

EL RAYO DE LUZ

Aula 10 Ondas Eletromagnéticas

Física Geral e Experimental III

Prof. Cláudio Graça

Capítulo 10



R. MONLAUR

Equações de Maxwell e Ondas Eletromagnéticas

Do livro *Genesis*

Dixitque Deus: Fiat lux. Et facta est lux.

O que é a luz?

Breve histórico:

Newton – séc. XVII – teoria corpuscular da luz

Hooke e Huygens – teoria ondulatória da luz

Luz mais lenta no vidro que no ar

Fizeau – mediu a velocidade da luz

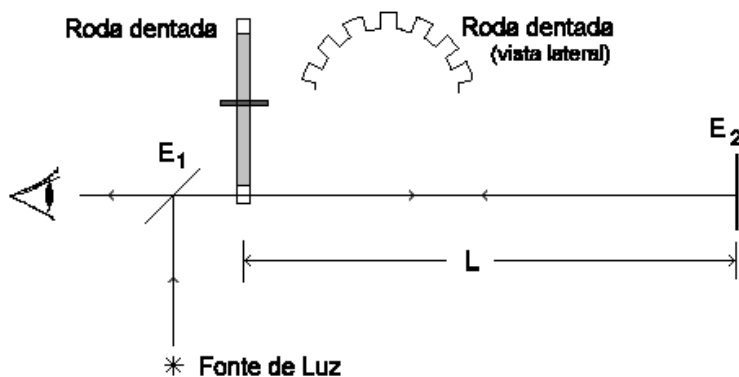
Young – (1801) Interferência da luz

Fermat – teoria matemática da interferência

Maxwell (1860) – Ondas eletromagnéticas viajam
com velocidade $c = 3 \times 10^8$ m/s

Einstein (1905) Teoria corpuscular da luz

A luz é uma onda eletromagnética!



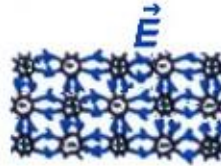
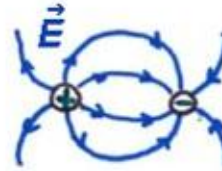
Armand Hyppolyte Louis Fizeau 1842
 $c = 315.00$ km/s



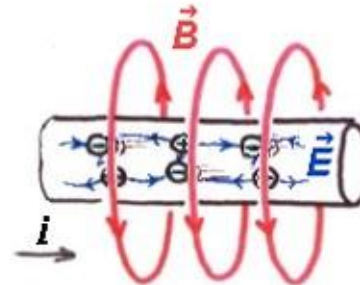
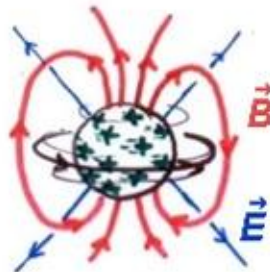
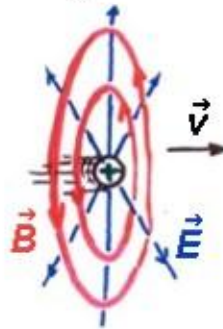
Criação de ondas eletromagnéticas

CARGA CRIA CAMPO

1) Carga parada (cria apenas campo elétrico, \vec{E})



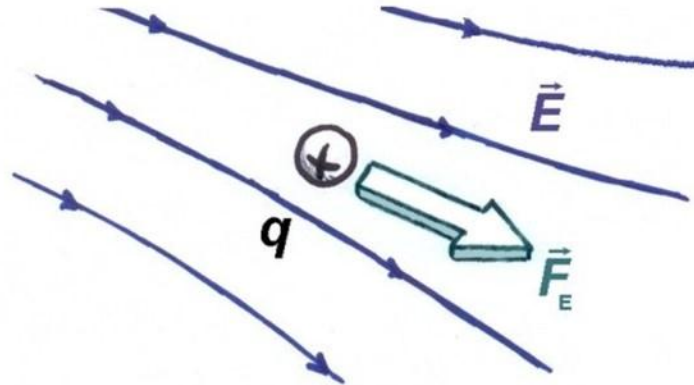
2) Carga em movimento (cria também campo magnético, \vec{B})



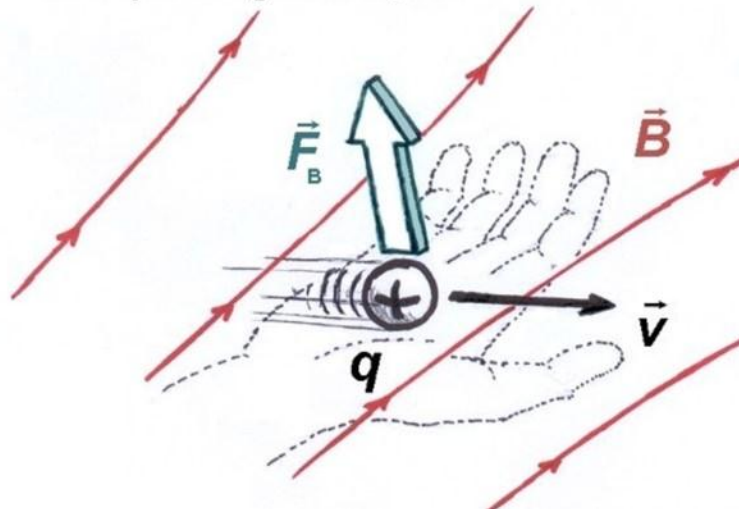
Criação de ondas eletromagnéticas

CARGA SENTE CAMPO

1) Carga sente campo elétrico, \vec{E} :



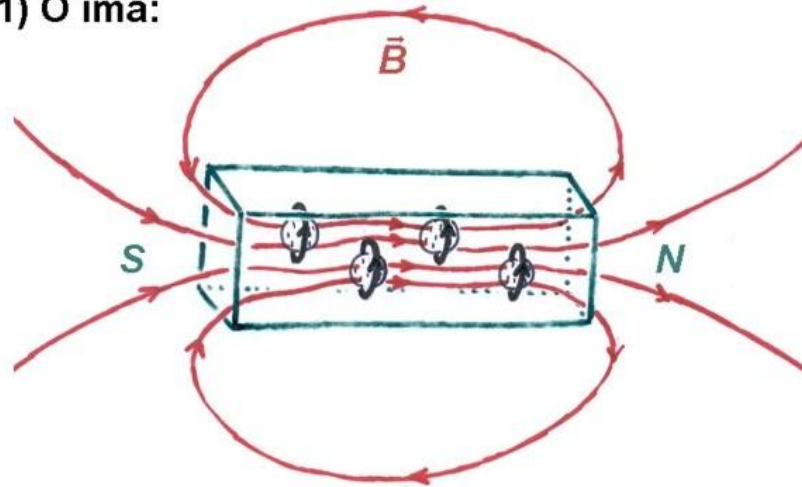
2) Carga (em movimento) sente campo magnético, \vec{B} :



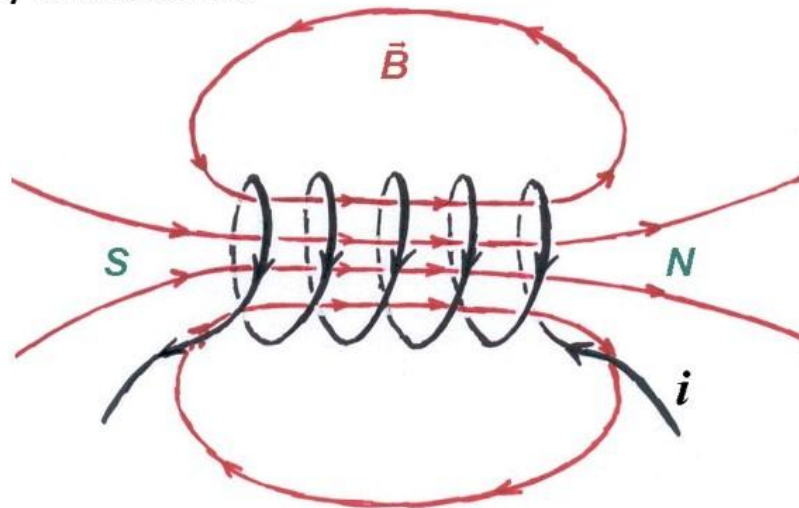
Criação de ondas eletromagnéticas

CARGA CRIA CAMPO MAGNÉTICO

1) O ímã:



2) O eletroímã:



As leis de Maxwell

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Lei de Gauss

- Cargas elétricas produzem campos elétricos.
 - Lei de Coulomb
-

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

Lei de Gauss para o magnetismo

- Não existem monopolos magnéticos.
-

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Lei de Faraday

- Um fluxo magnético variável produz um campo elétrico
-

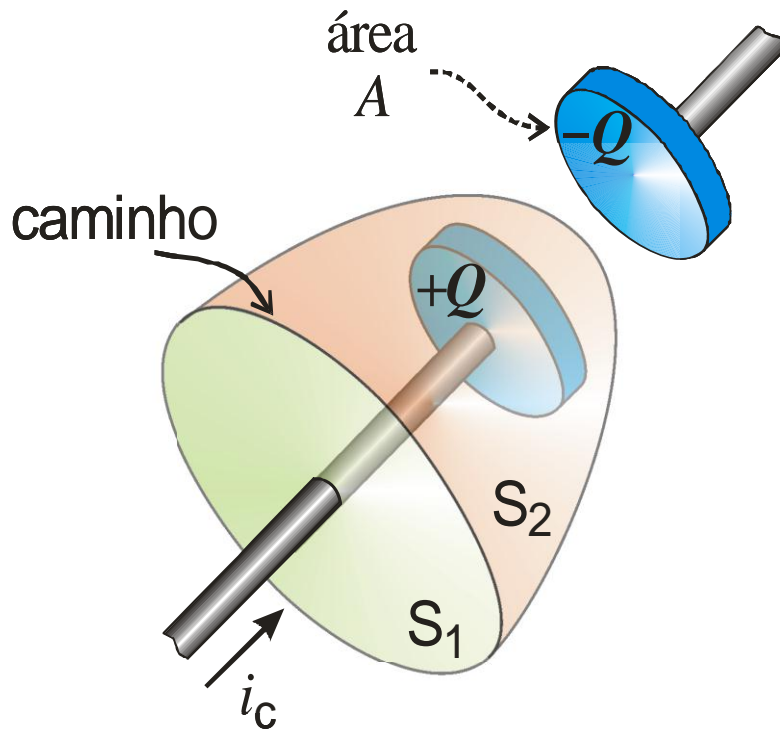
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 i$$

Lei de Ampère

- Uma corrente elétrica produz um campo magnético.

Lei de Ampère-Maxwell

Lei de Ampère aplicada em um capacitor de placas paralelas sendo carregado



superfície S_1

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 i_c$$

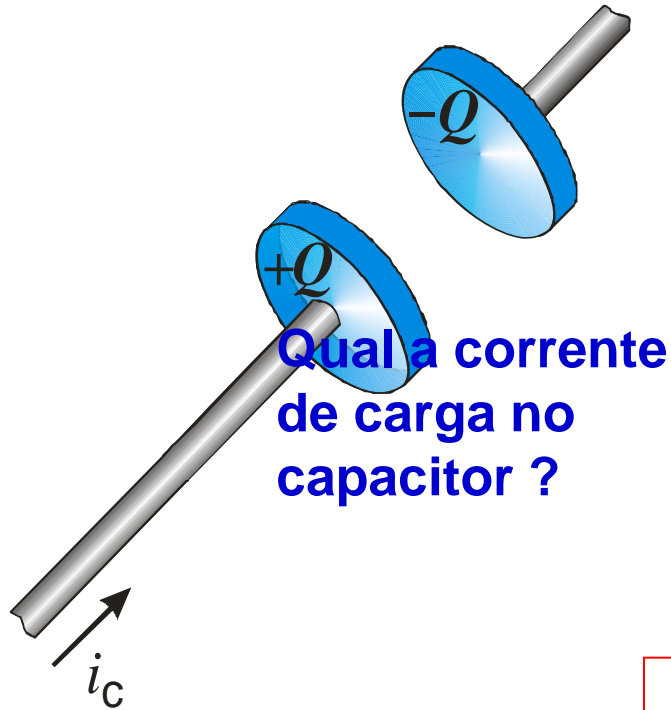
superfície S_2

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = 0 \quad ???$$

Lei de Ampère-Maxwell

A solução foi dada por Maxwell:

Qual o campo elétrico entre as placas do capacitor ?



$$\mathbf{E} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

$$i_c = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} (\epsilon_0 \underbrace{EA}_{\text{circled}}) = \epsilon_0 \frac{d\Phi}{dt}$$

Corrente de deslocamento

$$i_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi}{dt}$$

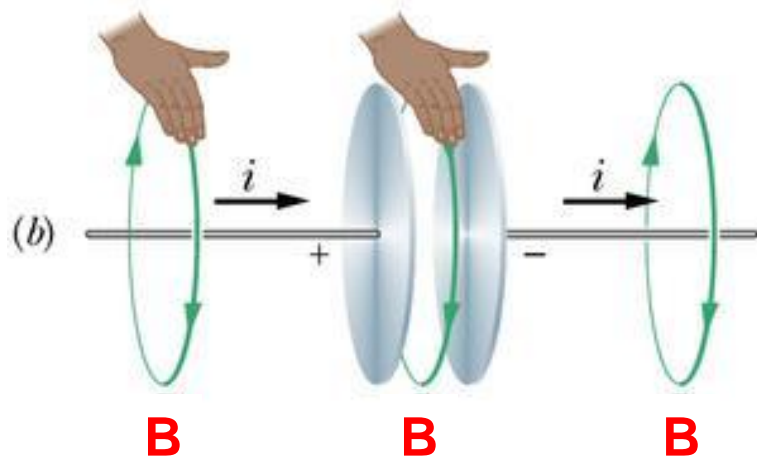
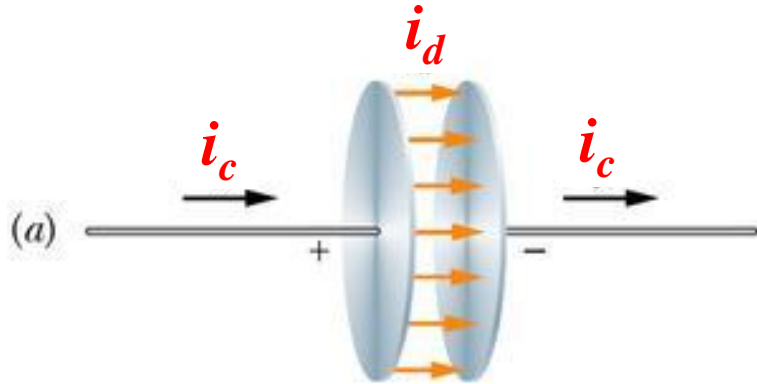
Continuidade da corrente no capacitor

$$i_c = i_d$$

Lei de Ampère-Maxwell

Existe de fato um campo magnético entre as placas ?

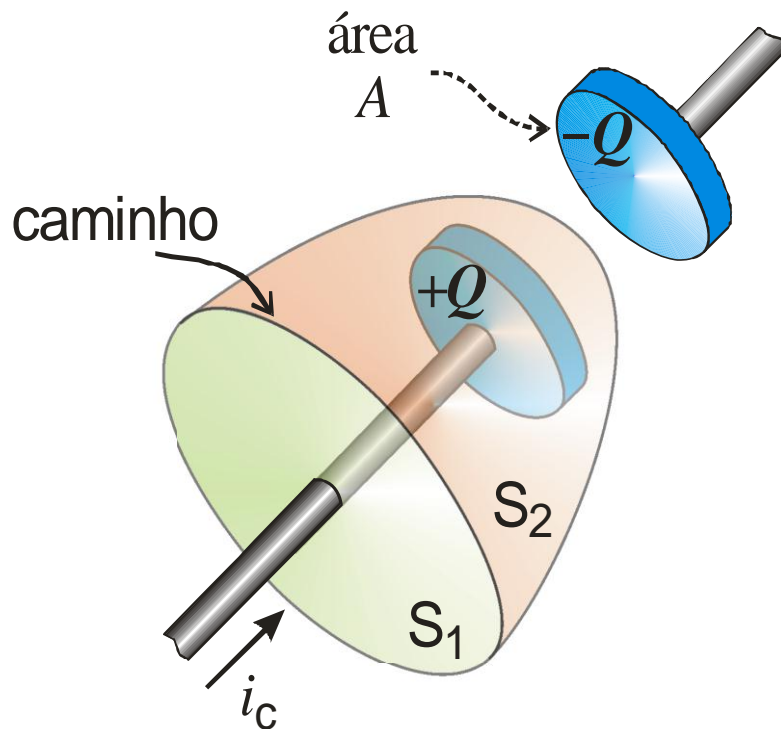
Sim !



O sentido do campo magnético é determinado pela regra da mão direita.

Lei de Ampère-Maxwell

A solução:



superfície S_1

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 i_c$$

superfície S_2

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 i_d$$

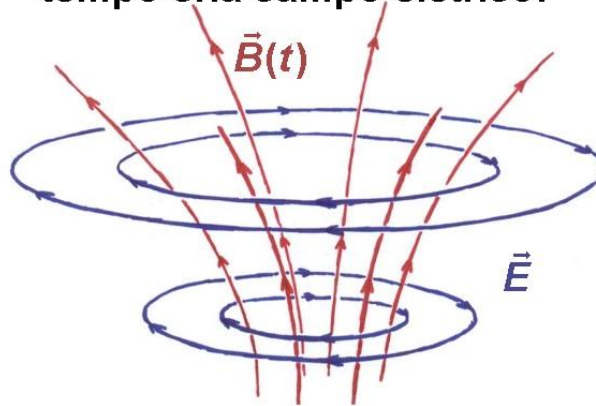
Em uma superfície qualquer:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 \left(i_c + \varepsilon_0 \frac{d\Phi}{dt} \right)$$

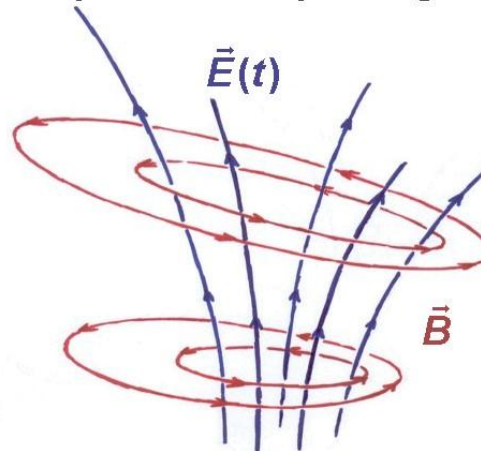
Campos Elétrico e Magnético Induzidos

CAMPO CRIA CAMPO

- 1) Campo magnético variando no tempo cria campo elétrico:



- 2) Campo elétrico variando no tempo cria campo magnético:



Equações de Maxwell

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Lei de Gauss

- Cargas elétricas produzem campos elétricos.
- Lei de Coulomb

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

Lei de Gauss para o magnetismo

- Não existem monopolos magnéticos.

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Lei de Faraday

- A variação de fluxo magnético produz um campo elétrico

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 \left(i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$

Lei de Ampère - Maxwell

- Correntes elétricas e variações de fluxo de campo elétrico produzem campos magnéticos.

Ondas eletromagnéticas

Equações de Maxwell

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 \left(i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$

Obtém-se a equação de uma onda eletromagnética

Solução:

$$E = E_m \cos(kx \pm \omega t)$$

$$B = B_m \cos(kx \pm \omega t)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Propagação de uma OEM

Equações de Maxwell

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 \left(i_c + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$

Obtém-se a equação de uma onda eletromagnética

Solução:

$$E = E_m \cos(kx \pm \omega t)$$

$$B = B_m \cos(kx \pm \omega t)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

Equações das ondas eletromagnéticas

$$\frac{\partial^2 E_y(x,t)}{\partial x^2} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y(x,t)}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 B_z(x,t)}{\partial x^2} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B_z(x,t)}{\partial t^2} = 0$$

Soluções

$$E_y(x,t) = f(x \pm ct)$$

$$B_z(x,t) = f(x \pm ct)$$

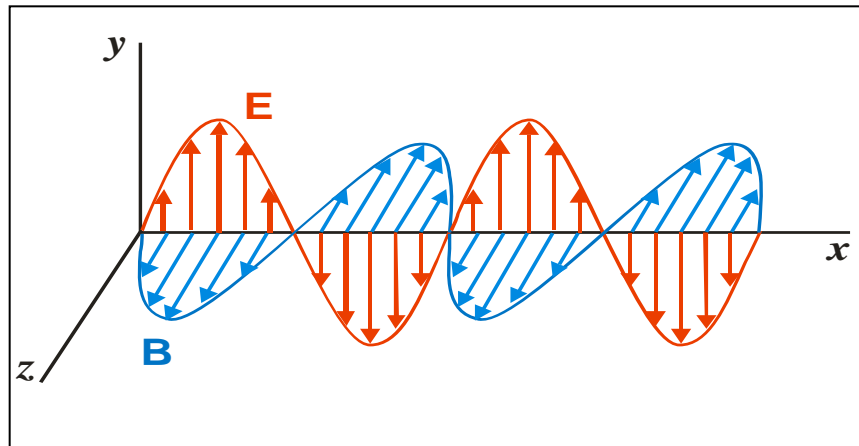
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

