA NAISSANCE ET L'ÉVOLUTION DES ÉTOILES.

ALORS ON VA PEUT-ÊTRE TROUVER DES NOUVEAUX MONDES HABITABLES, HORS DU SYSTÈME SOLAIRE?

ET ALORS?

AH BON? JE VEUX Y ALLER!

TU IMAGINES? UNE PLANÈTE HABITABLE... ET HABITÉE?

ON PARLERA DE LA SUITE DE CE PROJET PETIT À PETIT, À MESURE DE SON AVANCÉE...

CHACQUE FOIS QU'IL Y AURA DE NOUVELLES INFORMATIONS...

DANS LES PAGES DU JOURNAL.

À BIENTÔT, LES AMIS!

ET IL Y A UN ZONE APPAREIL PRÉVU, QUI S'APPELLE SPIP.

LE SPECTROPOLARIMÈTRE INFRAROUGE PYRÉNÉEN.

AU PIC DU MIDI* PAS LOIN DE CHEZ NOUS.

AAH! CHOUETTE!

MAIS BON, C'EST PAS POUR TOUT DE SUITE. C'EST TRÈS LONG À FAIRE, TOUT ÇA.

(*) V. SPIROU N° 3748

(À SUIVRE)

SPIRou

SPIRou @ CFHT



👁️ **installed @ CFHT in 2018 Feb**

first cryogenic cycle in 2018 Feb

H4RG detector installed in 2018 Apr

Laser Frequency Comb (LFC) installed in 2018 Oct (tests ongoing)

👁️ **lab tests @ CFHT throughout 2018**

study velocimetric stability & polarimetric properties

👁️ **tech commissioning (TC) & science verif (SV)**

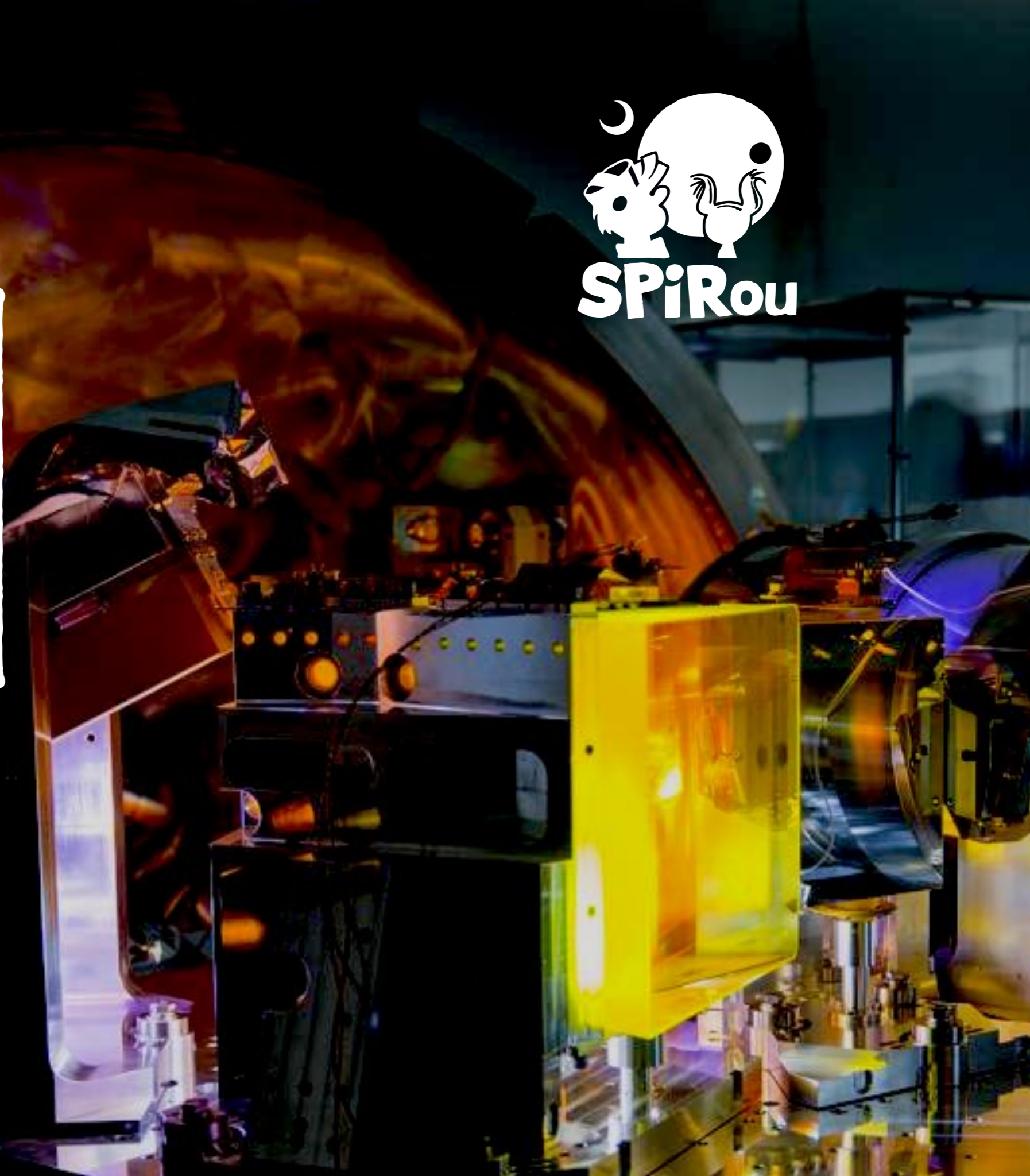
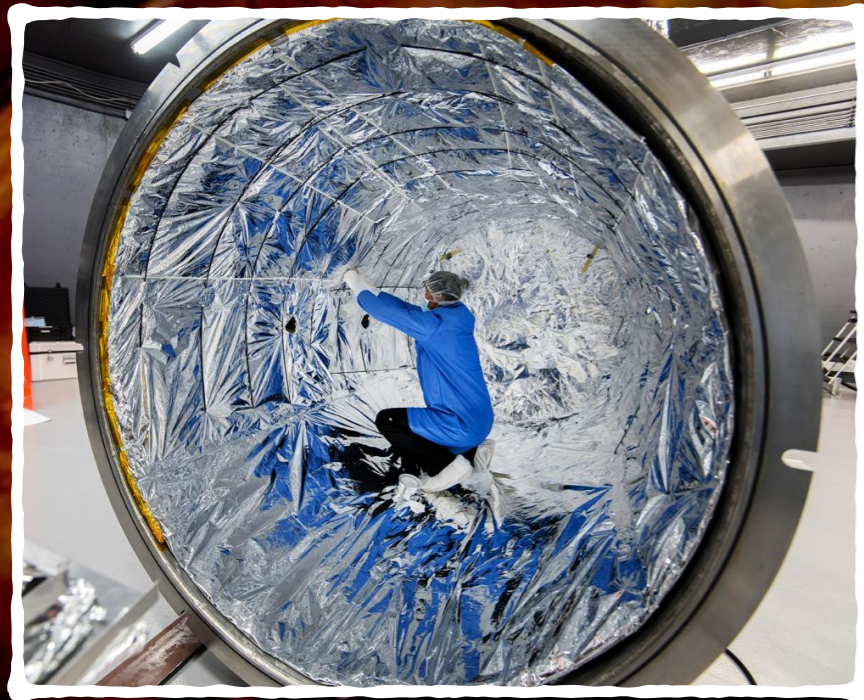
TC#0 for guiding only (1 night, 2018 Mar)

TC#1-7 & SV for overall performances (~29 clear nights)

