وزارة التعليم العالي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION

الجمهورية العربية السورية

الفصل الثالث عشر

النكليدات الإشعاعية والطب النووي

Radionuclides &

Nuclear Medicine

أهداف هذا الفصل

- التعرف على النكليدات المشعة المستخدمة في تشخيص الأورام أو معالجتها في الطب النووي
- دراسة طرائق التصوير في الطب النووي
  - التصوير الومضاني Scintigraphy
  - التصوير المقطعي الإصداري الأحادي الفوتون SPET

Single Photon Emission Tomography

  - التصوير المقطعي الإصداري الثنائي الفوتون PET

Positron Emission Tomography

Two Photon Emission Tomography

- المعالجة في الطب النووي Radiotherapy

تقفي أو تعقب أثر التفاعلات الحيوية والفيزيولوجية

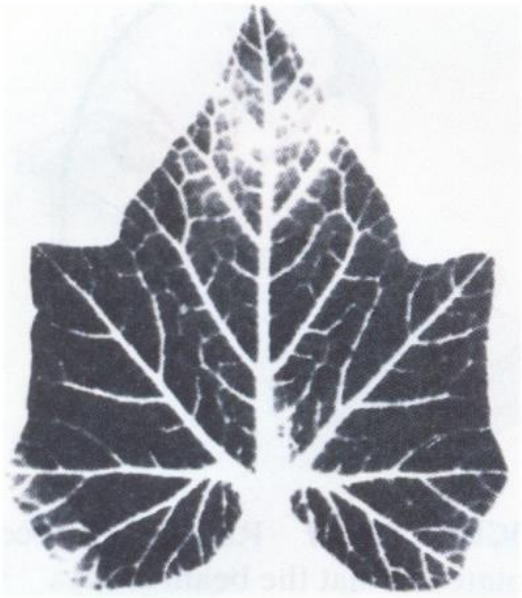
يشيع استخدام النكليدات أو النظائر ذات النشاطية الإشعاعية في البحوث الحيوية والطبية ككقفاءات tracers تقتفي أثر التفاعلات الحيوية والفيزيولوجية.

يتم عملياً إدخال أحد النظائر المشعة كالكربون $^{14}_{6}C$ أو التريتيوم $^{3}_{1}H$ في الجزيئات التي تحقن في الجسم.

إذْ يمكن تعقب الجزيئات الموسومة في أثناء حركتها في العضوية أو عندما تخضع إلى تفاعلات كيميائية.

يمكن الكشف عن وجود هذه الجزيئات الموسومة (أو عن أجزاء منها إذا كانت تخضع لتحول كيميائي) بعداد غايغر Geiger أو بعدَّاد ومضاني .

التصوير الشعاعي الذاتي



(a)

(b)

مثال عن التصوير الشعاعي الذاتي

(a)صورة شعاعية ذاتية لورقة نباتية تعرضت لـ $^{14}CO_2$ مدة ثلاثين ثانية.

(b) صورة تظهر انقسام الدنا

يتم الكشف عن الإشعاع الصادر بعداد غايغر ملر أو بعدَّاد ومضاني.

تكشف هذه التقنية عن مواقع النظير المشع على فلم. تعد هذه التقنية مفيدة جداً في تعقب طرائق انتقال الغذاء في النباتات. يمكن مثلاً مراقبة توزع الكاربوهدرات التي يولدها ثنائي أكسيد الكربون الممتص في أوراق النباتات، بالإبقاء على النبات في جو من غاز ثاني أكسيد الكربون الذي تكون ذرة الكربون فيه النظير 14.

2- توضع ورقة نباتية، بعد ذلك، بإحكام على فلم تصوير ضوئي فيؤدي الإشعاع الصادر إلى تعتيم الفلم بشكل أكبر حيث يتركز النظير.

3- يبين الشكل أعلاه صورة شعاعية ذاتية لورقة نباتية تعرضت لثنائي أكسيد الكربون المشع ـ مدة ثلاثين ثانية.

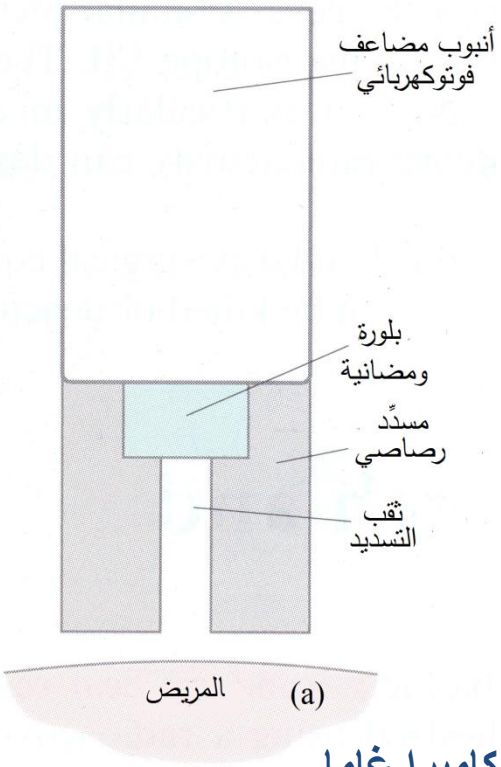
4- وقد أصبح نسيج التركيب الضوئي (الأخضر) نشِطاً إشعاعياً ومسوِّداً لفلم التصوير الضوئي (فلم التصوير الشعاعي بالأشعة السينية)؛ وأما نسيج العروق الذي لا يقوم بالتركيب الضوئي الخالي من ثنائي أكسيد الكربون المشع فلا يُسوِّد فلم التصوير الضوئي.

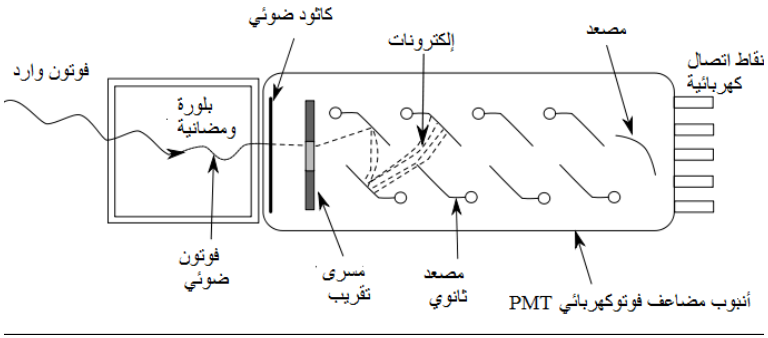
5- وقد كشف التصوير الشعاعي الذاتي باستخدام النكليوتيدات الموسومة (مكوِّنات الدنا) تفاصيل كثيرة عن استنساخ الدنا.

النكليدات الشائعة المستخدمة في التشخيص الطبي

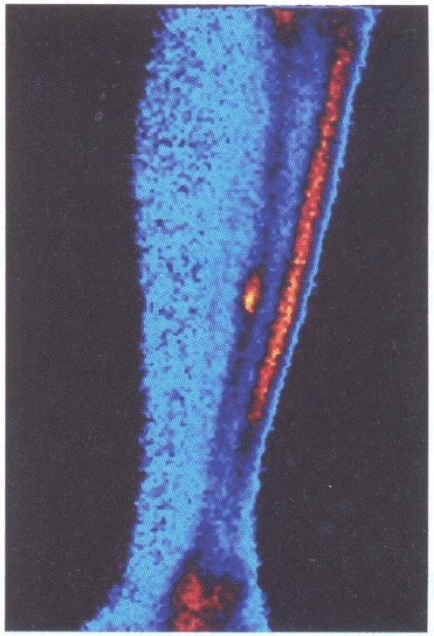
- يشيع في التشخيص الطبي **medical diagnosis**
- استخدام **النكليد الإشعاعي radionuclide المماكب** $^{99m}_{43}Tc$ ، وهو التكنسيوم 99 الذي يتميز **بحالة مثارة طويلة العمر** والذي يتم الحصول عليه عندما يتفكك المولبيدن $^{99}_{42}Mo$.
- يتميز هذا النظير بملاءمة عمر نصفه الذي يبلغ 6 ساعات.
- يتميز بإمكانية اتحاده مع عدد كبير من المركبات التي تحقن في الجسم وتستقر في مكان الإصابة.

الكاشف المستخدم في تقنيات التشخيص الطبي





بنية المضاعف الفوتوكهربائي



(a). كاشف لأشعة غاما مسدَّد، يمسَح به الجسم. (b)صورة بكاميرا غاما لساق تعاني كسر التعب بالكشف عن أشعة غاما الصادرة من $^{99m}_{43}Tc$ (الصورة بالألوان الاصطناعية).

