

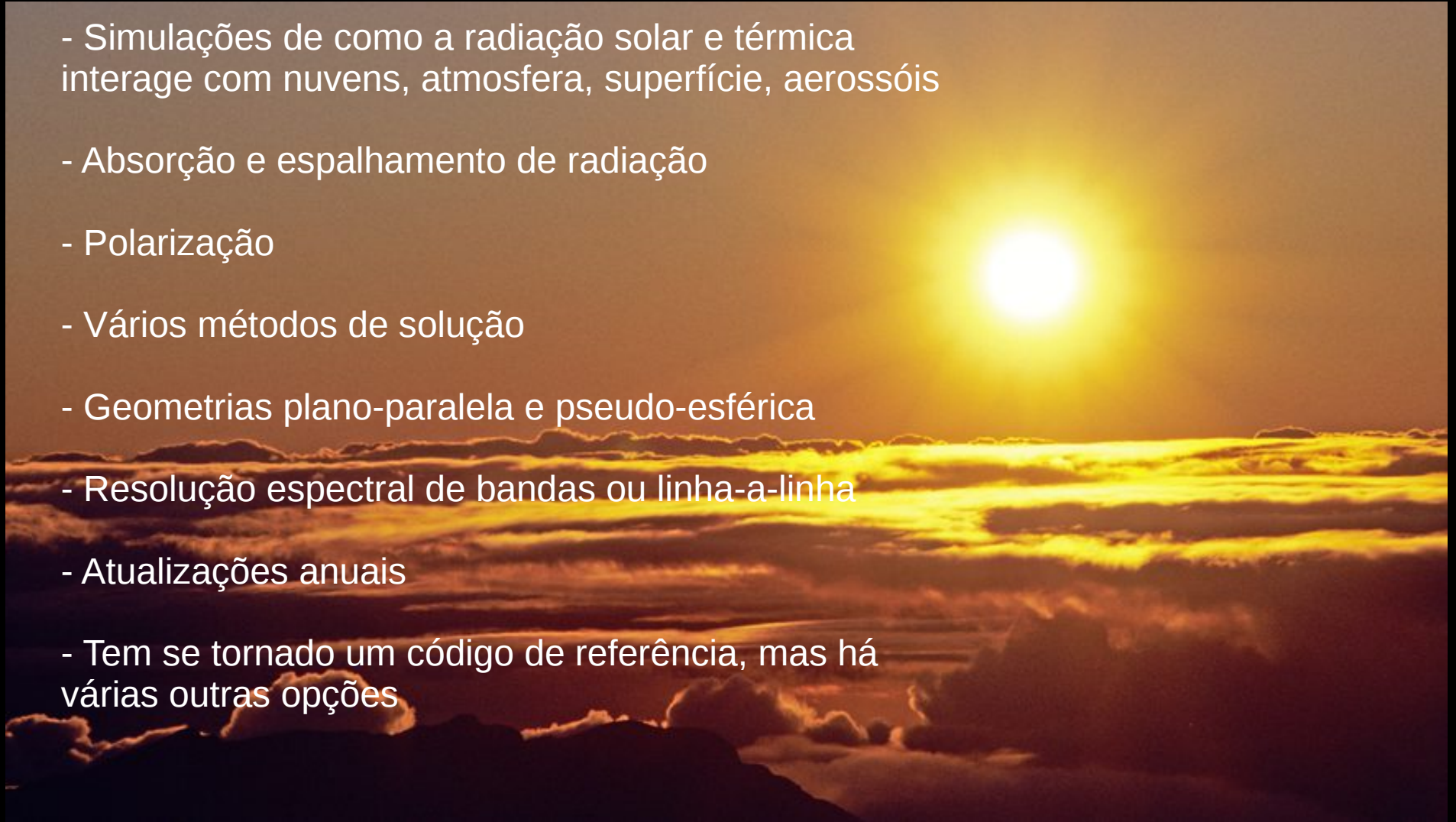
# Introdução ao uso do libRadtran

Alexandre Correia

Maio/ 2018

## LibRadtran – Código de transferência radiativa (na verdade é um conjunto de códigos)

- Simulações de como a radiação solar e térmica interage com nuvens, atmosfera, superfície, aerossóis
- Absorção e espalhamento de radiação
- Polarização
- Vários métodos de solução
- Geometrias plano-paralela e pseudo-esférica
- Resolução espectral de bandas ou linha-a-linha
- Atualizações anuais
- Tem se tornado um código de referência, mas há várias outras opções



FUTBOLIN		Martin-Lorres (2005) [13]	$\lambda > 0.3 \mu\text{m}$	Yes	Yes	Yes	$\lambda < 1000 \mu\text{m}$	No	line-by-line	Yes	?	spherical or plane-parallel		handles line-mixing, continuum absorption an
GENLN2	[12]☞	Edwards (1992) [14]	?	?	?	?	?	?	line-by-line	?	?			
KARINE	[13]☞	Eymet (2005) [15]	No	No	Yes		No	No		?	?	plane-parallel	GPL	
KCARTA	[14]☞		?	?	Yes	Yes	?	?	line-by-line	Yes	?	plane-parallel	freely available	AIRS reference model
KOPRA	[15]☞		No	No	No	Yes	No	No		?	?			
LBLRTM	[16]☞	Clough et al. (2005) [16]	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	line-by-line	?	?			
LEEDR	[17]☞	Fiorino et al. (2014) [17]	$\lambda > 0.2 \mu\text{m}$	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	band or line-by-line	Yes	?	spherical	US government software	extended solar & lunar sources; single & multiple scattering
LinePak☞	[18]☞	Gordley et al. (1994) [18]	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	line-by-line	No	No	spherical (Earth and Mars), plane-parallel	freely available with restrictions	web interface, <a href="#">SpectralCalc</a> ☞
libRadtran	[19]☞	Mayer and Kylling (2005) [19]	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	band or line-by-line	Yes	Yes	plane-parallel or pseudo-spherical	GPL	
MATISSE	[20]☞	Caillaud et al. (2007) [20]	No	Yes	Yes	Yes	No	No	band	Yes	?		proprietary freeware	
MCARaTS	[21]												GPL	3-D Monte Carlo
MODTRAN	[21]☞	Berk et al. (1998) [22]	$\nu < 50,000 \text{ cm}^{-1}$	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	band or line-by-line	Yes	?		proprietary commercial	solar and lunar source, uses DISORT
MOSART	[22]☞	Cornette (2006) [23]	$\lambda > 0.2 \mu\text{m}$	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	band	Yes	No		freely available	
PUMAS	[23]☞		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Line-by-line and correlated-k	Yes	Yes	plane-parallel and pseudo-spherical	Free/online tool	
RFM	[24]☞		No	No	No	Yes	No	No	line-by-line	?	?		available on request	MIPAS reference model based on GENL
RRTM/RRTMG	[25]☞	Mlawer, et al. (1997) [24]	$\nu < 50,000 \text{ cm}^{-1}$	Yes	Yes	Yes	Yes	$\nu > 10 \text{ cm}^{-1}$		?	?		free of charge	uses DISORT
RTMOM	[26]☞ <sup>[dead link]</sup>		$\lambda > 0.25 \mu\text{m}$	Yes	Yes	$\lambda < 15 \mu\text{m}$	No	No	line-by-line	Yes	?	plane-parallel	freeware	
RTTOV	[27]☞	Saunders et al. (1999) [25]	$\lambda > 0.4 \mu\text{m}$	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	band	Yes	?		available on request	
SASKTRAN	[26]	Bourassa et al. (2008) <sup>[27]</sup> Zawada et al. (2015) <sup>[28]</sup>	Yes	Yes	Yes	No	No	No	line-by-line	Yes	Yes	spherical 1D, 2D, 3D, plane-parallel	available on request	discrete and Monte Carlo options
SBDART	[28]☞	Ricchiazzi et al. (1998) [29]	Yes	Yes	Yes	?	No	No		Yes	?	plane-parallel		uses DISORT
SCIATRAN	[29]☞	Rozanov et al. (2005) [30] Rozanov et al. (2014) [31]	Yes	Yes	Yes	No	No	No	band or line-by-line	Yes	Yes	plane-parallel or pseudo-spherical or spherical		
SHARM		Lyapustin (2002) [32]	No	Yes	Yes	No	No	No		Yes	?			
SHDOM	[30]☞	Evans (2006) [33]	?	?	Yes	Yes	?	?		Yes	?			
Streamer, Fluxnet	[31]☞ <sup>[34]</sup>	Key and Schweiger (1998) [35]	No	No	$\lambda > 0.6 \text{ mm}$	$\lambda < 15 \text{ mm}$	No	No	band	Yes	?	plane-parallel		Fluxnet is fast version of STREAMER using ne