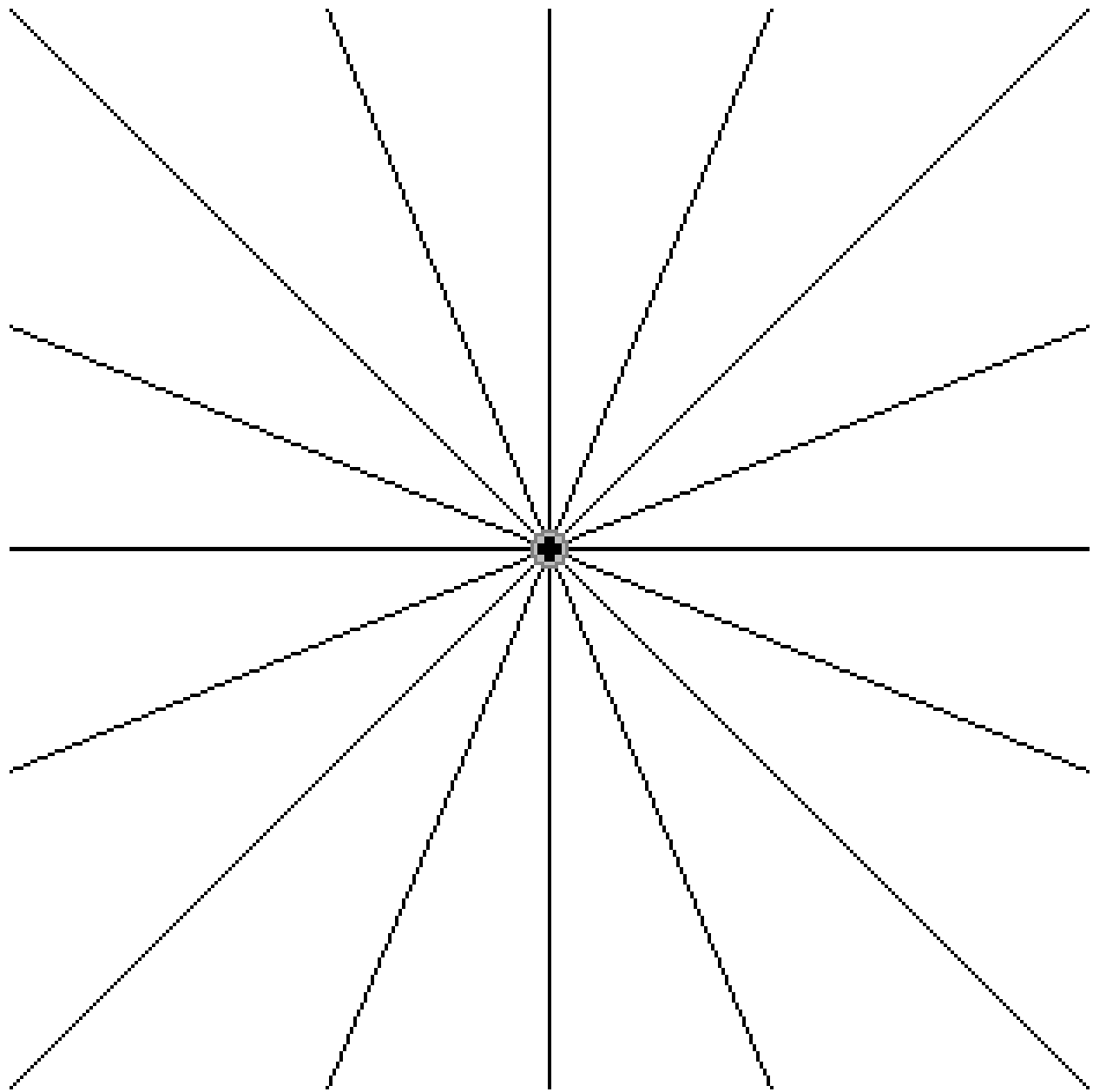
Ondas eletromagnéticas senoidais

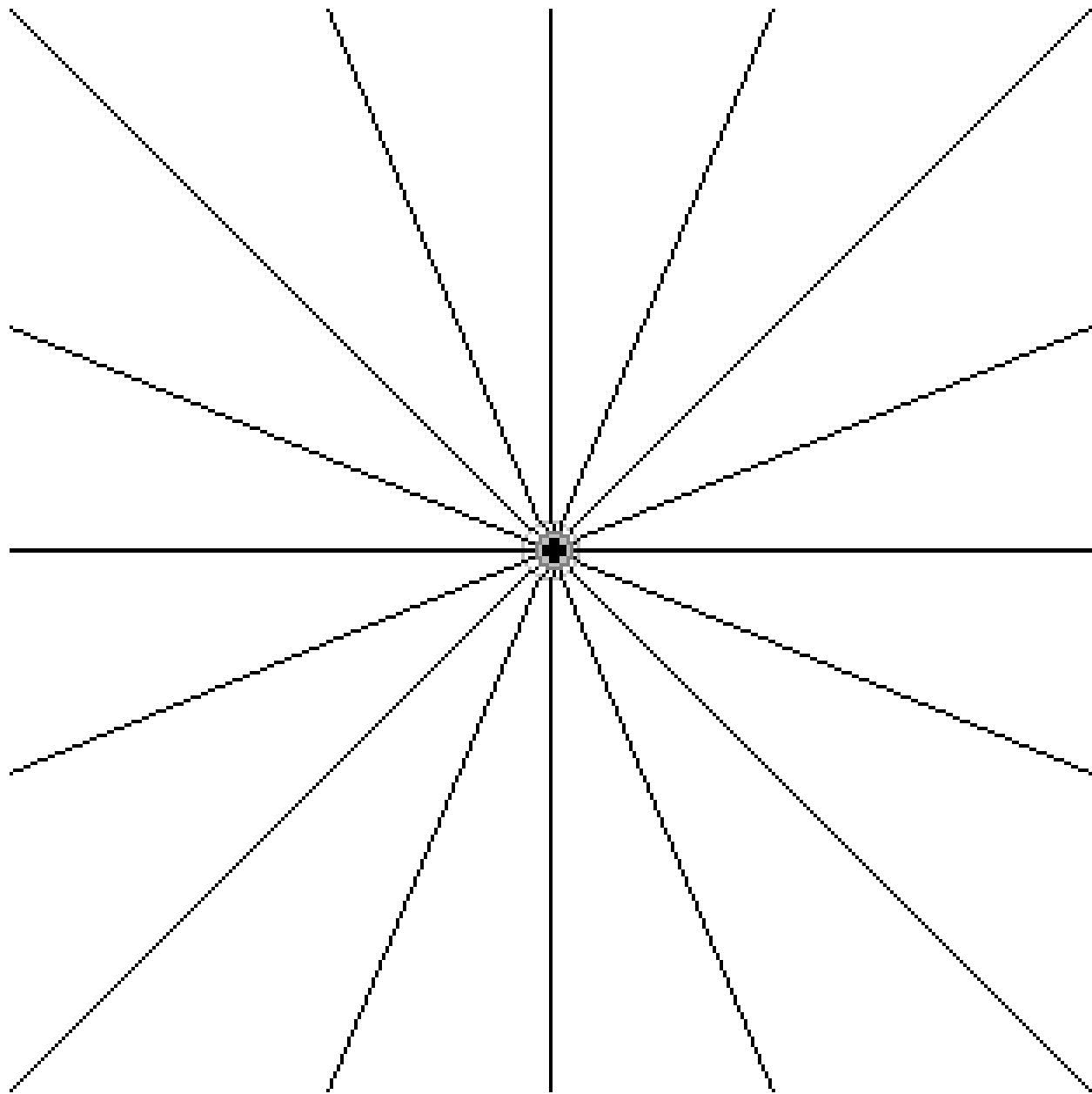
$$E_y(x,t) = E_m \sin(kx \pm \omega t)$$

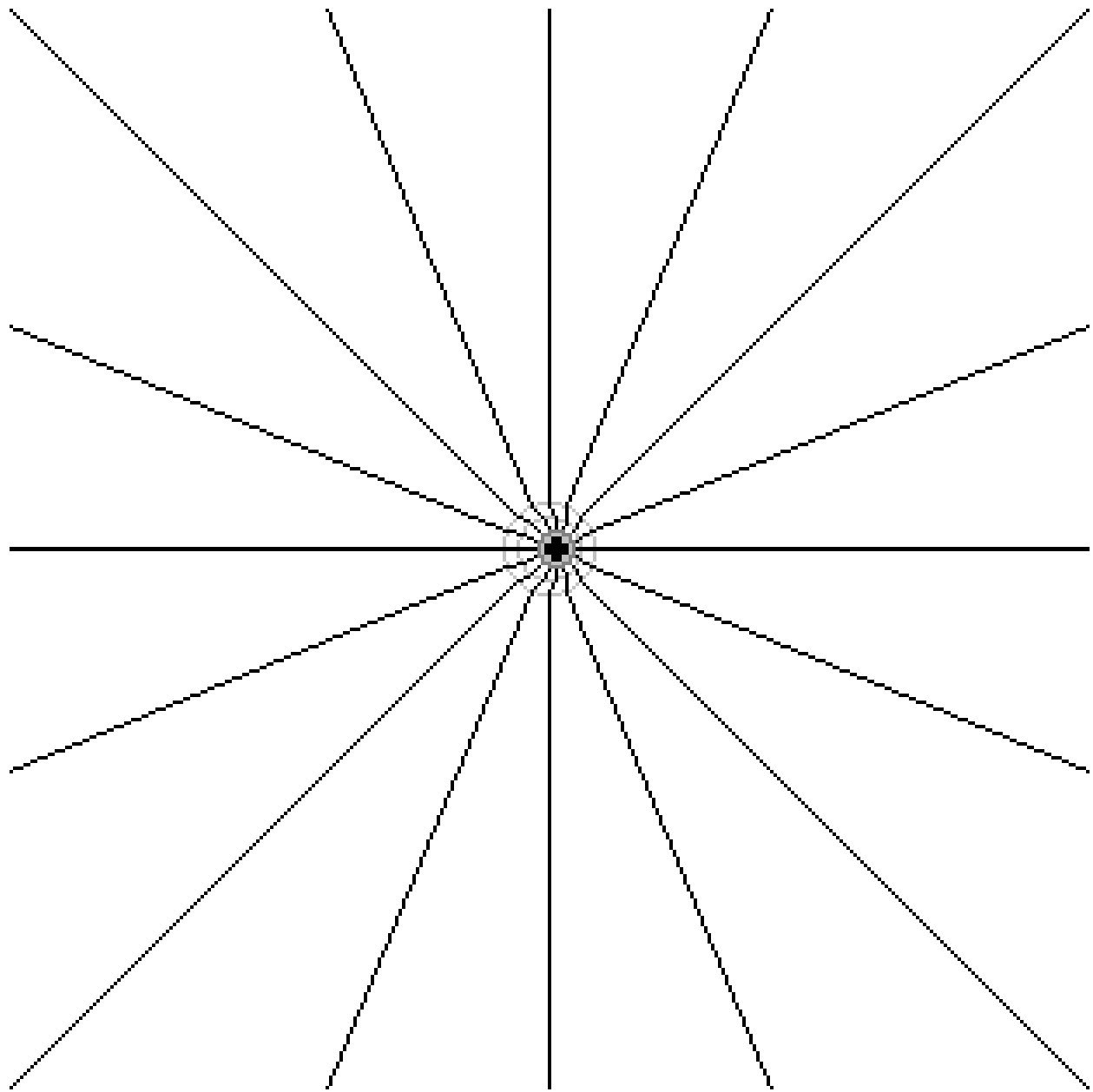
$$B_z(x,t) = B_m \sin(kx \pm \omega t)$$

