

Mirando al interior de los exoplanetas

Caracterización atmosférica

Doctorando: Manuel Lampón González-Albo
Directora: Luisa M. Lara López



Contenidos



1. Introducción
2. Objetivo principal
3. Metodología
4. Resultados que esperamos

1. Introducción: ¿Porqué estudiar exoplanetas?

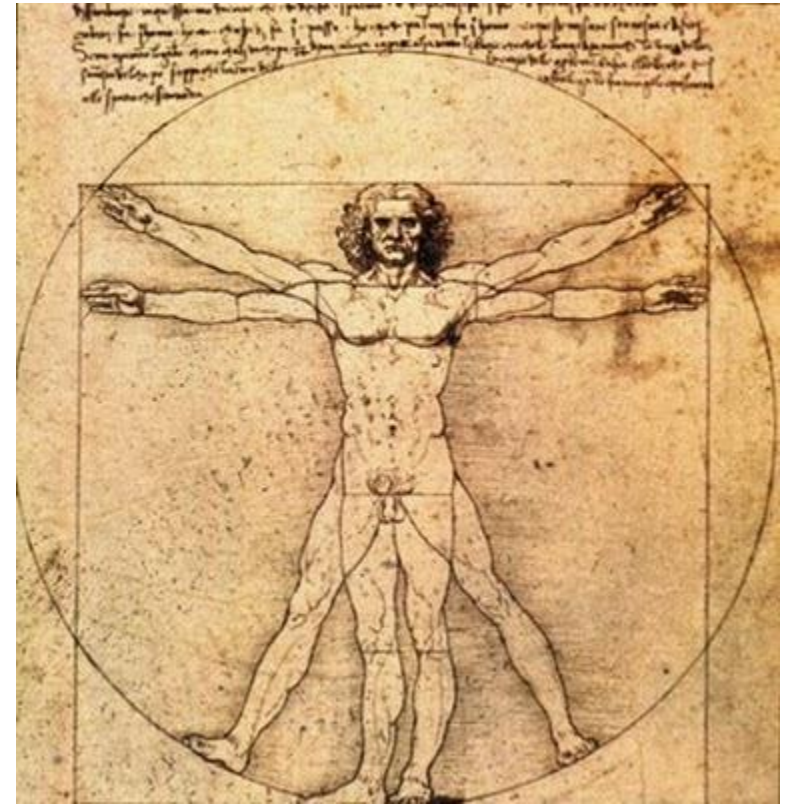
1. Introducción: ¿Porqué estudiar exoplanetas?

¿Quiénes somos?

¿Dónde vivimos?

¿Qué lugar ocupamos en el universo?

¿Estamos realmente solos?



1. Introducción: ¿Porqué estudiar exoplanetas?

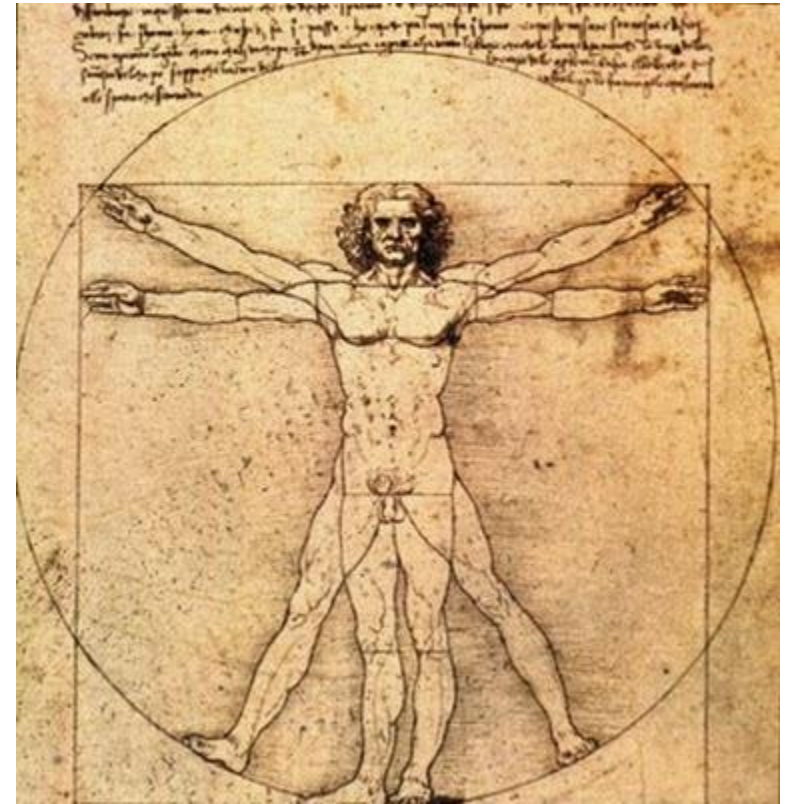
¿Quiénes somos?

¿Dónde vivimos?

¿Qué lugar ocupamos en el universo?

¿Estamos realmente solos?

¿Son la tierra y el sistema solar lugares excepcionales en la Galaxia?, ¿por qué?



1. Introducción: ¿Porqué estudiar exoplanetas?

¿Quiénes somos?

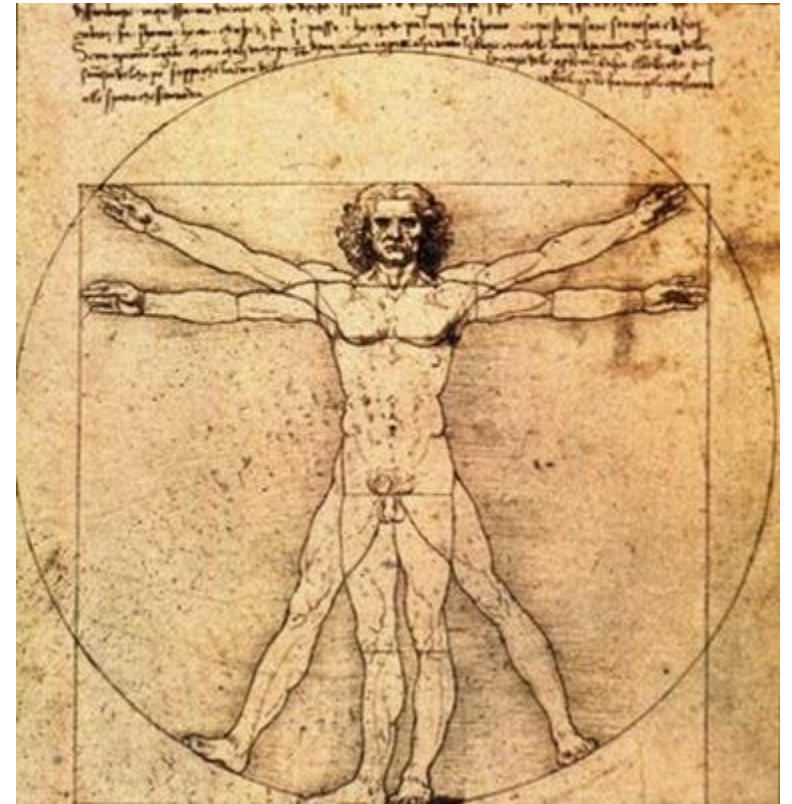
¿Dónde vivimos?

¿Qué lugar ocupamos en el universo?

¿Estamos realmente solos?

¿Son la tierra y el sistema solar lugares excepcionales en la Galaxia?, ¿por qué?