## libRadtran

- Solução da transferência radiativa
- Código Mie (aerossóis)
- Cálculo de geometria solar
- Cálculo de funções de fase
- Funções resposta de sensores
- Simuladores de Radar e Lidar (solo)
- Ferramentas de integração numérica
- Ferramentas de setup inicial
- Ferramentas de pós-processamento

# Algumas definições necessárias para interpretar os resultados:

Irradiância ( $\text{W}/\text{m}^2$ ): fluxo de energia que atravessa uma superfície plana

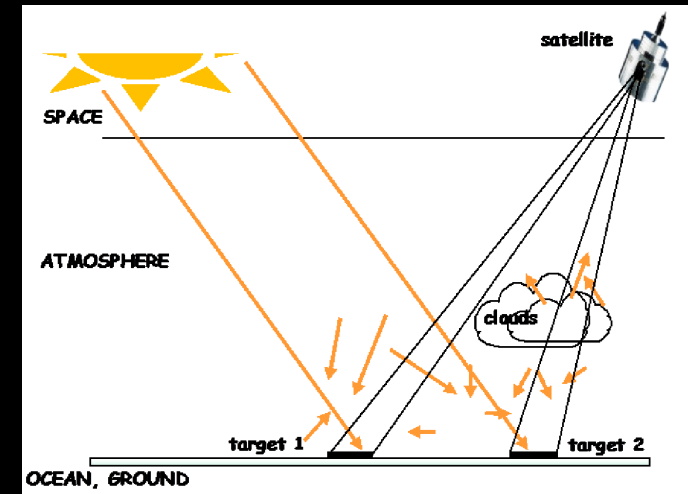
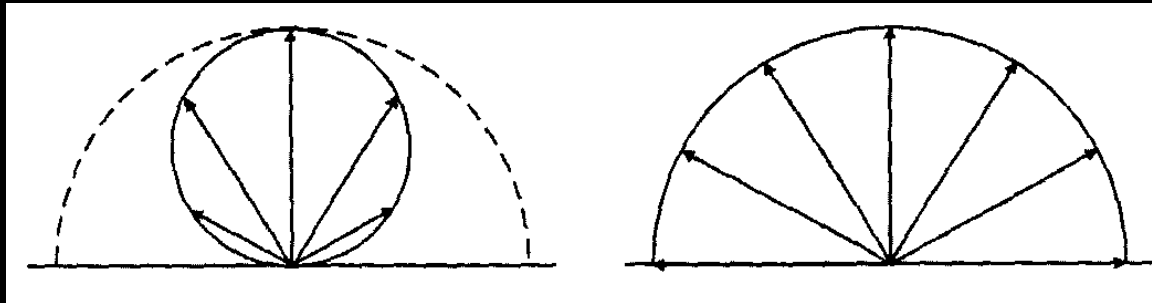
Ex.: Lei de cosseno para intensidade de radiação solar (manhã x meio-dia)

Radiância ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ ): fluxo de energia numa certa direção

Ex: Medidas com sensor em satélite ou com fotômetro da AERONET

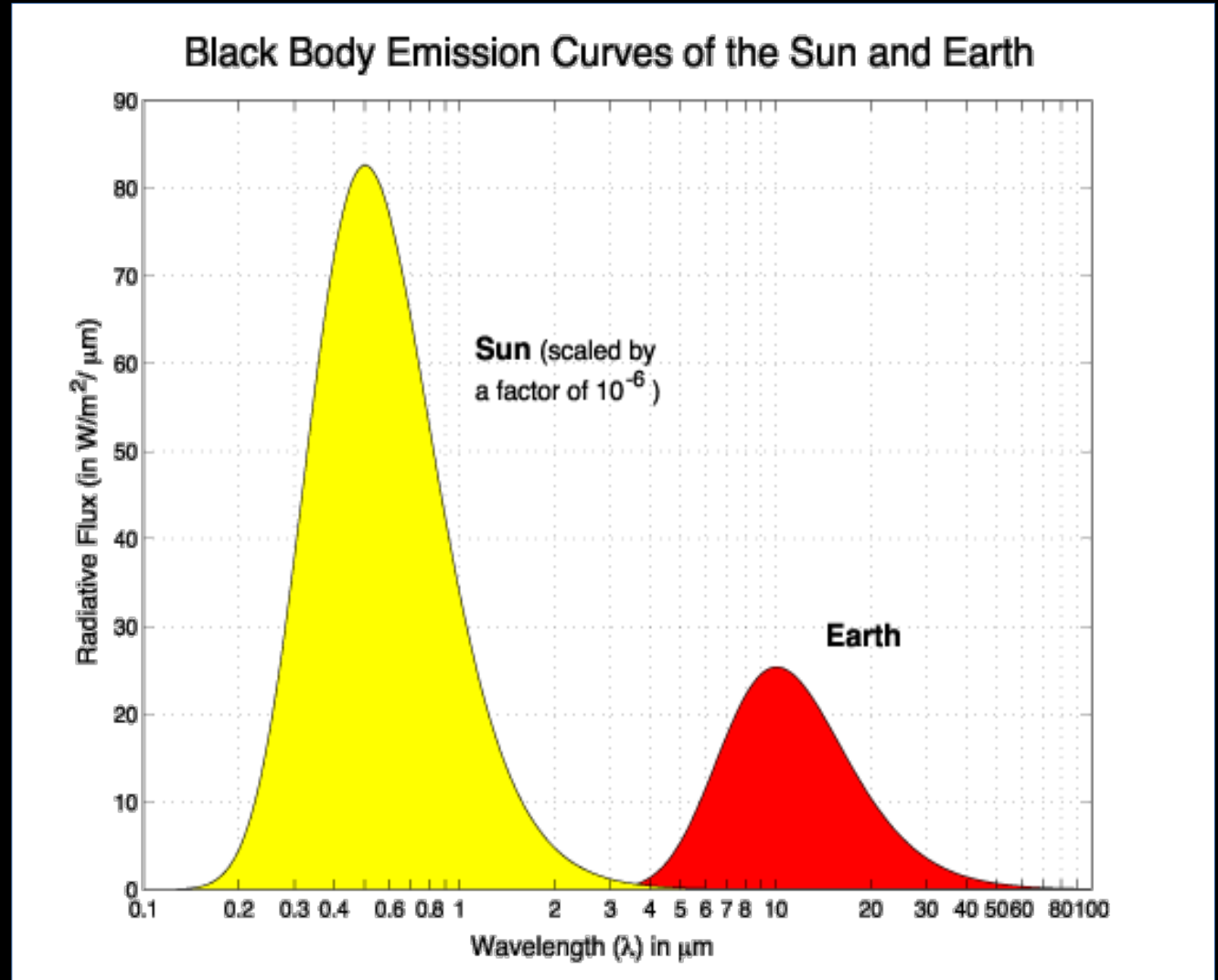
Fluxo actínico ( $\text{W}/\text{m}^2$ ): fluxo de energia através de uma superfície hemisférica (isotrópico)

Ex: Reações fotoquímicas de formação de SOA, dissociação, etc.