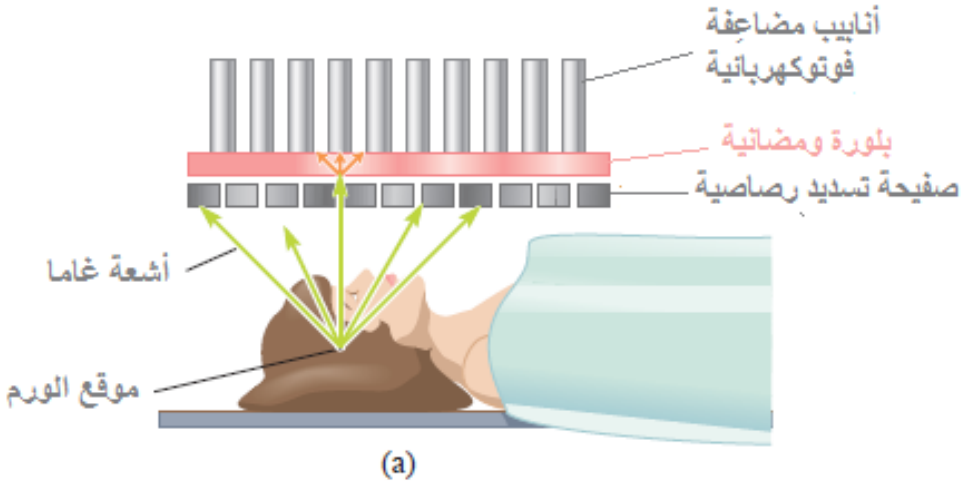
1- يتم في بادئ الأمر شرح مكونات الكاشف (a) الذي يتكون من مسدد رصاصي وبلورة ومضانية وأنبوب مضاعف فوتوكهربائي.

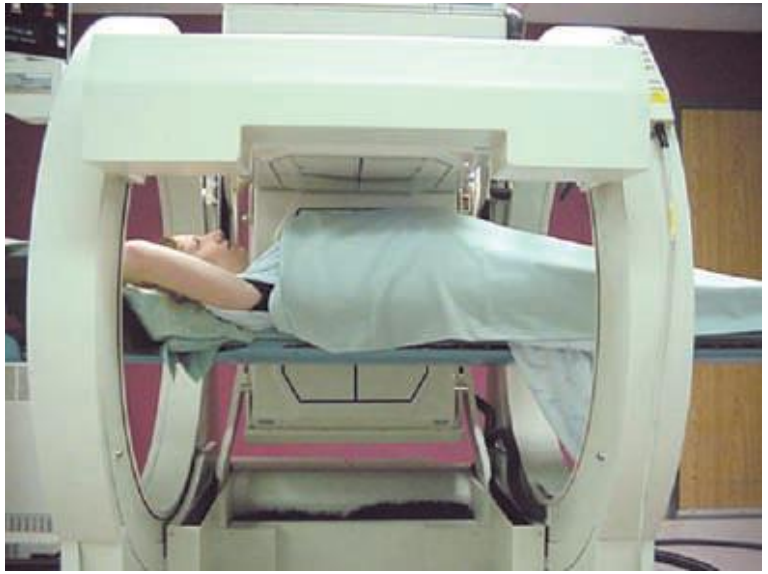
2- التذكير بأنه سبق لنا المرور بمفهوم الفلورة لدى دراسة كل من الأشعة السينية وفلورة النقاط الكمومية لدى دراسة الليزر وظاهرة الومضان هنا ظاهرة مماثلة.

3- لدى الحديث عن المضاعف الكهربائي يتم البدء بتحويل الأشعة التي تصدرها البلورة الومضانية (بعد امتصاصها لفوتون غاما) إلى إشارات كهربائية تتم مضاعفتها بالإلكترودات الثانوية في المضاعف الفوتوكهربائي.

4- ثم الحديث عن صورة القدم كما ورد في التعليق.

كاميرا آنجيه والتصوير الومضاني





كاميرا آنجيه الغاماوية

1- تتضمن كاميرا غاما الأكثر تعقيداً عدداً كبيراً من الكواشف التي تسجل النشاطية الإشعاعية في العديد من النقاط في الوقت نفسه، وهي الكاميرا التي أصبحت تعرف حاليّاً باسم غاما كاميرا (المصوِّرة غاما)، وفتحت الطريق واسعاً أمام تقنيّات التصوير التشخيصيّ في الطبّ النوويّ.

2- يمكن عرض الشدات المقيسة على شاشة تلفزيون أو حاسب، كما تسمح بإجراء دراسات دينميكية (أي من خلال الصور التي تتغير بدلالة الزمن).

3- تجد في الشكل أعلاه (الأيسر) مخططاً لكاميرا أنجيه الغاماوية. إذْ يتراكم النظير المشع في موقع الورم ويصدر أشعة غاما، ويتم الكشف عن الفوتونات التي تعبر ثقوب صفيحة التسديد الرصاصية. وتجد في الشكل أعلاه (الأيمن) صورة لكاميرا آنجيه برأسي كشف. أحد الرأسين فوق صدر المريضة في حين يقع الرأس الثاني إلى يسارها.

التصوير الومضاني التشخيصي

- نحصل في التصوير الومضاني Scintigraphy على صور ثنائيّة البعد للجزء المصوّر من جسم المريض،
- يستخدم في الكشف عن الكسور بأنواعها والالتهابات العظمية وصولاً إلى سرطان العظم
- و في الكشف عن الحالات المرضيّة للشرايين الإكليلية ويسمح بتقييم الحالة الوظيفيّة للعضلة القلبيّة بشكلٍ عام، تستخدم فيه مادة دوائية موسومة بمماكب التكنسيوم ^{99m}Tc.
- وفي الكشف عن أورام الغدّة الدرقيّة، ويمكن في هذه الحالة استخدام مماكب التكنسيوم ^{99m}Tc، أو اليود المشعّ ^{131}I.

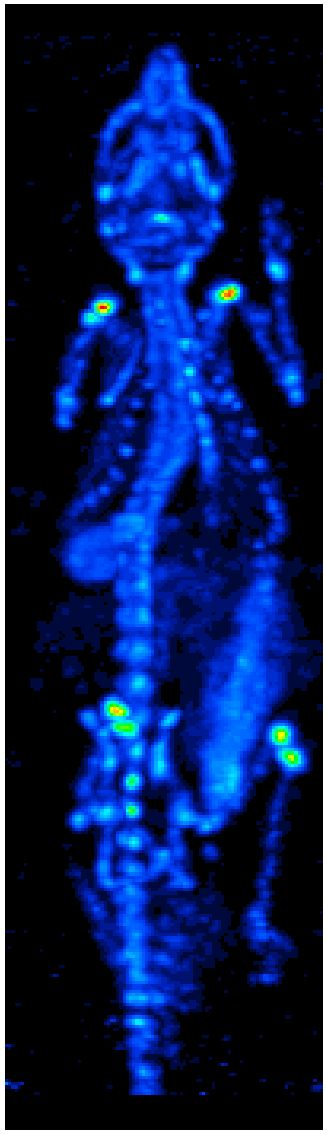
التصوير الومضاني التشخيصي

التصوير المقطعي المحوسب بالإصدار الأحادي الفوتون

جهاز الـSPECT المزوّد برأسي كاميرا غاما للتصوير المقطعي لكامل الجسم (تشخيص أمراض العظام).