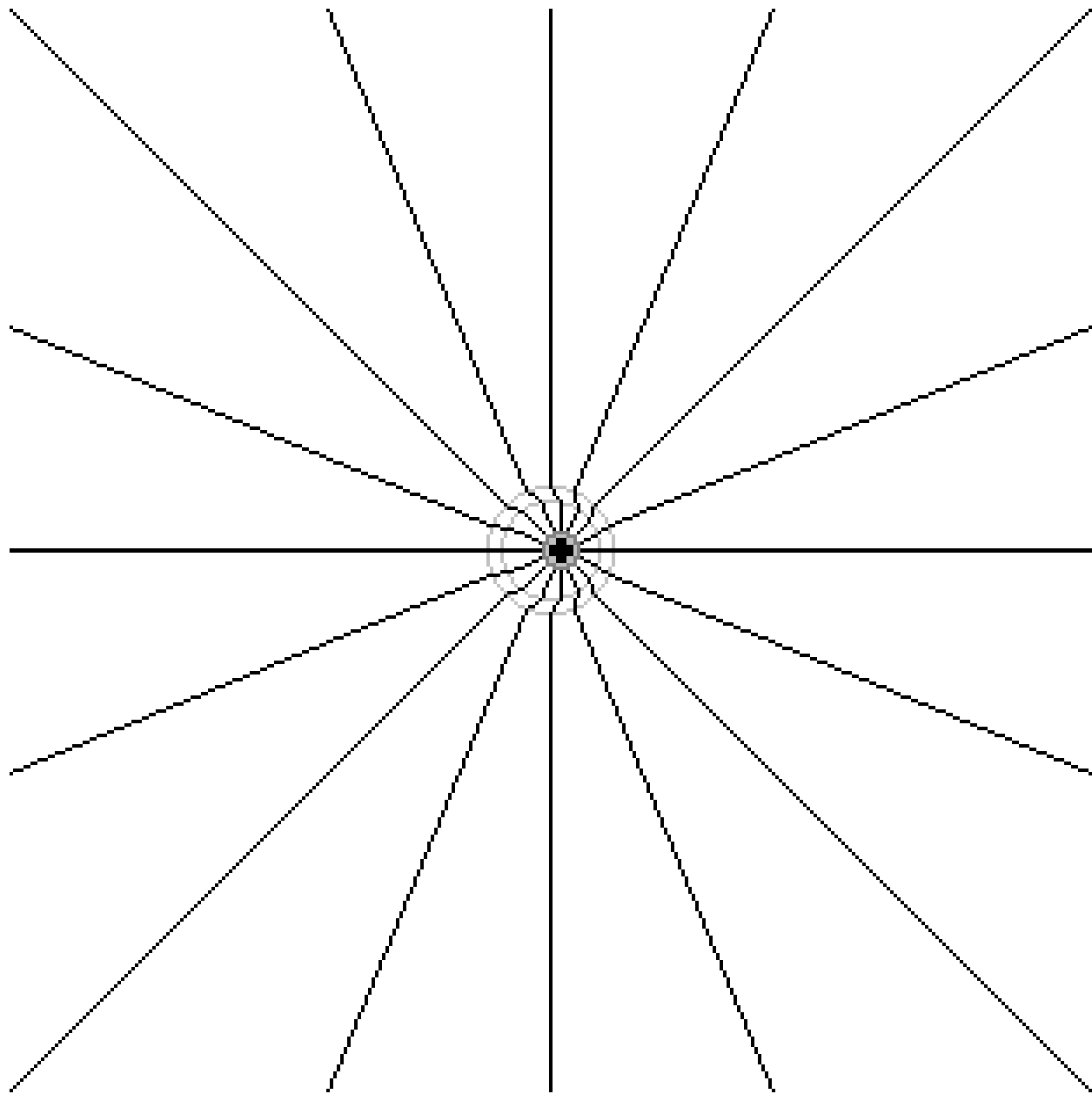
$$\frac{E_m}{B_m} = c$$

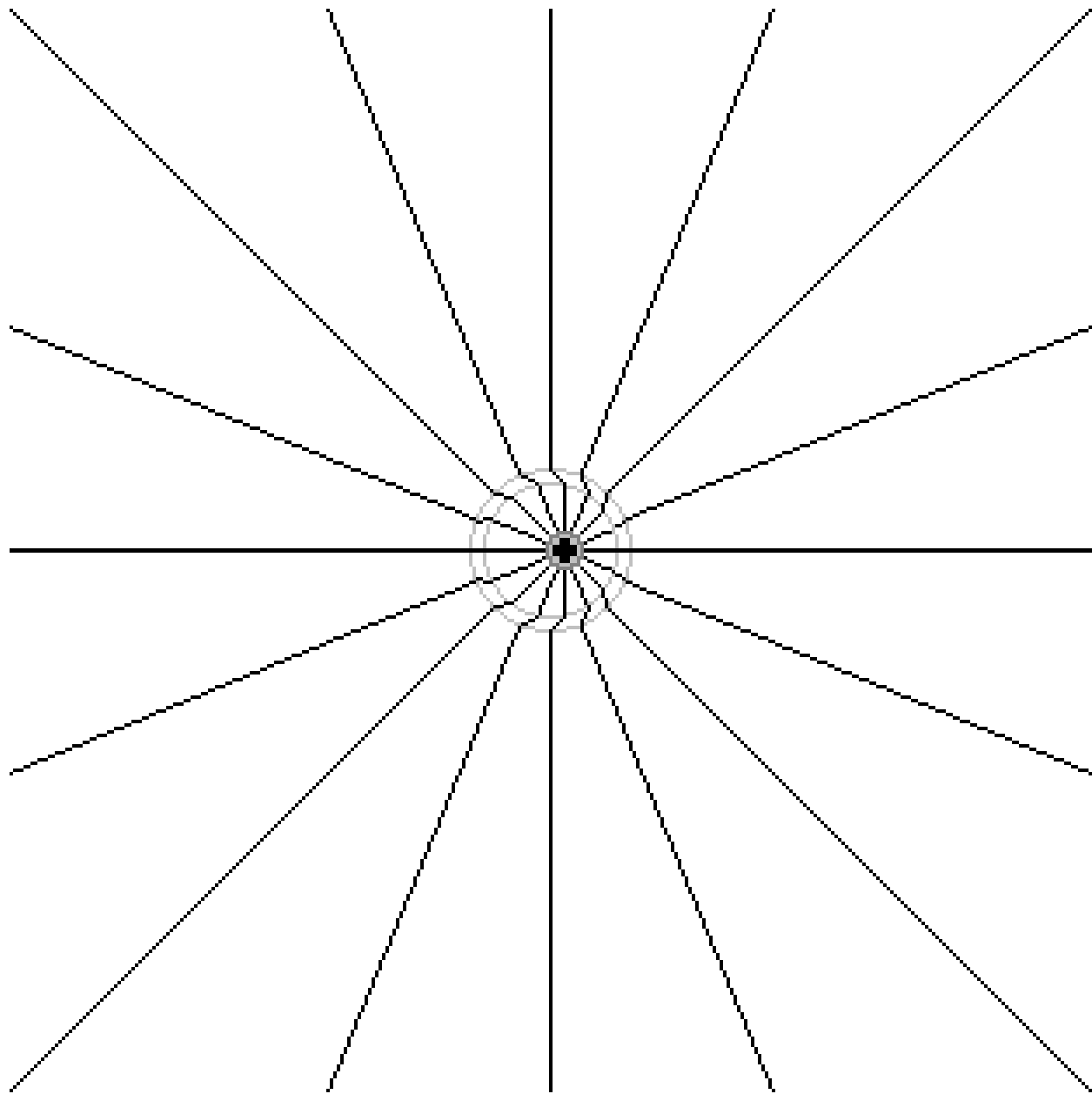


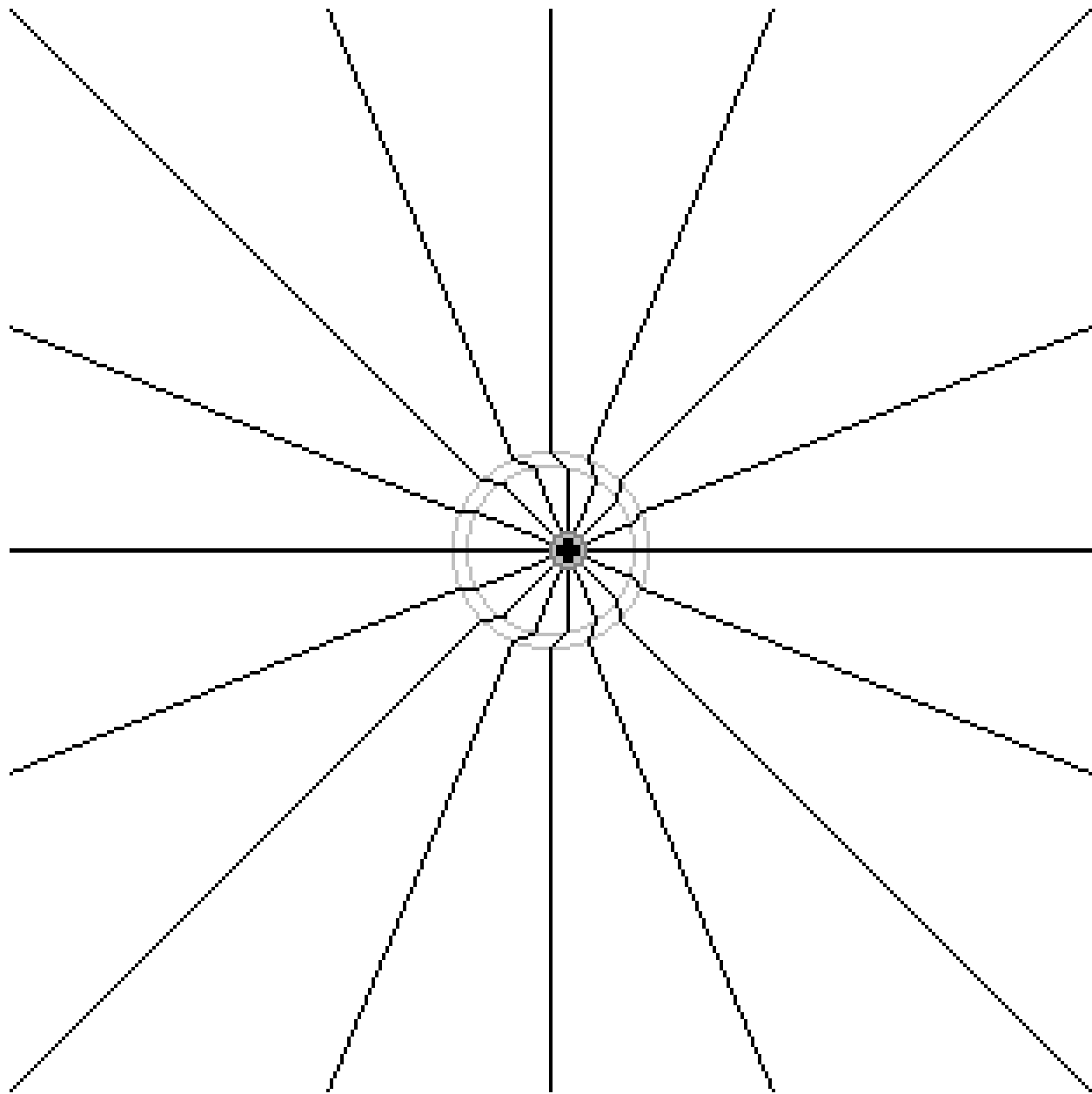


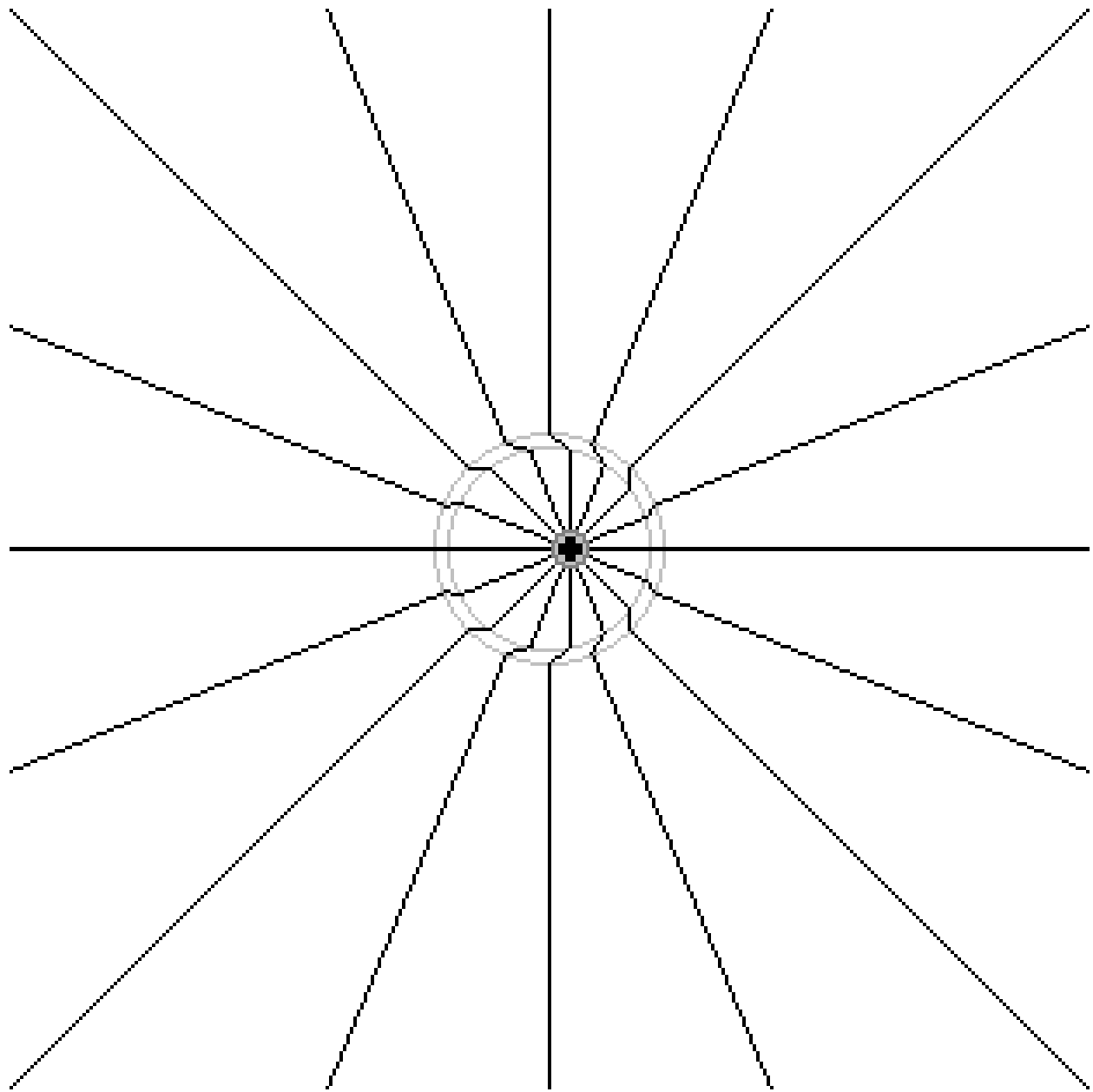


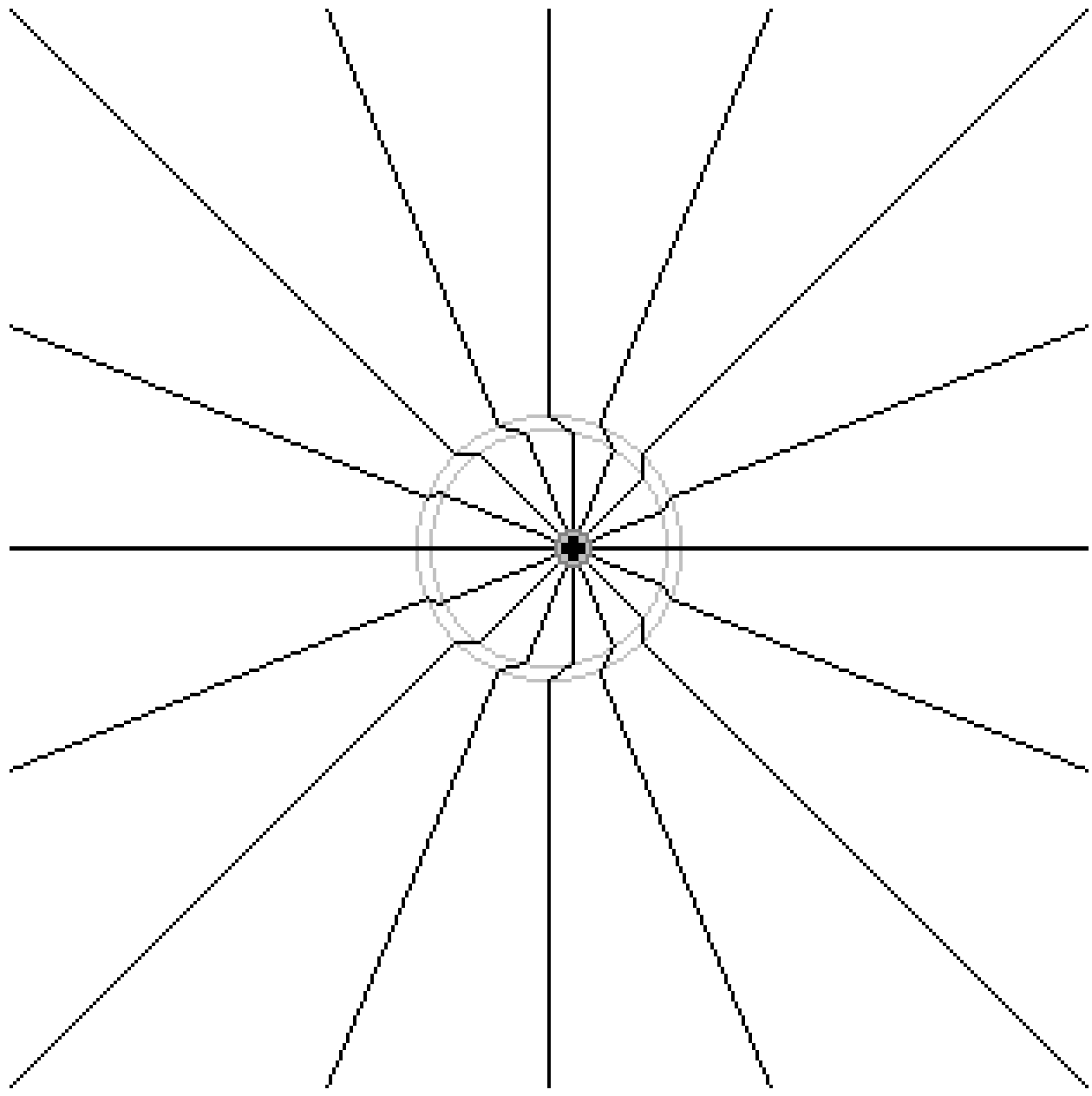


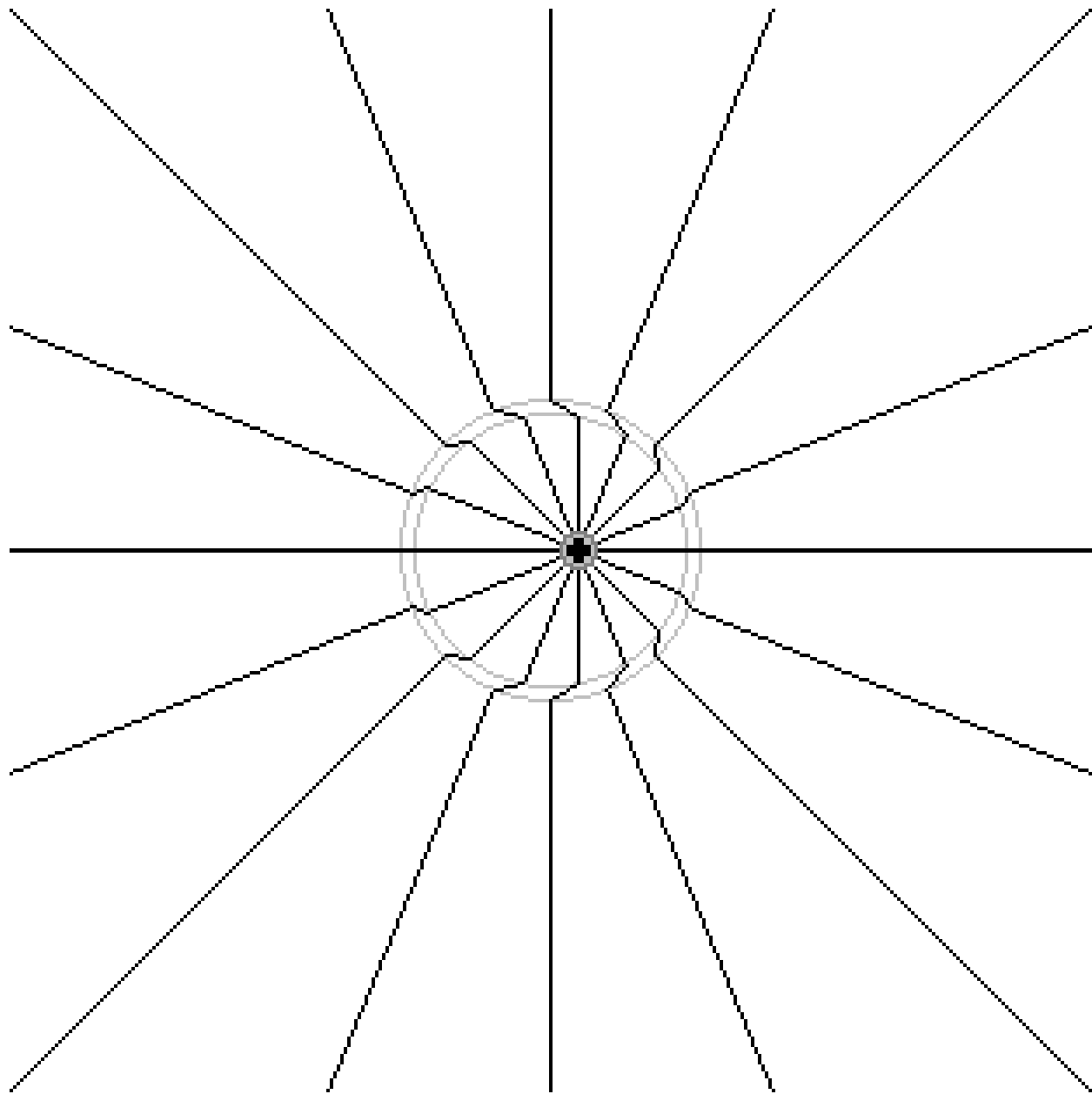


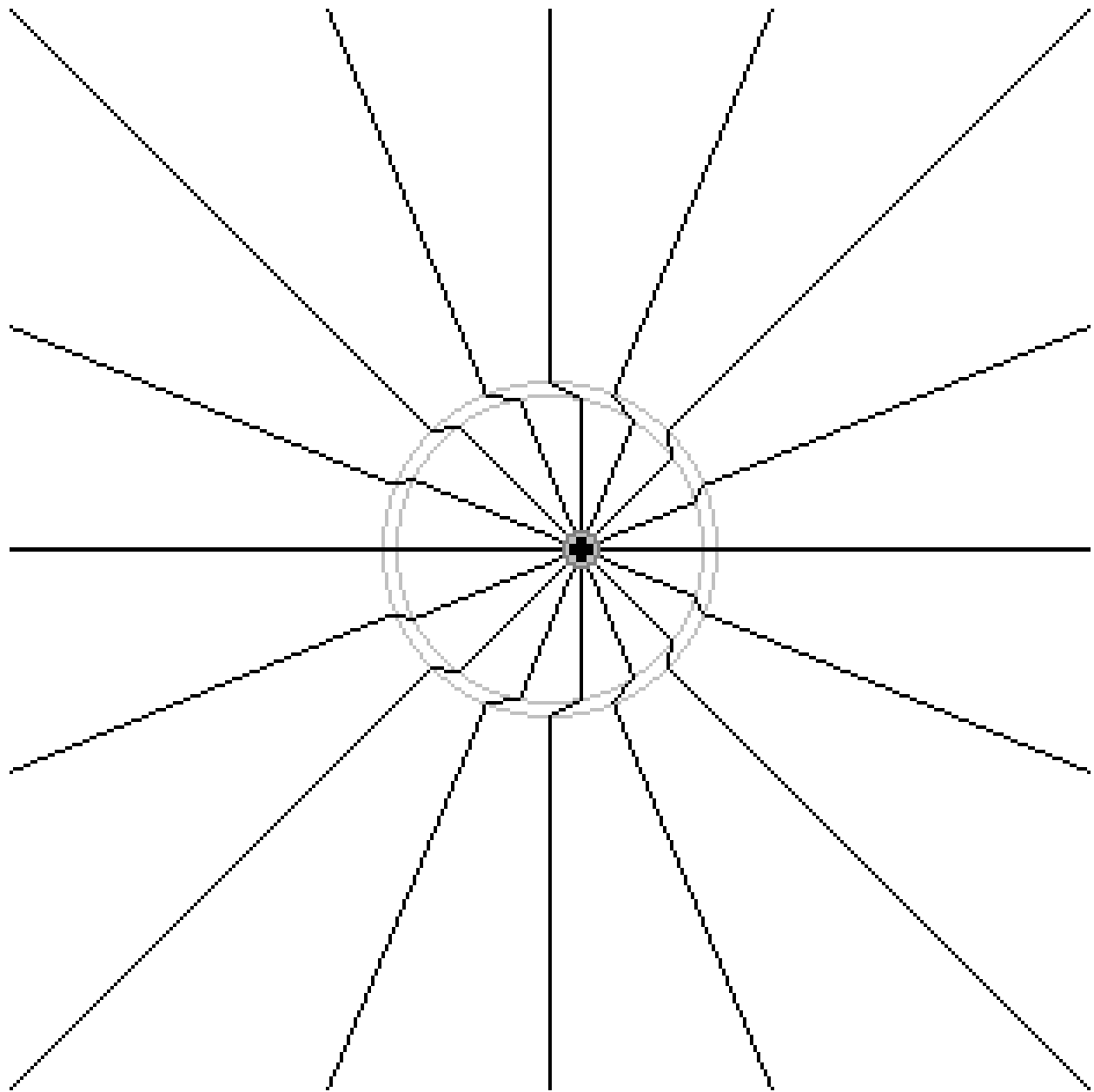


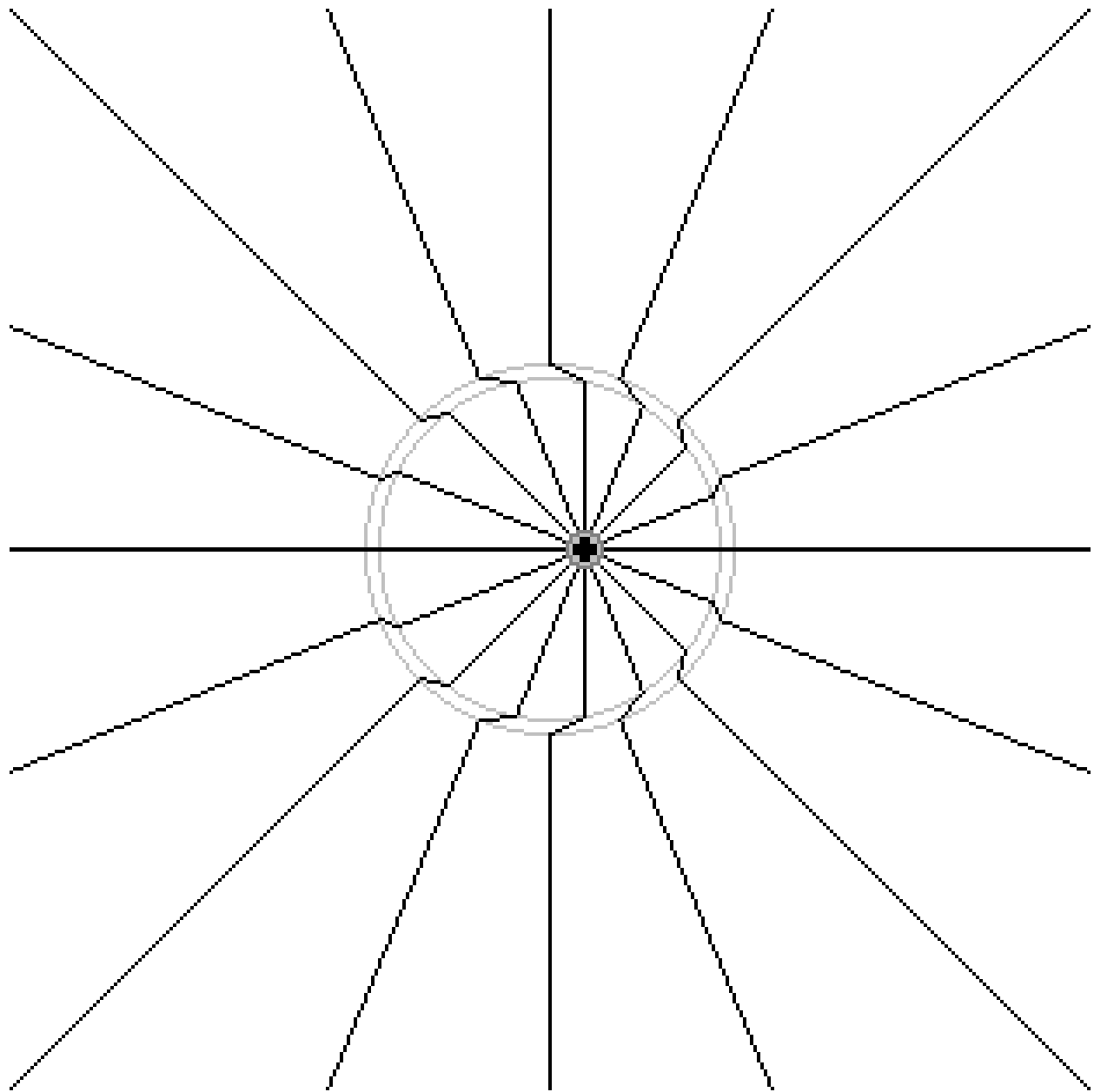