~3800 SPIRou spectra of ~100 stars

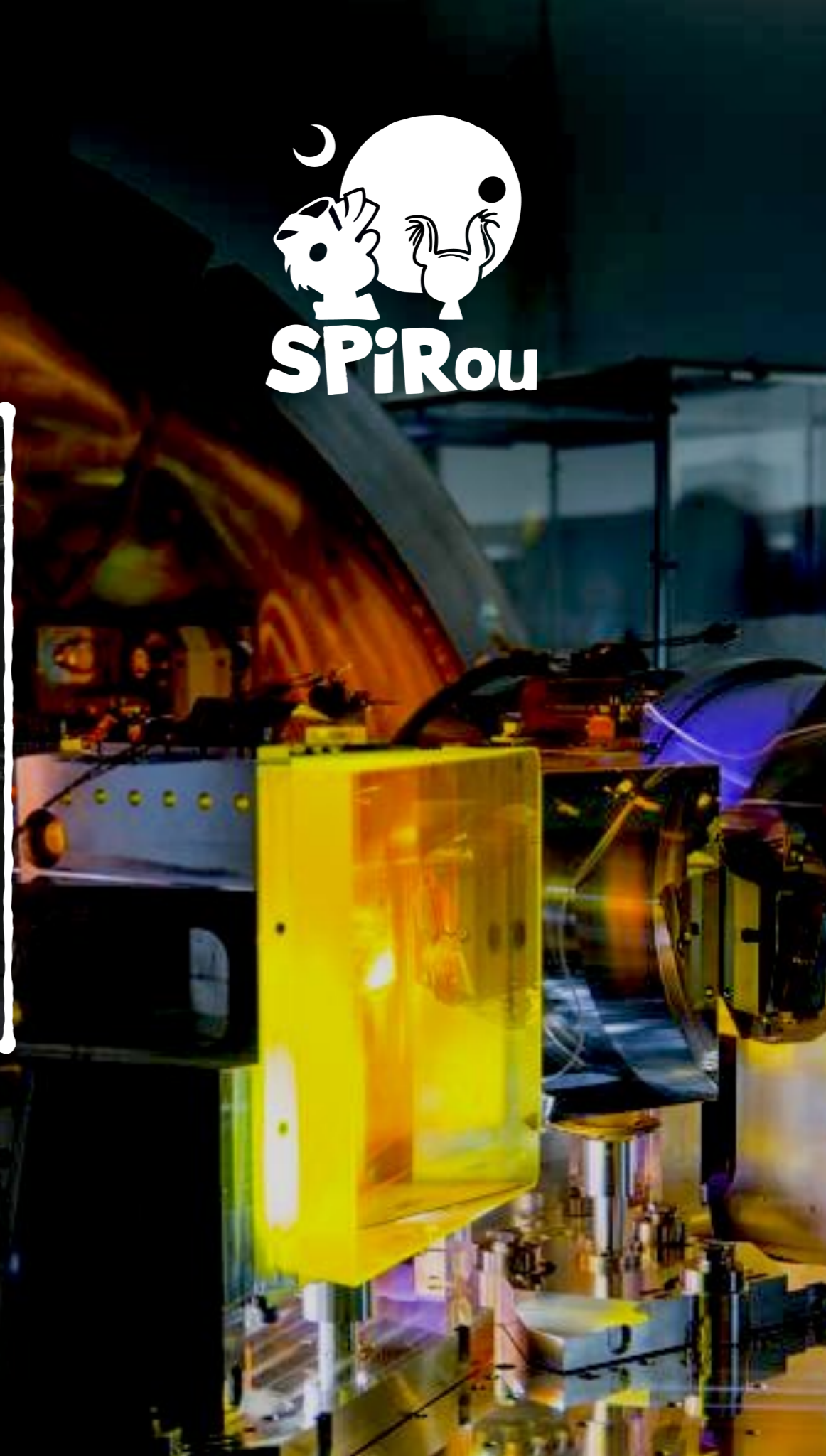
SPIRou

SPIRou @ CFHT



SPIRou

SPIRou @ CFHT



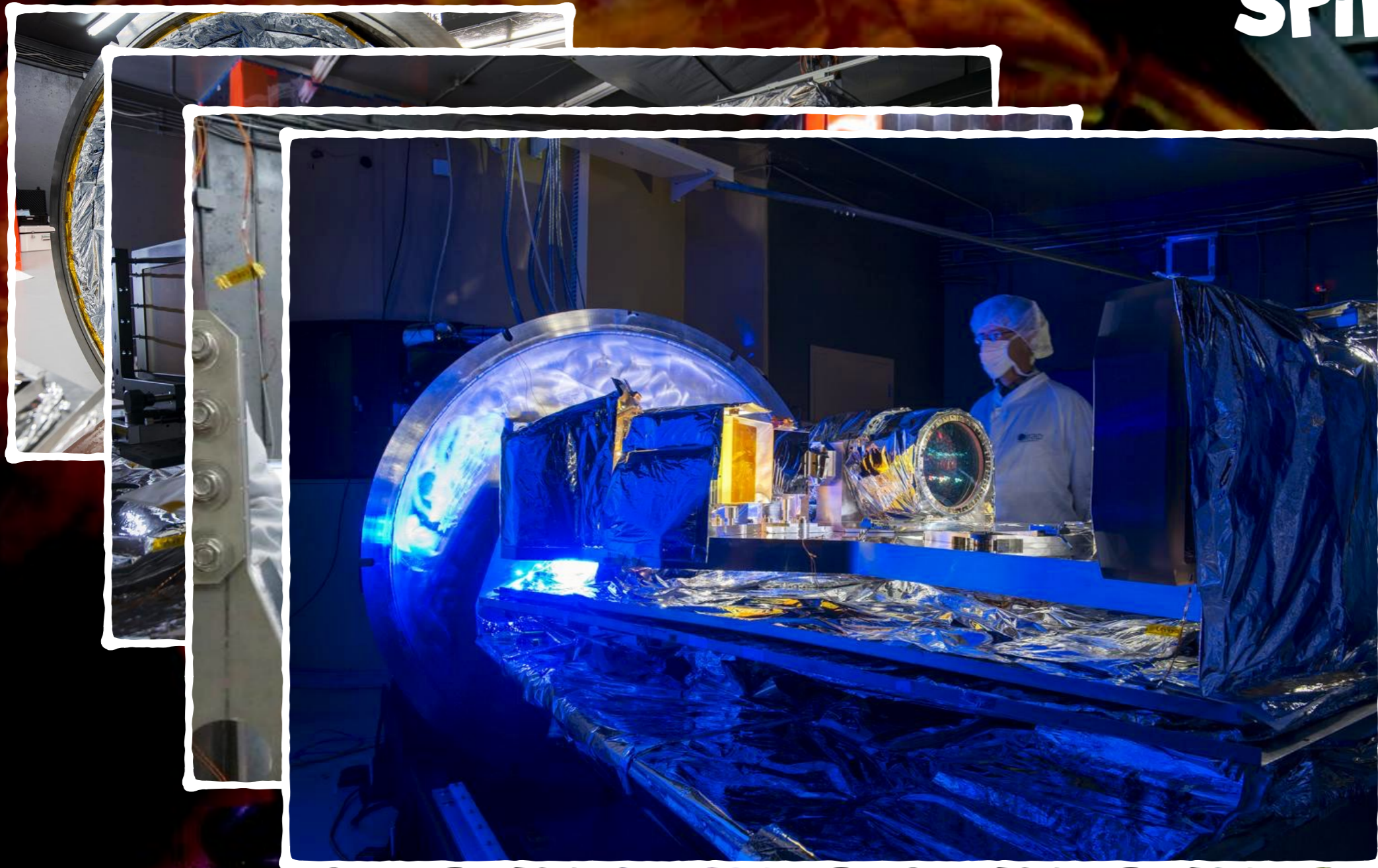
SPIRou

SPIRou @ CFHT



SPIRou

SPIRou @ CFHT



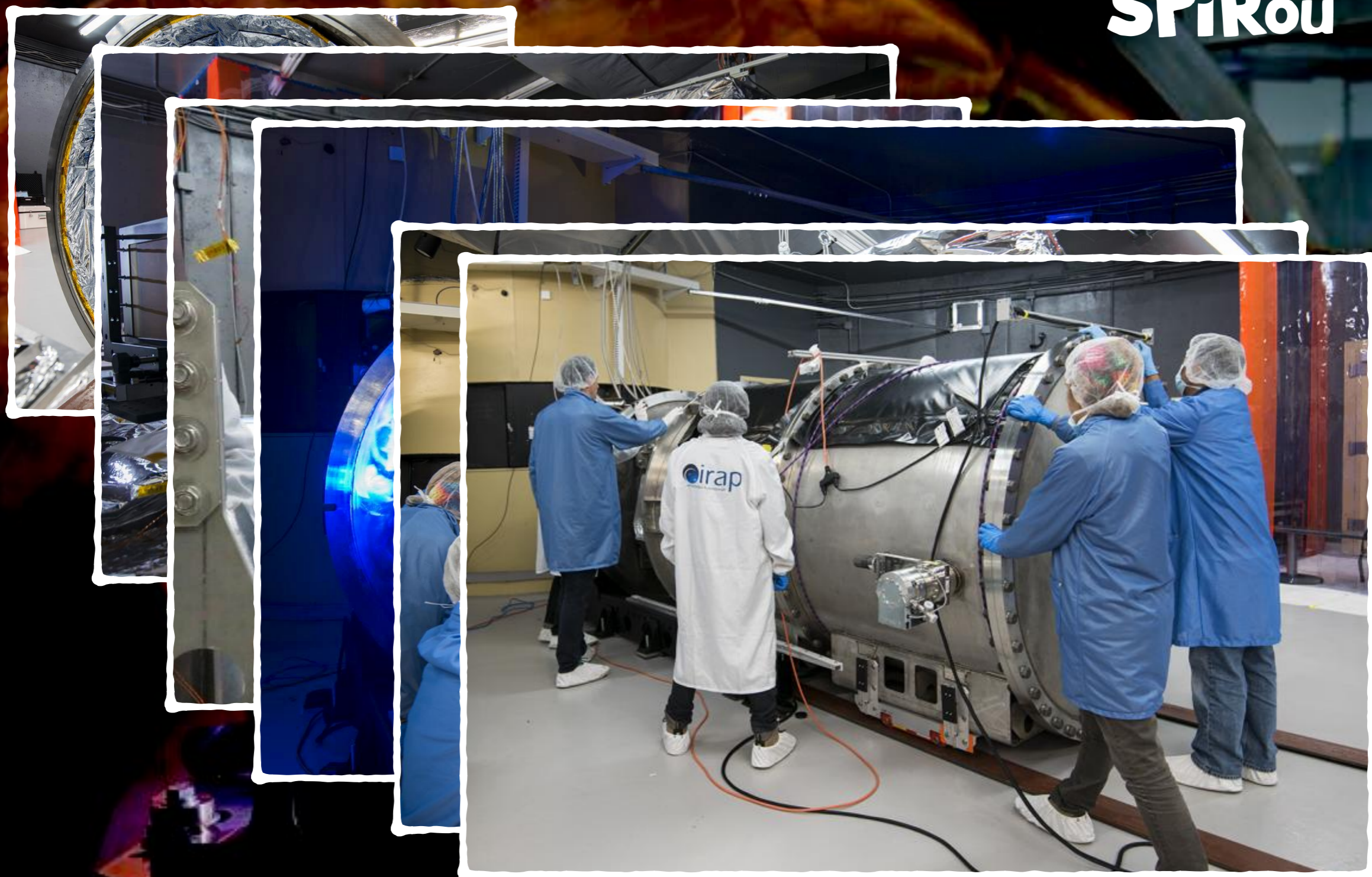
SPIRou

SPIRou @ CFHT



SPIRou

SPIRou @ CFHT



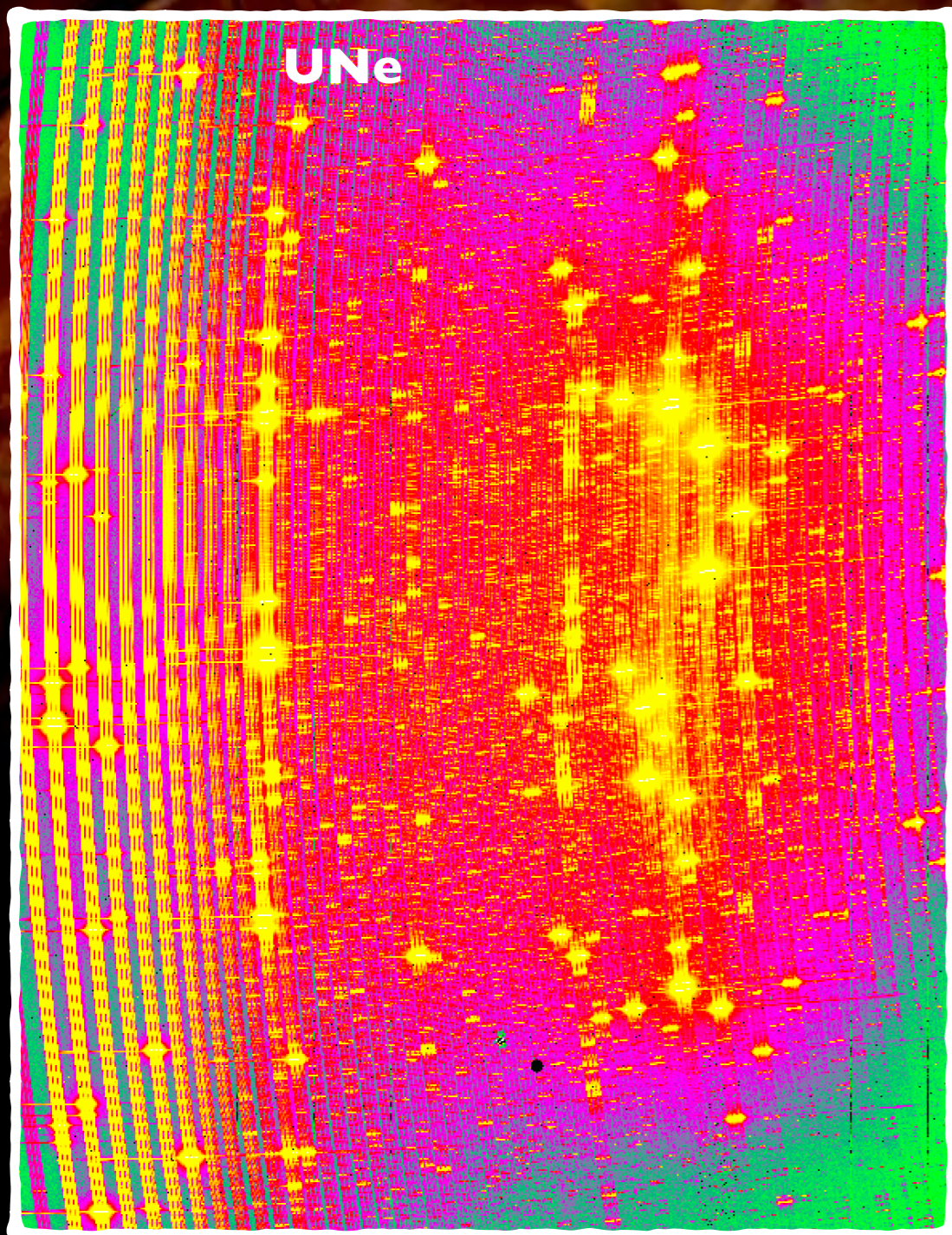
SPIRou

SPIRou @ CFHT



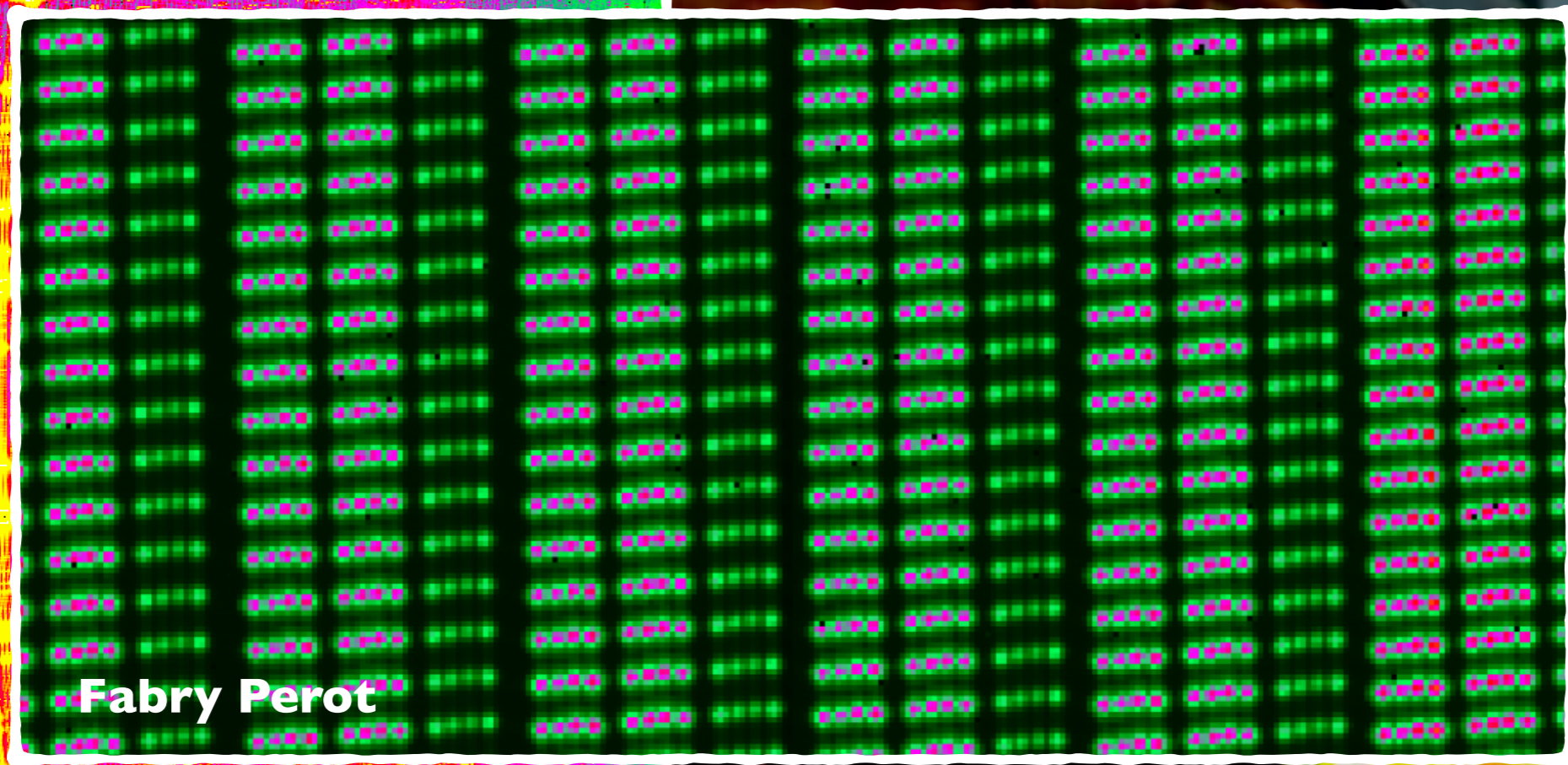
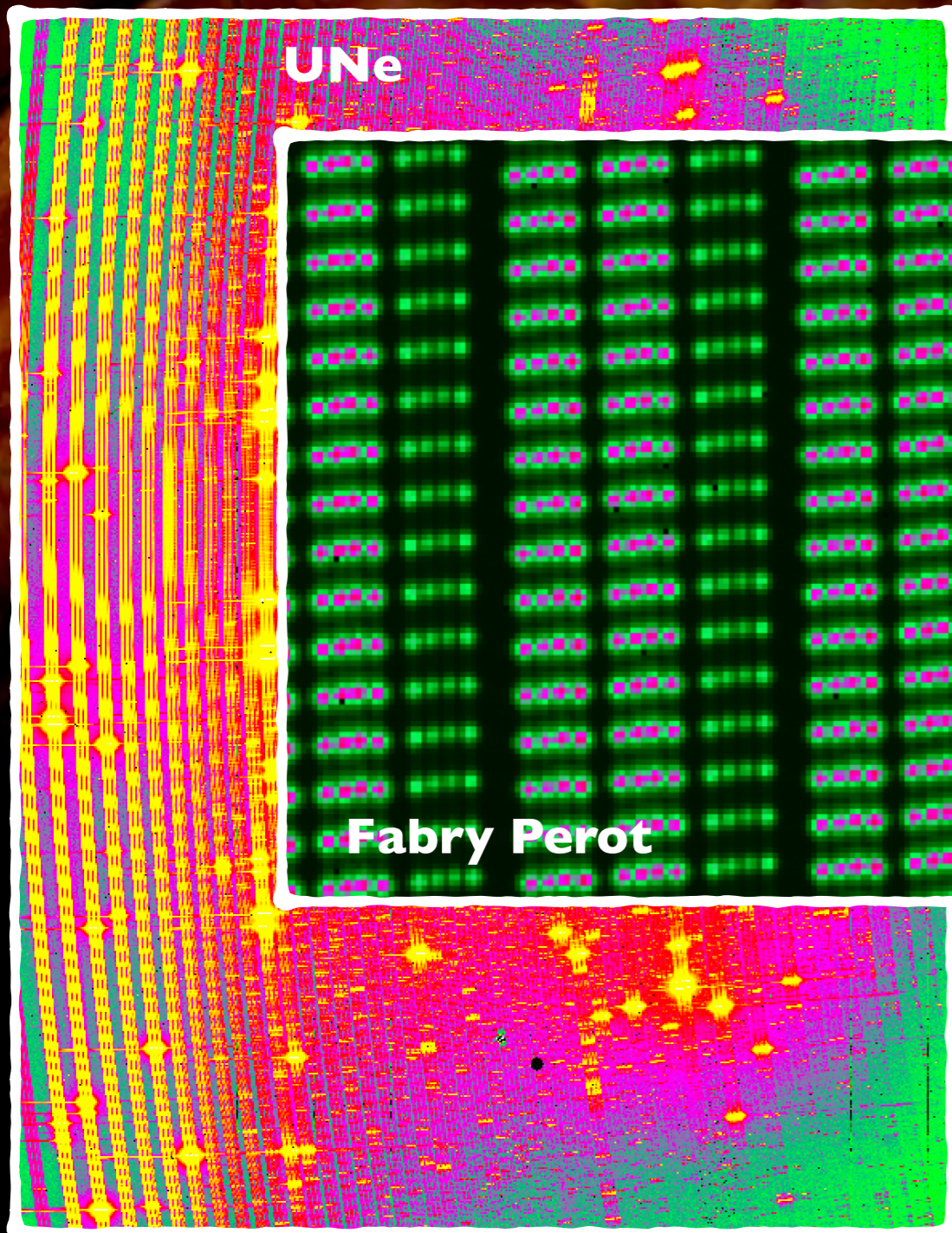
SPIRou

