

Aplicações da Física de Partículas à Saúde

Patrícia Gonçalves

patricia@lip.pt



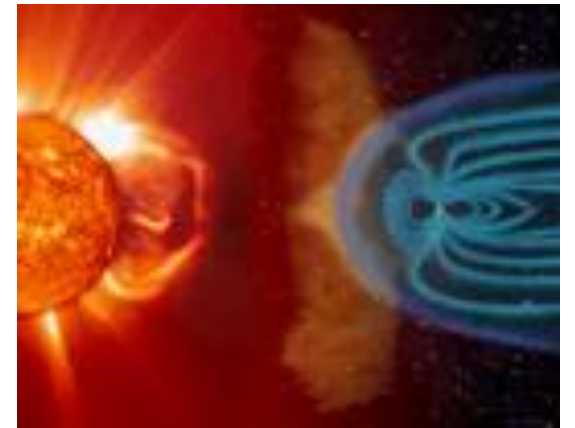
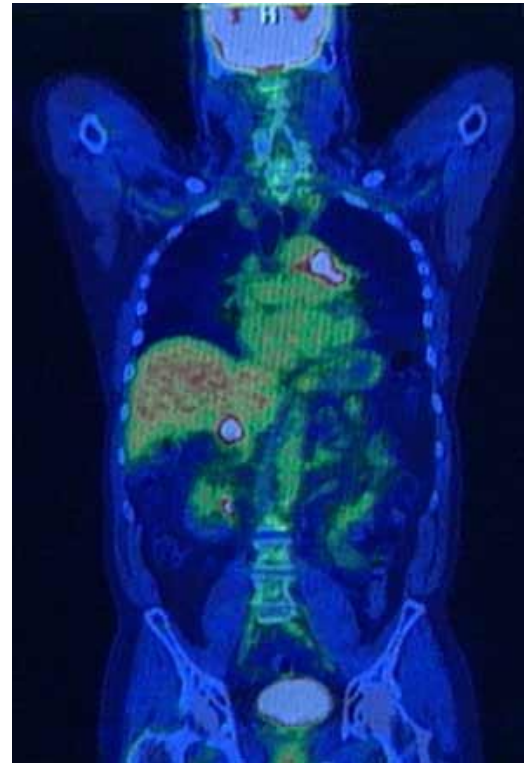
Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas



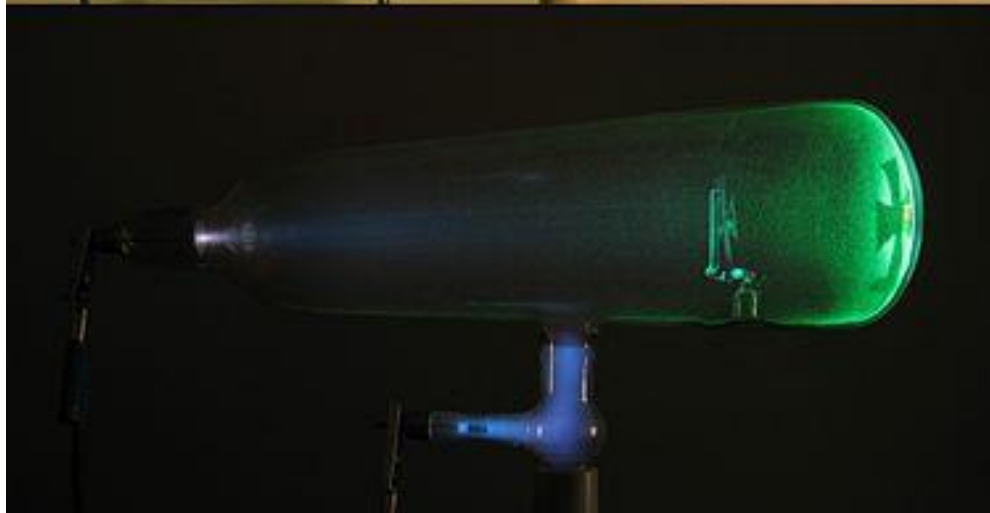
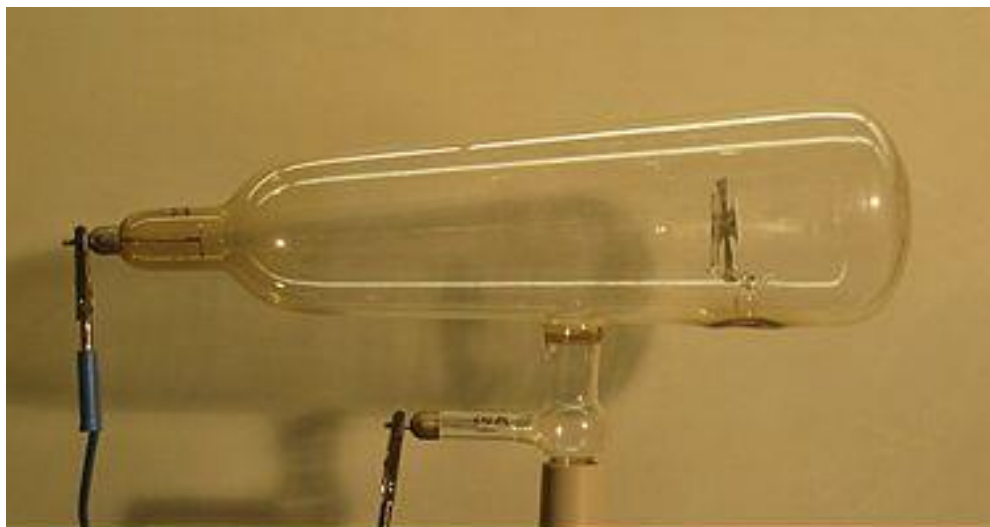
Instituto Superior Técnico

Tecnologias da Física de Partículas

- Linhas de feixe e aceleradores
- Desenvolvimento de detectores e instrumentação
- Simulação de detectores
- Blindagem por radiação
- Análise de dados / Técnicas de reconstrução de imagem



A primeira “aplicação” das partículas/radiação à saúde



Roentgen 1895

1ª radiografia
Mão da Bertha Roengen

Tempo de exposição:
15 minutos

Utilização clínica da Radiação ionizante

Aplicações médicas e biomédicas

- Diagnostico
- Terapia
- Desenvolvimento de novas tecnologias



Radiação ionizante

Radiação é simplesmente a propagação de energia através do espaço

Radiação ionizante é radiação com a capacidade de ionizar a matéria

O transporte da energia através do espaço é feito através de **partículas carregadas ou neutras**.

Designamos por **radiação ionizante** os **fótons energéticos** e as **partículas carregadas ou neutras** com energia cinética suficiente para ionizar átomos e moléculas.

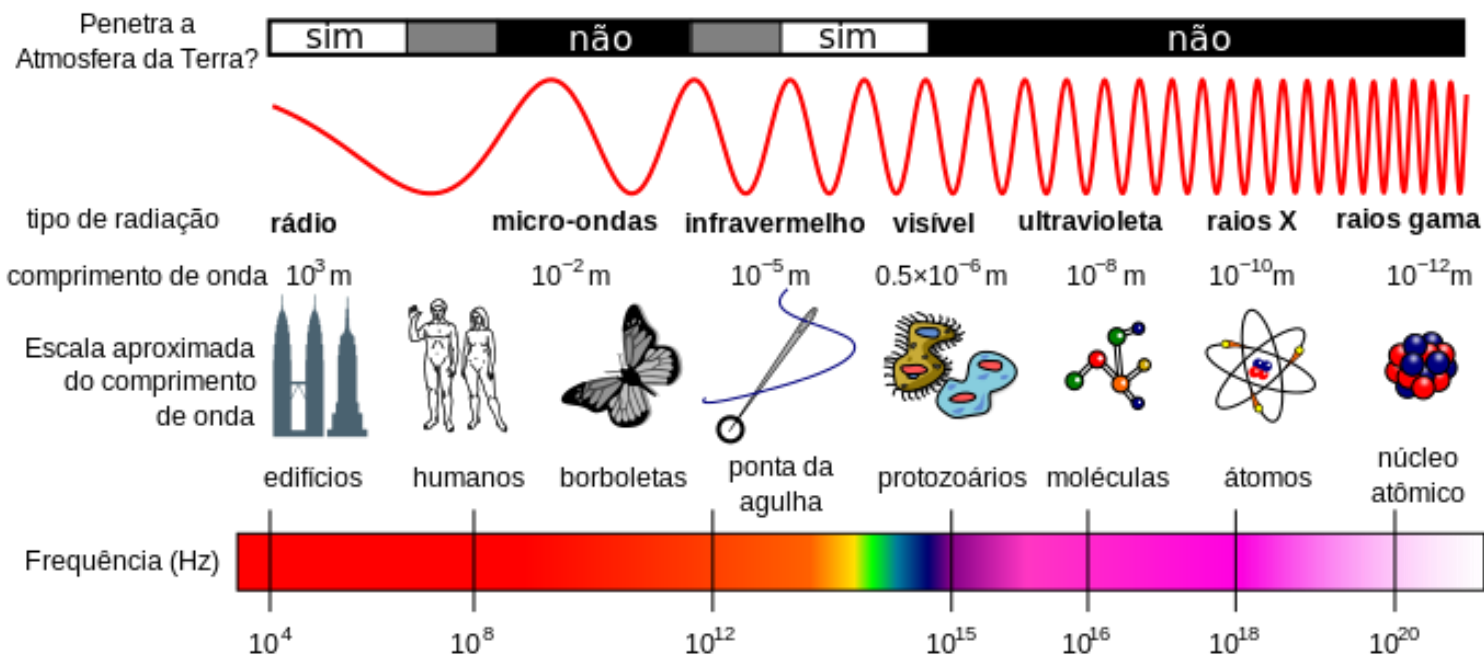
Em radiodiagnóstico e radioterapia utilizam-se **fótons, eletrões, prótons** (e não só!)





Fotões, elétrons, prótons

O que são?

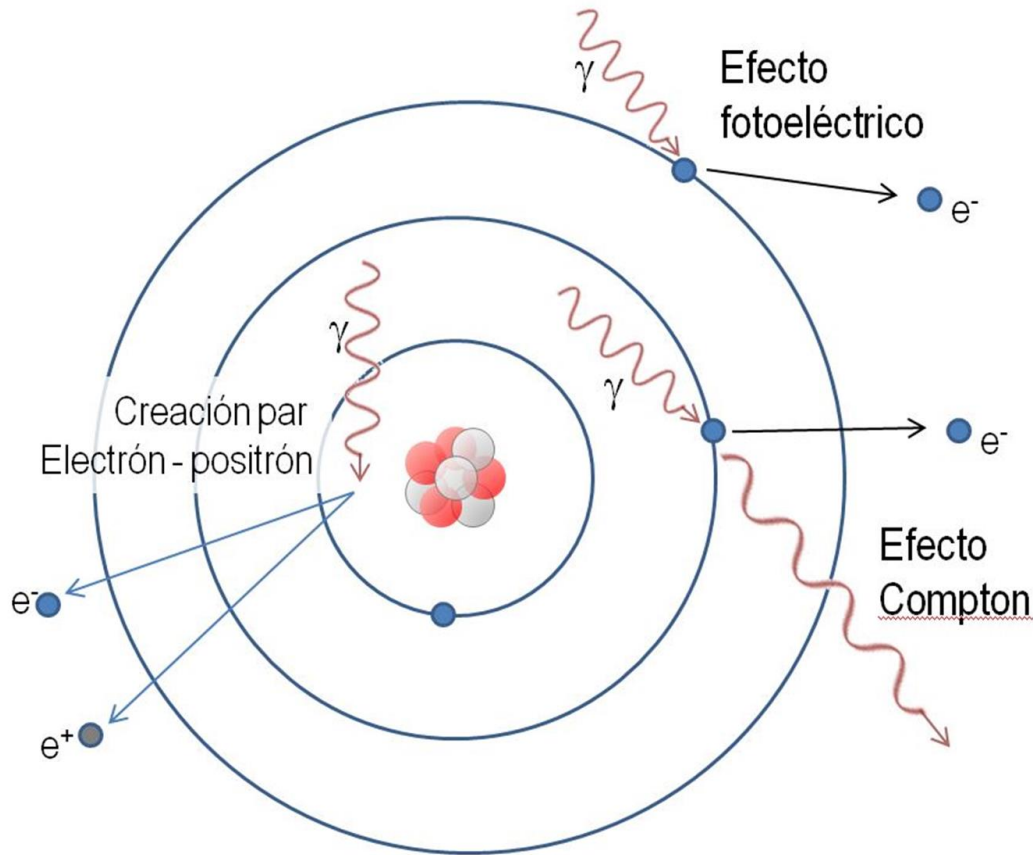


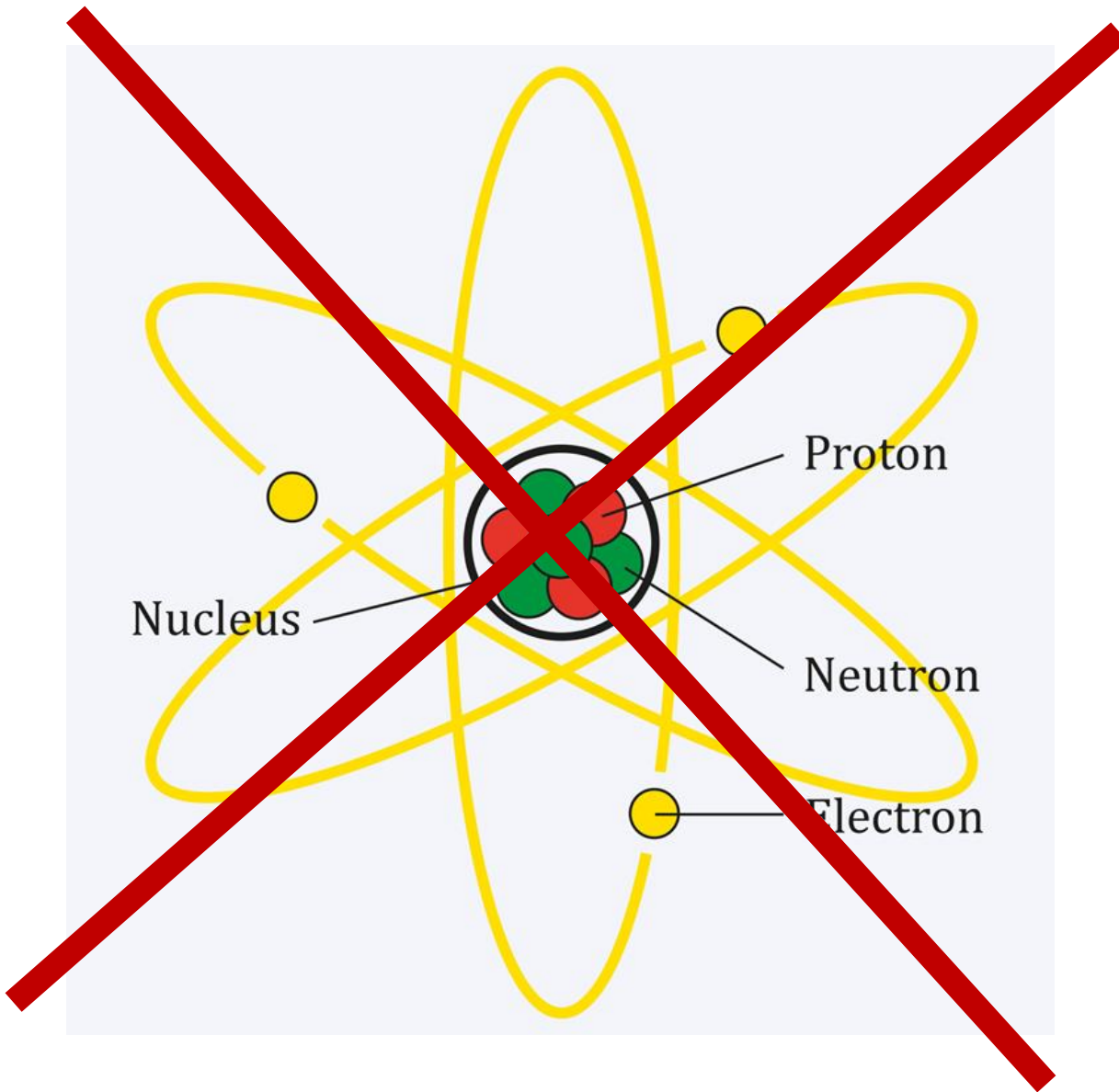
#Fotões

- “luz”, espectro eletromagnético
- Não têm carga elétrica
- Não têm massa “em repouso”
- Mediadores da interação eletromagnética