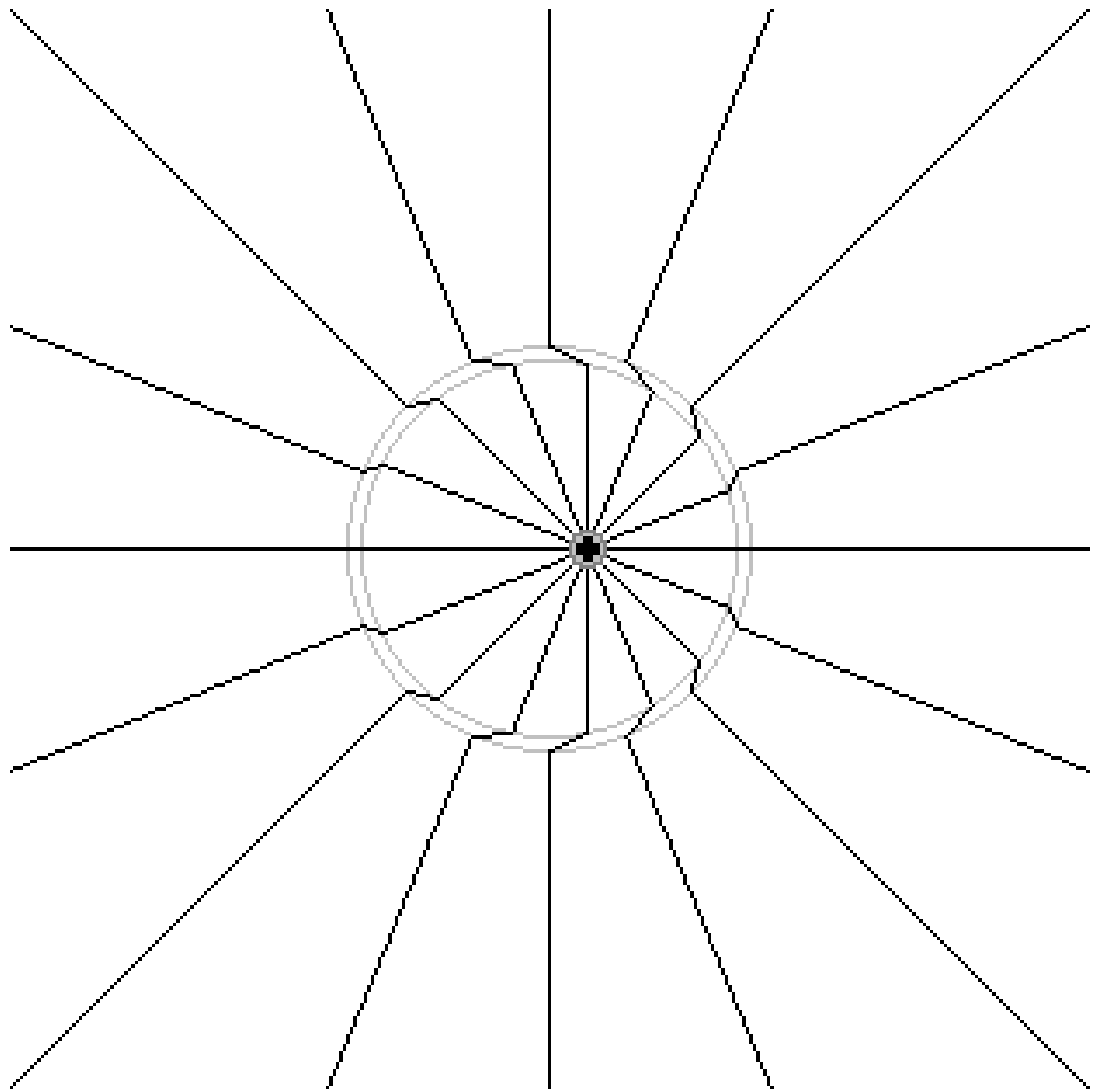


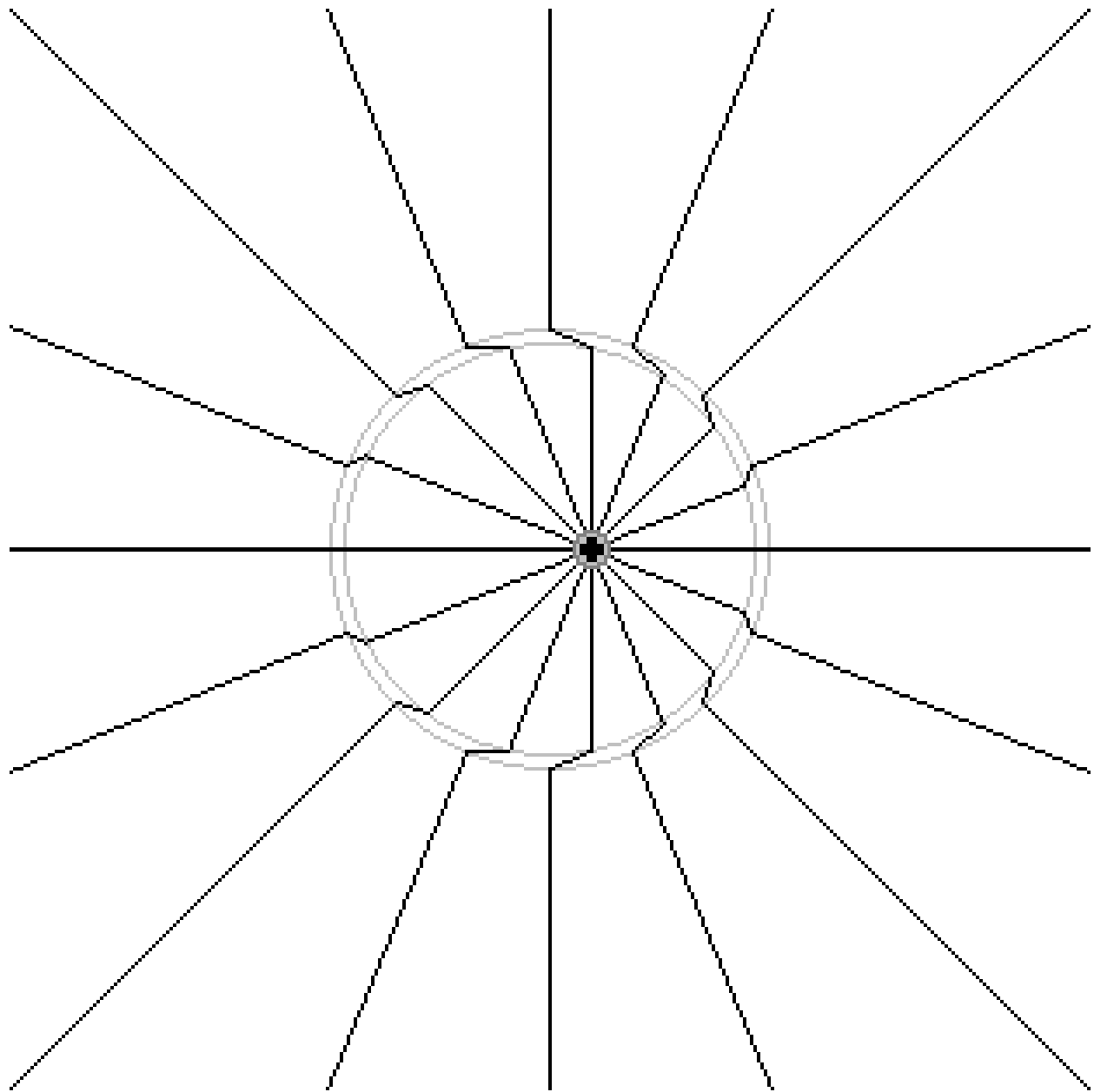


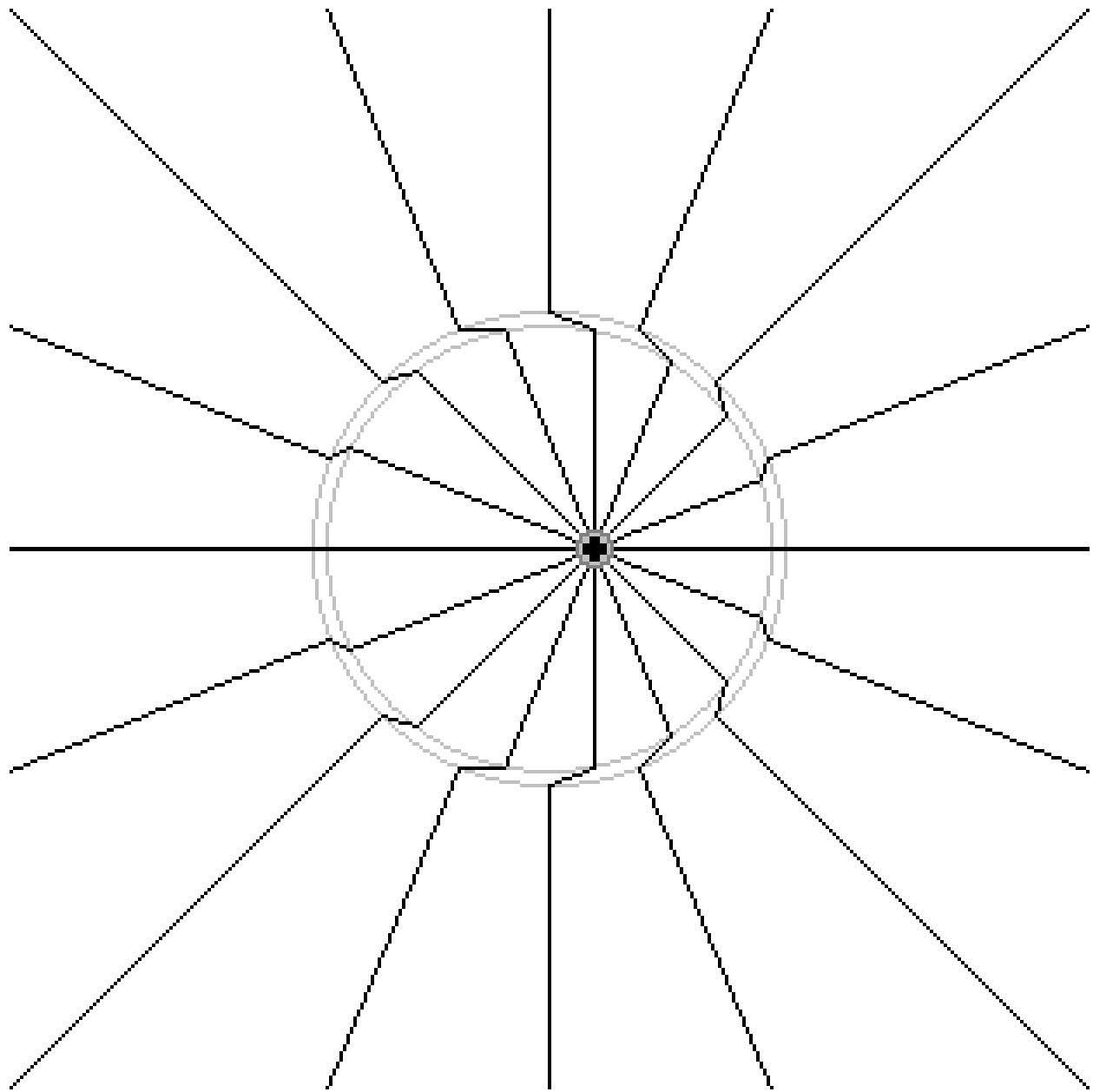


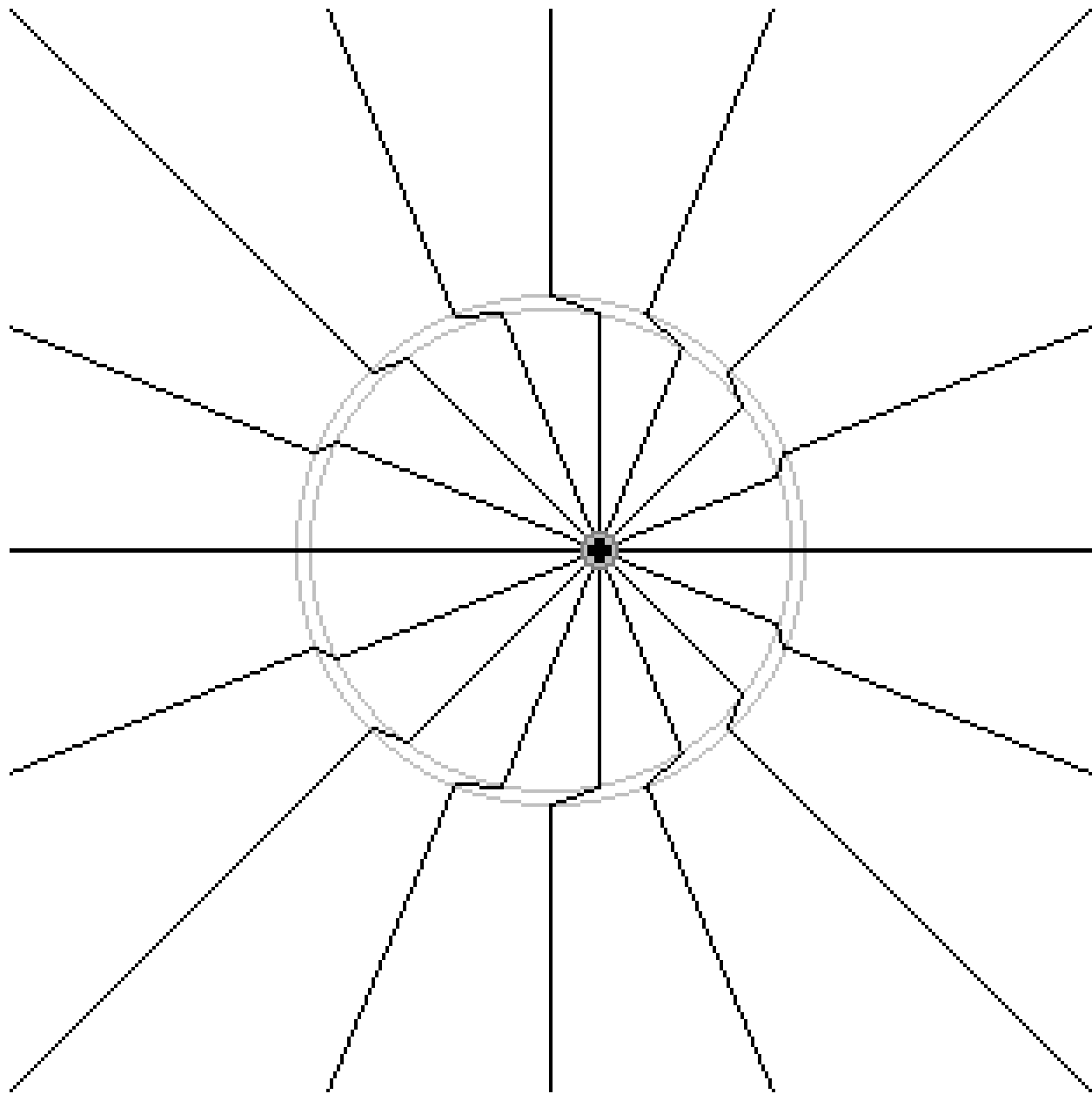


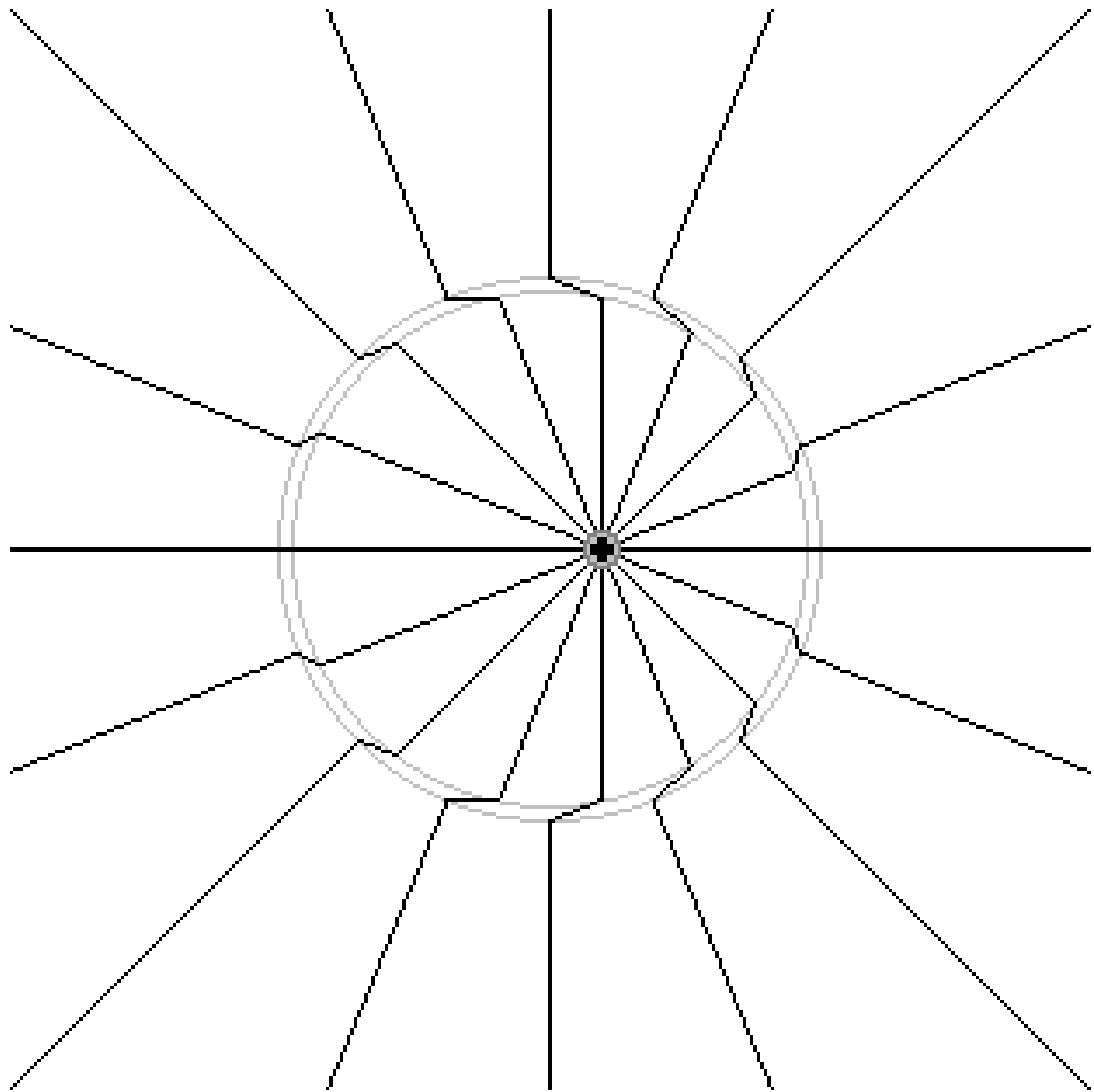


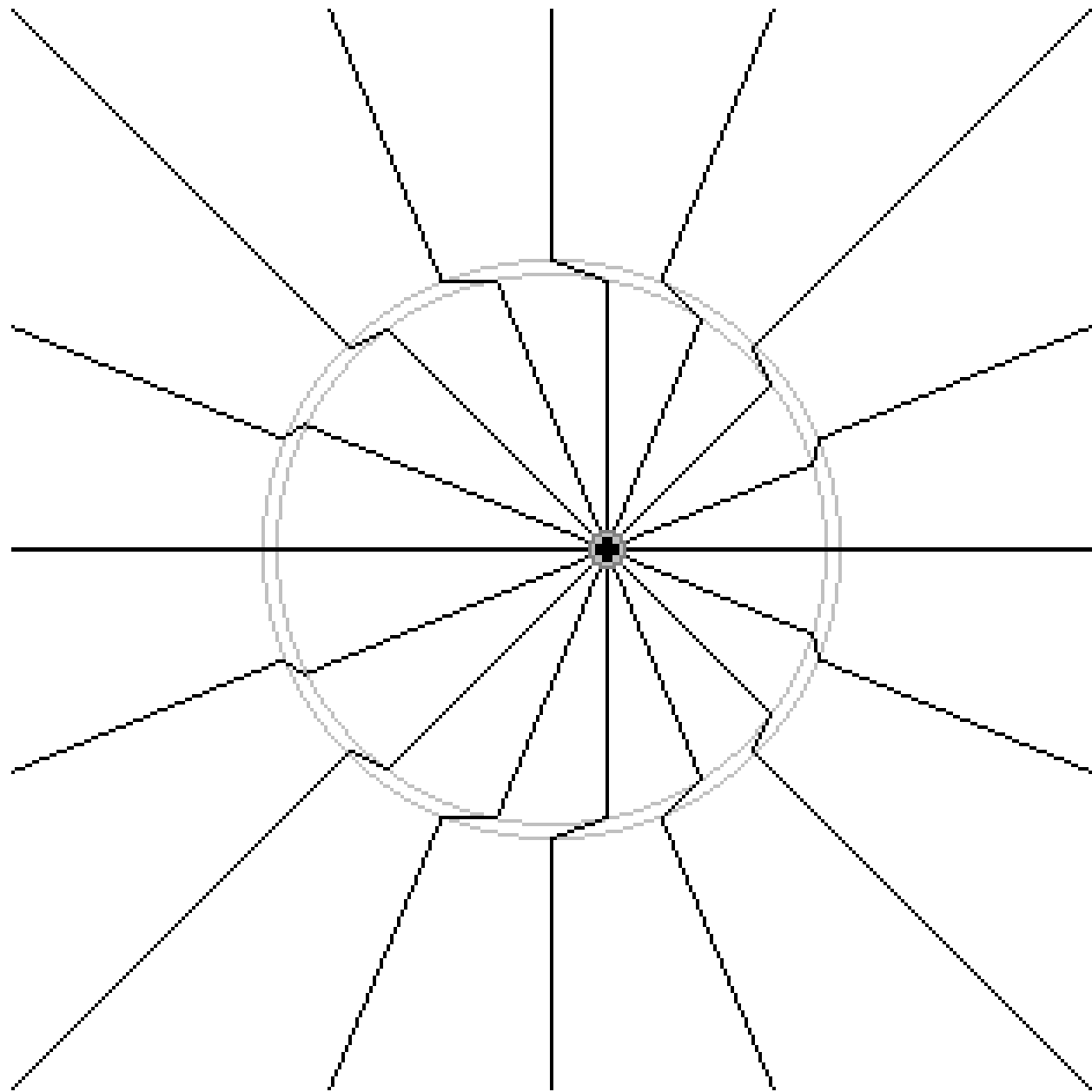


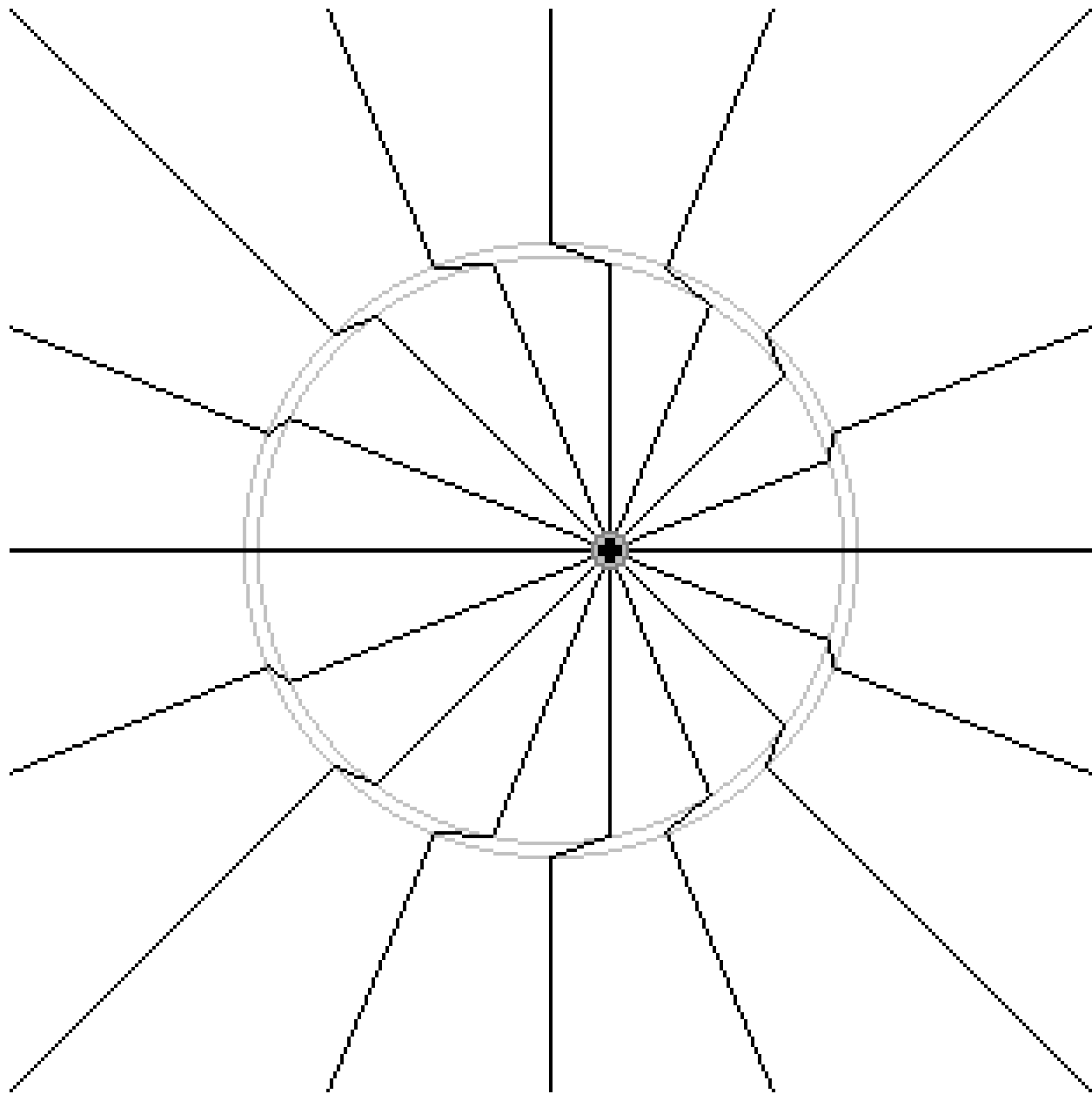


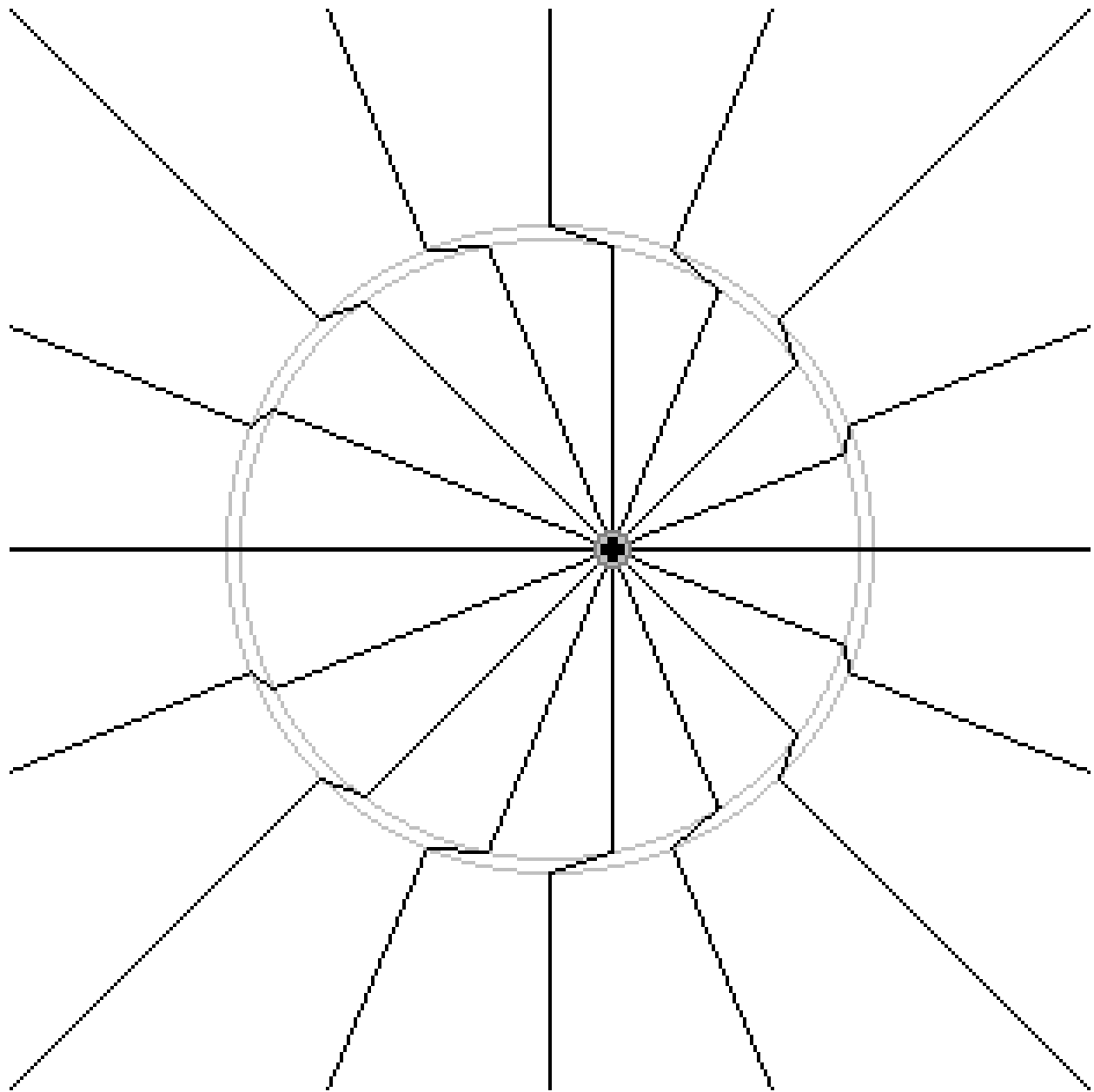


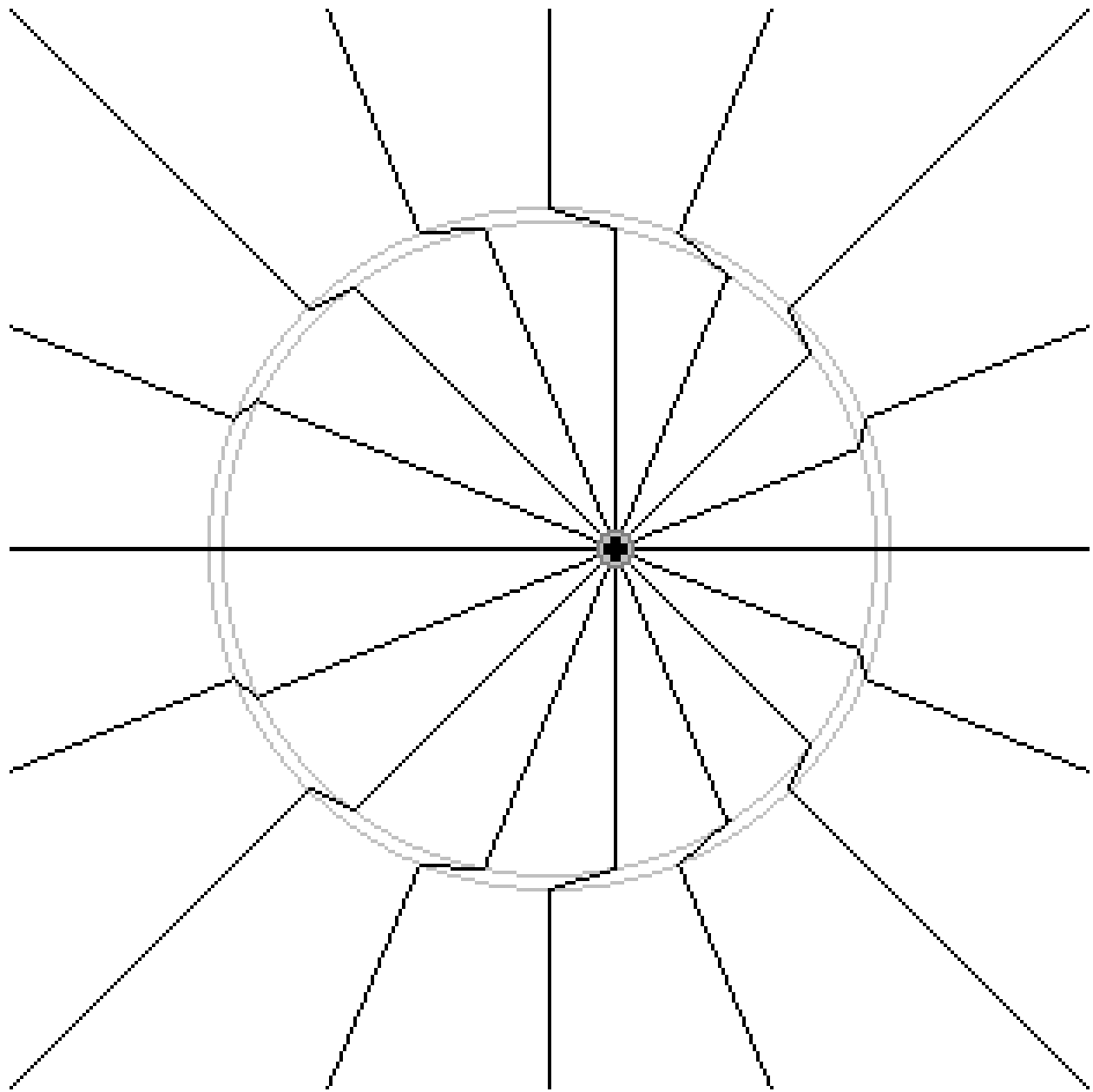