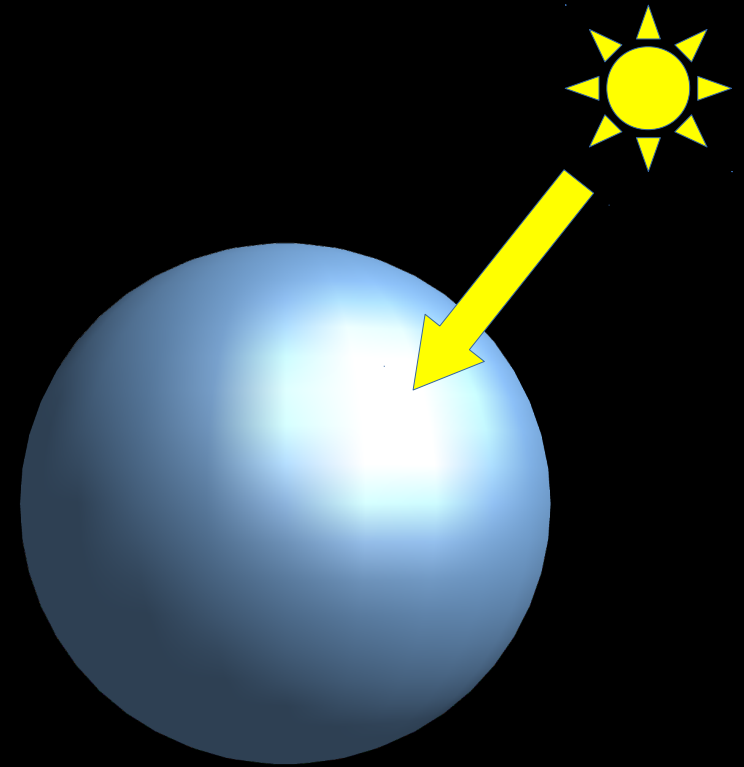
# Algumas definições necessárias para interpretar os resultados:

Funções densidade  
espectral de emissão  
de corpo negro



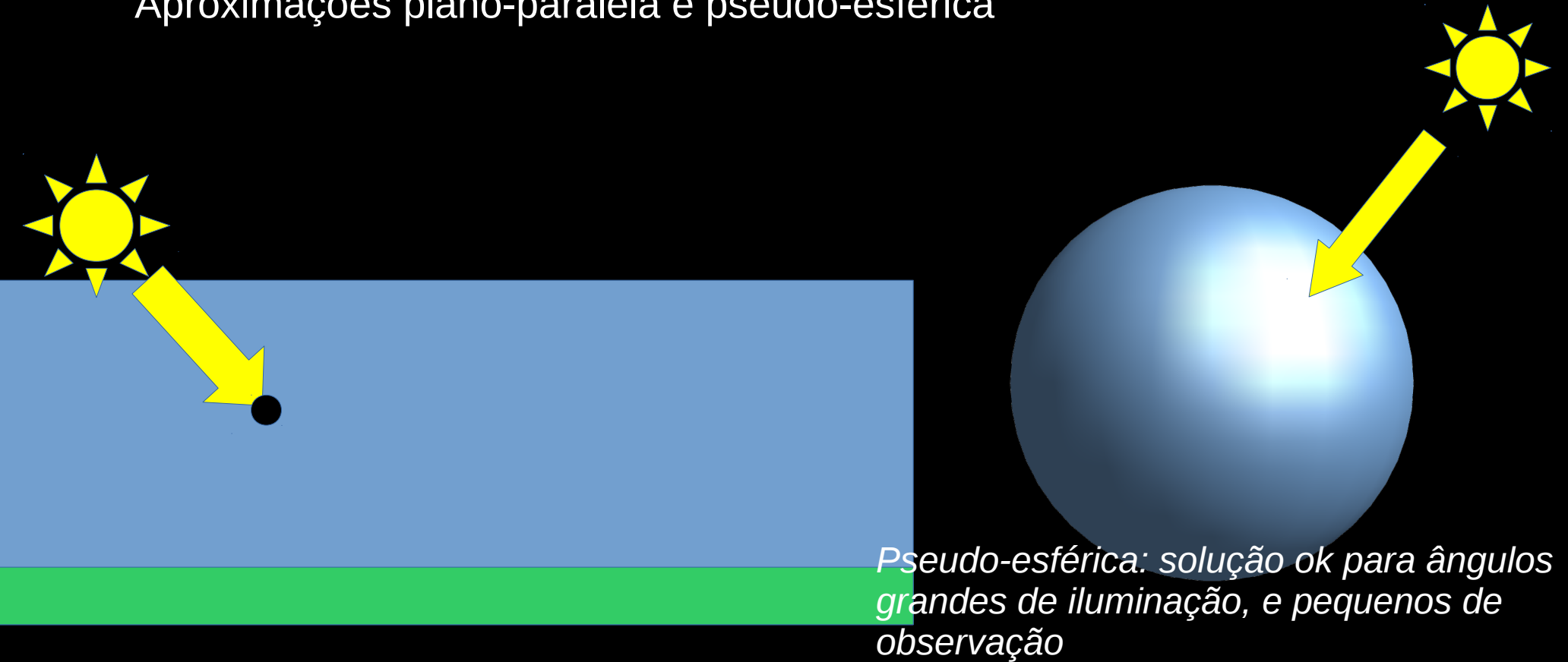
# Algumas definições necessárias para interpretar os resultados:

Aproximações plano-paralela e pseudo-esférica



# Algumas definições necessárias para interpretar os resultados:

Aproximações plano-paralela e pseudo-esférica



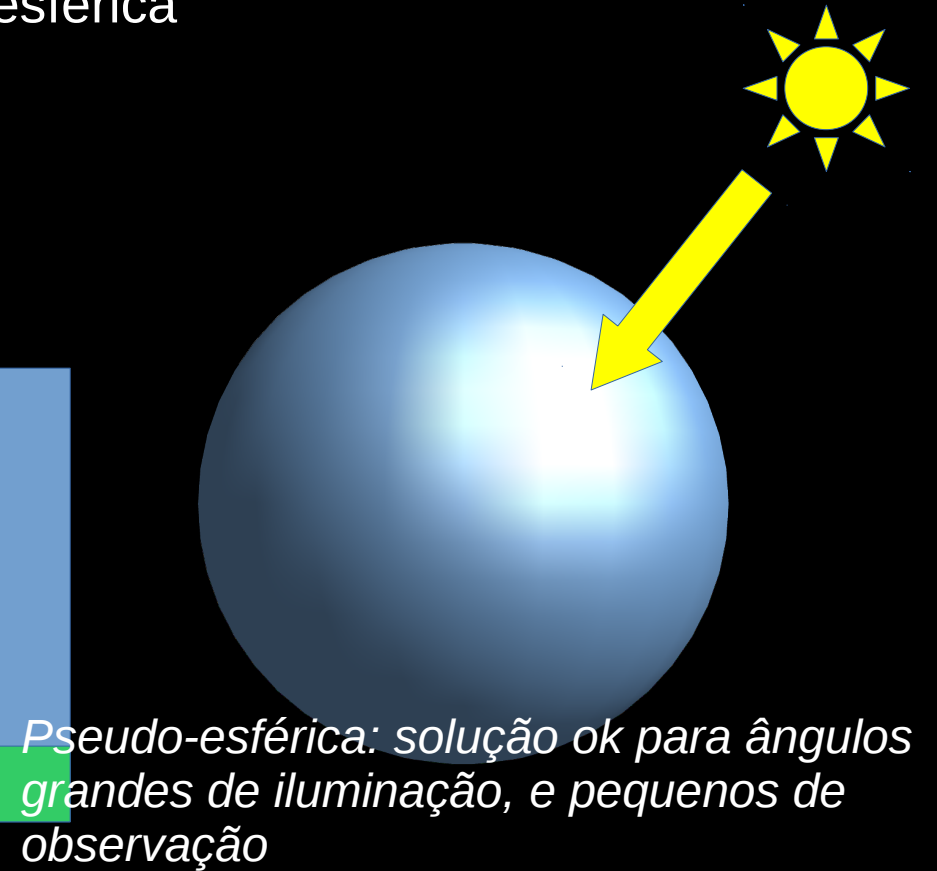
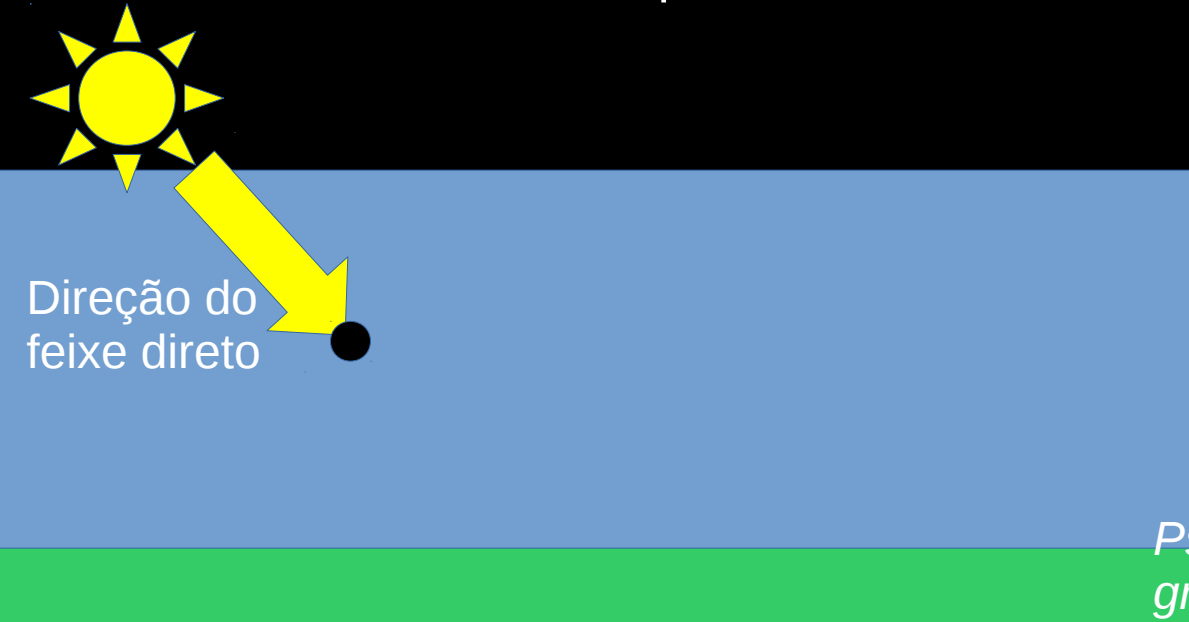
*Pseudo-esférica: solução ok para ângulos grandes de iluminação, e pequenos de observação*



# Algumas definições necessárias para interpretar os resultados:

Aproximações plano-paralela e pseudo-esférica

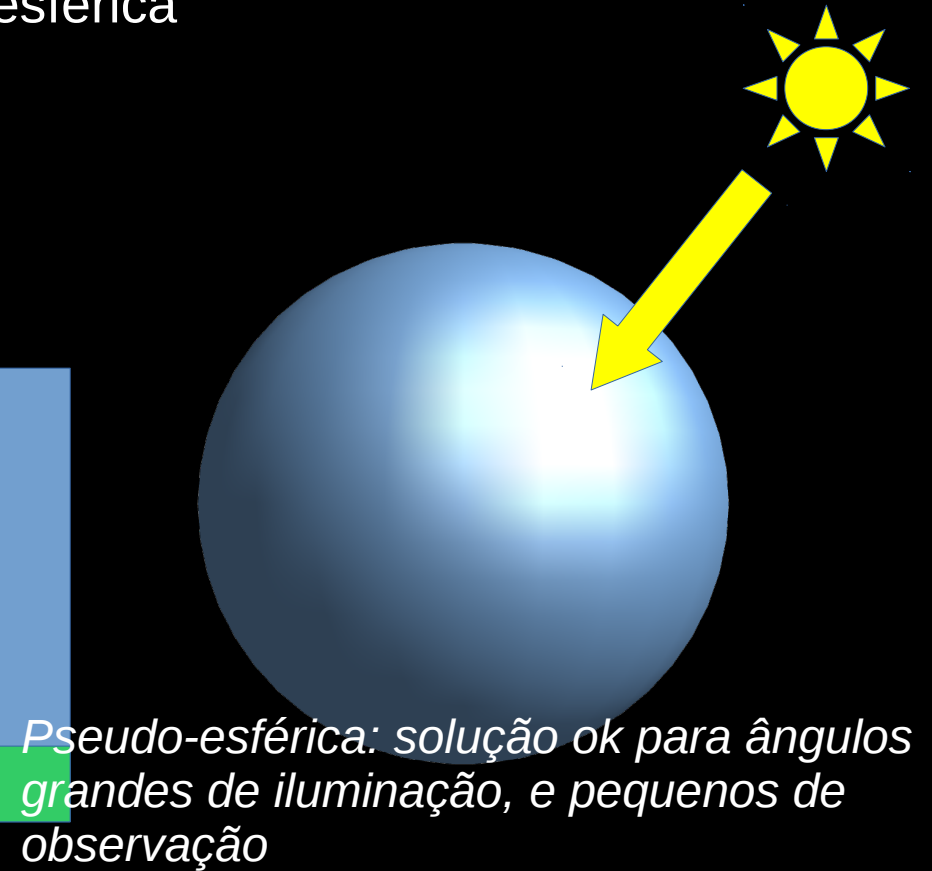
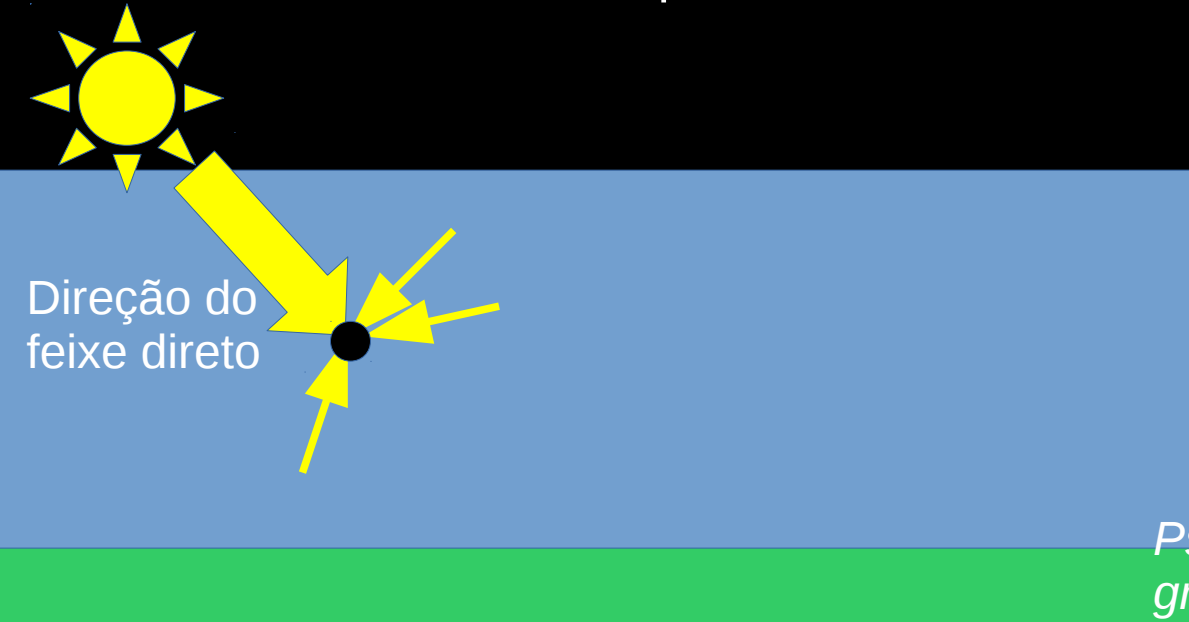
Divisão do feixe em parte direta e difusa