#Fotões

- Interagem por efeito fotoelétrico
 - difusão de Compton
 - criando pares eletrão-positrão
- não “perdem energia” diretamente:
transferem-na para os eletrões e positrões
criados



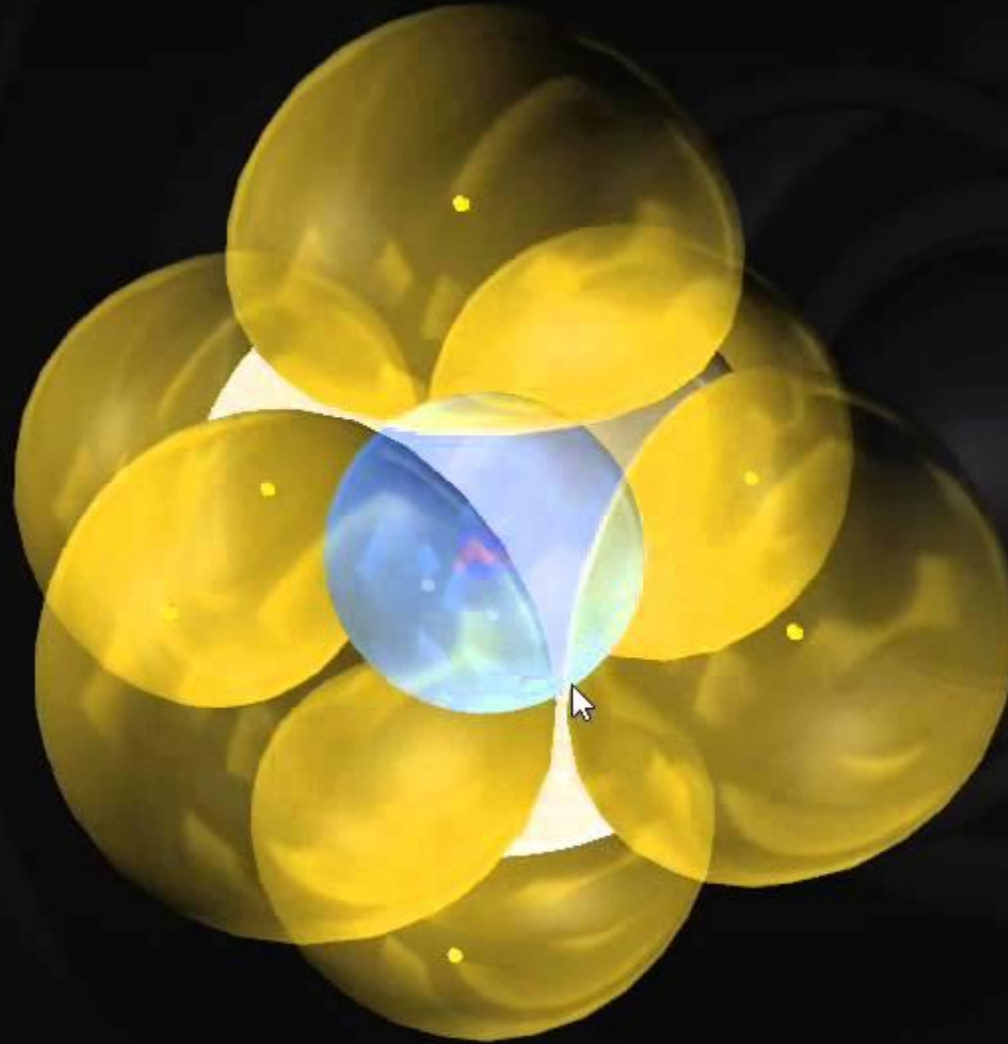


#Elétrões

- Fazem parte da matéria que conhecemos :
“orbitam” os núcleos dos átomos
- **Carga elétrica negativa**
- **Massa ~2000x inferior à do próton**
- Tanto quanto sabemos são partículas
“elementares”: não são compostas por outras

Electron configuration of Neon (N) = [He] 2s² 2p⁶
Indicating Helium plus 2 electrons in the 2s orbital & 6 in 2p
Electrons colored according to their orbital

Neon





Pause

||

Labels



Details



Heisenberg Atom



Orbital Table



Periodic Table



Hydrogen



Helium



Beryllium



Carbon



Neon
X section



Sulfur



Iron



Reset View



O tamanho dos átomos e dos núcleos

Tamanho do núcleo : 1×10^{-15} m

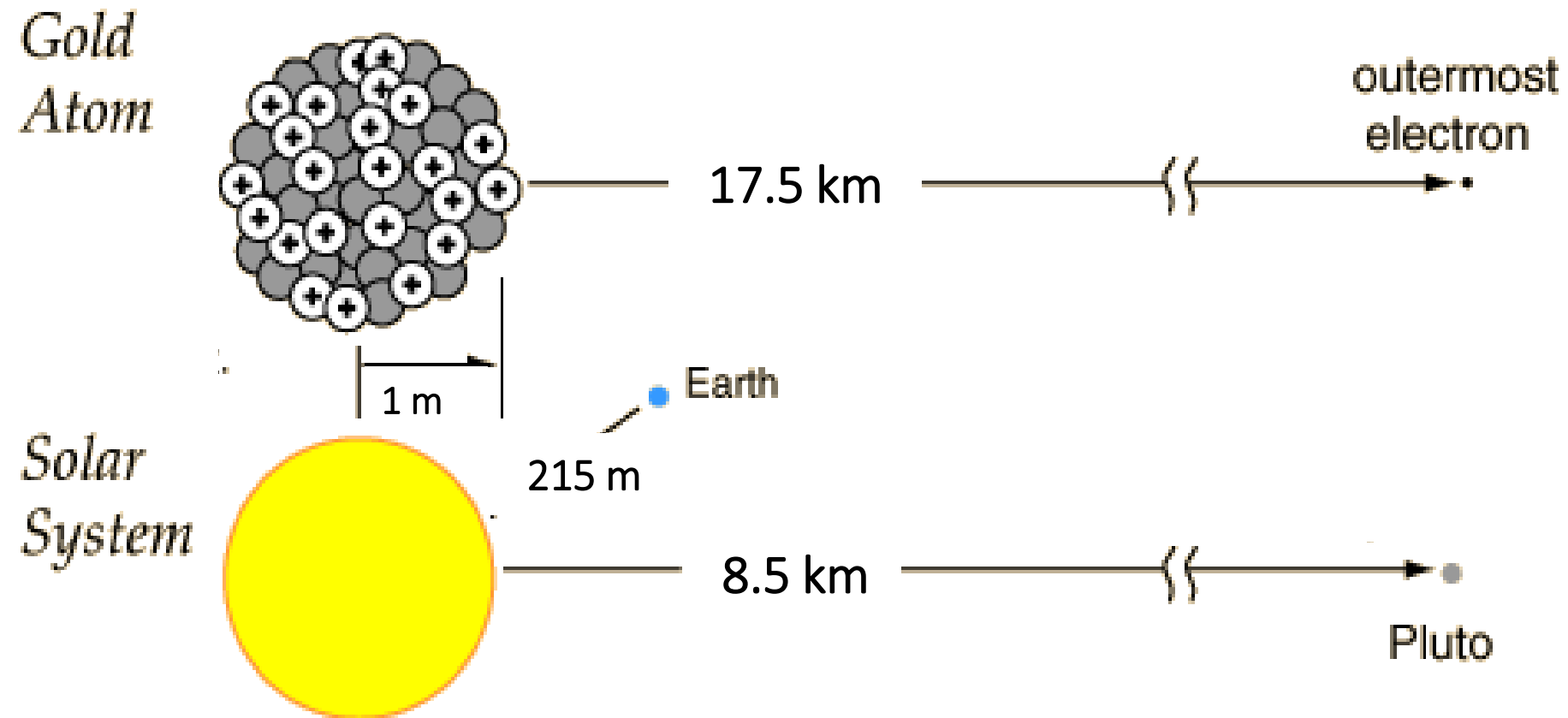
Tamanho do átomo : 1×10^{-10} m

O núcleo é 100 000 x mais pequeno que todo o átomo

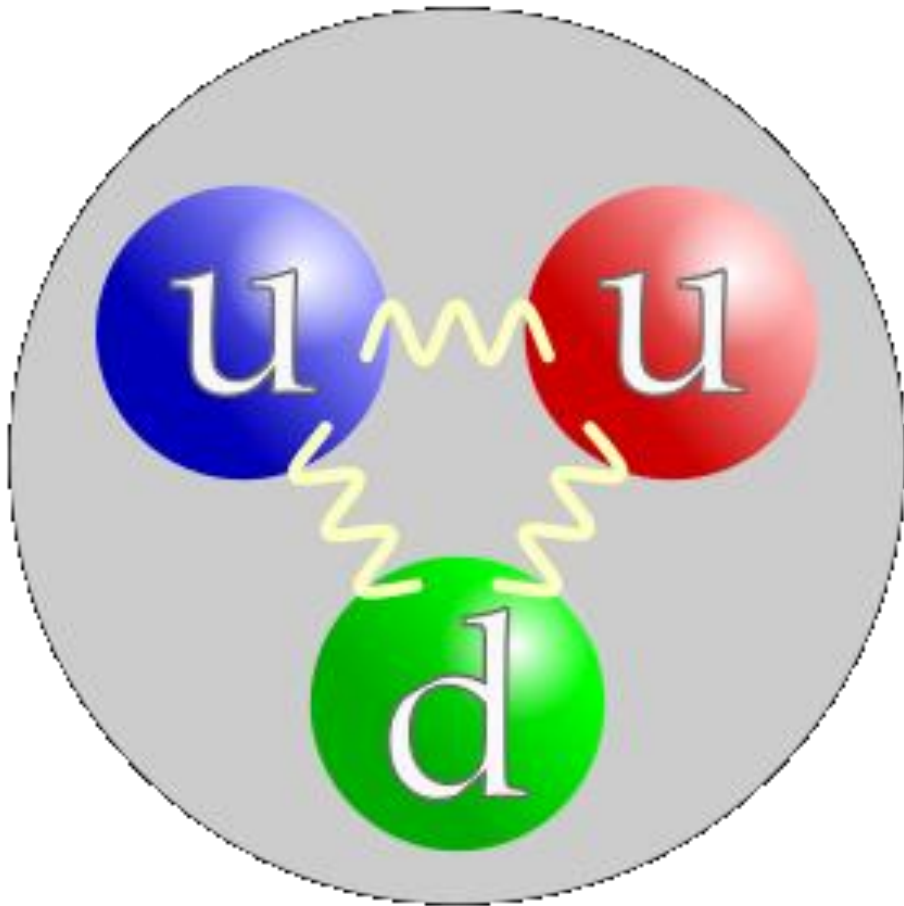
há muito espaço “vazio” entre os núcleos e os eletrões



O sistema solar e um átomo de ouro à escala de 1 m



Adaptado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/nucuni.html>



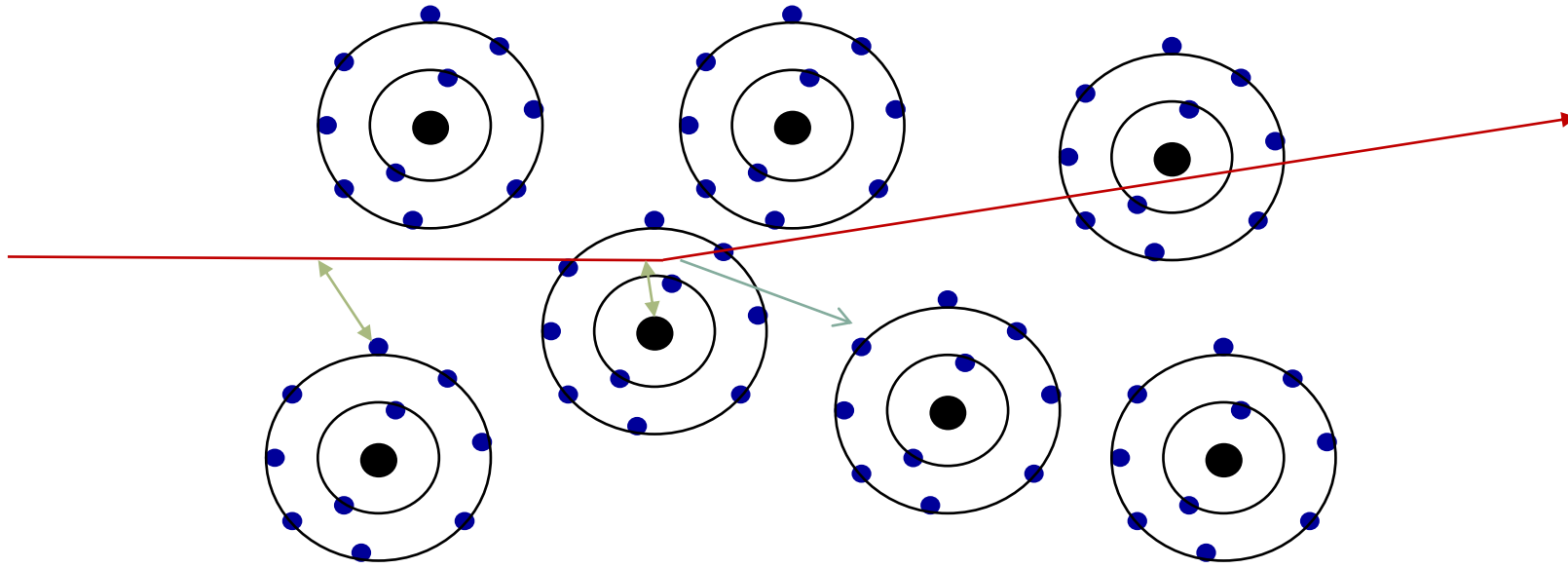
#prótons

- Existem nos núcleos dos átomos
- Carga positiva: +1
- Massa ~2000x a massa do elétron
- Constituídos por 3 quarks: dois quarks “up” e um quark “down”

Fotões, elétrons, prótons

Como interagem com a matéria ?

