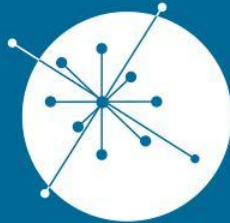


# RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

*Fundamentos Físicos*



GRUPO DE  
**DOSIMETRIA  
DAS RADIAÇÕES**  
e FÍSICA MÉDICA

---

IFUSP - Instituto de Física da USP

Jullianna Cristina de Oliveira Castro

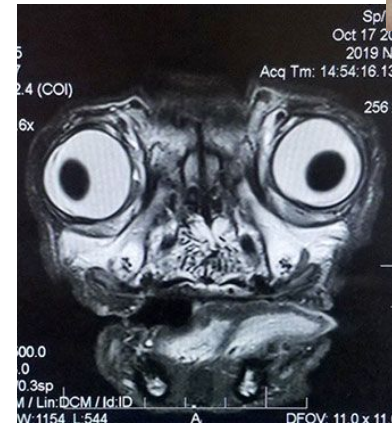
[julliannacastro26@gmail.com](mailto:julliannacastro26@gmail.com)

*São Paulo, 29 de setembro de 2022.*

1. Visão geral
2. Equipamento
3. Princípios básicos
4. Formação da imagem



Fonte: Arquivo pessoal.



Fonte: <https://www.oversodoinverso.com.br/alguem-mostrou-como-e-ressonancia-magnetica-de-um-pug-e-e-bastante-ateorizante/>

**Ressonância Magnética:** Método de diagnóstico por imagem.



Campo  
magnético



Pulso de  
Radiofrequência

1  
H  
Hidrogênio

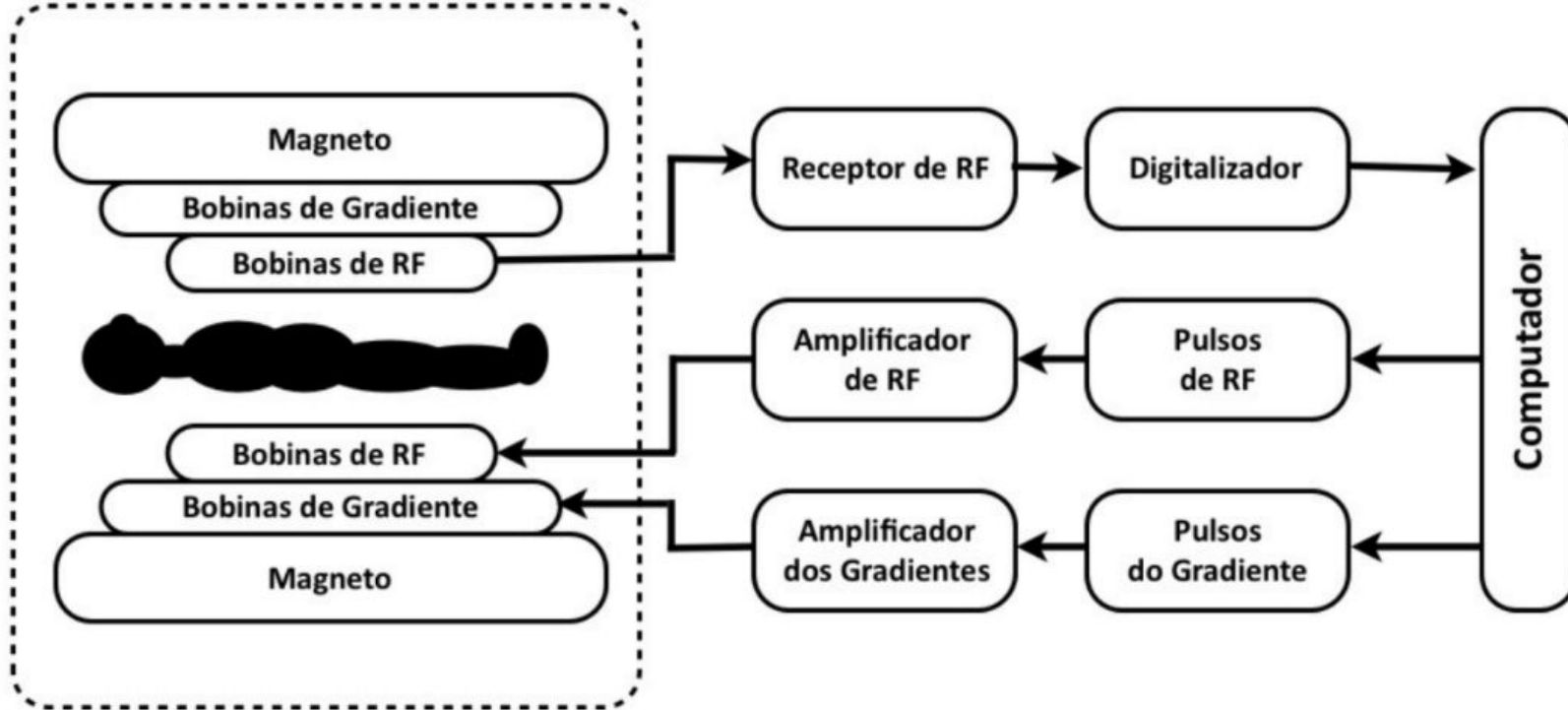
Anatomia

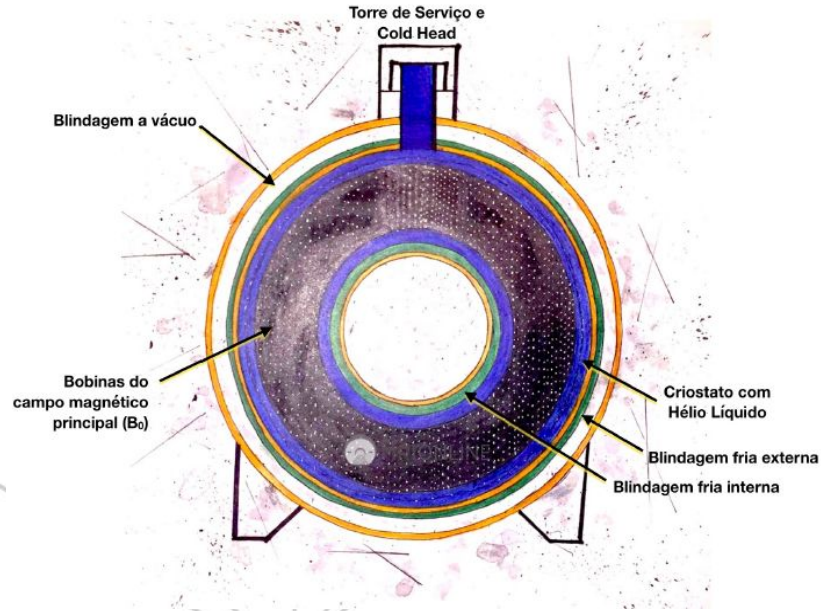


Imagem

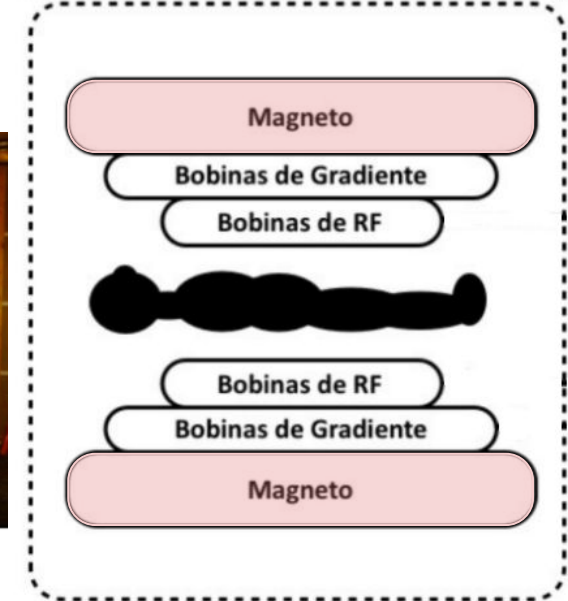


## Cabine Atenuadora de RF ou Gaiola de Faraday



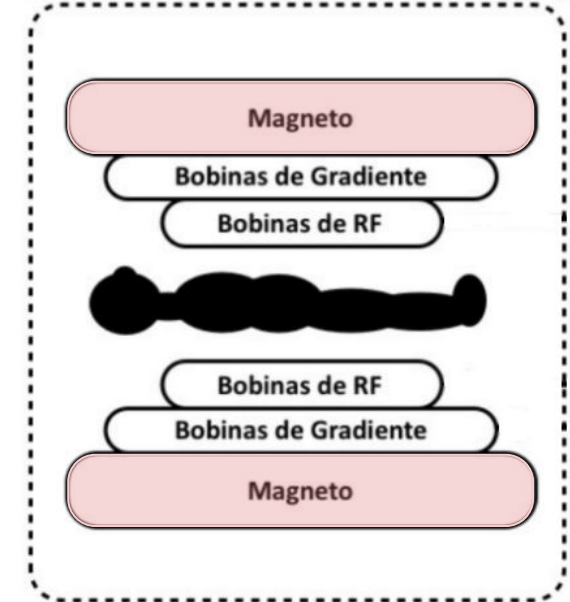


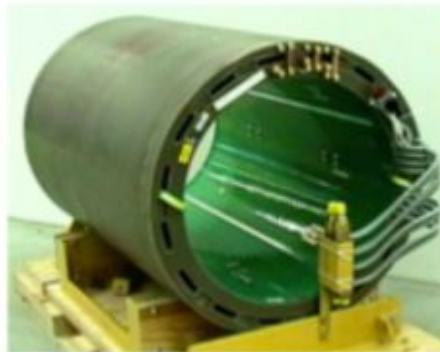
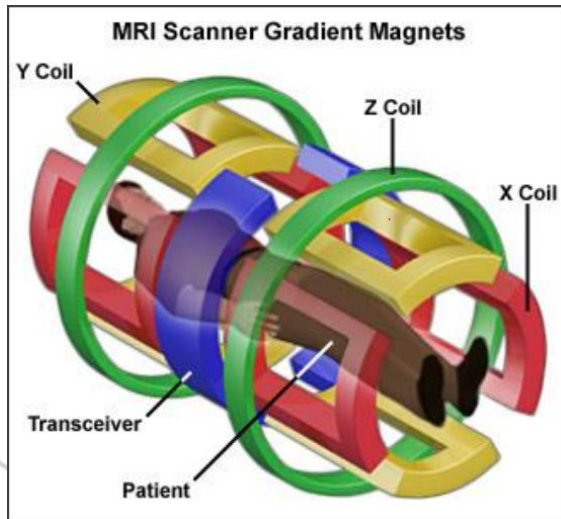
## Cabine Atenuadora de RF ou Gaiola de Faraday



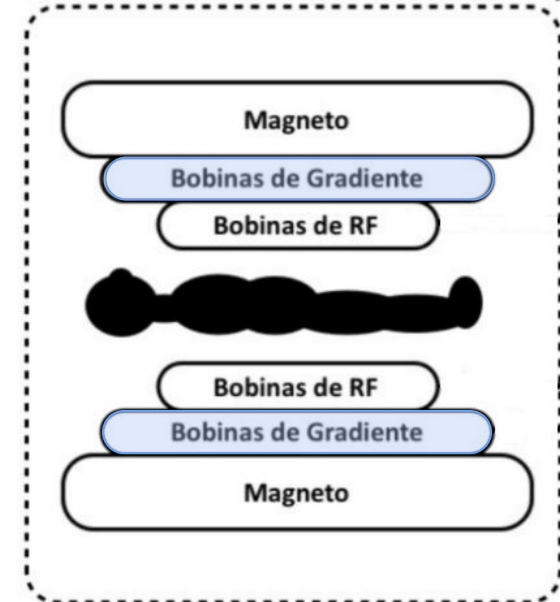


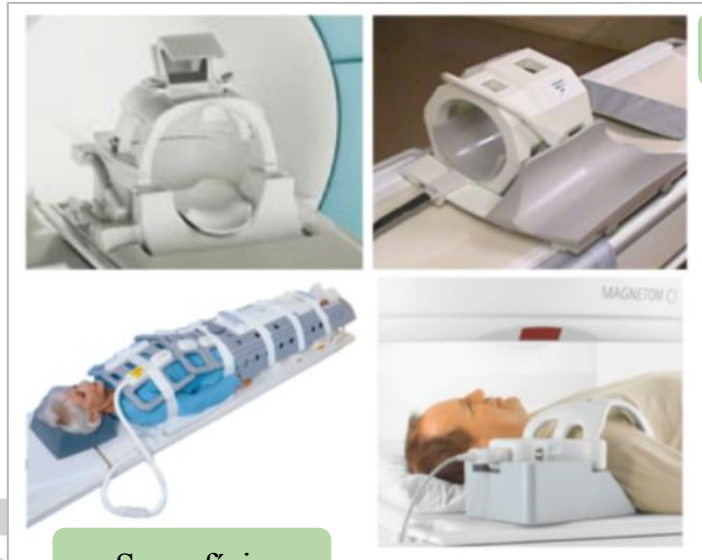
Cabine Atenuadora de RF ou Gaiola de Faraday





## Cabine Atenuadora de RF ou Gaiola de Faraday



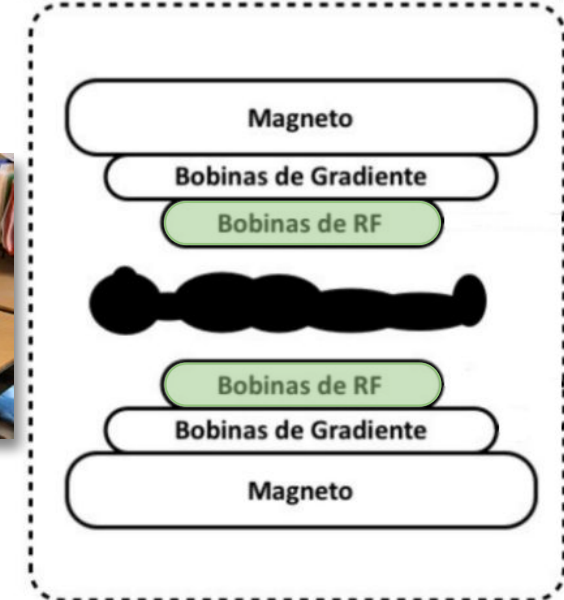


Superfície

Volume



Cabine Atenuadora de RF ou Gaiola de Faraday



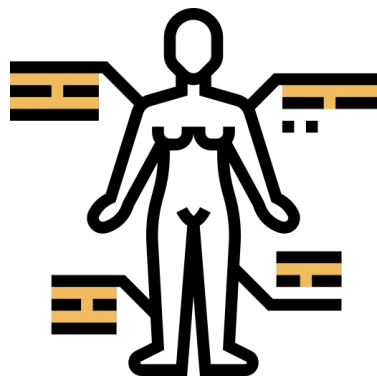


## Ressonância Magnética:

Propriedade física apresentada por alguns núcleos atômicos.

Momento Angular

Momento Magnético



### Composição do corpo humano

Hidrogênio

Fósforo

Sódio

Oxigênio

Cálcio

Potássio

Carbono

Flúor

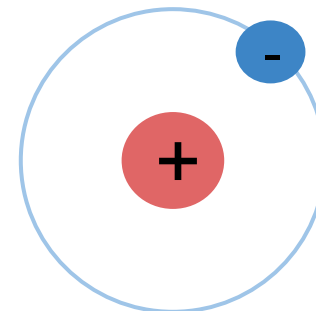
Nitrogênio

10% do peso corporal

Apresenta núcleo simples.

Próton de hidrogênio possui maior momento magnético.

Diferença de sensibilidade entre H de tecidos saudáveis e patológicos.



${}^1_1\text{H}$

## Propriedades do próton:

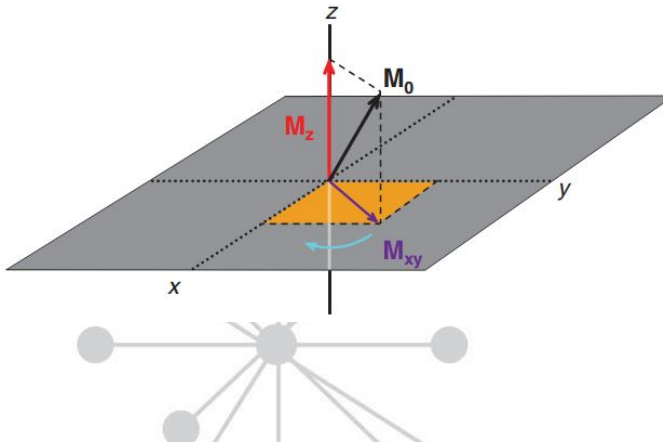
Os prótons também experimentam um torque em uma direção perpendicular do campo magnético externo.