En otro orden... ¿Cómo se formo el Sistema Solar?, ¿y los planetas?, ¿y la Tierra?, ...



1. Introducción: ¿Porqué estudiar exoplanetas?

¿Quiénes somos?

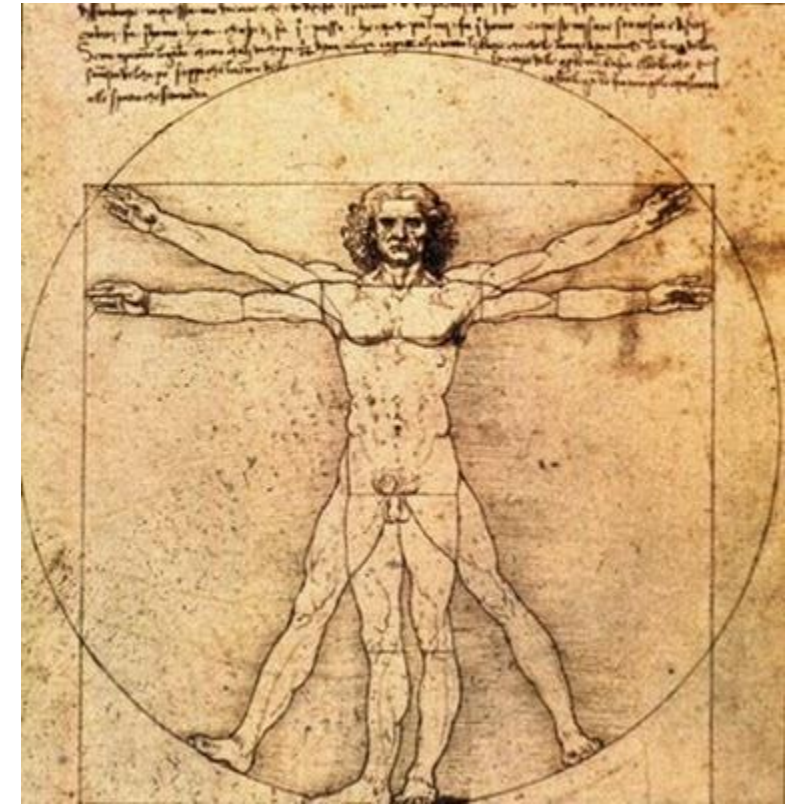
¿Dónde vivimos?

¿Qué lugar ocupamos en el universo?

¿Estamos realmente solos?

¿Son la tierra y el sistema solar lugares excepcionales en la Galaxia?, ¿por qué?

En otro orden... ¿Cómo se formo el Sistema Solar?, ¿y los planetas?, ¿y la Tierra?, ...

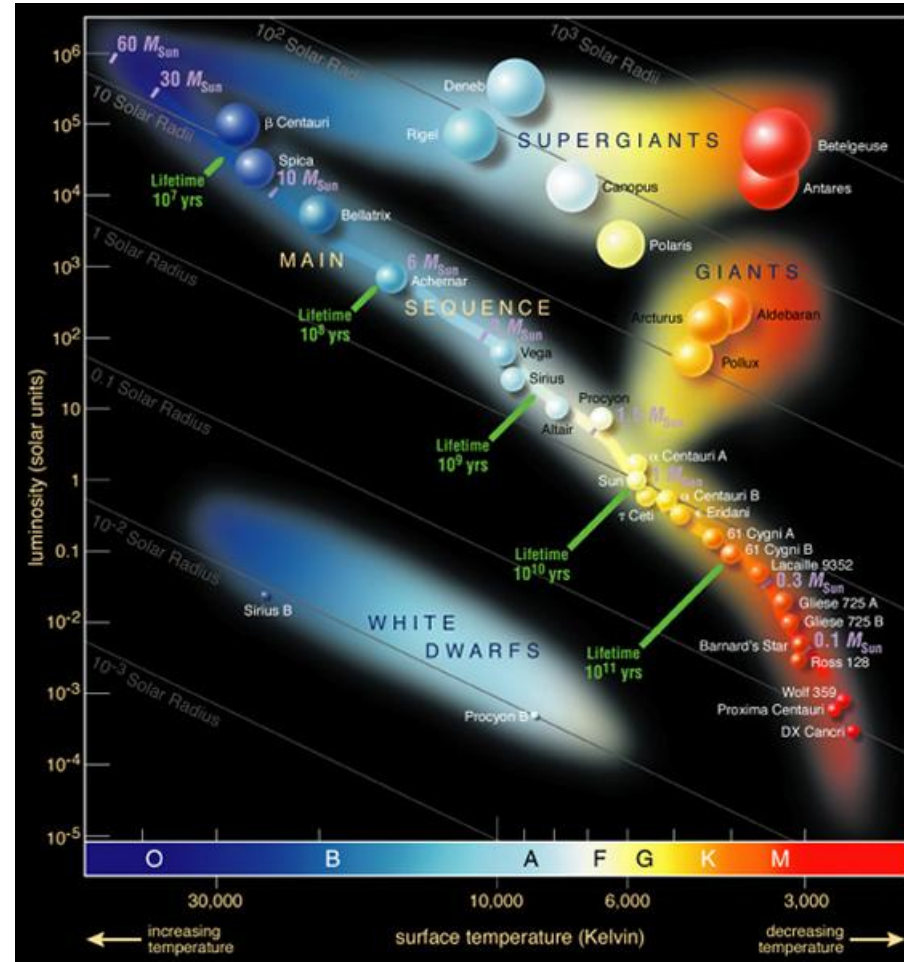


¡En el Sistema Solar solo hay 8 planetas!



No es posible hacer estadística

1. Introducción: ¿Porqué estudiar exoplanetas?



1. Introducción: ¿Porqué estudiar exoplanetas?

‘Our knowledge of Earth and the Solar System planets will always exceed our knowledge of any individual exoplanet, but the diversity of exoplanets enables the statistical study of planets to crack difficult problems in planetary science.’

PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC, 127:311–327, 2015 March
© 2015. The Astronomical Society of the Pacific. All rights reserved. Printed in U.S.A.

Conference Highlights

Characterizing Transiting Planet Atmospheres through 2025

N. B. COWAN,¹ T. GREENE,² D. ANGERHAUSEN,³ N. E. BATALHA,⁴ M. CLAMPIN,³ K. COLÓN,⁵ I. J. M. CROSSFIELD,⁶
J. J. FORTNEY,⁷ B. S. GAUDI,⁸ J. HARRINGTON,⁹ N. IRO,¹⁰ C. F. LILLIE,¹¹ J. L. LINSKY,¹² M. LOPEZ-MORALES,¹³
A. M. MANDELL,² AND K. B. STEVENSON,¹⁴ ON BEHALF OF EXOPAG SAG-10

1. Introducción: Lo que sabemos

1. Introducción: Lo que sabemos

¡3610 exoplanetas confirmados!

(en 2704 sistemas planetarios / 610 sistemas multiples)
(Exoplanets.eu 8/6/2017).