Elétrões e prótons



Vão perdendo a sua energia cinética através de interações com os elétrons atômicos
São partículas carregadas -> estas interações são eletromagnéticas – **interações de Coulomb**
Ou seja: **transferem a sua energia cinética para os elétrons do meio!**

#Positrões



Perdem a sua energia cinética através de interações com eletrões atômicos
Quando em repouso, aniquilam-se com eletrões médios originando dois fotões

Dose



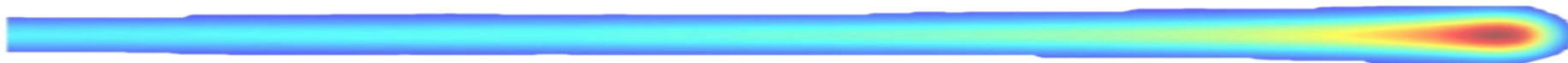
ΔE : energia perdida / transferida para o meio

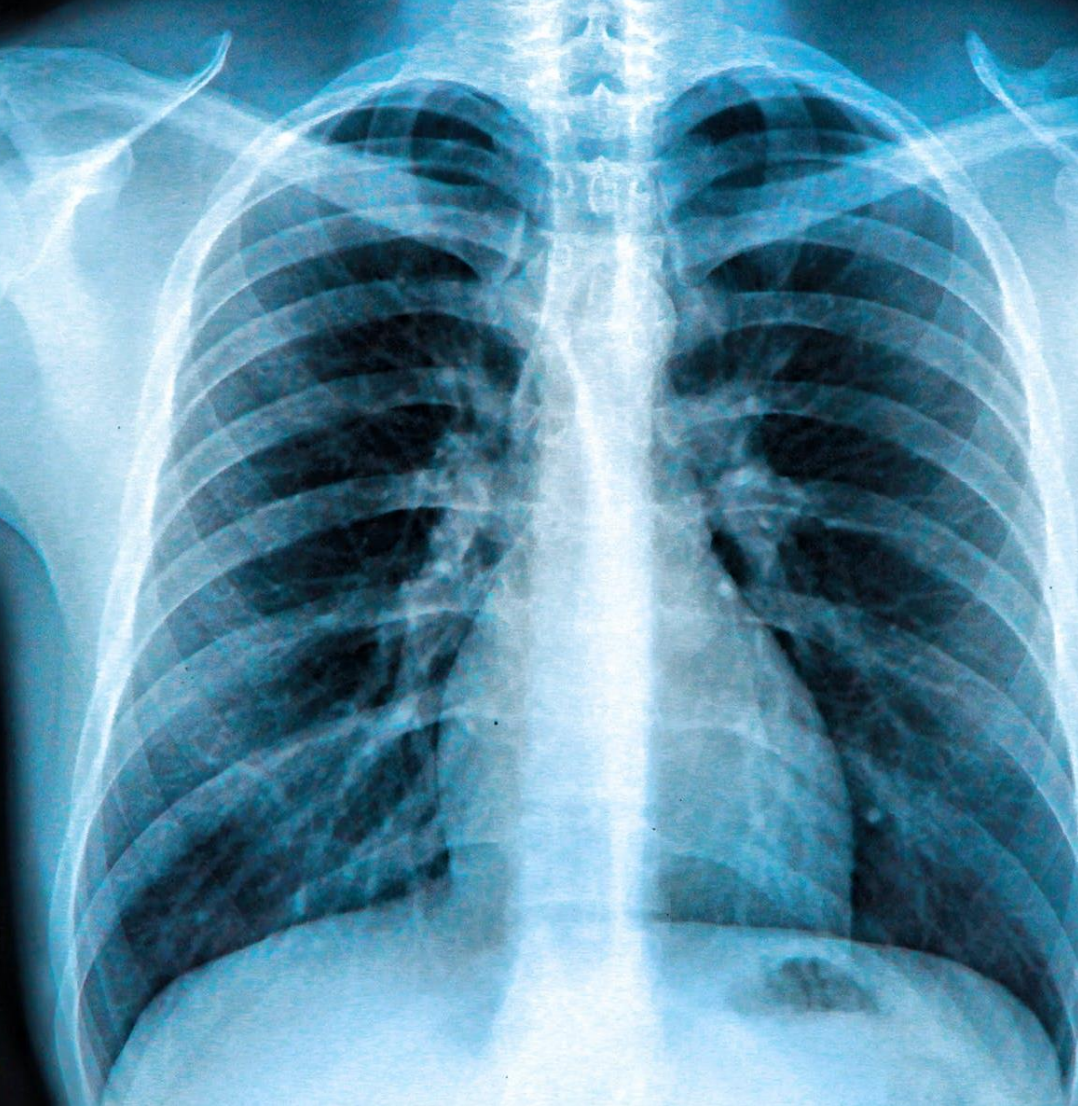
Energia depositada pela radiação ionizante
num volume de interesse dividida pela
massa desse volume

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

[J/kg= Gy (Gray)]

1 Gray corresponde à energia de 1 Joule depositada num kg de massa





Radiografia e Tomografia Axial computadorizada

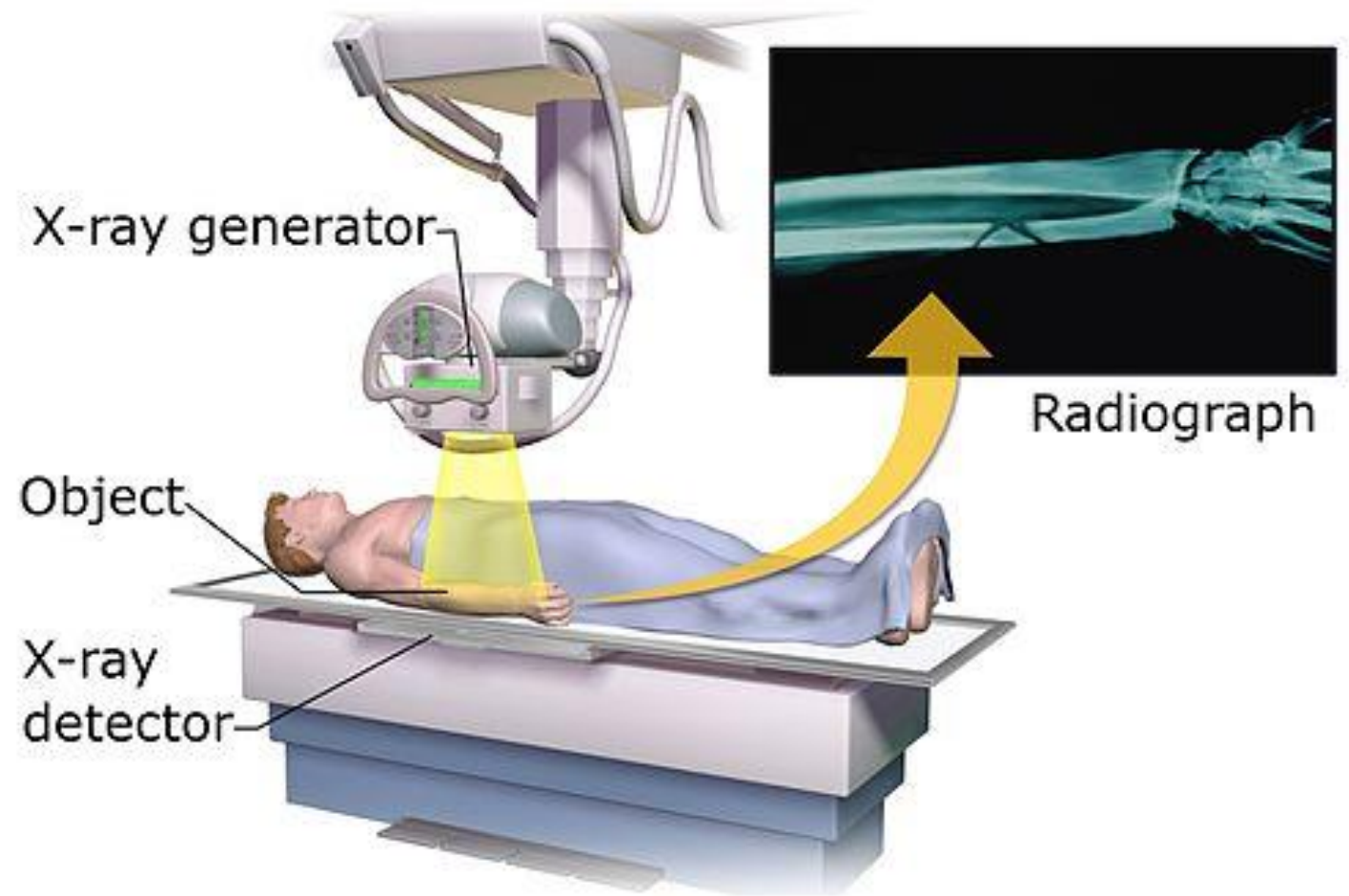
20

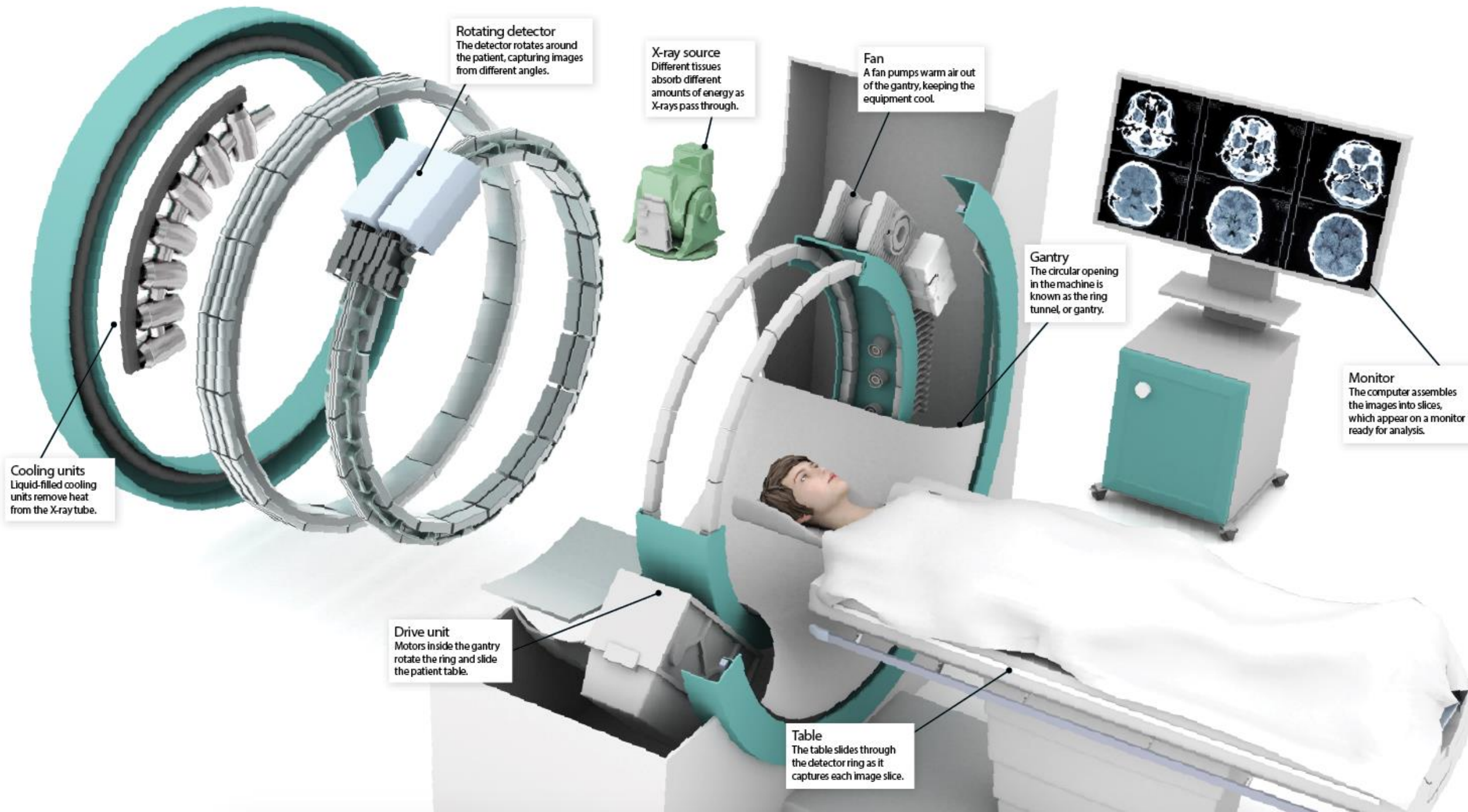
“Radiografia”

Os raios-X modernos são normalmente feitos colocando uma parte do corpo (como um braço ou uma perna) na frente de um detetor de raios-X e submetendo-o a uma pequena emissão de raios-X; por $\sim 1/50$ s

A tomografia axial computadorizada (TAC) permite uma visão tridimensional através de uma montagem automatizada de “fatias” de “radiografia” obtidas através de uma série de raios-X direcionais cruzados !

Projectional radiography





Rotating detector
The detector rotates around the patient, capturing images from different angles.

X-ray source
Different tissues absorb different amounts of energy as X-rays pass through.