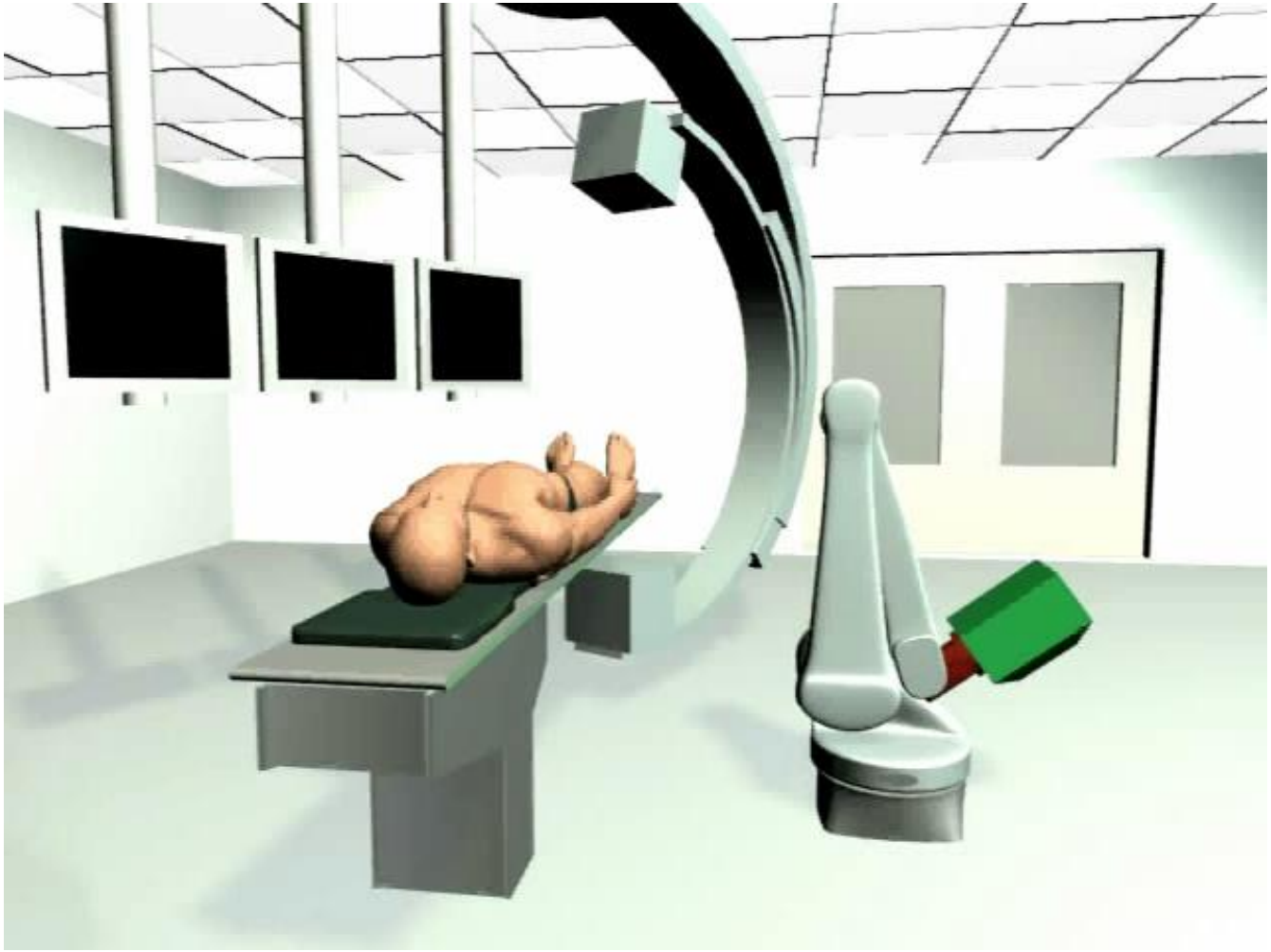
1- من أهم تقنيّات التصوير في الطبّ النوويّ، وتتميّز من التصوير الومضانيّ التقليديّ بإمكانيّة الحصول على صورة ثلاثيّة البعد للعضو المصوّر، وتعتمد في ذلك على تصوير مقاطع عرضيّة عديدة للمنطقة المراد تصويرها ومعالجة الصور وإعادة بنائها حاسوبيّاً باستخدام برمجيات خاصة.

2- نحتاج لتطبيق هذه التقنيّة، كما في حالة التصوير الومضانيّ، إلى إعطاء المريض نظيراً مشعّاً مصدراً لأشعة غاما، ويجري ذلك عادةً بواسطة الحقن الوريدي. يكون النظير المشعّ المستخدم، في بعض الأحيان، عبارةً عن أيون قابل للذوبان في محلولٍ مناسب للحقن الوريدي كنظير الغاليوم (Gallium) مثلاً، إلّا أنّه، في غالب الأحيان، يُحقن المريض قبل التصوير بالصيدلانيّة الإشعاعيّة المناسبة (أي المركّب المكوّن من المادة العضوية الموسومة بالنظير المشع). ويتم الكشف عن تركيز المادة المشعة في جسم المريض باستخدام كاميرا غاما.



صورة لعظم فأر بطريقة التصوير
المقطعي الإصداري الأحادي الفوتون
SPECT Single Photon
Emission Computerized
Tomography

التصوير المقطعي المحوسب بالإصدار الأحادي الفوتون



التصوير المقطعي المحوسب بالإصدار الأحادي الفوتون

- تسمح تقانة الـ SPECT بمراقبة مستوى النشاط البيولوجي في كلّ موضعٍ من المنطقة المصوّرة،
- إذْ تدلّ الإشعاعات الصادرة عن النظير المشع على مقدار تدفّق الدمّ في الأوعية الشعريّة،
- وبما أنّ الصورة التي نحصل عليها باستخدام كاميرا غاما عبارة عن مسقط ببعدين لتوزّع النظير المشعّ في المنطقة المصوّرة، يجري أخذ عدد كبير من هذه الصور ذات البعدين (المساقط) من زوايا مختلفة،

التصوير المقطعي المحوسب بالإصدار الأحادي الفوتون

- ويستخدم الحاسوب لبناء الصورة ثلاثية البعد باستخدام برمجيات خاصة لذلك.
- نرى هنا التشابه بين هذه التقنيّة وتقنيّات التصوير الأخرى كالتصوير بالتجاوب المغنطيسي MRI(الفصل22)
- أو التصوير الطبقي المحوري بالأشعة السينية X-ray CT (الفصل5)،
- وكذلك التصوير بالإصدار البوزتروني PET الفقرة التالية)، إذْ تُعالج المعطيات المتضمّنة في الصور المقطعيّة للتمكّن من رؤية تفاصيل مقاطع رقيقة على طول المحور المصوّر لجسم المريض.

- تستخدم، لإجراء التصوير بتقنية الـ SPECT، الصيدلانيّات المشعّة نفسها المستخدمة في التصوير الومضاني ثنائيّ البعد، ذلك أنّ كلتا التقنيّتين تعتمدان كاميرا غاما لتسجيل الإشعاع الصادر عن جسم المريض، إلا أنّه في حالة التصوير المقطعي بالإصدار الأحادي الفوتون، يتم تدوير كاميرا غاما حول المريض، وتؤخذ الصور المقطعية (المساقط) عند نقاط محددة أثناء الدوران (تقريباً كلّ 6-3 درجات). وفي معظم الحالات يجري أخذ الصور على دورة كاملة حول جسم المريض (360 درجة)، مما يساعد على أمثَلة عملية معالجة الصور وبناء الصورة ثلاثية البعد والوصول إلى الدقّة المطلوبة. تستغرق عملية التصوير نحو 15-20 s للمقطع الواحد، مما يعطي زمن تصوير كلّي نحو 15 -20 min.

ضرورات التصوير المقطعي الأحادي الفوتون

- عندما لا يكون التصوير الومضاني كافياً
- تصوير تروية العضلة القلبية
- تصوير الدماغ الوظيفي .... الخ

التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني أو الثنائي الفوتون

- تستخدم مجموعة من النظائر المشعة مصدرة للبوزترونات ذات أعمار نصف قصيرة نسبيّاً
- كالكربون11(20min) والأكسجين 15(2min) ، والفلور(110min) 18، والآزوت (10min) 13،
- يجري تضمين هذه النظائر المشعة في مركبات يستهلكها جسم الإنسان كالغلوكوز والماء.

- 1- ومن ناحية عملية، ونظراً لقصر أعمار النصف للمصدرات البوزترونية، يتمّ إنتاج هذه الأخيرة باستخدام مسرّعات ينبغي أن توجد في نفس المراكز الطبيّة، وتحضير الصيدلانيّات المشعّة أيضاً فيها ممّا يرفع تكاليف هذا النوع من التصوير التشخيصي.