### Frequência de Larmor

$$\omega = \gamma B_0$$

$\gamma$ : razão giromagnética (H  $\rightarrow$  42,58 MHz/T)

$B_0$ : campo magnético externo



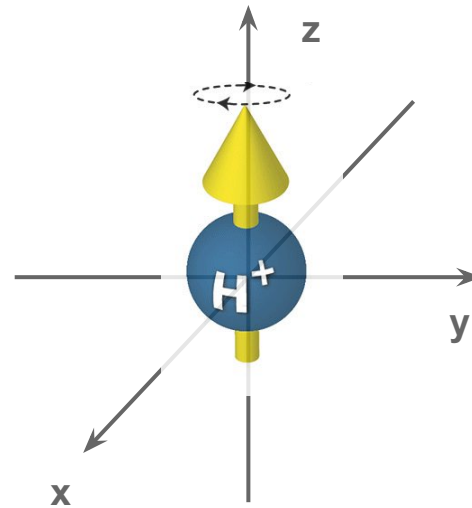
$M_{xy}$ : magnetização transversal

$M_z$ : magnetização longitudinal

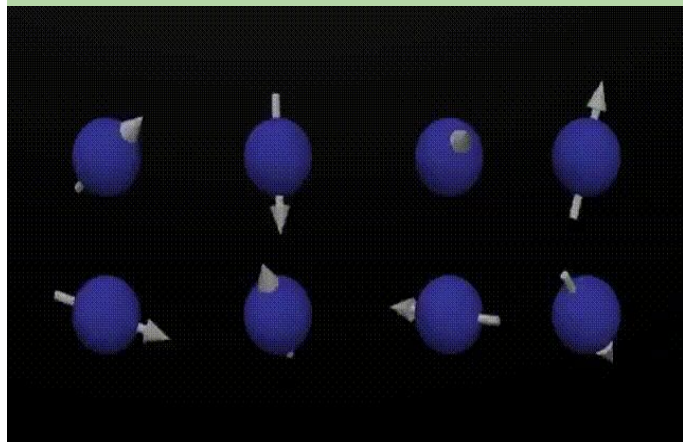
$M_0$ : magnetização de equilíbrio

Magnetização longitudinal máxima

### Movimento de Precessão



Sem campo magnético externo



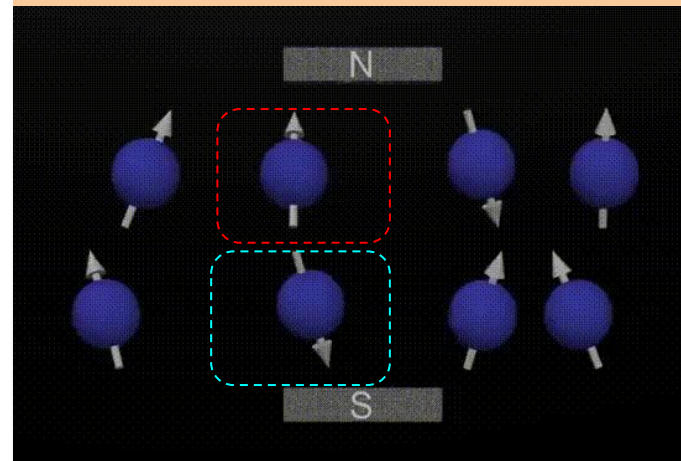
$M_0 = \text{zero.}$



$B_0$

$5 \times 1.000.000$

Campo magnético externo aplicado



$M_0 \neq \text{zero.}$

Alinhados antiparalelamente: nível de alta energia.

Alinhados paralelamente: nível de baixa energia.

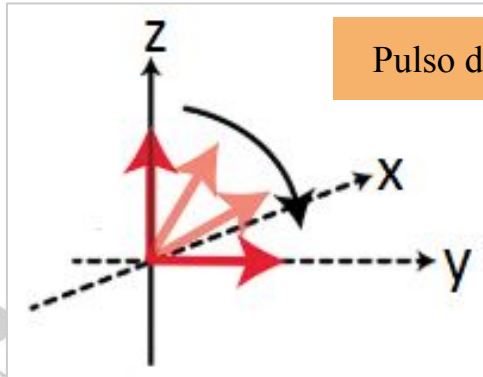
**Magnetização do tecido:**

Como induzir uma corrente elétrica em uma bobina perpendicular ao plano transversal?



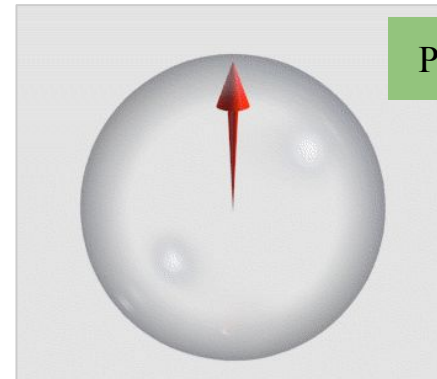
Projetar o  $M_0$  para o plano transversal.

Defasagem no eixo transversal: interações spin-spin



Pulso de 90°

Radiofrequência



Pulso de 180°

Refasagem



ECO!

## Relaxação

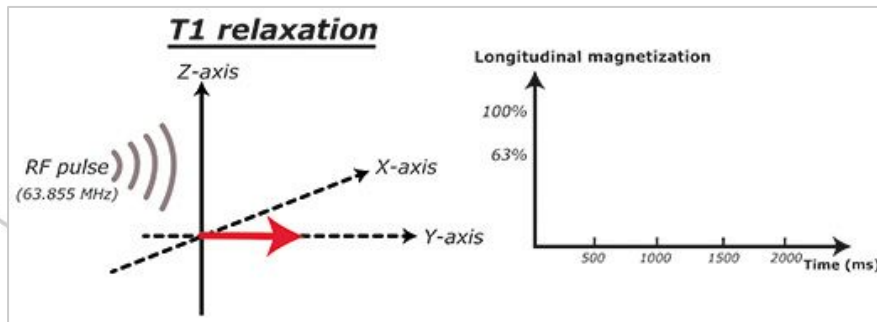
Processo de retorno do vetor  $M$  ao seu estado de equilíbrio (paralelo a  $B_0$ ).

Constantes  
de Tempo

### T1

Interação *spin-rede*

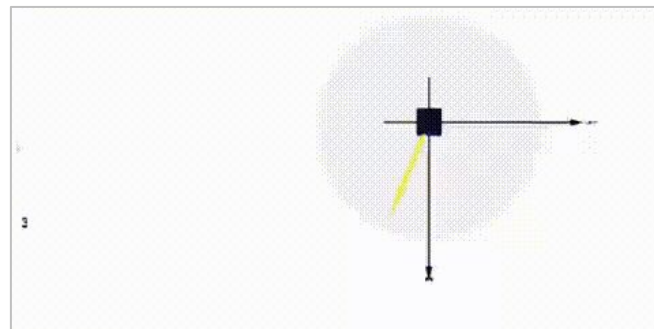
Tempo de retorno da magnetização para o eixo longitudinal.



### T2

Interação *spin-spin*

Tempo de retorno da magnetização no eixo transversal.



## Relaxação

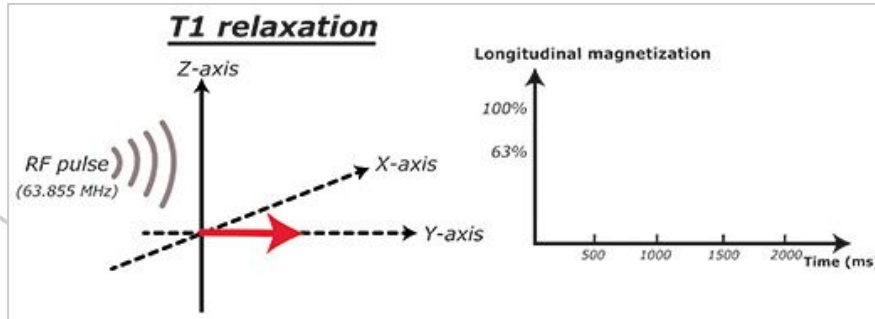
Processo de retorno do vetor M ao seu estado de equilíbrio (paralelo a  $B_0$ ).

Constantes  
de Tempo

### T1

Interação *spin-rede*

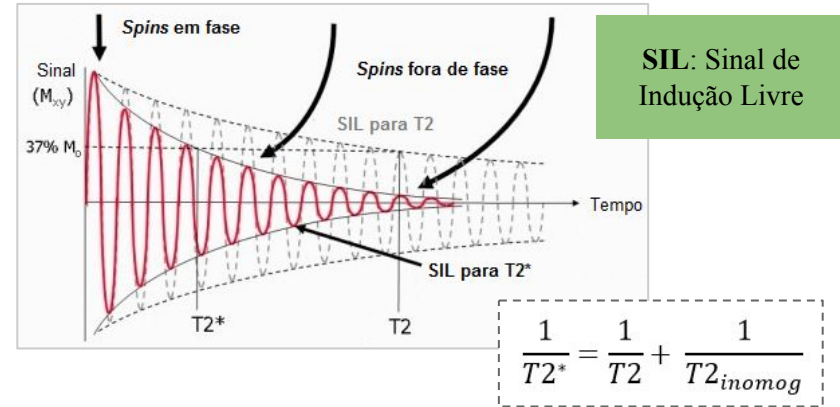
Tempo de retorno da magnetização para o eixo longitudinal.



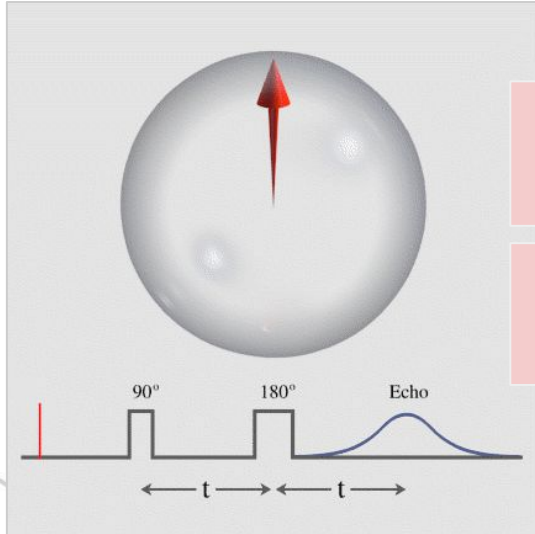
### T2

Interação *spin-spin*

Tempo de retorno da magnetização no eixo transversal.



## Spin Eco



TR: tempo de  
repetição do pulso  
de 90°

TE: tempo ao eco  
(2t)

1º passo: Pulso de 90°

t

Defasagem  
transversal

2º passo: Pulso de 180°

TE: 2t

3º passo: SIL

TR

4º passo: Pulso de 90°

t

Defasagem  
transversal

5º passo: Pulso de 180°

TE: 2t

6º passo: ECO

Informação  
para imagem

# PRINCÍPIOS BÁSICOS

Composição de tecidos diferentes



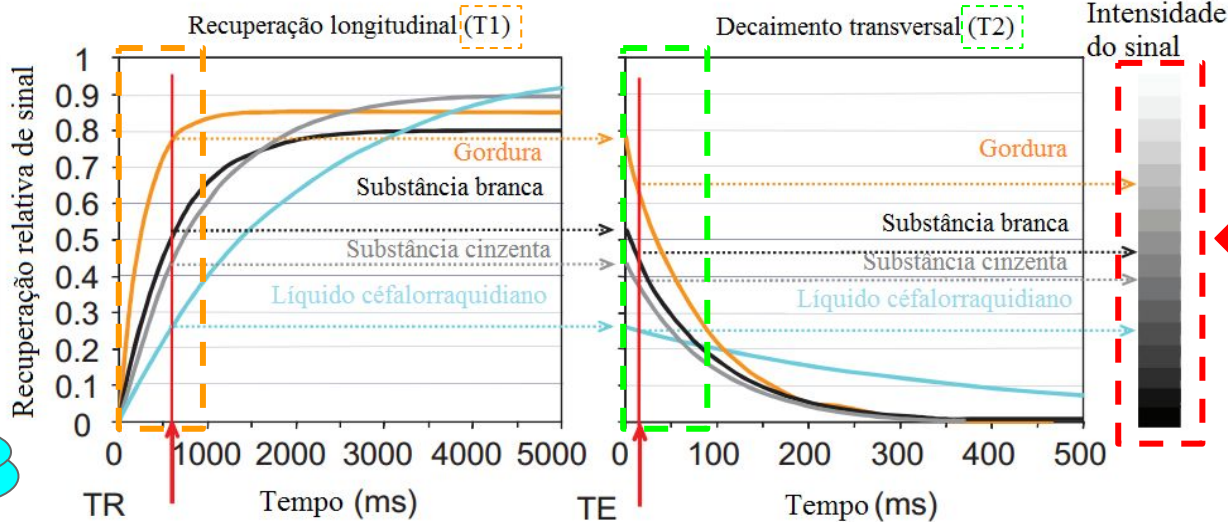
susceptibilidade magnética diferente



Retorno da magnetização em tempos diferentes



CONTRASTE ENTRE TECIDOS



Meios de contraste

Gd: Paramagnético

Aumenta interação spin-rede (reduz T1)

endovenoso

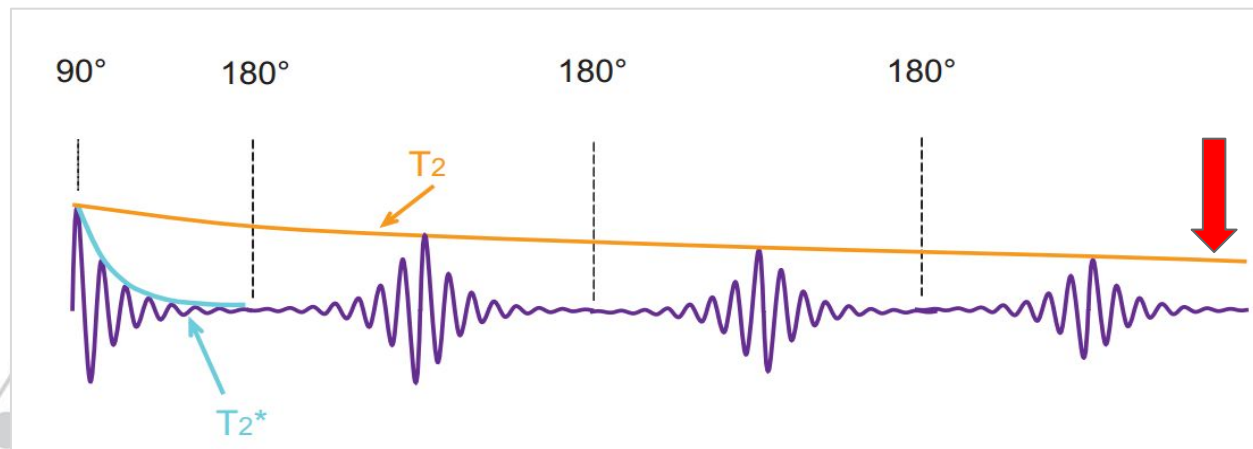
Hipersinal

Fonte: Adaptado de Bushberg (2012).



## Turbo Spin Eco

Limitação: O sinal dos ecos cai ao longo dos pulsos de 180°.