Example raw images



SPIRou

Example raw images



SPIRou

Example raw images



UNe

Fabry P

Laser Frequency Comb - experimental

SPIRou

Performances: spectroscopy



🌀 conclusions wrt spectroscopy

spectral domain supernominal

spectral resolving power nominal (70k)

throughput nominal in HK, subnominal in YJ

•↔ ZnSe transmission larger than assumed in design

thermal background subnominal: ~1.1 mag too strong @ 2.33 μm

•↔ from polarimeter & spectrograph feedthroughs

🌀 forthcoming upgrades

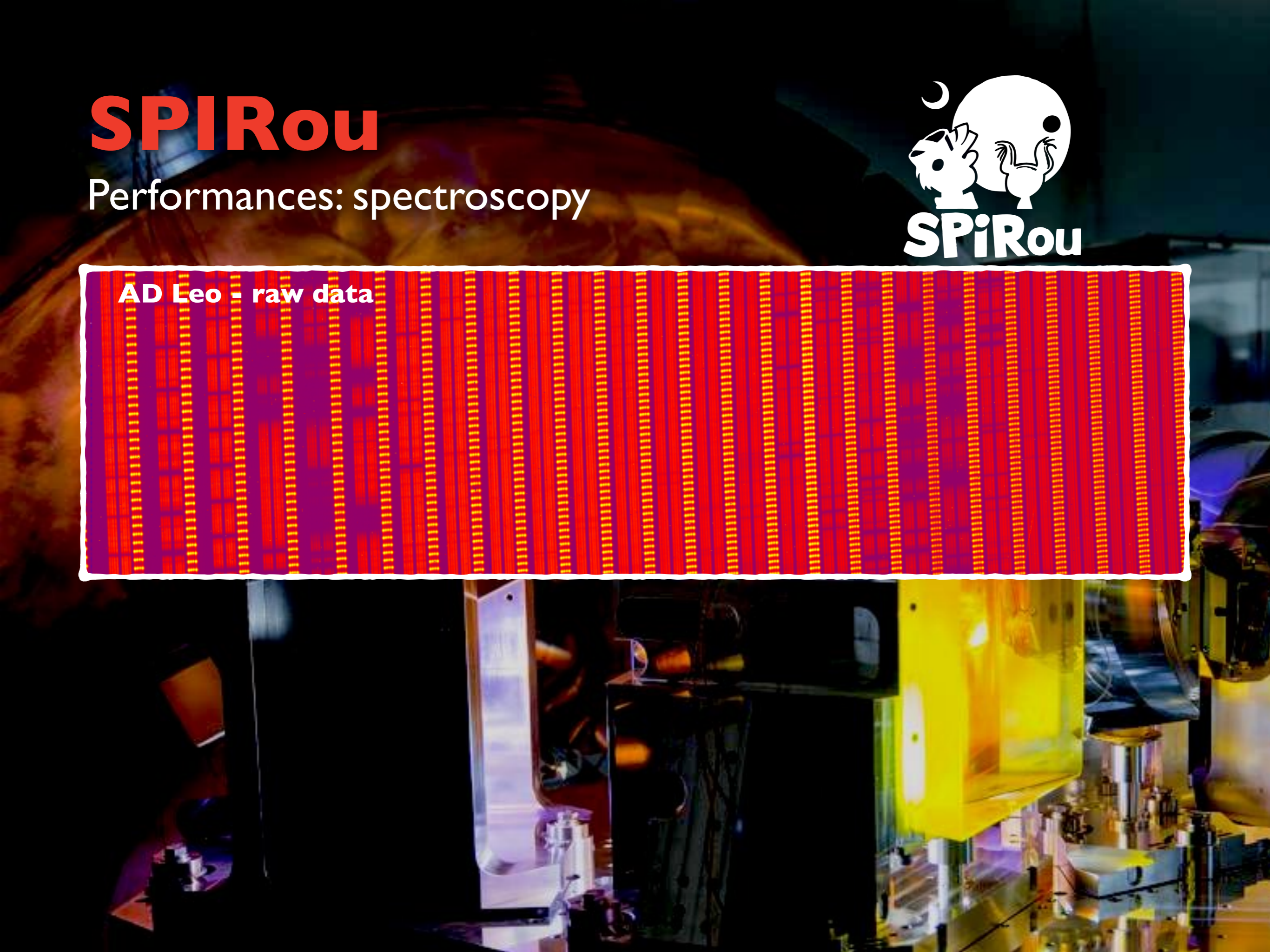
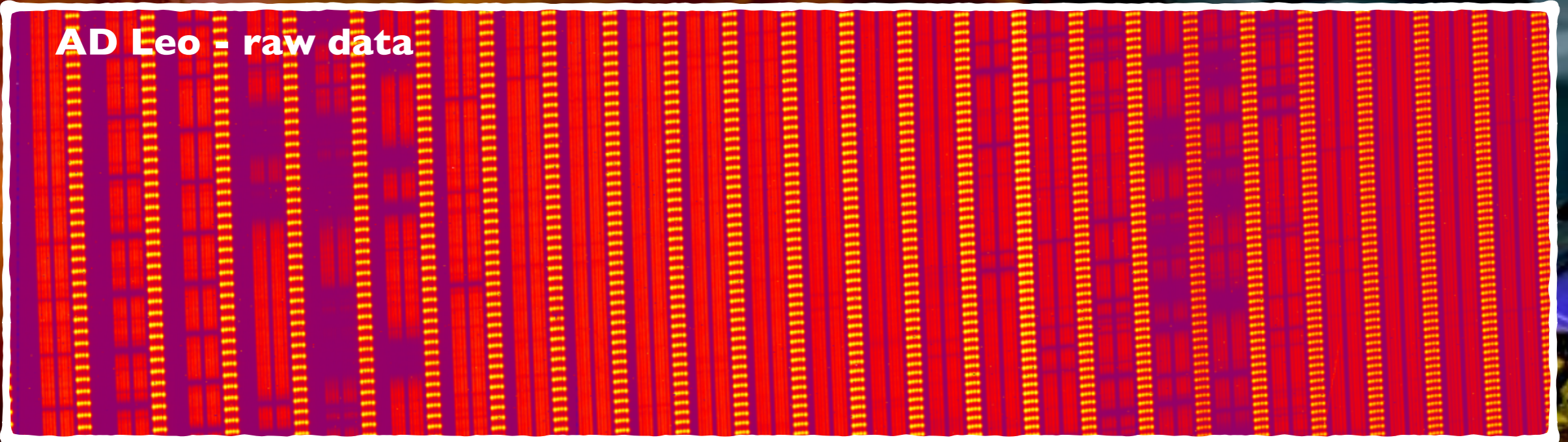
lower thermal background by cooling polarimeter & feedthroughs

SPIRou

Performances: spectroscopy



AD Leo - raw data

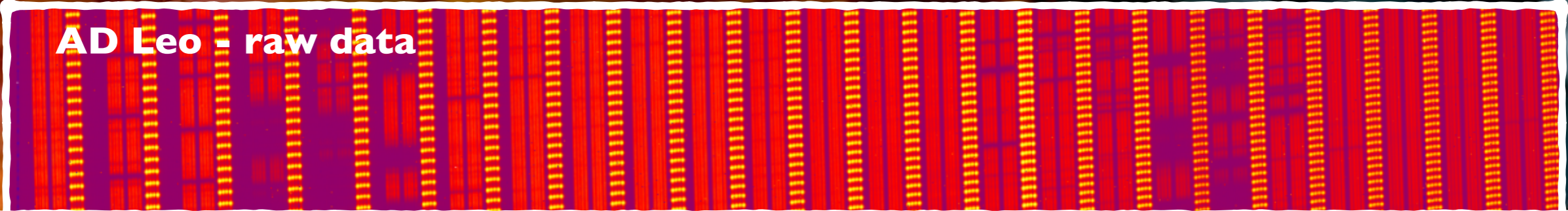


SPIRou

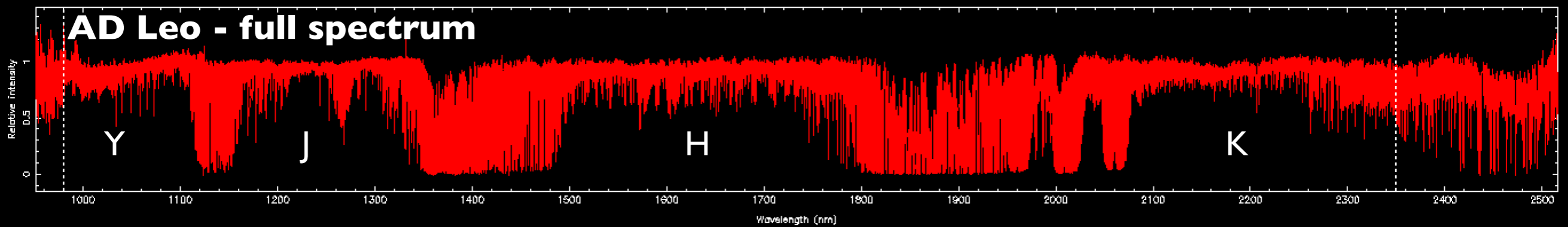
Performances: spectroscopy



AD Leo - raw data



AD Leo - full spectrum

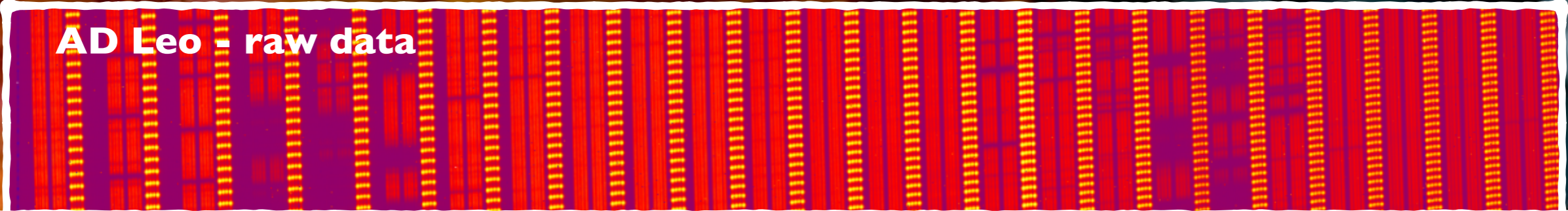


SPIRou

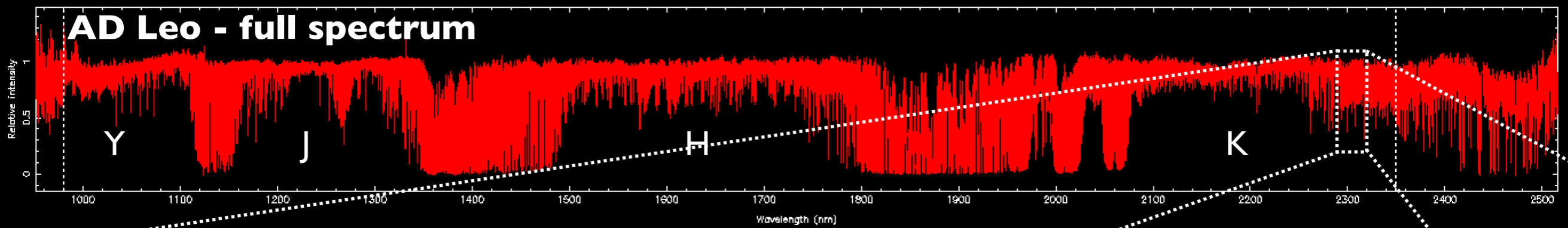
Performances: spectroscopy



AD Leo - raw data

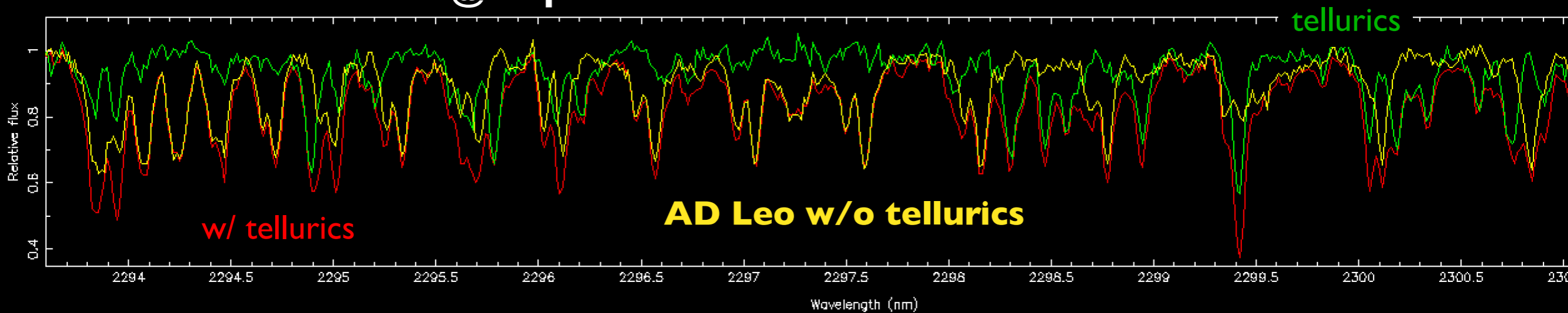


AD Leo - full spectrum



AD Leo - CO bandhead @ 2.3 μ m

SPIRou - ADLeo w/ and w/o tellurics



SPIROU

Performances: spectroscopy



€ Eri w/ & w/o tellurics (© P Petit)

SPIRou

Performances: velocimetry



🌀 **conclusions wrt velocimetry**

RV precision better than 1 m/s in the lab, ~2 m/s on the sky
main contributor: telluric correction & data reduction

- upper limit on RV precision only, will improve w/ more data
- best nIR RV precision so far (eg Carmenes: 5-10 m/s rms)

