

Raccolta informazioni

1 Grandezze fisiche

1.1 Idrodinamica

		valori tipici	phantom	mcfo	DB
M_P	planet mass	$(10 - 10^2)M_\oplus$	in		✓
M_*	star mass	$\sim 1M_\odot$	in		✓
M_g	gas mass	$\sim (1 - 10)M_j$	in		✓
M_d	dust mass	$\sim (10^{-3} - 1)M_j$	comp		✓
$\frac{H}{R}$	aspect ratio	(0.001)-0.1	in (at R_{ref})		✓
R_p	planet orbital radius	(1 - 100)au	in		✓
$R_{in} - R_{out}$	simulation boundaries	$\sim (1 - 10^2)$ au	in		
α_{SS}	Shakura-Sunyaev viscosity	$10^{-4} - 10^{-2}$	in: desired, out: min, max		✓
α_{AV}	artificial viscosity		in		
St	Stokes' number	$10^{-2} - 10^{-3}$			✓
s	grain size	$(1 - 10^5)\mu\text{m}$	in		✓
ρ_g	grain density	$\sim 1 \text{ g cm}^{-3}$	in	in	✓
ϵ	dust-gas ratio	0.01	in		
p	p index (Σ_g)	1	in		✓
q	q index (c_s)	0.25	in		✓
T	temperature	(20 - 100)K	in (at R_{in}, R_{ref}, R_{out})	comp	✓

1.2 Trasferimento radiativo

		valori tipici	phantom	mcfo	DB
κ	opacity			in	✓
τ	optical depth		in		
β	opacity spectral index			in	✓
T_*	star temperature	$\sim 4000\text{K}$		in	✓

1.3 Osservazioni

		valori tipici	phantom	mcssoft	pymcfost	DB
b_{maj}	FWHM beam (maj)				in	✓
b_{min}	FWHM beam (maj)				in	✓
b_{pa}	position angle beam (maj)				in	✓
d	distance	~ 150pc		in		✓
λ	wavelength					✓
i	inclination		in	in		✓
$p.a.$	position angle		in	in		✓

1.4 Grandezze fisiche approfondite

1.4.1 Planet mass

Per dischi con $St \ll 1$ la massa minima in grado di aprire un gap è ¹

$$\frac{M_{min}}{M_*} = 0.3 \left(\frac{H}{R} \right)^3 \quad (1)$$

Per masse superiori alla massa termica $M_{th} = \left(\frac{H}{R_p} \right)^3 \cdot 3M_*$, massa per la quale il raggio di Hill è pari ad H , si possono presentare strutture più complesse: strutture a spirale, bordi del gap con vortici,...

1.4.2 Dust mass

Viene ricavata dalle osservazioni nel continuo di emissione termica della polvere utilizzando la relazione

$$I_\nu \propto \tau_\nu B_\nu(T) \propto \kappa_\nu \Sigma_s B_\nu(T) \quad (2)$$

valida assumendo sia prevalente il limite otticamente sottile.

Misure ad una data lunghezza d'onda sono in pratica una misura della massa della componente solida di dimensioni comparabili con tale lunghezza d'onda.

Le misure a disposizione sono probabilmente valori sottostimati.

Nota: in alcuni casi potrebbe essere interessante il solo rapporto M_P/M_*

1.4.3 Aspect ratio

Definito come

$$h = H/R \quad (3)$$

Imponendo la condizione di equilibrio idrostatico per il gas lungo z (ad R fissato) si ottiene che la densità assume una distribuzione

$$\rho_g = \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Omega_k^2 z^2}{2c_s^2}\right) \quad (4)$$

che è una gaussiana con deviazione standard $H \equiv c_s/\Omega_k$

Sempre da questa relazione si ha anche $h = c_s/v_K$. Per un fluido perfetto $c_s = (\frac{k_B T}{\mu m_p})^{1/2}$, H è quindi legato alla temperatura del disco

Legato anche alla stabilità/instabilità gravitazionale. Dall'espressione del parametro di Toomre, con alcune approssimazioni si ottiene la condizione per la stabilità

$$\frac{M_{disk}}{M_*} \gtrsim h \quad (5)$$

Solitamente si assumono dischi sottili in cui $h \ll 1$, questa condizione impone anche una condizione sulle velocità: $c_s \ll v_\phi$.