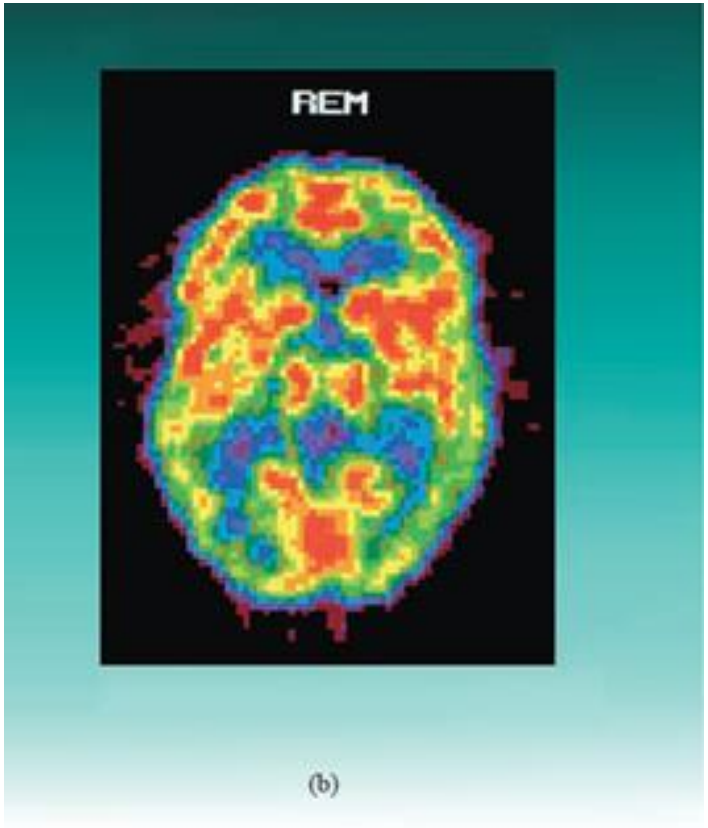
التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني أو الثنائي الفوتون

- في معظم حالات التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني يُستخدم الـ الديوكسي غلوكوز الموسوم بالفلور18 FDG fluorodeoxyglucose
- وهو جزيء شبيه السكر الموسوم بالمصدر البوزتروني ^{18}F، لحقن المريض قبل إجراء التصوير، ويدلّ توزّع النظير المشعّ ^{18}F، في المنطقة المصوّرة على نشاط النسيج الاستقلابي بالاعتماد على امتصاص هذا النسيج لمادة الغلوكوز.

1- يقطع البوزترون الصادر مسافة لا تتجاوز بضعة ملمترات في النسيج، يفقد خلالها طاقته الحركية، قبل أن يتّحد مع إلكترون في تفاعل الفناء منتجاً زوجاً من الفوتونات غاما. يقوم الكاشف الوميضي في جهاز التصوير بالكشف عنهما بشكلٍ متزامن. ينتج عن عملية الكشف ومضة ضوئية، يجري تحويلها إلى إشارة كهربائية في المضاعفات الضوئية التي تقوم أيضاً بتضخيم الإشارة الكهربائية في مساريها المتعدّدة، ويستخدم في بعض الأحيان ديودات ضوئية من السلكون لنفس الغاية.

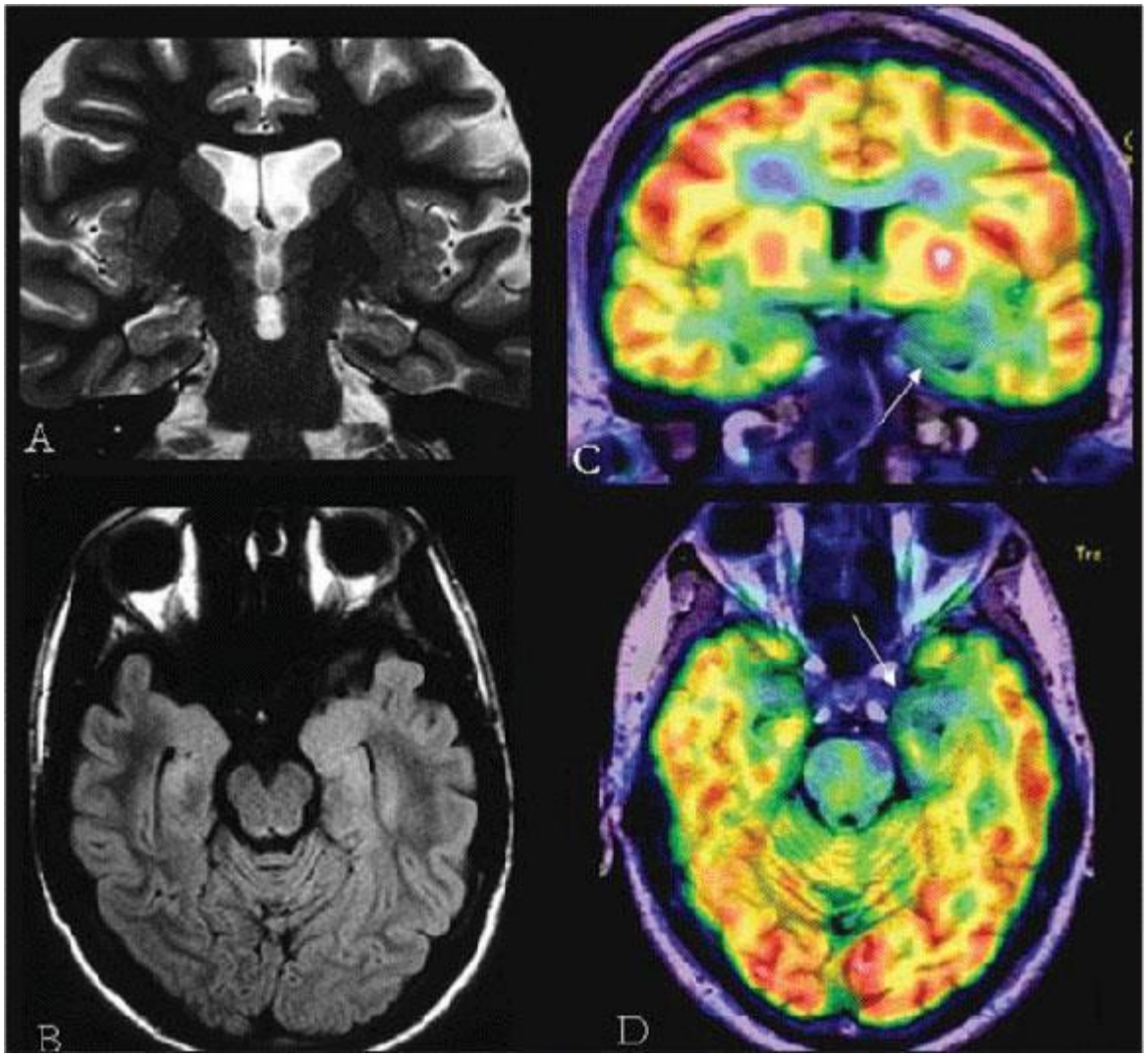
التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني أو الثنائي الفوتون

يستخدم التصوير المقطعي البوزتروني حلقة من الكواشف الومضانية في الحالة النموذجية مقترنة بمضاعفات فوتوكهربائية في الكشف عن شعاعي الفناء البوزتروني $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ الصادرين في اتجاهين متعاكسين.



توزّع نظير المصدر للبوزترونات في الدماغ، والحصول على صورة وظيفيّة.

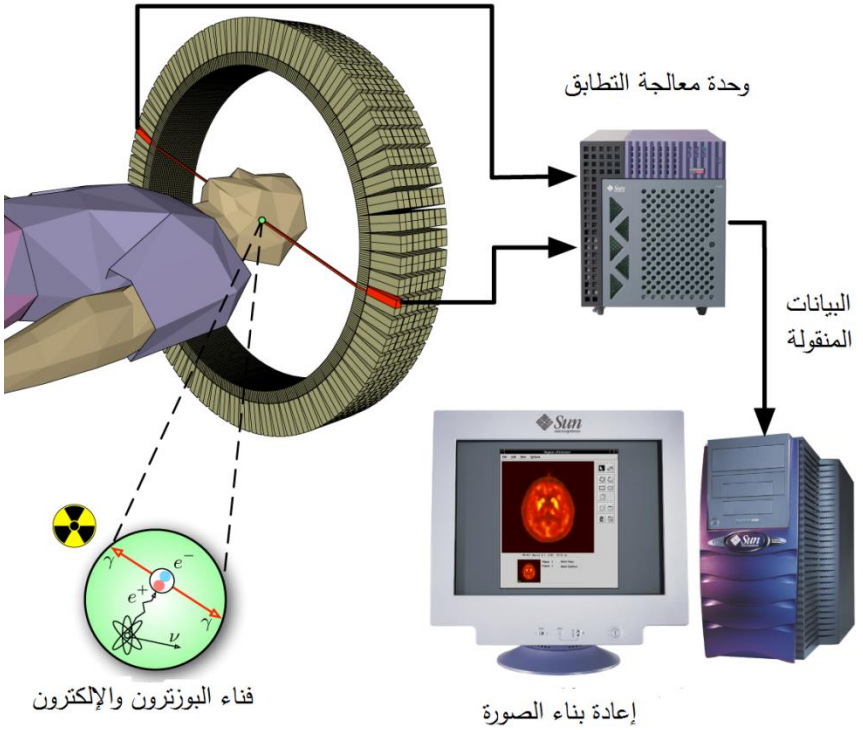
صورتان بالرنين المغنطيسي (إلى اليسار) لشخص مصاب بالصرع باستخدام تعاقبين مختلفين من تعاقبات نبضات التواتر الراديوي المستخدمة في الرنين المغنطيسي، لم يظهر فيهما أي تغير.