🌀 **forthcoming upgrades**

improved telluric correction & data reduction
fiber link upgrade

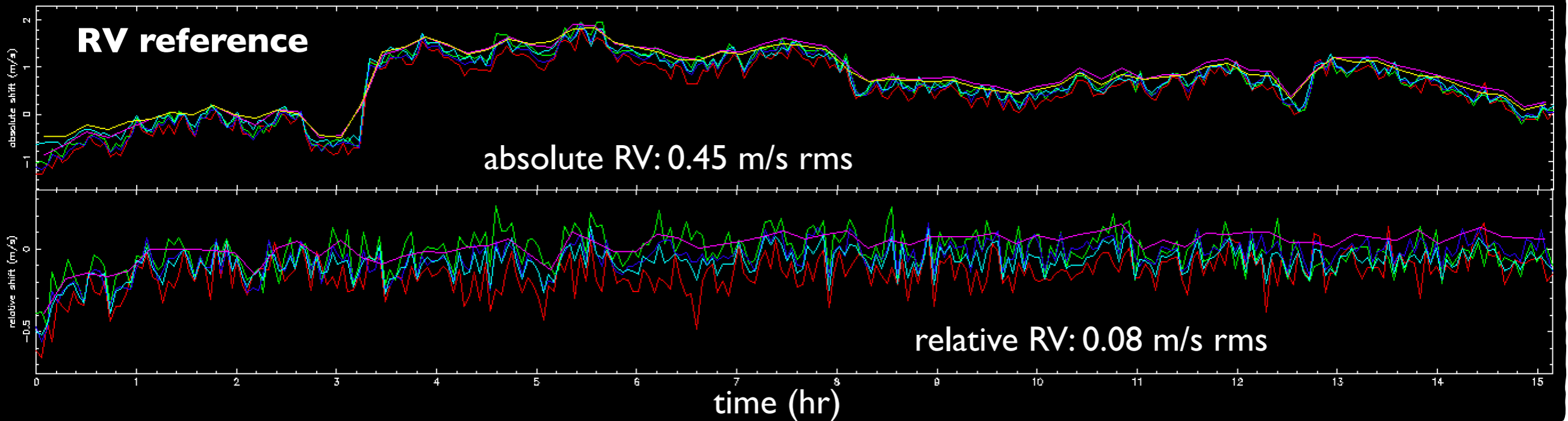
SPIRou

Performances: velocimetry



FP shift vs time

RV reference



absolute RV: 0.45 m/s rms

relative RV: 0.08 m/s rms

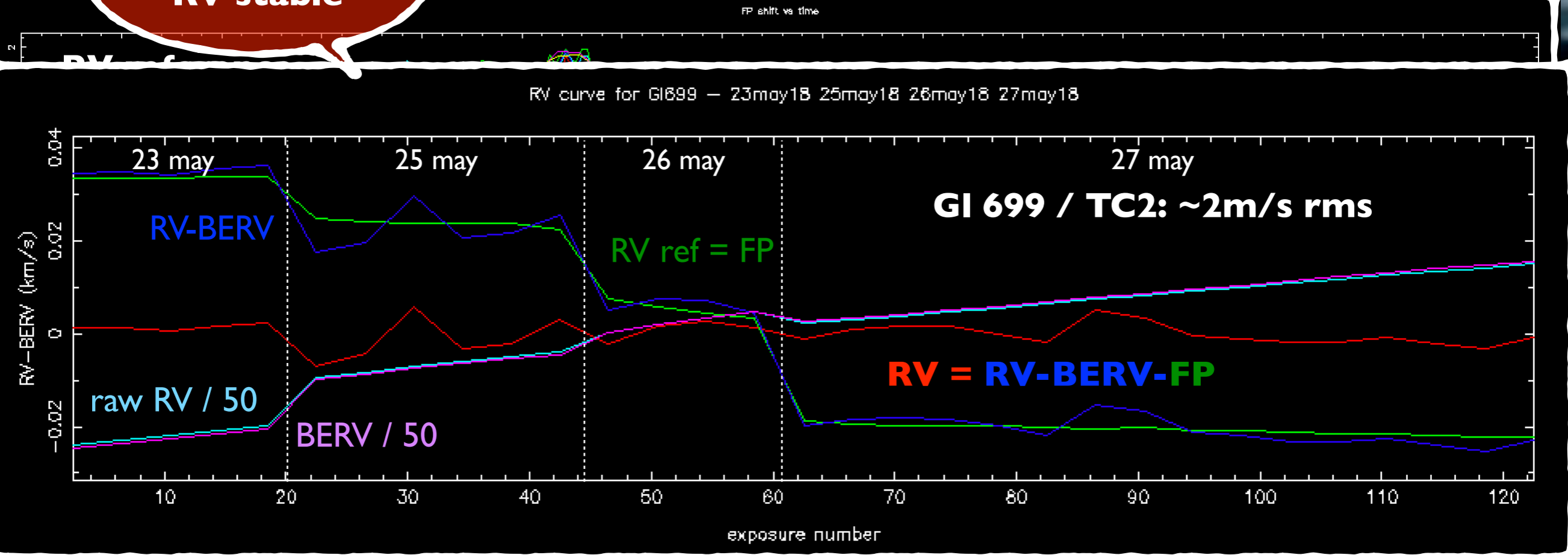
time (hr)

SPIRou

Performances: velocimetry



GI 699 (M4),
RV stable

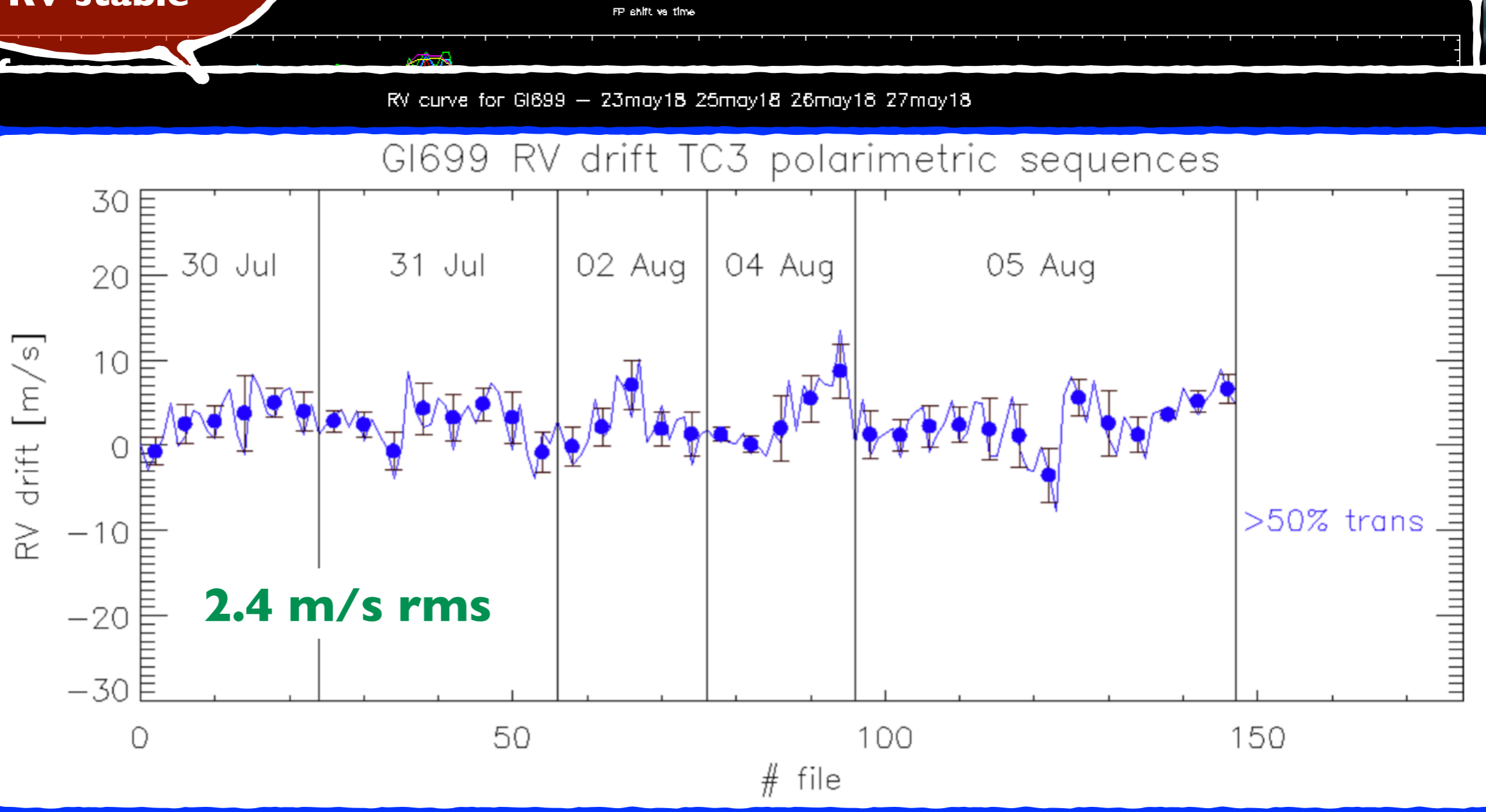


SPIRou

Performances: velocimetry



GI 699 (M4),
RV stable



SPIRou

Performances: spectropolarimetry



conclusions wrt spectropolarimetry

durable ZnSe Fresnel rhombs tricky to construct
 circular & linear polarimetry in line profiles functional
 circular & linear polarized Zeeman signatures detected in stellar spectra
 nominal polarimetric sensitivity & minimal polarization crosstalk