# Algumas definições necessárias para interpretar os resultados:

Aproximações plano-paralela e pseudo-esférica

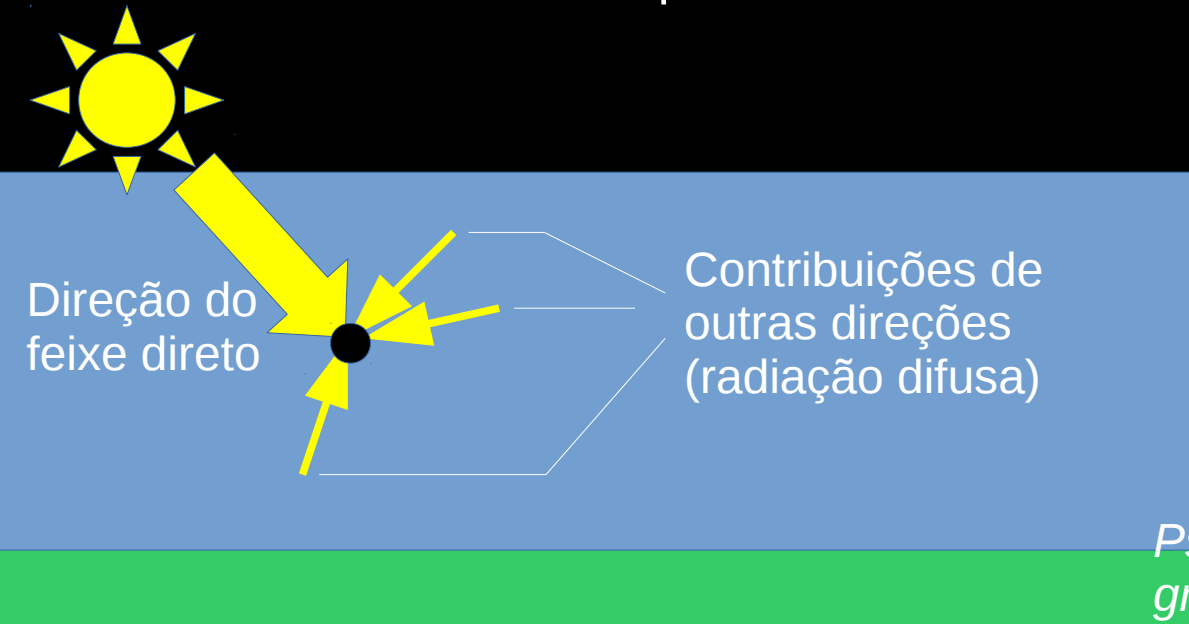
Divisão do feixe em parte direta e difusa



# Algumas definições necessárias para interpretar os resultados:

Aproximações plano-paralela e pseudo-esférica

Divisão do feixe em parte direta e difusa



*Pseudo-esférica: solução ok para ângulos grandes de iluminação, e pequenos de observação*

# Algumas definições necessárias para interpretar os resultados:

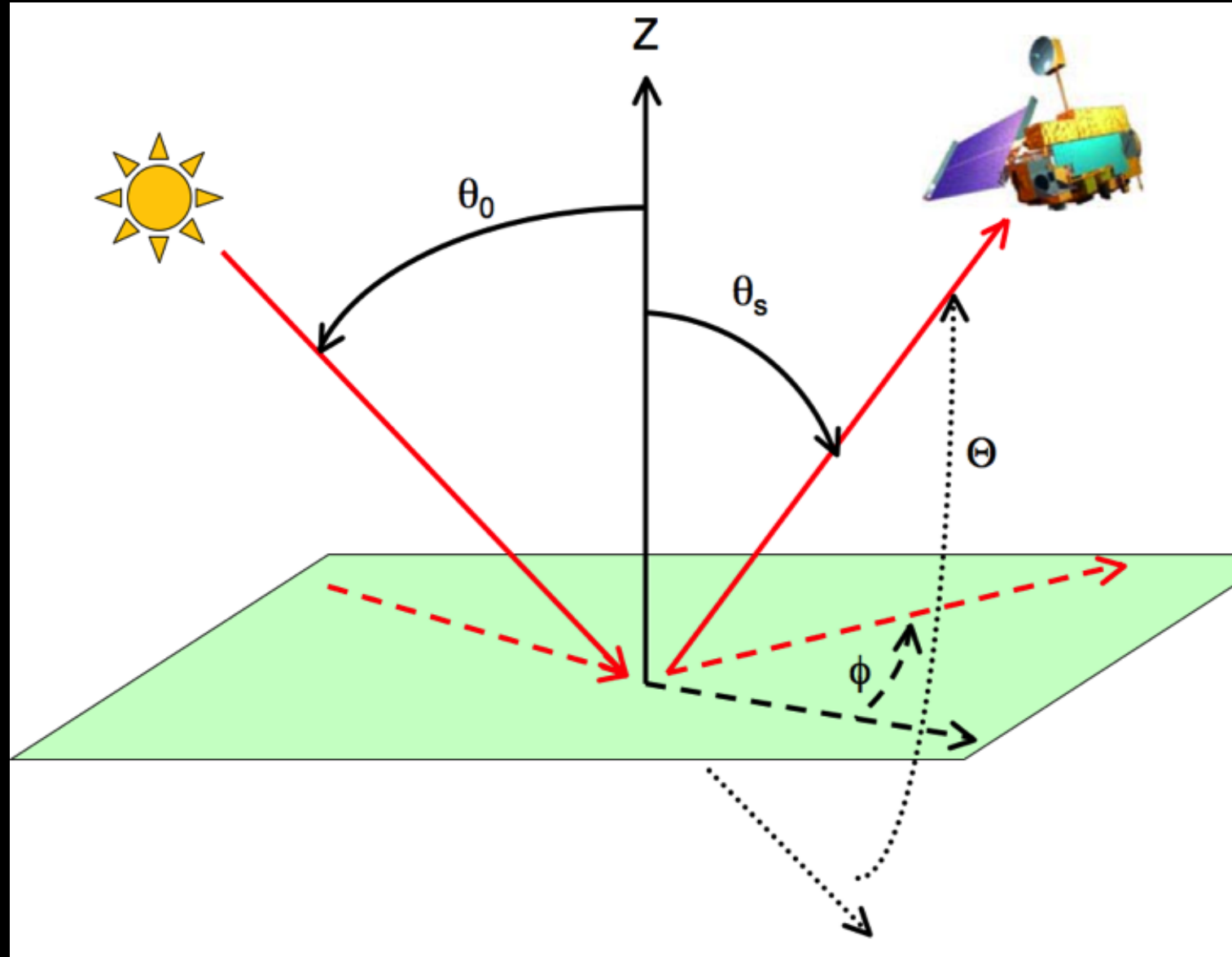
## Geometria de espalhamento

$$\begin{array}{l} \cos \theta_0 = \mu_0 \rightarrow \text{Sol} \\ \cos \theta_s = \mu_s \\ \cos \theta = \mu \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \cos \theta_0 = \mu_0 \\ \cos \theta_s = \mu_s \\ \cos \theta = \mu \end{array}} \right\} \text{observador}$$

$$N \left\{ \begin{array}{l} \phi_0 \rightarrow \text{Sol} \\ \phi_s \rightarrow \text{observador} \end{array} \right.$$