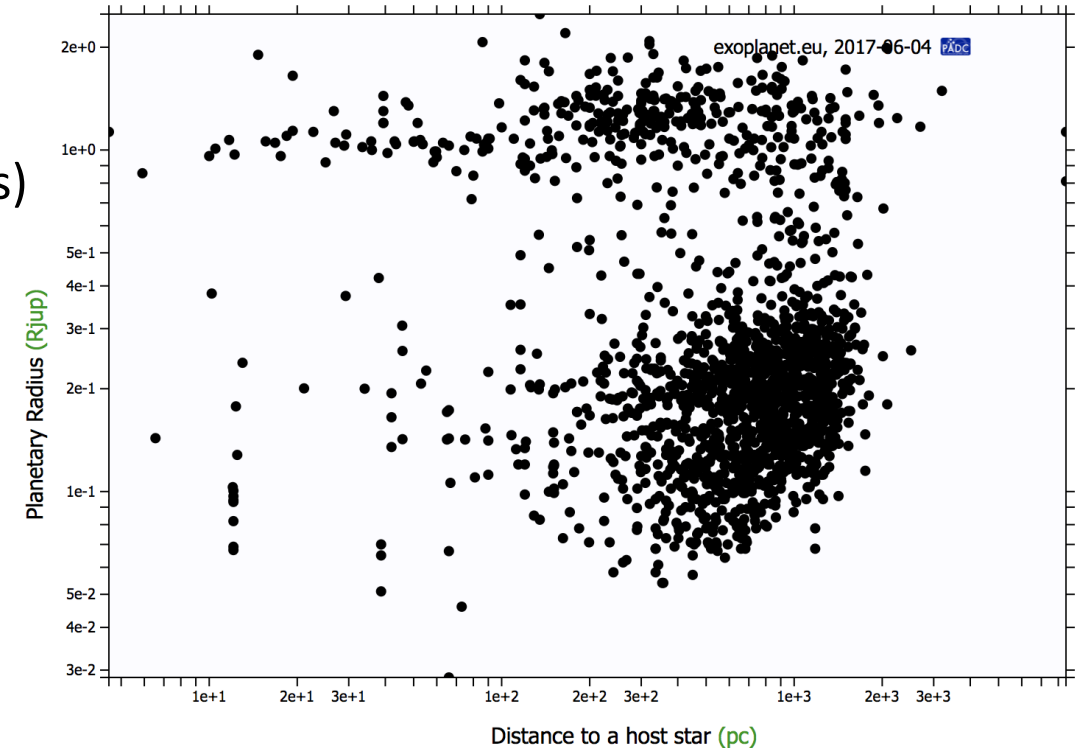
1. Introducción: Lo que sabemos

¡3610 exoplanetas confirmados!

(en 2704 sistemas planetarios / 610 sistemas multiples)
(Exoplanets.eu 8/6/2017).

Existe una gran diversidad (masas, radios, orbitas)

Diferentes tipos de estrellas (incluidos pulsares,
binarias,...etc.)



1. Introducción: Que expectativas tenemos

La mayor parte de las estrellas tipo F,K,M tienen uno o mas planetas

1. Introducción: Que expectativas tenemos

La mayor parte de las estrellas tipo F,K,M tienen uno o mas planetas

La Via Lactea puede contener mas de 10^{12} exoplanetas
(Göran Pilbratt, ESA ARIEL Study Scientist)

1. Introducción: Lo que no sabemos

No llegamos a relacionar su presencia, su tamaño o su parámetros orbitales con la naturaleza de su estrella.



ARIEL: Assessment Study Report

1. Introducción: Lo que no sabemos

No llegamos a relacionar su presencia, su tamaño o sus parámetros orbitales con la naturaleza de su estrella.

No sabemos como son “por dentro” (temperatura, edad).



ARIEL: Assessment Study Report

1. Introducción: Lo que no sabemos

No llegamos a relacionar su presencia, su tamaño o sus parámetros orbitales con la naturaleza de su estrella.

No sabemos como son “por dentro” (temperatura, edad).

No podemos distinguir claramente entre planetas rocosos y de hielo (degeneración de la densidad).



ARIEL: Assessment Study Report

1. Introducción: Lo que no sabemos

No llegamos a relacionar su presencia, su tamaño o sus parámetros orbitales con la naturaleza de su estrella.

No sabemos como son “por dentro” (temperatura, edad).

No podemos distinguir claramente entre planetas rocosos y de hielo (degeneración de la densidad).

No tenemos claros los procesos de formación.

Y un largo etcetera...



ARIEL: Assessment Study Report

2. Objetivo principal de nuestro proyecto

Modelar las atmósferas de una muestra de exoplanetas con el fin de encontrar parámetros clave que permitan su caracterización

3. Metodología: Cómo lo haremos

3. Metodología: Cómo lo haremos

- 1- Desarrollando modelos atmosféricos 1D en equilibrio termodinámico
- 2- Desarrollando modelos atmosféricos 1D con procesos de desequilibrio
- 3- Diseñando las bases de datos: termodinámica, termoquímica y de cinética química
- 4- Seleccionando una muestra de exoplanetas adecuada
- 5- Caracterizando las atmósferas de los exoplanetas de la muestra

3. Metodología:

Modelos atmosféricos
1D en equilibrio
termodinámico

Describen la composición aproximada para:

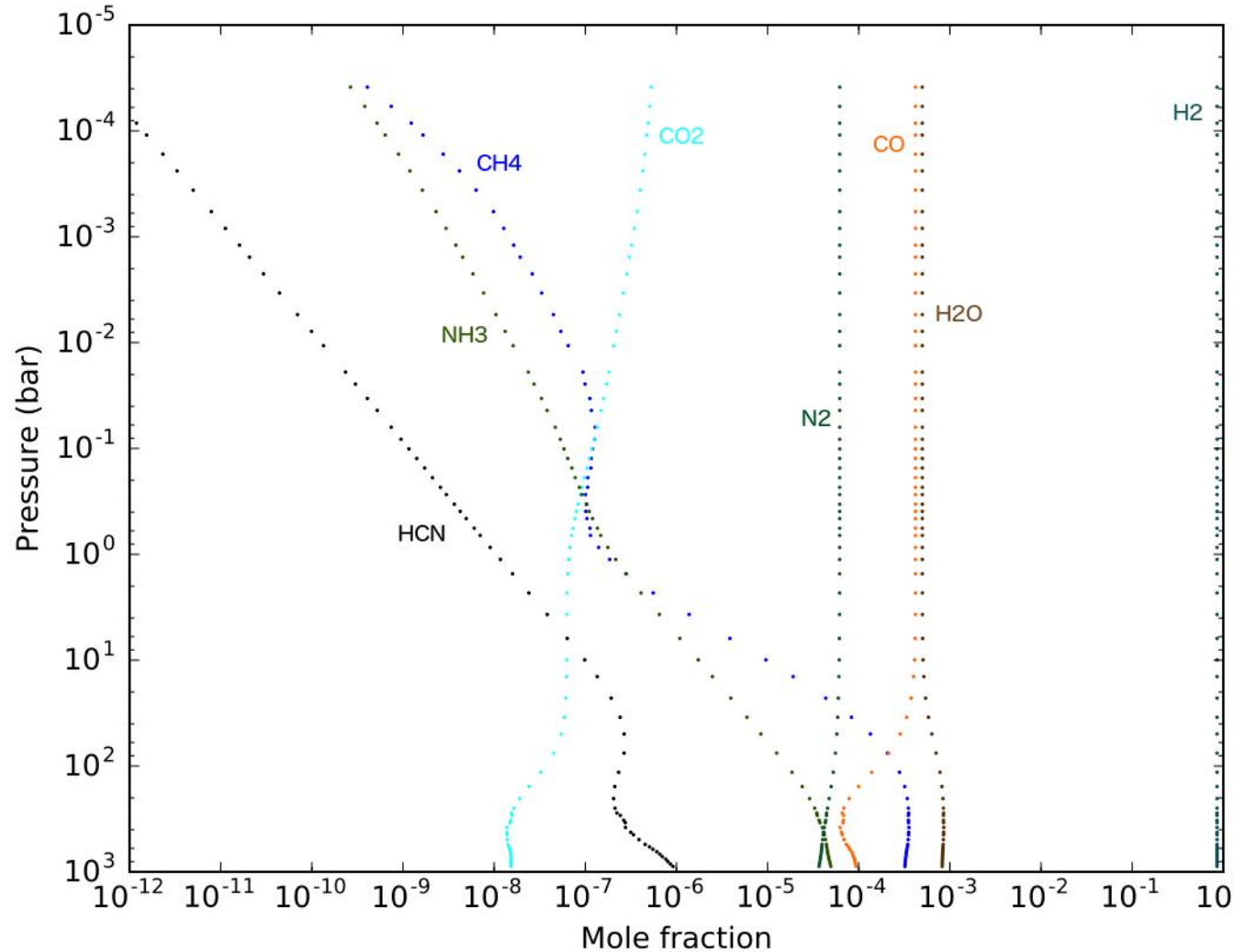
- Planetas muy calientes ($> 1500K$) en sus caras diurna y nocturna.
- Planetas calientes ($\approx 750 - 1500K$) en la cara diurna.
- Son un buen punto de partida para el resto de exoplanetas (con procesos de desequilibrio importantes)