Fan
A fan pumps warm air out of the gantry, keeping the equipment cool.

Gantry
The circular opening in the machine is known as the ring tunnel, or gantry.

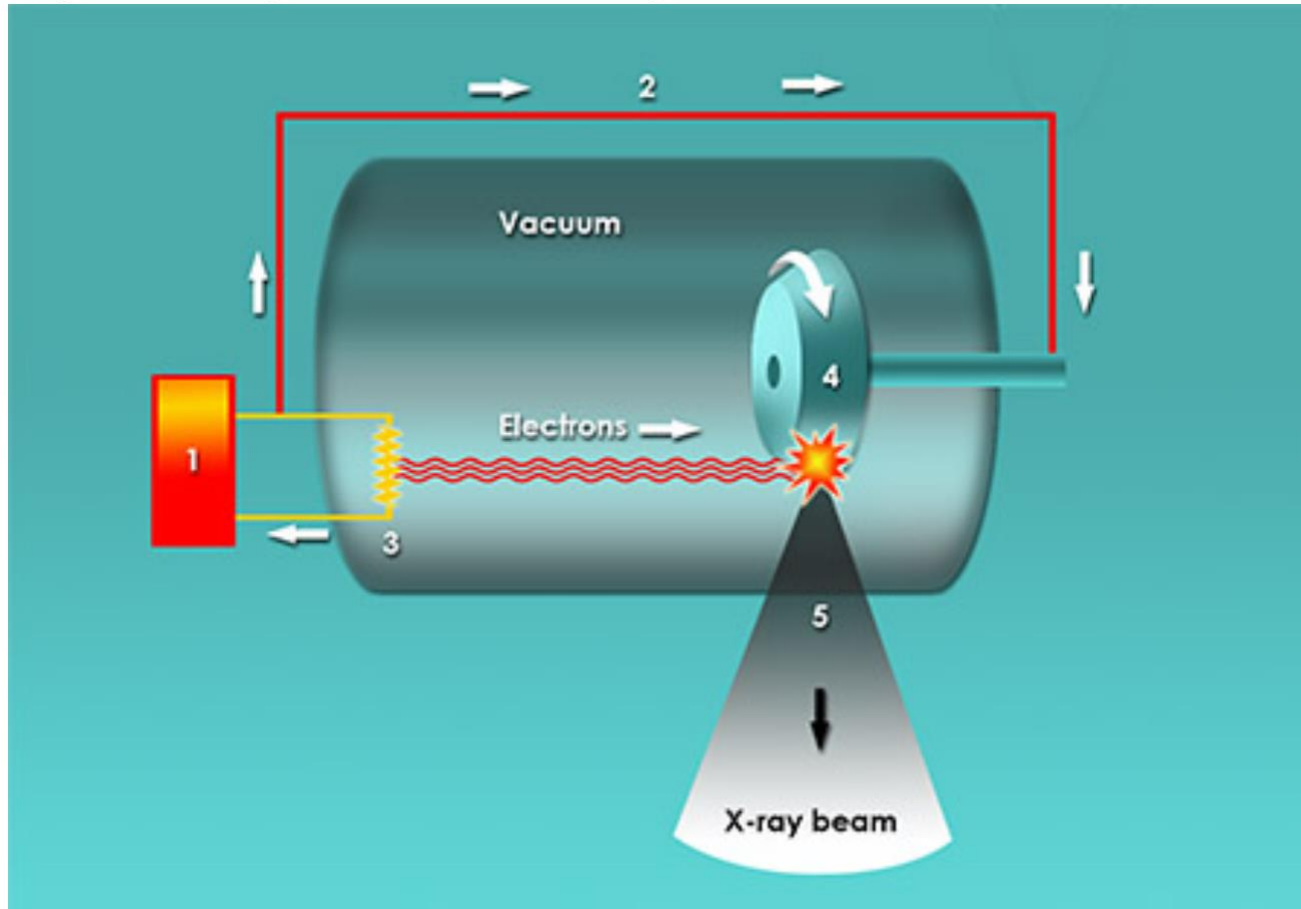
Monitor
The computer assembles the images into slices, which appear on a monitor ready for analysis.

Cooling units
Liquid-filled cooling units remove heat from the X-ray tube.

Drive unit
Motors inside the gantry rotate the ring and slide the patient table.

Table
The table slides through the detector ring as it captures each image slice.

Como produzimos os raios-X



- Os raios-X são produzidos pela interação de elétrons acelerados com núcleos de tungstênio/molibdeno dentro do ânodo do tubo

São gerados dois tipos de radiação: radiação característica e radiação bremsstrahlung (travagem)

A alteração da corrente ou regulação da tensão da máquina de raio-X altera as propriedades do raio-X

Como pode a física de partículas ajudar no diagnóstico e tratamento do cancro?

Tomografia de Emissão de Positrões

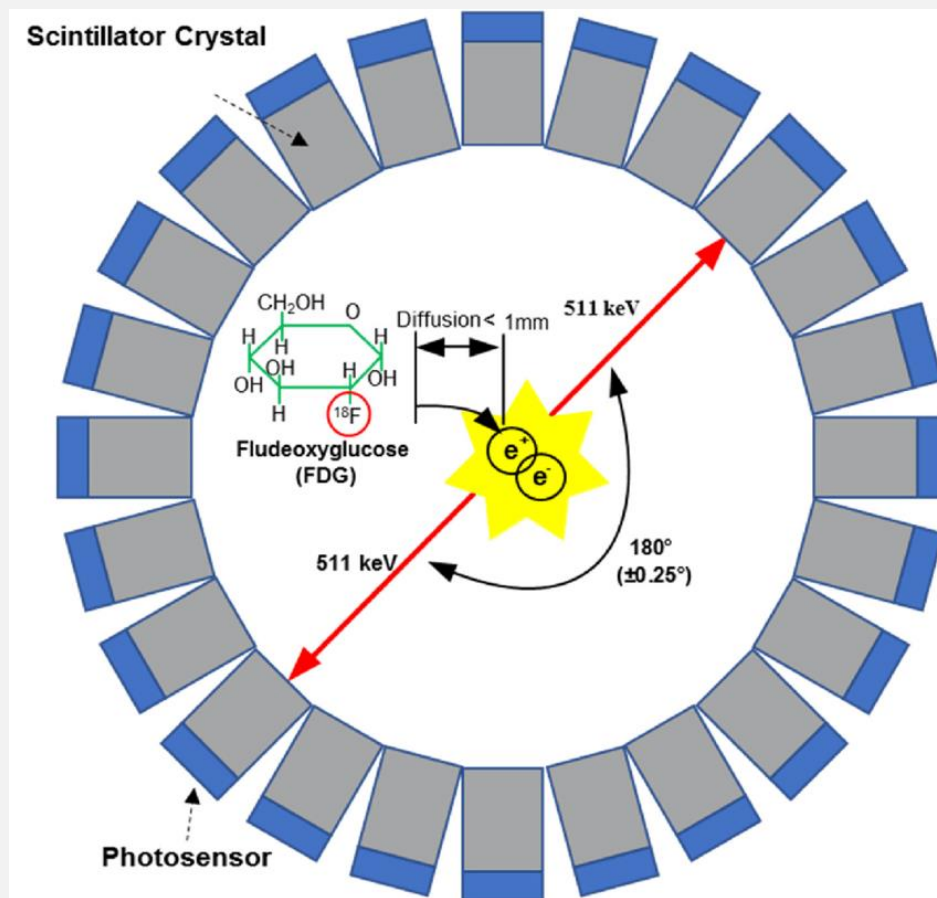
Terapia de partículas Carregadas

O que é o cancro?

O cancro é um grupo de doenças em que existe uma proliferação anormal e descontrolada de células originadas de uma célula "normal" que sofreu mutação, dando origem a células que têm a capacidade de continuar a multiplicar-se, espalhando-se para outros tecidos e órgãos além daqueles a que a célula original pertencia.



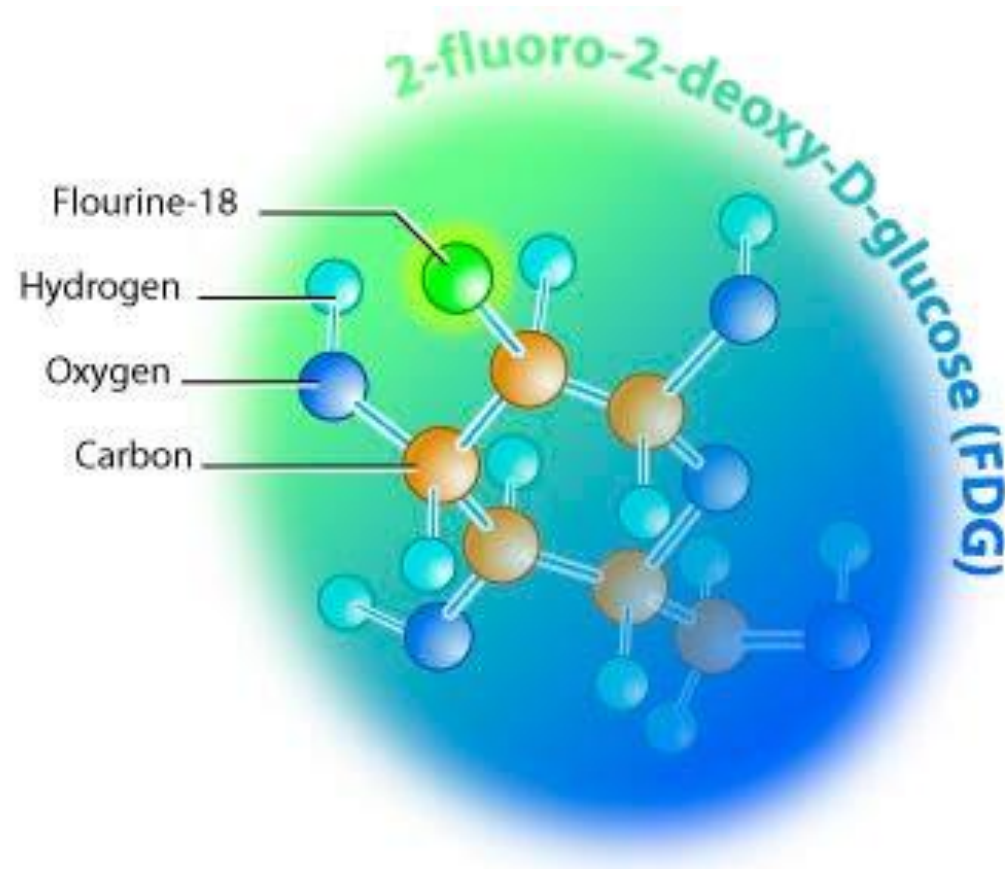
Undifferentiated cancer cells



Tomografia de Emissão de Positrões

PET & Radioisótopos

Um radioisótopo (emissor de positrões) é injetado no paciente geralmente ligado a um açúcar



Os cancros têm taxas metabólicas invulgarmente elevadas, pelo que a solução de açúcar é consumida a taxas mais elevadas pelas células cancerígenas do que por tecidos saudáveis.

Radioisótopos

Radionuclídeos ou radioisótopos são **isótopos instáveis**, ou seja, sujeitos ao processo de decaimento radioativo.

Os radioisótopos são produzidos em ciclotrões e em reatores nucleares.

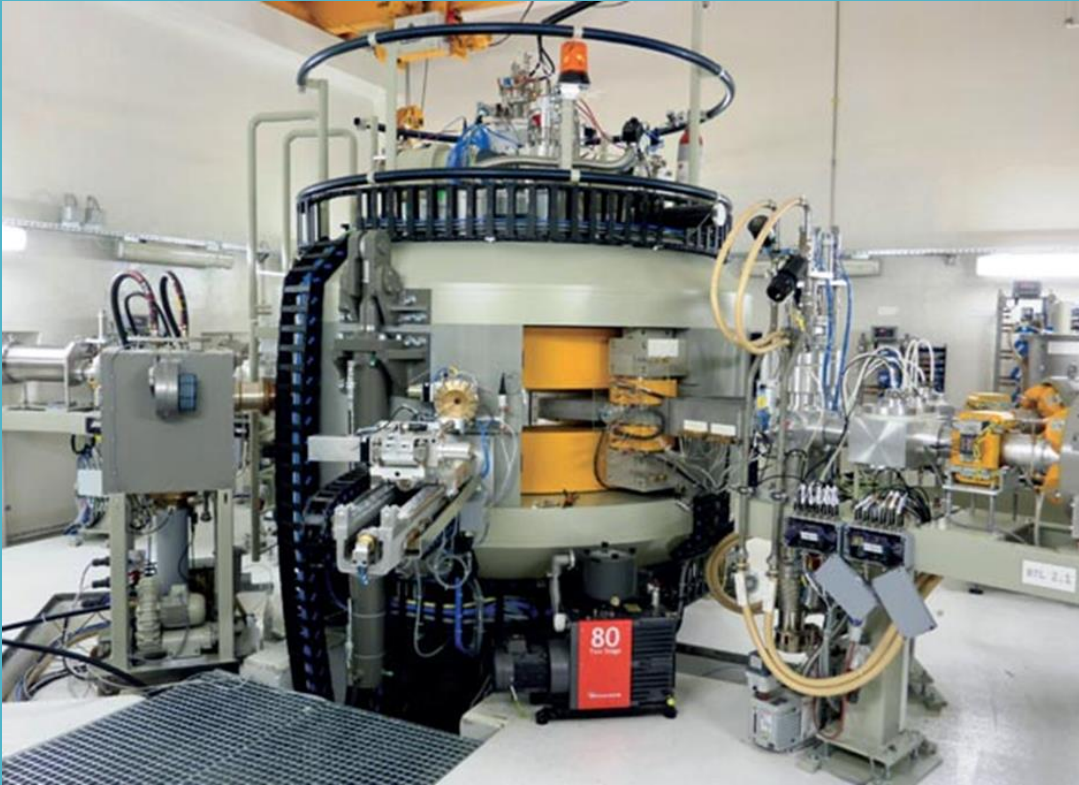
Os ciclotrões podem ser instalados em instalações industriais ou em grandes hospitais, o que permite o uso imediato.

A produção, é feita pelo bombardeamento de um alvo por partículas carregadas, geralmente prótons.

Os emissores beta-+ como o fluor-18 e outros radioisótopos de curta duração são produzidos em ciclotrões e representam cerca de 25% dos radioisótopos utilizados no diagnóstico.



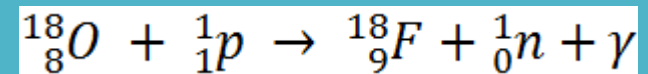
Radioisotope production



IBA Cyclone-30 isotope-producing cyclotron, 2.7 m in diameter and 2.8 m high.