Dalla componente radiale dell'equazione di Eulero si trova che la velocità angolare del gas presenta una correzione del secondo ordine in h rispetto a quella Kepleriana

$$v_{\phi,gas} = v_K(1 - qh^2)^{1/2} \quad (6)$$

Misure che rivelano l'andamento della temperatura in funzione di R permettono di ottenere anche la curva di h .

1.4.4 Stokes' number

Il gas esercita sulle particelle di polvere una forza di diversa natura a seconda della dimensione della particella s

$$s \lesssim \frac{9}{4}\lambda, \text{ regime di Epstein } \mathbf{F_D} = -\frac{4\pi}{3}\rho s^2 v_{th} \mathbf{v}$$

$$s \gtrsim \frac{9}{4}\lambda, \text{ regime di Stokes } \mathbf{F_D} = -\frac{C_D}{2}\pi s^2 \rho \mathbf{v} \mathbf{v}$$

Il numero di Stokes è definito come

$$St = t_{stop}\Omega_K \quad (7)$$

dove t_{stop} è il tempo caratteristico di frenamento dovuto al drag viscoso in uno dei due regimi.

Per particelle $\lesssim 10\mu\text{m}$ prevale il regime di epstein, nel quale

$$St = \frac{\pi}{2} \frac{s \rho_g}{\Sigma_g} \quad (8)$$

dove ρ_g è la densità del materiale che costituisce la componente solida del disco

Il suo valore può variare con la posizione e anche con l'evoluzione del disco. Può essere fissato nelle simulazioni per non fissare la dimensione delle particelle solide. O viceversa può essere fissata la dimensione della polvere.

1.4.5 Shakura-Sunyaev viscosity

Parametrizza la viscosità cinematica $\nu = \mu/\rho$

$$\nu = \alpha \cdot H \cdot c_s \quad (9)$$

La viscosità influenza l'evoluzione radiale della densità superficiale Σ_g

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2})] \quad (10)$$

da cui si ottiene una scala temporale legata alla viscosità

$$t_\nu \sim R^2/\nu \quad (11)$$

Misure o stime:

viene stimato richiedendo quale deve essere il suo valore per riprodurre le scale di tempo tipiche dell'evoluzione del disco, come? analisi di indicatori di accrescimento:

- eccesso ultravioletto
- emissione $H\alpha$ dalla fotosfera della stella
- osservazioni nel (sub-)mm risolte spazialmente

Viene solitamente considerato costante in tutto il disco, potrebbe non esserlo ma l'utilità del modello risiede nel considerarlo costante

Si riescono ad ottenere prevalentemente limiti superiori, l'evoluzione radiale potrebbe infatti essere dovuta anche ad altri meccanismi

1.4.6 Artificial Viscosity²

Utilizzata per modellizzare la viscosità nelle simulazioni SPH. Legata alla α_{SS} dalla relazione

$$\alpha_{SS} \simeq \frac{\alpha_{AV}}{10} \frac{\langle h_s \rangle}{H} \quad (12)$$

dove $\langle h_s \rangle$ è il valor medio azimutale (ad R fissato) della smoothing length delle particelle. Per ottenere α_{SS} costante è necessario risolvere $H(R)$.

α_{AV} viene assunto costante in tutto il disco.

Vantaggi:

- forza a considerare se H è risolto o meno
- è utile conoscere α_{AV} perchè $\alpha_{AV} \simeq 0.1$ rappresenta il limite inferiore sotto il quale la viscosità non è risolta dal metodo SPH.

Svantaggi:

- si ottengono alte viscosità di bulk $\frac{1}{6}\alpha_{AV}c_s h$, tuttavia questo coefficiente è applicato a $\nabla \cdot v$ che per le simulazioni di dischi assume generalmente valori bassi.