Basados en el cálculo de la energía libre de Gibbs

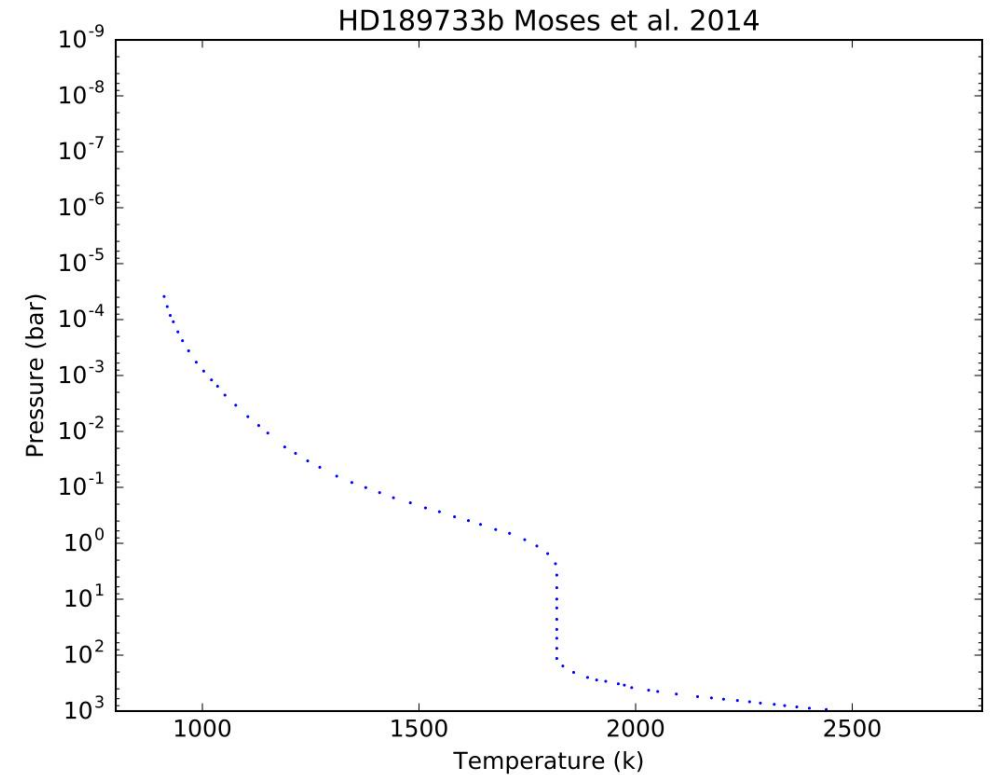
No permiten evolución temporal

PET (*“Procesador de modelos en Equilibrio Termodinámico”*)

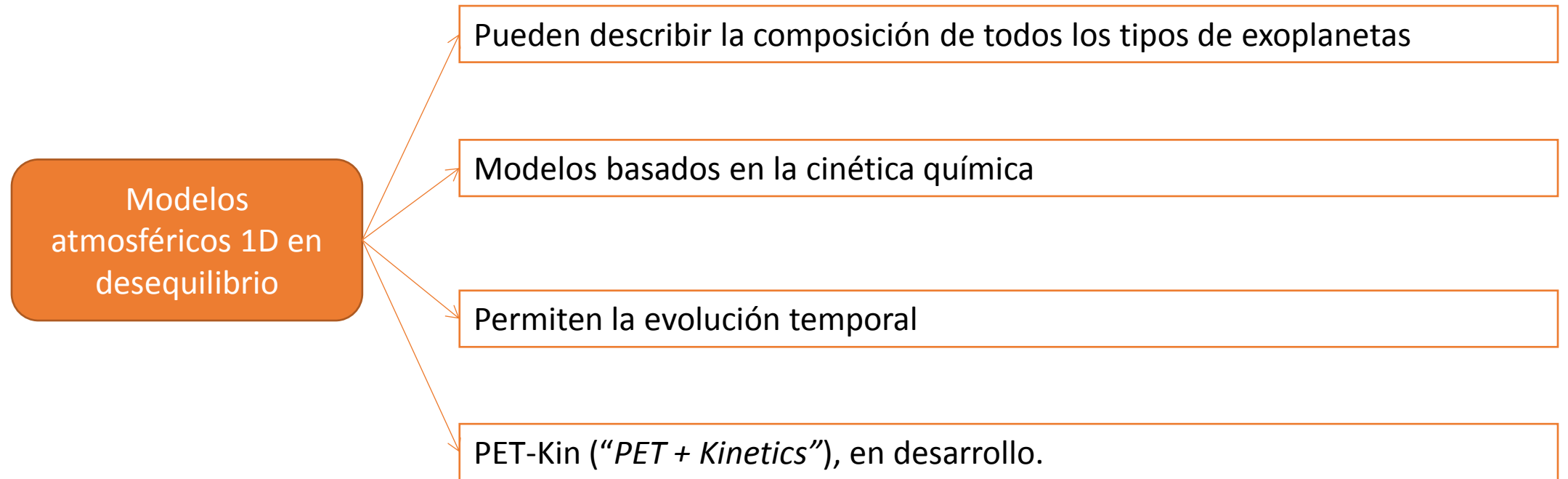
3. Metodología:



Hot Jupiter HD189733b
Modelo 1D en equilibrio termodinámico
desarrollado con PET.