صورتان مقطعيتان (إلى اليمين) تم الحصول عليهما بالتسجيل المشترك لـ PET/MRI تُظهران منطقة في الحصين إلى اليمين (السهم في كل صورة) فيها انخفاض في المعدل الاستقلابي.

1- يجب التأكيد على أنه لمعرفة موضع الورم أو الإصابة على صور تقنيات الطب النووي لا بد من إسقاط هذه الصور على صور مرافقة بالأشعة السينية ل أو بالرنين المغنطيسي كهذه الحالة

التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني أو الثنائي الفوتون

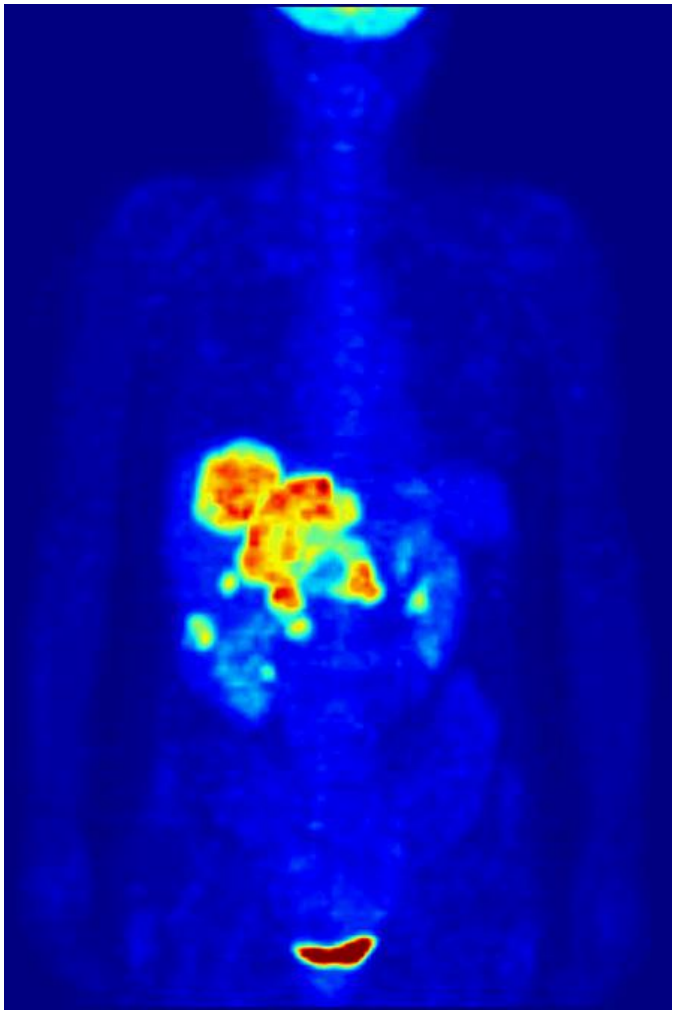


جهاز التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني أو PET.

1- التصوير المقطعي البوزتروني Positron Emission Tomography- PET أو Two Photon Emission Tomography- TPETتقنيّة تصوير وظيفي تُستخدم في الطبّ النوويّ وتسمح بالحصول على صورة ثلاثيّة البعد للعمليات الوظيفية في جسم المريض. في هذه التقنيّة، يتمّ حقن المريض بالصيدلانيّة الإشعاعيّة (وهي جزيء بيولوجي موسوم بنظير مشع مصدر للبوزترونات أو أشعة بيتا الموجبة)، ومن ثمّ يتمّ الكشف عن زوج الفوتونات غاما الصادرة عن اتّحاد البوزترون بعد فقده لطاقته الحركية مع إلكترون في تفاعل الفناء Annihilation Reaction.

2-هنا أيضاً نحصل على صور لتوزّع المادة المشعّة في جسم المريض، وتتمّ معالجة هذه الصور وإعادة بنائها حاسوبياً للوصول إلى الصورة التي تسمح بالتشخيص الطبي.

يتشابه التصوير المحوسب بالإصدار الفوتوني الأحادي أو الـ SPECTمع التصوير بالإصدار البوزتروني أو الـ PET، إلّا أنّ الفرق الأساسيّ بين التقنيّتين يعود إلى أنّ النظائر المشعّة المستخدمة في التصوير بالإصدار الفوتوني الأحادي، تصدر أشعة غاما بشكلٍ مباشر بينما تُصدر النظائر المستخدمة في التصوير بالإصدار البوزتروني بوزترونات لا تلبث أن تفنى لينتج عنها فوتونا غاما طاقة كلٍّ منهما 0.511 MeV، باتّجاهين متعاكسين. يساعد هذا الإصدار المتزامن لزوج الفوتونات على إعطاء معلومات أكثر دقّة عن الإشعاع الصادر من حيث مكان الإصدار، وهذا يسمح بالحصول على مقدرة فصلٍ مكانيّة spatial resolution power عالية في صور الإصدار البوزتروني.



مسح كامل الجسم بالتصوير المقطعي الإصداري الثنائي الفوتون باستخدام الديوكسي غلكوز (مماثل للغلوكوز) الموسوم بالفلور 18

Whole-body PET scan using 18F-FDG

التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني أو الثنائي الفوتون

آلية عمل ماسح PET

- يتم إدخال سكر في جسم الإنسان موسوم بنكليد إشعاعي، في الدورة الدموية في الحالة النموذجية. تتميز الخلايا الورمية عن الخلايا السليمة بارتفاع استهلاكها للسكر، وبالتالي أينما كان موقع النسيج المصاب، تستهلك الخلايا السرطانية السكر من القفاء، الذي يحرر جسيمات مشحونة إيجابياً، تدعى بوزترونات. سرعان ما يقترن كل بوزترون بإلكترون حر داخل الجسم، ويتفانى الجسيمان مولدين زوجاً من الفوتونات. ينطلق الفوتونان في اتجاهين متعاكسين، راسمين خطاً مستقيماً إذا لم ينتثر أحدهما.

آلية عمل ماسح PET

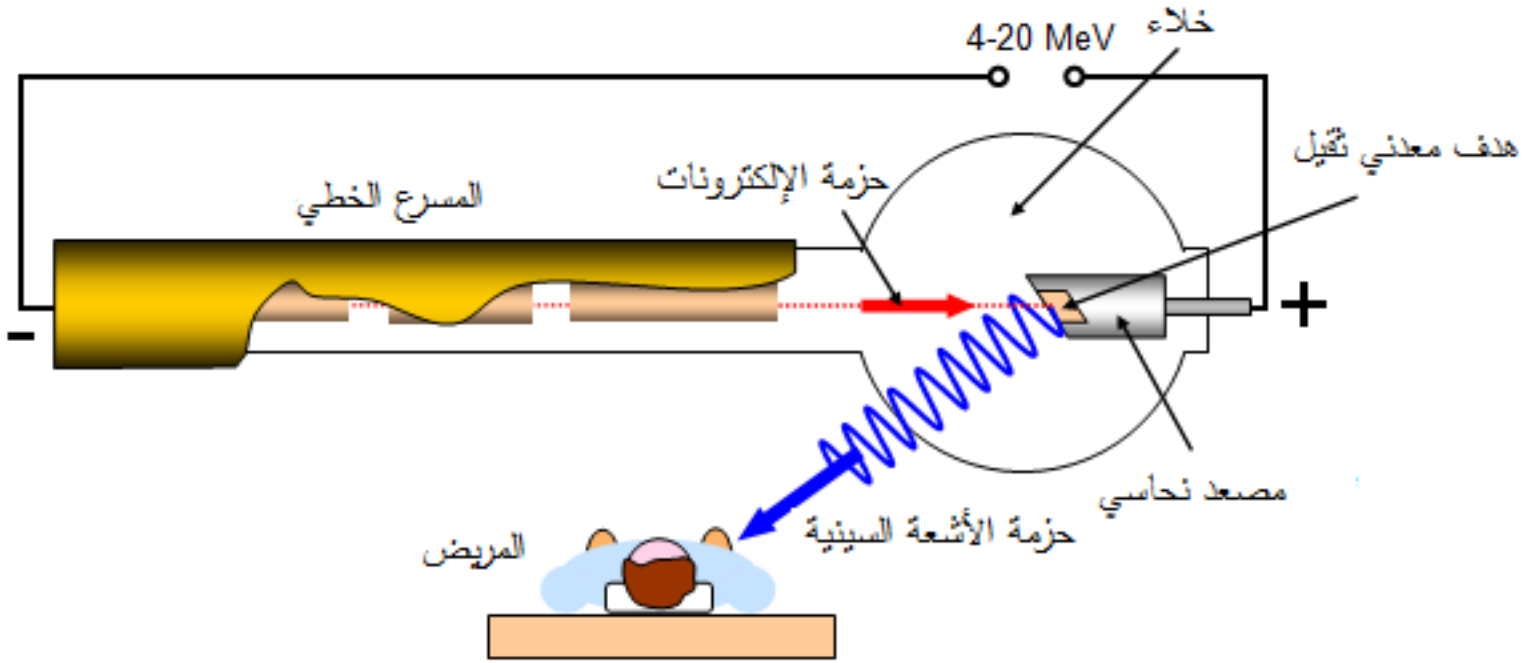
- تصدر ملايين أزواج الفوتونات وتصل إلى حلقة الكاشف. تتقاطع intersect الفوتونات مع جدران الحلقات لتشير marking إلى نهاية الخطوط المستقيمة. يدل تقاطع عدة خطوط على الموقع الدقيق للتركيز المرتفع للنظير . وبقدر ما تكون الخلية السرطانية أكثر نشاطاً، يكون استهلاكها للسكر أكبر، وتركيز النظائر أعلى، ومن ثم معدل إصدار البوزترونات أعلى. **يسمح جمع مئات ملايين النقاط لبرمجيات حاسبية معقدة ببناء نموذج ثلاثي الأبعاد (صورة ثابتة) أو رباعي الأبعاد (تتغير مع الزمن) للنسج السرطانية وتركيزها.**