Fonte: Adaptado de Bushberg (2012),

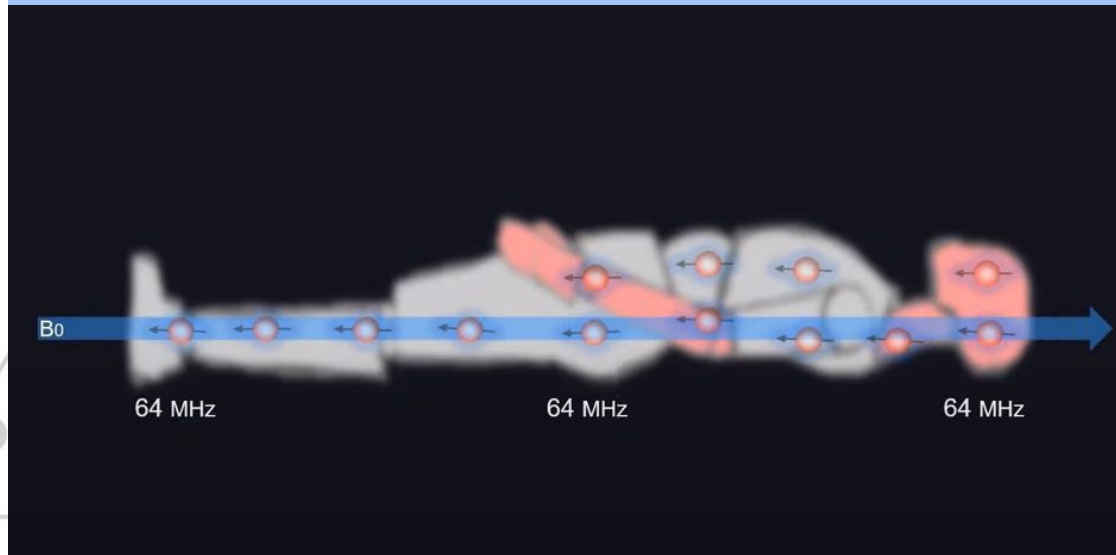
<https://www.pinterest.com.au/pin/319403798556880344/>

# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de seleção de corte (z)

OFFO

Aproximadamente a mesma frequência

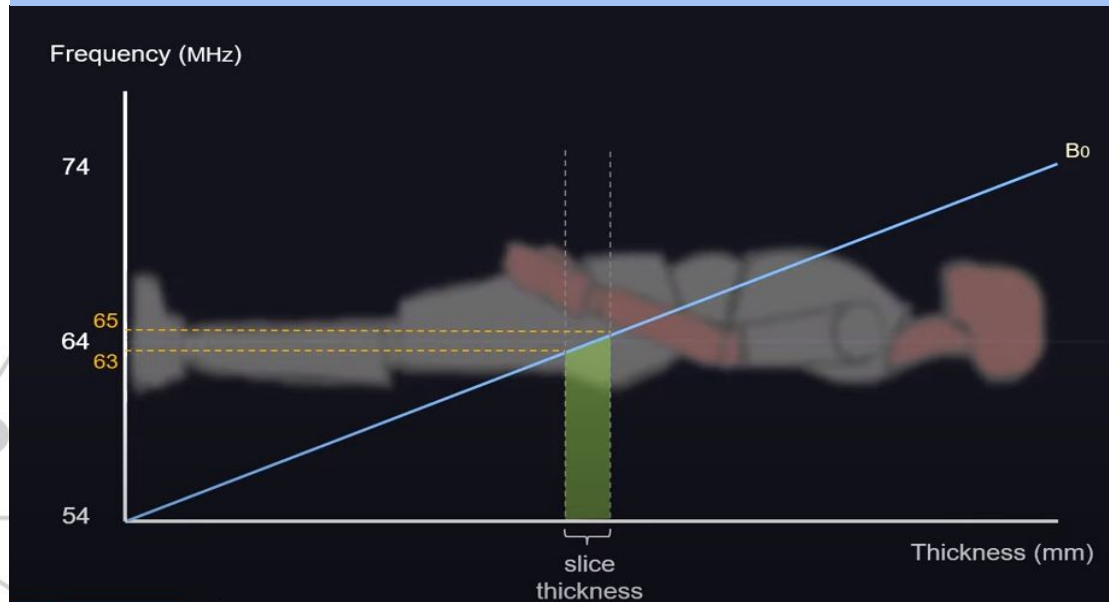


# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de seleção de corte (z)

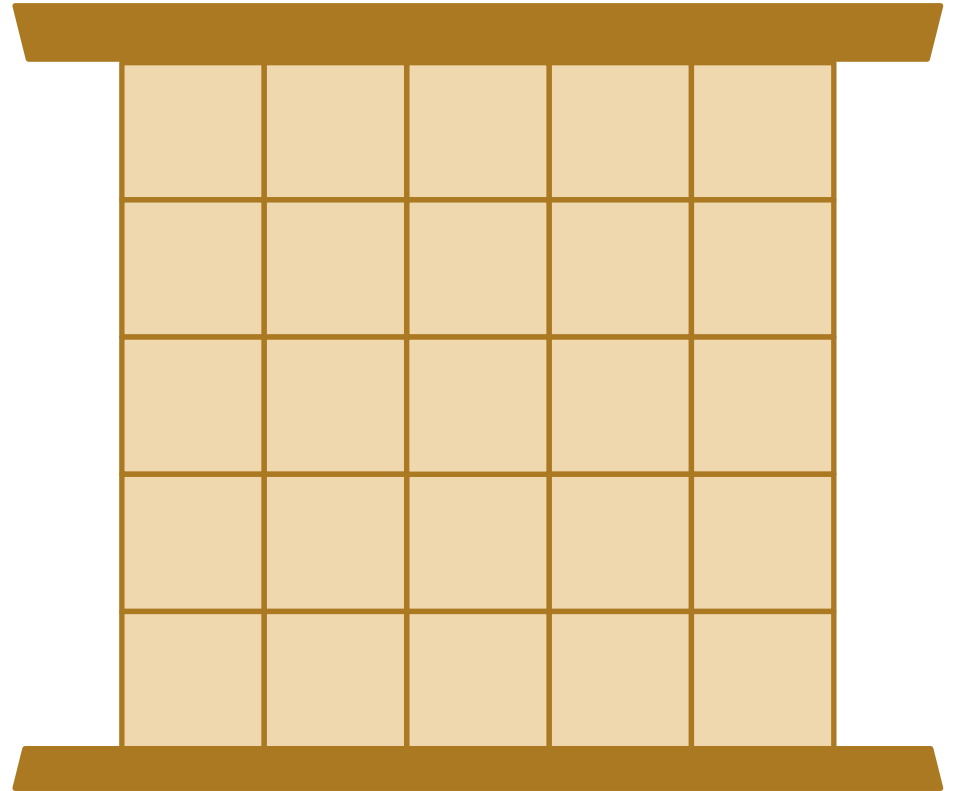
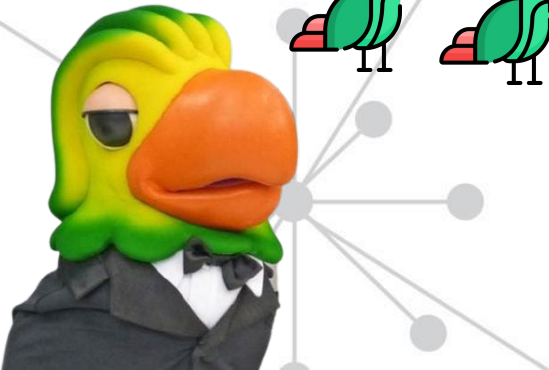
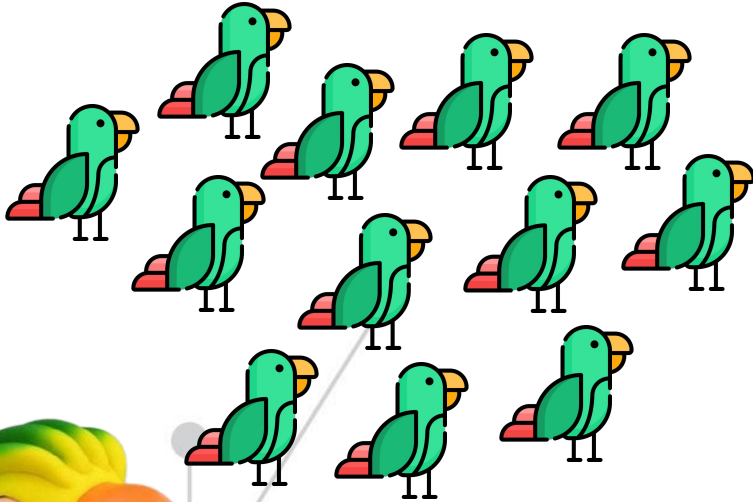


Cada região com spins precessionando a uma frequência diferente



# FORMAÇÃO DA IMAGEM

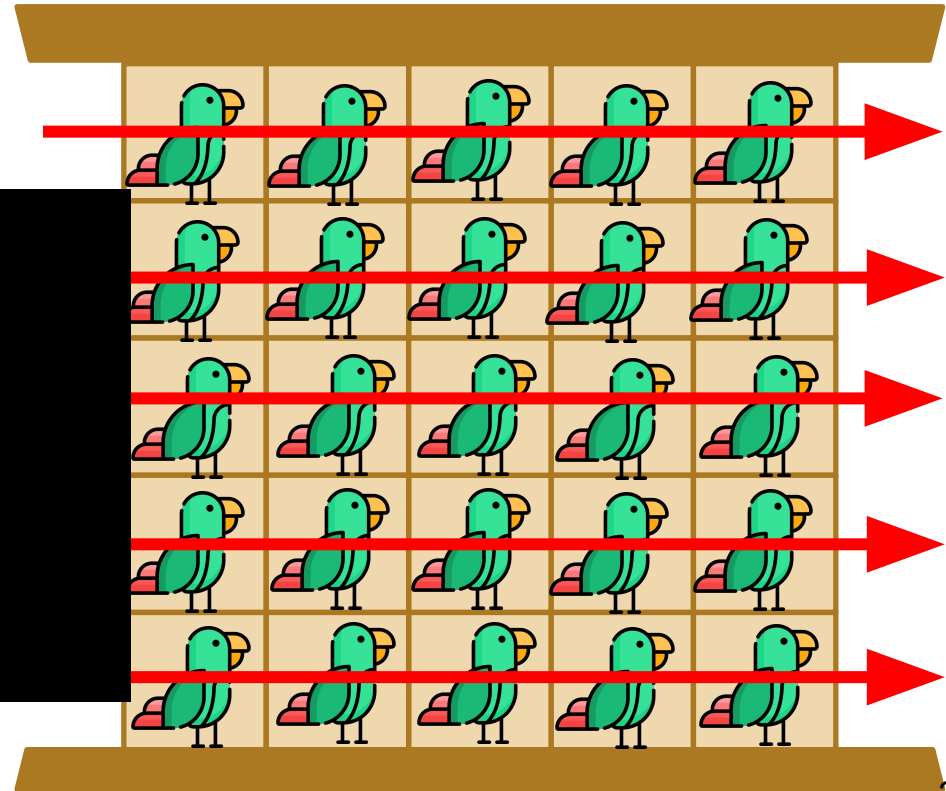
## Preenchimento do Espaço K



# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Preenchimento do Espaço K

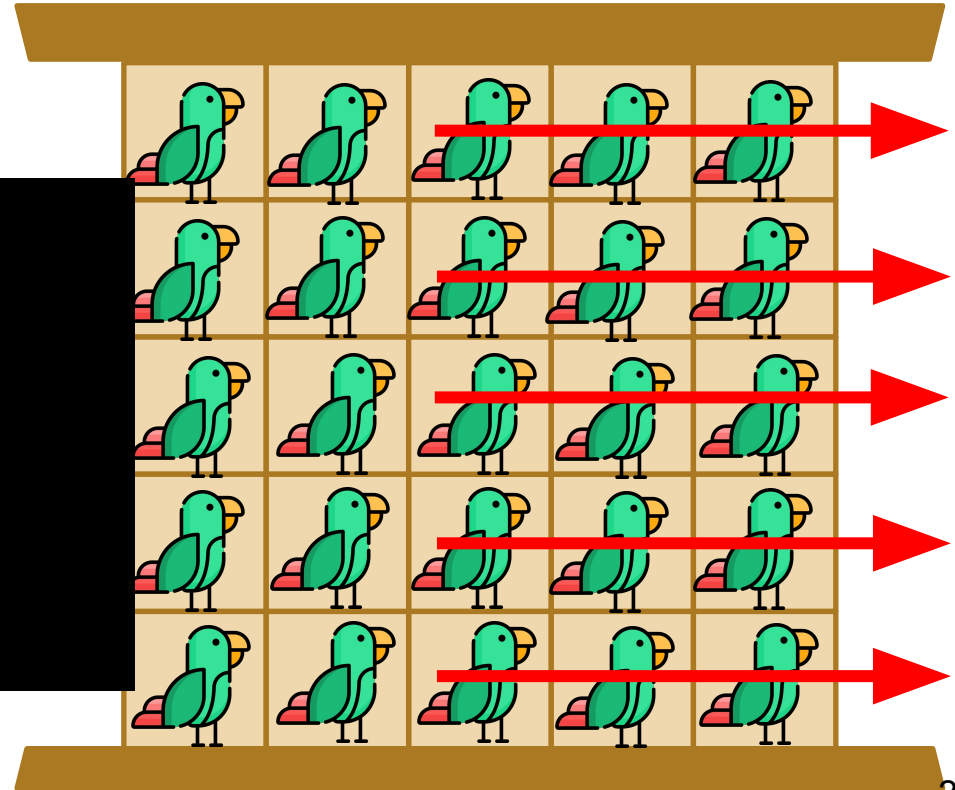
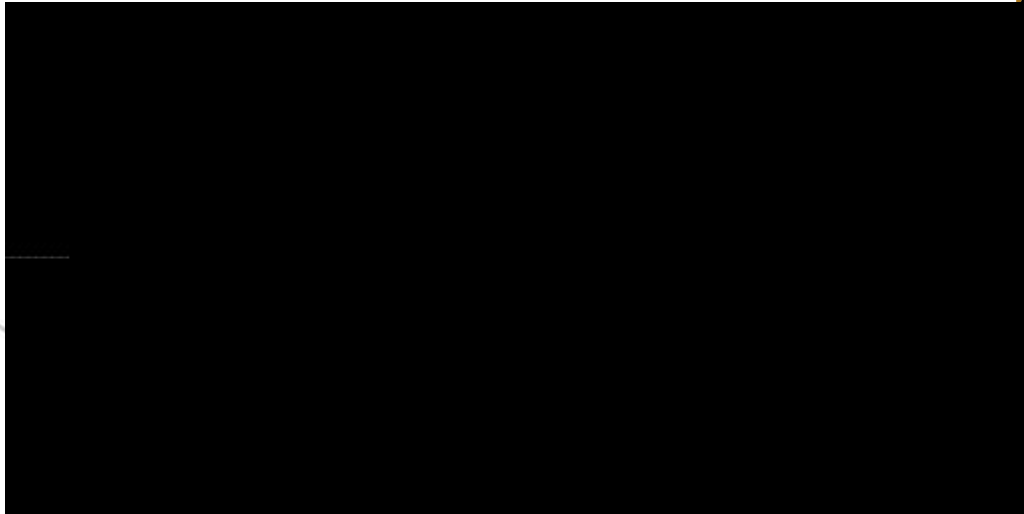
Cartesiana



# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Preenchimento do Espaço K

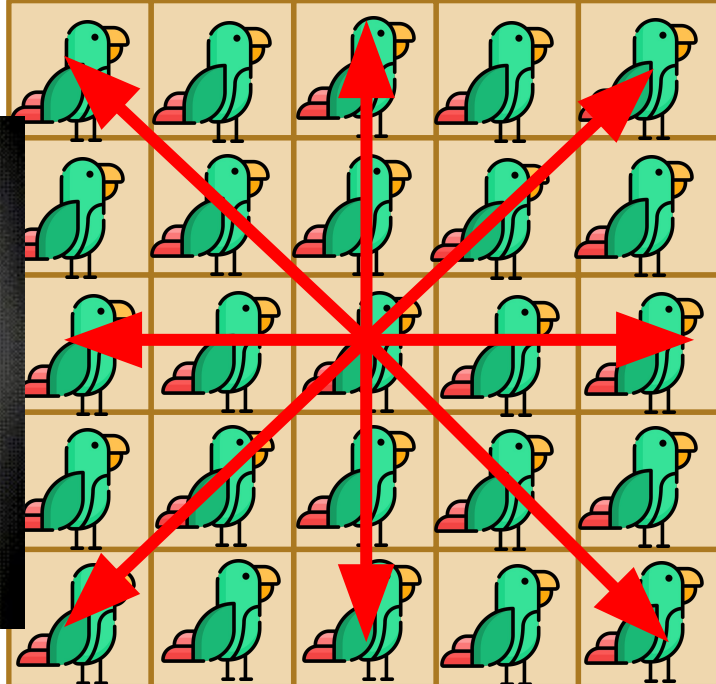
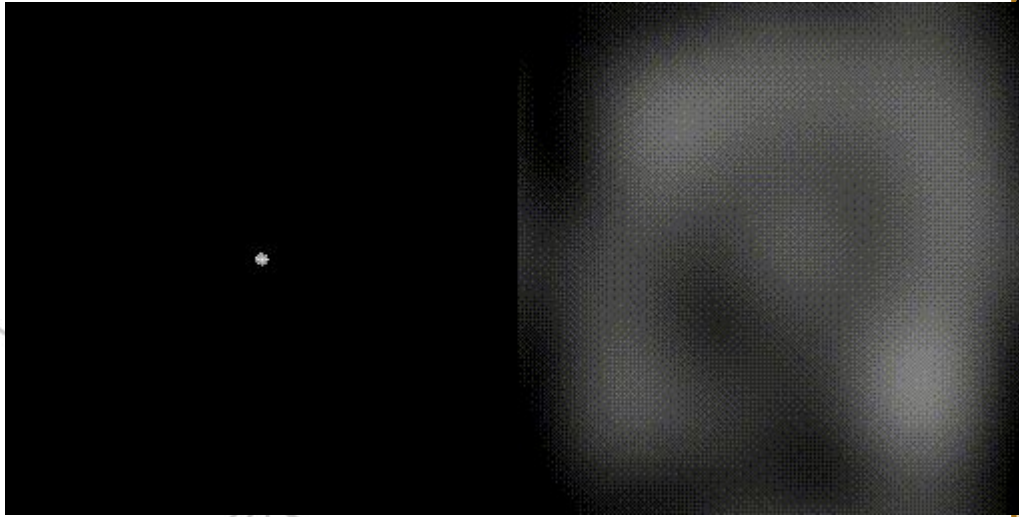
Cêntrica