1.4.7 Temperature

La temperatura del disco è determinata dal bilancio di calore proveniente principalmente da due sorgenti

- disco passivo: radiazione emessa dalla stella che viene intercettata dal disco ($P = fL_*$, $f \sim 1/4$)
- disco attivo: dissipazione dell'energia potenziale gravitazionale ($P \sim G \frac{M_* \dot{M}}{R_*}$)

La scelta del limite in cui trascurare una delle due sorgenti dipende principalmente dal rate di accrescimento \dot{M} della stella. Dai valori ottenuti con le osservazioni si può concludere che entrambi i processi possono essere rilevanti a seconda della situazione.

Fortemente legata alla forma del disco.

Per un disco piatto sottile (passivo): $T \propto R^{-3/4} \implies h \propto R^{1/8}$

Per un disco "flared" (passivo): $T \propto R^{-1/2} \implies h \propto R^{1/4}$

$T(z)$ cresce con $|z|$

Temperature tipiche vanno da 10K, che è circa la temperatura del mezzo interstellare, a qualche 50/100K. Valori tipici sono 20/30K.

Per determinare la distribuzione di temperatura:

- simulare la distribuzione spettrale nell'infrarosso proponendo densità ed opacità del disco. Problema: degenerazioni del modello
- osservazioni in regime otticamente spesso

Per generare i dati da inserire nel db calcolo T con

$$T = c_s^2 \cdot \frac{\rho_g 4\pi s^3}{3k_B} \quad (13)$$

1.4.8 p index

Indice della legge di potenza che descrive l'andamento della densità in funzione del raggio

$$\Sigma_g(R) = \Sigma_{ref} \left(\frac{R}{R_{ref}} \right)^{-p} \quad (14)$$

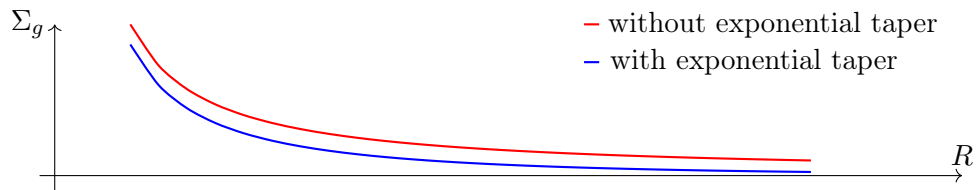
può essere attivata una modifica al profilo di densità chiamata “exponential taper” consistente in un termine moltiplicativo che modifica la densità soprattutto ai bordi. Può assumere diverse forme a seconda di quella impostata. Il profilo di densità utilizzato durante la simulazione viene scritto in *.discparams

Due tipi di exponential taper

$$\Sigma_g(R) = \Sigma_{ref} \left(\frac{R}{R_{ref}} \right)^{-p} \cdot \exp \left[-(R/R_c)^{(2-p)} \right] \quad (15)$$

$$\Sigma_g(R) = \Sigma_{ref} \left(\frac{R}{R_{ref}} \right)^{-p} \cdot [1 - \exp(R - R_{out})] \quad (16)$$

viene usato il (14) nelle simulazioni di DSTau



Per calcolare Σ_{ref} :

$$M_g = \int_{R_{in}}^{R_{out}} \Sigma_g(R) \cdot 2\pi R dR = \int_{R_{in}}^{R_{out}} 2\pi R \cdot \Sigma_{ref} \left(\frac{R}{R_{ref}} \right)^{-p} \cdot \exp \left[- (R/R_c)^{(2-p)} \right] dR \quad (17)$$

$$\simeq \int_{R_{in}}^{R_{out}} \Sigma_{ref} \left(\frac{R}{R_{ref}} \right)^{-p} \cdot 2\pi R dR = \begin{cases} 2\pi \Sigma_{ref} R_{ref}^p \frac{R^{-p+2}}{(2-p)} \Big|_{R_{in}}^{R_{out}}, & p \neq 2 \\ 2\pi \Sigma_{ref} R_{ref}^2 \ln R \Big|_{R_{in}}^{R_{out}}, & p = 2 \end{cases} \quad (18)$$

serve quindi inserire gli estremi della simulazione nel DB?