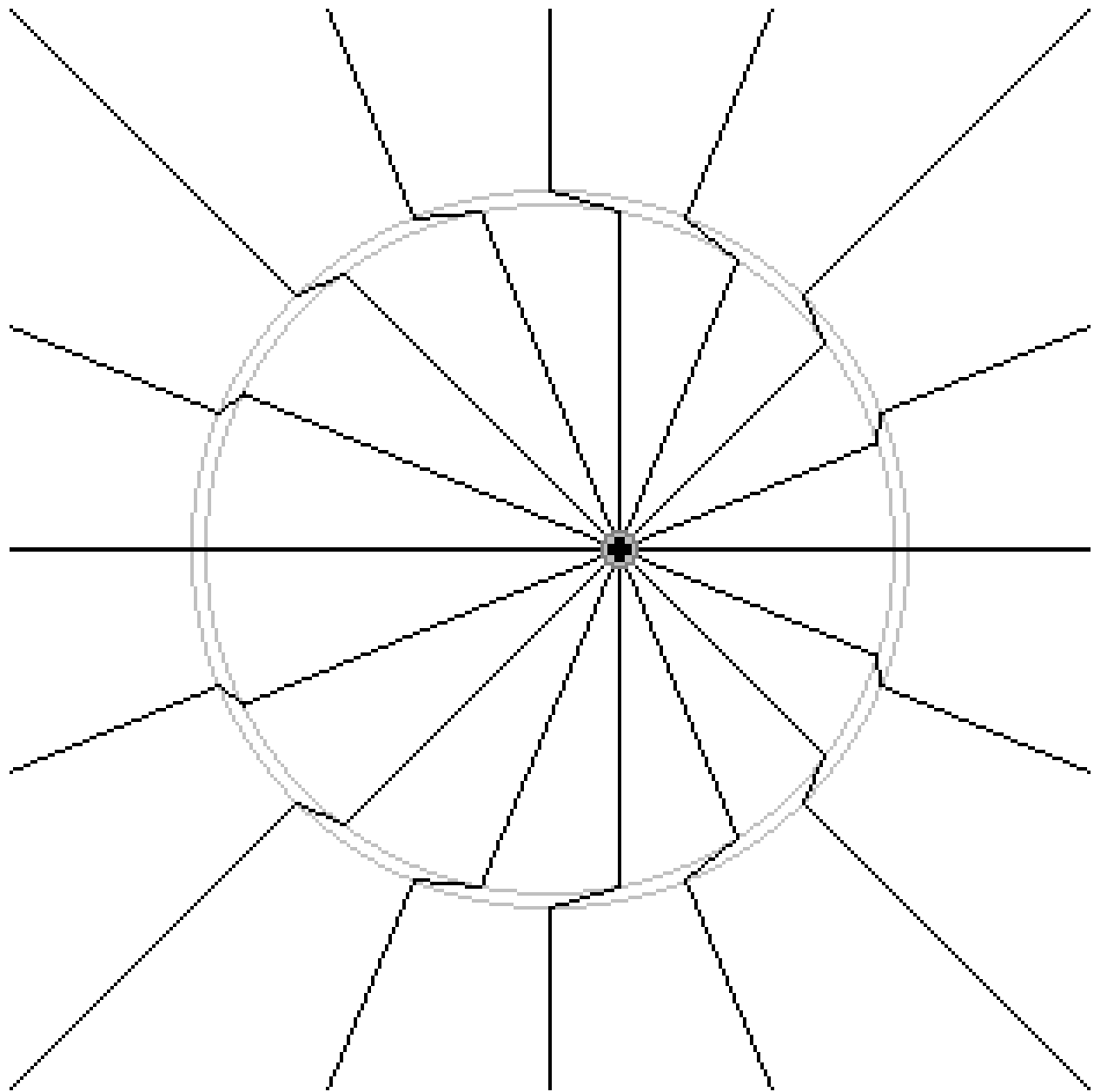


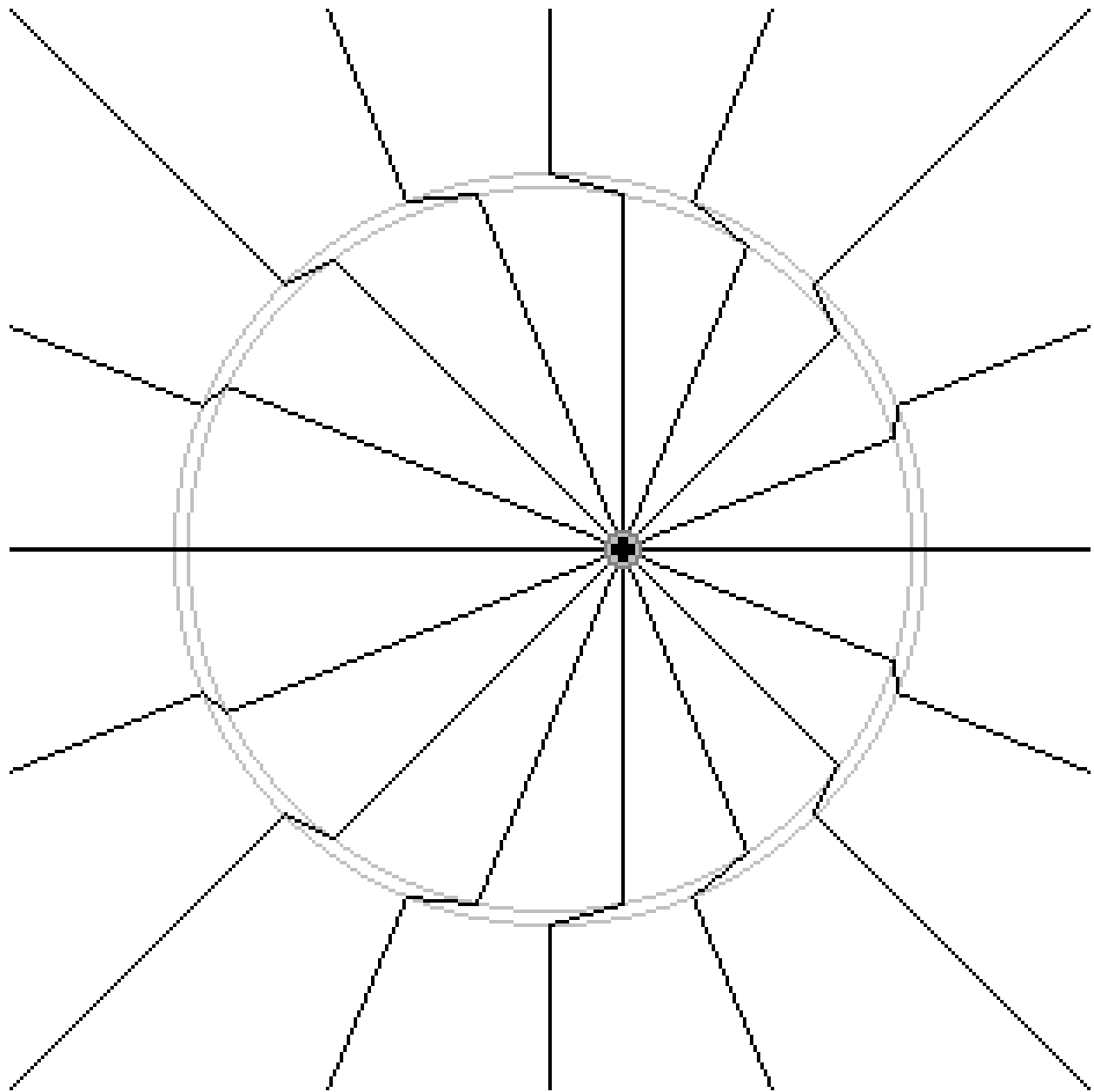


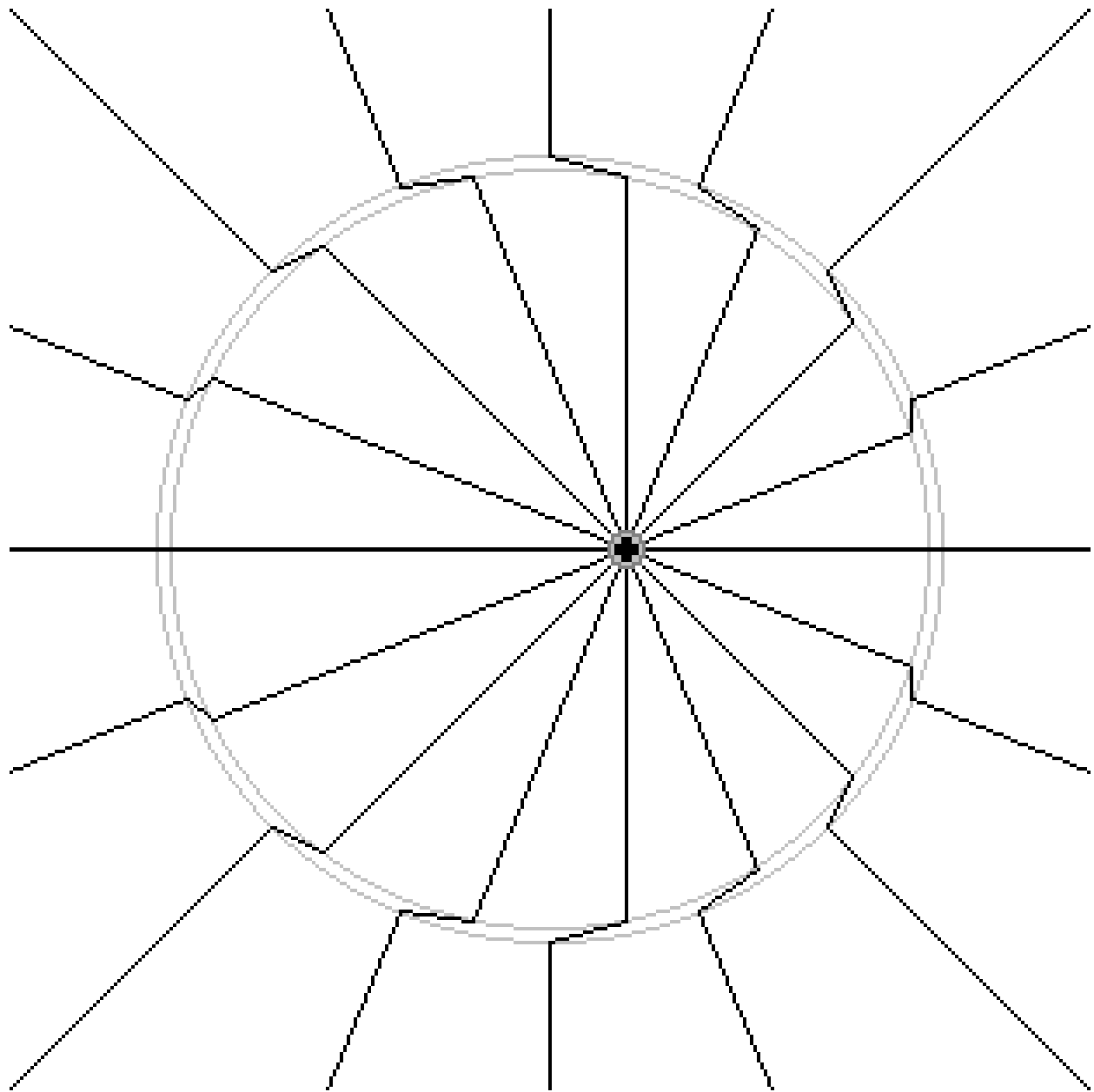


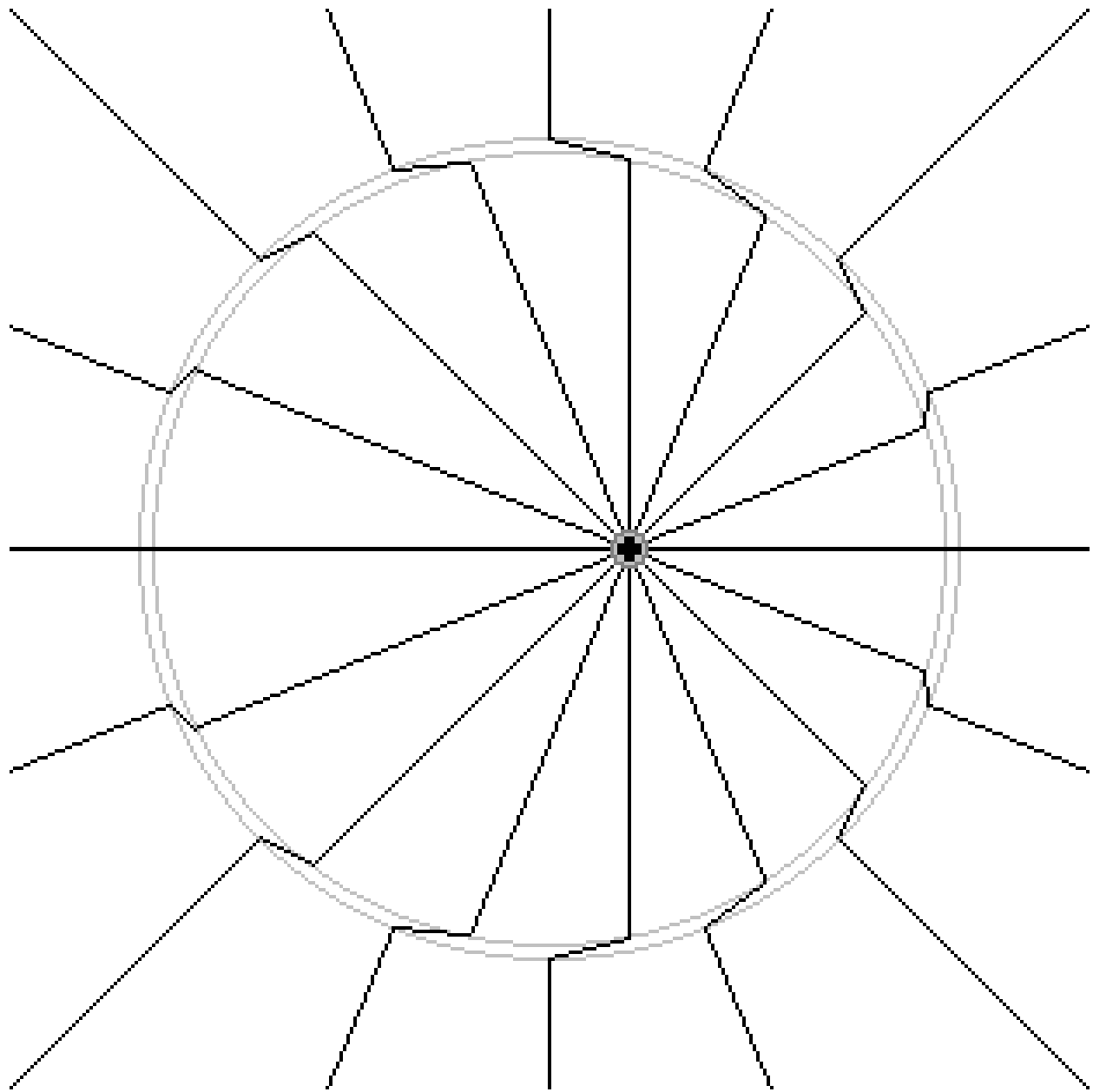


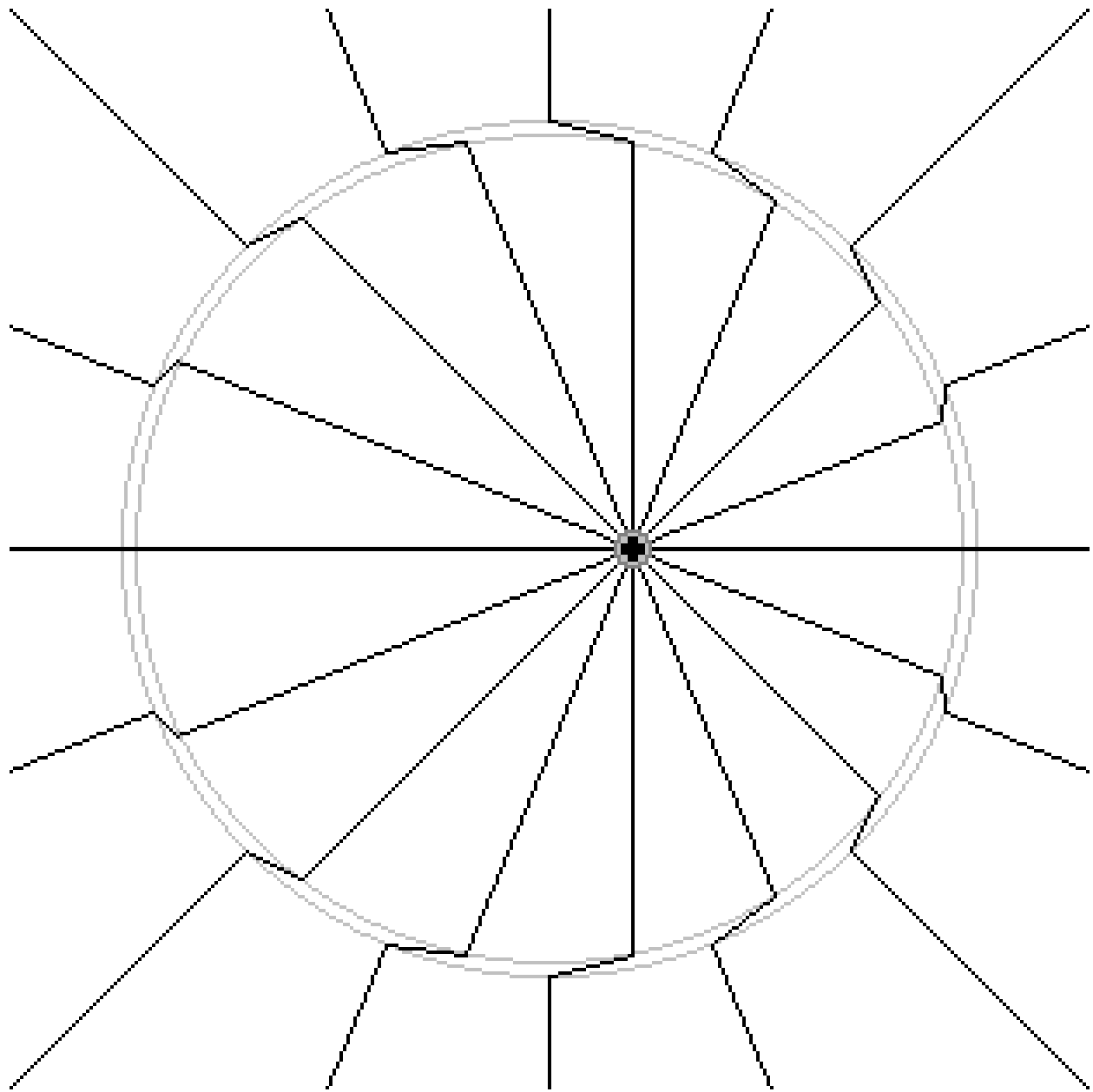


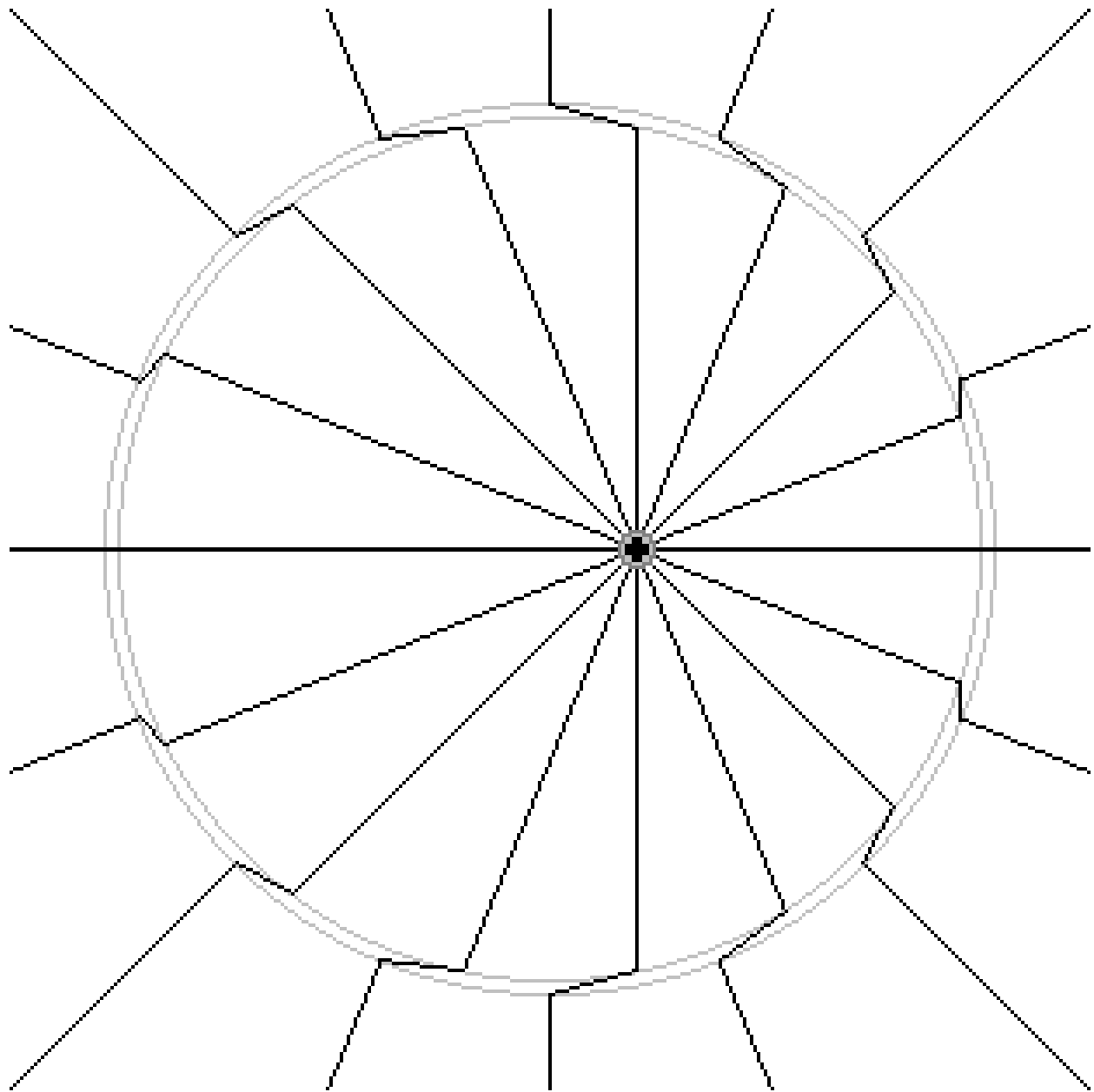


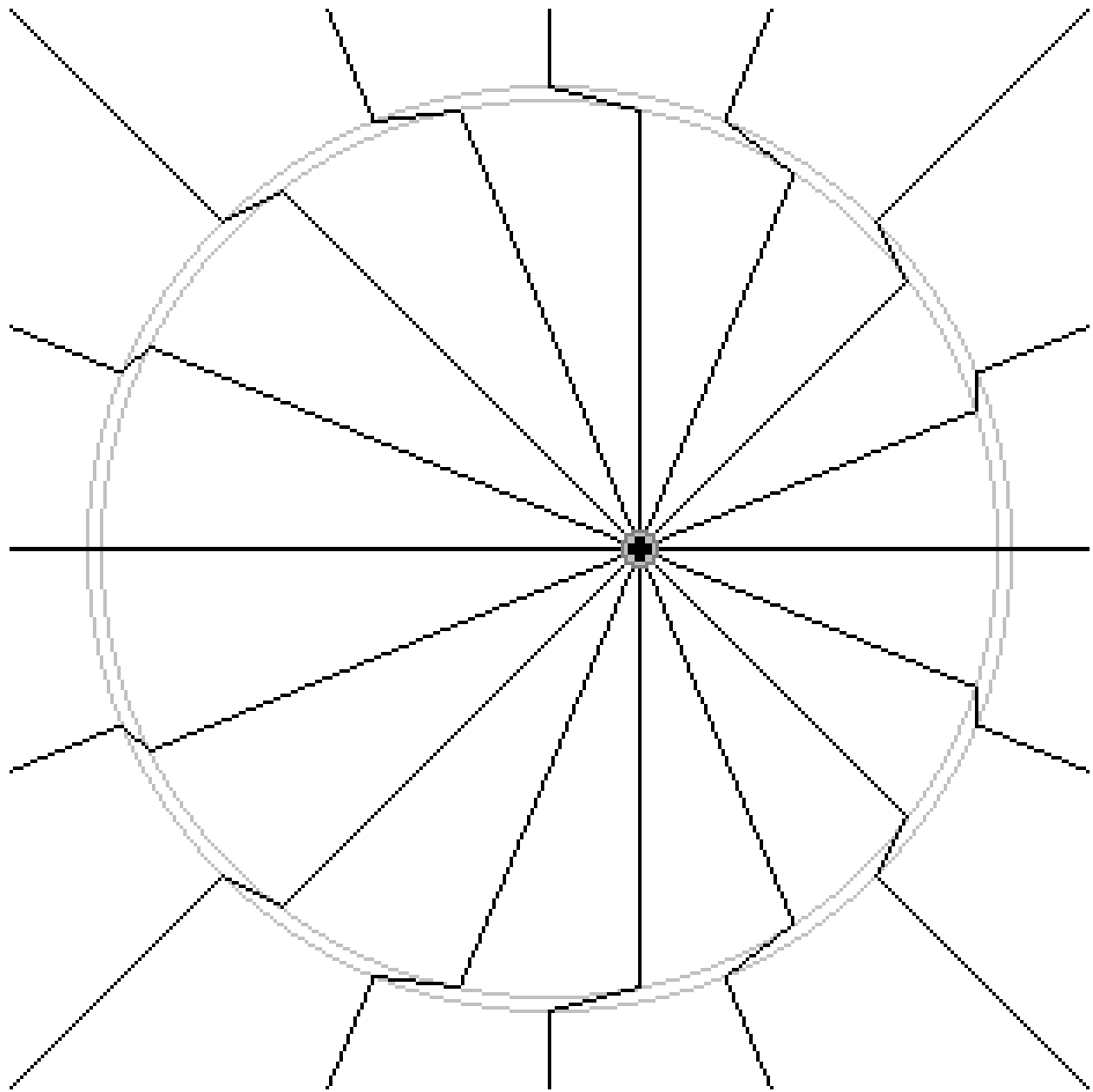


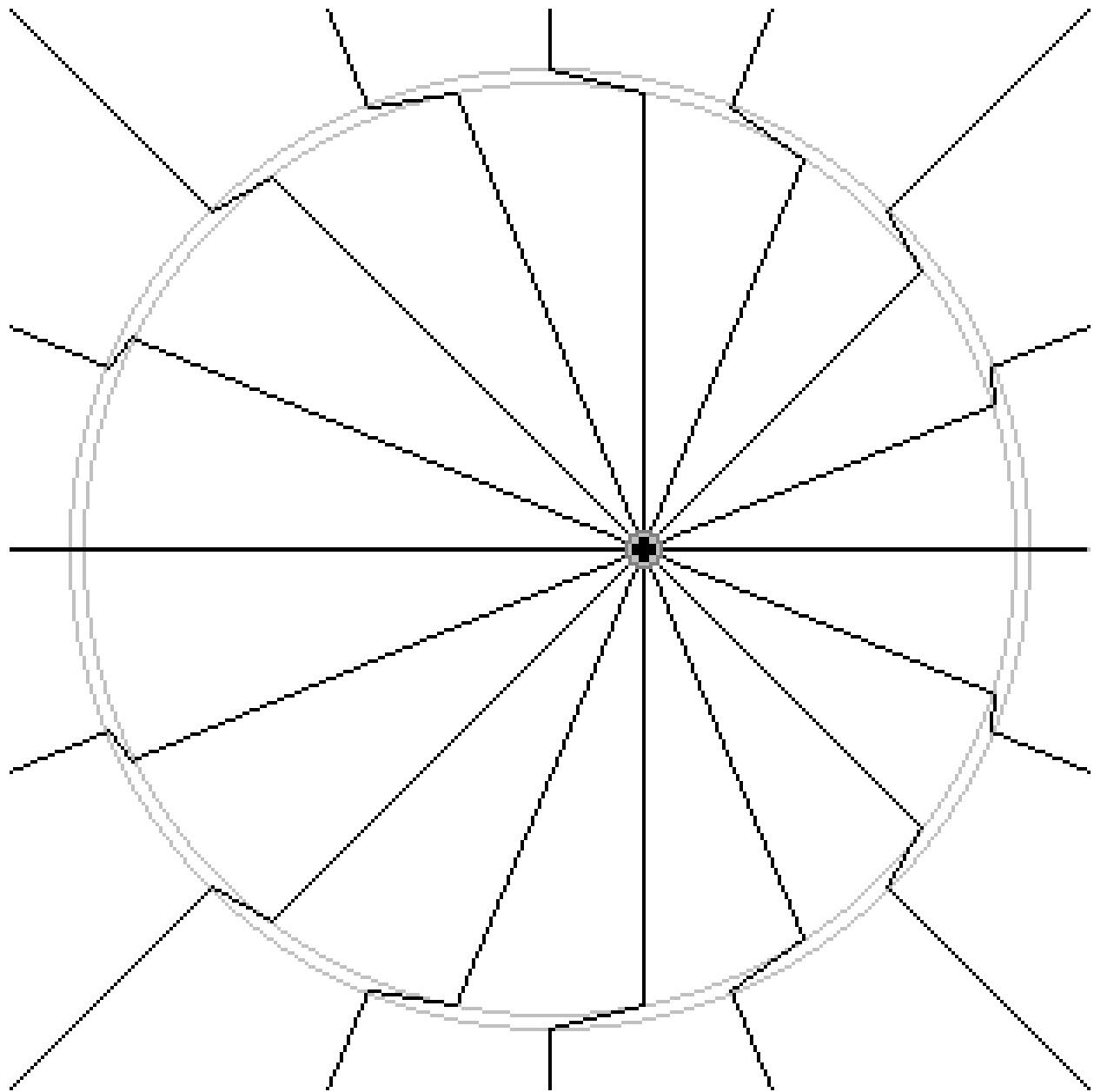


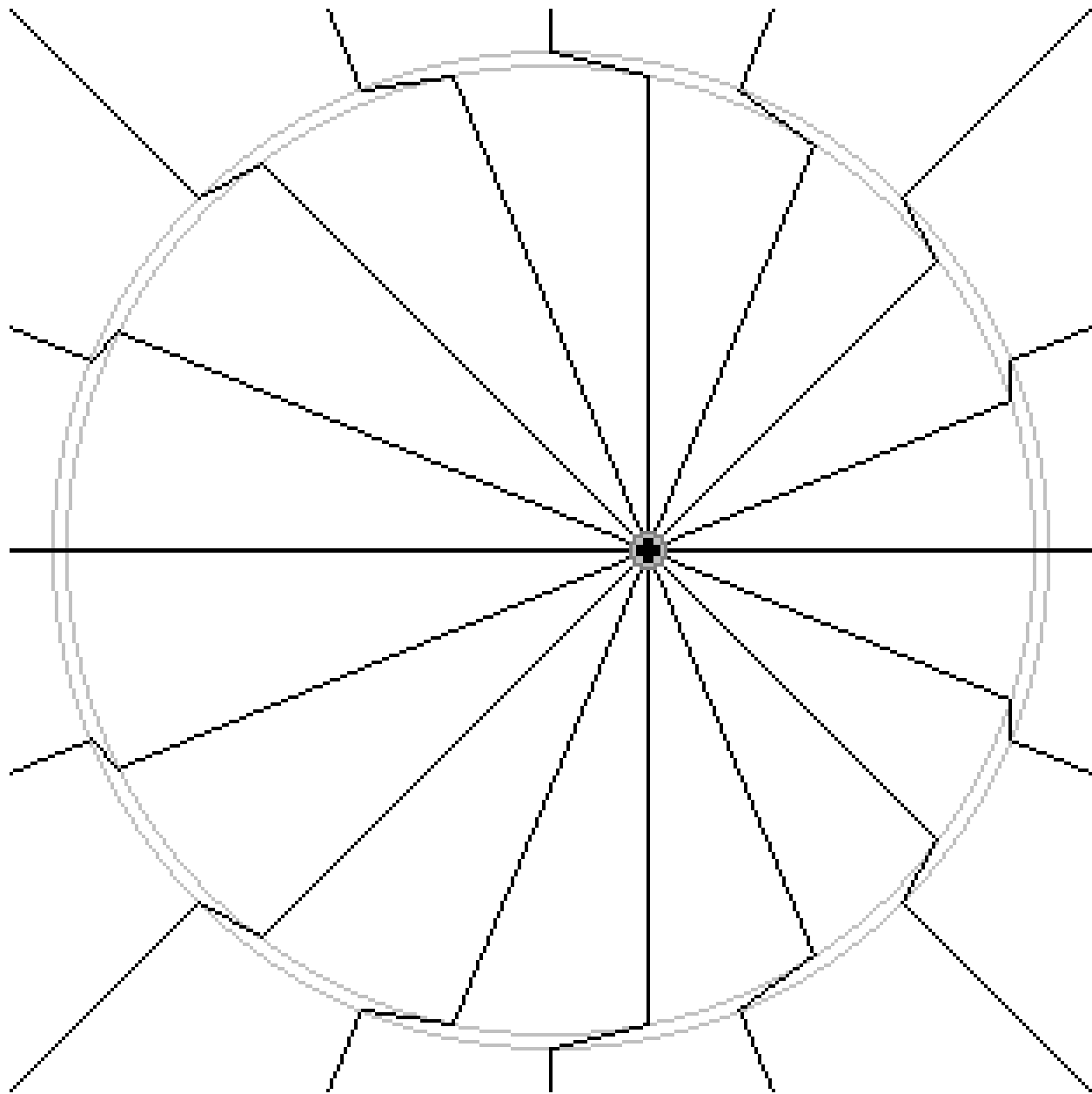


