

PTC2892
Princípios da Formação e
Processamento de Imagens Médicas

Raio-X e Tomografia

Sérgio S Furuie

S.Furuie 1/9/2010 - 1

Plano da aula de hoje

- Formação de raio-X
- Tomografia por raio-X: CT
- As aulas estão no site:
✓ <http://moodle.stoa.usp.br>

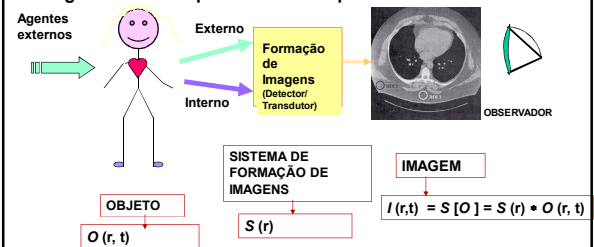
S.Furuie 1/9/2010 - 2

COMO SE FORMAM AS
IMAGENS DE RAIO-X? E
TOMOGRAFIA?

S.Furuie 1/9/2010 - 3

Formação de imagens médicas

IMAGENS MÉDICAS são, essencialmente, **DISTRIBUIÇÕES ESPACIAIS e/ou TEMPORAIS** de resultados ou efeitos das interações de agentes físicos, físico-químicos, bioquímicos ou biológicos com componentes do corpo humano.



S.Furuie 1/9/2010 - 4

“Os objetos que vemos não são, por eles próprios, o que vemos... Exceto pela sensibilidade dos nossos sentidos, o que os objetos podem ser, por si só, permanece completamente desconhecido para nós. Não sabemos de nada a não ser a nossa maneira de percebê-los...”

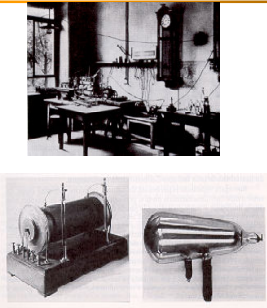
Immanuel Kant

S.Furuie 1/9/2010 - 5

RAIO-X: PRINCÍPIOS FÍSICOS

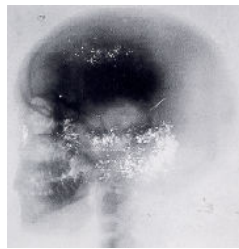
S.Furuie 1/9/2010 - 6

Wilhelm C. Röntgen, 1895

8 de novembro de 1895 : Descoberta dos raios X por Wilhelm C. Röntgen, no Instituto de Física da Universidade de Würzburg, ao realizar experiências com tubo de Hittorff-Crookes ligado a uma bobina de indução de Ruhmkorff.

S.Furule 1/9/2010 - 7

Dezembro de 1895 :
1a. Radiografia = mão da Sra. Bertha Röntgen

1896 :
Radiografia da cabeça, no início das aplicações de raios X em Medicina, com o uso dos primeiros equipamentos construídos por RG&S, em Erlangen, Alemanha, que deu origem à Siemens.

S.Furule 1/9/2010 - 8

PRODUÇÃO DE RAIOS X

ELÉTRONS
acelerados incidem
sobre um alvo

↓

**Interações
Coulombianas**

Colisões = CALOR
(> 95%)

→ Espalhamento Inelástico pelo núcleo do átomo do alvo

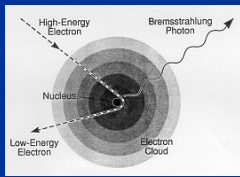
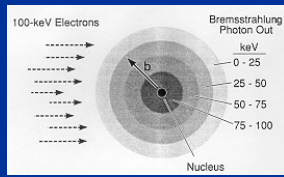
→ Perda de energia na forma de radiação eletromagnética

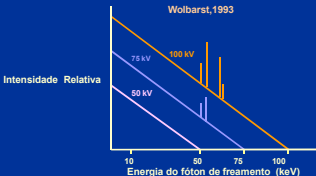
→ Radiação de Freamento = *bremstrahlung* = raios X com espectro contínuo