مقارنة بين صور PETوSPECT وCT Scan

- يمكن لكل من التقنيتين PET وSPECT أن تعطي صوراً ترتبط بالكيمياء الحيوية والاستقلاب والوظيفية.
- بينما تعكس صور مسوحات الأشعة السينية، شكل وبنية المنطقة المصورة، أي تشريحيتها.

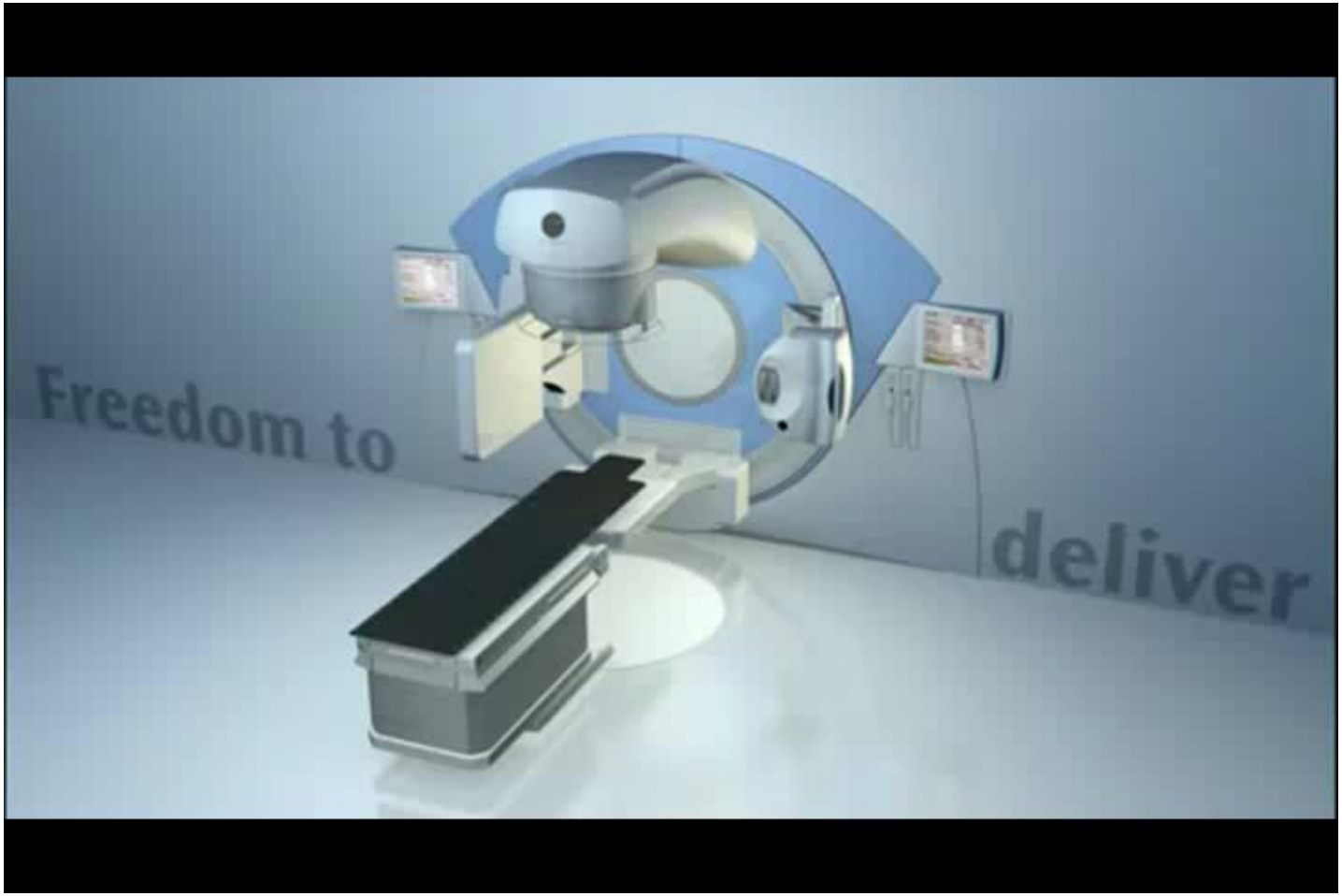
الطب النووي ومعالجة الأورام

المعالجة عن بعد، أو باستخدام حزمة إشعاعية خارجية



المسرع الخطي وحزمة الأشعة السينية المستخدمة في معالجة المريض

المعالجة بالمسرع الخطي



المعالجة بالمسرع الخطي

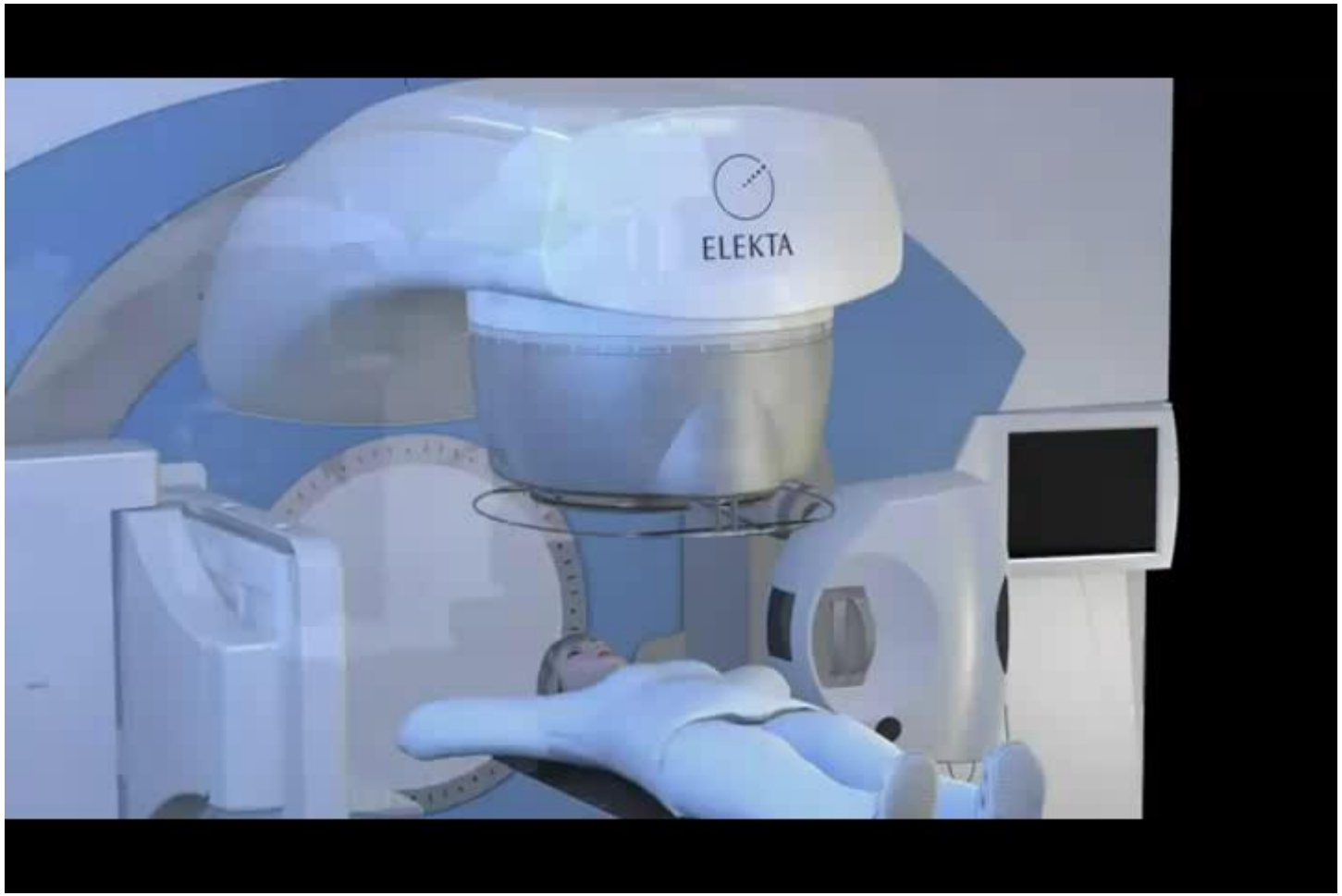
المعالجة بالمسرع الخطي

- يتم ضخ الأمواج المكروية عالية الطاقة التي يولدها المغنطرون ضمن الدليل الموجي للتسريع.
- يتزامن ذلك مع حقن الإلكترونات التي يولدها المدفع الإلكتروني ضمن الدليل الموجي للتسريع.
- تسرع الأمواج المكروية الإلكترونات ضمن دليل التسريع إلى سرعة تقارب سرعة الضوء.
- يتم توليد الحزمة الإشعاعية عندما تصطدم الإلكترونات المسرعة بهدف من التنغستن موجود على الطرف المعاكس من دليل التسريع.
- يتحكم المغنترون بطاقة وتواتر الأمواج وبالتالي يتحكم بطاقة الأشعة السينية المتولدة.
- يقع المدفع الإلكتروني المستخدم في المسرعات الخطية عند بداية دليل التسريع.