O espalhamento só depende da diferença:

$$\phi_0 - \phi_s = \phi$$



# Algumas definições necessárias para interpretar os resultados:

## Geometria de espalhamento

$$\begin{array}{l} \cos \theta_0 = \mu_0 \rightarrow \text{Sol} \\ \cos \theta_s = \mu_s \\ \cos \theta = \mu \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \cos \theta_0 = \mu_0 \\ \cos \theta_s = \mu_s \\ \cos \theta = \mu \end{array}} \right\} \text{observador}$$

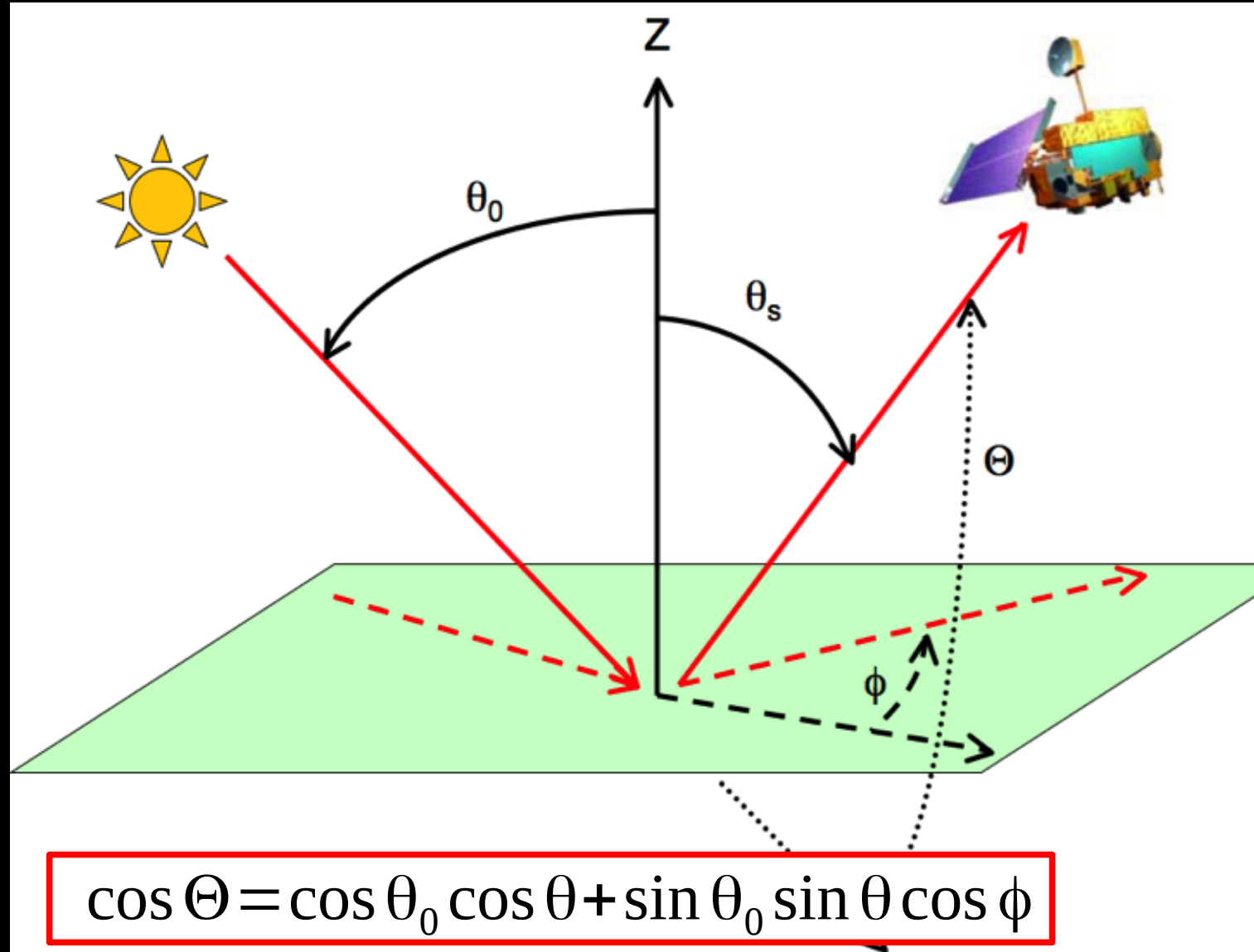
$$N \left\{ \begin{array}{l} \phi_0 \rightarrow \text{Sol} \\ \phi_s \rightarrow \text{observador} \end{array} \right.$$

O espalhamento só depende da diferença:

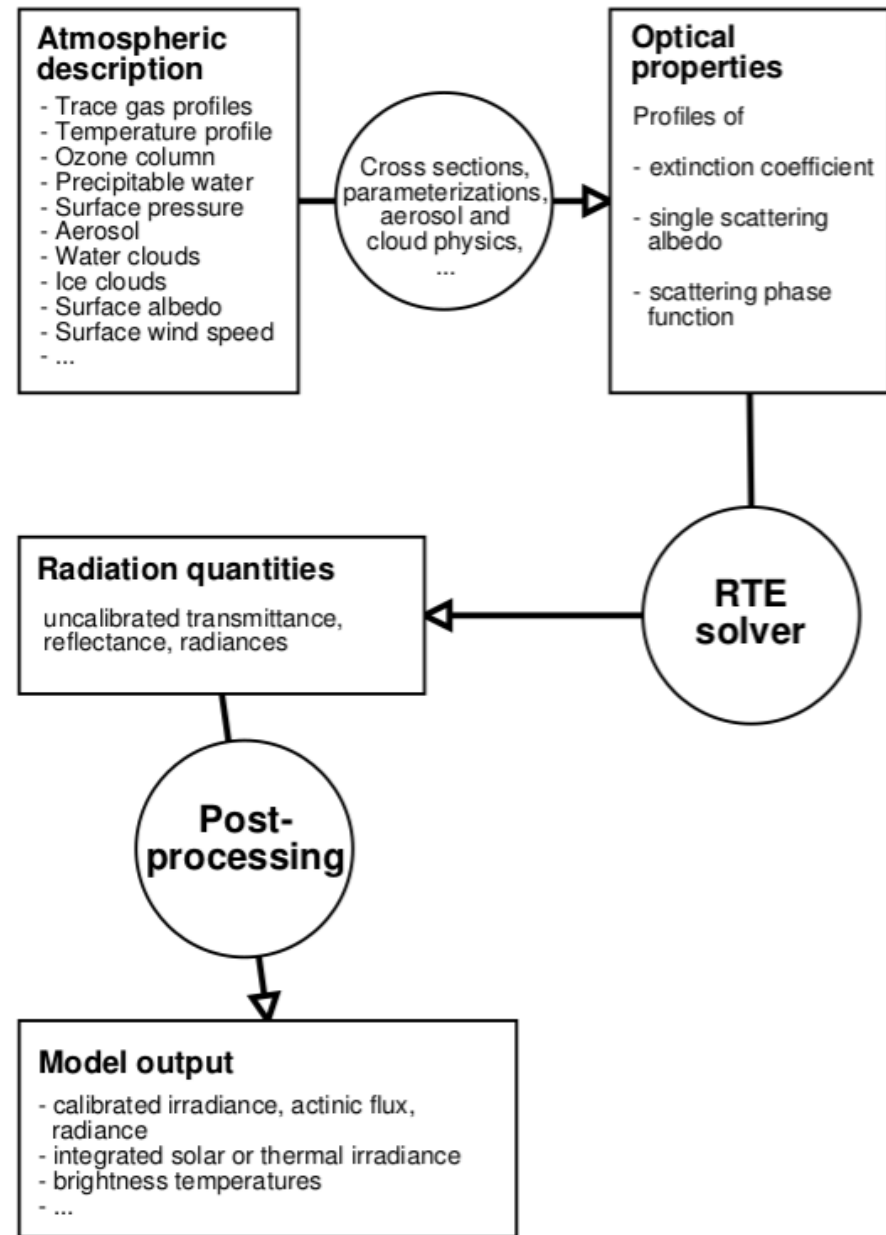
$$\phi_0 - \phi_s = \phi$$

Ângulo relevante:

$$\cos \Theta = \cos \theta_0 \cos \theta + \sin \theta_0 \sin \theta \cos \phi$$



# Estrutura do libRadtran para solução da transferência radiativa



# Grandezas calculadas pelo libRadtran

De forma geral o resultado dos cálculos leva a:

- Campo de radiância direta
- Campo de radiância difusa

Após integração angular, tem-se também:

- Irradiância ascendente
- Irradiância descendente (inclui contribuição direta)
- Fluxo actínico (ascendente ou descendente)

O balanço de radiação numa camada permite calcular:

- Taxa de aquecimento (K/dia)

# Ferramenta principal: uvspec

O software “uvspec” é a ferramenta principal do libRadtran.