3. Metodología:

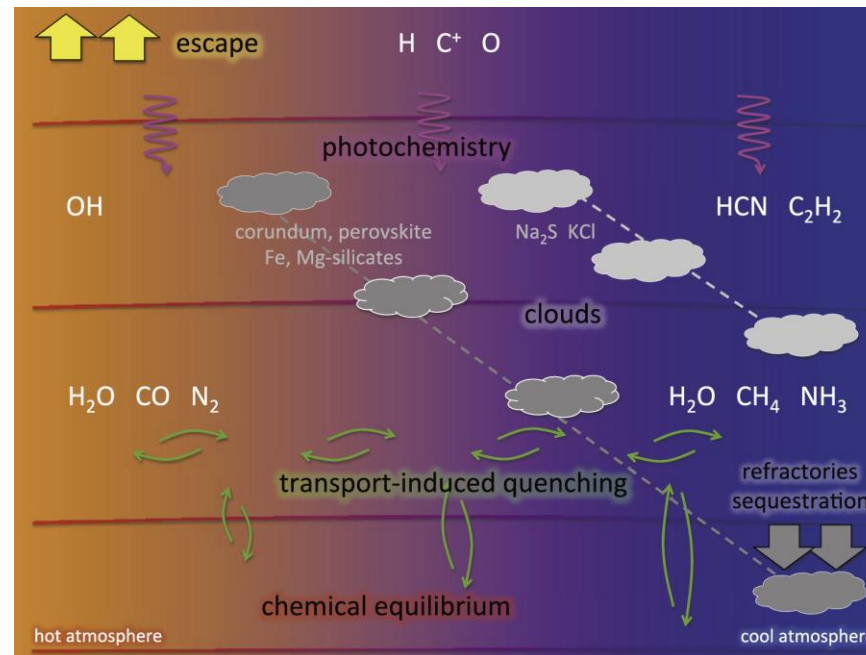


3. Metodología:

Modelos
atmosféricos 1D en
desequilibrio

Introducción de procesos
de disequilibrio

- ✓ Transporte de material
- ✓ Fotoquímica
- ✓ Nubes, nieblas
- ✓ Entrada de material
- ✓ etc.



3. Metodología:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = P_i - L_i - \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \Phi_i)}{\partial r}$$

n_i : number density

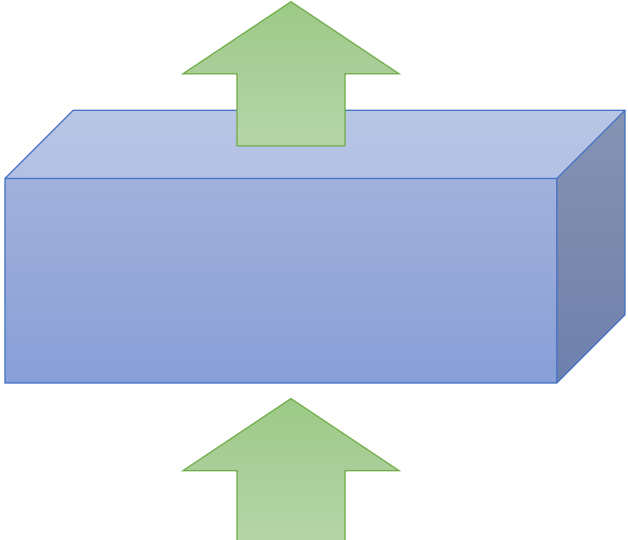
t : time

P_i : species i molecular production rate

L_i : species i molecular loss rate

r : height

Φ_i : in/out species i molecular flux on the layer



The diagram illustrates a 3D rectangular layer, likely representing a plasma or gas layer. A vertical blue arrow labeled 'r' indicates the height or radial coordinate. Two large green arrows point upwards from the bottom and top surfaces of the layer, representing the molecular flux Φ_i entering and leaving the layer.

3. Metodología:

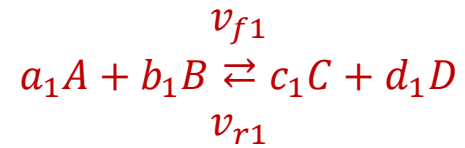
Production and loss ratios:

$$P_i = \sum P_{chem} + P_{ph.chem} + P_{other}$$

$$L_i = \sum L_{chem} + L_{ph.chem} + L_{other}$$

3. Metodología:

E.g. Bimolecular reaction:



$$v_{f1} = -\frac{1}{a_1} \frac{d[A]_{v_{f1}}}{dt} = -\frac{1}{b_1} \frac{d[B]_{v_{f1}}}{dt} = +\frac{1}{c_1} \frac{d[C]_{v_{f1}}}{dt} = +\frac{1}{d_1} \frac{d[D]_{v_{f1}}}{dt}$$

$$v_{r1} = +\frac{1}{a_1} \frac{d[A]_{v_{r1}}}{dt} = +\frac{1}{b_1} \frac{d[B]_{v_{r1}}}{dt} = -\frac{1}{c_1} \frac{d[C]_{v_{r1}}}{dt} = -\frac{1}{d_1} \frac{d[D]_{v_{r1}}}{dt}$$

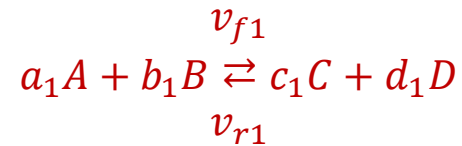
$$\frac{d[A]_1}{dt} = -a_1 v_{f1} + a_1 v_{r1}$$

$$P_{Chem [A]} = a_1 v_{r1}$$

$$L_{Chem [A]} = a_1 v_{f1}$$

3. Metodología:

E.g. Bimolecular reaction:



$$v_{f1} = -\frac{1}{a_1} \frac{d[A]_{v_{f1}}}{dt} = -\frac{1}{b_1} \frac{d[B]_{v_{f1}}}{dt} = +\frac{1}{c_1} \frac{d[C]_{v_{f1}}}{dt} = +\frac{1}{d_1} \frac{d[D]_{v_{f1}}}{dt}$$

$$v_{r1} = +\frac{1}{a_1} \frac{d[A]_{v_{r1}}}{dt} = +\frac{1}{b_1} \frac{d[B]_{v_{r1}}}{dt} = -\frac{1}{c_1} \frac{d[C]_{v_{r1}}}{dt} = -\frac{1}{d_1} \frac{d[D]_{v_{r1}}}{dt}$$

$$\frac{d[A]_1}{dt} = -a_1 v_{f1} + a_1 v_{r1}$$

Arrhenius equation:
 $k = F e^{-E_a/RT}$

$$v_{f1} = k_f [A]^{a_1} [B]^{b_1}$$

$$v_{r1} = k_r [C]^{c_1} [D]^{d_1}$$

$$P_{Chem [A]} = a_1 v_{r1}$$

$$L_{Chem [A]} = a_1 v_{f1}$$

Modified Arrhenius equation:
 $k = G T^n e^{-C/RT}$

Others ...