# FORMAÇÃO DA IMAGEM

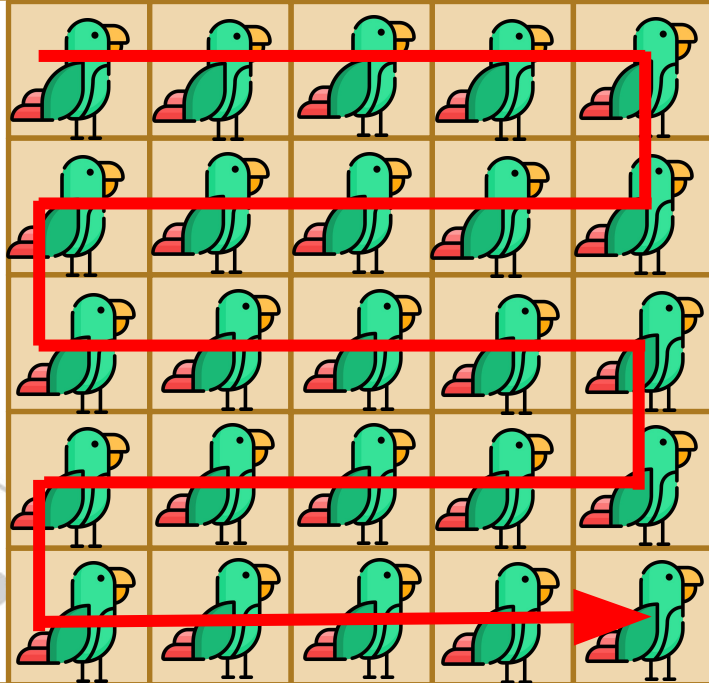
Preenchimento do Espaço K

Radial

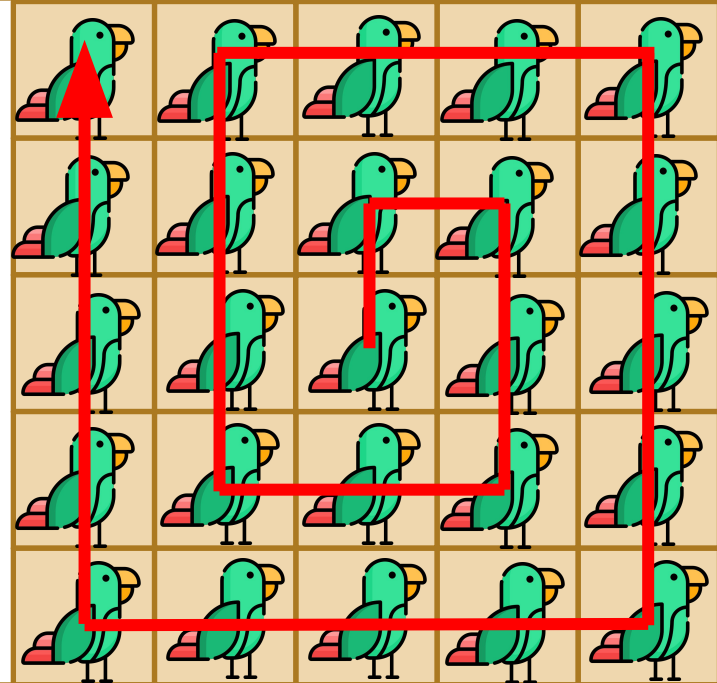


# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Zig-zag



Espiral

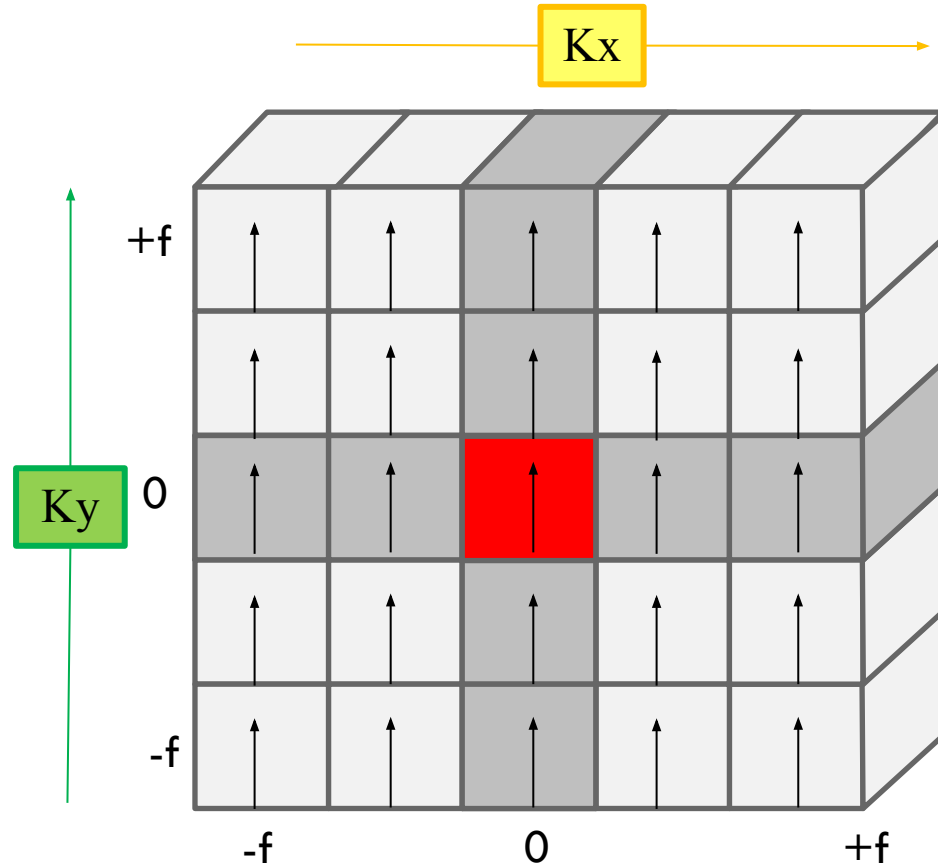




# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de fase (y)

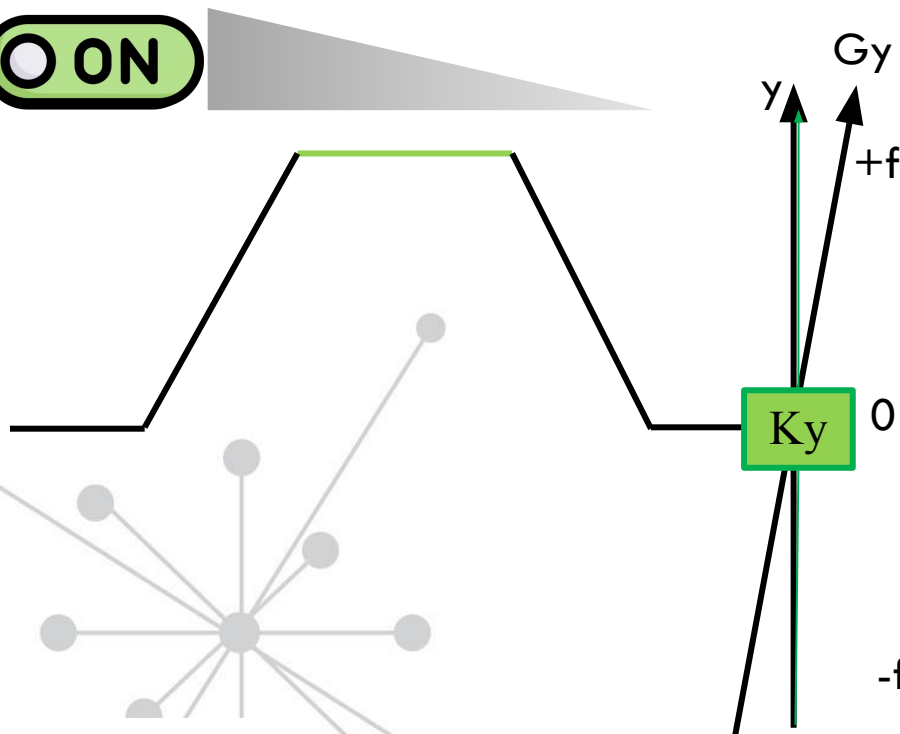
OFFO



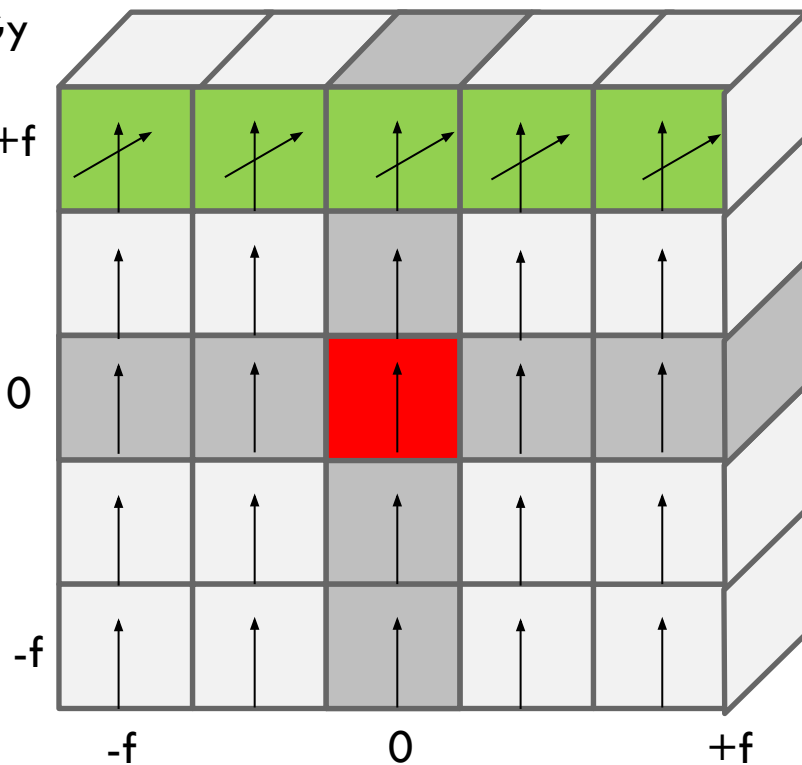
# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de fase (y)

ON



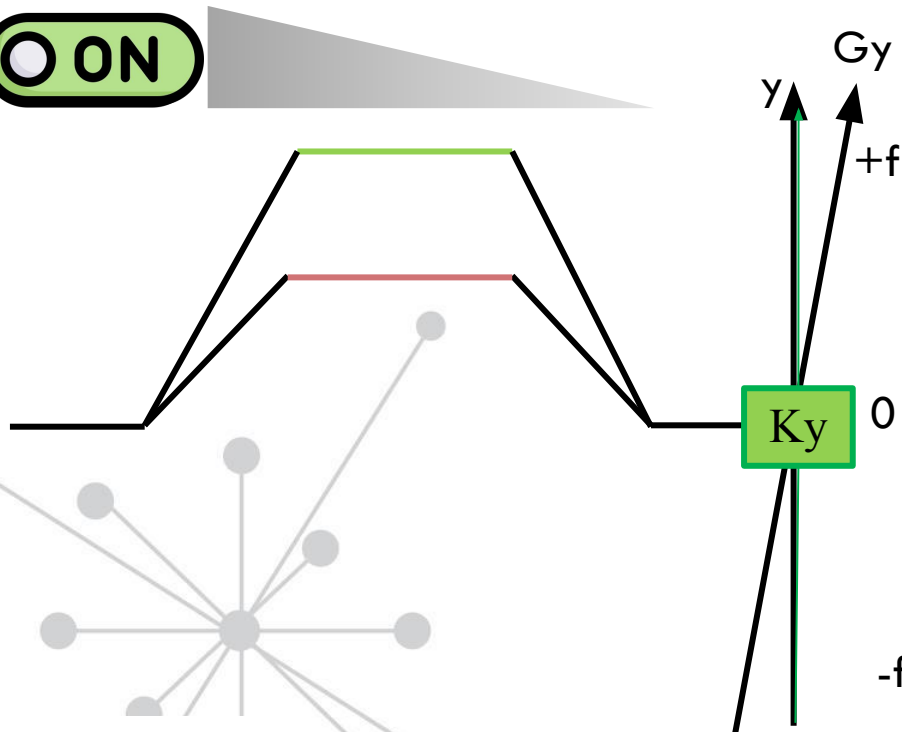
$K_x$



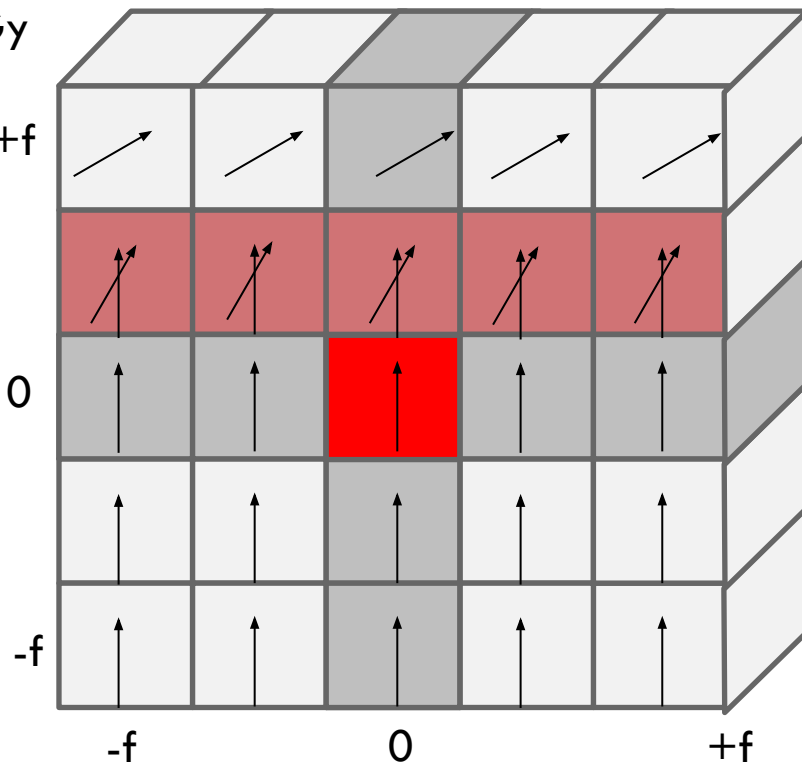
# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de fase (y)