Originalmente era só para UV e VIS, depois foi estendido para espectro térmico, mas o nome permaneceu. Atualmente:  $120\text{ nm} < \lambda < 100\text{ }\mu\text{ m}$

Para executar, abrir um terminal e digitar:

```
uvspec < ./input_file > ./output_file
```

O arquivo de input é um arquivo texto que pode ser editado em qualquer editor, como nedit, gedit, vi, pico, nano, emacs, pluma, geany, etc.

Todos os parâmetros necessários para se rodar o libRadtran para um problema específico são descritos no arquivo de entrada.

Ao final do processo, o usuário analisa os resultados gravados no arquivo de saída. O formato e as informações gravadas dependem dos parâmetros de entrada.



# Construindo um arquivo de entrada

- Estrutura flexível; linhas em branco são ignoradas;
- Símbolo # indica um “comentário”: todo o conteúdo da linha à direita desse símbolo não será processado pelo código. Útil para inserir descrições explicativas.
- Um parâmetro definido por linha.
- Ordem das linhas não é importante. No entanto: se houver repetição, somente a última linha é considerada.

## Sequência sugerida:

1. Definir parâmetros físicos da atmosfera, superfície e fluxo solar
2. Definir a geometria de iluminação e de observação
3. Definir comprimentos de onda / parametrização de bandas
4. Escolher o método de solução da transferência radiativa
5. Definir as grandezas a serem calculadas
6. Definir o tipo de pós-processamento necessário

# Um exemplo de arquivo de entrada mínimo

```
atmosphere_file ../../libRadtran/share/libRadtran/data/atmmod/afglt.dat
source solar ../../libRadtran/share/libRadtran/data/solar_flux/kurudz_1.0nm.dat
wavelength 510.0 510.0
```

- Depende do diretório no qual o usuário executa o programa;
- Escolha do perfil atmosférico;
- Fluxo solar no topo da atmosfera;
- Intervalo de comprimentos de onda em nm;
- Pode-se (“deve-se”) acrescentar comentários explicativos;
- Outras opções ficam implícitas (i.e. escolhidas pelo código).

# Um exemplo de arquivo de entrada mínimo

```
atmosphere_file ../../libRadtran/share/libRadtran/data/atmmod/afglt.dat
source solar ../../libRadtran/share/libRadtran/data/solar_flux/kurudz_1.0nm.dat
wavelength 510.0 510.0
```

```
uvspec < ./inputminimo > ./output
```

- ... using CH4 volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
- ... using N2O volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
- ... using CO volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
- ... using N2 volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.

# Um exemplo de arquivo de entrada mínimo

```
atmosphere_file ../../libRadtran/share/libRadtran/data/atmmod/afglt.dat
source solar ../../libRadtran/share/libRadtran/data/solar_flux/kurudz_1.0nm.dat
wavelength 510.0 510.0
```

```
uvspec < ./inputminimo > ./output
```

```
... using CH4 volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
```

```
... using N2O volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
```

```
... using CO volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
```

```
... using N2 volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
```

```
cat ./output
```

```
510.000 1.685106e+03 1.188161e+02 -3.250561e-14 1.340965e+02 2.592184e+01 -2.258159e-15
```

# Um exemplo de arquivo de entrada mínimo

```
atmosphere_file ../../libRadtran/share/libRadtran/data/atmmod/afglt.dat
source solar ../../libRadtran/share/libRadtran/data/solar_flux/kurudz_1.0nm.dat
wavelength 510.0 510.0
```

```
uvspec < ./inputminimo > ./output
```

```
... using CH4 volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
... using N2O volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
... using CO volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
... using N2 volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
```

```
cat ./output
```

```
510.000 1.685106e+03 1.188161e+02 -3.250561e-14 1.340965e+02 2.592184e+01 -2.258159e-15
```

Lambda	“edir”	“edn”	“eup”	“uavgdir”	“uavgdn”	“uavgup”
	Irradiância direta (sempre descendente)	Irradiância difusa descendente	Irradiância difusa ascendente	Intensidade média direta (sempre descendente)	Intensidade média difusa descendente	Intensidade média difusa ascendente

# Um exemplo de arquivo de entrada mínimo

```
atmosphere_file ../../libRadtran/share/libRadtran/data/atmmod/afglt.dat
source solar ../../libRadtran/share/libRadtran/data/solar_flux/kurudz_1.0nm.dat
wavelength 510.0 510.0
```

```
uvspec < ./inputminimo > ./output
```

```
... using CH4 volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
... using N2O volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
... using CO volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
... using N2 volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.
```

```
cat ./output
```

```
510.000 1.685106e+03 1.188161e+02 -3.250561e-14 1.340965e+02 2.592184e+01 -2.258159e-15
```

Lambda	“edir”	“edn”	“eup”	“uavgdir”	“uavgdn”	“uavgup”
	Irradiância direta (sempre descendente)	Irradiância difusa descendente	Irradiância difusa ascendente	Intensidade média direta (sempre descendente)	Intensidade média difusa descendente	Intensidade média difusa ascendente

edir+edn = irradiância total descendente

# Um exemplo de arquivo de entrada mínimo

```
atmosphere_file ../../libRadtran/share/libRadtran/data/atmmod/afglt.dat
source solar ../../libRadtran/share/libRadtran/data/solar_flux/kurudz_1.0nm.dat
wavelength 510.0 510.0
```

```
uvspec < ./inputminimo > ./output
```

... using CH4 volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.  
... using N2O volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.  
... using CO volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.  
... using N2 volume mixing ratio profile from US standard atmosphere.

```
cat ./output
```

```
510.000 1.685106e+03 1.188161e+02 -3.250561e-14 1.340965e+02 2.592184e+01 -2.258159e-15
```

Lambda	“edir”	“edn”	“eup”	“uavgdir”	“uavgdn”	“uavgup”
	Irradiância direta (sempre descendente)	Irradiância difusa descendente	Irradiância difusa ascendente	Intensidade média direta (sempre descendente)	Intensidade média difusa descendente	Intensidade média difusa ascendente

edir+edn = irradiância total descendente

= fluxo actínico /  $4\pi$

# Atividade 1

Modifique o arquivo de input mínimo, execute o uvspec e avalie o resultado:

- Altere o comprimento de onda final, mas mantenha-se dentro da faixa do espectro solar. Execute. O que acontece?
- Mantenha o comprimento de onda final como você definiu. Mude o arquivo de input solar para kurudz\_0.1nm.dat. Execute. O que acontece?
- Altere os comprimentos de onda mais algumas vezes.
- Que conclusão você pode obter sobre o comprimento de onda dos resultados nesse exemplo de setup?
- Compare a irradiância solar descendente na região espectral de ~500 nm com a da região perto de ~800 nm. O que você observa?