→ Interação com e⁻ das camadas internas → colisões duras

⇒ emissão de raios X característicos com energias bem definidas = raios

S.Furule 1/9/2010 - 12

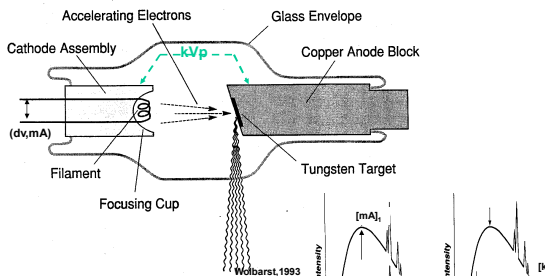


ΔV aplicada depende do tipo de estudo:

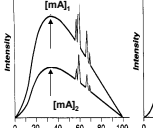
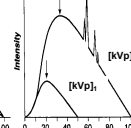
- * radiografia convencional (60 kVp a 140 kVp)
- * mamografia (~ 30 kVp)
- * tomografia (~ 140 kVp)

S.Furule 1/9/2010 - 13

Tubo de raios X com ANODO FIXO



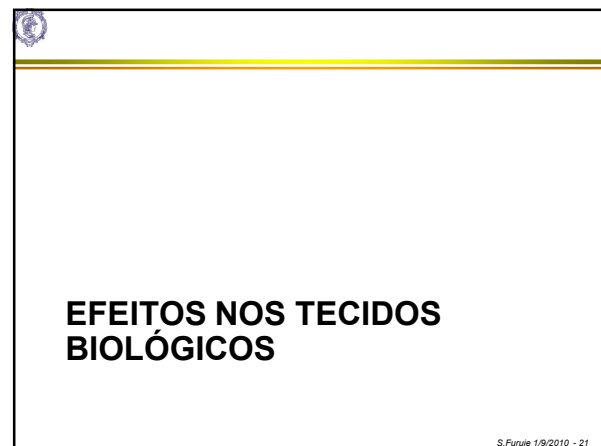
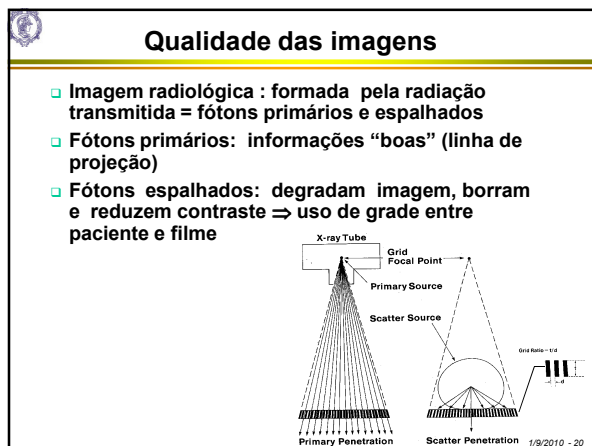
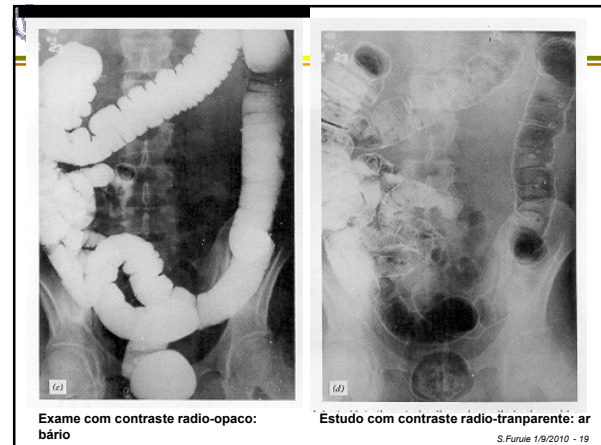
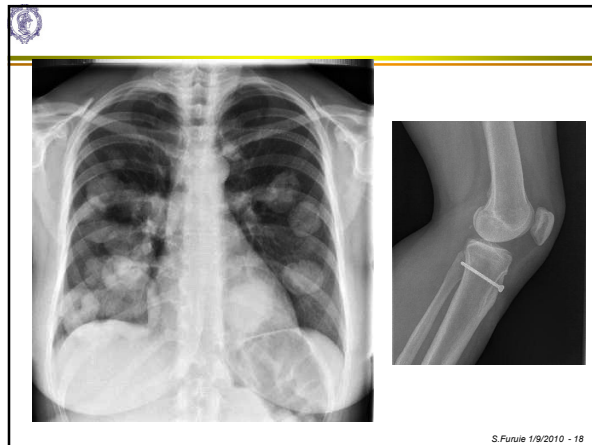
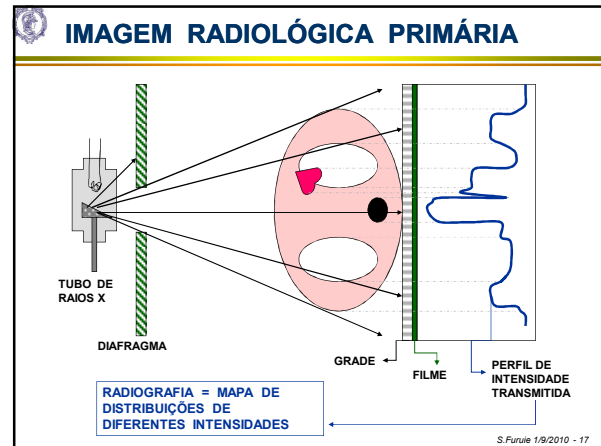
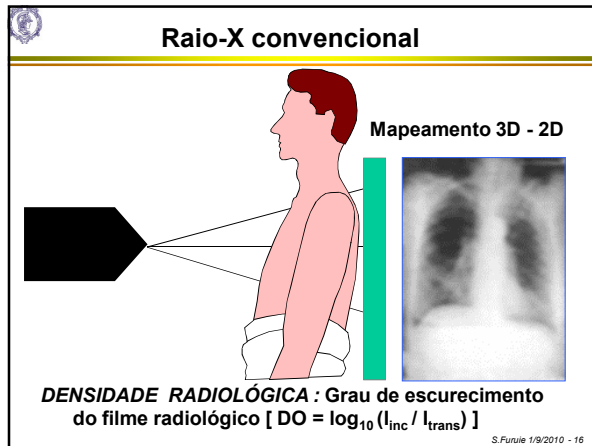
Espectro emitido = f[kVp, mA, alvo]

