

**Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da
Universidade de São Paulo**

**Apostila da Disciplina
Meteorologia Física II – ACA 0326**

**Prof. Márcia Akemi Yamasoe
Digitação: Clara Iwabe – monitora da disciplina**

**Primeiro semestre de 2006
Versão revisada**

Introdução.....	4
1. Grandezas Radiométricas	6
1.1. Radiação e o espectro eletromagnético.....	6
1.2. Ângulo sólido	7
1.3. Fluxo, Intensidade, Irradiância e Radiância.....	8
1.4. Densidades Espectrais	10
1.5. Absortância, Refletância e Transmitância	11
2. Radiação de Corpo Negro	14
2.1. Lei de Kirchhoff	15
2.2. Lei de Planck	16
2.3. Leis de Wien.....	18
2.4. Lei de Stefan-Boltzmann	19
2.5. Equilíbrio Termodinâmico Local	20
3. Radiação Solar.....	22
3.1. O Sol.....	22
3.1.1 A Distribuição Espectral de Energia.....	24
3.2. Posição do Disco Solar acima do Horizonte.....	25
3.2.1 Sistema Geográfico	26
3.2.2 Sistema Equatorial Horário	27
3.2.3 Sistema Horizontal Local	28
3.3. Ciclos Anuais	33
3.4 Irradiância Solar no Topo da Atmosfera	37
3.5 Irradiação Solar no Topo da Atmosfera.....	37
4. Medição de Irradiância	40
4.1 Introdução.....	40
4.2 Principais Grandezas Medidas.....	41
4.2.1 Radiação solar (0,3 a 4,0 μm).....	41
4.2.2 Radiação de onda longa ou radiação terrestre (4 a 100 μm).....	42
4.2.3 – Radiação total	42
4.2.4 – Medidas em bandas espectrais (filtros).....	42
4.2.5 – Medidas orientadas em ângulos sólidos pequenos.....	43
4.3 Princípios Físicos	43
4.3.1 – Detectores térmicos	43
4.3.2 – Fotodetectores.....	45
4.4 Calibração.....	45
4.5 Algumas Aplicações	46
4.6 Instrumentos Convencionais.....	47
5. Absorção e espalhamento	49
5.1 Constituintes Atmosféricos Relevantes	50
5.1.1 Gases	51
5.1.2 Aerossol.....	52
5.2 Absorção Molecular	52
5.2.1 Espectro de absorção (emissão) atômico	53
5.2.2 Espectro de emissão(absorção) molecular	54
5.2.3 Formas das linhas espectrais.....	58
5.2.4 Coeficiente mássico e profundidade óptica de absorção	60
5.3 Espalhamento	61
5.3.1 Espalhamento Rayleigh	64
5.3.2 Espalhamento Mie	67
5.4 O papel das nuvens.....	70
6. Equação de Transferência Radiativa (ETR)	72
6.1 Lei de Beer	72
6.2 Forma diferencial da ETR na ausência de espalhamento - Equação de Schwarzschild.....	74
6.3 Forma diferencial da ETR na ausência de absorção/emissão	75

6.4 Equação geral de transferência radiativa	77
6.5 Aproximação atmosfera plano-paralelo.....	78
6.6 Propagação de radiação solar	82
6.7 Propagação de radiação terrestre	85
7. Balanços Radiativos	87
7.1 Equilíbrio radiativo do planeta	87
7.1.1 Temperatura de equilíbrio radiativo de um planeta sem atmosfera	88
7.1.2 Temperatura de equilíbrio radiativo num planeta com atmosfera	89
7.1.3 Atmosfera com absorção e espalhamento.....	94
7.2 Taxa de aquecimento/resfriamento radiativo.....	97
7.3 Balanço de energia à superfície	102
Bibliografia.....	104

Introdução

A principal fonte de energia do sistema Terra-atmosfera, utilizada nos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem tanto na superfície quanto na atmosfera, é a radiação eletromagnética proveniente do sol. Dessa forma, qualquer alteração no fluxo incidente de radiação solar resultará em diferentes respostas/cenários na atmosfera e superfície, podendo haver alterações em vários processos meteorológicos e climáticos na Terra. Além de fatores externos, como o movimento de rotação da Terra, por exemplo, a radiação solar que atinge a superfície sofre vários processos de interação com a atmosfera que é constituída por gases e partículas de aerossol. As nuvens assim como as características físicas da superfície sobre a qual a radiação solar incide também desempenham um papel importante no balanço de radiação do sistema.