forthcoming upgrades

improved & long-lived Fresnel rhombs

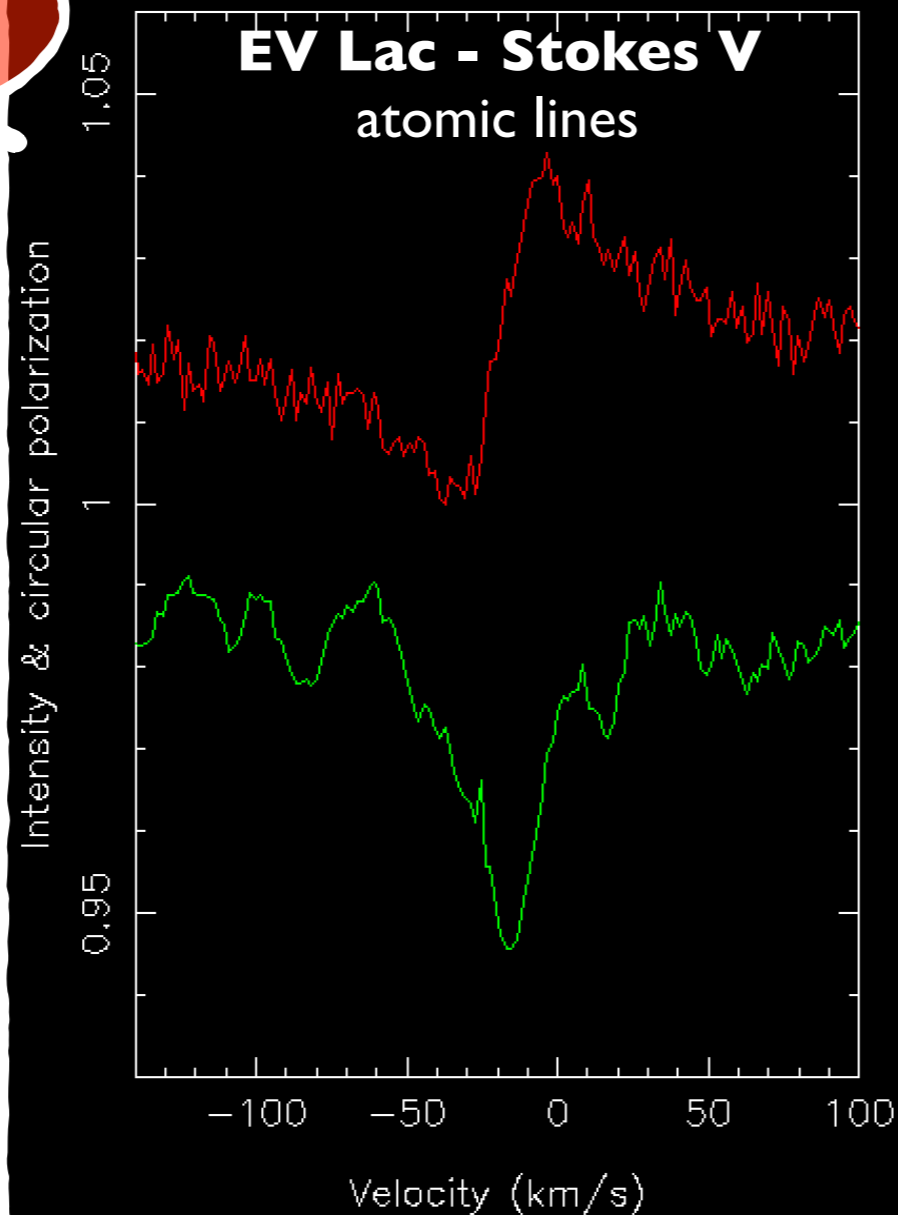
SPIRou

Performances: spectropolarimetry

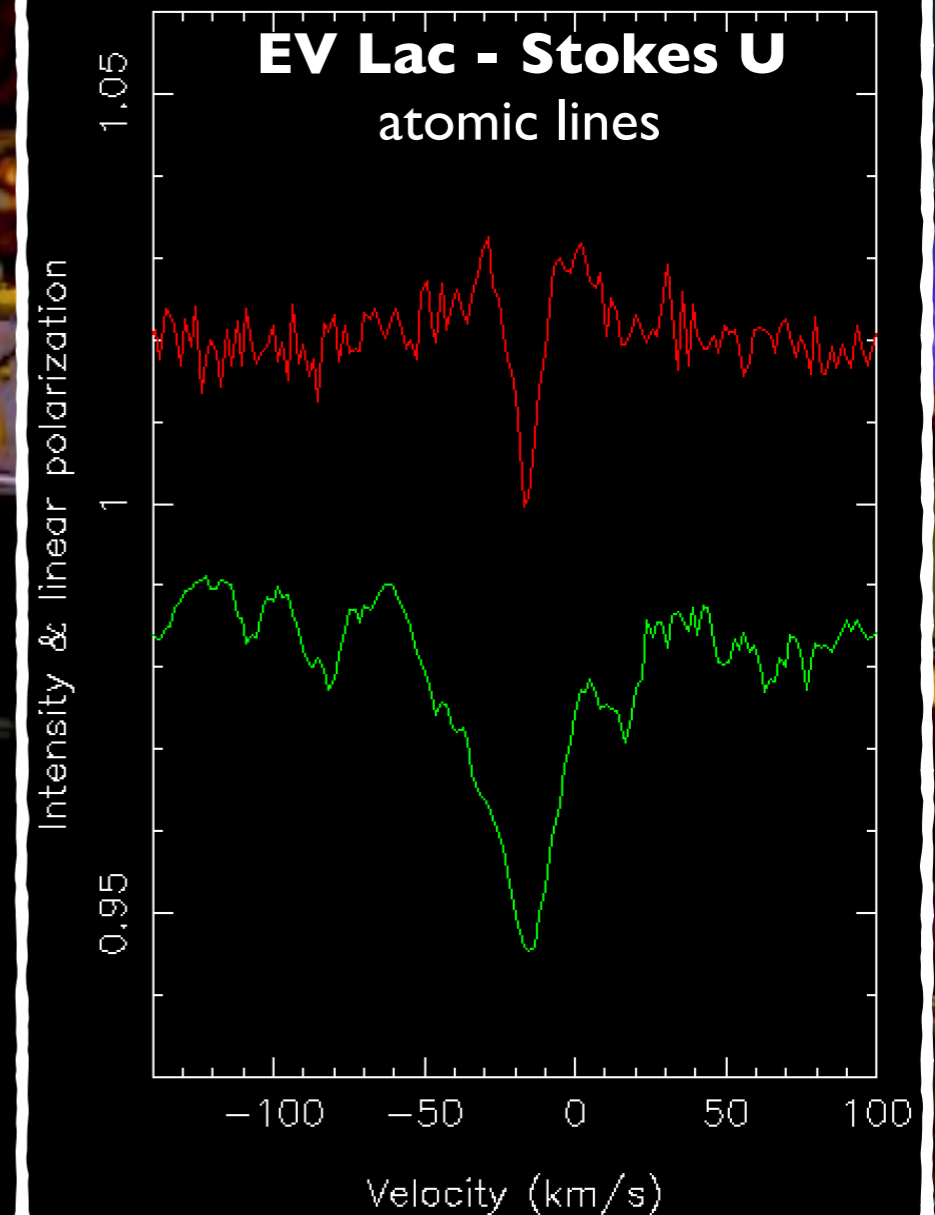


EV Lac (M3)
very active

Stokes V signature of EV Lac



Stokes U signature of EV Lac



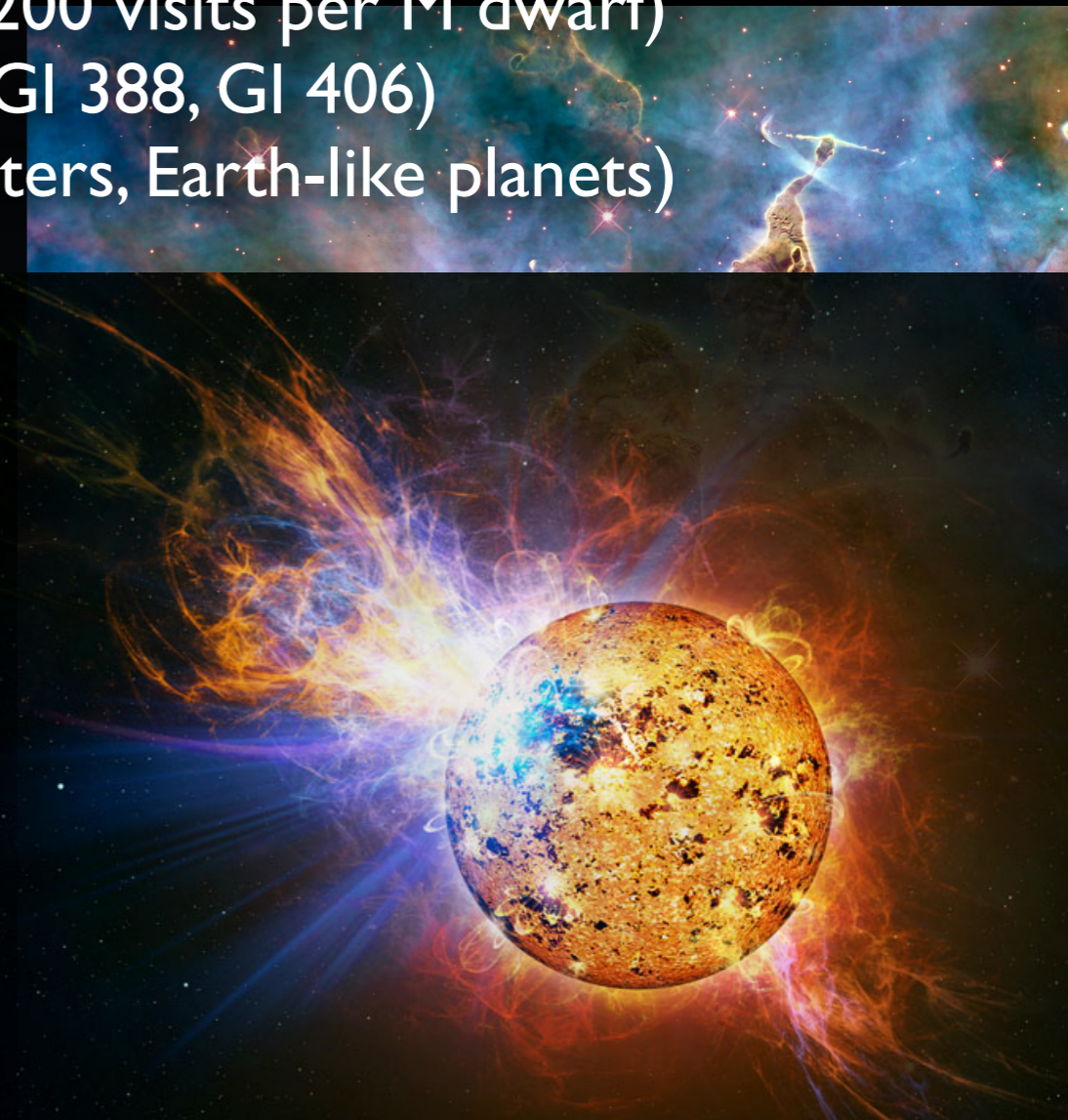
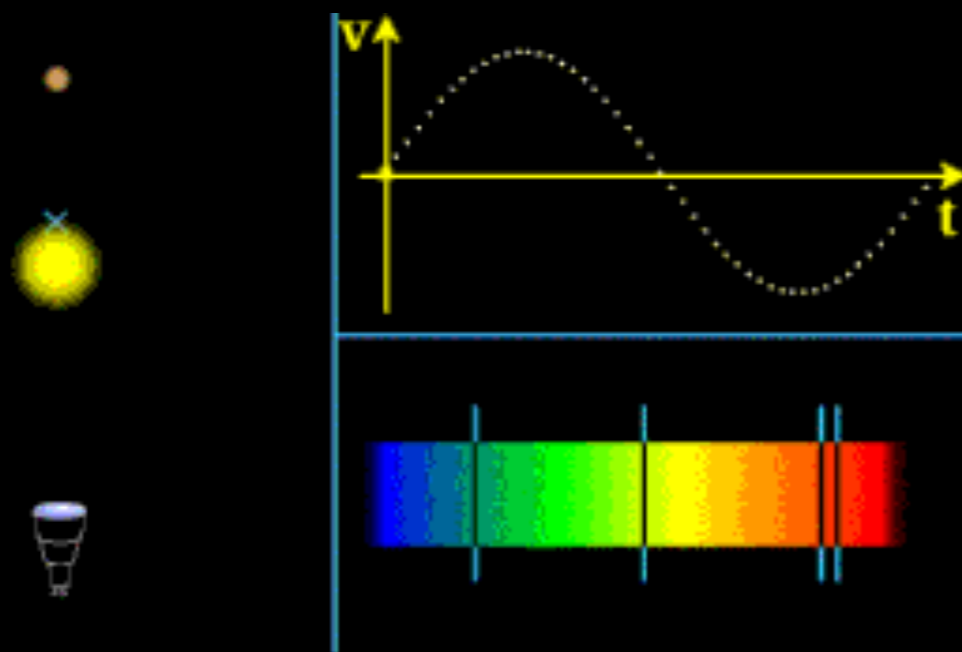
SPIROU

First science results



exoplanets & activity of M stars

a few tens of M dwarfs monitored so far, w/ up to ~30 visits
way too early for any firm result (aim : 150-200 visits per M dwarf)
clear magnetic activity in some of them (eg Gl 388, Gl 406)
several planetary transits observed (hot Jupiters, Earth-like planets)