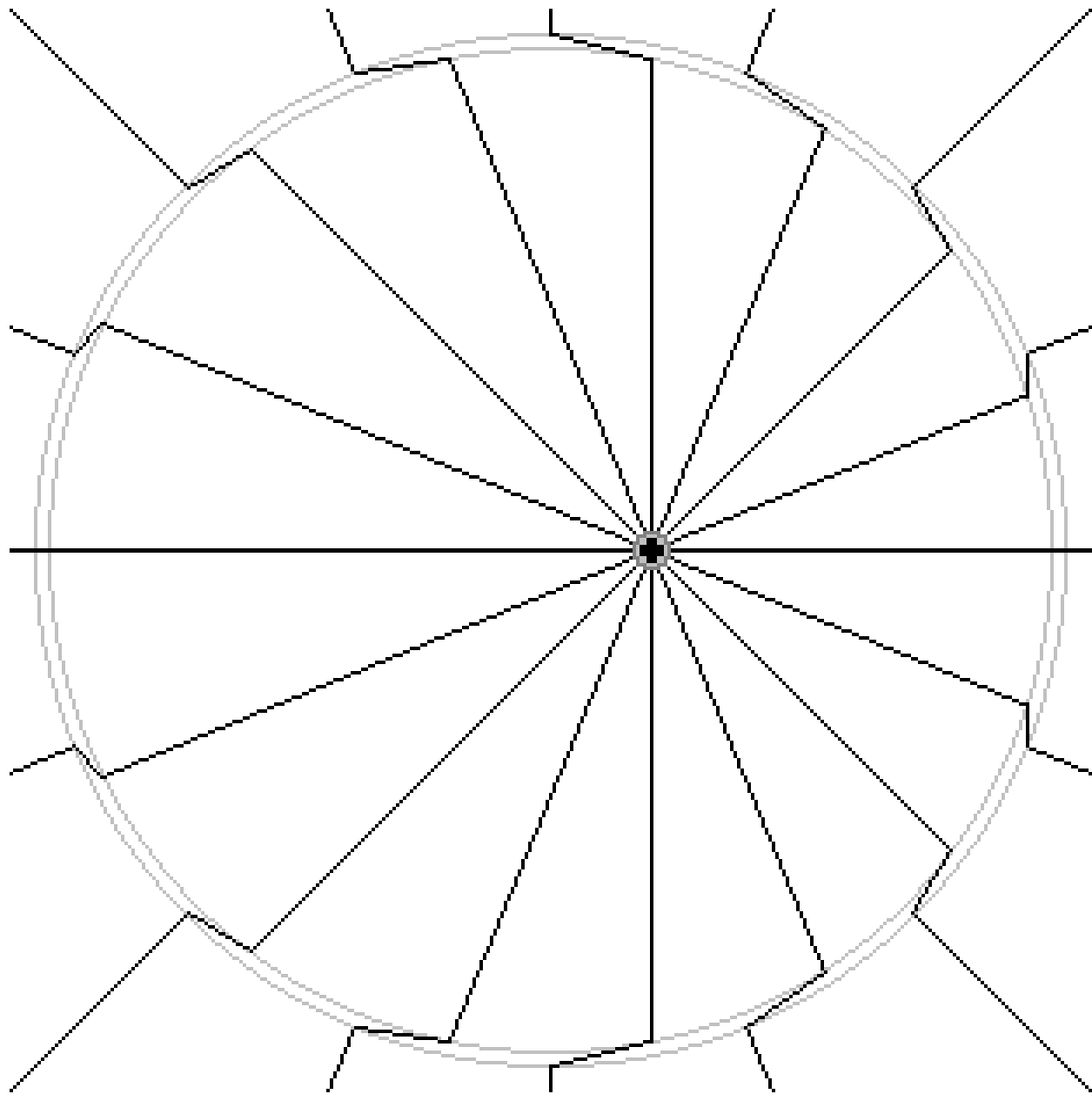


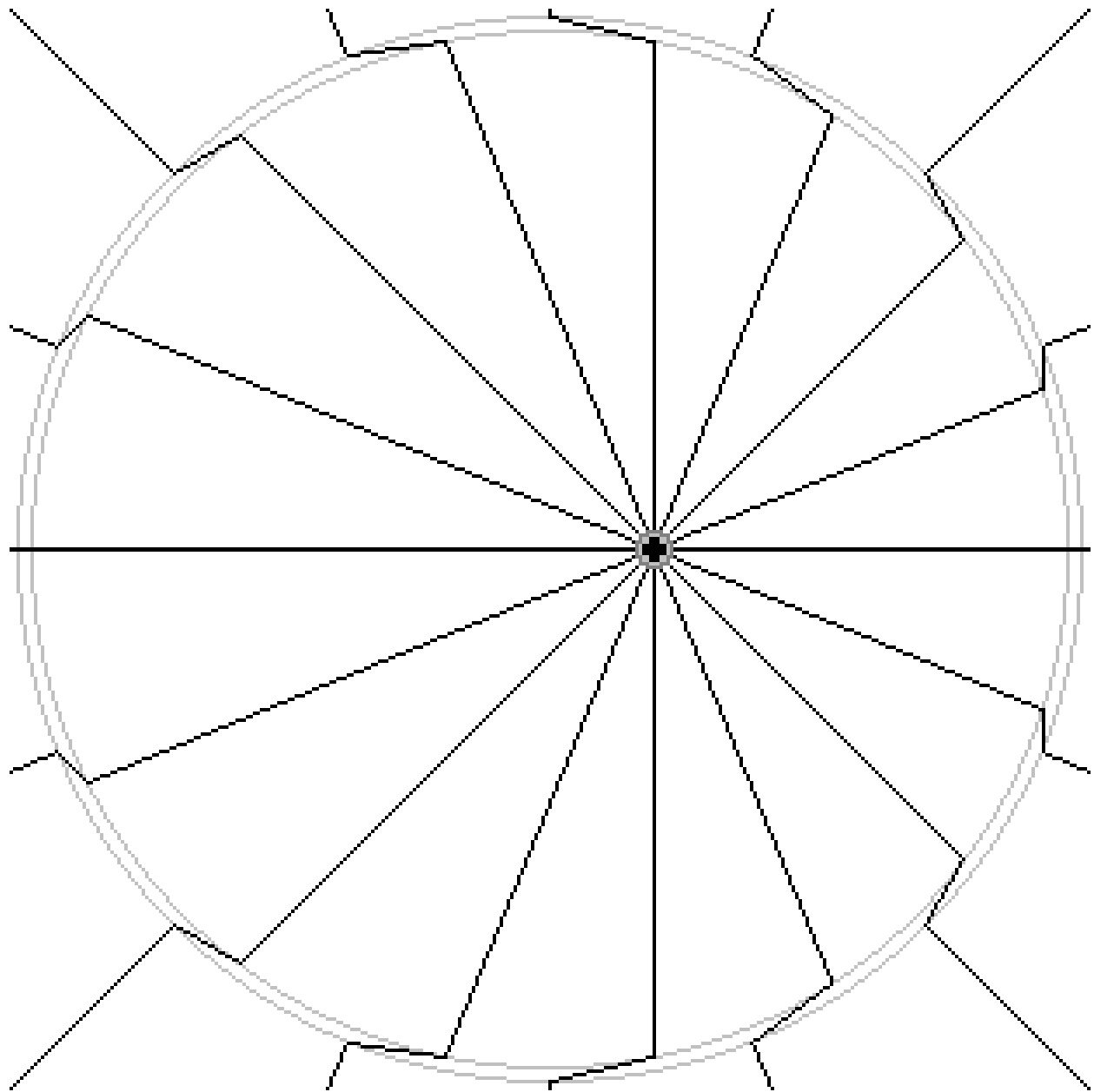




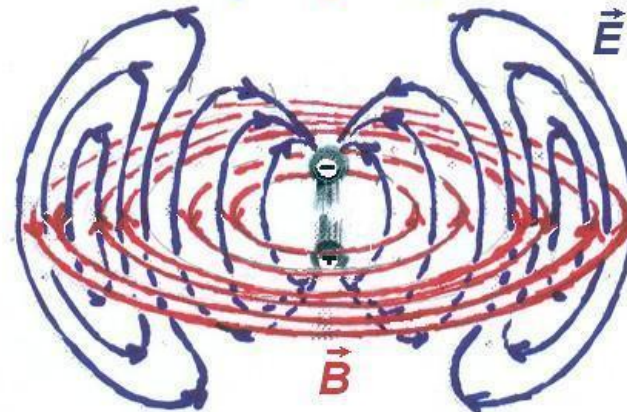
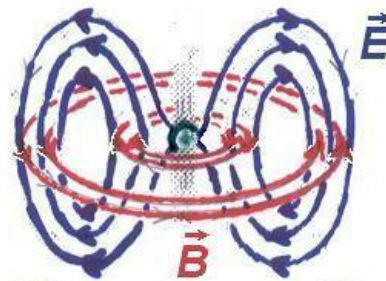
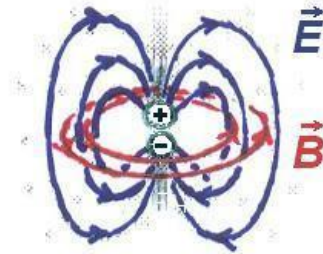




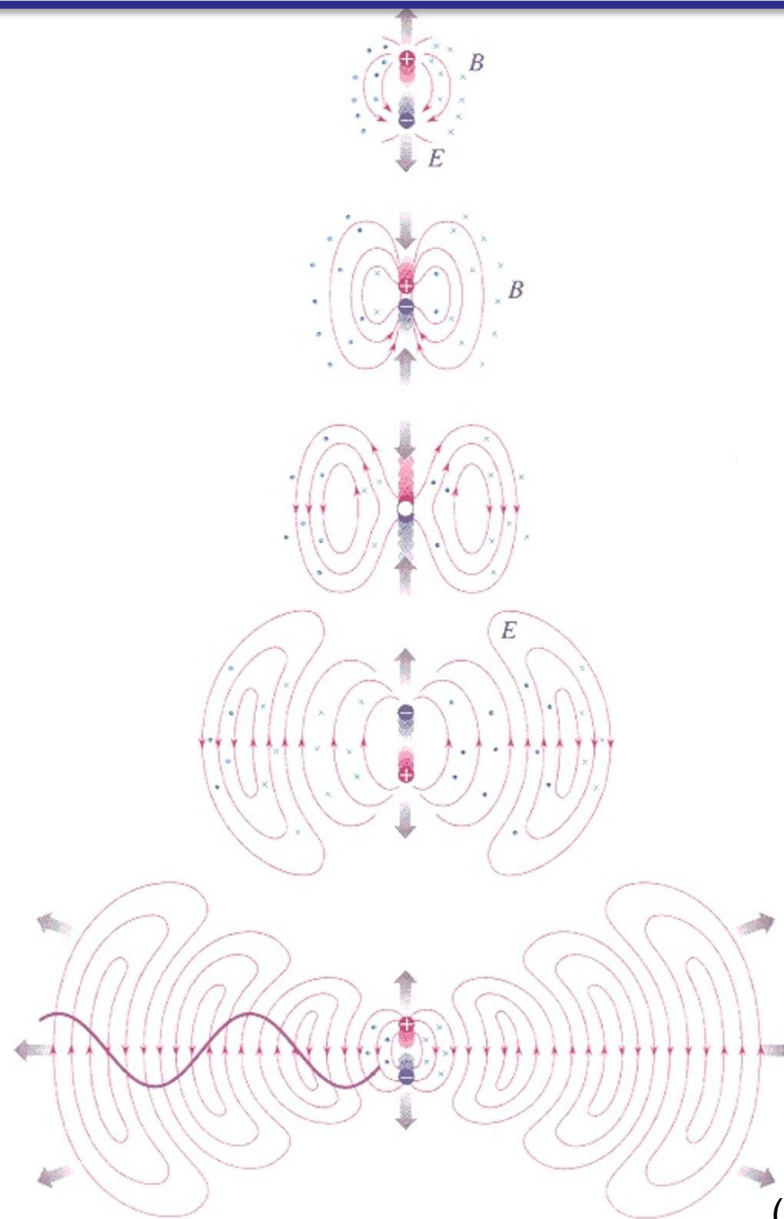




Radiação de Dipolo Elétrico

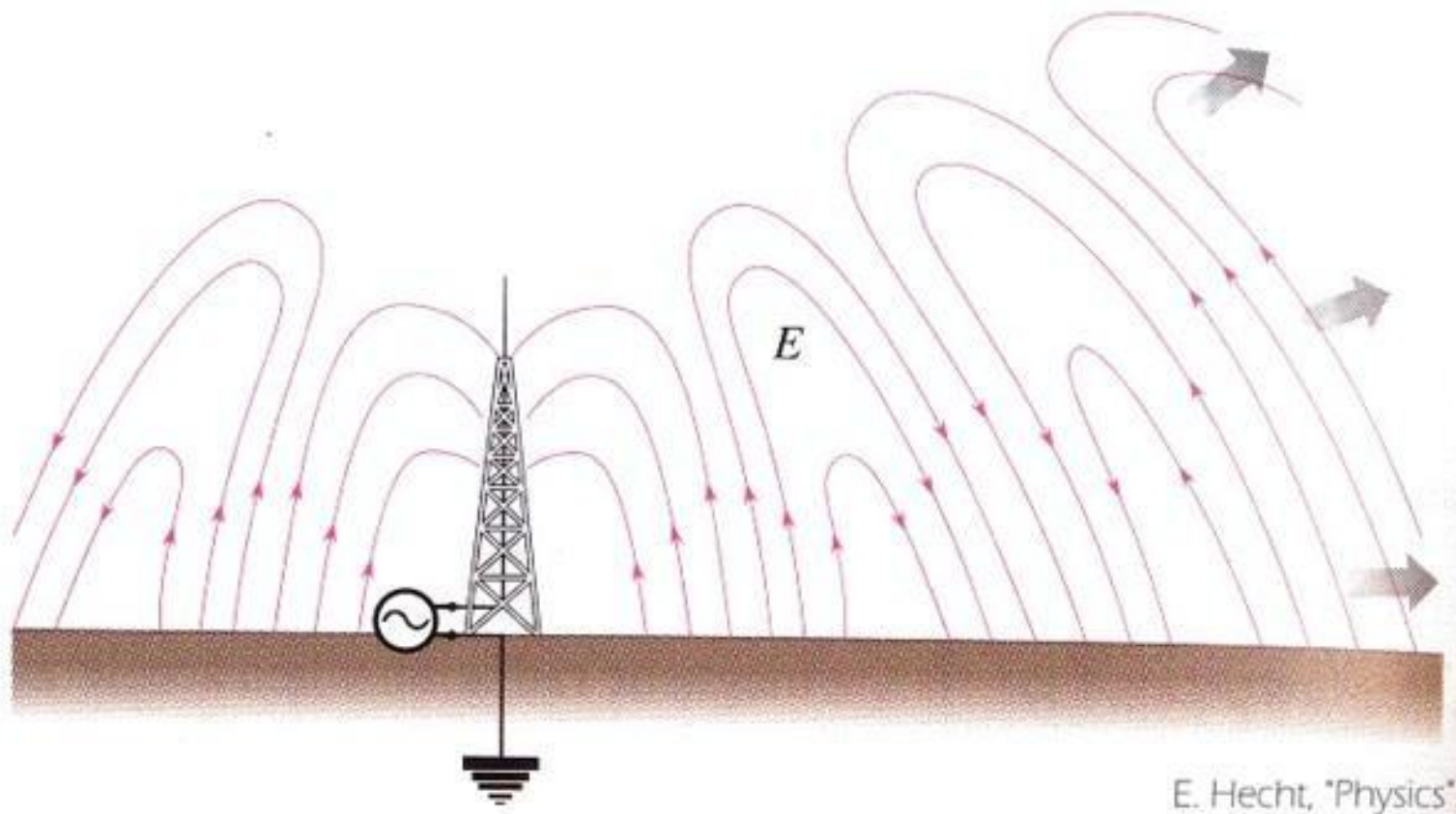


Radiação de Dipolo Elétrico



(Eugene Hecht, "Physics", 1998)