S.Furule 1/9/2010 - 15

RAIO-X: FORMAÇÃO DAS IMAGENS

S.Furule 1/9/2010 - 15





Efeitos das radiações eletromag.

- Formas de energia EM:
 - ✓ corpuscular ($p, e^-, n, \alpha, \beta, \pi, \dots$)
energia = energia cinética
 - ✓ ondulatória (luz, uv, calor, raios X, radiação γ , ...)
energia e.m. = $h f = hc/\lambda$
 - ✓ Radiação = energia em propagação
- Radiações Ionizantes (raio-X) :
 - ✓ partículas carregadas eletricamente,
 - ✓ nêutrons, radiações eletromagnéticas
- Radiações Não-ionizantes :
 - ✓ Luz, iv, uv, microondas, etc.

S. Furule 1/9/2010 - 22



Dose radioativa (cont.)

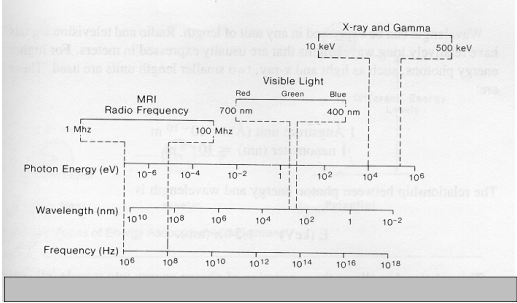
- unidade SI de dose absorvida
 - gray (Gy) = quantidade de radiação necessária de raio X para depositar um Joule (J) de energia em um kg de matéria (J/kg)
 - Sievert (Sv): efeito biológico devido à radiação e equivalente à dosagem de raio X. No caso da radiação raio X: 1 Sv=1Gy.
 - Limite máximo anual é de 100 mSv p/ 5 anos (20 mSv por ano)

Raio X do tórax	0,02 mSv
Mamografia	0,4 mSv
CT do tórax	7 mSv
Radiação natural ambiente	3 mSv/ano
Cateterismo	15 mSv
Cintilografia do miocárdio	15 mSv
Instantâneo e letal	4 Sv

S. Furule 1/9/2010 - 23



ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO



S. Furule 1/9/2010 - 24



MODALIDADE	FORMAS DE ENERGIA	PARÂMETROS FÍSICOS	INFORMAÇÕES
Consulta: Visual, auditivo, tato, movimento, ...	Luz Som Mecânica, ...		História da saúde Sintomas
Radiologia: Convencional Digital Tomográfica	Ondas e.m.	I_0, I, μ, ρ	Anatomia Dinâmica Dimensões Volumes
Ultra-sonografia: Modo - A Modo - B Modo - TM Doppler 3 - D	Ondas mecânicas	I, z v_a, v, f_s	Anatomia Dimensões Massa Movimento Função Velocidade Fluxo, ...
Medicina Nuclear: Convencional SPECT PET	Ondas e.m.	I, μ	Função Metabolismo Dimensões Volumes Anatomia
Ressonância Magnética Nuclear: Tomográficas Funcionais	Ondas e.m.	Campos magnéticos Momentos magnéticos, T_1, T_2, ρ	Anatomia Alterações na estrutura dos tecidos Dinâmica Função
Microscopia: Óptica Eletrônica Luz síncrotron	Luz visível Elétrons Luz síncrotron	I Coef. transmissão elet. Coef. reflexão elet.	Histológicas Estruturas celulares Superfície

S. Furule 1/9/2010 - 25



Síntese: raio-X

- Imagem radiológica = mapa de intensidade da radiação transmitida
- Visibilidade de um objeto determinada pelo **CONTRASTE**, que depende de:
 - ✓ Objeto $\Rightarrow \rho, Z, \mu, x$
 - ✓ Energia do fóton $\Rightarrow$ kV, anodo, filtro
 - ✓ Receptor $\Rightarrow$ tipo, função resposta, exposição
 - ✓ Penetração e Espalhamento dos fótons $\Rightarrow$ objeto, energia dos fótons, grade
- ionizante