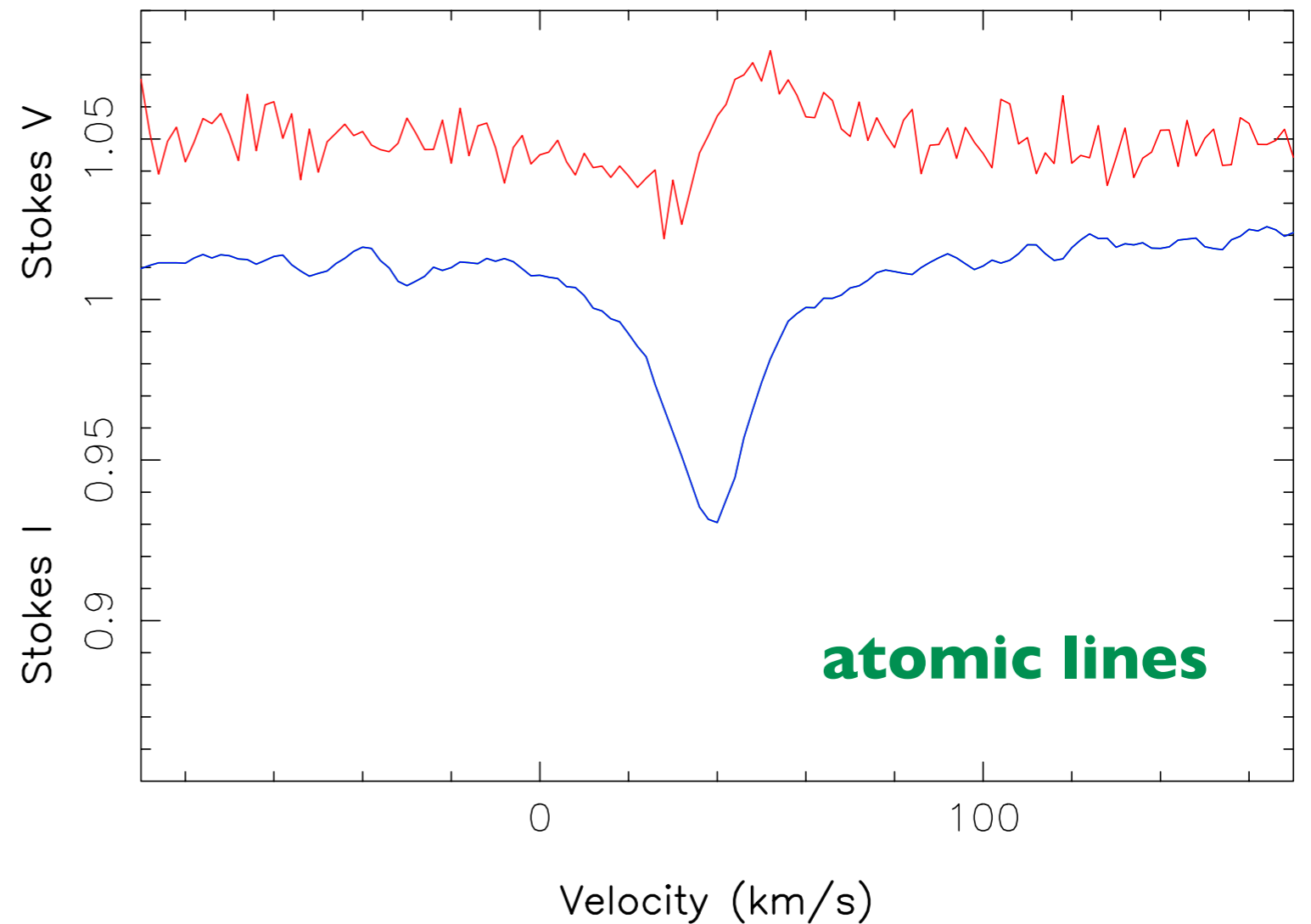
SPIRou

First science results



AD Leo (M3)
magnetic field &
activity

Zeeman signature of AD Leo, 2019 Apr 25



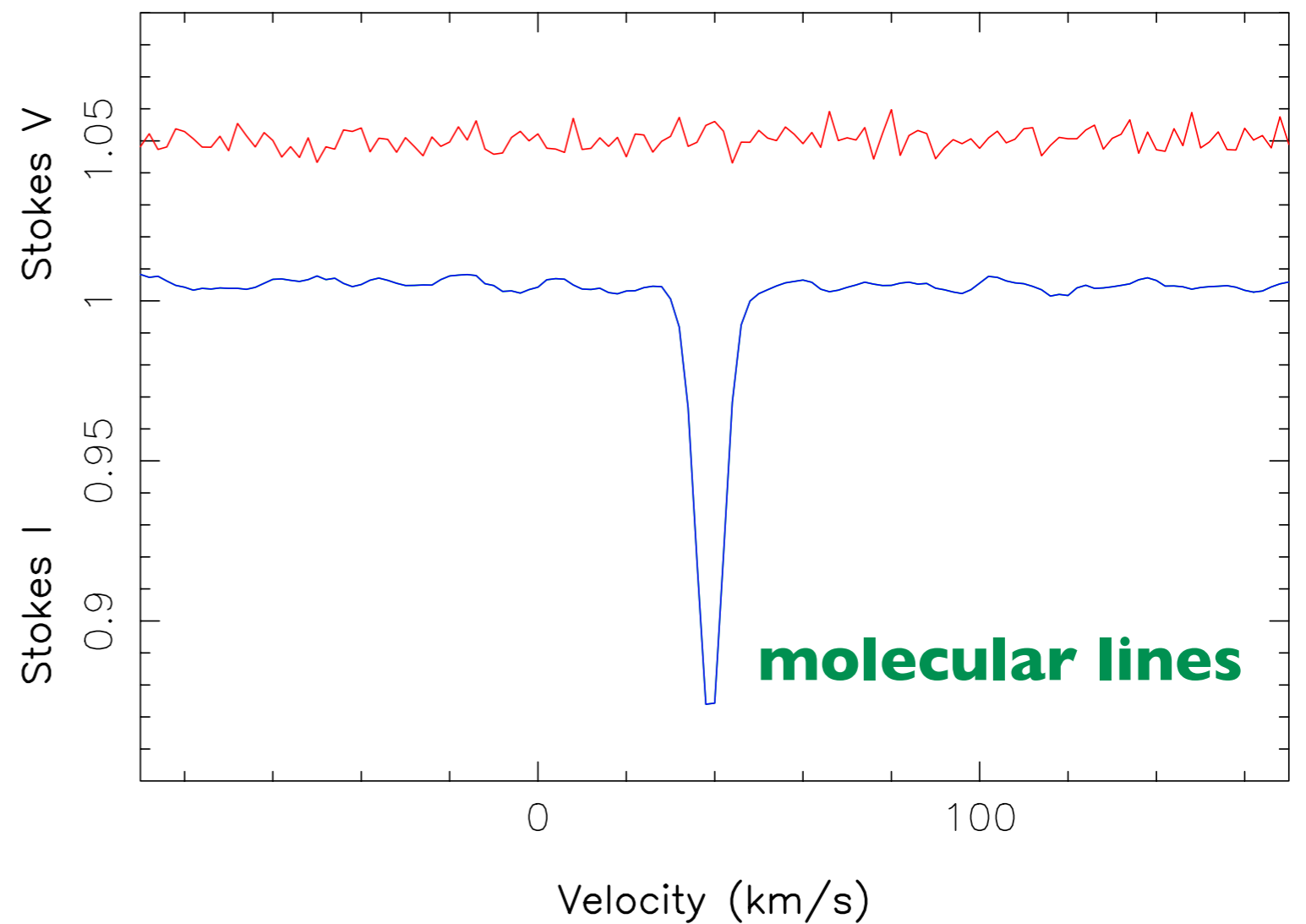
SPIRou

First science results



AD Leo (M3)
magnetic field &
activity

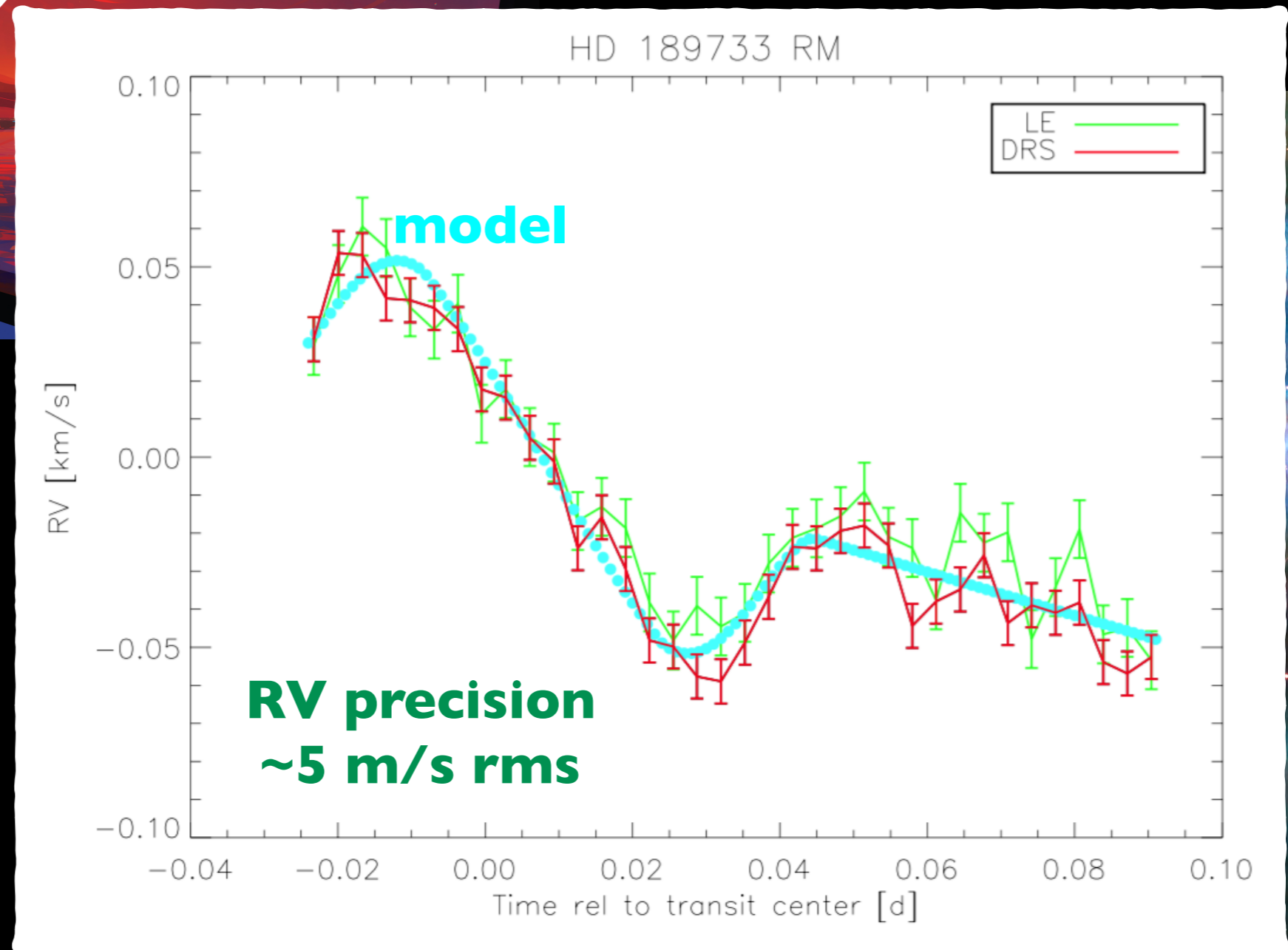
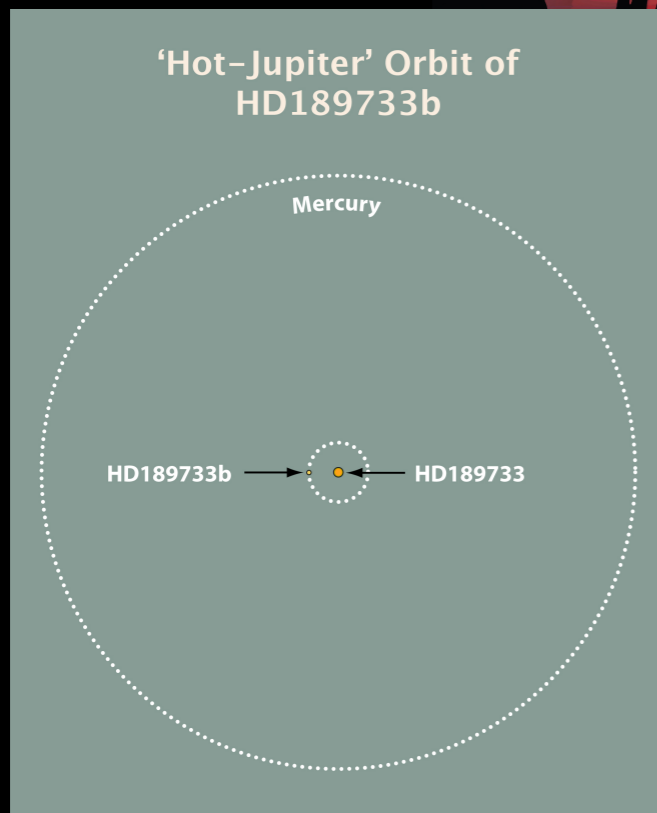
Zeeman signature of AD Leo, 2019 Apr 25



SPIRou

First science results

**RM effect
transit of HD 189733b
(Moutou et al in prep)**



SPIRou

First science results

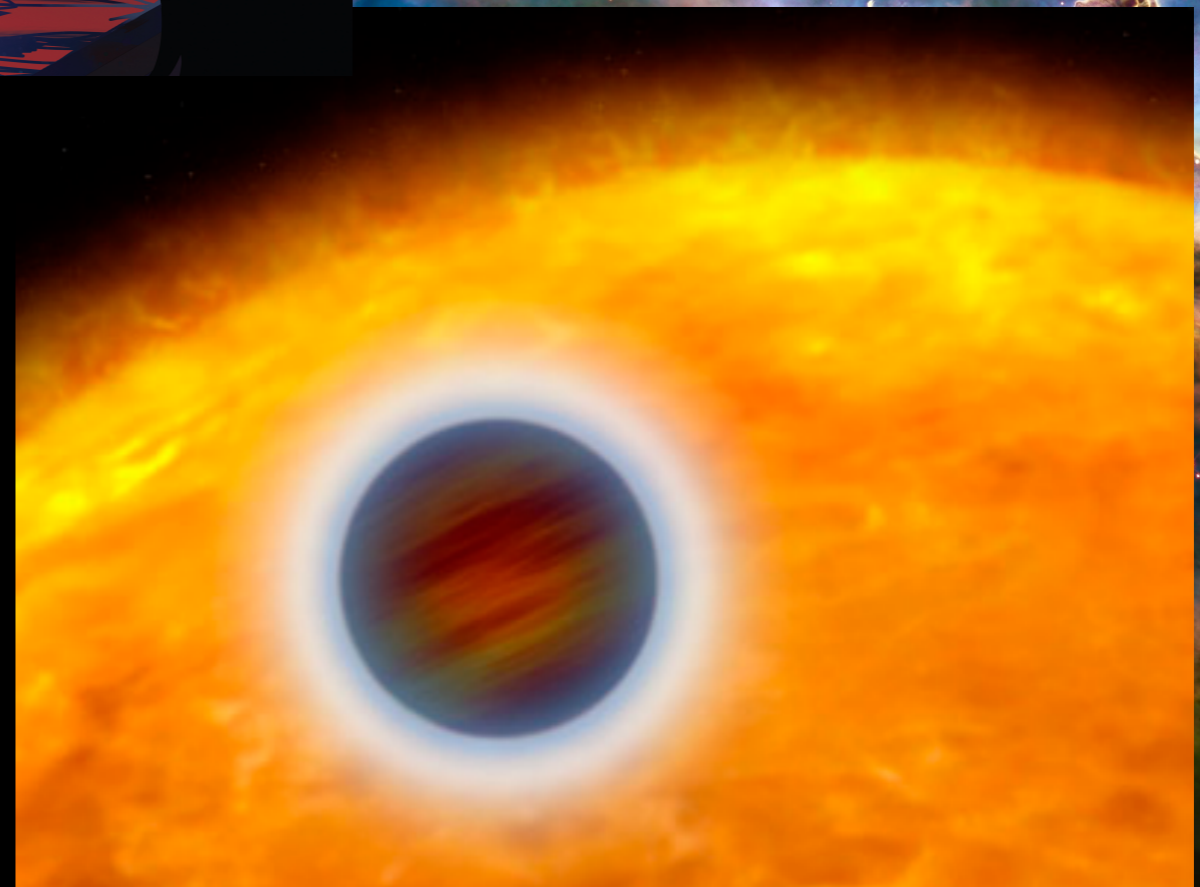
exoplanet atmospheres

detect atmospheric signatures of transiting planets

a few close-in planets observed w/ SPIRou during transits

hot Jupiters, eg HD 189733 b; hot Neptunes, eg AU Mic b

↔ He, H₂O, CO detected - O₂, CH₄ ?

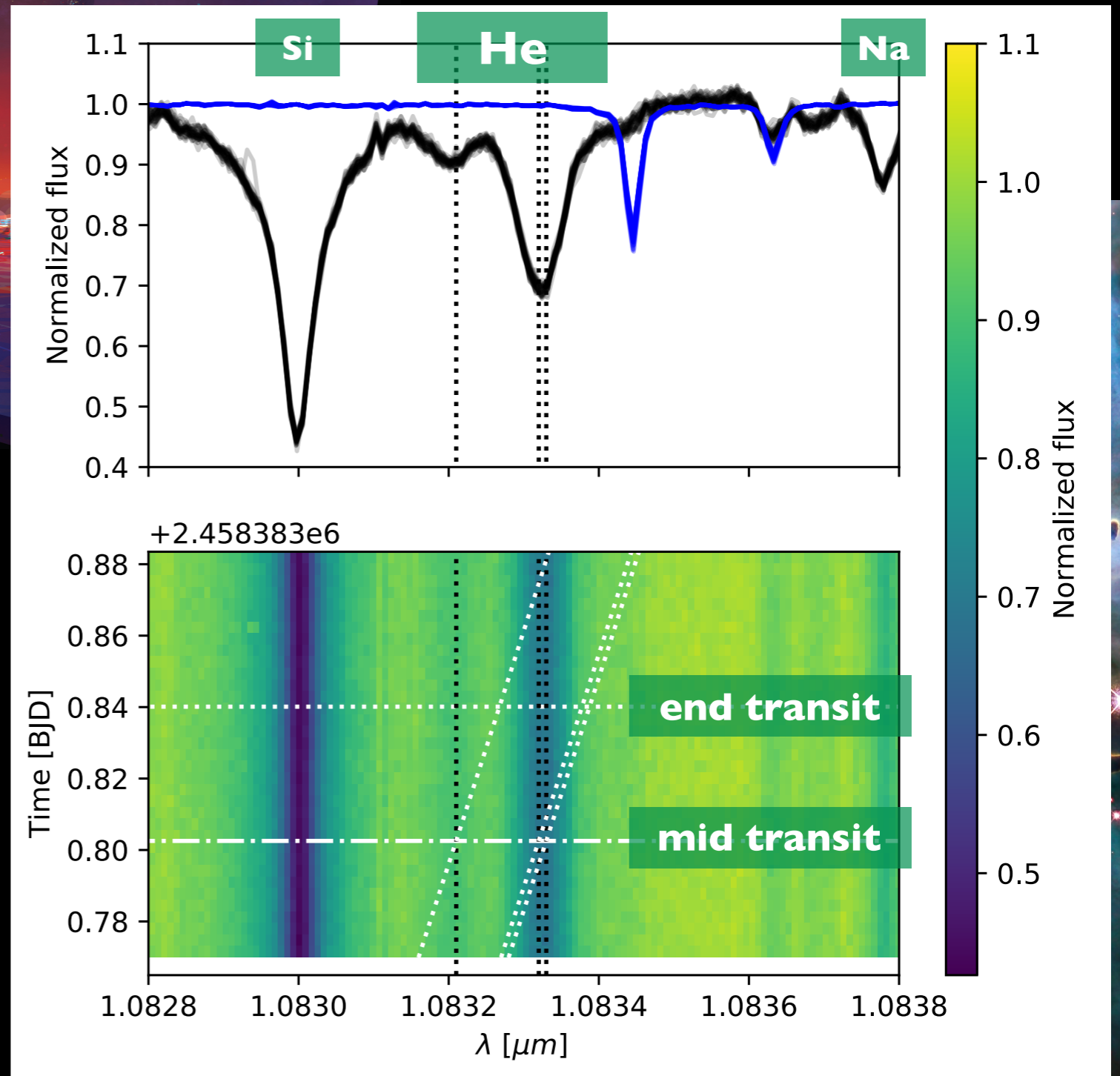
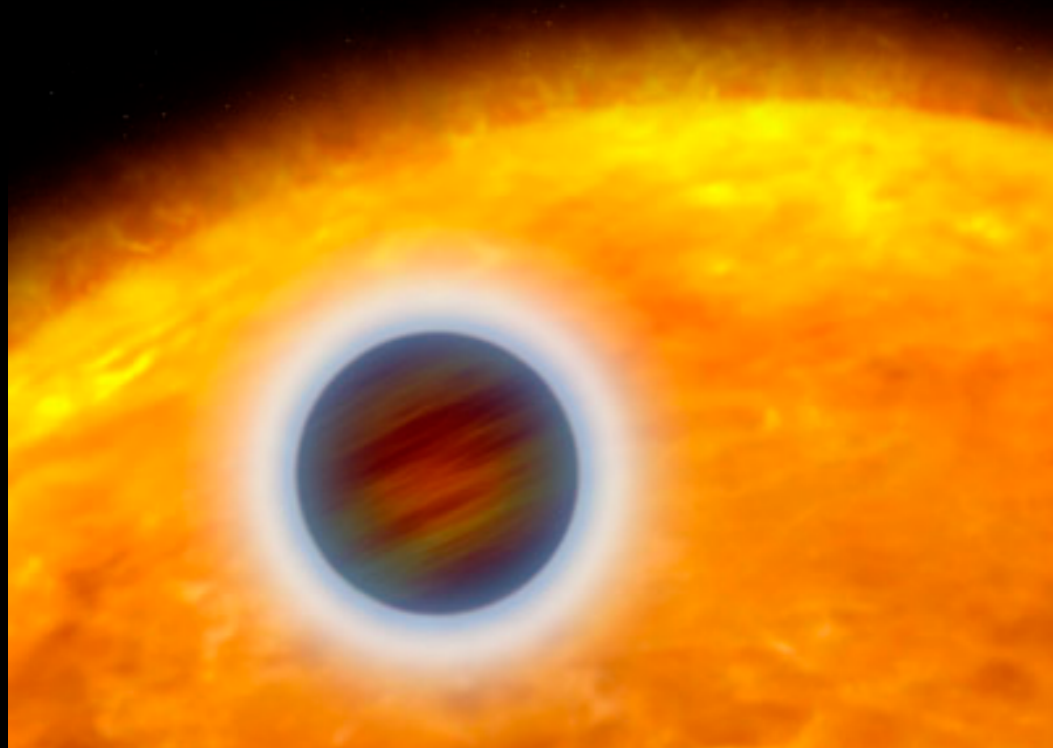


SPIRou

First science results



transit
of HD 189733b,
1083 nm He I absorption
(Darveau-Bernier et al
in prep)