1.4.9 q index

Indice della legge di potenza che descrive il profilo radiale di c_s (e quindi di H/R e T)

$$c_s(R) = c_s(R_{ref}) \left(\frac{R}{R_{ref}} \right)^{-q} \quad (19)$$

1.4.10 Grain size

Ad una data lunghezza d'onda l'emissione si può ricondurre principalmente a grani di dimensione

$$s = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (20)$$

in quanto corrisponde ad una risonanza in $\kappa(s)$.

1.4.11 Opacity

Dato un fascio di radiazione, la perdita di intensità dovuta all'assorbimento del mezzo che viene attraversato è data da

$$dI_\nu = -\alpha_\nu I_\nu ds \equiv -\rho \kappa_\nu I_\nu ds \quad (21)$$

κ_ν è l'opacità. Ha le dimensioni di $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$.

Legata all'intensità della radiazione emessa dal disco da

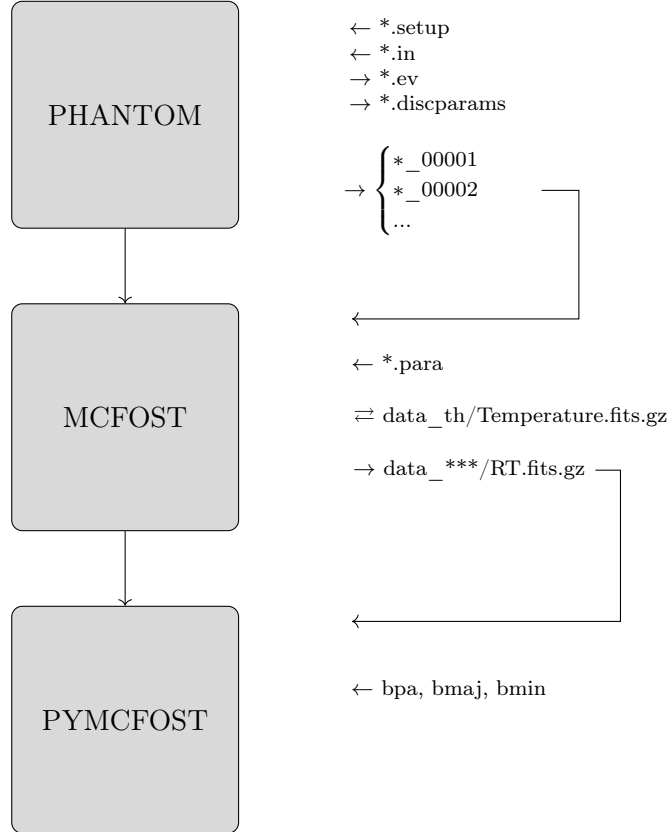
$$I_\nu \propto \kappa_\nu B_\nu(T) \Sigma_s \quad (22)$$

In generale dipende dalla frequenza della radiazione. Si può approssimare un andamento del tipo

$$\kappa(\nu) \propto \nu^\beta \quad (23)$$

dove β è lo “opacity spectral index”.

2 Workflow simulazioni



2.1 Phantom

Programma realizzato in fortran per simulazioni idrodinamiche mediante il metodo SPH (Smoothed-particle hydrodynamics). Per le simulazioni di dischi costituiti da gas e polvere i passaggi da seguire sono i seguenti:

Si utilizza lo script fornito con phantom per la generazione del makefile specificando il valore della variabile `SETUP`, da porre uguale a `dustydisc` per simulare dischi costituiti da gas e polvere solida


```
1 ~/sim_dir $ ~/phantom/scripts/writemake.sh dustydisc > Makefile
```