Dessa forma, alterações, por exemplo, nos constituintes da atmosfera (composição química e concentração de gases e partículas de aerossol, quantidade e características das nuvens) que interagem com a radiação eletromagnética podem afetar o perfil de temperatura e, por conseguinte, o perfil de pressão. A alteração da distribuição vertical e horizontal da pressão atmosférica afeta a velocidade e a direção do vento. Com relação ao clima da Terra, um dos assuntos da atualidade é o aumento da concentração dos chamados gases do efeito estufa e o consequente aumento da temperatura do planeta. No que diz respeito aos processos que ocorrem na superfície, um exemplo é a realização de fotossíntese pela vegetação a partir da absorção da radiação solar na região espectral do visível ou fotossinteticamente ativa. A radiação eletromagnética afeta também a concentração de alguns gases na atmosfera a partir de reações fotoquímicas.

É importante lembrar que assim como o meio afeta o campo de radiação, o campo de radiação pode alterar o meio e assim por diante. Denominam-se tais processos como processos de re-alimentação do sistema (do inglês *feedback processes*). Um exemplo é o aquecimento da superfície e da atmosfera terrestre devido à incidência de radiação solar durante o dia. Tal aquecimento resulta em instabilidade, gerando movimentos convectivos do ar próximo à superfície. Algumas parcelas de ar sofrem movimentos ascendentes e outras descendentes. O movimento ascendente da parcela de ar causa resfriamento adiabático e, se a atmosfera estiver suficientemente úmida, ocorre condensação e formação

de nuvens. As nuvens por sua vez alteram a distribuição de radiação solar incidente e emitem e absorvem radiação infravermelha [Thomas e Stamnes, 1999].

Um dos objetivos deste curso é compreender os principais processos de interação da radiação solar e terrestre com os constituintes da atmosfera e com a superfície, discutindo as possíveis consequências oriundas dessa interação. Para tanto, serão estudados os fundamentos da transferência radiativa na atmosfera: Terminologia, definições das grandezas físicas, leis físicas envolvidas, formulação matemática – a equação de transferência radiativa. Nos próximos capítulos serão estudados o espectro eletromagnético, as regiões nas quais se costuma dividi-lo e os conceitos físicos envolvidos. Os principais processos que determinam a variação do fluxo de radiação solar no topo da atmosfera também são abordados neste curso. Um dos capítulos é destinado à instrumentação utilizada para medir radiação e os princípios físicos de funcionamento. Uma das aplicações oriundas da compreensão dos processos de transferência radiativa entre o sistema Terra-atmosfera é o monitoramento do sistema a partir de técnicas de sensoriamento remoto via satélite.

1. Grandezas Radiométricas

1.1. Radiação e o espectro eletromagnético

Todo corpo com temperatura maior que o zero absoluto (0 K) emite radiação, em todos os comprimentos de onda. Define-se como radiação a emissão ou propagação de energia na forma de onda eletromagnética ou fóton (a energia é transferida como unidades discretas denominadas quanta ou fótons). A energia (U) de um fóton está relacionada com seu comprimento de onda (λ) ou sua frequência de oscilação (ν) por:

$$U = hc/\lambda = h\nu \quad (1.1)$$

onde h é a constante de Planck ($= 6,626 \times 10^{-34}$ Js) e c é a velocidade da luz ($= 2,998 \times 10^8$ ms⁻¹ no vácuo).