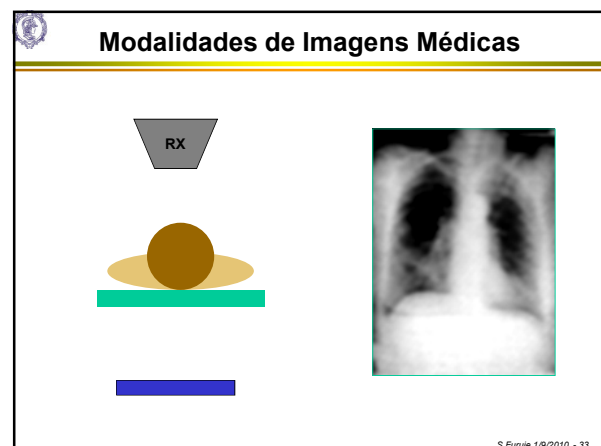
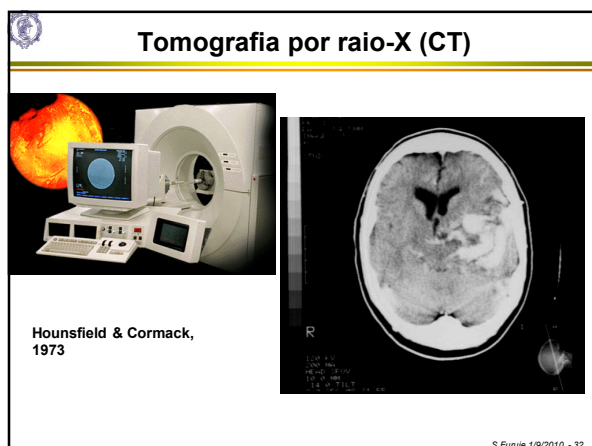
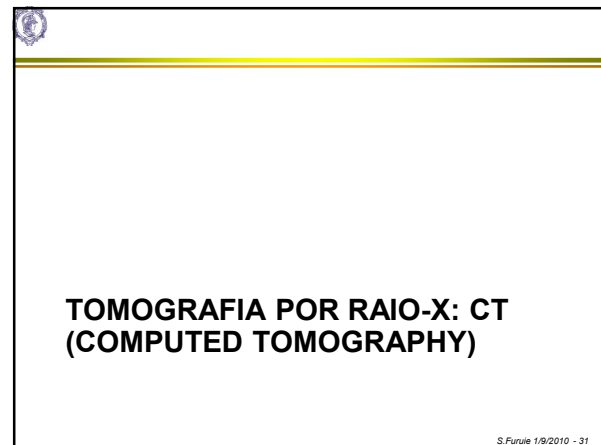
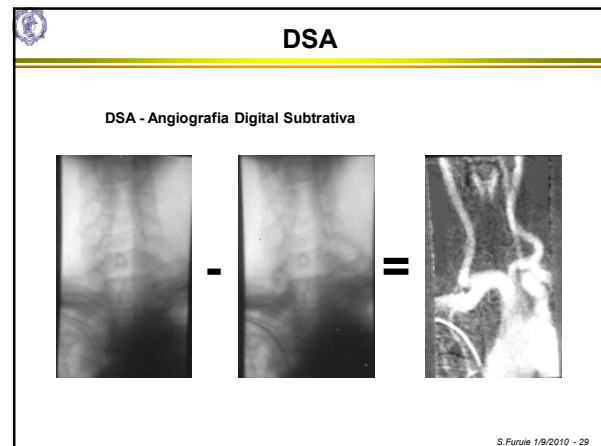
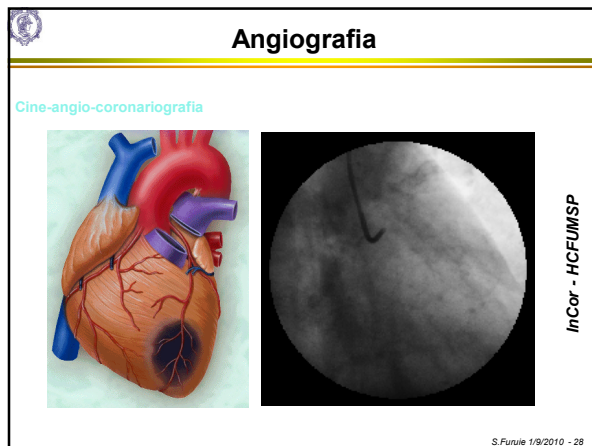


S. Furule 1/9/2010 - 26



RAIO-X: APLICAÇÕES CLÍNICAS

S. Furule 1/9/2010 - 27



Modalidades de Imagens Médicas

S. Furule 1/9/2010 - 34

S. Furule 1/9/2010 - 35

Solução?

S. Furule 1/9/2010 - 36

Reconstrução ingênua (backprojection)

S. Furule 1/9/2010 - 37

Algébrica

4 9

f_1	f_2
f_3	f_4

Imagem f

7
6

Problema: $f \mid$

$$\begin{aligned} f_1 + f_2 &= 7 \\ f_3 + f_4 &= 6 \\ f_1 + f_3 &= 4 \\ f_2 + f_4 &= 9 \end{aligned}$$