Na síntese de FDG, o alvo utilizado é a água enriquecida (H_2^{18}O).

Protões acelerados ciclotrão interagem com a água e “substituem” neutrões do isótopo de oxigénio, formando o isótopo radioativo ^{18}F

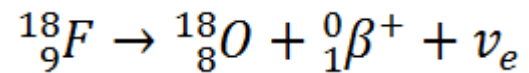


A física em PET

Emissão de positrões

^{18}F é um isótopo rico em prótons

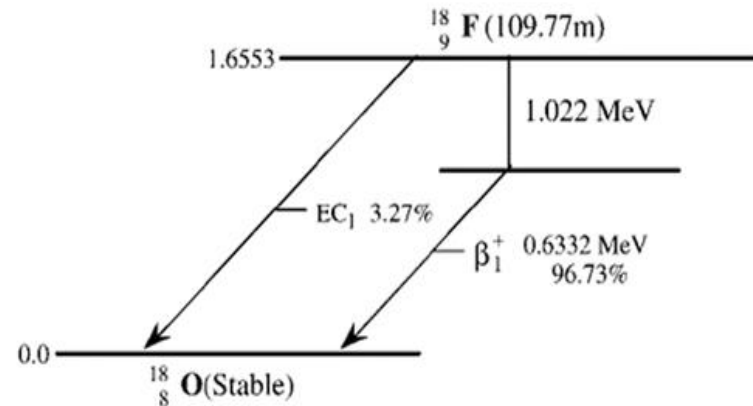
Decai no isótopo estável do Oxigênio, It ^{18}O ,
“Transformando” um próton num neutrão,
num processo chamado de **declínio beta+** (*),
emitindo um **positrão e um neutrino!**



(*) Troca de um bóson W !! Força fraca!

27/07/2022

			Na22 2.605 y β^+ , EC E 2.842	Na23 100 22.98977
		Ne20 90.48 19.99243	Ne21 0.27 20.99384	Ne22 9.25 21.99138
	F18 109.77 m β^+ E 0.156	F19 100 18.99840	F20 11.0 s β^- E 7.030	F21 4.16 s β^- E 5.690
O16 99.76 15.99461	O17 0.04 16.99913	O18 0.20 17.99916		



Esquema de declínio ^{18}F

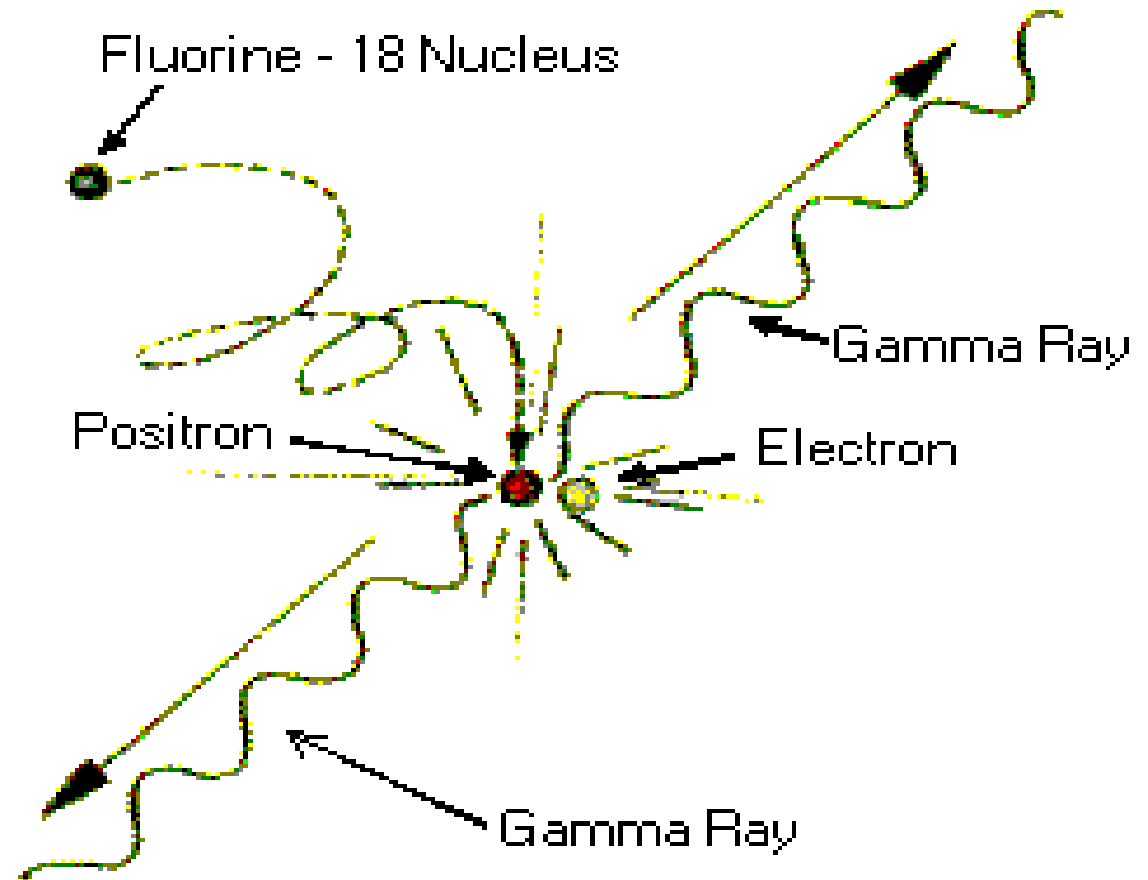
PET Physics

positron interactions

O positrão emitido pelo radioisótopo aniquila-se com um eletrão do meio, nos tecidos do paciente, produzindo dois raios gama

Os dois raios gama viajam em direções opostas deixando o corpo do paciente

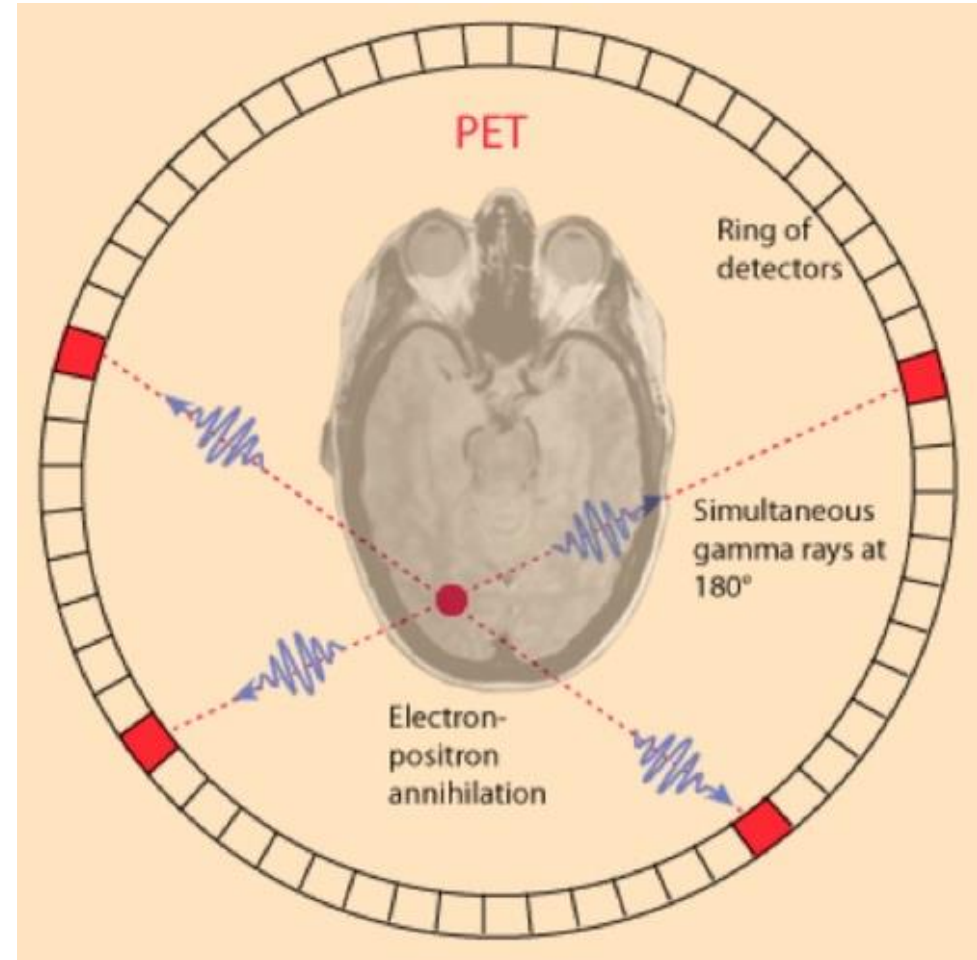
Positron Emission Tomography



PET detection principle

The **Gamma rays** emitted in coincidence are detected by modules surrounding the patient

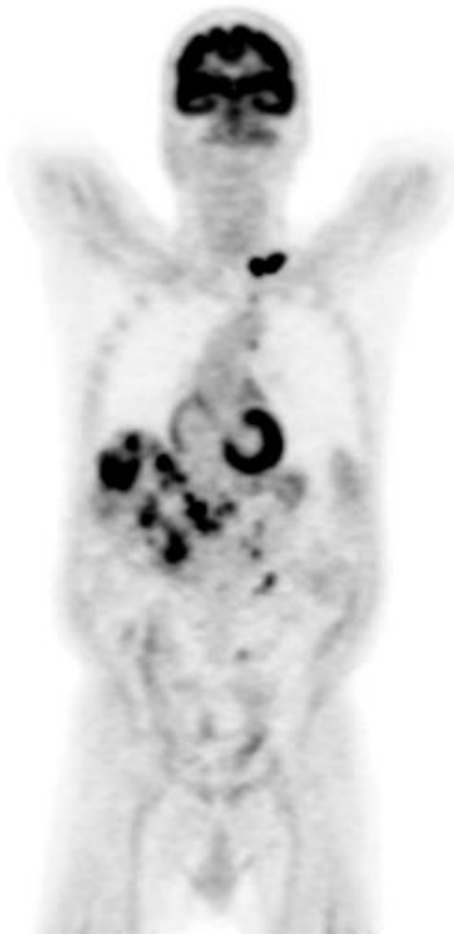
The reconstructed directions of the gammas emitted in coincidence are used by imaging reconstruction algorithms to obtain **high resolution images** of the internal organs



PET imaging

PET scans are a very powerful imaging tool producing high resolution images

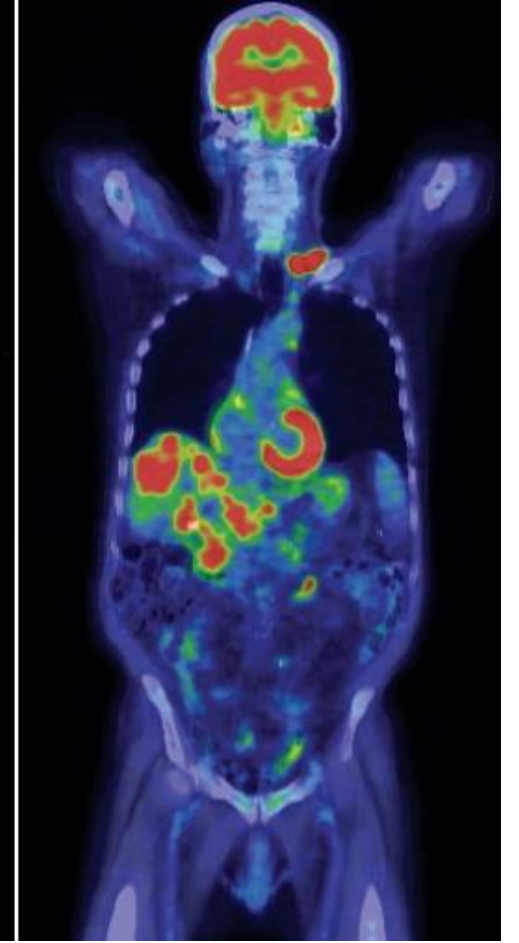
PET scans can detect changes in metabolic activity before changes in the anatomy are seen in CAT and MRI images!