O espectro eletromagnético pode ser dividido em várias bandas ou intervalos espectrais (também ilustrado na Figura 1.1):

- raios-gama: radiação com comprimento de onda¹ menor que 1 nanômetro;
- raios-X: radiação com comprimento de onda entre 1 e 10 nm;
- ultravioleta: região compreendida entre $10 < \lambda < 400$ nm;
- visível ou radiação fotossinteticamente ativa (PAR, do inglês *photosynthetically active radiation*)²: $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$;
- infravermelho próximo: $0,7 \mu\text{m} < \lambda < 3,5 \mu\text{m}$;
- infravermelho térmico: $3,5 \mu\text{m} < \lambda < 100 \mu\text{m}$;
- microondas: radiação com comprimentos de onda entre 3mm e 300mm ou frequências³ entre 1 e 100 GHz;

¹ As unidades de comprimento de onda comumente utilizadas são: nanômetro (1nm = 10⁻⁹m) e micrômetro (1 μ m=10⁻⁶m). Em astrofísica também utiliza-se o Ångström (1Å = 10⁻¹⁰m).

² Possui essa denominação por ser a região espectral da radiação solar que é utilizada para a realização de fotossíntese.

- ondas de rádio: radiação com comprimento de onda maior que 300mm.

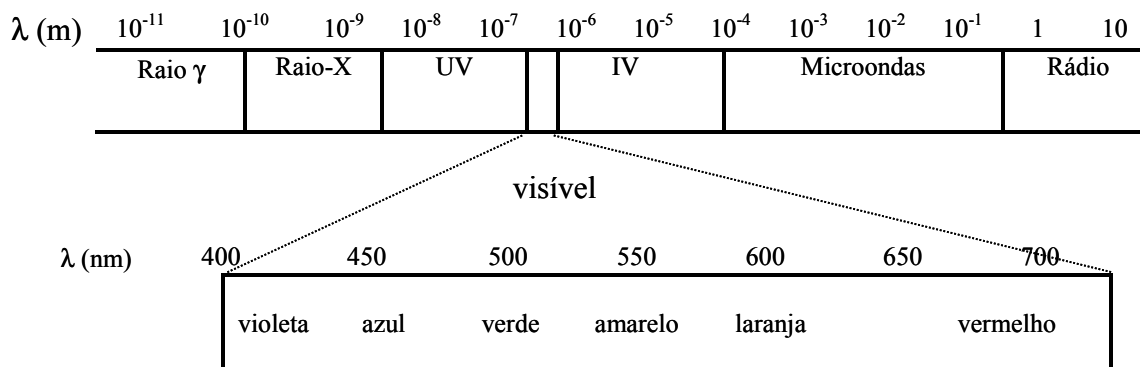


Figura 1.1 – Ilustração esquemática das várias regiões do espectro eletromagnético, de acordo com o comprimento de onda da radiação.

A radiação solar está confinada majoritariamente na região espectral $\lambda \leq 4\mu\text{m}$, sendo por isso denominada radiação de onda curta. Já a radiação emitida por corpos terrestres (por exemplo, superfície, atmosfera) compreende majoritariamente a região espectral $\lambda \geq 4\mu\text{m}$, sendo denominada radiação de onda longa ou térmica.

1.2. Ângulo sólido

O ângulo sólido Ω é definido como a razão entre a área σ de uma superfície esférica e o quadrado do raio r de tal esfera:

$$\Omega = \frac{\sigma}{r^2} \quad (1.2)$$

Utiliza-se o esterradiano (sr) como unidade, embora o ângulo sólido seja na realidade uma grandeza adimensional.

³ Da equação (1.1), verifica-se que $\nu = c/\lambda$, cuja unidade é s^{-1} ou Hz. Além de comprimento de onda e frequência, pode-se também caracterizar uma onda eletromagnética por seu número de onda $\tilde{\nu}$, onde $\tilde{\nu} = 1/\lambda$, cuja unidade mais comumente utilizada é cm^{-1} .