Antena Emissora de Rádio



Ondas eletromagnéticas

Equação de uma onda mecânica

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0$$

Equação da onda eletromagnética:

$$\frac{\partial^2 E_y(x,t)}{\partial x^2} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y(x,t)}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 B_z(x,t)}{\partial x^2} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B_z(x,t)}{\partial t^2} = 0$$

velocidade de propagação:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Soluções:

$$E_y(x,t) = f(x \pm vt)$$

$$B_z(x,t) = f(x \pm vt)$$

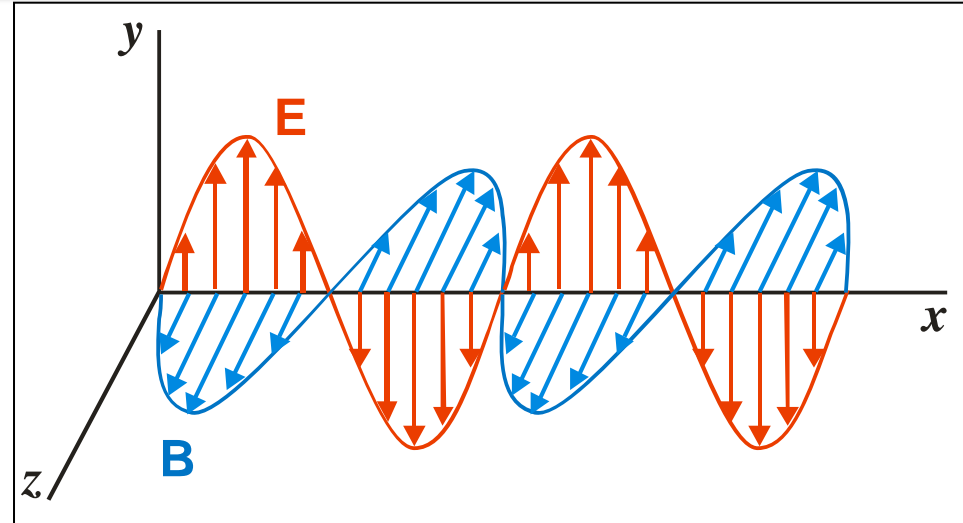
Ondas eletromagnéticas senoidais

$$E_y(x,t) = f(x \pm vt)$$

$$B_z(x,t) = f(x \pm vt)$$

$$E_y(x,t) = E_m \sin(kx \pm \omega t)$$

$$B_z(x,t) = B_m \sin(kx \pm \omega t)$$



$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$\frac{\partial E_y(x,t)}{\partial x} = -\frac{\partial B_z(x,t)}{\partial t}$$

$$kE_m \cos(kx - \omega t) = \omega B_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{\omega}{k} = \frac{E_m}{B_m} = \frac{E(x,t)}{B(x,t)} = c$$

E e B
estão em fase !

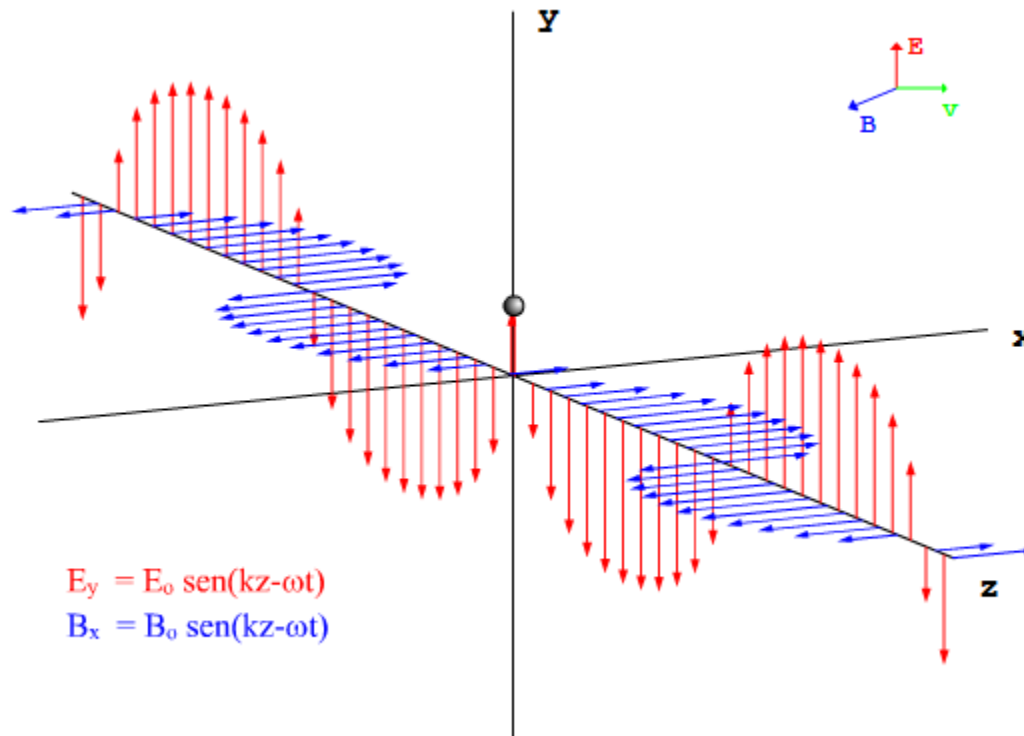
Ondas eletromagnéticas senoidais

$$E_y(x, t) = f(x \pm vt)$$

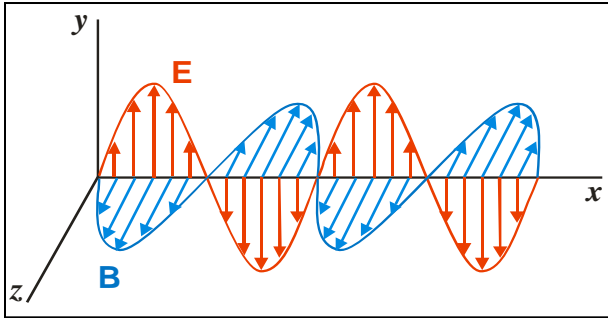
$$B_z(x, t) = f(x \pm vt)$$

$$E_y(x, t) = E_m \text{sen}(kx \pm \omega t)$$

$$B_z(x, t) = B_m \text{sen}(kx \pm \omega t)$$



Energia transportada por uma OEM



energia do campo
elétrico

+

energia do campo
magnético

volume

volume

densidade de
energia

$$u = \left[\frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right]$$

Mas,

$$\frac{E}{B} = c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad \rightarrow \quad u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} (\varepsilon_0 \mu_0 E^2) = \varepsilon_0 E^2$$

densidade de energia
associada a E

=

densidade de energia
associada a B

$$u = \varepsilon_0 E^2$$

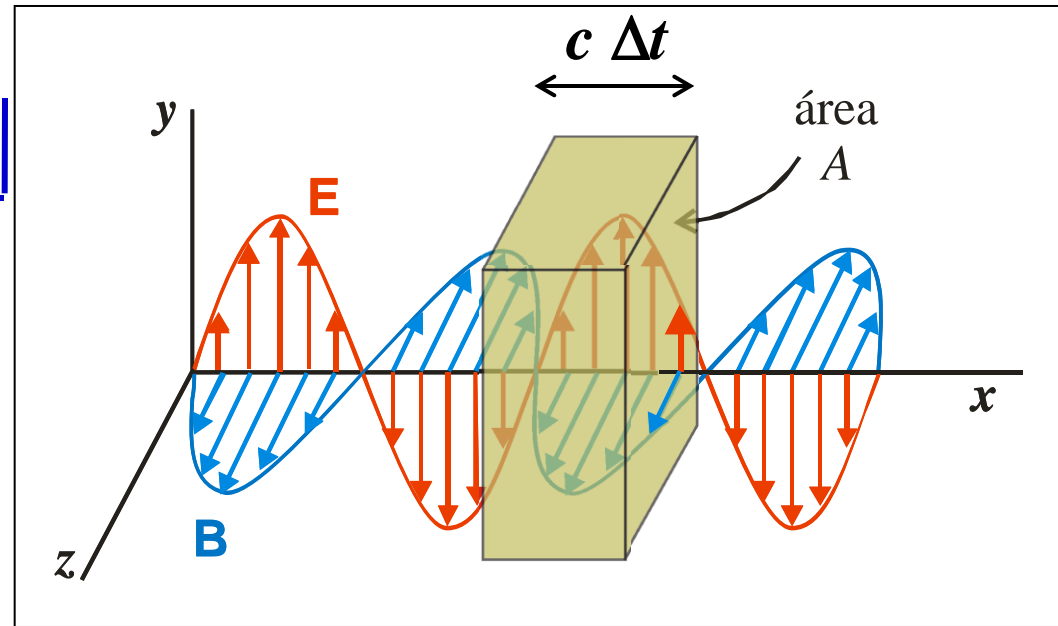
Fluxo de energia eletromagnética S

$$S = \frac{\text{energia}}{\text{área} \times \text{tempo}} = \frac{\text{potência}}{\text{área}}$$

$$S = \frac{u \Delta V}{A \Delta t} = \frac{(\epsilon_0 E^2)(Ac \Delta t)}{A \Delta t}$$

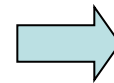
$$S = \epsilon_0 c E^2 = \frac{EB}{\mu_0}$$

Mostrar !



Qual a direção do fluxo de energia eletromagnética ?

A direção de propagação da onda !
(perpendicular à \mathbf{E} e \mathbf{B})



vetor de Poynting

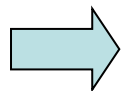
$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

unidade: W / m^2

Vetor de Poynting

fluxo de energia em um certo instante

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$



$$S(x, t) = \frac{1}{\mu_0} E(x, t) B(x, t) = \varepsilon_0 c \underbrace{E^2(x, t)}$$

Qual o fluxo **MÉDIO** de energia em uma posição x ?

Para uma onda eletromagnética
senoidal:

$$S(x, t) = \varepsilon_0 c E_m^2 \underbrace{\sin^2(kx - \omega t)}$$

fluxo médio:

Intensidade de uma onda eletromagnética:

... é proporcional ao quadrado da amplitude
da onda !

$$I = \langle S \rangle = \frac{\varepsilon_0 c}{2} E_m^2$$

$$I = \frac{\text{potência}}{\text{área}}$$

Pressão de radiação

Ao incidir sobre um objeto durante um tempo Δt , um feixe de luz transfere energia U e momentum Δp .

Maxwell mostrou que, para incidência normal:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Delta p = \frac{U}{c} & \text{(absorção total)} \\ \Delta p = 2 \frac{U}{c} & \text{(reflexão total)} \end{array} \right.$$

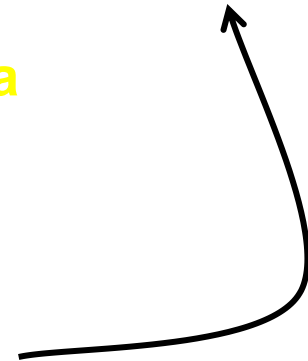
pressão de radiação

$$P = \frac{I}{c}$$

$$P = 2 \frac{I}{c}$$

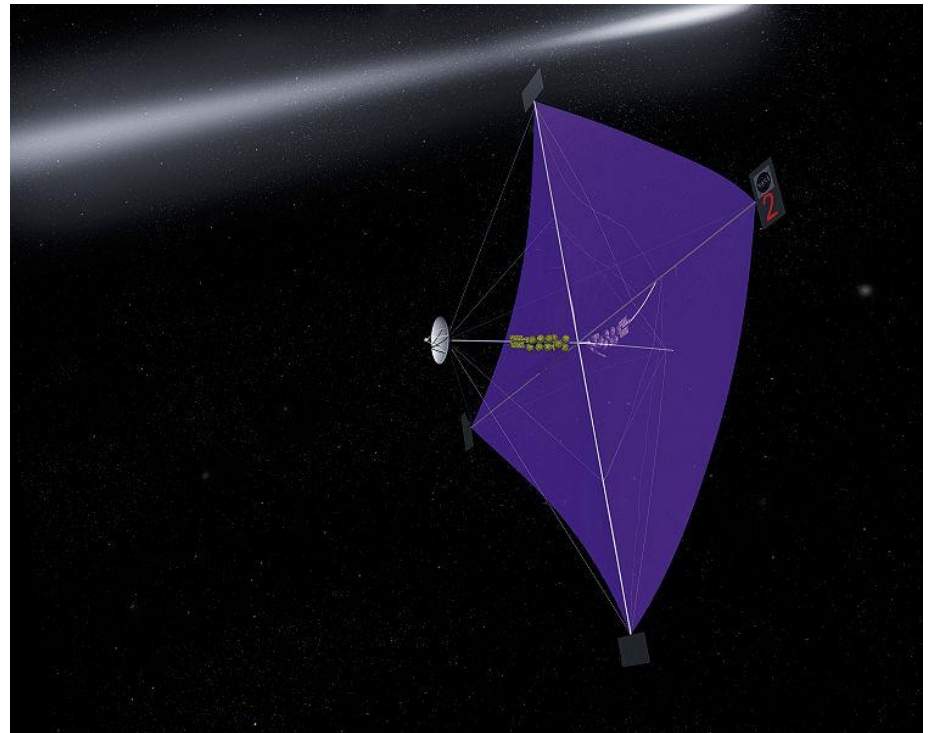
Qual a pressão exercida por uma onda eletromagnética sobre uma superfície perfeitamente absorvedora ?

$$P = \frac{F}{A} = \frac{dp/dt}{A} = \frac{1}{A} \frac{d(U/c)}{dt} = \frac{1}{c} \frac{dU/dt}{A} = \frac{I}{c}$$



Veleiro solar

Um grupo de engenharia da NASA desenvolveu uma missão espacial denominada **NanoSail-D** que foi perdida no lançamento a bordo do foguete Falcon 1 lançado em 3 agosto de 2008, finalmente ela foi lançada em 2010



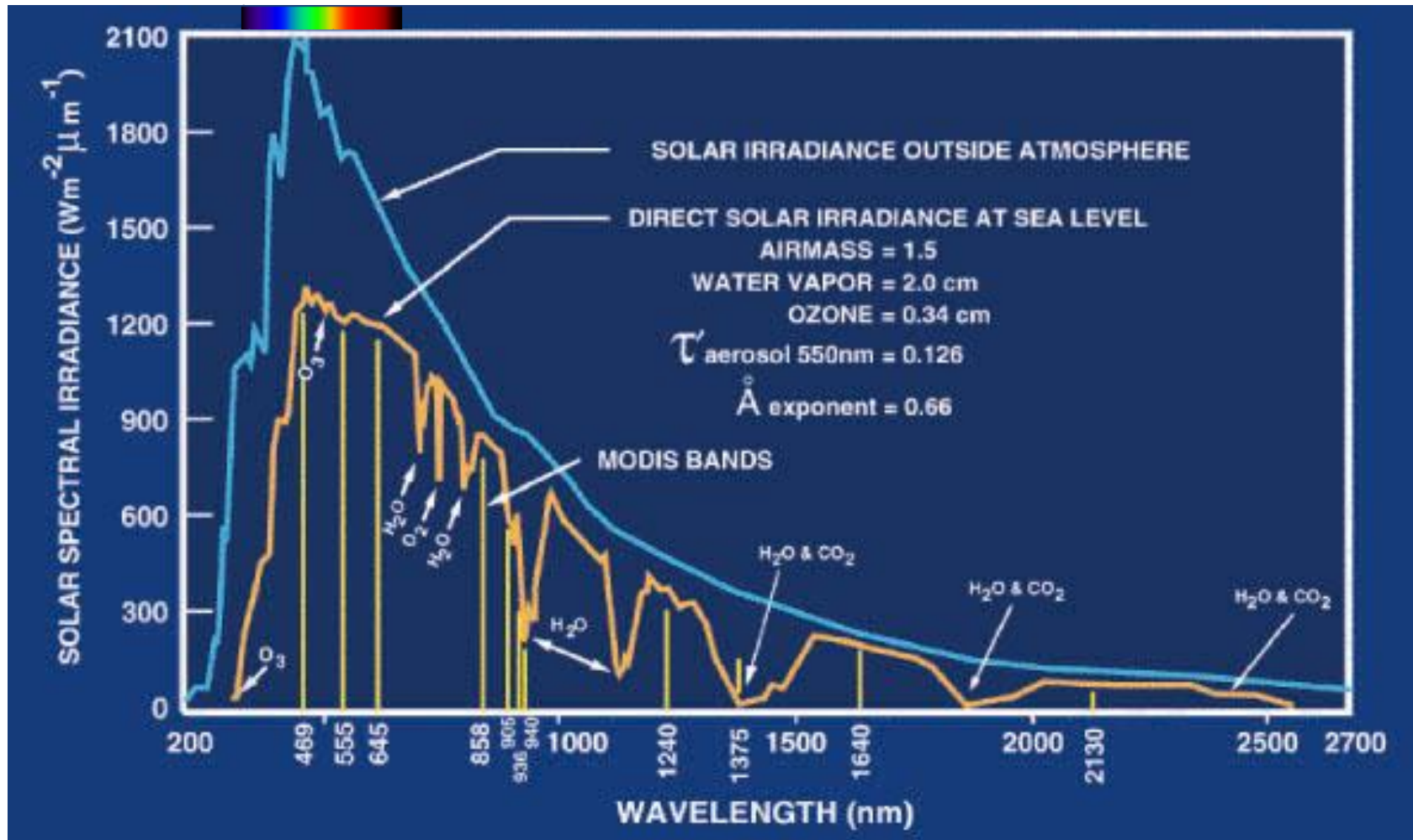
A estrutura NanoSail-D era feita de alumínio e plástico com um peso inferior 5 kg. A vela possuía 9,3 metros quadrados na face coletora de luz.

Algumas regiões conhecidas

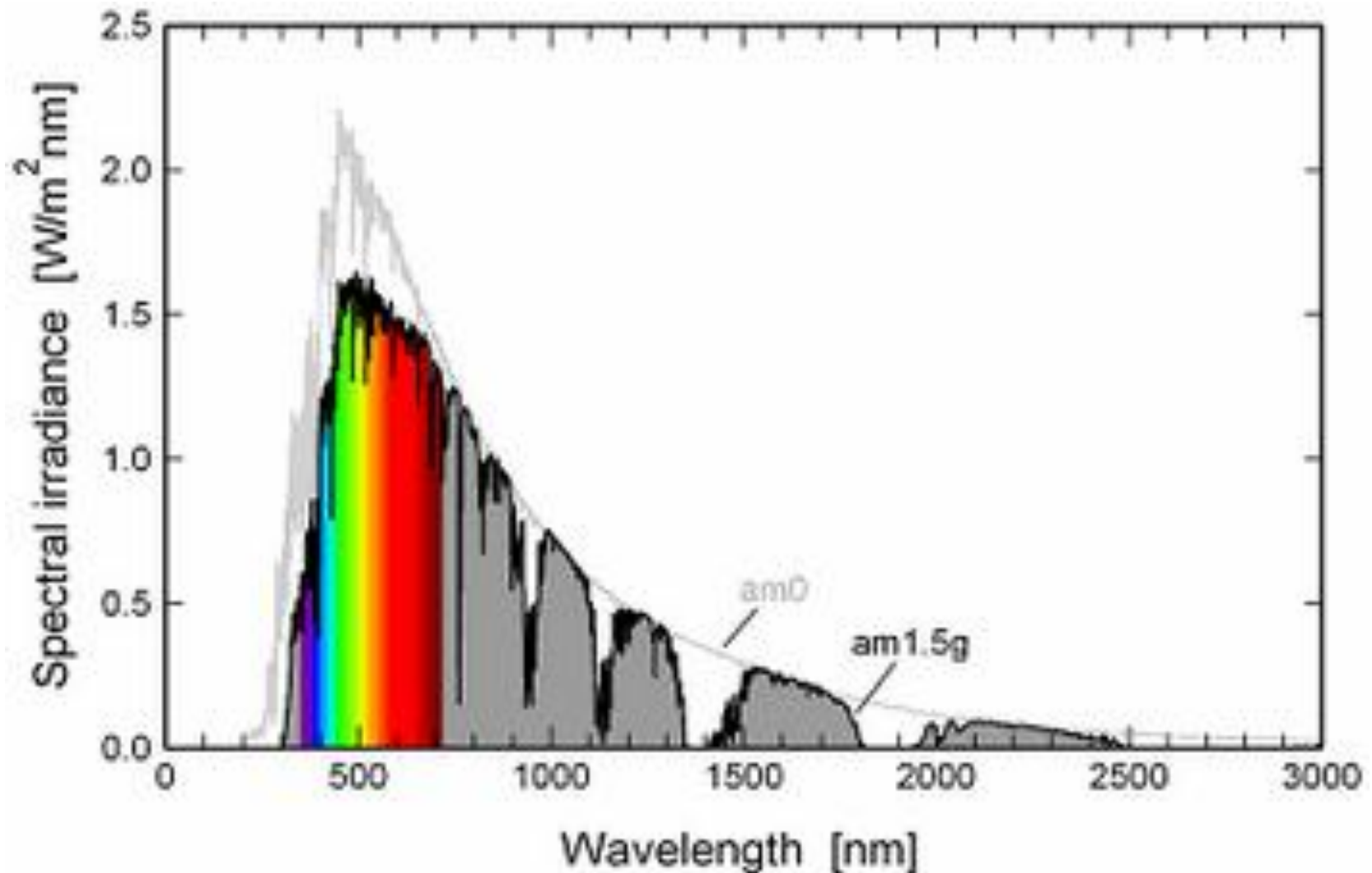
Espectro de Radiação Eletromagnética

Região	Comp. Onda (Angstroms)	Comp. Onda (centímetros)	Frequência (Hz)	Energia (eV)
Rádio	$> 10^9$	> 10	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Micro-ondas	$10^9 - 10^6$	$10 - 0.01$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Infra-vermelho	$10^6 - 7000$	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Visível	$7000 - 4000$	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Ultravioleta	$4000 - 10$	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Raios-X	$10 - 0.1$	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Raios Gama	< 0.1	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