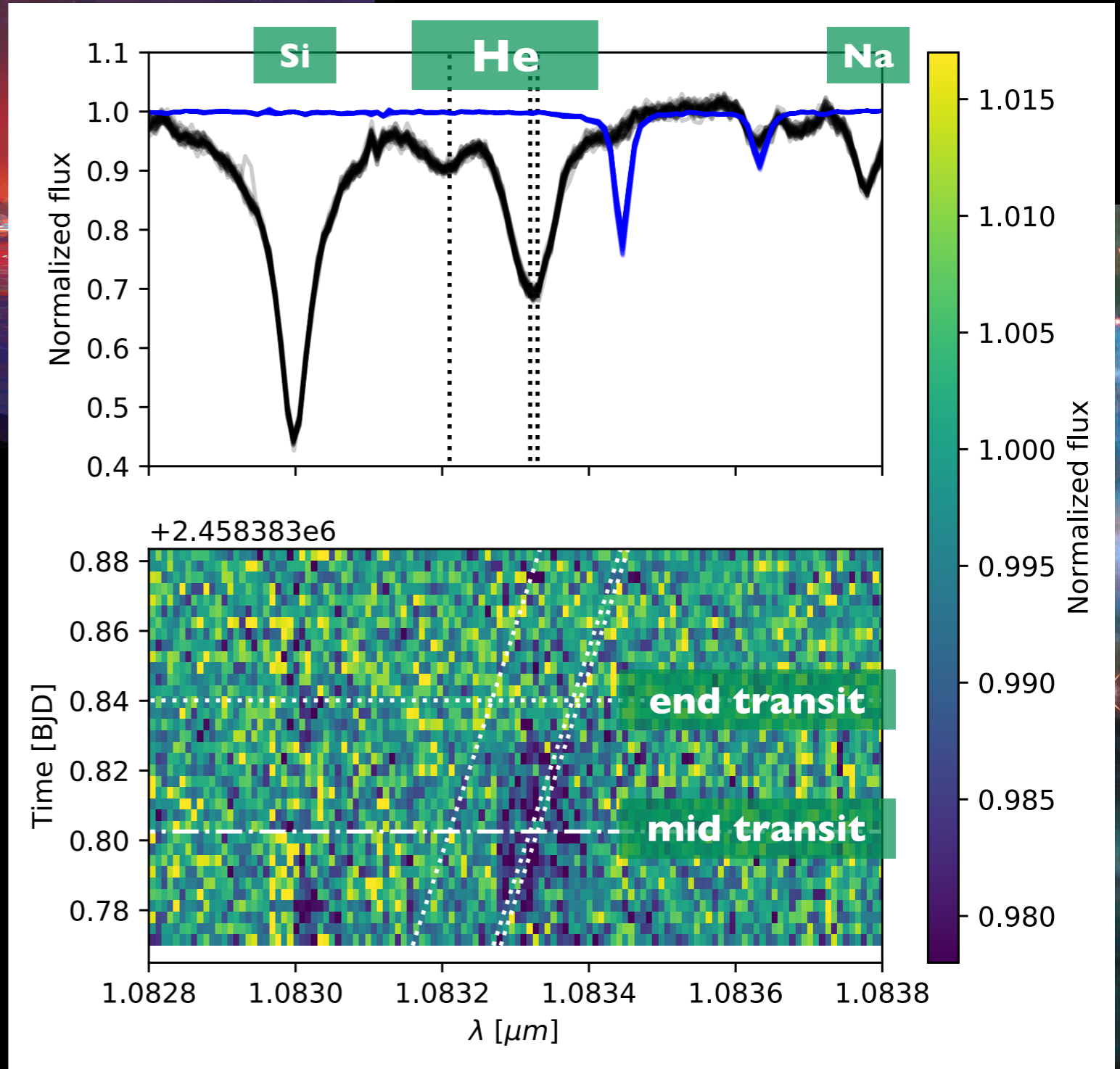
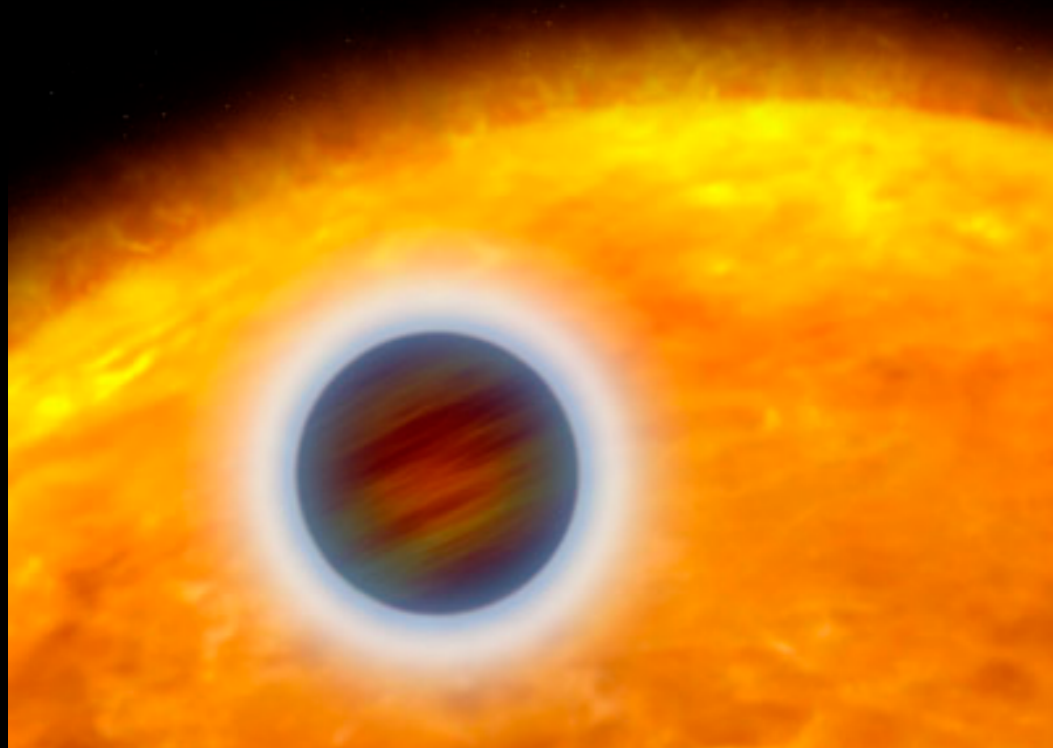


SPIRou

First science results



transit
of HD 189733b,
1083 nm He I absorption
(Darveau-Bernier et al
in prep)



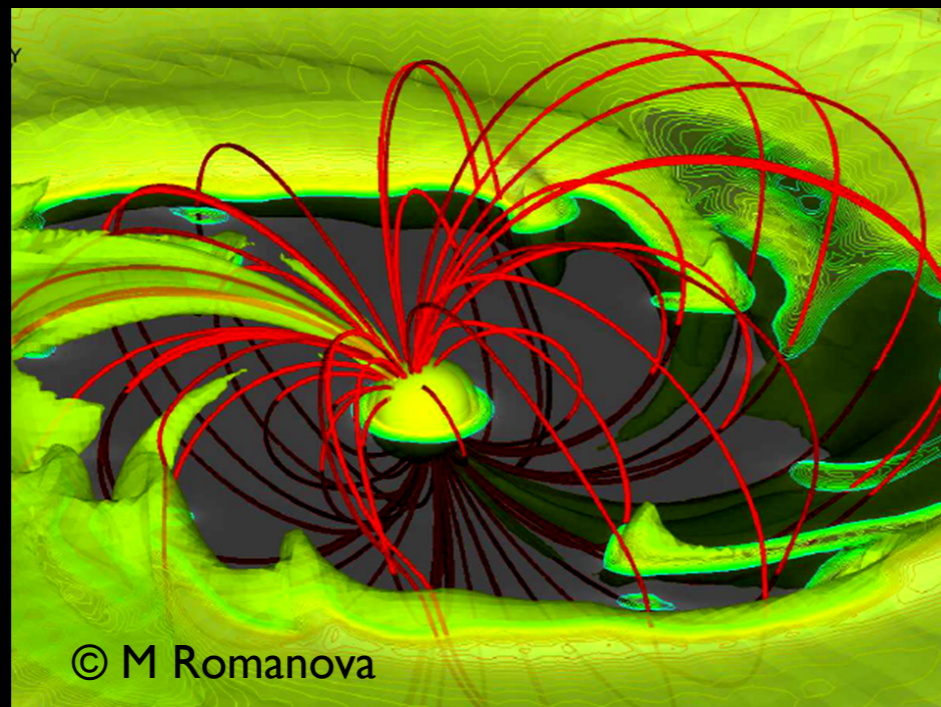
SPIRou

First science results

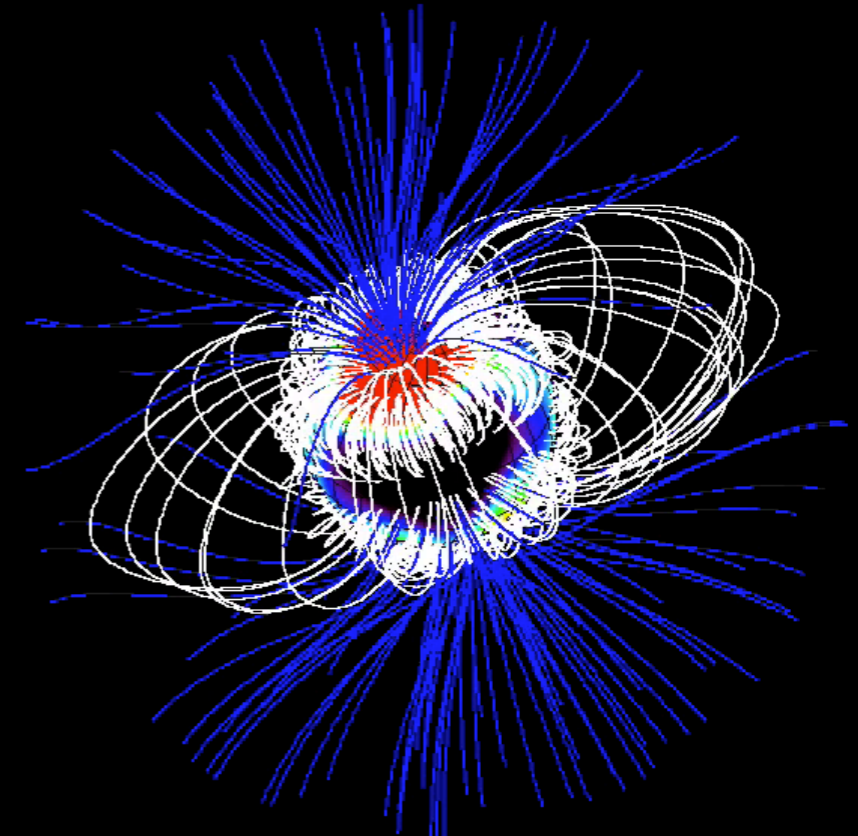


star / planet formation

detect Zeeman signatures in the spectral lines of the young star
collect times series of modulated line profiles & Zeeman signatures
recover spot patterns & magnetic topologies using tomographic imaging
investigate accretion from spectral proxies (eg H α , Pa γ , Pa β , Br γ)
look for close-in giants after filtering activity from radial velocity curves