- يتم توليد الإلكترونات من خلال تسخين الفتيل الذي يمثل المهبط ومن ثم حقنها ضمن دليل التسريع.
- يمكن التحكم بعدد الإلكترونات المتولدة من خلال التحكم بدرجة حرارة الفتيل.

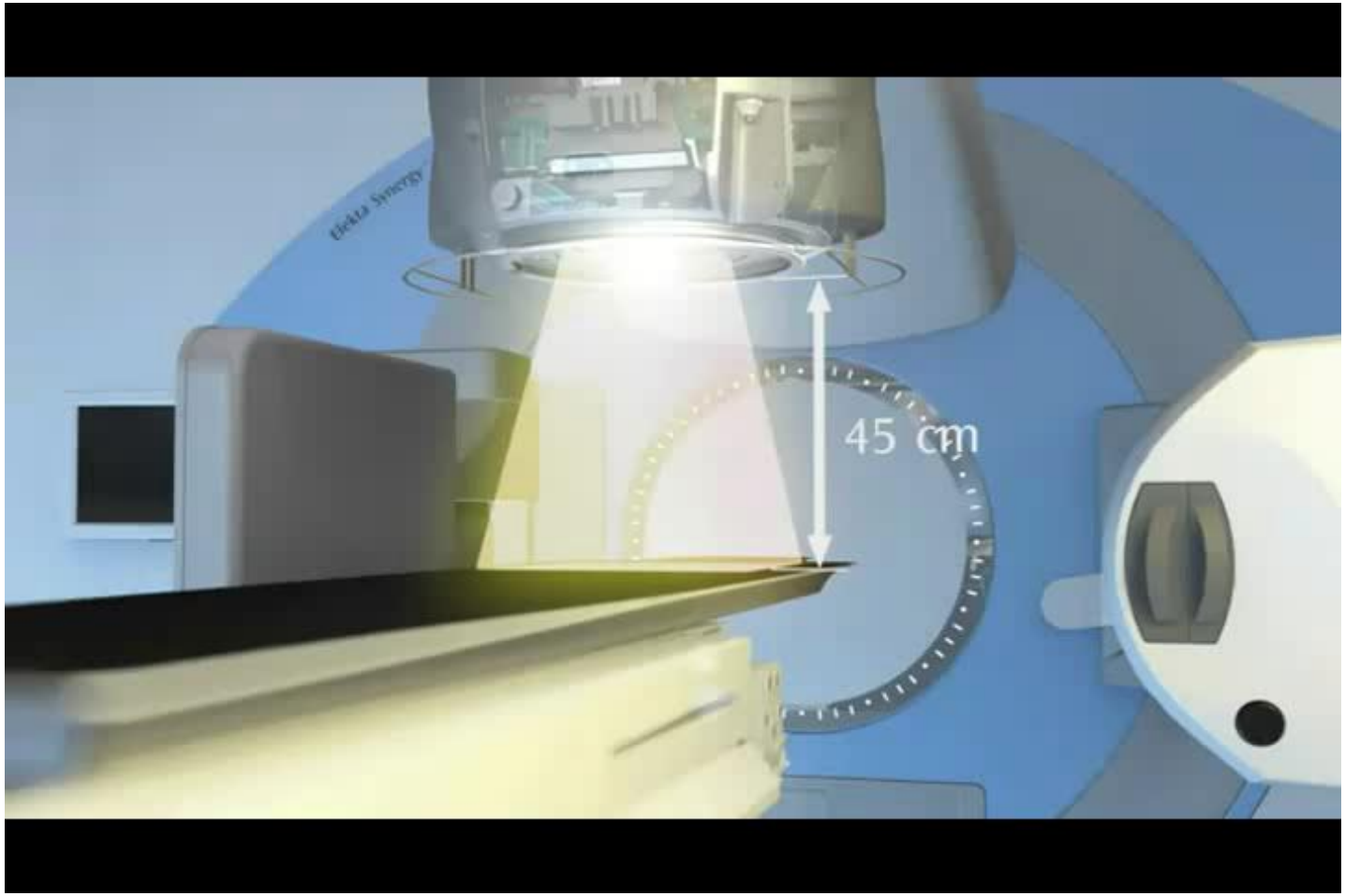
المعالجة بالمسرع الخطي

- تسرع الإلكترونات في دليل التسريع الذي يتألف من سلسلة من الحلقات النحاسية تحوي ثقوب فيما بينها تسمح للإلكترونات بالانتقال عبر دليل التسريع.
- يتم خلق خلاء ضمن دليل التسريع لضمان عدم تفاعل الإلكترونات مع أي جزيئات أخرى.
- يتم التحكم بتوجيه حزمة الإلكترونات من خلال مجموعتين من الوشائع تدعى وشائع التوجيه تحيط بدليل التسريع ومجموعتين إضافيتين من الوشائع لمحرقة الحزمة تدعى وشائع المحرقة.
- تصل الالكترونات على شكل حزمة دقيقة بقطر مماثل لرأس الدبوس.
- يتم تبريد كامل النظام بالماء.
- تغادر الالكترونات دليل التسريع لتدخل نظام نقل الحزمة حيث يعاد توجيه الحزمة لتواجه الهدف مباشرةً.
- يتم حني مسار الحزمة بواسطة مجموعة من المغانط لتصل إلى الهدف بقطر لا يزيد عن 1mm.
- تصمم المغانط بحيث يمكنها أن تحني حزم الإلكترونات ذات الطاقات المختلفة لتصيب الهدف في نفس المنطقة منه.