PET scan



CT scan



PET/CT scans combined



Radiotherapy with charged particles



Radioterapia

Radioterapia com feixes externos

- LINACs
fotões e electrões
- Ciclotrões e sincrotrões
protões e iões de carbono

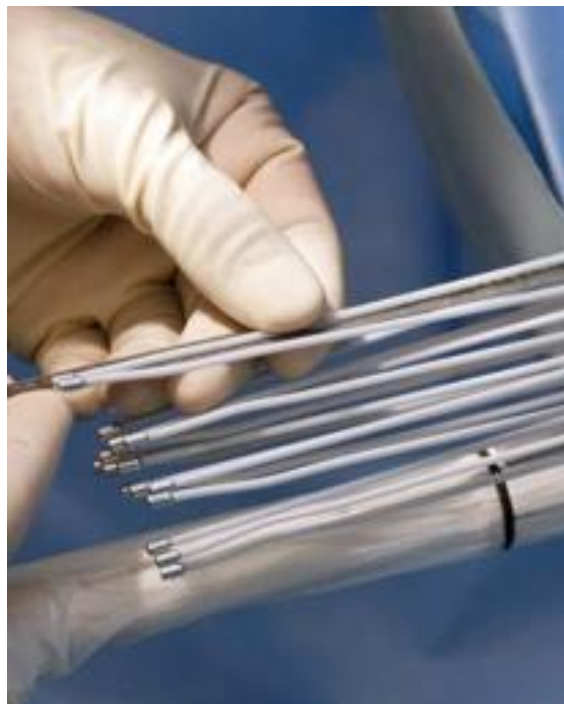


Radioterapia

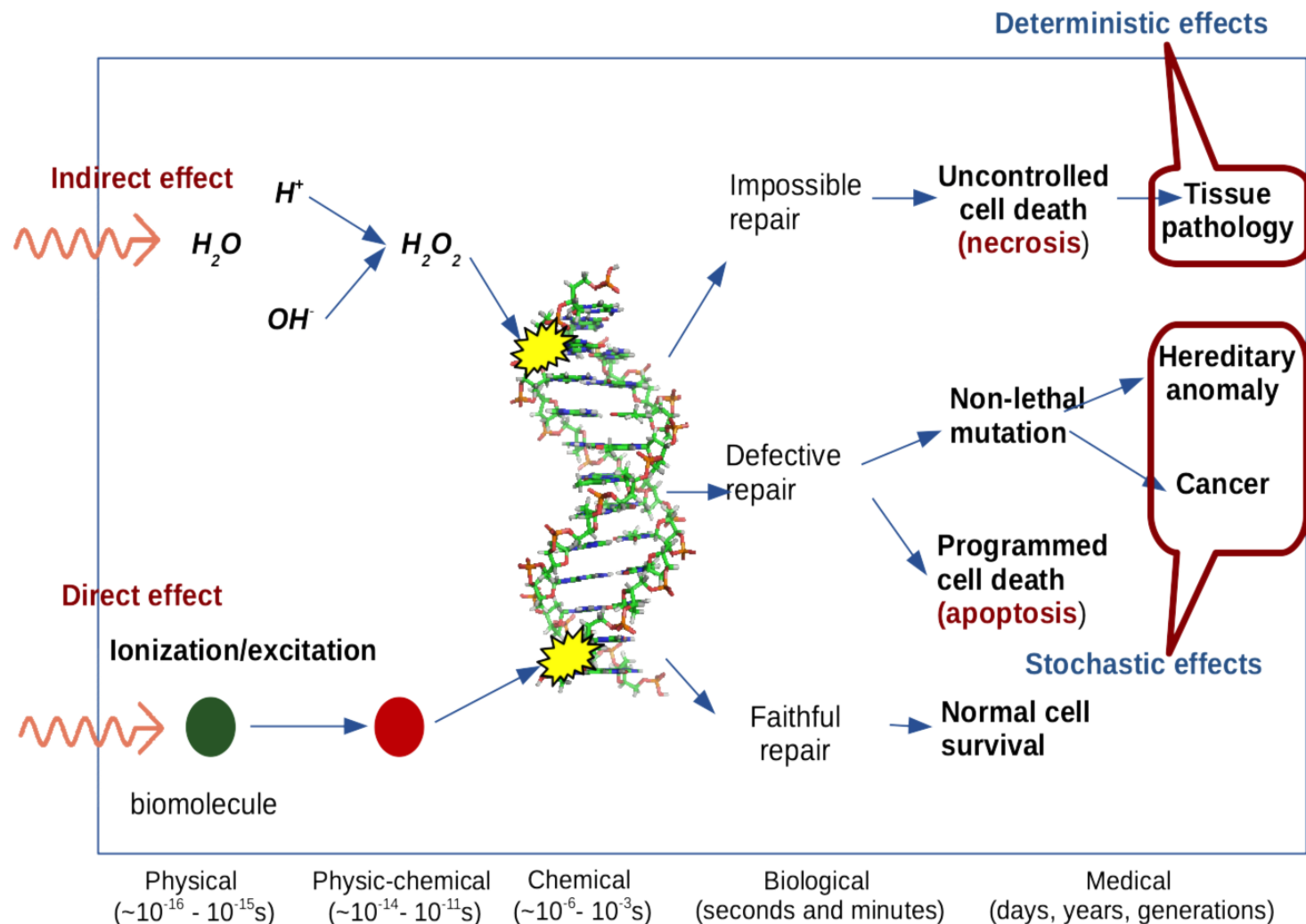
Radioterapia com fontes radioativas ou radioterapia interna

- Braquiterapia:

fotões e elétrons emitidos por fontes radioativas colocadas junto ao tecido a tratar

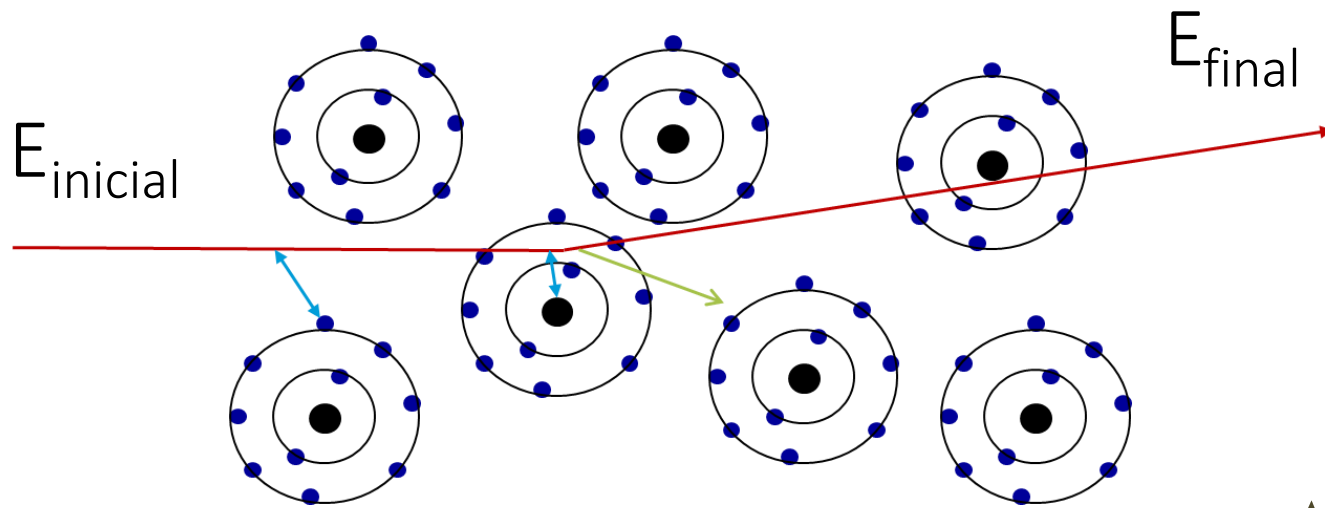


Qual é o efeito da radiação ionizante nos tecidos?



Efeitos biológicos da radiação

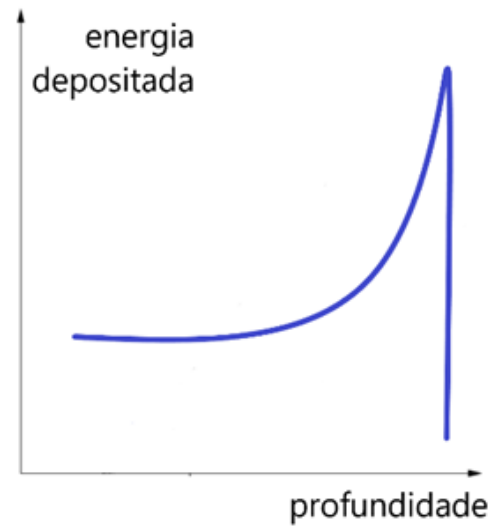
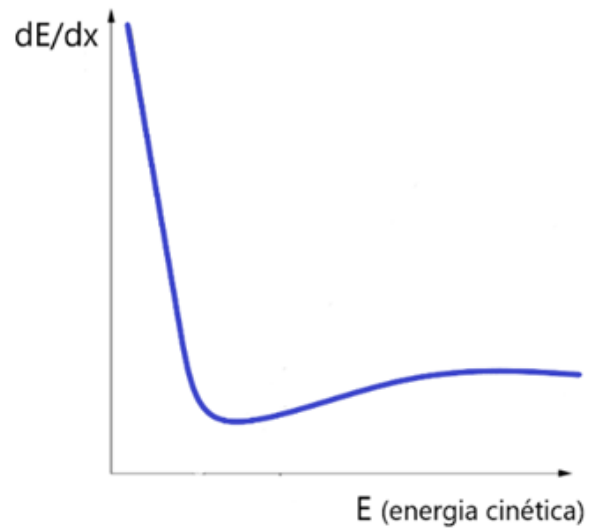
Porquê terapia com partículas carregadas?



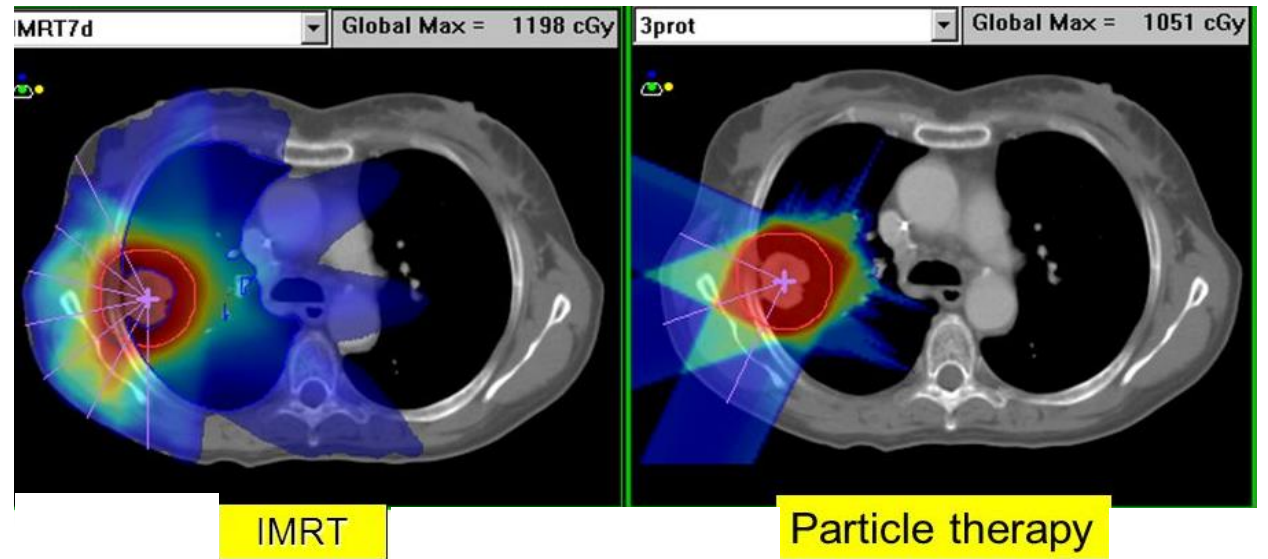
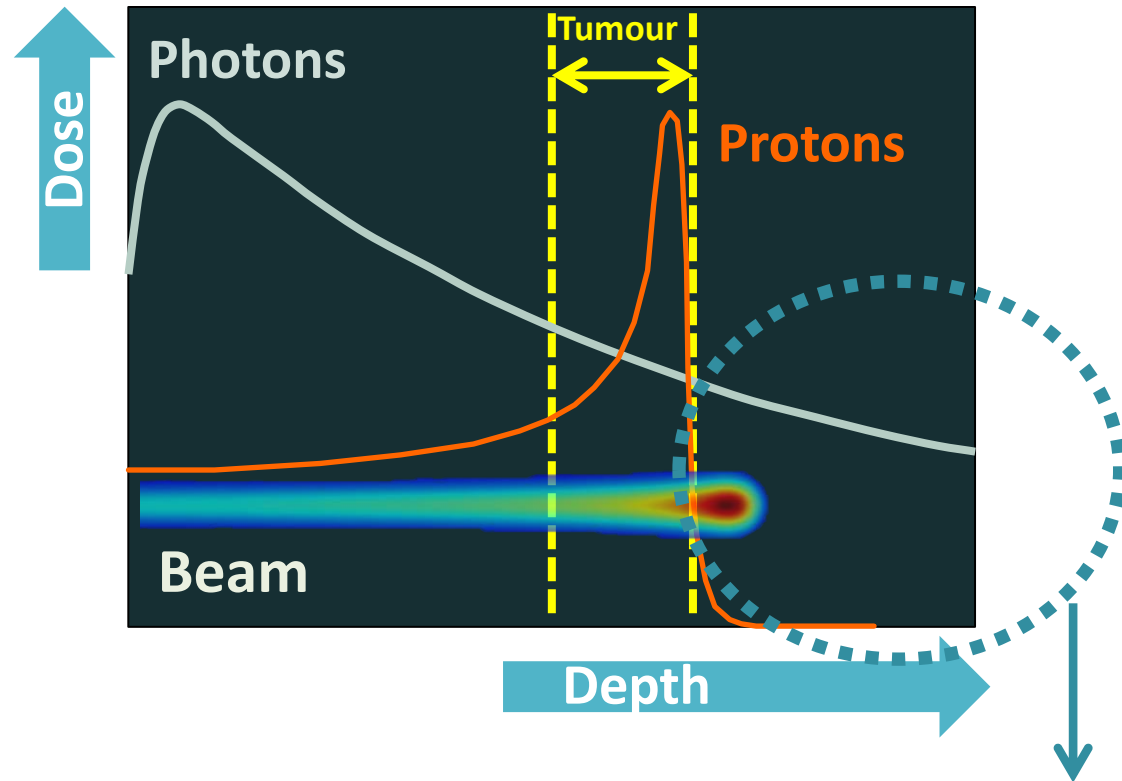
$$E_{\text{final}} = E_{\text{inicial}} - \Delta E$$

ΔE : energia perdida / transferida para o meio

na terapia com partículas carregadas o meio é o tecido!!



Pico de Bragg



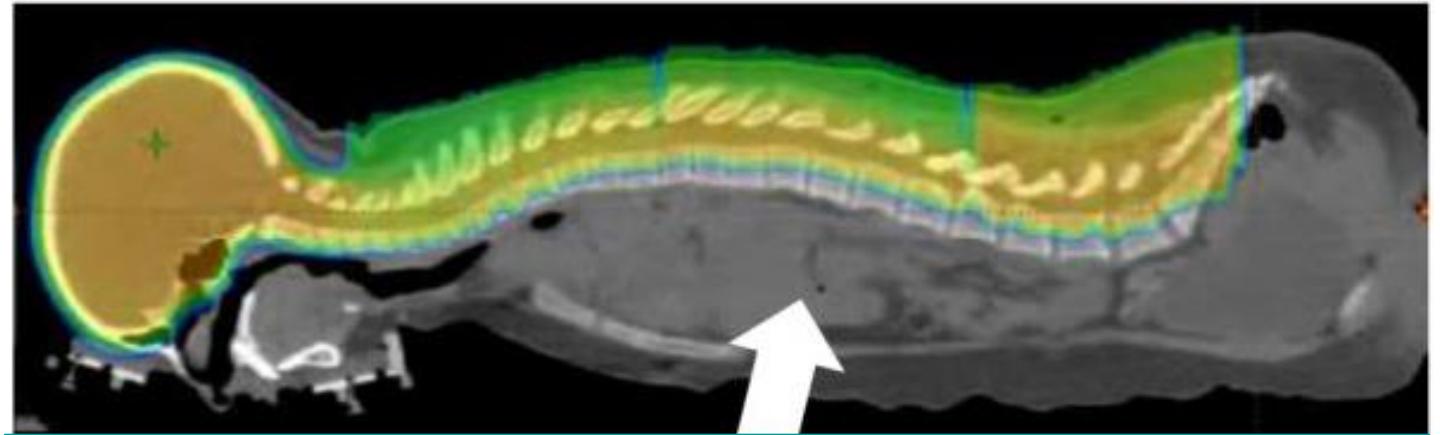
organ sparing region

A vantagem dos prótons

Prótons

Os prótons param!