Considerando a esfera de raio r ilustrada na Figura 1.2, centrada no ponto O e um ponto arbitrário em sua superfície com coordenadas esféricas θ e φ , a área infinitesimal dessa superfície é dada por:

$$d\sigma = r \times d\theta \times r \times \text{sen}\theta \times d\varphi \quad (1.3)$$

Portanto, o ângulo sólido infinitesimal definido por essa área é:

$$d\Omega = \frac{d\sigma}{r^2} = \text{sen}\theta \times d\theta \times d\varphi \quad (1.4)$$

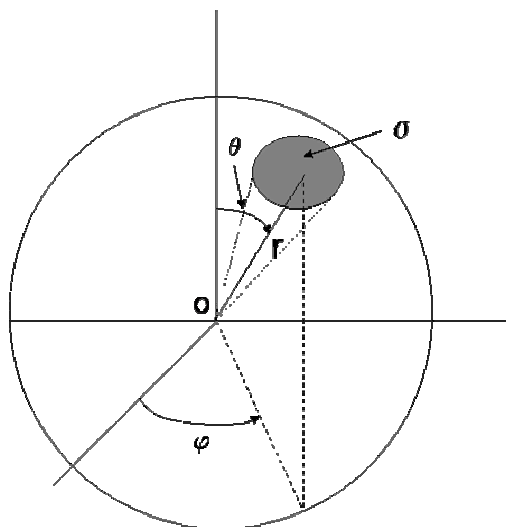


Figura 1.2 – Definição de ângulo sólido. Para um observador localizado em O , o ângulo sólido definiria seu “campo de visão”.

Exercício 1.1: Mostre que o ângulo sólido definido por uma esfera vale 4π .

1.3. Fluxo, Intensidade, Irradiância e Radiância

Nesta seção são apresentadas as nomenclaturas e definições das grandezas radiométricas partindo-se da energia radiante ou eletromagnética. De acordo com Paltridge e Platt [1976] a nomenclatura dos termos associados à radiação atmosférica resultou originalmente de distintas disciplinas. Dessa forma, alguns termos podem ter diferentes significados dependendo do autor. Nesta apostila é adotada a nomenclatura recomendada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

- Energia radiante (U): quantidade de energia na forma de radiação (emitida, transferida, absorvida, incidente, etc.), cuja unidade no Sistema Internacional (SI)⁴ é J (Joule);

- Fluxo de radiação ou fluxo radiativo (ϕ): potência emitida, transferida ou recebida na forma de radiação, com unidade Js^{-1} ou W (Watt)

$$\phi = \frac{dU}{dt} \quad (1.5)$$

- Intensidade radiante de uma fonte (pontual) em uma determinada direção (I): quociente entre a potência emitida pela fonte para uma dada direção do espaço e o ângulo sólido infinitesimal de um cone representando tal direção. Sua unidade é Wsr^{-1}

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} = \frac{d^2U}{dtd\Omega} \quad (1.6)$$

- Irradiância num certo ponto de uma superfície (ϵ): quociente entre o fluxo de radiação pela área do elemento de superfície, cuja unidade é Wm^{-2}

$$\epsilon = \frac{d\phi}{dA} = \frac{d^2U}{dtdA} \quad (1.7)$$

- Radiância (L): quociente entre a intensidade de radiação de um certo elemento de superfície, em uma determinada direção, e a área da projeção ortogonal deste elemento em um plano perpendicular a essa direção. Sua unidade é $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. A Figura 1.3 apresenta uma ilustração esquemática da configuração geométrica da definição de radiância.

$$L = \frac{dI}{\cos\theta \times dA} = \frac{d^3U}{\cos\theta \times dtd\Omega dA} \quad (1.8)$$

⁴ Nesta seção será adotado o Sistema Internacional (SI) para indicar as unidades das grandezas radiométricas, exceto nas definições de grandezas espectrais.

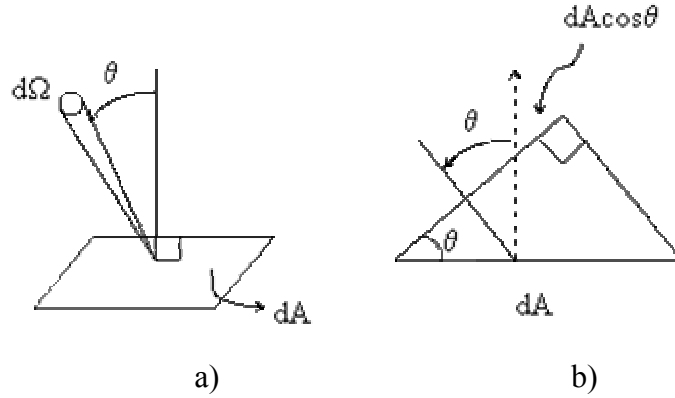


Figura 1.3 – Ilustração esquemática da geometria na definição de radiância. O elemento de área a ser considerado é sempre perpendicular à direção de incidência. a) visão tridimensional; b) visão num plano vertical.

