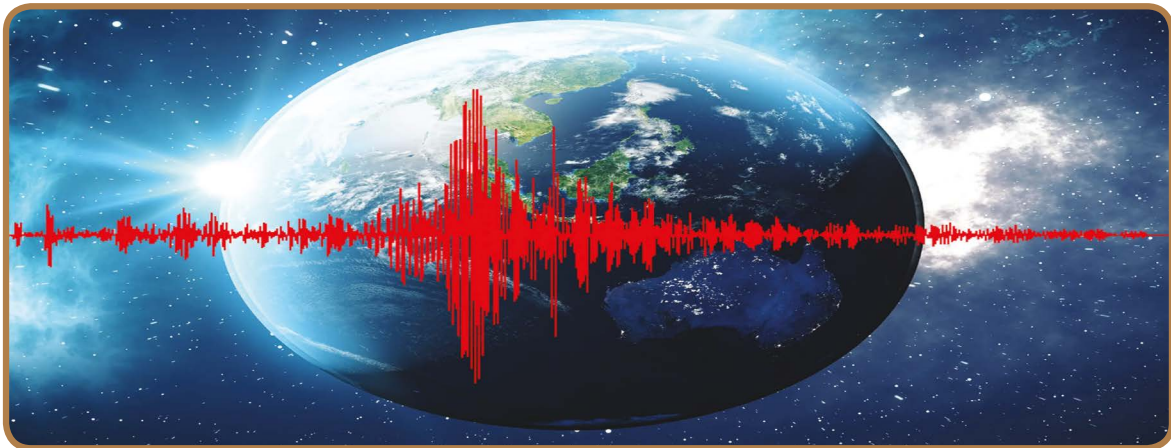
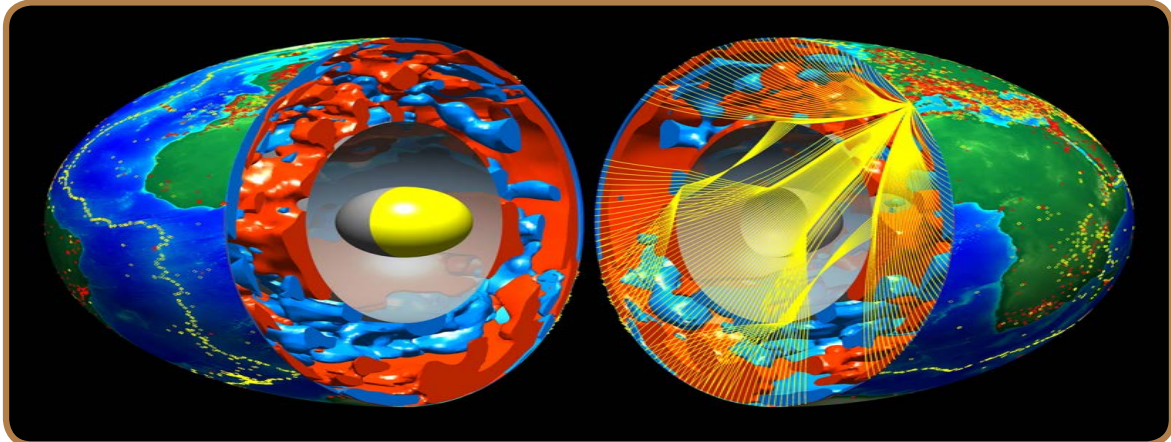


الجيوفيزياء النووية



عبد الله بن محمد العمري

قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - كلية العلوم - جامعة الملك سعود

١٤٤٤ هـ - ٢٠٢٣ م



www.alamrige.com





ح عبد الله بن محمد العمري، ١٤٤٤هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

العمري ، عبدالله بن محمد سعيد

الجيوفيزياء النووية. / عبدالله بن محمد سعيد العمري - ط١ -

الرياض، ١٤٤٤هـ

٢١٠ ص ، ٢١،٥ X ٢٨

ردمك: ٢-٢٩٩٦-٠٤-٦٠٣-٩٧٨

١ - الجيوفيزياء النووية أ. العنوان ب. الموسوعة

١٤٤٤ / ٢٦٩٢

ديوي ٥٣٩

رقم الإيداع ٢٦٩٢ / ١٤٤٤

ردمك: ٢-٢٩٩٦-٠٤-٦٠٣-٩٧٨

حقوق طبع الموسوعة محفوظة للمؤلف

مع عدم السماح ببيعها .. ويمكن إعادة طباعتها وتوزيعها مجاناً بدون أي تعديل في الاسم أو المحتوى

تطلب النسخة الورقية المجانية من المؤلف على العنوان التالي:

قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود ص.ب. 2455 الرياض 11451

الإصدار الإلكتروني من خلال الموقع

www.alamrigeo.com

للاستفسارات والملاحظات الاتصال على:

جوال +966505481215 هاتف +966 11 4676198

البريد الإلكتروني E.mail : alamri.geo@gmail.com



الطبعة الأولى

١٤٤٤هـ / ٢٠٢٣م



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ وَفِي الْأَرْضِ آيَاتٌ لِلْمُوقِنِينَ ﴾

[سورة الذاريات : آية 20]

﴿ And on the Earth are Signs for
Those Whose Faith is Certain ﴾



الموسوعة العمري في علوم الأرض





مَهَيِّدُكَ

الحمد والشكر لله الذي ساعدني في إنجاز هذا الجهد المتواضع المرتبط بتأليف الموسوعة العلمية العربية. تهدف الموسوعة العلمية الشاملة في علوم الأرض والبيئة والطاقة إلى تزويد وخدمة الباحثين وطلاب المدارس والجامعات وفئات المجتمع نظراً لمعاناة المهتمين من مشاكل ندرة المراجع العربية في هذا المجال. تشتمل الموسوعة المجانية والتي تعتبر الأضخم عالمياً على 30 كتاب علمي ثقافي موثق ومدعم بالصور والأشكال التوضيحية المبسطة في 6000 صفحة تقريباً تغطي خمسة أجزاء رئيسية:

الجزء الأول مكون من ستة كتب يناقش عمر الأرض وشكلها وحركاتها وتركيبها الداخلي وثرواتها المعدنية والتعدينية والجاذبية الأرضية وعلاقتها بالمد والجزر:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| تقدير عمر الأرض | التركيب الداخلي للأرض |
| شكل الأرض وحركاتها | المعادن والتعدين |
| الجاذبية الأرضية وتطبيقاتها | المد والجزر |

الجزء الثاني من الموسوعة يشتمل على ستة كتب تربط علاقة الأرض بالنظام الشمسي وبالأخص القمر والأغلفة الجوية والمائية والحيوية المحيطة بالأرض. وكذلك دور الزلازل والتفجيرات والبراكين والتسونامي في التأثير على بنية الأرض وكيفية تقليل مخاطرها:

- | | |
|---------------------|------------------------|
| موجات التسونامي | البراكين وسبل مجابتهها |
| الزلازل والتفجيرات | جيولوجية القمر |
| تقييم مخاطر الزلازل | الأغلفة المحيطة بالأرض |





الجزء الثالث يتألف من ستة كتب يربط كل ما يتعلق بالمشاكل والكوارث البيئية والطبيعية وحلولها والتغيرات المناخية وأهمية التشجير ومعالجة الاحتباس الحراري:

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| المشاكل البيئية وحلولها | الانزلاقات والإنهيارات والفيضانات |
| التغيرات المناخية والاحتباس الحراري | الأمطار والسيول والسدود |
| التشجير: التحديات والحلول | التصحّر والجفاف |

الجزء الرابع يتكون من ستة كتب يناقش ارتباط علوم الأرض بالعلوم الأخرى نووياً وطبيعياً، وكذلك دور الطاقة المستدامة النظيفة اقتصادياً وبيئياً:

- | | |
|-------------------------|----------------------------------|
| مستقبل الطاقة في عالمنا | الجيوفيزياء النووية |
| الطاقة الحرارية الأرضية | الجيولوجيا الطبية |
| هل إنتهى عصر النفط؟ | دليل كتابة الرسائل والنشر العلمي |

أما **الجزء الخامس** يتألف من ستة كتب متخصصة في العلوم الجيولوجية مكونة من 2020 سؤال وجواب لمساعدة طلاب الجامعات والباحثين وتهيئتهم للاختبارات الشاملة والتأهيلية للدراسات العليا ومزاولة المهنة:

321 سؤال وجواب في تطور الأرض	
358 سؤال وجواب في علم الصخور والجيوكيمياء والاستشعار عن بُعد والـ GIS	
358 سؤال وجواب في الثروات الطبيعية	
380 سؤال وجواب في المخاطر الجيولوجية	
303 سؤال وجواب في علم الزلازل والزلازلية الهندسية	
300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية	

المؤلف





مقدمة

الجيوفيزياء النووية Nuclear geophysics هي دراسة وممارسة الفيزياء النووية كما هي مطبقة على الجيولوجيا. تشمل أمثلة المواد المختلفة التي تتناولها الجيوفيزياء النووية المواد الخام مثل البترول والماء والمعادن والفحم وكذلك المواد المصنعة مثل الزجاج والمعادن النقية والسيراميك.

بدأت منهجية الجيوفيزياء النووية مع اكتشاف الفيزيائي الفرنسي هنري بيكريل عام 1896 للنشاط الإشعاعي في كبريتات اليورانيوم. منذ ذلك الحين تطورت إلى تكنولوجيا القياس المعاصرة التي تشمل مصادر الإشعاع التي يجري تشغيلها إلكترونياً وأجهزة الكشف عالية الدقة الموصولة بأجهزة حاسوب مصغرة وسهلة الاستخدام.