3. Metodología:

E.g. Photo-dissociation:



$$P_{Ph.Chem [B]} = b v_{ph} = b J [A]$$

$$L_{Ph.Chem [A]} = v_{ph} = J [A]$$

3. Metodología:

E.g. Photo-dissociation:



$$P_{Ph.Chem} [B] = b v_{ph} = b J [A]$$

$$L_{Ph.Chem} [A] = v_{ph} = J [A]$$

$J_i(r)$: photo-dissociation
coefficient

$$J_i(r) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \sigma_{i,\lambda} F(r, \lambda) d\lambda$$

$\sigma_{i,\lambda}$: absorption
cross section

$F(r, \lambda)$: stellar flux at height z
and wavelength λ

3. Metodología:

E.g. Photo-dissociation:



$$P_{Ph.Chem} [B] = b v_{ph} = b J [A]$$

$$L_{Ph.Chem} [A] = v_{ph} = J [A]$$

$J_i(r)$: photo-dissociation
coefficient

$$J_i(r) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \sigma_{i,\lambda} F(r, \lambda) d\lambda$$

$\sigma_{i,\lambda}$: absorption
cross section

$F(r, \lambda)$: stellar flux at height z
and wavelength λ

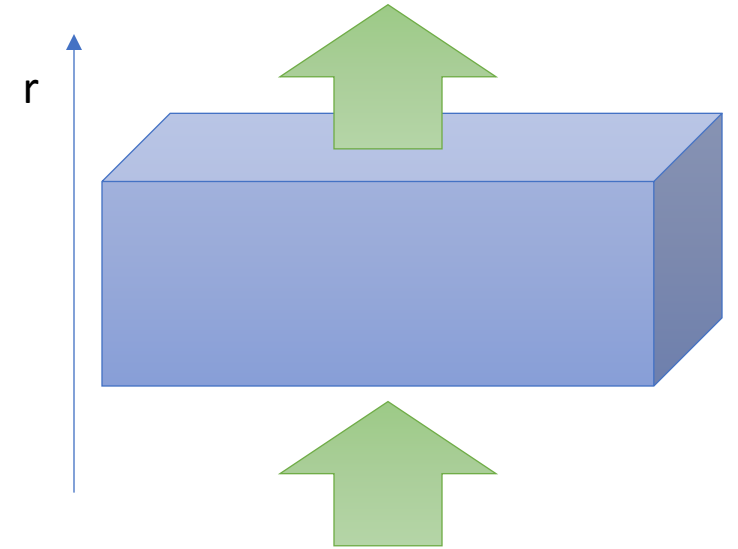
$n_i(r')$ number density

$$F(r, \lambda) = F_{\infty}(\lambda) \exp \left[- \int_{r'=r}^{+\infty} \left(\sum_i \sigma_{i,\lambda} n_i(r') \alpha_z \right) dr' \right]$$

α_z zenital Chapman stellar incident
flux function

3. Metodología:

Material transport:



α_i thermal diffusion coefficient

$$\Phi_i = -n_i D_i \left(\frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial r} + \frac{1 + \alpha_i}{T} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \right) - n_i K \left(\frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial r} + \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{H} \right)$$