## Outro exemplo de arquivo de entrada - “uv\_input”

```
atmosphere_file ../../libRadtran/share/libRadtran/data/atmmod/afglt.dat
# Location of atmospheric profile file

source solar ../../libRadtran/share/libRadtran/data/solar_flux/kurudz_0.1nm.dat
# Extraterrestrial spectrum

mol_modify O3 300. DU # Set ozone column
day_of_year 170 # Correct for Earth-Sun distance
albedo 0.04 # Surface albedo for the Amazon
sza 32.0 # Solar zenith angle
rte_solver disort # Radiative transfer equation solver
number_of_streams 6 # Number of streams
wavelength 299.0 341.0 # Wavelength range [nm]
spline 300 340 1 # Interpolate from first to last in step

quiet
```

## Outro exemplo de arquivo de entrada - "uv\_input"

### Atividade 2

- Procure avaliar o que são os parâmetros do script uv\_input.
- Execute o uvspec e avalie os resultados.
- Modifique os parâmetros e avalie como mudam os resultados.
- Consulte o Capítulo 6 do manual do libRadtran para tirar dúvidas sobre o significado de cada parâmetro.

quiet

## Alguns parâmetros de destaque ( Cap. 6 do manual )

aerosol\_haze type #(2 km) rural, maritime, urban, tropospheric  
aerosol\_modify tau set value  
aerosol\_file file #(e.g. AOD variável com altura, ssa, função de fase)

albedo value  
albedo\_file file # albedo em função do comprimento de onda

atmosphere\_file file # arquivos predefinidos: tropical, midlat summer/winter,  
arctic summer/winter, US standard

mol\_abs\_param reptran [fine medium coarse] # parametrização de bandas  
mol\_abs\_param kato/fu/sbdart etc # outras parametrizações de bandas

mol\_modify species column unit # define a concentração na coluna para O3,  
O2, H2O, CO2, NO2, SO2, CH4, N2O, CO etc.

sza value # ângulo solar zenital, em graus

zout values # altitudes (km) acima da superfície para resultados dos cálculos.  
Topo da atmosfera: 120 km

## Alguns parâmetros de destaque ( Cap. 6 do manual )

`Souce type [file] [unit]` # tipo de fonte: solar ou thermal. Nome do arquivo opcional. Unidades de saída dos resultados dependem da unidade da fonte.

`output_process type` # pós-processamento dos dados. `integrate` para `reptran`, `sum` para outras parametrizações de bandas. Outras opções: `per_nm`, `per_cm-1`, `per_band`

`output_quantity quantity` # se desejado, converte radiâncias/irradiâncias em temperatura de brilho ou refletância.

`output_user format` # grandezas a serem apresentadas ao final. Vários parâmetros possíveis: `edir`, `eglo`, `edn`, `eup` (irradiâncias), `uu` (radiâncias, dependendo dos ângulos de observação), `fdir`, `fglo`, `fdn`, `fup` (fluxos actínicos), `heat` (taxa de aquecimento em K/dia), etc.

`number_of_streams value` # Quanto maior, mais preciso, mas mais demorado. Radiâncias precisam de mais feixes.

`rte_solver type` # define o método de solução da eq. de transferência radiativa.

# Métodos de solução da transferência radiativa (solver)

RTE solver	Geometry	Radiation quantities	Reference	Comments
DISORT 1.3	1-D, PP	E, F, L	Stamnes et al. (1988)	discrete ordinate
DISORT 2.0	1-D, PP	E, F, L	Stamnes et al. (2000)	discrete ordinate
POLRADTRAN	1-D, PP	<b>E, F, L</b>	Evans and Stephens (1991)	polarization included
twostr	1-D, PS	E, F	Kylling et al. (1995)	two stream; pseudo-spherical correction for low sun angles;
sdisort	1-D, PS	E, F, L	Dahlback and Stamnes (1991)	pseudo-spherical correction for low sun angles; double precision, customized for airmass calculations
spsdisort	1-D, PS	E, F, L	Dahlback and Stamnes (1991)	pseudo-spherical correction for low sun angles; single precision, not suitable for cloudy conditions
tzs	1-D, PP	L(TOA)		thermal, zero scattering
sss	1-D, PP	L(TOA)		solar, single scattering
mystic	3-D, PP	E, F, L	Mayer (1999, 2000)	Monte Carlo <sup>(a)</sup>

(a) not included in the free package; available in joint projects

Explanation:

PP, plane-parallel

E, irradiance

PS, pseudo-spherical

F, actinic flux

1-D, one-dimensional

L, radiance

3-D, three-dimensional

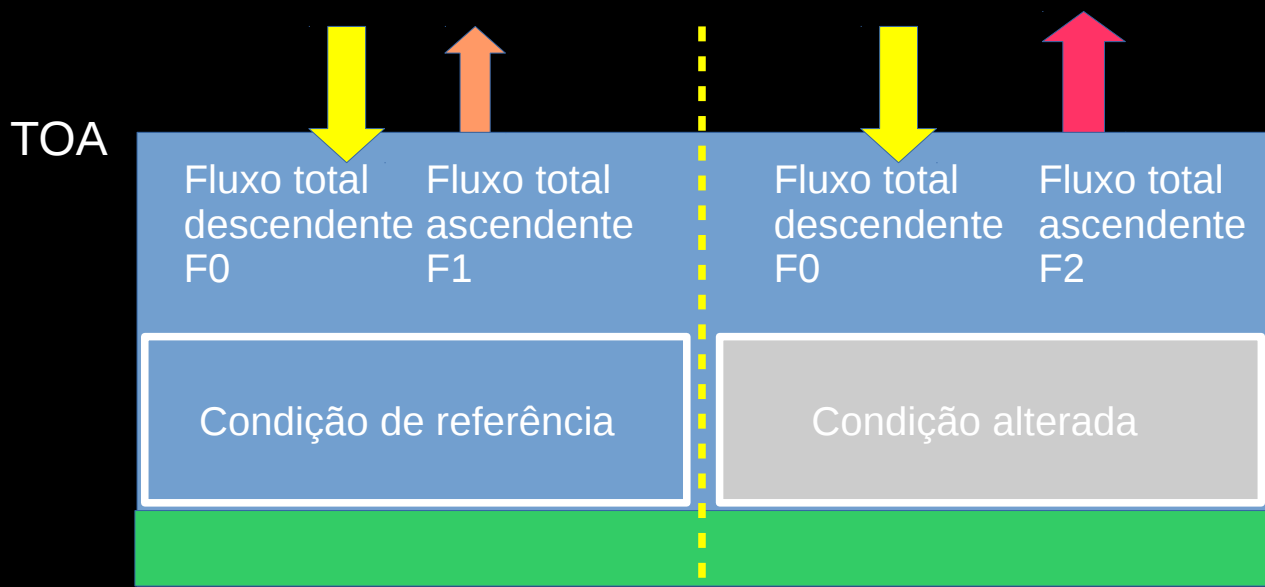
L(TOA), radiance at top of atmosphere

Bold face **E**, **F**, and **L** indicate vector quantities.

# Atividade em grupo

## Forçantes e efeitos radiativos

Forçante: variação do fluxo radiativo líquido no topo da atmosfera, devido a mudança de um parâmetro em relação a uma referência.



$$\text{Forçante} \equiv \Delta (F_{\text{down}} - F_{\text{up}})$$

$$\text{Forçante} = (F_0 - F_2) - (F_0 - F_1)$$

$$\text{Forçante} = F_1 - F_2$$

# Atividade em grupo

## Forçantes e efeitos radiativos

- Mudança de uso do solo
- Aerossóis vistos do espaço
- Gases de efeito estufa
- Efeito radiativo de nuvens
- Efeito de onda longa de cirrus