ON



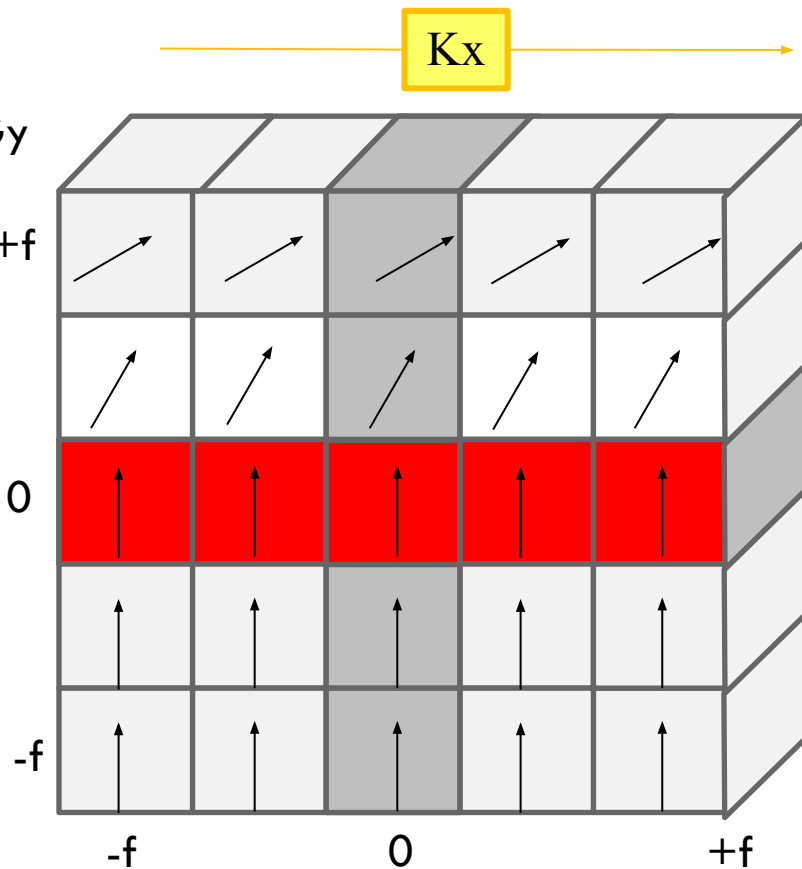
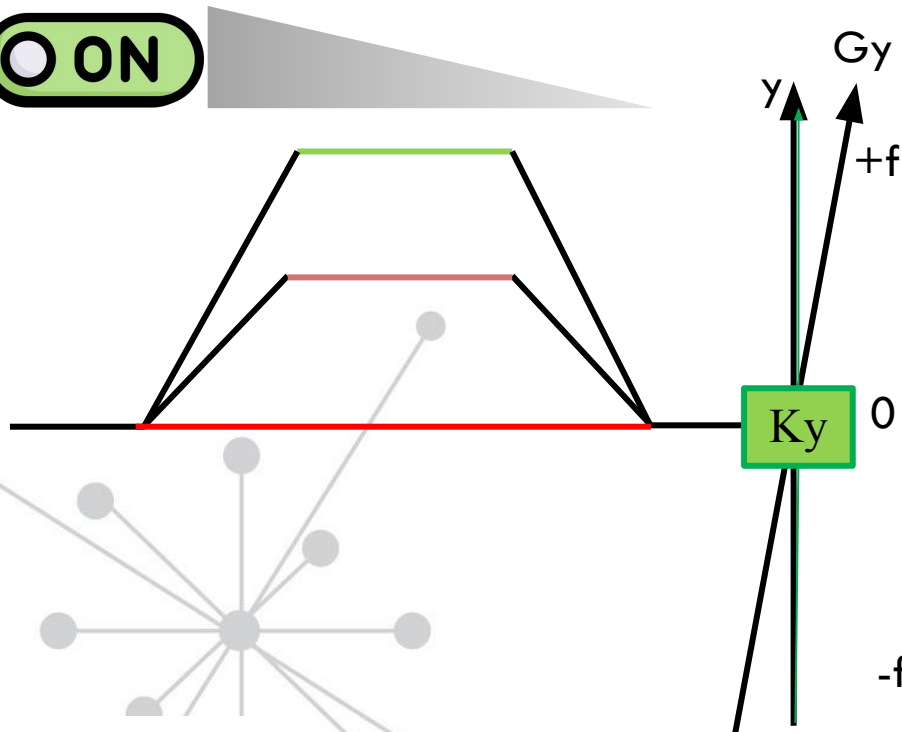
$K_x$



# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de fase (y)

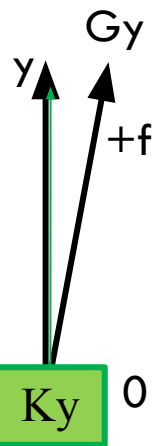
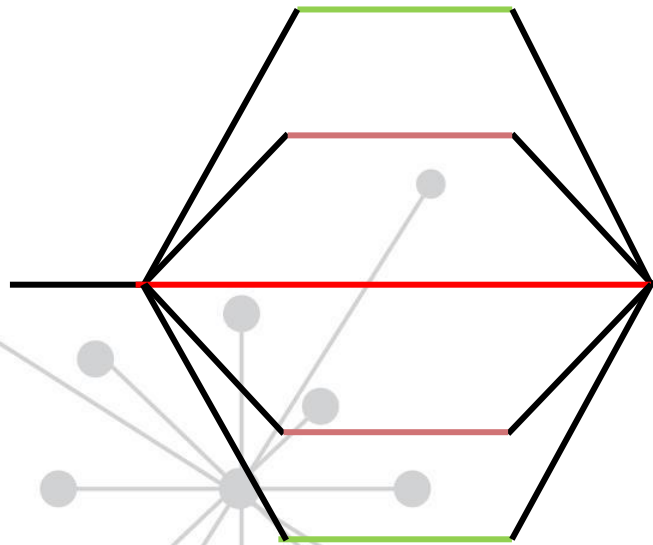
ON



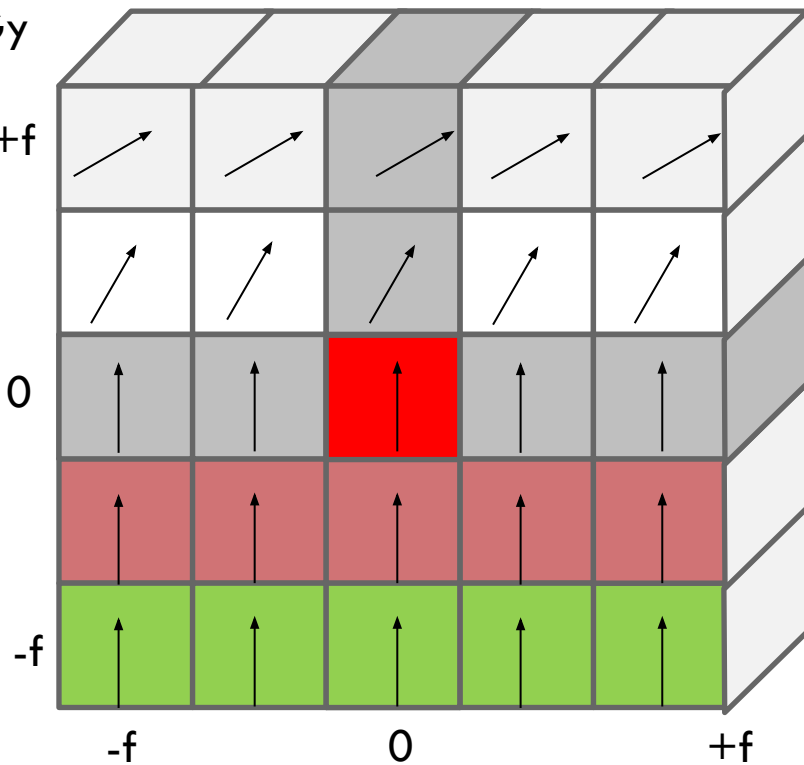
# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de fase (y)

ON



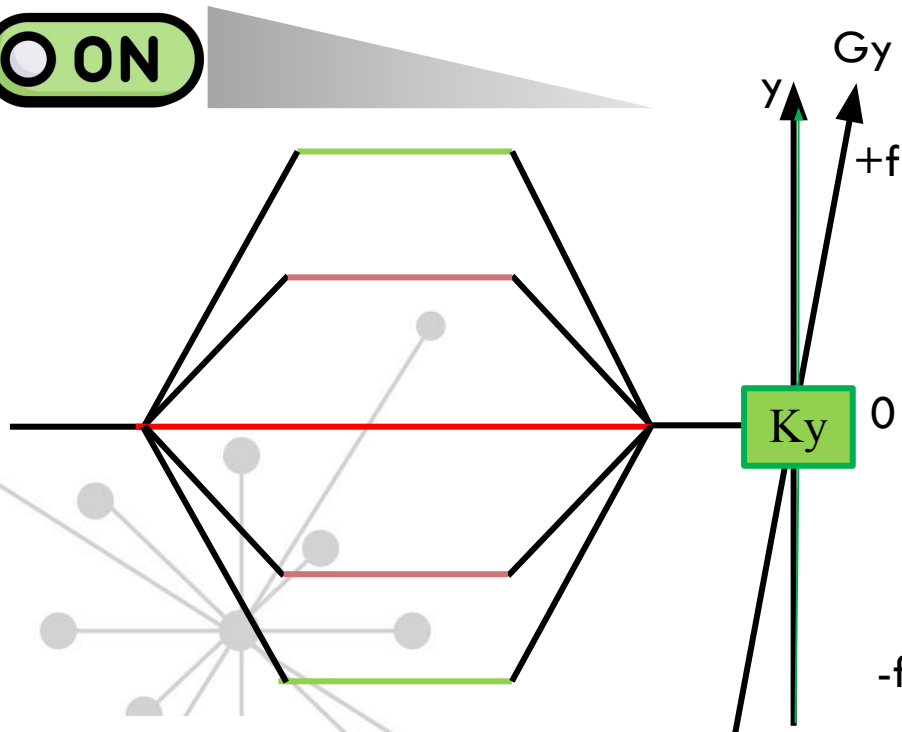
$Kx$



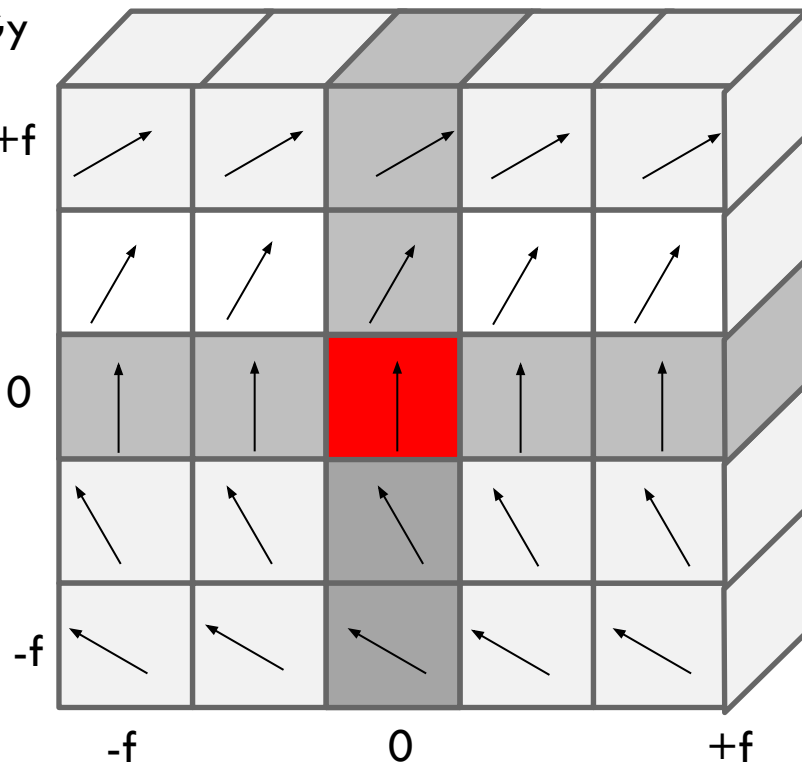
# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de fase (y)

ON



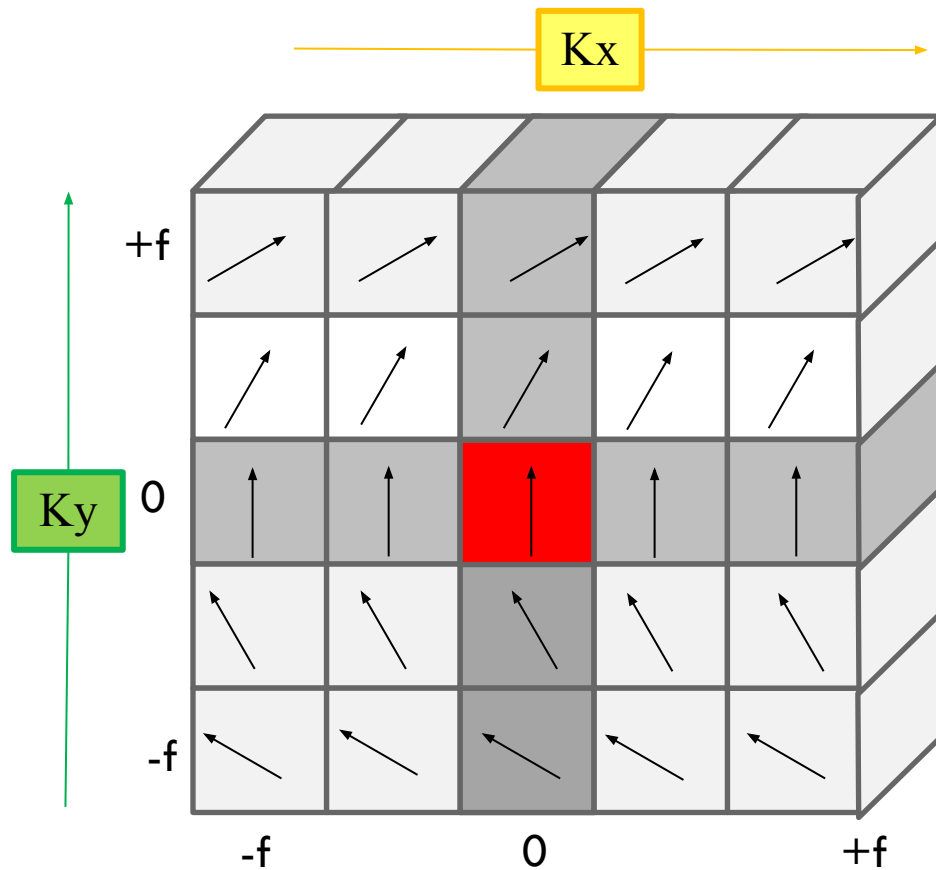
$K_x$



# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de fase (y)

OFFO



# FORMAÇÃO DA IMAGEM

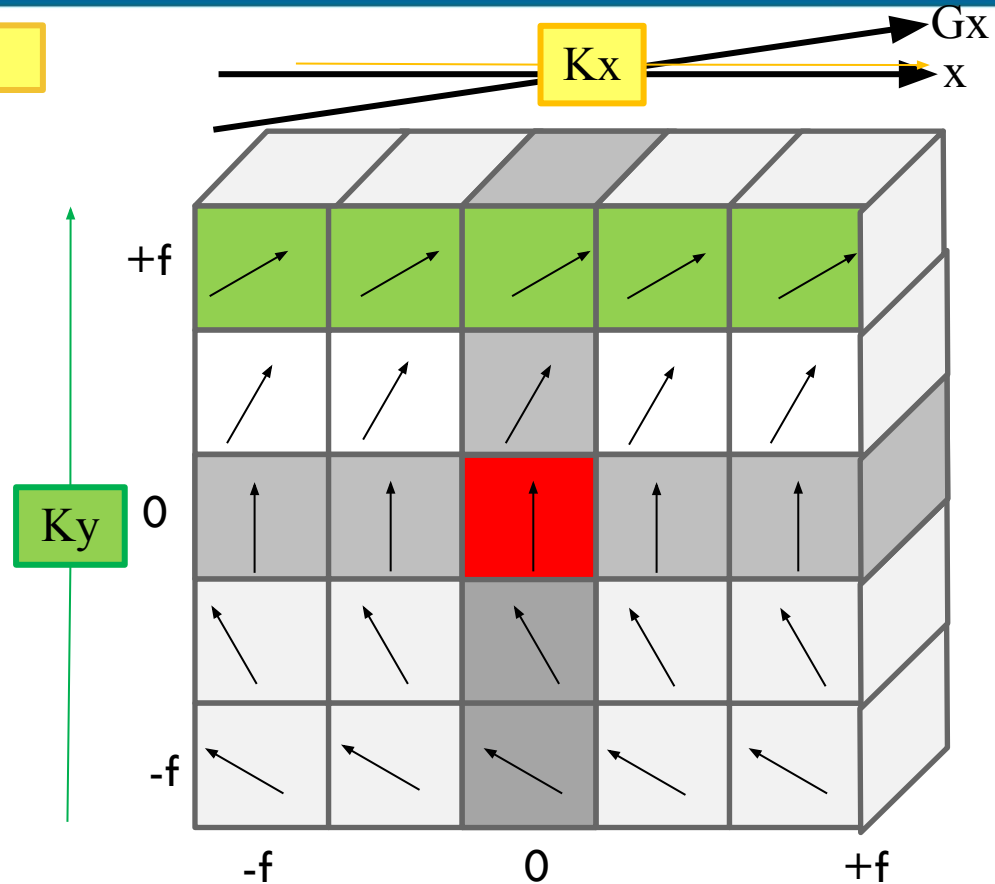
Gradiente de codificação de frequência (x)