Si utilizza il makefile così creato per generare phantom e phantomsetup specificando con il valore della variabile SYSTEM il compilatore fortran da utilizzare

```
1 ~/sim_dir $ make SYSTEM=gfortran setup
2 ~/sim_dir $ make SYSTEM=gfortran
```

Si può quindi utilizzare phantomsetup per generare il file *.setup tramite l'interfaccia a riga di comando con cui vengono richieste informazioni sul sistema che si vuole simulare.

```
1 ~/sim_dir $ ./phantomsetup sim_name
```

Il file *.setup deve poi essere modificato manualmente per settare i parametri coi quali eseguire la simulazione. Infine si deve utilizzare nuovamente phantomsetup per generare il file *.in che viene utilizzato come input per la simulazione.

```
1 ~/sim_dir $ ./phantomsetup sim_name.setup
```

A questo punto si può eseguire la simulazione

```
1 ~/sim_dir $ ./phantom sim_name.in
```

Vengono prodotti i seguenti file:

- *.ev, file ascii contenenti informazioni globali sul disco in funzione del tempo
- *.discparams, file ascii contenente i valori delle principali grandezze fisiche del disco con le quali è stata eseguita la simulazione. Vengono generati due file di questo tipo: uno per la componente solida ed uno per la componente gassosa.
- file dump con nomi nel formato *_00001, *_00002, Solo alcuni di questi (a seconda di quanto specificato in *.in sono “full dumps” ovvero contengono tutte le informazioni ottenute dalla simulazione e necessarie per, ipoteticamente, farla ripartire da quello stato. Gli altri file dump contengono solo la posizione delle particelle e le smoothing lengths.

2.2 MCFOST

Codice che simula il rasferimento radiativo permettendo di ottenere una immagine della radiazione emessa dal disco. Può essere utilizzato per generare l'emissione nel continuo, l'emissione di linee spettrali specifiche, e l'emissione di radiazione scatterata.

MCFOST è in grado di leggere direttamente i file dump di phantom. L'istruzione per eseguire una simulazione è la seguente

```
1 ~/sim_dir $ mcfofst *.para -phantom <dump_file>
```

Il file `*.para` può essere ottenuto tramite `mcfofst -get_para`. Costituisce il file di configurazione in cui modificare i parametri prima di eseguire la simulazione. Se si utilizzano i file prodotti da PHANTOM:

- usare 100 più pacchetti di fotoni rispetto al numero di particelle SPH
- spegnere calcolo della SED (?)
- spegnere le simmetrie

Vengono ignorate le seguenti sezioni del file `*.para`

- Grid geometry and size
- Disk physics
- Number of zones
- Density structures (except for gas/mass ratio)

Dopo la prima esecuzione viene generato il file `data_th/Temperature.fits.gz` che è un archivio gzip contenente un file fits con la temperatura calcolata nel disco. (Come è rappresentata l'informazione? il file fits contiene una sola HDU con un array monodimensionale) A questo punto si può eseguire nuovamente MCFOST per determinare l'emissione ad una data lunghezza d'onda

```
1 ~/sim_dir $ mcfofst *.para -phantom <dump_file> -img 870 -casa
```

dopo `-img` deve essere specificata la lunghezza d'onda a cui si vuole eseguire la simulazione in μm (in questo esempio 870). L'opzione `-casa` può invece essere utilizzata per ottenere un file pronto per CASA.

Viene generato un file fits (compressato).

2.3 pymcfost

Libreria python che fornisce una interfaccia python per l'utilizzo di mcfost. Tra le varie funzioni è interessante per la possibilità di eseguire una convoluzione dell'immagine ottenuta di MCFOST con beam gaussiani in modo da riprodurre la risoluzione del telescopio.