Conhecendo-se a radiância incidente em todas as direções (caracterizadas pelas coordenadas θ e φ) em um determinado hemisfério, é possível determinar a irradiância total incidente em um hemisfério a partir do cálculo:

$$\epsilon = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1.9)$$

Exercício 1.2: Prove que se a radiação é isotrópica, isto é, a radiância é a mesma em todas as direções, a irradiância total incidente em um hemisfério é igual a πL .

1.4. Densidades Espectrais

Todas as grandezas definidas na seção anterior podem também ser especificadas em um intervalo infinitesimal de comprimento de onda, número de onda ou frequência. Neste caso, as quantidades são denominadas espectrais (irradiância espectral, radiância espectral, etc.) que são denotadas por um subscrito apropriado. Por exemplo, radiância espectral com relação a:

a) comprimento de onda: $L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda}$ (1.10), com unidade $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$

$$\text{b) número de onda: } L_{\tilde{\nu}} = \frac{dL}{d\tilde{\nu}} \quad (1.11), \text{ com unidade } \text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{cm}$$

$$\text{c) frequência: } L_{\nu} = \frac{dL}{d\nu} \quad (1.12), \text{ com unidade } \text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{Hz}^{-1}$$

As conversões entre as várias escalas envolvem a velocidade da luz c e as relações:

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} \Rightarrow \frac{d\tilde{\nu}}{d\nu} = \frac{1}{c} \quad (1.13a)$$

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \frac{d\tilde{\nu}}{d\lambda} = -\frac{1}{\lambda^2} \quad (1.13b)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \frac{d\nu}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2} \quad (1.13c)$$

tal que, por exemplo:

$$L_{\lambda} = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{dL}{d\tilde{\nu}} \left| \frac{d\tilde{\nu}}{d\lambda} \right| = \frac{dL}{d\tilde{\nu}} \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} \frac{dL}{d\tilde{\nu}} = \frac{1}{\lambda^2} L_{\tilde{\nu}} \quad (1.14)$$

Quando a grandeza é expressa em termos de comprimento de onda, denomina-se monocromática. A partir da grandeza espectral, valores integrados em determinados intervalos espectrais podem ser obtidos, visto que:

$$dL = L_{\lambda} d\lambda = L_{\tilde{\nu}} d\tilde{\nu} = L_{\nu} d\nu \text{ e, portanto,}$$

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(\lambda') d\lambda' = \int_{\tilde{\nu}_1}^{\tilde{\nu}_2} L_{\tilde{\nu}}(\tilde{\nu}') d\tilde{\nu}' = \int_{\nu_1}^{\nu_2} L_{\nu}(\nu') d\nu'$$

1.5. Absortância, Refletância e Transmitância

A radiação eletromagnética ao atravessar um meio qualquer pode sofrer absorção ou espalhamento. A ocorrência simultânea dos dois processos é denominada extinção ou atenuação. No processo de absorção, parte ou toda a energia radiante é transferida ao meio no qual ela incide ou atravessa. Define-se **absortância** espectral como a fração da radiação

incidente que foi absorvida, ou em outras palavras, como a razão entre a radiação absorvida pela radiação incidente, num determinado comprimento de onda:

$$a(\lambda) = \frac{\epsilon_a(\lambda)}{\epsilon_i(\lambda)} \quad (1.15)$$

onde $a(\lambda)$ é a absorptância espectral, $\epsilon_a(\lambda)$ é a irradiância espectral absorvida pelo meio e $\epsilon_i(\lambda)$ é a irradiância espectral incidente.

O processo de absorção está sempre associado a uma alteração física do meio atravessado. No caso da atmosfera, a alteração mais significativa é a de temperatura ou energia interna.