S. Furule 1/9/2010 - 38

Soluções

4 9

f_1	f_2
f_3	f_4

Imagem f

7
6

3	4
1	5

2	5
2	4

A . x = b

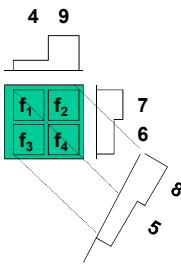
M equações com N incógnitas

Sistema indeterminado (infinitas soluções, rank < N)

Sistema inconsistente (M eq. Lin. Indep > N) => otimização

S. Furule 1/9/2010 - 39

Algébrica: otimização (regularizada)



Problema: f

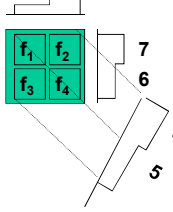
$$\begin{aligned} f_1 + f_2 &= 7 \\ f_3 + f_4 &= 6 \\ f_1 + f_3 &= 4 \\ f_2 + f_4 &= 9 \\ .5f_1 + f_3 + .5f_4 &= 5 \\ .5f_1 + f_2 + .5f_4 &= 8 \end{aligned}$$

Imagem f

S. Furui 1/9/2010 - 40

Soluções (otimizada)

$A \cdot x = b$
 6 equações com 4 incógnitas
 Sistema inconsistente ($M \text{ eq. Lin. Indep} > N$) => otimização



$$\min_x \|A \cdot \hat{x} - b\|^2$$

$$\hat{x} = A^+ b$$

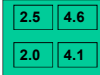
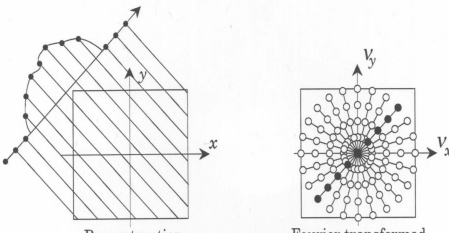
$$A^+ = (A' A)^{-1} A'$$


Imagem f

S. Furui 1/9/2010 - 41

Alguma outra solução ?



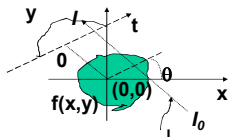
Reconstruction matrix

Fourier transformed matrix

Teorema do corte central

S. Furui 1/9/2010 - 42

Tomografia por Transmissão (CT)



$$g(t, \theta) = R f = \int_L f(x, y) \cdot ds$$

$$= \iint f(x, y) \cdot \delta(x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta - t) \cdot dx \cdot dy$$

Transformada de Radon 2D
 (projection operator)

$f(x, y) \longleftrightarrow g(t, \theta)$ (sinograma)

S. Furui 1/9/2010 - 43

Teorema da Projeção

$$g(t, \theta) = \iint f(x, y) \delta(x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta - t) \cdot dx \cdot dy$$

$$G(u, \theta) \equiv \iint f(x, y) \int \delta(x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta - t) \cdot e^{-j2\pi u t} \cdot dt \cdot dx \cdot dy$$

$$G(u, \theta) = \iint f(x, y) \cdot e^{-j2\pi u (x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta)} \cdot dx \cdot dy$$

$$\therefore G(u, \theta) = F(u \cdot \cos \theta, u \cdot \sin \theta) \Rightarrow \text{DFM}$$

S. Furui 1/9/2010 - 44

Teorema da Projeção (cont.)

Transf. Radon Inversa

$$f(x, y) = \iint F(u, v) \cdot e^{j2\pi \cdot (x \cdot u + y \cdot v)} \cdot du \cdot dv$$

coord. polares $\Rightarrow u = w \cdot \cos \theta \quad v = w \cdot \sin \theta$

$$f(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty F_p(w, \theta) \cdot e^{j2\pi \cdot (x \cdot w \cdot \cos \theta + y \cdot w \cdot \sin \theta)} \cdot w \cdot dw \cdot d\theta$$

$$f(x, y) = \int_0^\pi \int_0^\infty F_p(w, \theta) \cdot e^{j2\pi \cdot (x \cdot w \cdot \cos \theta + y \cdot w \cdot \sin \theta)} \cdot |w| \cdot dw \cdot d\theta$$

S. Furui 1/9/2010 - 45

Reconstr. baseados em Transf.