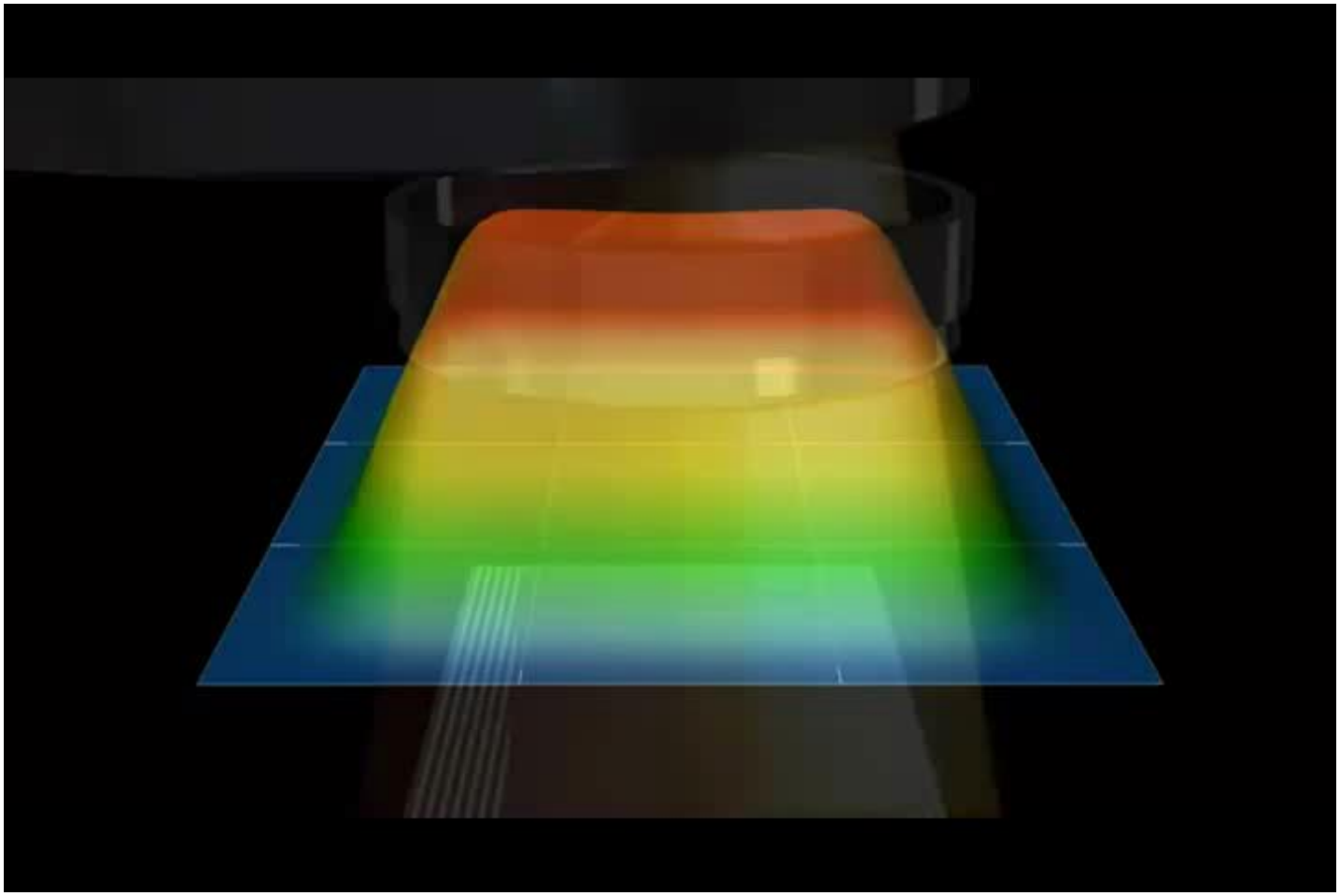
المعالجة بالمسرع الخطي



المعالجة بالمسرع الخطي

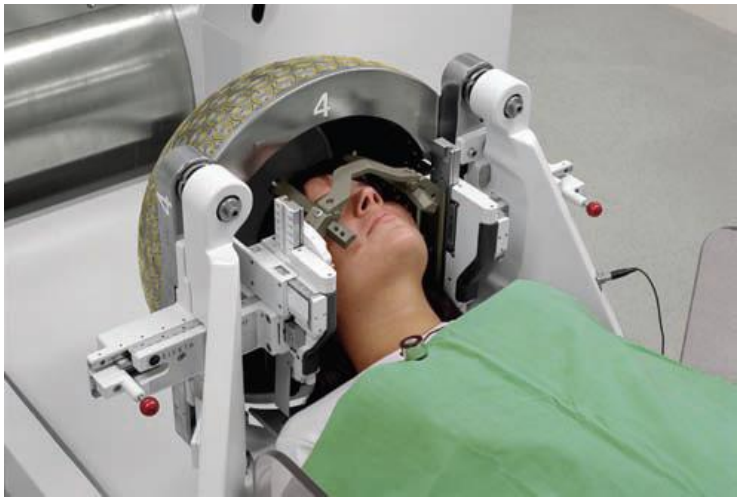


المعالجة بالمسرع الخطي

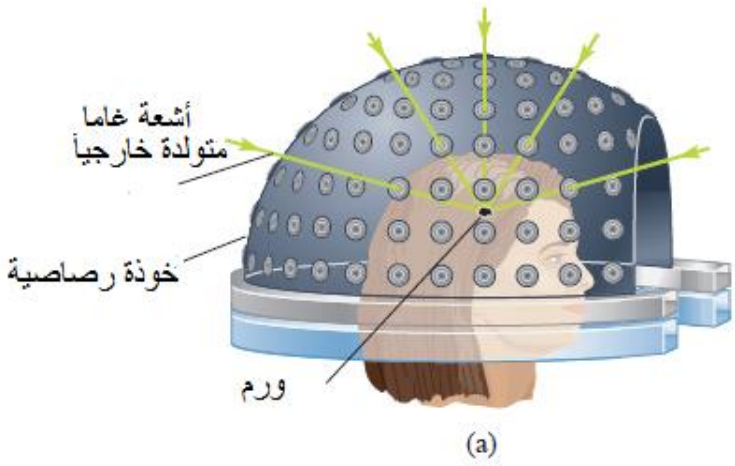


الطب النووي العلاجي

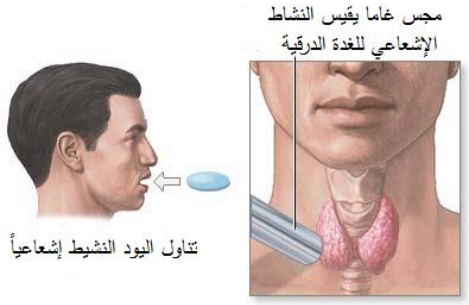
المعالجة عن قرب



المعالجة الإشعاعية: المشرط الغاماوي



شكل تخطيطي للخوذة الرصاصية المستخدمة في الجراحة الشعاعية بالمشرط الغاماوي.



المعالجة الإشعاعية باليود 131 للغدة الدرقية.

المشرط الغاماوي

المعالجة عن قرب

المعالجة عن قرب

آثار اشعاع ووحداته

التعرض _ الرونتجن R تقابل إحداث 1.61×10^{15} فرداً من الإيونات في كل كيلوغرام من الهواء الجاف. تحمل شحنة كهربائية قدرها كولوناً 2.58×10^{-4}.

- نسبة جزيئات الهواء التي تتأين بفعل الرونتجن:
-

$$\frac{1.61\times10^{15}}{2\times\frac{1000}{29}\times6.06\times10^{23}}\approx4\times10^{-9}\ \%$$

آثار الإشعاع ووحداته

- الطاقة الوسطية اللازمة لإحداث إيون واحد في الهواء

5.4×10^{-18} جولاً

الطاقة الممتصة في الهواء المقابلة لتعرض قدره $1R$

$$1.61\times10^{15}\times5.4\times10^{-18}=8.69\times10^{-3}\ J/kg$$

أي 0.00869 جولاً لكل كيلوغرام في الهواء

الطاقة المتوضعة في النسيج، الموافقة لتعرض قدره ($1R$)

تقابل $9.6\times10^{-3}\ J/kg$

آثار اشعاع ووحداته

. جرعة الإشعاع الممتصة - الغري والراد

- الجرعة الممتصة ***Absorbed Dose*** هي مقياس لتوضع الطاقة في أي وسط، الناجم عن أنواع الإشعاع المؤين كافة.
- وحدة قياس الجرعة الراد

(RAD) *Radiation Absorbed Dose*

- التي تعرف بأنها توضع للطاقة بمعدل $0.01 J/kg$
- الغري $Gray\,(Gy)$ $1\,Gy = 1\,J/kg = 100\,rad$
- $1R$ في الهواء $1R = 8.69\times10^{-3} / 0.01 = 0.869\,rad$
- في النسيج البشري $1R = 9.6\times10^{-3} / 0.01 = 0.96\,rad$

آثار اشعاع ووحداته

- الجرعة المكافئة_ السيفرت والريم
- الجرعة المكافئة (رَيْم) =

الجرعة الممتصة (الراد) × عامل النوعية

- الريم REM
- RAD *Equivalent for Man*

- في الحالة التي يكون فيها عامل النوعية مساوياً الواحد يكون:

$$1\,Sv = 1Gy \times Q = 100\,rad \times Q = 100\,rem$$

الإشعاع وعامل النوعية

الجدول 13.1. عامل النوعية	
نوع الإشعاع	عامل النوعية Q
الأشعة السينية وغاما وبيتا	1
نترونات حرارية	2.3
نترونات سريعة وبروتونات	10
جسيمات ألفا	20

مدى الإشعاعات النووية في الهواء والأنسجة الحية

الجدول13.2. مدى الإشعاعات النوويةً في الهواء والأنسجةً الحيةً		
الإشعاع	المدى في الهواء	المدى في الأنسجة
ألفا	3 *cm*	0.04 *mm*
بيتا	300 *cm*	5 *mm*
السينية وغاما	كبير جداً	تعبر الجسم
نترونات بطيئة	كبير جداً	15 *cm*
نترونات سريعة	كبير جداً	تعبر الجسم