Utilizzo:

```
1 import pymcfost as mcfost
2 mcfost.__version__
3 %matplotlib inline
4 import matplotlib
5 from matplotlib.patches import Circle
6
7 directory = './'
8 image = mcfost.Image(directory+"/data_1300/")
9
10 img = image.plot(i=0, bpa=159,
11                  bmaj=0.14, bmin=0.1, ax=ax[0,1],
12                  scale='lin', Jy=True, per_beam=True,
13                  no_ylabel=True, no_xlabel=True,
14                  plot_stars=False, s=17, limits=[0.8,-0.8,-0.8,0.8])
```

il metodo di interesse è quindi il metodo `plot()` dell'oggetto `Image`. I parametri più importanti di questo metodo sono:

- `i`, seleziona quale delle immagini a diverse inclinazioni utilizzare (se nel file `file RT.fits` sono presenti immagini a diverse inclinazioni)
- `bpa`, position angle del beam. Se è pari a 0 il beam ha l'asse minore coincidente con l'asse x, crescendo l'asse minore viene ruotato in senso antiorario di un angolo pari a `bpa` rispetto al semiasse positivo delle ascisse.
- `bmaj`, asse maggiore del beam
- `bmin`, asse minore del beam
- `scale`, scala con cui viene realizzata l'immagine
- `Jy=True`, `per_beam=True`, imposta le unità di misura in $\frac{\text{Jy}}{\text{beam}}$. Senza questi parametri le unità di misura sono $\frac{\text{W m}^{-2}}{\text{pixel}}$. Nota: $1\text{Jy} = 1 \cdot 10^{-26} \text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$

Nota: il parametro `s=17` non è più presente nella versione di pymcfost corrente. TODO: capire cos'è e se qualche parametro ora lo sostituisce.

Si può usare

```
1 image.writeto(filename='pymcfostsaving.fit')
```

per salvare un file fits con i dati dell'immagine ottenuta dall'ultima chiamata di `.plot()` e lo stesso header del file utilizzato in input. Non viene aggiornato l'header per cui l'unità di misura è ancora quella di mcfost anche se l'immagine viene prodotta in Jy/beam.

Realizzo una funzione che utilizza le funzioni precedenti per generare e salvare l'immagine in un file fits. Inoltre modifica l'header del file fits aggiornando o aggiungendo le seguenti informazioni

keyword	descrizione	aggiornata o nuova
BUNIT	unità di misura dei dati dell'immagine	updated
CDEL1	puixel scale x (deg)	kept
CDEL2	puixel scale y (deg)	kept
NSTARS	numero di stelle nella simulazione	new
TSTAR#	temperatura della stella (K)	new
MSTAR#	massa della stella in masse solari	new
RSTAR#	raggio della stella in raggi solari	new (?)
BMAJ	FWHM maggiore beam	new
BMIN	FWHM minore beam	new
BPA	position angle del beam	new
MGAS	massa della componente gassosa	new
MDUST	massa della componente solida	new
MPLANET#	massa dell pianeta in masse di giovè	new
RORB#	distanza del pianeta dalla stella	new
NPLANETS	numero di pianeti presenti	new
HR	aspect ratio (i.c.) a RORB	new
TEMP	temperatura del gas a RORB (from phantom c_s)	new
GRSIZE	grain size ($\lambda/2\pi$)	new
ALPHASS	Hakura-Sunyaev viscosity	new
RHOG	grain density	new
PINDEX	p index	new
QINDEX	q index	new
DISKPA	position angle del disco	new
INCL	inclinazione del disco	new
DISTANCE	distanza del disco dal telescopio (pc)	new
WAVE	lunghezza d'onda a cui è generata l'immagine	kept
RIN	raggio interno del dominio della simulazione idrodinamica	new
ROUT	raggio esterno del dominio della simulazione idrodinamica	new
RC	raggio per exponential taper	new

3 Formati

3.1 File FITS

Flexible Image Transport System Costituito da segmenti chiamati Header/Data Units, ciascuno di questi segmenti è costituito da un header, che contiene varie informazioni sui

dati, e un blocco di dati che può essere un array da 1 a 999 dimensionale, una tabella ascii, una tabella binaria (...)