© M Romanova



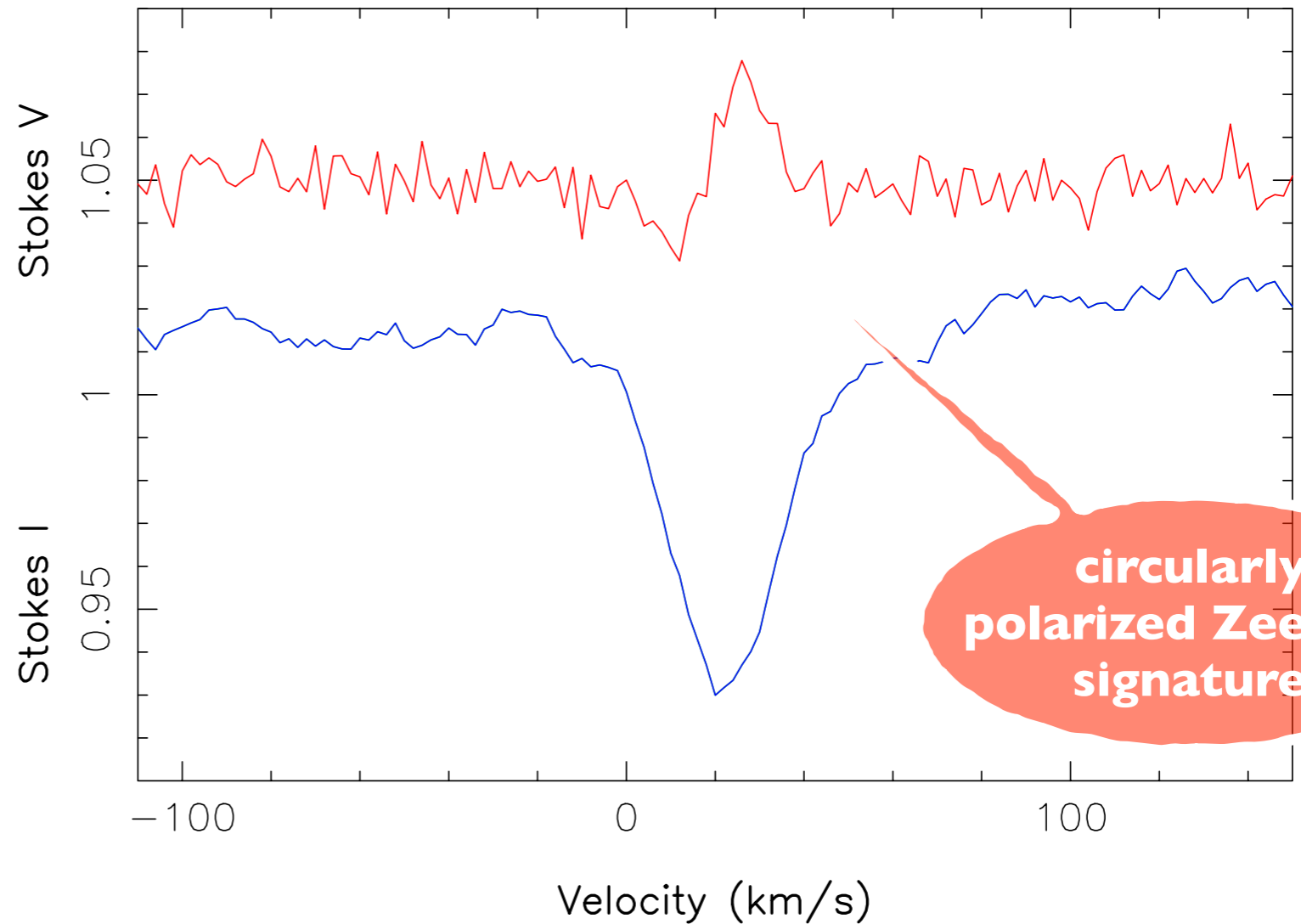
SPIROU

First science results



TWA 13A
(disc-less T Tauri star)
Zeeman signature

Zeeman signature of TWA 13A, 2019 Apr 26



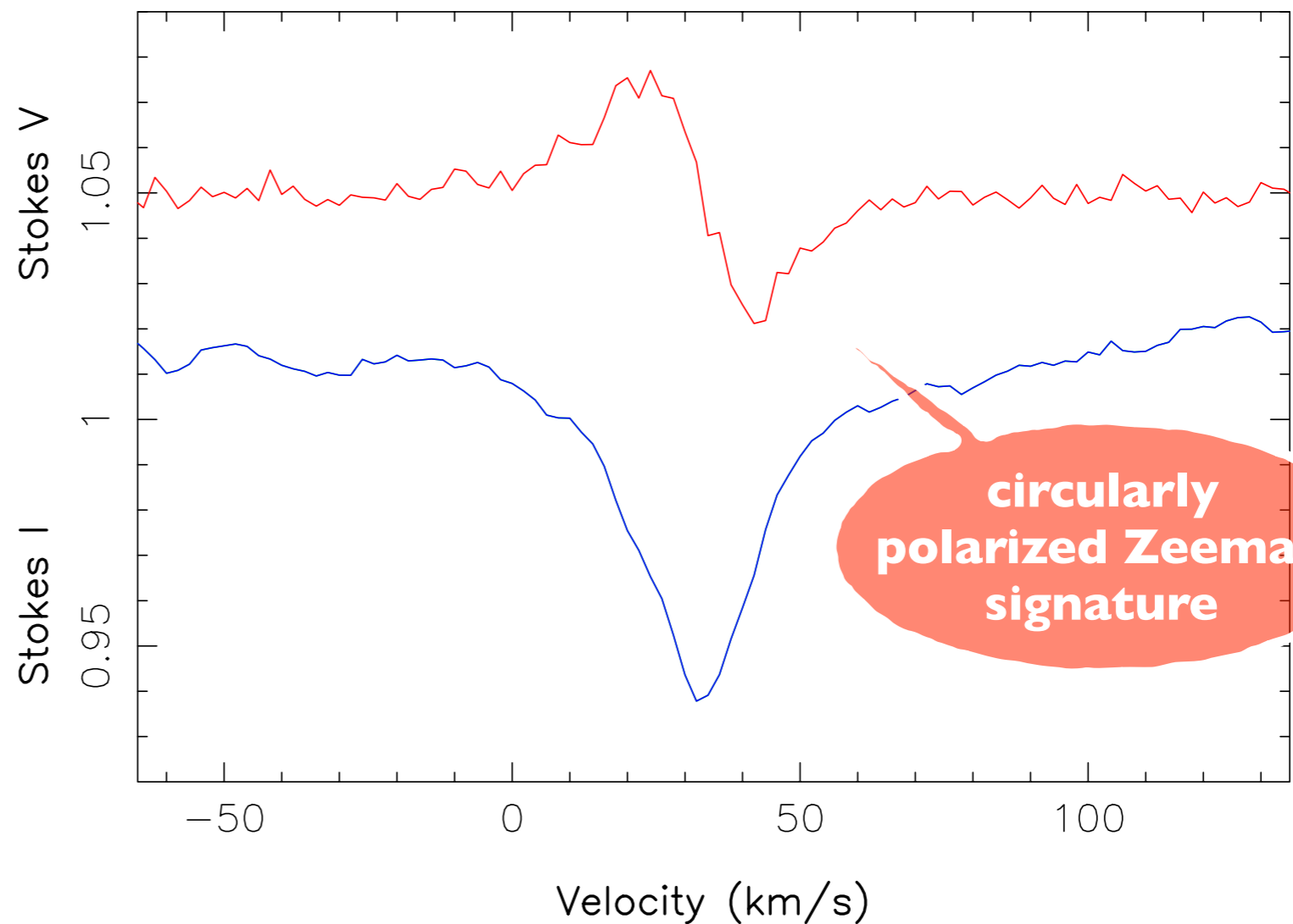
SPIRou

First science results



TW Hya
(classical T Tauri star)
Zeeman signature

Zeeman signature of TW Hya, 2018 May 24



**circularly
polarized Zeeman
signature**

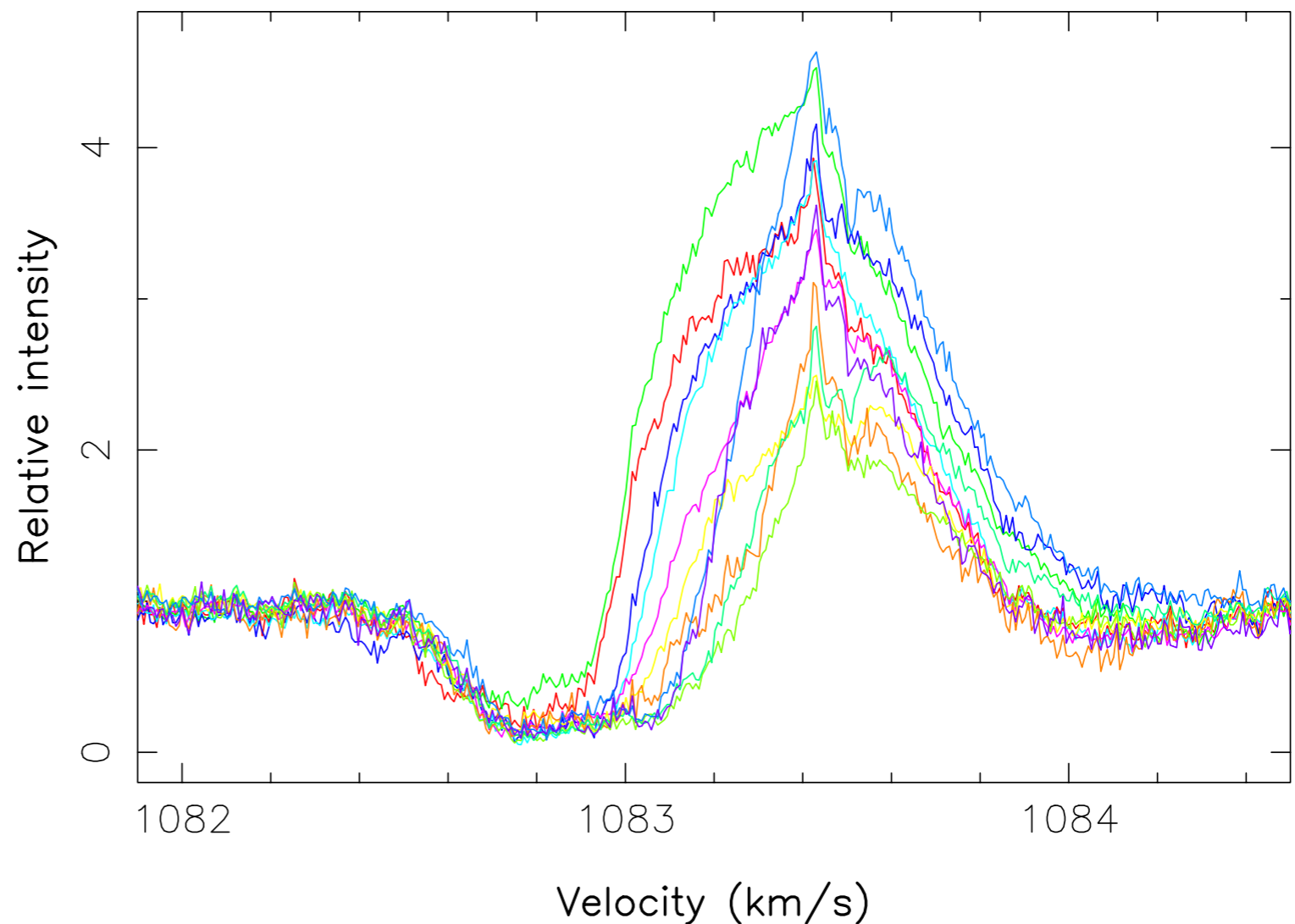
SPIRou

First science results



**TW Hya
(classical T Tauri star)
1083 nm He I accretion &
wind proxy**

TW Hya, 2019 Apr, 1083 nm He I line



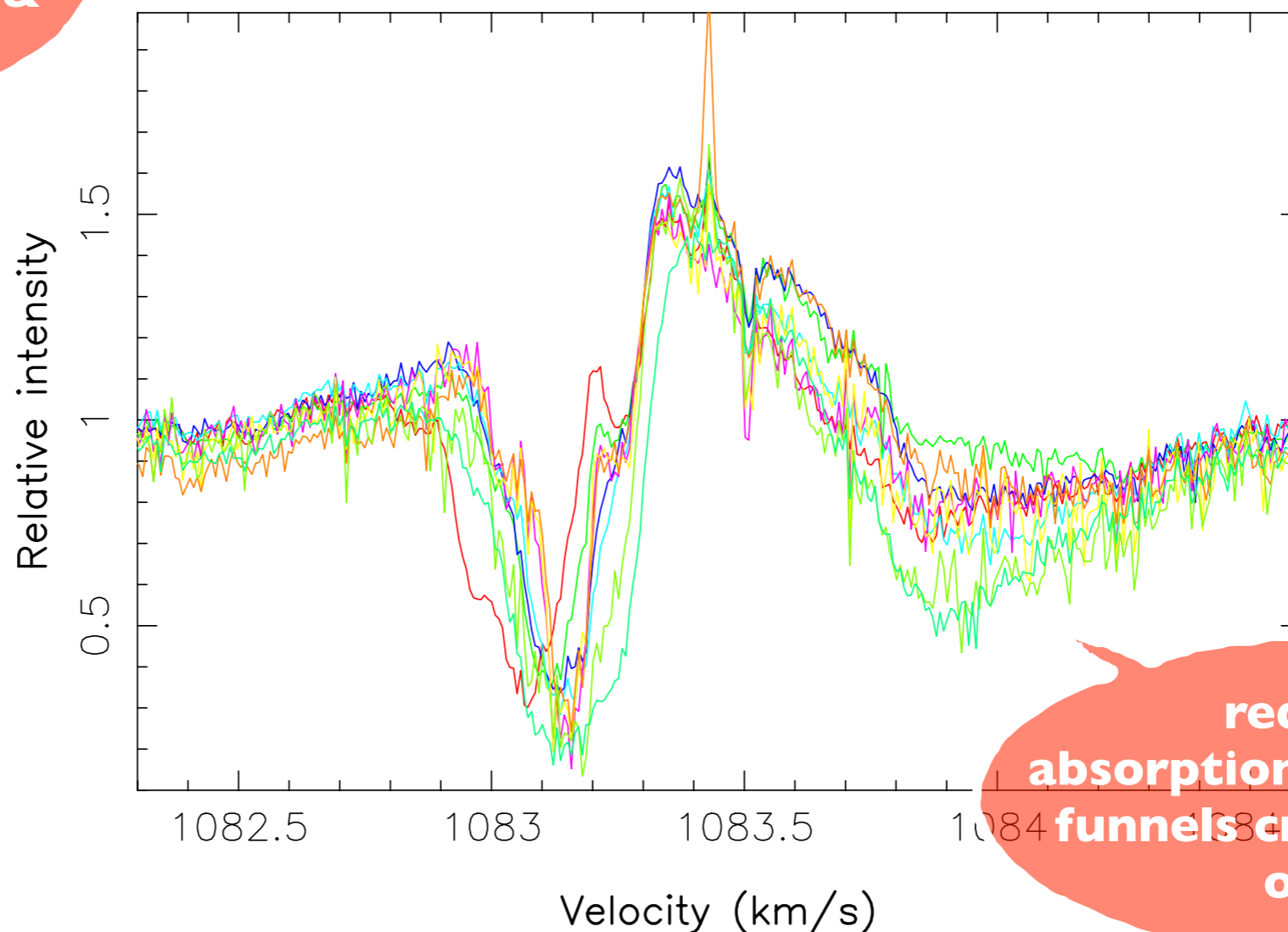
SPIRou

First science results



**V2129 Oph
(classical T Tauri star)
1083 nm He I accretion &
wind proxy**

V2129 Oph, 2018 July–August, 1083 nm He line



**red-shifted
absorption from accretion
funnels crossing the line
of sight**



SPIROU

Outreach



LE LABO Scénario, Dessin & Couleur: JEAN-YVES DUHOO

QUAND LA LUMIÈRE PARLE

À TOULOUSE, À L'INSTITUT DE RECHERCHE EN ASTROPHYSIQUE ET PLANÉTOLOGIE (IRAP), ET À L'OBSERVATOIRE MIDI-PYRÉNÉES (OMP)...

... ON MET LA DERNIÈRE MAIN AU PROJET SPIROU, LE SPECTROPOLARIMÈTRE INFRAROUGE, AVANT SON DÉPART POUR HAWAÏ.

À TOULOUSE, ON EST UNE DIZAINE À TRAVAILLER SUR LE PROJET, INGÉNIEURS, SCIENTIFIQUES, TECHNICIENS...

ET AVEC LE CANADA ET HAWAÏ, UNE TRENTAINE.

... TOUS EN TRAIN DE TRAVAILLER AUX DERNIERS TESTS DE L'APPAREIL.

DES ÉTOILES PLUS CHAUDES QUE LE SOLEIL, PLUS CHAUDES QUE DES AMPOULES, ÉMETTENT DE LA LUMIÈRE INFRAROUGE.

POUR OBSERVER LA LUMIÈRE INFRAROUGE, IL FAUT REFRROIDIR À -200°C... CAR TOUT CE QUI EST CHAUD RAYONNE DANS L'INFRAROUGE.

ÇA SE PASSE DANS LA SALLE BLANCHE. L'AIR EST CONDITIONNÉ, PAS DE POUSSIÈRE!

PAS DE POUSSIÈRE, ET UNE TEMPÉRATURE STABLE...

HORS DE LA SALLE BLANCHE, ON FAIT CONNAISSANCE AVEC L'ÉQUIPE...

DEDANS, C'EST PLUS DIFFICILE DE SE RECONNAÎTRE!

charlotte →
masque →
blouse →
gants →
surchauffures →

LE POLARIMÈTRE VA CAPTER LA LUMIÈRE DES ÉTOILES. IL EST PLACÉ SUR LE TÉLESCOPE... LE SPECTROGRAPHE, LUI, SE TROUVE 2 ÉTAGES PLUS BAS. C'EST LUI QUI VA ANALYSER LA LUMIÈRE ET APPORTER DES INFORMATIONS SUR LES PLANÈTES OBSERVÉES. ONT-ELLES UNE ATMOSPHÈRE, DE QUOI EST-ELLE CONSTITUÉE ?

LES ÉTOILES PLUS CHAUDES QUE LE SOLEIL, PLUS CHAUDES QUE DES AMPOULES, ÉMETTENT DE LA LUMIÈRE INFRAROUGE.

POUR OBSERVER LA LUMIÈRE INFRAROUGE, IL FAUT REFRROIDIR À -200°C... CAR TOUT CE QUI EST CHAUD RAYONNE DANS L'INFRAROUGE.

UNE FOIS REFRROIDI, SPIROU N'EST PLUS ÉBLOUI PAR LE RAYONNEMENT AMBIANT, ET PEUT DÉTECTER LA LUMIÈRE D'ÉTOILES, MÊME PEU BRILLANTES.

LES PRISMES TRANSLUCIDES DÉCOMPOSENT LA LUMIÈRE EN PLUSIEURS COULEURS, OU LONGUEUR D'ONDES.

INDICATIONS QUI VONT NOUS RENSEIGNER SUR LA COMPOSITION DE L'ATMOSPHÈRE DE L'ÉTOILE, VOIRE DES PLANÈTES. ICI, ON OBSERVE LA PRÉSENCE D'HYDROGÈNE ET DE FER...

MESURER LE CHAMP MAGNÉTIQUE PARVIENT À ENGENDRER.

... QUI VONT DISPERSER LA LUMIÈRE DE L'ÉTOILE EN UN DOUBLE ARC-EN-CIEL.

LES PRISMES TRANSLUCIDES DÉCOMPOSENT LA LUMIÈRE EN PLUSIEURS COULEURS, OU LONGUEUR D'ONDES.

INDICATIONS QUI VONT NOUS RENSEIGNER SUR LA COMPOSITION DE L'ATMOSPHÈRE DE L'ÉTOILE, VOIRE DES PLANÈTES. ICI, ON OBSERVE LA PRÉSENCE D'HYDROGÈNE ET DE FER...

MESURER LE CHAMP MAGNÉTIQUE PARVIENT À ENGENDRER.

LES PLANÈTES ROUGES VOISINES DU SYSTÈME SOLAIRE, SPIROU VA MESURER, À LA MANIÈRE D'UNE ÉTOILE, LES PERTURBATIONS INDUITES DANS LA LUMIÈRE DE L'ÉTOILE OBSERVÉE. CES PERTURBATIONS NE SONT PAS DÉTECTABLES, POUR ÊTRE DÉTECTABLES, IL FAUT STABILISER LA TEMPÉRATURE DU LABORATOIRE À MOINS QU'UN MILLIÈME DE DEGRÉ!

TOUT EST RECOUVERT DE FEUILLES ISOLANTES.

PLUSIEURS TONNES DE MATÉRIEL FRAGILE QUI PART POUR HAWAÏ.

ELLE PÈSE QUAND MÊME 2 TONNES!

7 ANS QUE CE PROJET EST EN CHANTIER! ET LÀ...

À 4200 MÈTRES D'ALTITUDE!

... ET ELLE VA NOUS PERMETTRE DE FAIRE PARLER LA LUMIÈRE!

COMMENT LA TERRE S'EST FORMÉE, LE SYSTÈME SOLAIRE... COMMENT LA VIE EST APPARUE!

SPIRou

Conclusions



SPIRou @ CFHT

installed in 2018 after ~8 yr of engineering design, integration & tests
science observations started in 2019a, most demanded CFHT instrument
performances mostly nominal, a few upgrades still needed



SPIRou

Conclusions

SPIRou @ CFHT

installed in 2018 after ~8 yr of engineering design, integration & tests
science observations started in 2019a, most demanded CFHT instrument performances mostly nominal, a few upgrades still needed

first results to come

velocimetric monitoring & planetary transits of M dwarfs
modeling magnetic activity & velocimetric jitter of M dwarfs
magnetic fields, accretion & hot Jupiters of young T Tauri stars
ERC-funded PhDs & postdocs

SPIP @ TBL

funded by Région Occitanie, to be installed at TBL in 2021
essential for dense phase coverage in dark time