No processo de espalhamento, a radiação é apenas desviada da orientação original, podendo ser refletida ou transmitida. Se a radiação, quando espalhada, voltar para o hemisfério de origem, é denominada refletida, caso contrário, diz-se que ela foi transmitida (vide Figura 1.4). Em estudos atmosféricos, o hemisfério é definido a partir de um plano horizontal de referência. Finalmente, quando a radiação não sofrer interação com o meio diz-se que foi diretamente transmitida (componente t_D na figura 1.4). Denomina-se **refletância** a razão entre a radiação refletida e a radiação incidente e **transmitância** é a razão entre a radiação transmitida e a incidente. Da Figura 1.4, tem-se:

$$r(\lambda) = r_1(\lambda) + r_2(\lambda) \quad (1.16);$$

$$t_d(\lambda) = t_{d1}(\lambda) + t_{d2}(\lambda) \quad (1.17);$$

$$t(\lambda) = t_D(\lambda) + t_d(\lambda) \quad (1.18)$$

e, por conservação de energia:

$$a(\lambda)L(\lambda) + r(\lambda)L(\lambda) + t(\lambda)L(\lambda) = L(\lambda) \quad (1.19a)$$

onde $L(\lambda)$ é a radiância espectral incidente⁵

$$a(\lambda) + r(\lambda) + t(\lambda) = 1 \quad (1.19b)$$

⁵ Note-se que a definição pode ser feita a partir de qualquer variável derivada da energia radiante, desde que, é claro, utilize-se a mesma variável no numerador e no denominador nas respectivas definições.

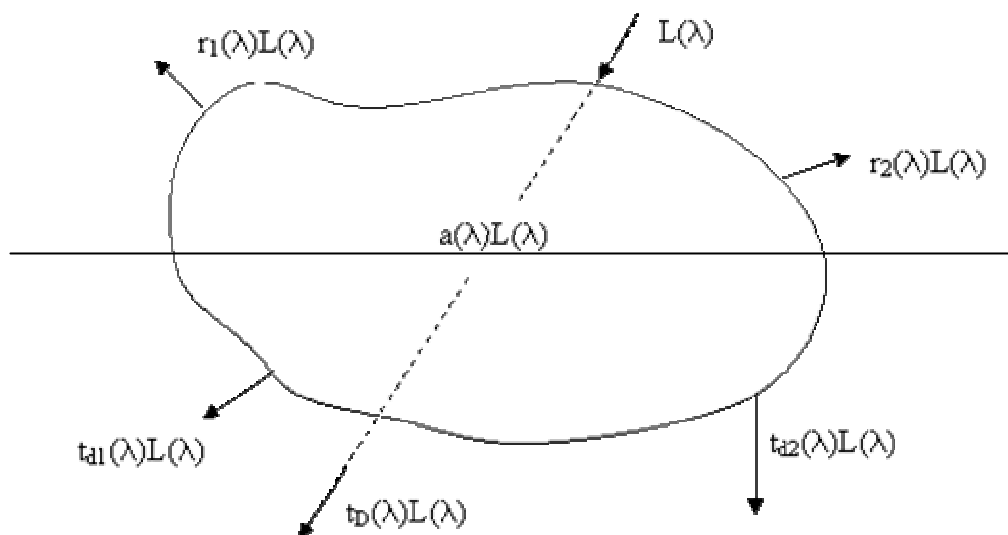


Figura 1.4 – Esquema ilustrativo dos componentes absorvido, refletido e transmitido da radiação incidente, com relação a um plano horizontal de referência.

Um corpo é dito opaco quando sua transmitância for desprezível ou nula. Neste caso, a soma da absorptância e refletância é unitária. As grandezas apresentadas neste subcapítulo se referem a grandezas espectrais, o que significa que podem variar conforme varie o comprimento de onda da radiação incidente. Vale lembrar também que dependem dos constituintes do meio ou corpo atravessado. No caso da atmosfera, os constituintes são os gases, as partículas de aerossol e as nuvens, como será visto no Capítulo 5 e as grandezas variam de acordo com a composição química desses constituintes. No próximo capítulo será estudado um meio especial no qual toda a radiação incidente é absorvida, de modo que a absorptância desse corpo ou meio é unitária em todos os comprimentos de onda.