Após desligar  $G_y$ : spins estão defasados em y e em fase em x

Liga-se  $G_x$ : spins no eixo x precessam em diferentes frequências

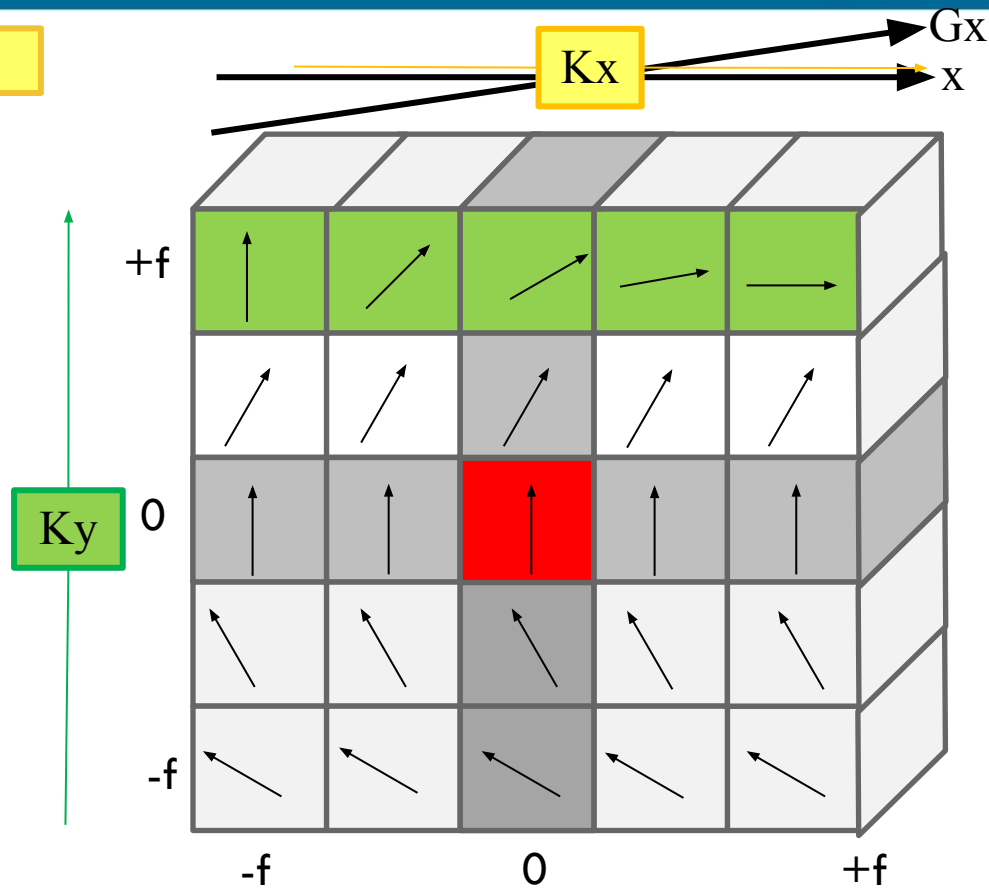
Sabe-se a frequência e a fase do spin, sabe-se a coordenada x, y





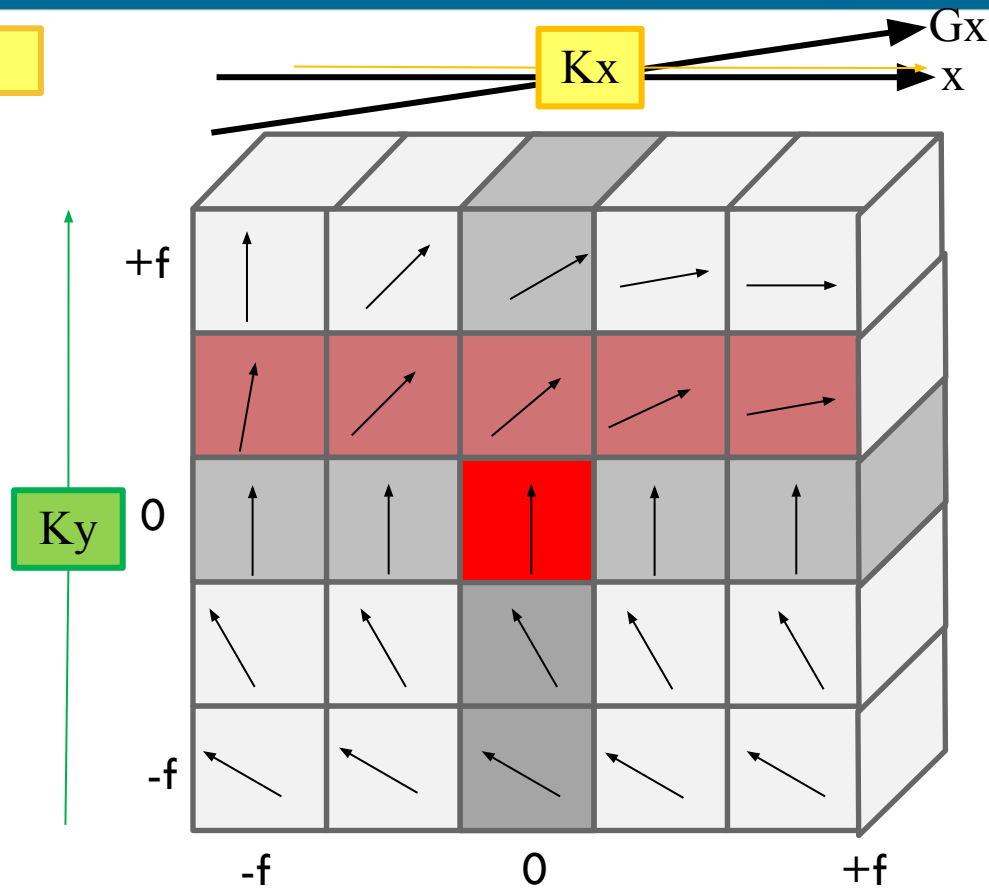
# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de frequência (x)



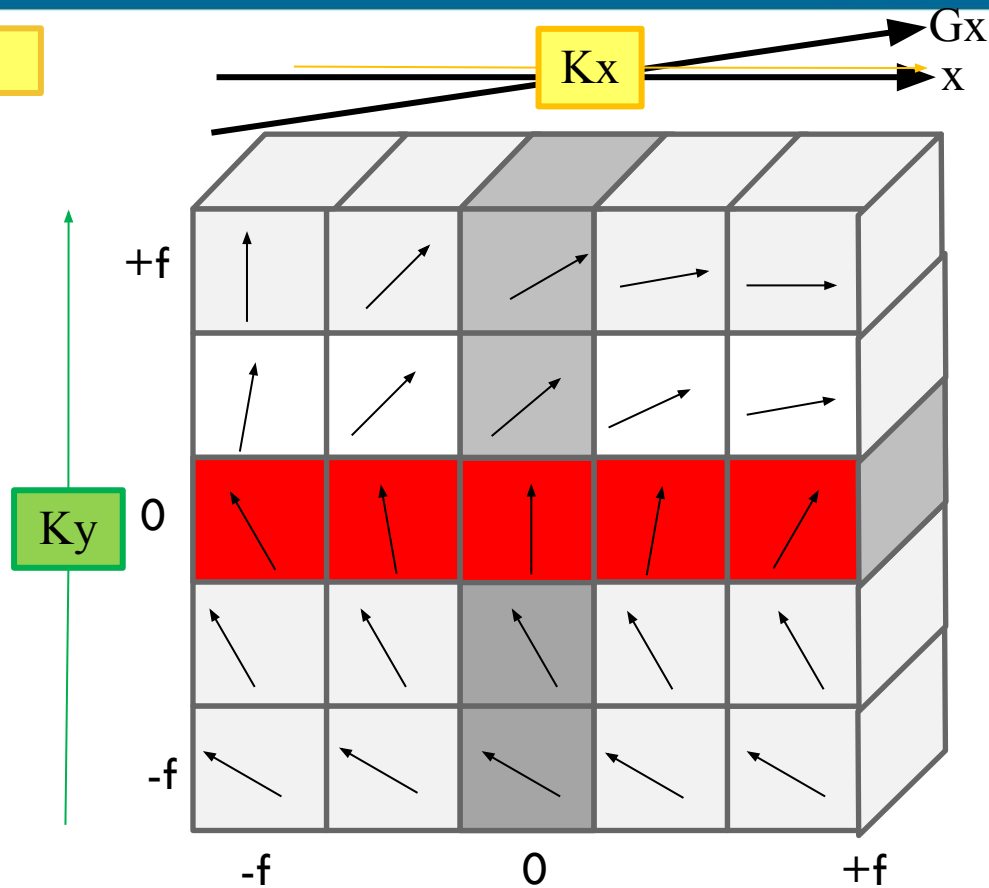
# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de frequência (x)



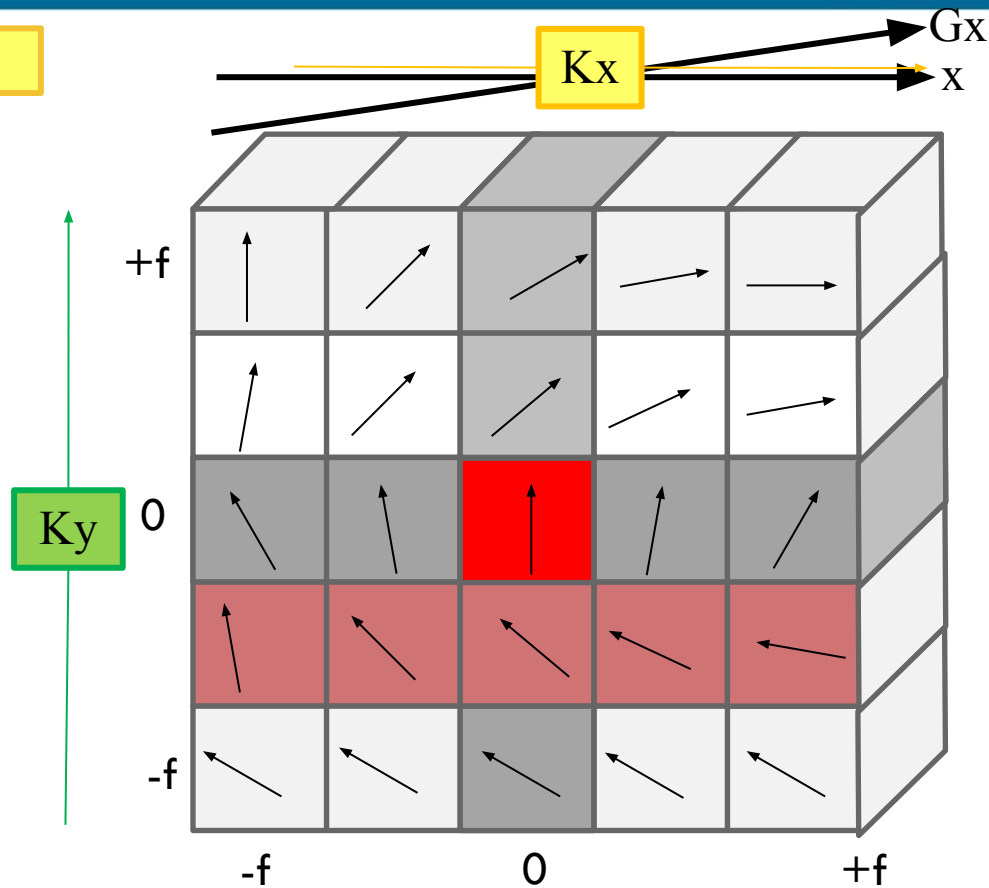
# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de frequência (x)



# FORMAÇÃO DA IMAGEM

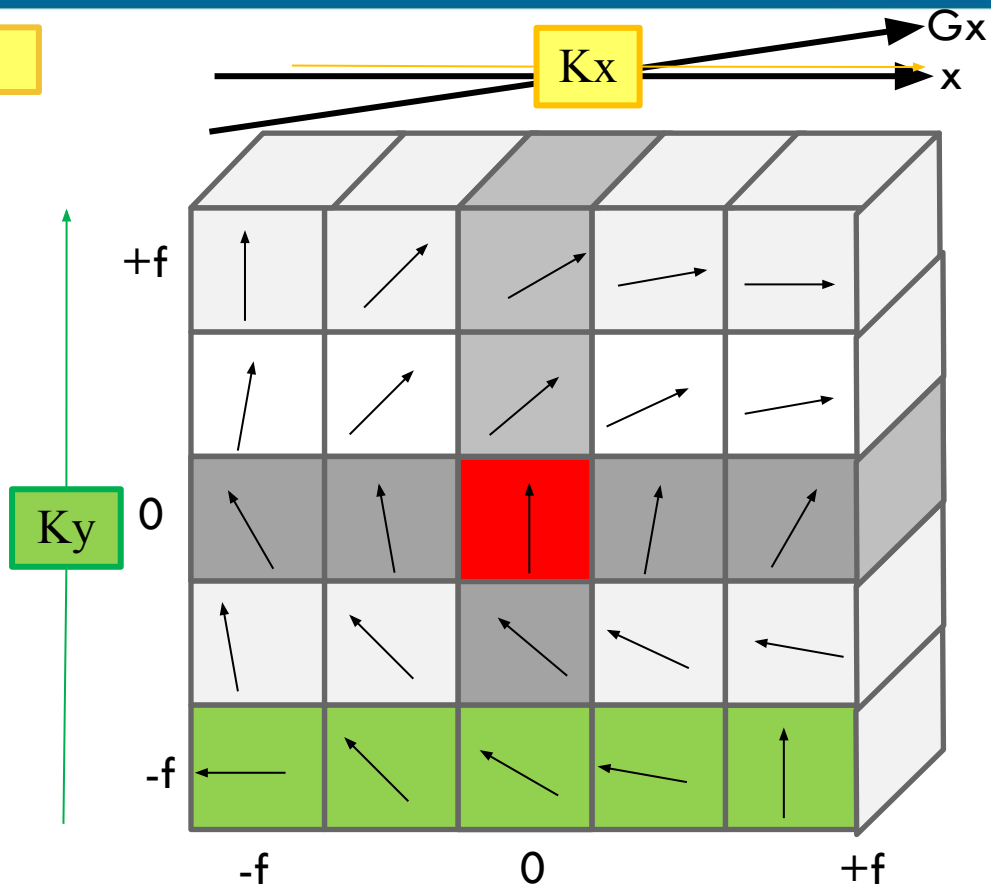
Gradiente de codificação de frequência (x)



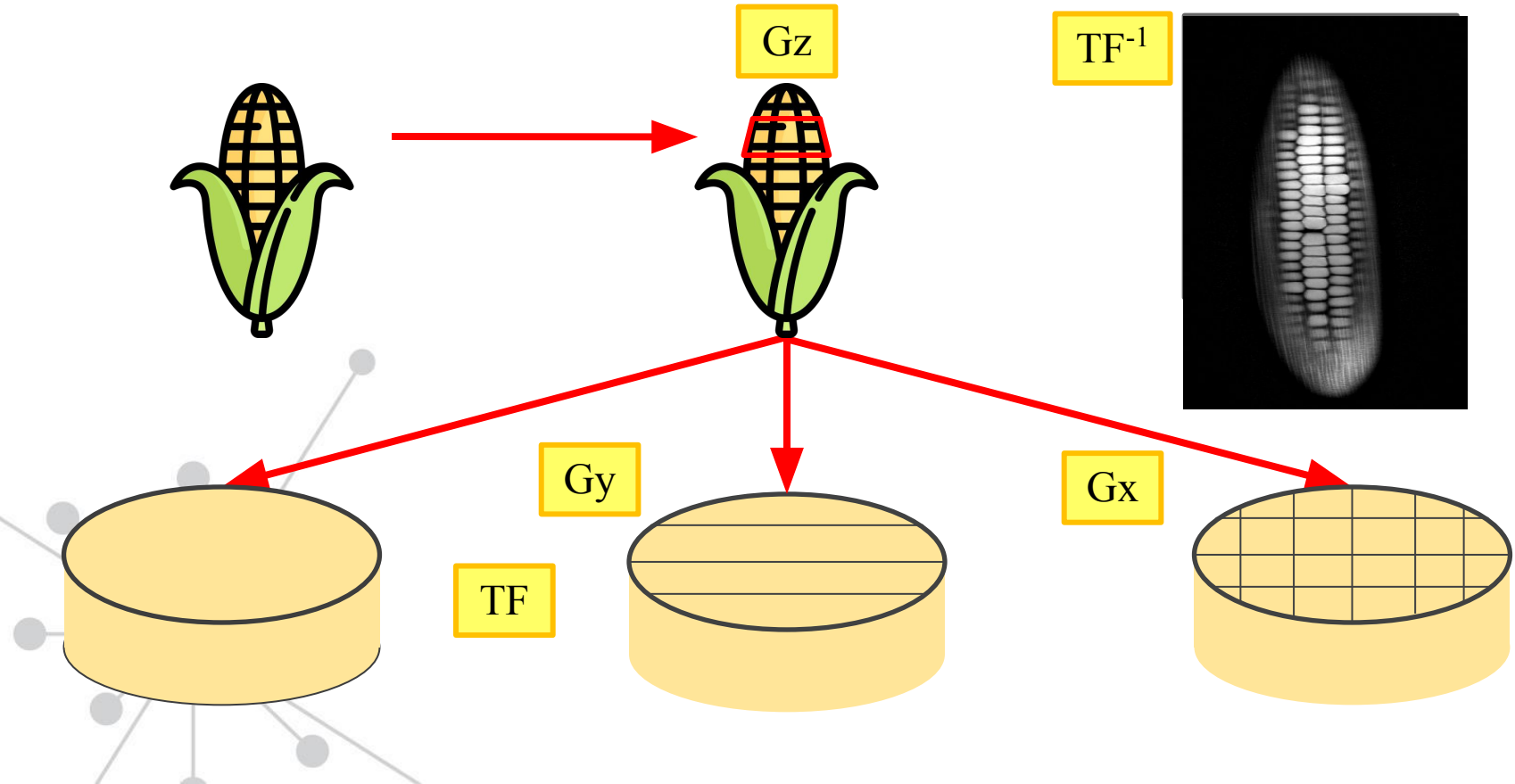
# FORMAÇÃO DA IMAGEM

Gradiente de codificação de frequência (x)