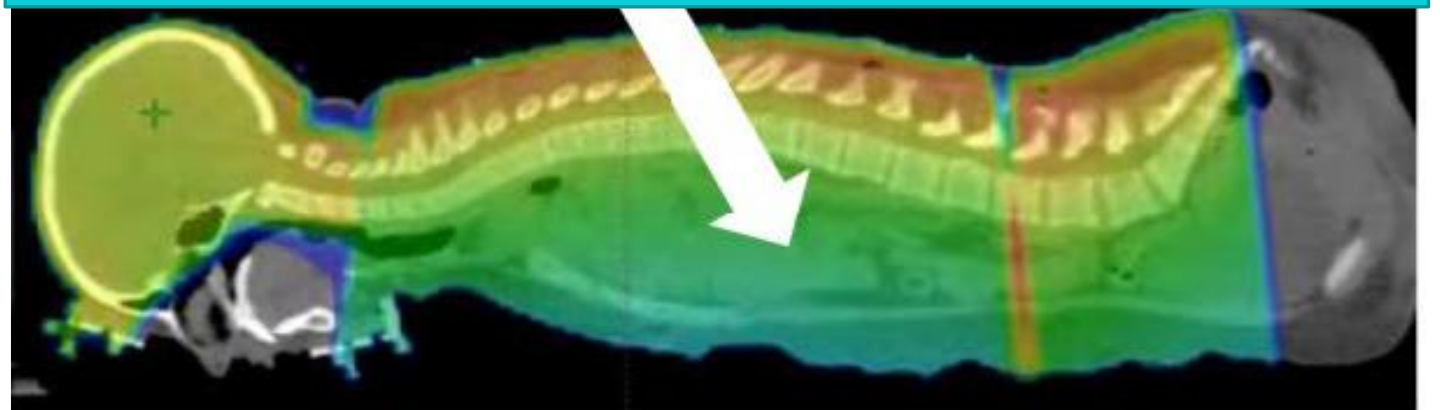
A profundidade onde param depende da sua energia inicial



A utilização de prótons evita irradiação desnecessária do coração, pulmões e intestinos que acontece no caso da radioterapia com raios-x

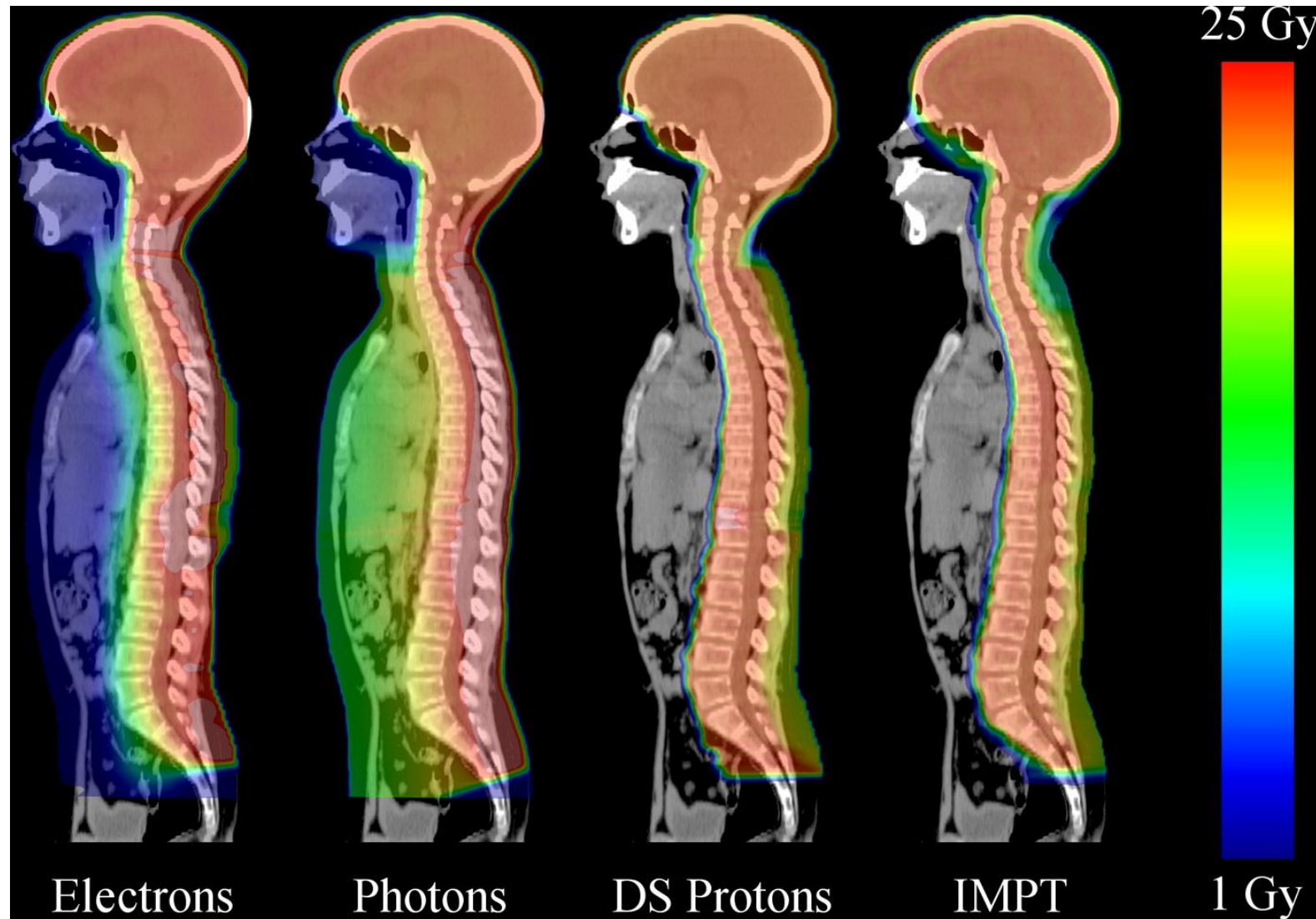
Os raios-x e gama não param!

Continuam a atravessar os tecidos normais para além dos tecidos a tratar

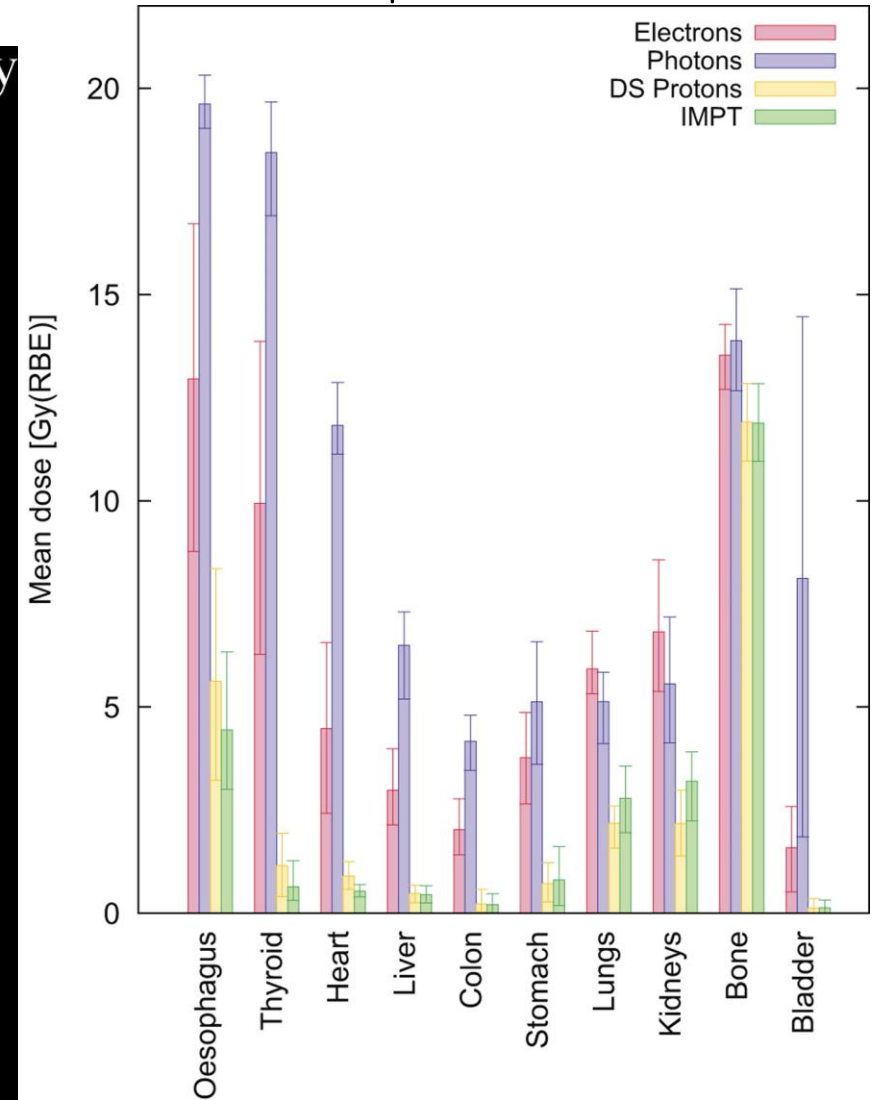


Fótons (raios-x / gama)

Radioterapia do eixo cranioespinal – Eletrões, fótons & prótons



Stokkevåg et al., (2014) *Acta Oncol.* 53:8 1051-2



DS : Double Scattering

IMPT: : intensity modulated proton therapy

Porquê terapia com partículas carregadas?

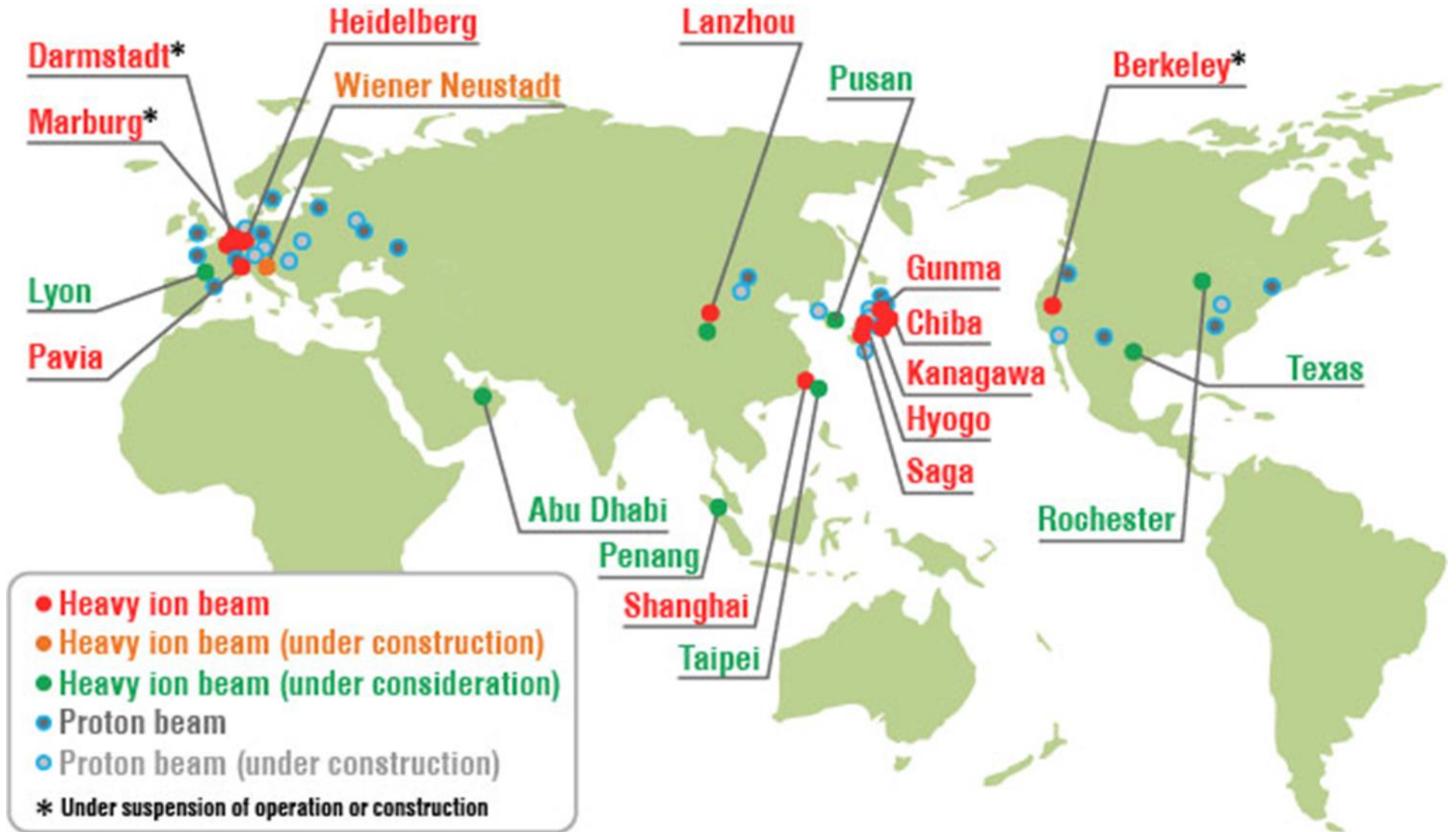
Os prótons podem reduzir significativamente os efeitos secundários no tratamento do cancro e potencialmente aumentar as doses fornecidas aos tumores, através de **fornecimento ultrapreciso da dose**



[J. Seco, PRESENT AND FUTURE OF PROTON THERAPY: Special Emphasis on Pediatrics , july 2020]