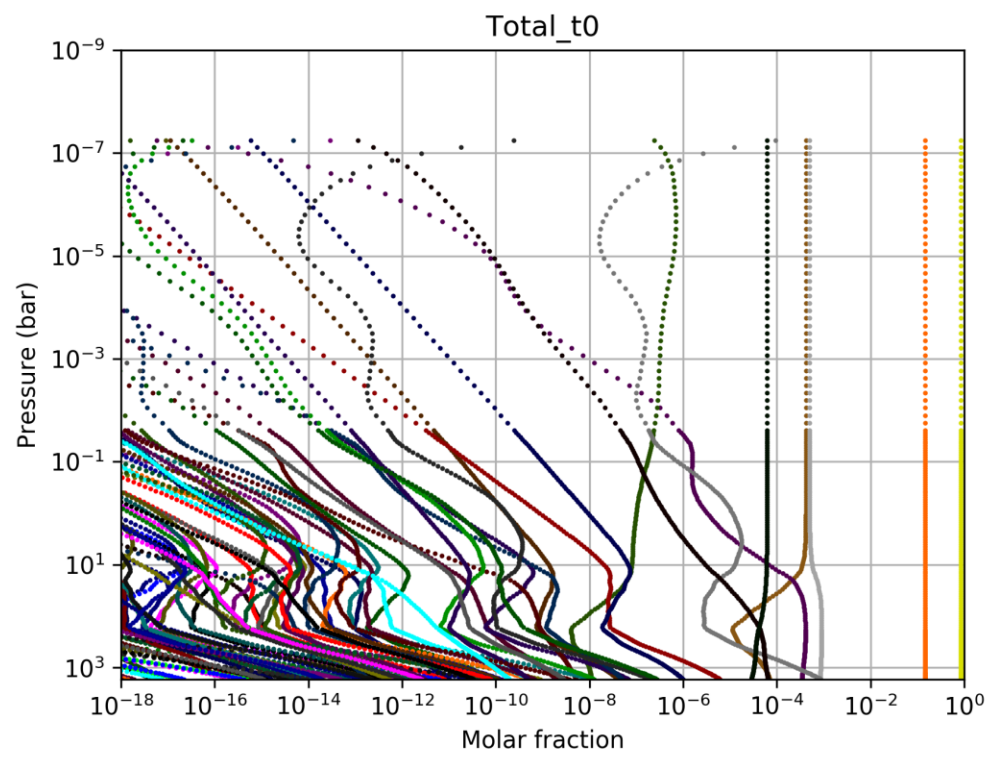
D_i : molecular diffusion coefficient

H_i species i scale height

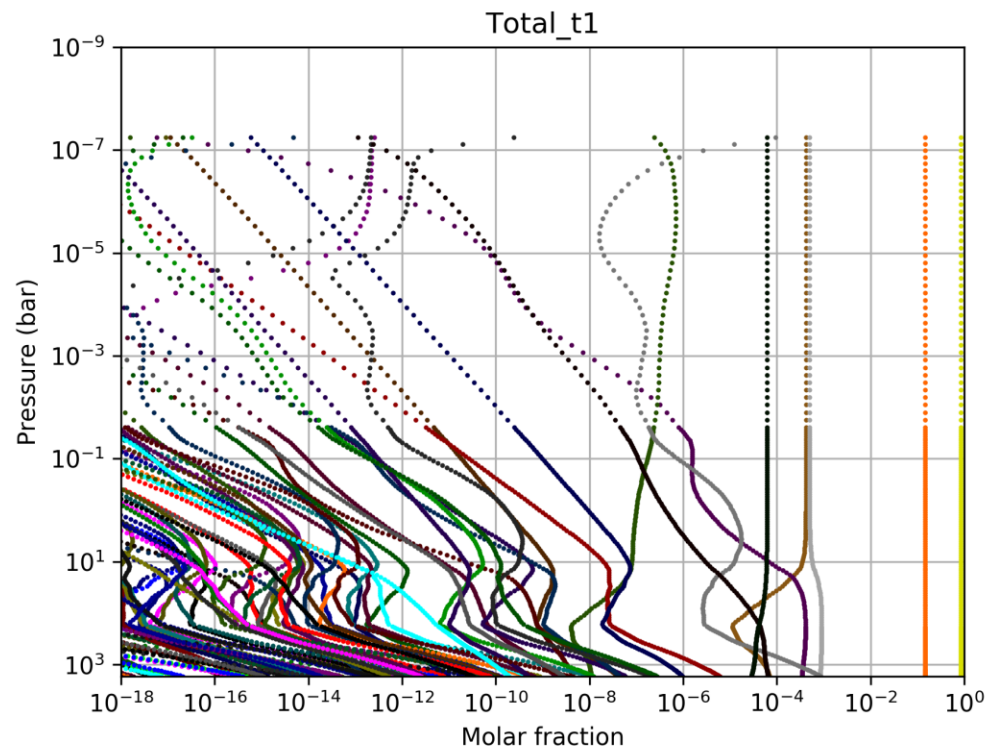
K eddy diffusion coefficient

H global scale height

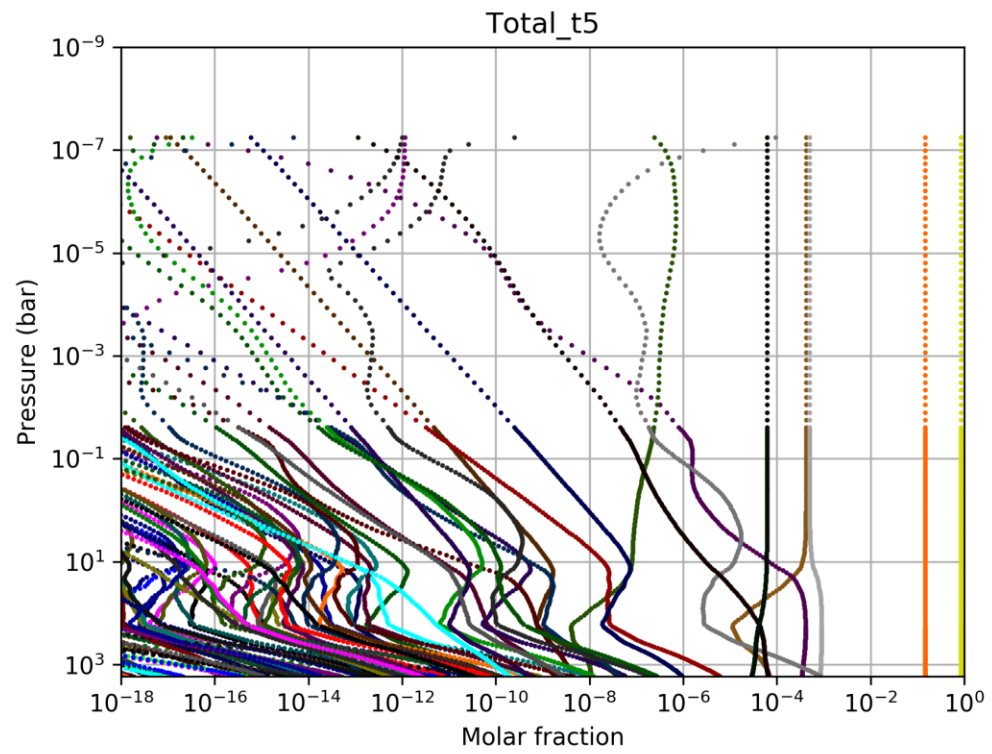
$t = 0\text{s}$



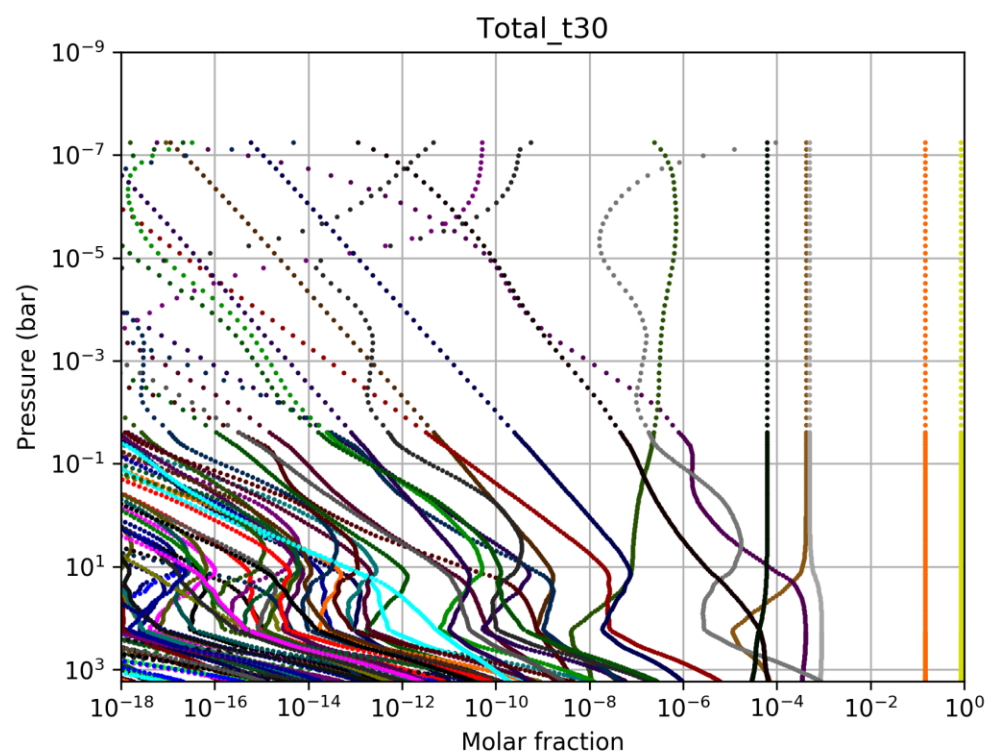
$t=0.001\text{s}$



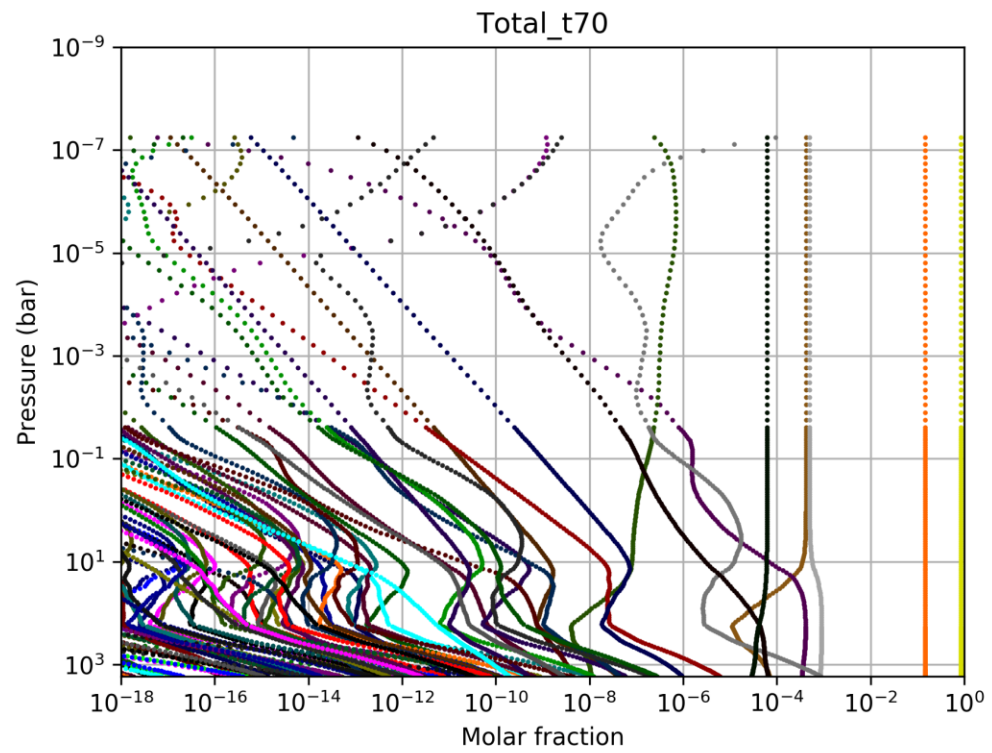
$t=0.05s$



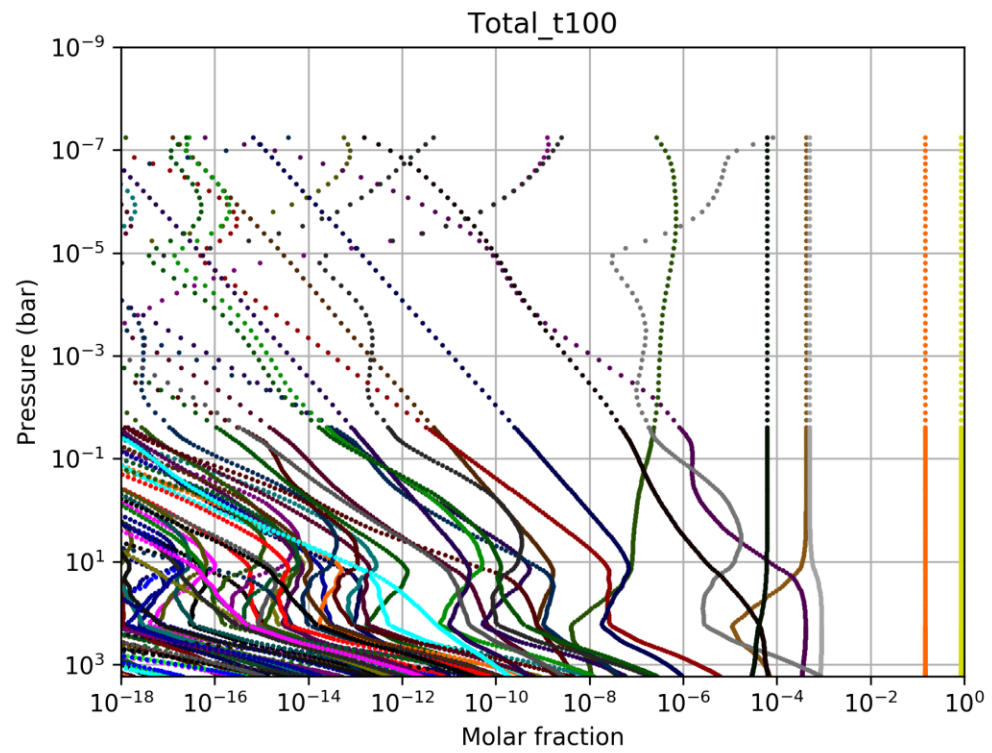
$t=0.201s$