- Direct Fourier Method
- Inverse Radon Transform
- Convolution Backprojection
- Filtered Backprojection
- Fan-beam
 - ✓ rebinning
 - ✓ fórmula

S. Furui 1/9/2010 - 46

Ilustração DFM

S. Furui 1/9/2010 - 47

DFM : interpolação em freq.

S. Furui 1/9/2010 - 48

CBP, FBP

$$f(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty F_p(w, \theta) \cdot e^{j2\pi \cdot (x \cdot w \cdot \cos\theta + y \cdot w \cdot \sin\theta)} \cdot |w| \cdot dw \cdot d\theta$$

$$f(x, y) = \int_0^\pi \left\{ \int_{-\infty}^\infty F_p(w, \theta) \cdot |w| \cdot e^{j2\pi \cdot w \cdot (x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta)} \cdot dw \right\} \cdot d\theta$$

$$f(x, y) = \int_0^\pi \hat{g}(x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta, \theta) \cdot d\theta$$

S. Furui 1/9/2010 - 49

FBP

S. Furui 1/9/2010 - 50

Reconstrução com filtered backprojection

S. Furui 1/9/2010 - 51

Normalização (escala Hounsfield)

$$H_{CT} = 1000 \frac{\mu - \mu_{H_2O}}{\mu_{H_2O}}$$

$\therefore H_{CT}(\text{água}) = 0$
 $H_{CT}(\text{ar}) = -1000$
 $H_{CT}(\text{osso}) \cong 1000$
 $\mu_{H_2O} = 0.190 \text{ cm}^{-1} (70 \text{ kev})$

Massa branca e cinzenta: apenas alguns Hs

S.Furule 1/9/2010 - 52

Exemplo de imagem de CT

- ImageJ
 - ✓ Número de Hounsfield

S.Furule 1/9/2010 - 53

Síntese da aula

- Imagem radiológica = mapa de intensidade da radiação transmitida
- Ionizante
- Raio-X
 - ✓ Simples, barato
 - ✓ Elevada disponibilidade
 - ✓ Alta resolução espacial
 - ✓ Formação rápida das imagens
- CT
 - ✓ Tomográficas
 - ✓ Alta qualidade => imagens anatômicas
 - ✓ - elevada dose de radiação

S.Furule 1/9/2010 - 54

Exemplo do Iplab de Tomografia

- ImageJ + Iplab
 - ✓ 1) copiar do moodle
 - ✓ 2) open point
 - ✓ 3) rodar o plugin tomography
 - Ver as projecoes (sinograma)
 - Ver a filtragem
 - Reconstruir
 - Reconstruir sem filtro
 - ✓ 4) repetir p/ o arquivo phantom

S.Furule 1/9/2010 - 55

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SPRAWLS,Jr, Perry: Physical Principles of Medical Imaging. Aspen Publishers, Rockville, USA, 1987. Cap. 7, 12-14, 18-20, 23-24.
- WOLBARST, A.B.: Physics of Radiology. Appleton & Lange, USA, 1993. Cap. 10-11, 21.
- WEBB, Steve (Ed.): The Physics of Medical Imaging. IOP, Bristol, UK, 1992. Cap. 2, 3, 4.
- JOHNS, H.E., CUNNINGHAM, J.R.: The Physics of Radiology. Charles C. Thomas, Springfield, USA, 1983. Cap. 16.
- OKUNO, E. CALDAS, I.L., CHOW, C.: Física para Ciências Biológicas e Biomédicas. Harbra, São Paulo, Brasil, 1982. Cap. 1, 6-7.
- CAMERON, J.R., SKOFRONICK, J.G.: Medical Physics. John Wiley & Sons, New York, USA, 1978. Cap. 16.
- Chow, C. Aula sobre princípios físicos em raio-X. PTC 5892, 2002.

S.Furule 1/9/2010 - 57