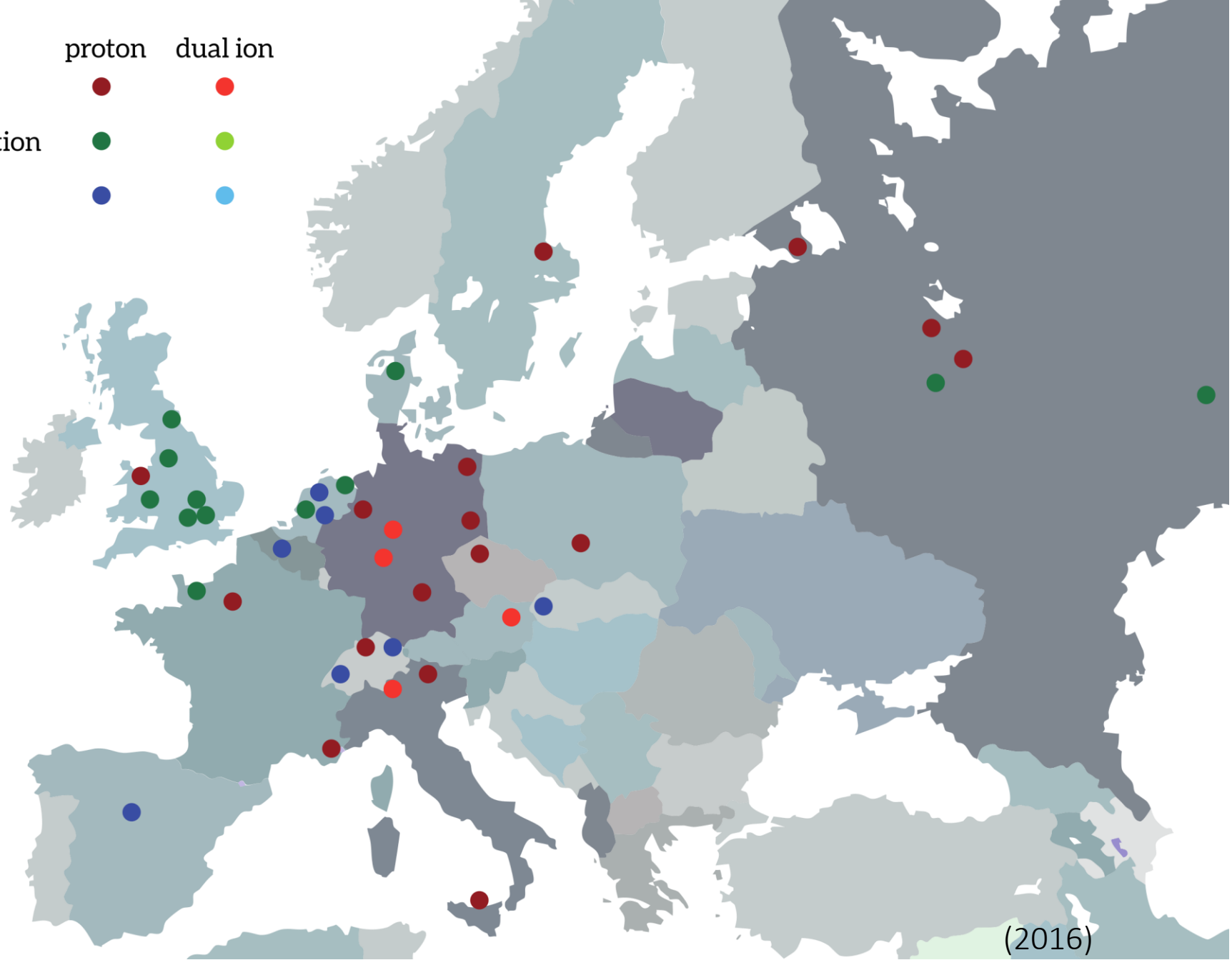
Onde há centros de tratamento com partículas carregadas?

Mundo



Europa

	proton	dual ion
in operation	●	●
under construction	●	●
being planned	●	●



(2016)

Terapia com partículas em todo o mundo

110 centros em operação em 20 países

USA (32 p)

Japan (14 p, 6 C)

Germany (6 p, 2 C)

England (3 p)

Austria (1 p, C)

Italy (3 p, 1 C)

Netherlands (3 p)

Denmark (1 p)

77 centros planeados incluindo 11 novos países

Spain (2 p)

Belgium (1 p)

Norway (2 p)

Terapia com partículas em todo o mundo

89 centros em operação em 20 países

USA (32 p)

Japan (14 p, 6 C)

C (1 p, 2 C)

England (3 p)

Austria (1 p, C)

Italy (3 p, 1 C)

Netherlands (3 p)

Denmark (1 p)

77 centros planejados incluindo 11 novos países

Spain (2 p)

Belgium (1 p)

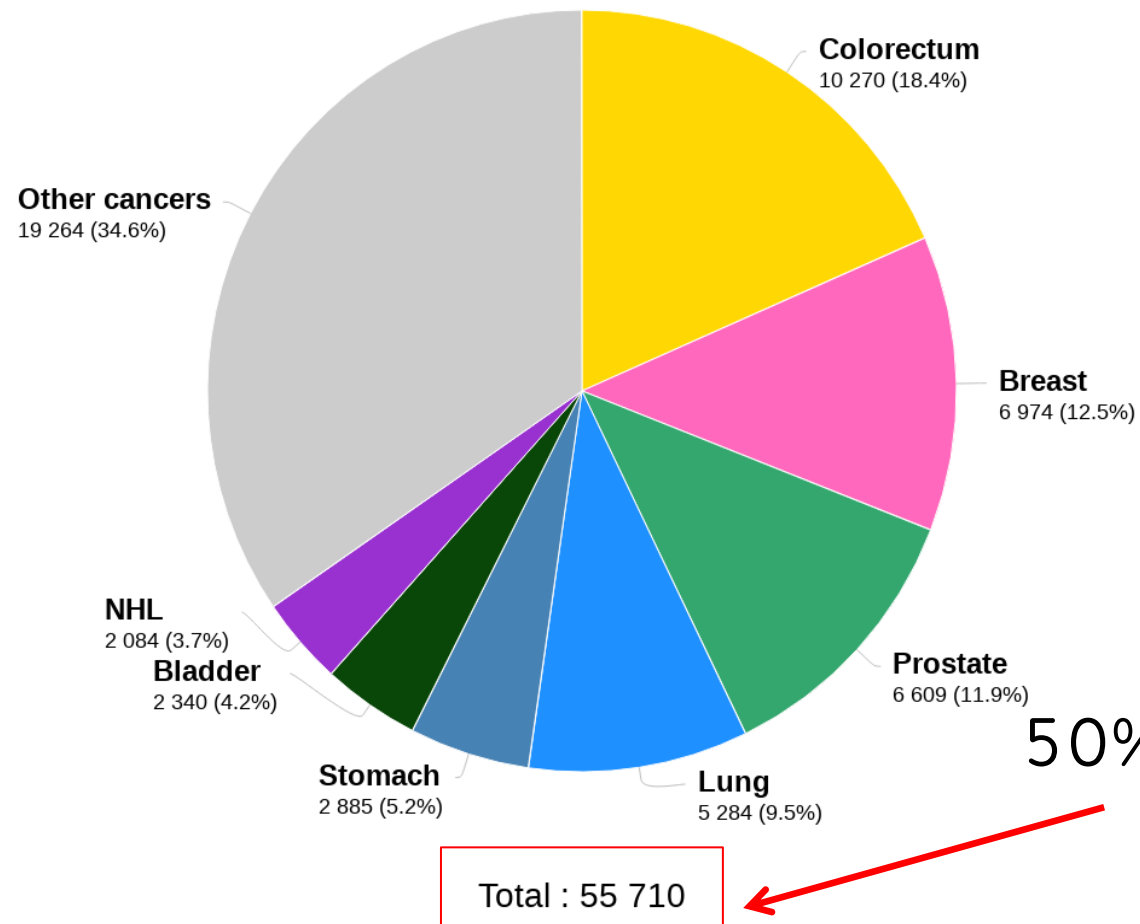
Norway (2 p)

166 centros em 31 países

E em Portugal?

Incidência de diferentes tipos de cancro em Portugal

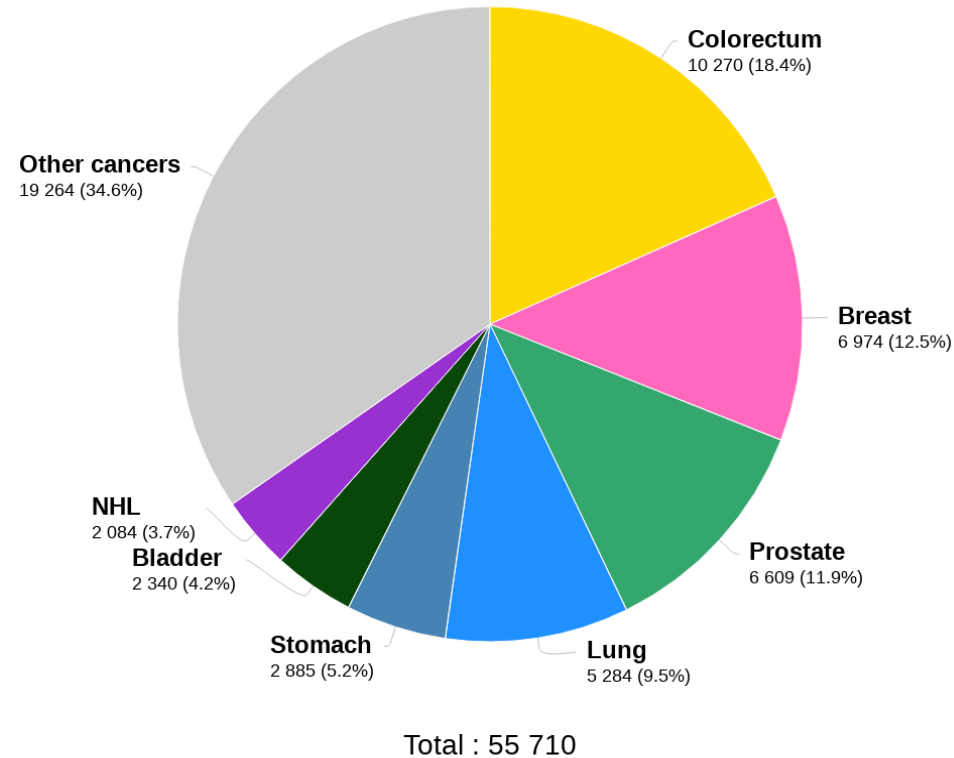
Estimated number of new cases in 2018, Portugal, all cancers excl. NMSC, both sexes, all ages



50% beneficiam com radioterapia

Incidência de diferentes tipos de cancro em Portugal

Estimated number of new cases in 2018, Portugal, all cancers excl. NMSC, both sexes, all ages



Pacientes estimados com recomendação para terapia com protões

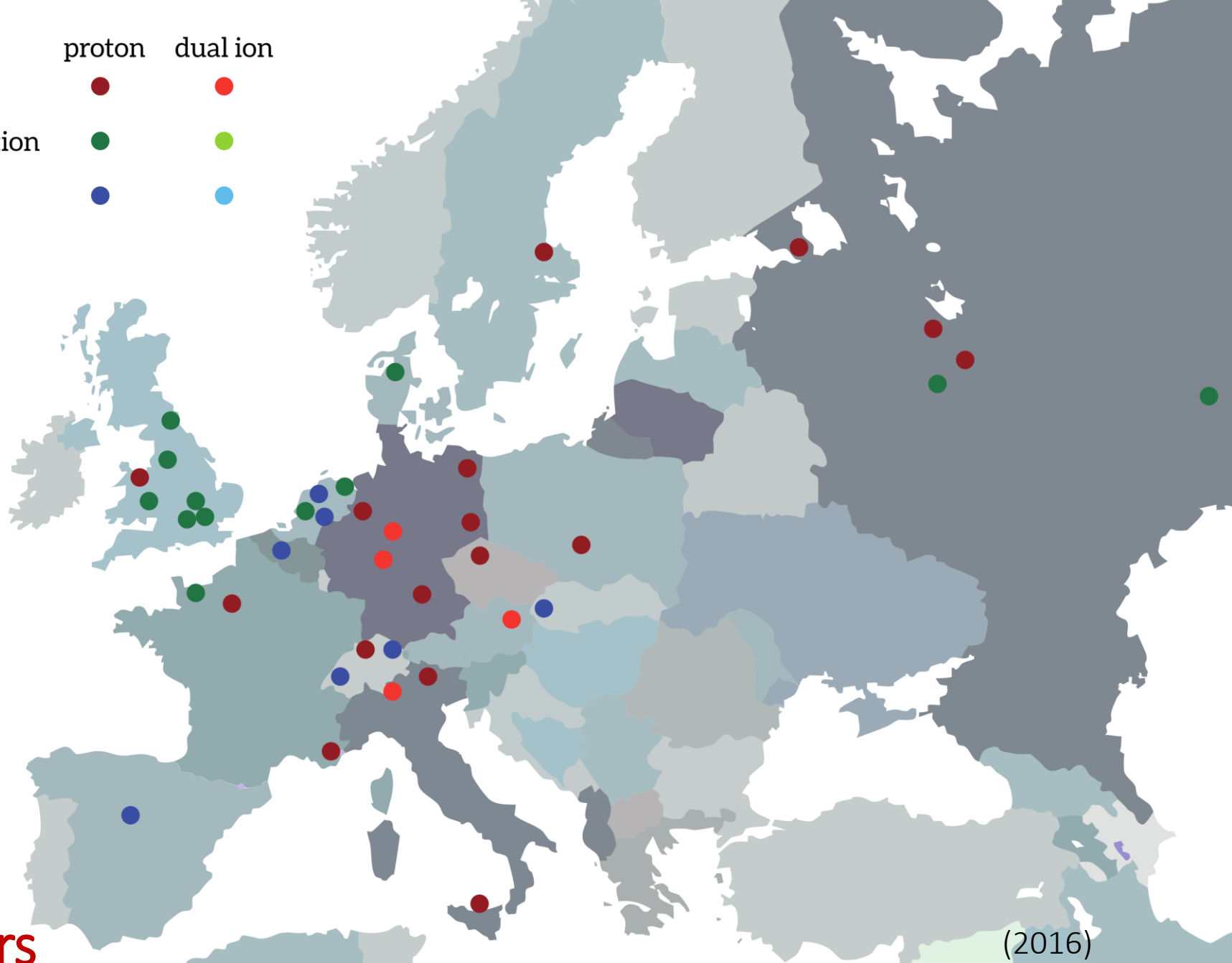
15% dos pacientes recomendados para radioterapia (50% of Total): 4200 pacientes/ano

2017 Hirohiko Tsujii „Overview of Carbon-ion Radiotherapy“ Journal of Physics: Conf. Series 777 (2017) 012032

Europa

Portugal
T0+3 years

- | | proton | dual ion |
|--------------------|--------|----------|
| in operation | ● | ● |
| under construction | ● | ● |
| being planned | ● | ● |



(2016)

Tecnologias da Física de Partículas

- Linhas de feixe e aceleradores
- Desenvolvimento de detectores e instrumentação
- Simulação de detectores
- Blindagem por radiação
- Análise de dados / Técnicas de reconstrução de imagem