Il file fits di interesse è `RT.fits` generato da `mcfo`

3.1.1 Primary HDU

I dati possono essere recuperati in un array numpy multidimensionale:

```
1 data[S,A,I,X,Y]
```

s: può avere diverse dimensioni, questo indice permette di accedere a vari contributi (se calcolati, es. luce scatterata,...) e ai valori dei parametri di Stokes che permettono se combinati di ottenere varie polarizzazioni della luce. La componente non polarizzata è la 0

A: immagini a diverse inclinazioni azimuthali

I: immagini a diverse inclinazioni

x, y: valori dell'immagine, l'intensità è solitamente salvata in $\frac{W}{m \cdot pixel}$

4 Data

	quando	data type	from	py f
M_P	t snapshot	float	image.log	ilf
M_*	t snapshot	float	ph:image.log, mc:*.para	pif
M_g	t snapshot	float	image.log	ilf
M_d	t snapshot	float	image.log	ilf
$\frac{H}{R}$	R_p (?)	float	fixed=0.6 (*.discparams)	*
R_p	t snapshot	float	image.log	ilf
$\Sigma_g(R_p)$	unperturbed	float	computed	-
α_{SS}	unperturbed	float	fixed=0.005	*
$St(R_p)$	unperturbed	float	computed	-
$s(\lambda)$		float	computed	-
ρ_g		float	fixed= 1 g cm^{-3} , from paper	*
p		float	fixed=1, from paper	*
q		float	fixed=0.25, from paper	*
T (from phantom)				
T (from mcfost)				
κ				
β				
T_*		float	*.para	pif
b_{maj}		float	pymcfost in	pif
b_{min}		float	pymcfost in	pif
b_{pa}		float	pymcfost in	pif
i		float	*.para	pif
$p.a.$		float	*.para	pif
d		float	*.para	pif
λ		float	RT.fits	"pif"
$n.orbits$		int	name dir	
26 variabili				

5 Organizzazione file ONEDRIVE

- mcfost_dstau/dstau_Racc contiene i file dump di phantom
- mcfost_dstau/nocasa contiene cartelle nel formato MP1_time100, il nome indica la massa del pianeta e il tempo in termini di numero di orbite effettuate dal pianeta al dump in esame. Ogni cartella contiene altre cartelle ognuna delle quali si riferisce a simulazioni con diversi gas/dust (ϵ). Formato: gd100. All'interno di queste cartelle si trovano (che mi possono servire):
 - file .para, input della simulazione mcfost

- file `data_1300/RT.fits.gz` immagine da dare in pasto a `pymcfost` per ottenere la convoluzione che riproduca la risoluzione del telescopio. Il nome della cartella indica la lunghezza d'onda in micrometri a cui è realizzata l'immagine.

6 Da valutare

- architettura (o almeno tipologia) rete neurale:
convolutional neural network (?), è trasparente nell'implementazione o l'immagine deve essere processata (es. sezionata, identificare il centro,...) ? (serve?)
- dimensione minima necessaria per il database
- considerare il tempo?
- cosa usare per implementare il database?
pandas
MLDB
Globe
MySQL
MongoDB
file fits con header modificato
- variabili adimensionali ? in funzione di cosa ?
proposta: database con variabili salvate in SI con possibilità di estrarle in c.u. (da decidere)
- distribuzione dati
- coerenza temperatura tra `mcfost` e `phantom`: provare a fare una verifica.
- cosa hanno in meno i file `with_casa` ? passano da circa 10/12 MB a circa 2/3 MB.
- `posangle beam` diverso da `posangle disco`?
- come scegliere dimensione e orientazione beam ?

7 TODO

- riempire tabella subsection 4.1, aggiungere anche dove vanno misurati i parametri
- realizzare script che scarica file e info
- controllare come sono definiti p.a. e i

8 Fonti

8.1 Paper

¹<https://doi.org/10.1093/mnras/stz913>

²<http://dx.doi.org/10.1017/pasa.2018.25>

8.2 Phantom docs

<https://phantomsph.readthedocs.io/en/latest/index.html>

8.3 MCFOST docs

<https://ipag.osug.fr/~pintec/mcfost/docs/html/index.html>