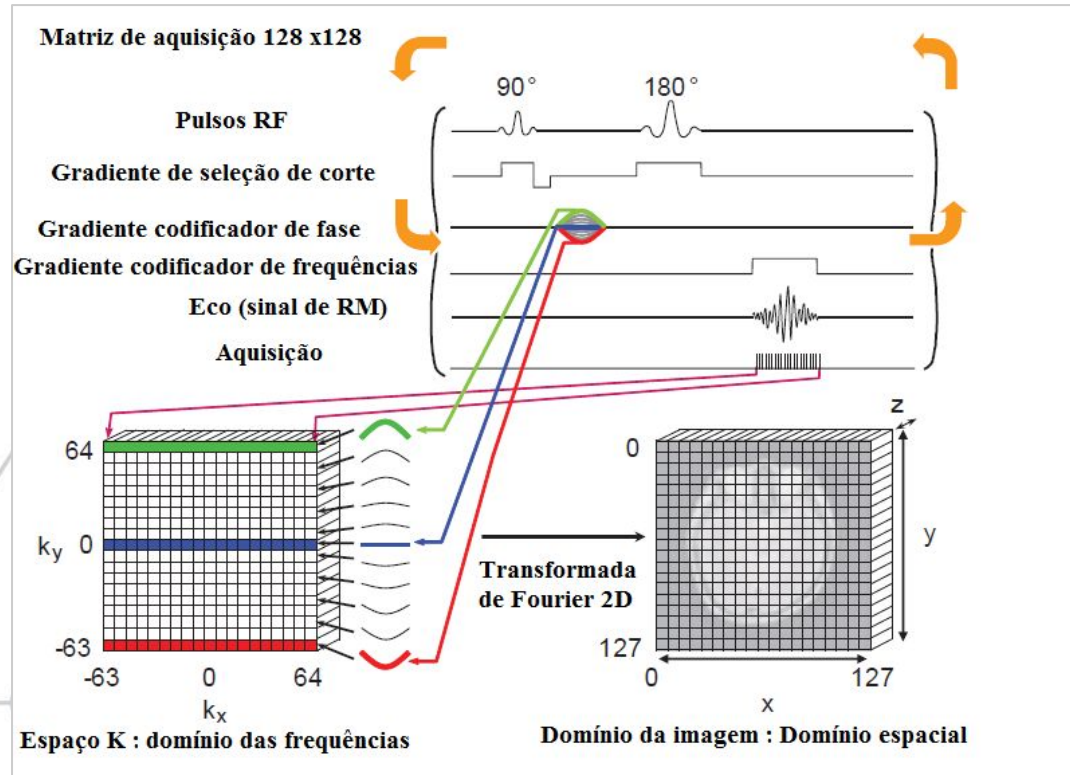
ON



# FORMAÇÃO DA IMAGEM

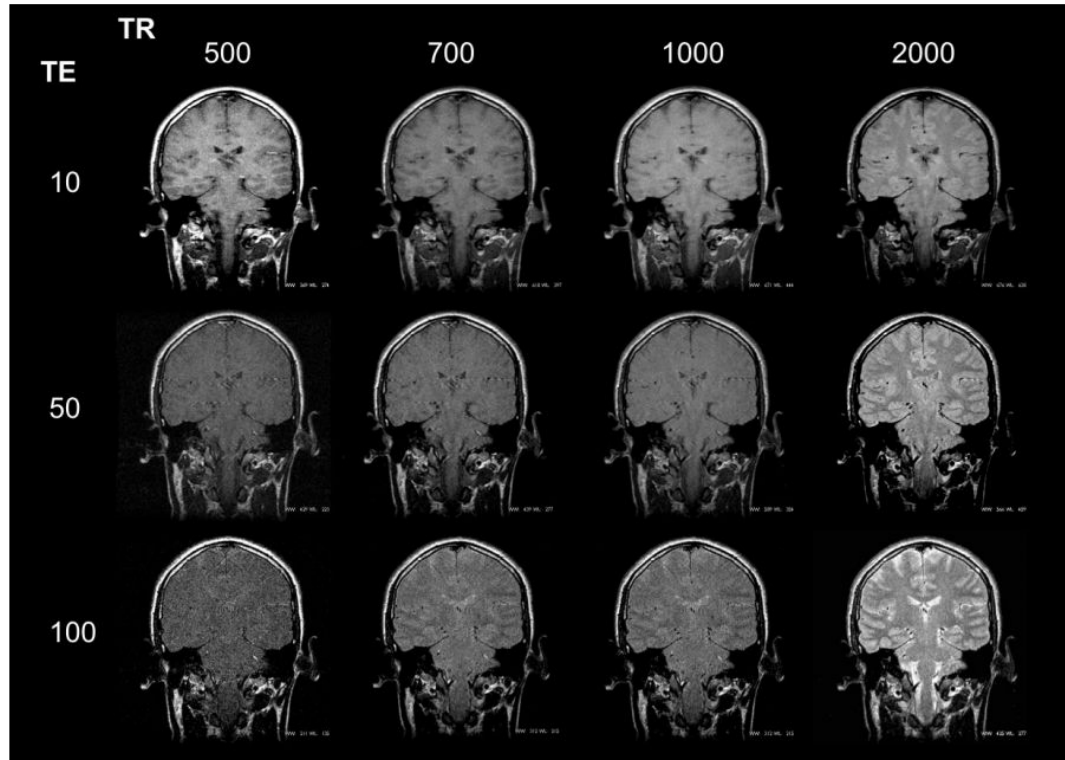


# FORMAÇÃO DA IMAGEM



Fonte: Adaptado de Bushong (2012).

# FORMAÇÃO DA IMAGEM

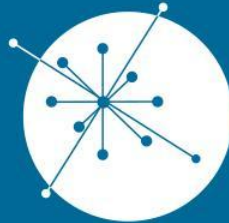


Fonte: Hipermídia (website).



# ULTRASSONOGRAFIA

*Fundamentos Físicos*

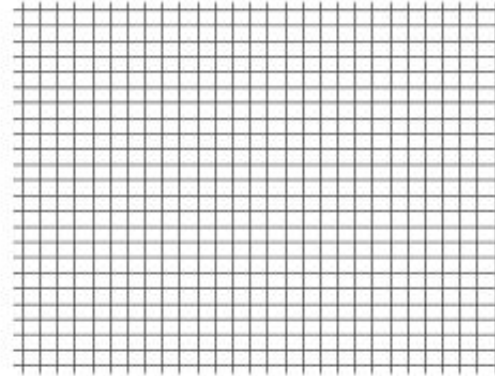


GRUPO DE  
**DOSIMETRIA  
DAS RADIAÇÕES**  
e FÍSICA MÉDICA

---

IFUSP - Instituto de Física da USP

1. Visão geral
2. Interação do US com a matéria
3. Formação e detecção do ultrassom
4. Ultrassom Doppler



**Fonte:**

<https://revistacrescer.globo.com/Curiosidades/noticia/2017/06/antes-e-depois-medico-compara-fotos-de-bebes-com-seus-ultrassons-e-faz-sucesso-na-internet.html>



**Ultrassom:** Onda sonora com frequência que excede o alcance da audição.

**Frequência:** > 20 kHz

**Aplicação médica:** 2 MHz - 10 MHz

**Aquisição de imagens**

Medidas anatômicas

Estudos de fluxo sanguíneo

Imagens 3D

Equipamento:



**Funcionamento:**

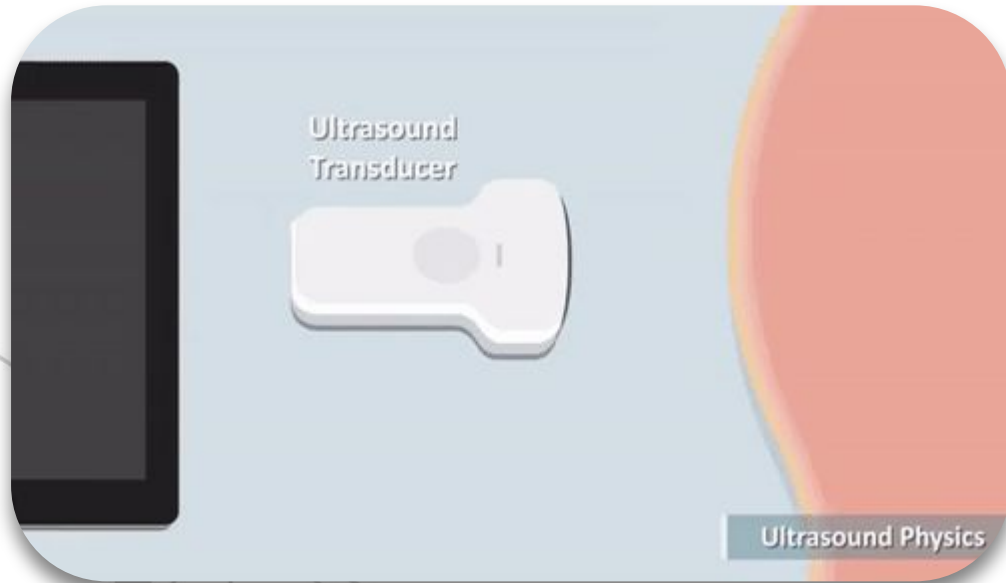
Transdutor

Pulso de US

Tecidos

Eco

Transdutor



**Profundidade**

Tempo entre pulso-eco

**Escala de cinza**

Amplitude do eco

# INTERAÇÃO DO US COM A MATÉRIA

## Tipos de interação

Reflexão

Refração

Espalhamento

Absorção

Propriedades acústicas  
do meio.

**Impedância acústica**

$$Z = \rho c$$

$\rho$ : densidade do meio

$c$ : velocidade do som no meio

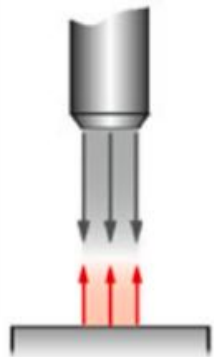
Tecido	Z (rayls)
Ar	$0,0004 \times 10^6$
Pulmão	$0,18 \times 10^6$
Gordura	$1,34 \times 10^6$
Água	$1,48 \times 10^6$
Rim	$1,63 \times 10^6$
Sangue	$1,65 \times 10^6$
Fígado	$1,65 \times 10^6$
Músculo	$1,71 \times 10^6$
Osso	$7,8 \times 10^6$

# INTERAÇÃO DO US COM A MATÉRIA

## Reflexão:

Feixe de US atinge a interface entre dois tecidos de impedâncias diferentes e, parte dele, volta a se propagar pelo meio inicial.

### Reflexão especular



Superfície lisa

Ângulos de incidência e  
reflexão são iguais.

Eco

Imagem

Interface tecido-ar reflete  
~100% do feixe incidente.

↑ diferença de impedância acústica entre os meios

↑ energia sonora é refletida

↑ eco mais intenso

Gel de acoplamento acústico



# INTERAÇÃO DO US COM A MATÉRIA

## Reflexão:

Feixe de US atinge a interface entre dois tecidos de impedâncias diferentes e, parte dele, volta a se propagar pelo meio inicial.

### Reflexão não-especular



Superfície áspera

Sem dependência direcional

Ecos "fracos"

Não contribuem para  
imagem

↑ diferença de impedância acústica entre os meios

↑ energia sonora é refletida

↑ eco mais intenso

Gel de acoplamento acústico





# INTERAÇÃO DO US COM A MATÉRIA

## Refração:

Mudança na direção e velocidade do feixe de US, quando passa de um tecido para o outro.

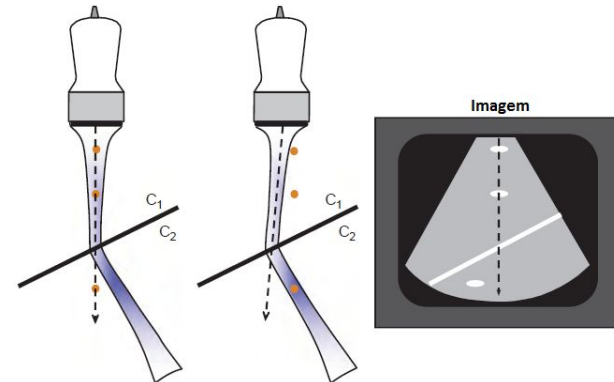
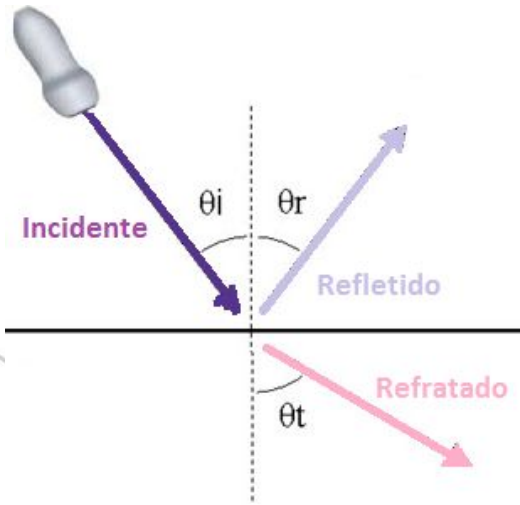
Frequência não muda, somente velocidade e comprimento de onda.

O equipamento assume uma linha reta de propagação.

### Artefatos

Distorção espacial

Regiões escuras



# INTERAÇÃO DO US COM A MATÉRIA

## Atenuação:

Perda de intensidade do feixe de US devido à absorção e ao espalhamento.

## Absorção:

Energia sonora é convertida em energia térmica pelo meio.

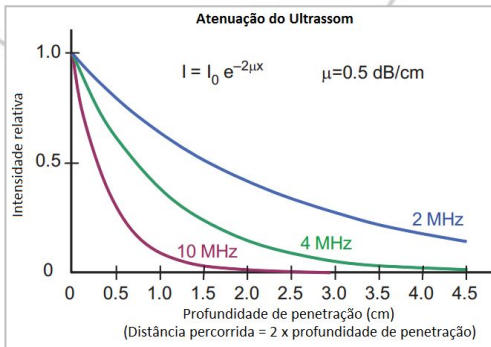


Perda irre recuperável do sinal sonoro.

## Coefficiente de atenuação:

Perda da intensidade relativa pela distância percorrida em um meio.

**Unidade:** dB/cm



Como a escala dB progride logaritmicamente, a intensidade do feixe é atenuada exponencialmente com a distância.

↑ frequência

↓ profundidade de penetração

Tecido mole

0,5 dB/cm/MHz

$$\mu = f \times 0,5$$

# FORMAÇÃO E DETECÇÃO DA ULTRASSOM

Material piezoelétrico

Cristal transdutor

Rede cristalina não possui  
centro de simetria

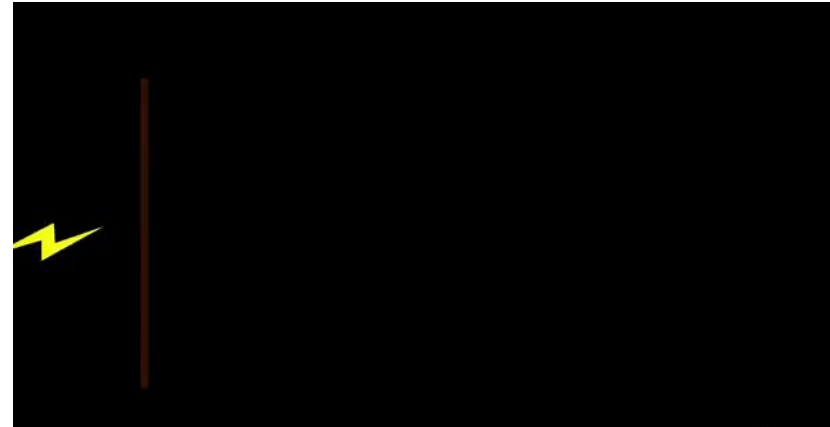
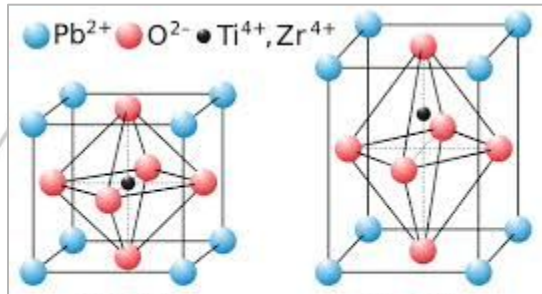
Materiais sólidos  
transformam um tipo de  
energia em outro tipo.