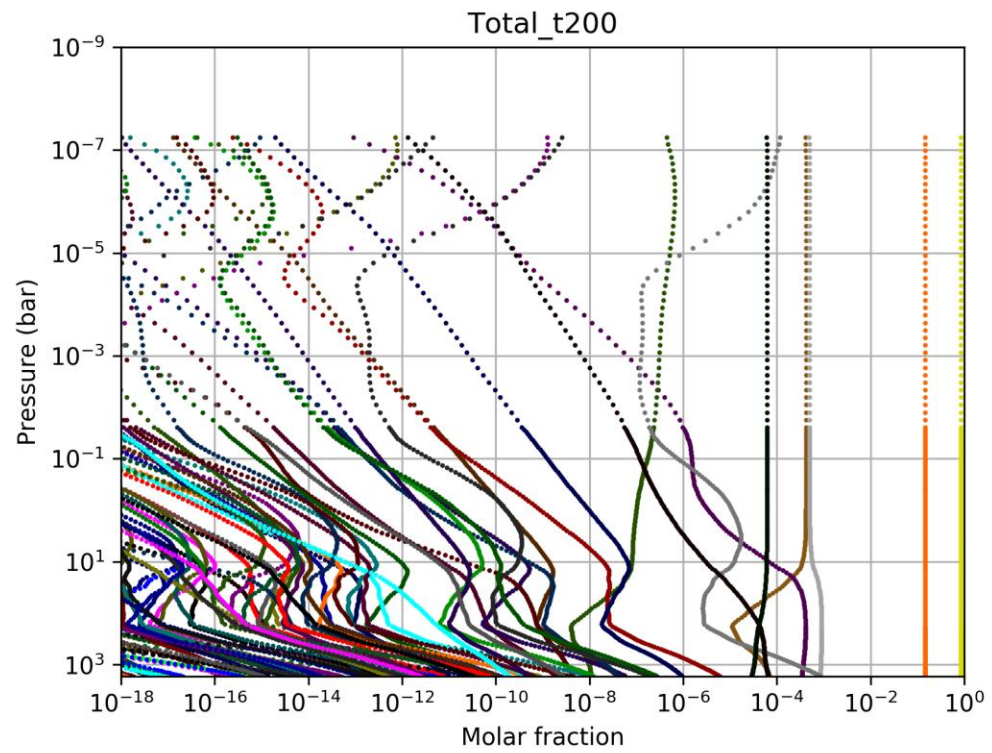
$t=14.281\text{s}$



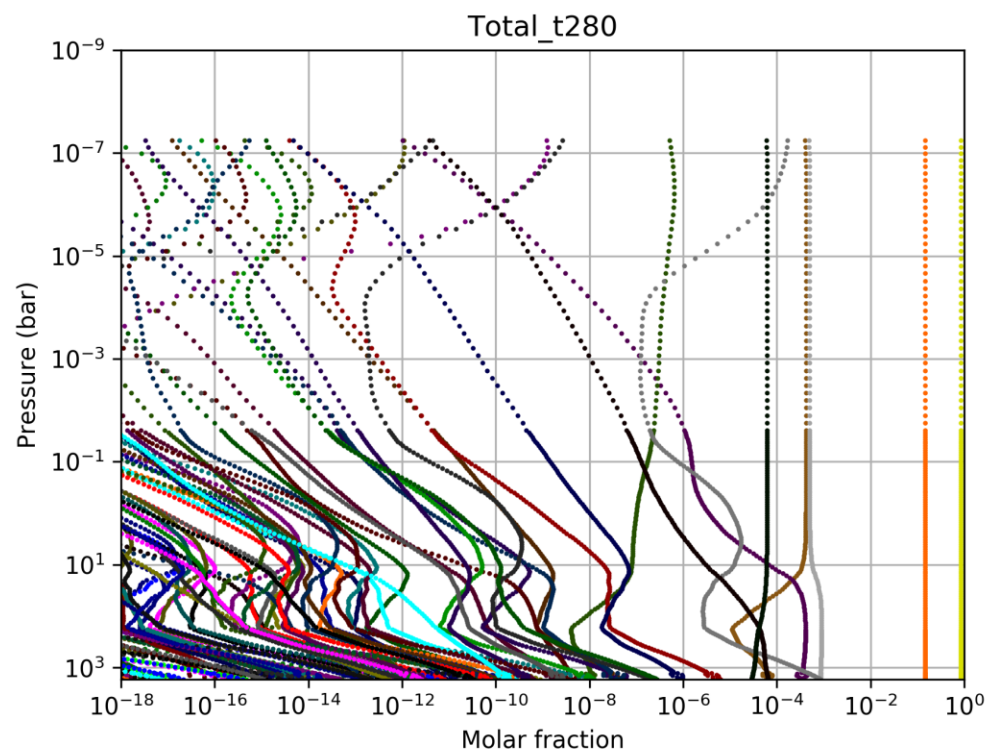
t=2015s



$t=25040s$



$t=42490s$



5. Resultados que esperamos

1- Encontrar parámetros clave que permitan la caracterización de los exoplanetas.

2- Crear las herramientas necesarias para el estudio de atmósferas exoplanetarias.

3- Contribuir a la determinación de futuros objetivos observacionales.



Gracias