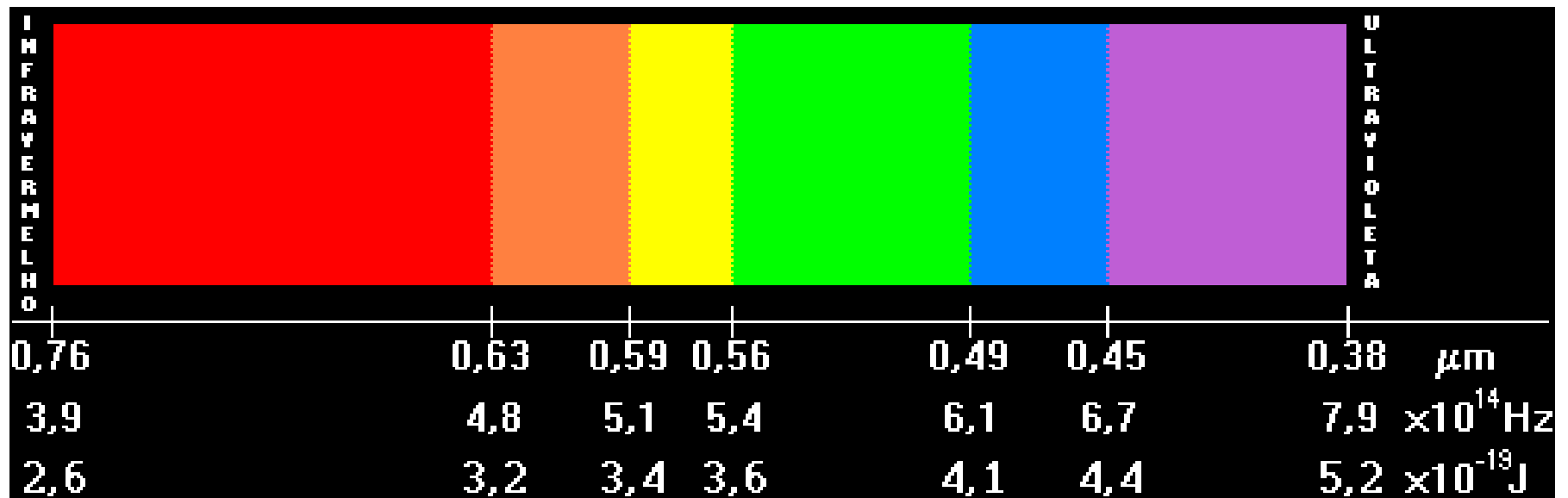
Espectro de Luz solar



Espectro de Luz solar



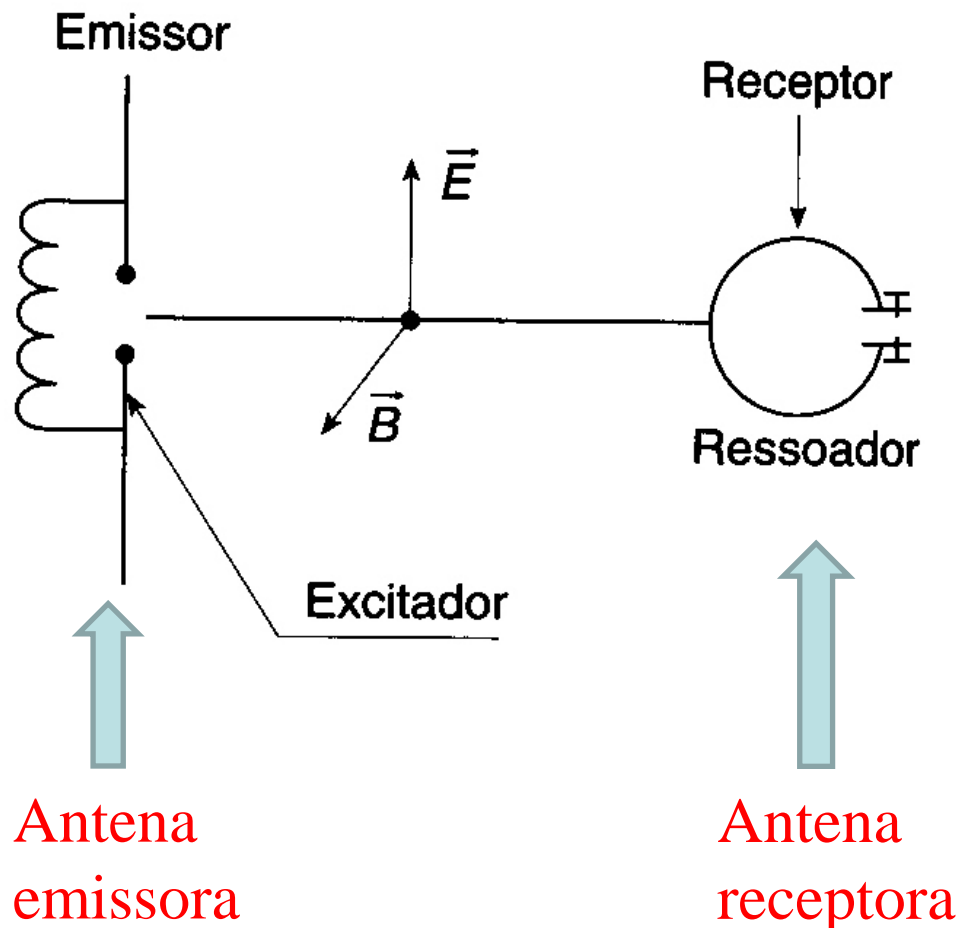
Espectro Visível



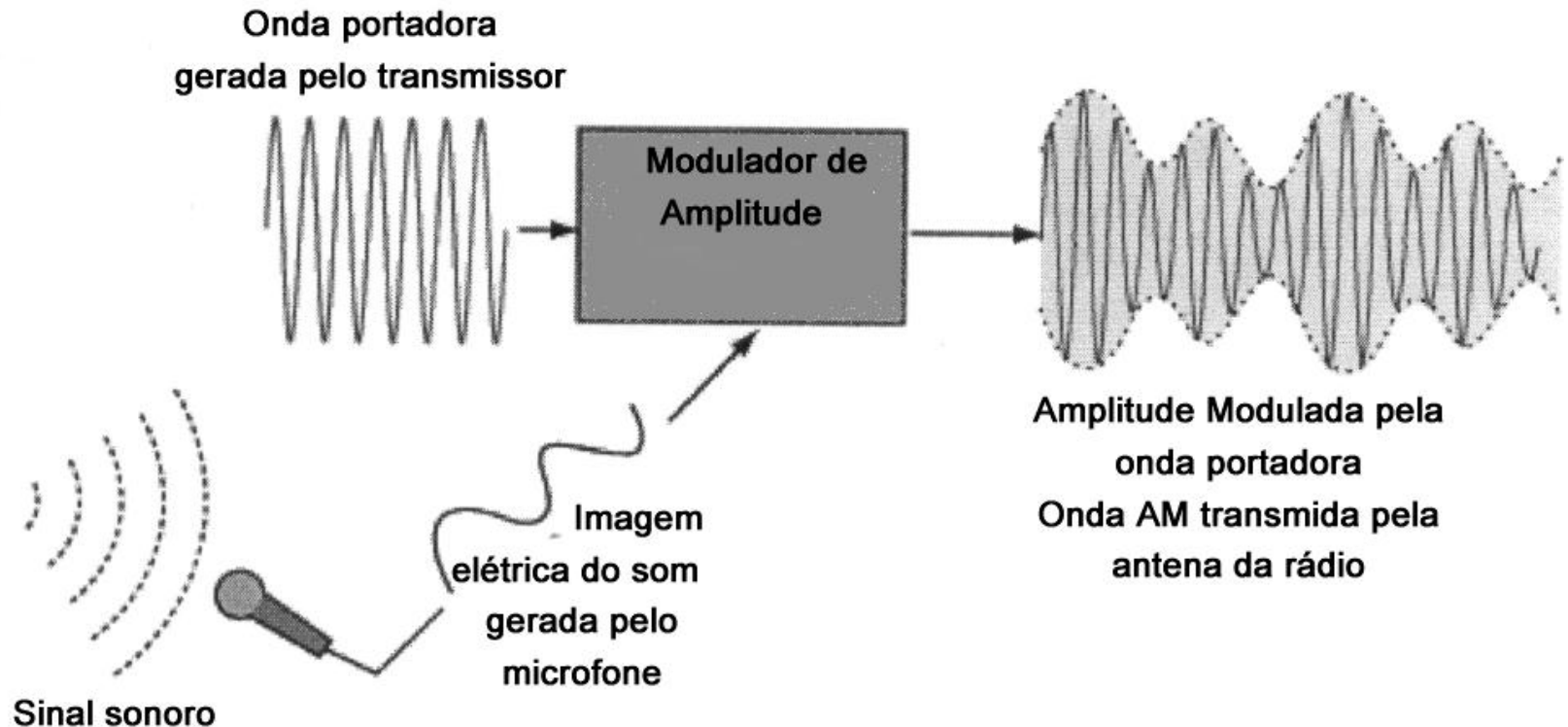
Experimento de Hertz

Utilizando um gerador de alta tensão e uma bobina era possível criar uma oscilação de cargas eléctricas entre dois pares de esferas, de tamanhos diferentes, as quais emitiam ondas eletromagnéticas captadas por um “ressoador”, um anel metálico com uma pequena abertura regulável. Com uma lupa observou, entre as pontas do “ressoador”, pequenas faíscas. O “ressoador” funcionou como a primeira antena receptora e o seu excitador funcionou como a primeira antena emissora.

Representação esquemática da experiência de Hertz

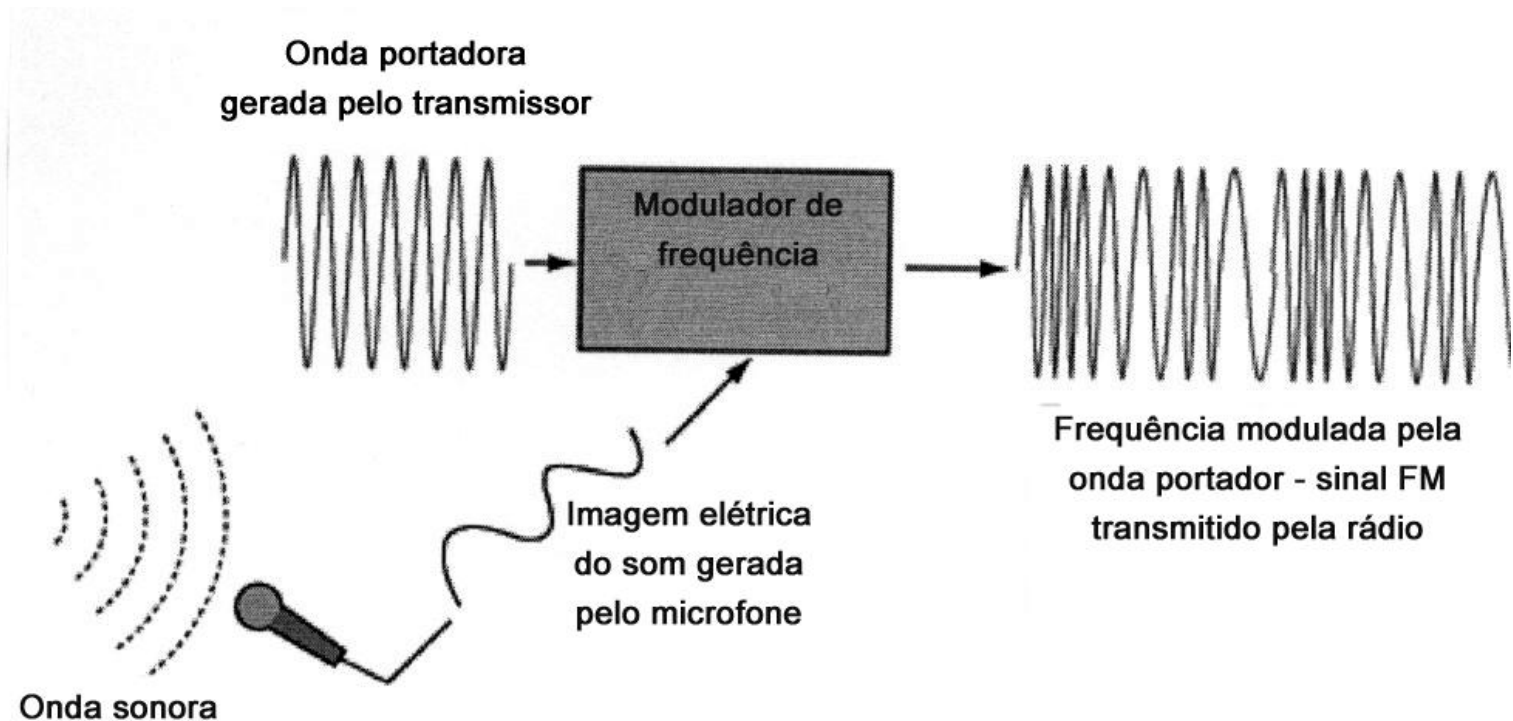


Emissão e recepção de rádio AM



A banda AM do espectro eletromagnético está colocada entre os 535kHz e os 1605 kHz e as ondas transportadoras são espaçadas de 10 kHz

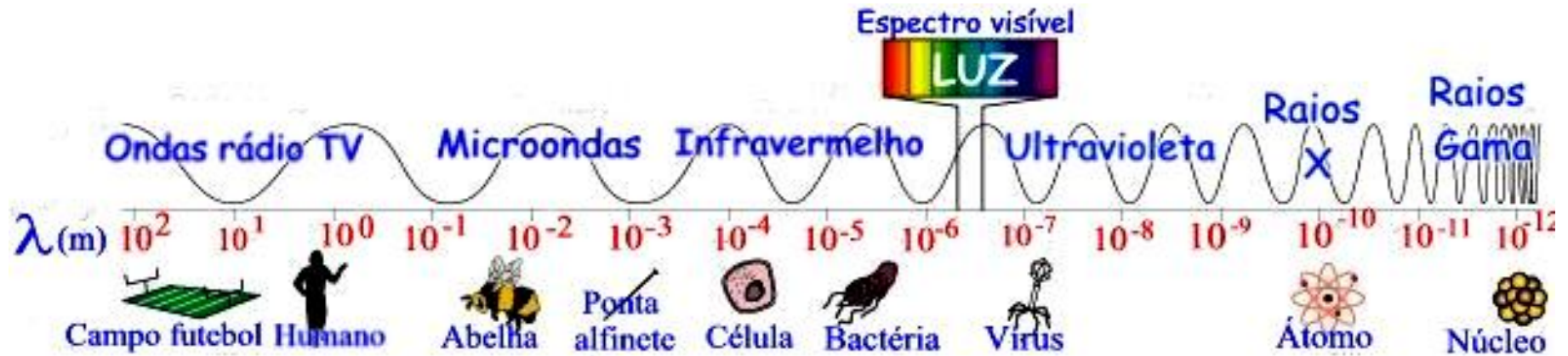
Emissão e recepção de rádio FM



Esquema da modulação de frequência

A banda FM do espectro eletromagnético está compreendida entre os 88MHz e os 108MHz e as ondas transportadoras para estações individuais são espaçadas de 200kHz

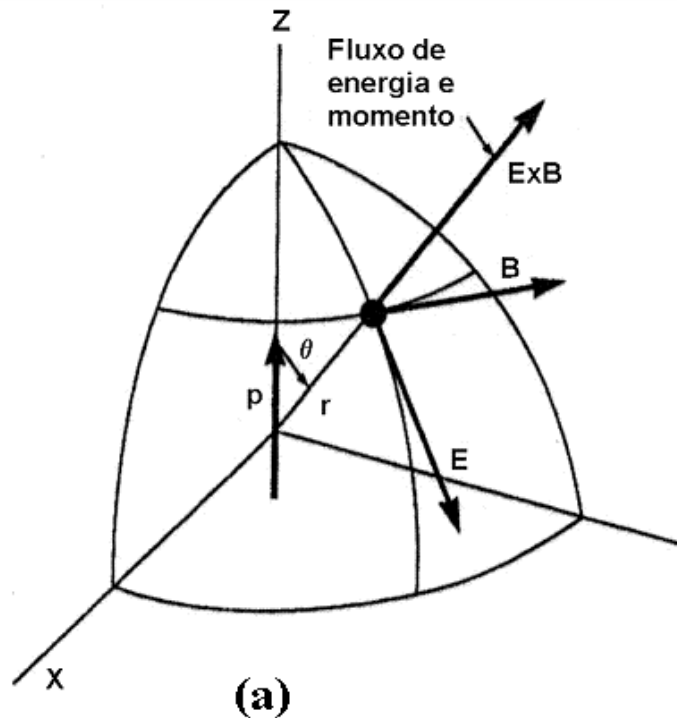
Comparação do comprimento de onda e dimensões



Comparação do comprimento de onda e dimensões

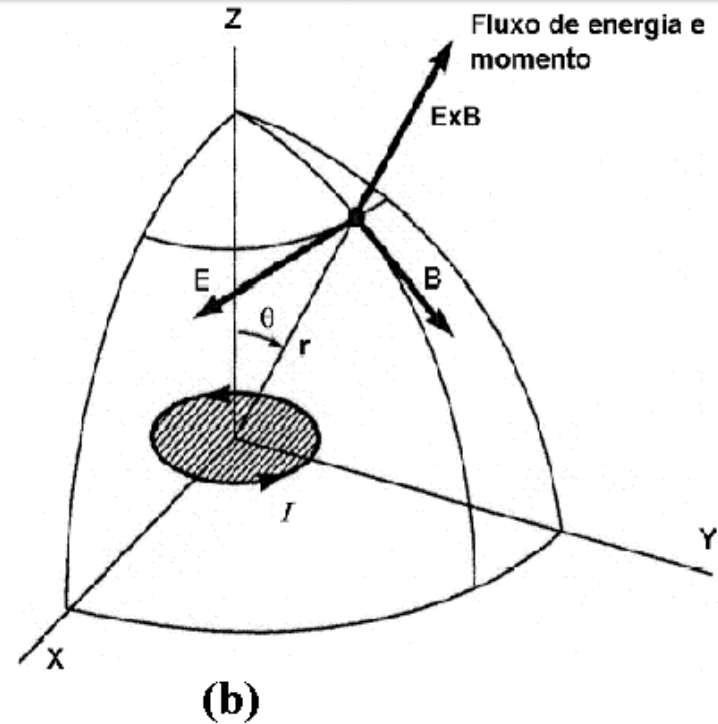
Tipo de ondas	λ	f	Características
ELF Ondas extremamente longas	+ 100 km	até 3 kHz	Ondas emitidas por linhas de transmissão e por utilidades domésticas.
VLF Ondas muito longas	10 a 100 km	3 a 30 kHz	Radio navegação e marítimos; emissões associadas a terremotos, auroras boreais, eclipses, etc
LF Ondas longas	1 a 10 km	30 a 300 kHz	Comunicação marítima. Radiodifusão (150 a 255 kHz). Tem alcance da ordem de 500 km.
MF (MW) Ondas Médias	1 km a 100 m	300 kHz a 3 MHz	Estações de radio AM (alcance até 75 km); telegrafia marítima; radiofarol. etc
HF (SW) Ondas Curtas	100 a 10 m	3 a 30 MHz	Radioamadores; faixa do cidadão; radiodifusão internacional (alcance 1.000 a 20.000 km); emissões naturais de radio do planeta Júpiter.
VHF Ondas muito curtas (VHF)	10 a 1 m	30 a 300 MHz	TV aberta; radio FM; operações espaciais; walkie-talkies; microfones sem fio; telefones sem fio; radioastronomia (emissões galácticas naturais).
UHF Ondas ultra curtas (UHF)	1m a 10 cm	0,3 a 3 GHz	TV em UHF; radioastronomia; comunicações de estações fixas e móveis; aeronavegação; radar de longo alcance; GPS; telefonia celular móvel.
SHF Ondas ultra curtas	10cm a 1cm	3 GHz a 30 GHz	Telefones ceulares, radar, satélites e GPS
EHF Ondas extra curtas	1 cm a 1mm	30 GHz a 300GHz	Estações espaciais

Radiação de Dipolos Oscilantes



a) Radiação de dipolo elétrico:

$$p = p_0 \sin \omega t$$



b) Radiação de dipolo magnético:

$$I = I_0 \sin \omega t$$

$$m_b = I A \sin \omega t$$

Radiações Ionizantes e Não-Ionizantes

- Chamamos atenção para a palavra "**radiação**", que, no imaginário popular é associada a radioatividade, bomba atômica e outras lembranças aterradoras. Convém frisar que radiação é apenas uma das formas de emissão e propagação de energia.
- A **radiação eletromagnética** é uma **oscilação**, em **fase**, os **campos elétricos e magnéticos**, que, auto sustentando-se, encontram-se **desacoplados das cargas elétricas** que lhe deram origem.
- Essa radiação é chamada eletromagnética por se tratar do transporte de energia por meio de flutuações dos campos elétrico e magnético. A luz, ou radiação eletromagnética, pode ser observada sob diferentes formas ou seja, em diferentes faixas espectrais: visível, infravermelho, ultravioleta, ondas rádio, etc.

Radiações Ionizantes

- Radiação ionizante é constituída por fótons com energia suficiente para produzir íons em sua passagem por matéria, ou seja, capazes de "arrancar" elétrons de átomos e moléculas.
- Ultravioleta curto, raios X, raios gama, são radiações ionizantes, cujas conseqüências para a saúde são conhecidas (inclusive efeitos cancerígenos). Por outro lado, luz visível, infravermelho, microondas, rádio freqüências e baixas freqüências, não têm efeito ionizante.

Radiações Ionizantes e Não-Ionizantes

ICRP

International Commission
on Radiological Protection

ICNIRP

International Commission on Non-
Ionizing Radiation Protection

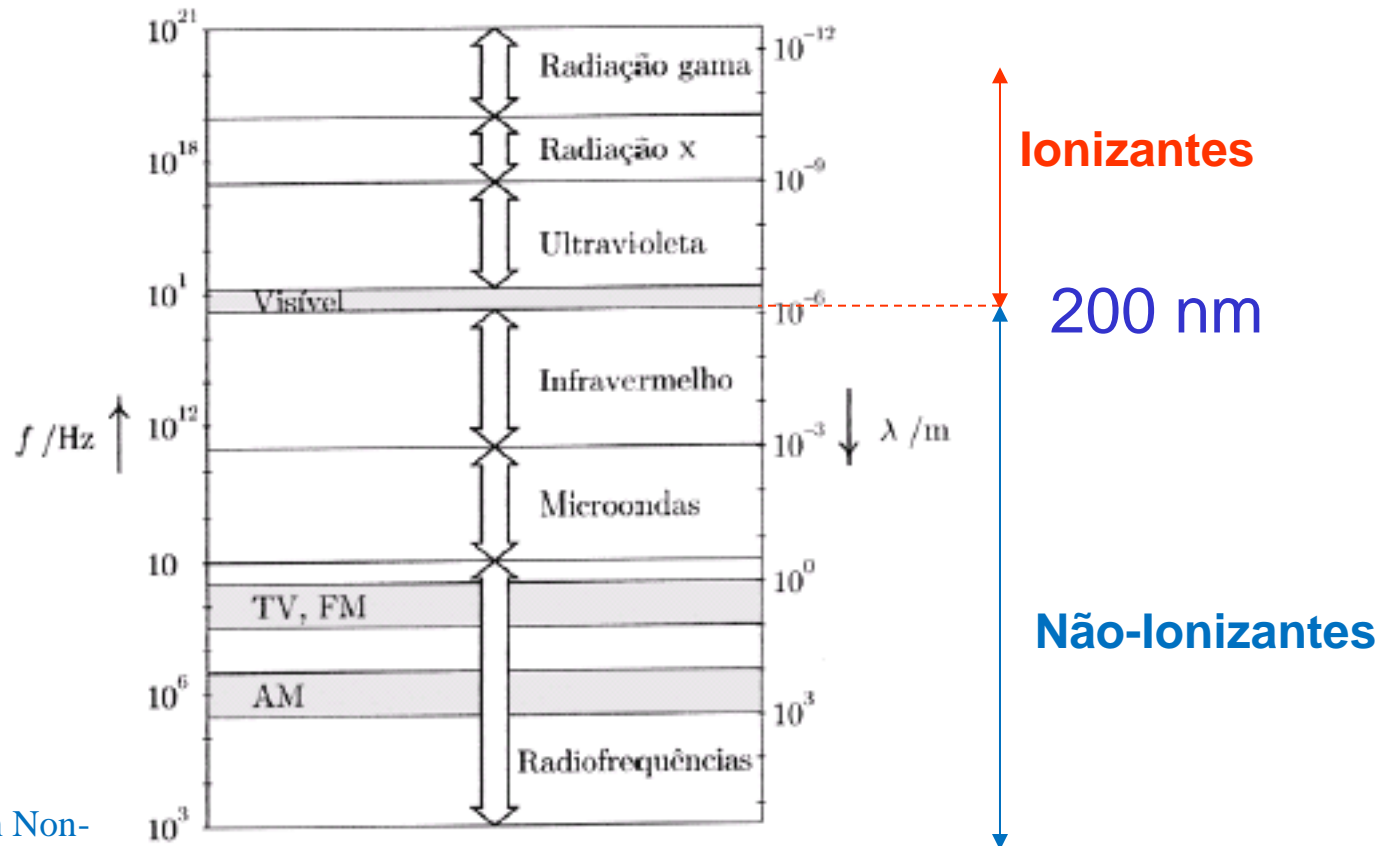


Fig. 10.9 Espectro Eletromagnético