Energia  
mecânica



Energia  
elétrica

Quartzo  
Turmalina  
Sulfeto de Lítio  
Titanato-zirconato  
de chumbo (PZT)



# FORMAÇÃO E DETECÇÃO DA ULTRASSOM

Material piezoelétrico

Cristal transdutor

Rede cristalina não possui  
centro de simetria

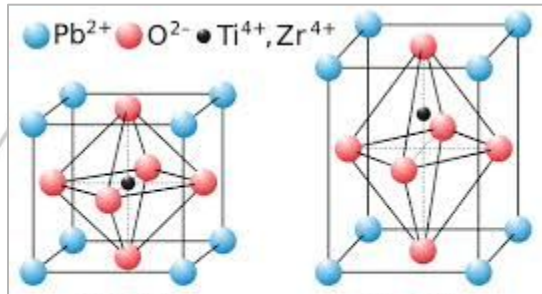
Materiais sólidos  
transformam um tipo de  
energia em outro tipo.

Energia  
mecânica

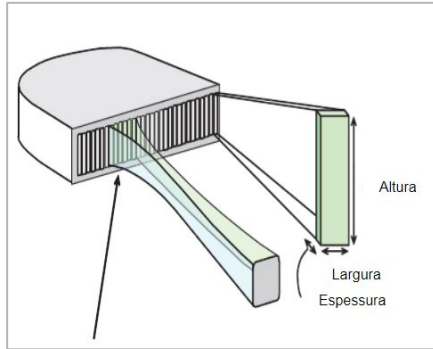


Energia  
elétrica

Quartzo  
Turmalina  
Sulfeto de Lítio  
Titanato-zirconato  
de chumbo (PZT)

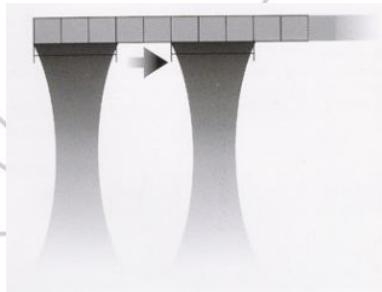


# FORMAÇÃO E DETECÇÃO DA ULTRASSOM

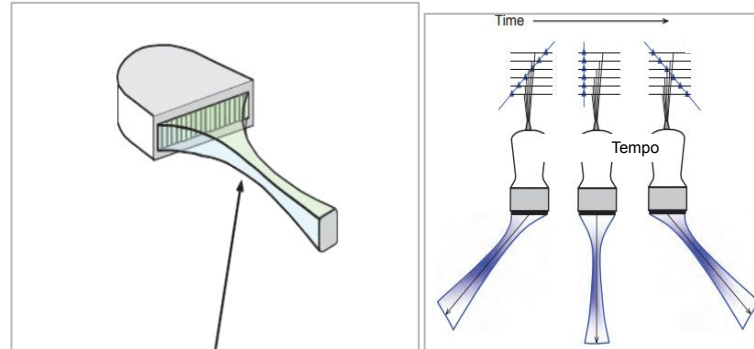


Linear

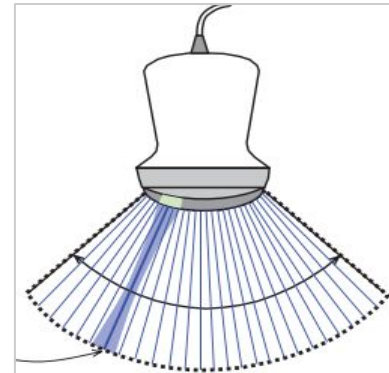
≈ 20 elementos simultâneos



Adaptado de BUSHBERG, 2012; Cerri et al,  
2008.



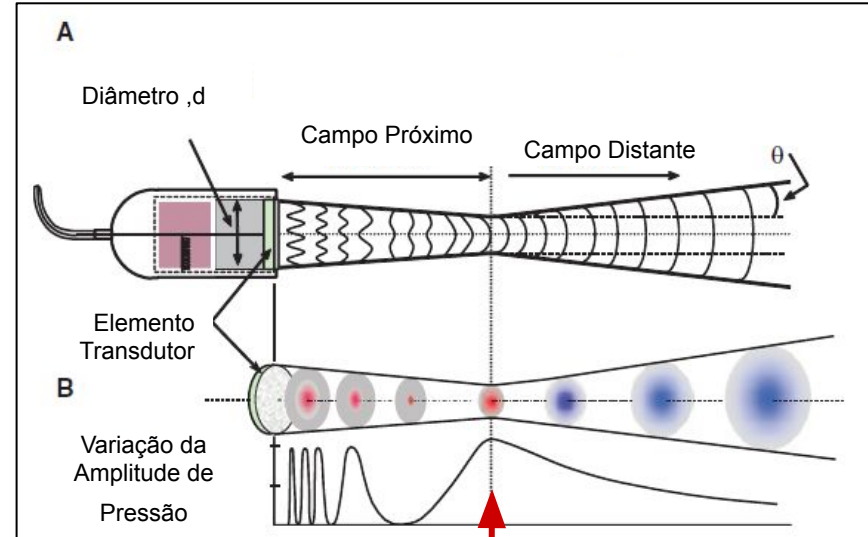
Arranjo de fase - pulsos sequenciais



Convexo

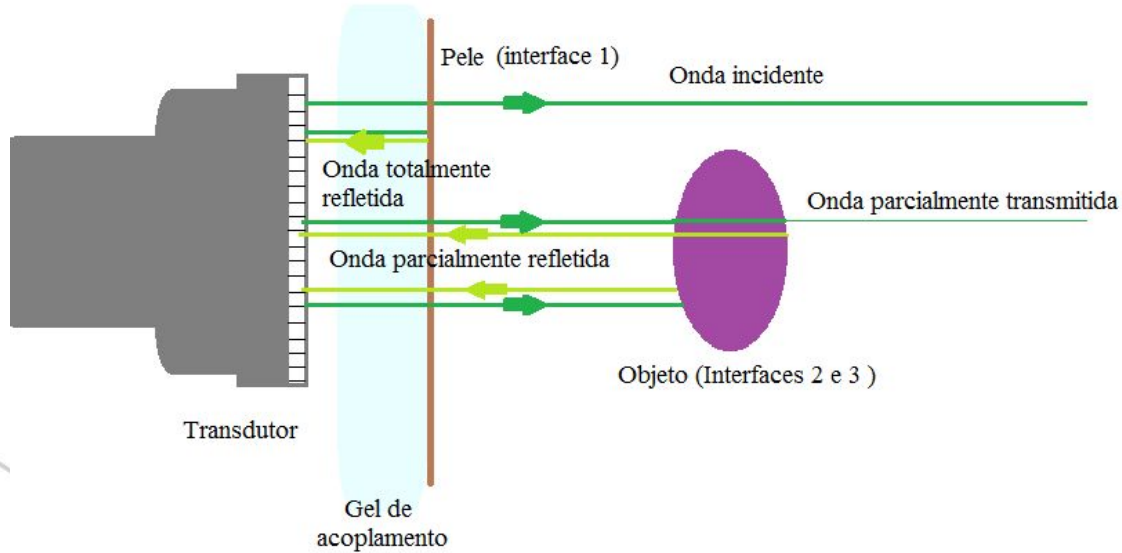
# FORMAÇÃO E DETECÇÃO DA ULTRASSOM

Foco	Zona de melhor resolução
Zona de Fresnel	Zona de Fraunhouffer
<ul style="list-style-type: none"><li>• Campo próximo</li><li>• Região coerente</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Campo distante</li><li>• Região sem coerência</li></ul>



Adaptado de BUSHBERG, 2012

# FORMAÇÃO E DETECÇÃO DA ULTRASSOM



Formação da imagem

Eco (reflexão)

Densidade (diferença de impedância)

Distância (tempo do eco)

# FORMAÇÃO E DETECÇÃO DA ULTRASSOM

Modos	Amplitude	modo A
	Brilho	modo B
	Movimento	modo M





# FORMAÇÃO E DETECÇÃO DA ULTRASSOM

Modos	Amplitude	modo A
	Brilho	modo B
	Movimento	modo M

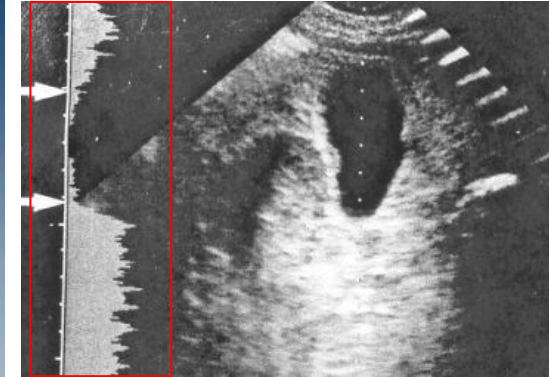
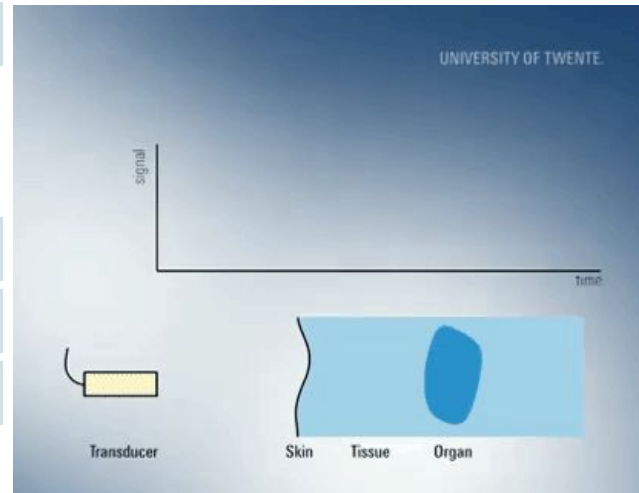
Função Temporal

$$t = \frac{2d}{c}$$

↑ Diferença de impedância - Interface

↑ Reflexão

↑ Amplitude



<https://www.youtube.com/watch?v=zJXW5DFvDV4&t=13s>

ZUCATTI, 2003.

# FORMAÇÃO E DETECÇÃO DA ULTRASSOM

Modos	Amplitude	modo A
	Brilho	modo B
	Movimento	modo M

Modo mais usado no diagnóstico

Converte pulsos em uma escala de cinza.



<https://www.youtube.com/watch?v=zJXW5DFvDV4&t=13s>

Imagem retirada da internet.

# FORMAÇÃO E DETECÇÃO DA ULTRASSOM

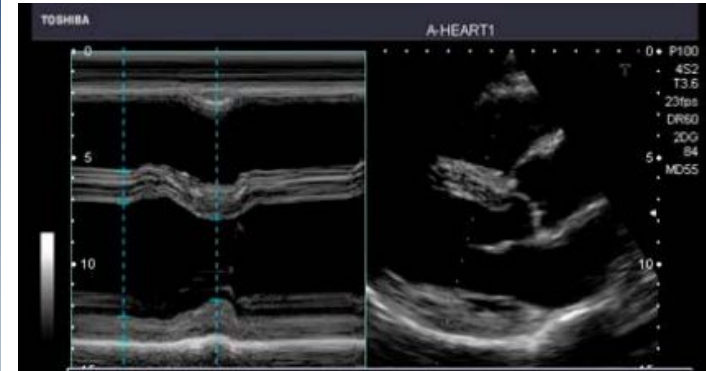
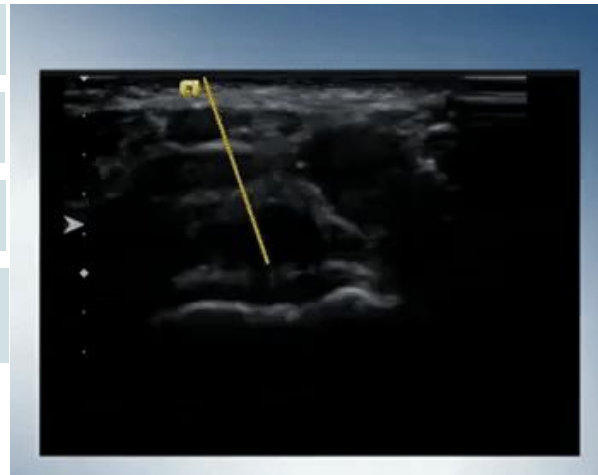
Modos	Amplitude	modo A
	Brilho	modo B
	Movimento	modo M

Mostra movimentos de órgãos.

Miocárdio

Abertura de válvulas.

Excelente resolução temporal.



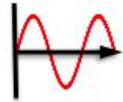
<https://www.youtube.com/watch?v=zJXW5DFvDV4&t=13s>



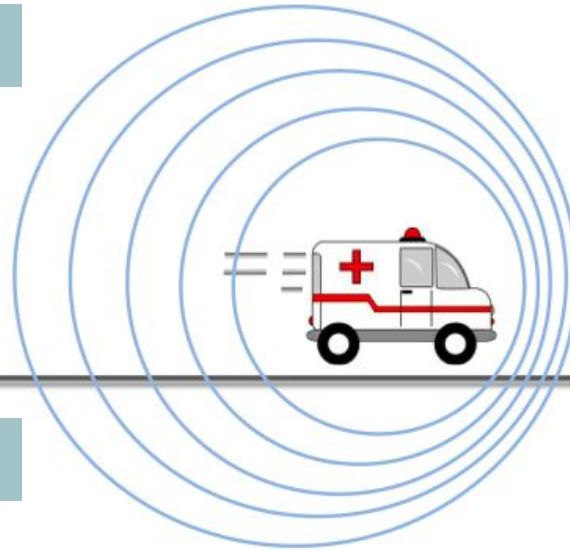
## Efeito Doppler

É caracterizado pela mudança na frequência de onda emitida por uma fonte que se movimenta em relação a um observador.

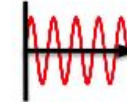
Baixa frequência



$\lambda$  é estendido



Alta frequência



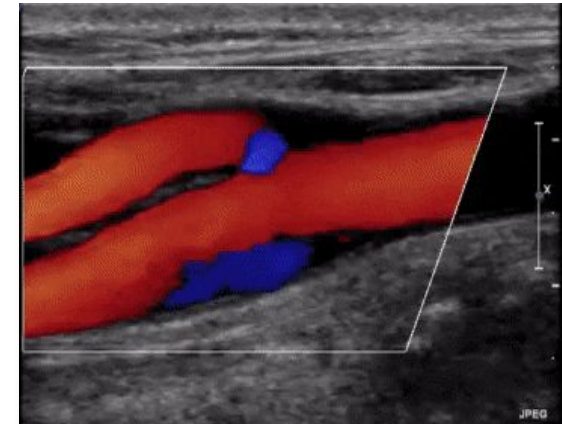
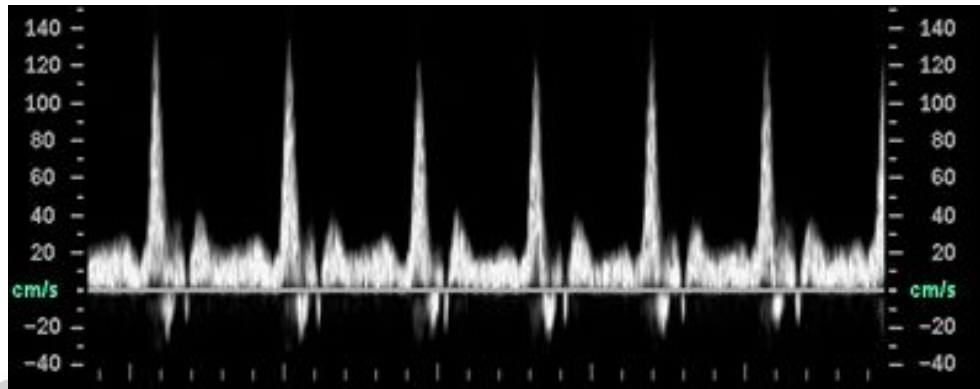
$\lambda$  é comprimido

A mudança de frequência é proporcional à velocidade de deslocamento.



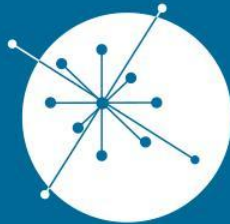
## Efeito Doppler

É caracterizado pela mudança na frequência de onda emitida por uma fonte que se movimenta em relação a um observador.



<https://www.youtube.com/watch?v=zJXW5DFvDV4&t=13s>

# OBRIGADA!



GRUPO DE  
**DOSIMETRIA  
DAS RADIAÇÕES**  
e FÍSICA MÉDICA

---

IFUSP - Instituto de Física da USP