شهدت السنوات الخمسون الماضية تطوراً هائلاً في الجيوفيزياء النووية بفضل التقدم في التخصصات الفيزيائية الأخرى والرياضيات والجيولوجيا نفسها وعلوم المعلومات.

تعتمد الجيوفيزياء النووية على تفاعل الإشعاع النووي مع المواد الجيولوجية. الآثار المكتشفة أو المقيسة هي أيضاً إشعاعات. ما يوفر الأساس العملي للجيوفيزياء النووية هو حقيقة أن الخصائص الجيولوجية للمواد هي عوامل تحدد خصائص هذه الإشعاعات المكتشفة.





تعد طريقة تسجيل البئر والتحليل الديناميكي أو الساكن للكتلة من تطبيقات القياس الرئيسية للجيوفيزياء النووية، ومن ثم، فإن أدائها يشكل أساساً للكثير من المناقشات التي سنقدمها حول فوائد هذه التقنيات للمجتمع.

لقد نوقشت التقنيات النووية المختلفة المتاحة التي تعتمد على استخدام المصادر النظيرية، وعند الاقتضاء، المصادر الإلكترونية للنيوترونات وأشعة غاما والأشعة السينية في هذه التطبيقات.

يهدف العمل إلى توفير معلومات أساسية عن طبيعة **الجيوفيزياء النووية** وأهدافها وأدوات التحقيق فيها ومجموعة واسعة من التطبيقات التي تفيد المجتمع والصناعة.

كما يقدم عرضاً شاملاً لأساسيات **الجيوفيزياء النووية** وتقنياتها وتطبيقاتها في المجتمع. كما يحوي العمل على مواد علمية إضافية حول تفاعل الإشعاع النووي مع العينات الجيولوجية، ومعالجة البيانات وتفسيرها.

وهو يركز على التطبيقات الأكثر تقليدية والراسخة والتي ترتبط بشكل أساسي بالتقدم الاقتصادي والأساليب التي تزيد من إنتاجية المنتجات المرغوبة للعمليات الصناعية، ومن ثم تقليل الفاقد في الموارد المستخدمة من قبل هذه العمليات.

يستعرض التقرير إنجازات وأداء القياسات الجيوفيزيائية النووية، لا سيما في تطبيقات المياه والبحار والتربة، ويحلل العديد من هذه التطبيقات المهمة لأثرها الاقتصادي.



يحدث العمل المعلومات المتاحة عن **الجيوفيزياء النووية** من خلال تقديم سرد لأهم الإنجازات والمفاهيم التي قُدمت خلال السنوات الأخيرة. كما أنه يوفر إشارات إلى العديد من المنشورات المهمة الحديثة في هذا المجال من خلال قائمة المراجع المدرجة في آخره.

يحتوي العمل على مواد ذات صلة ليس فقط بالعلماء والتكنولوجيين النشطين في مختلف فروع الصناعات، ولكن الأهم من ذلك أنه يهدف إلى إعلام كل من المديرين والأشخاص المتعلمين بشكل عام في مجالات خارج تخصص **الجيوفيزياء النووية**.

سنناقش في هذا الكتاب تاريخ وأساسيات **الجيوفيزياء النووية** وتطورها، فضلاً عن طبيعة وطرائق إجراء القياسات الجيوفيزيائية النووية والكثير من التطبيقات العملية.





نبذة تاريخية

لقد كانت ولادة **الجيوفيزياء النووية** منذ أعلن هنري بيكريل عن اكتشافه للنشاط الإشعاعي في كبريتات اليورانيوم في عام 1896. وبالفعل، كان هناك أداة واحدة، والتي كانت الأكثر أهمية للجيوفيزياء النووية، وهي مقياس الطيف الكتلي (**Tandem Mass Spectrometry**) الذي طوره بالكامل بحلول عام 1919.

لم يجر إتقان استخدامه في قياس الأوزان الذرية للنظائر حتى عام 1938، وجرى تطبيقه على نطاق مختبري كامل لفصل نظائر العناصر الكيميائية، بما في ذلك الهيدروجين والليثيوم والنيون والكلور والبوتاسيوم والروبيديوم بحلول عام 1940. المعلومات المتوفرة على الوفرة النظرية تعتمد بشكل كبير على استخدام مطياف الكتلة.

منذ ثلاثينات القرن العشرين، وهو العصر الذهبي في تطور الفيزياء النووية، كان نمو **الجيوفيزياء النووية** دائماً موازياً لنمو الفيزياء النووية، العلوم الأم، لكنها بقيت دائماً متأخرة عدة خطوات.

قد يكون هذا بسبب الاستخدامات العملية المتوقعة في ذلك الوقت - وخلال العقود اللاحقة- كانت للاستخدامات العسكرية، ومن ثم توليد الطاقة. كانت هذه مجالات التكنولوجيا النووية التي تلقت تمويلاً حكومياً واسع النطاق.



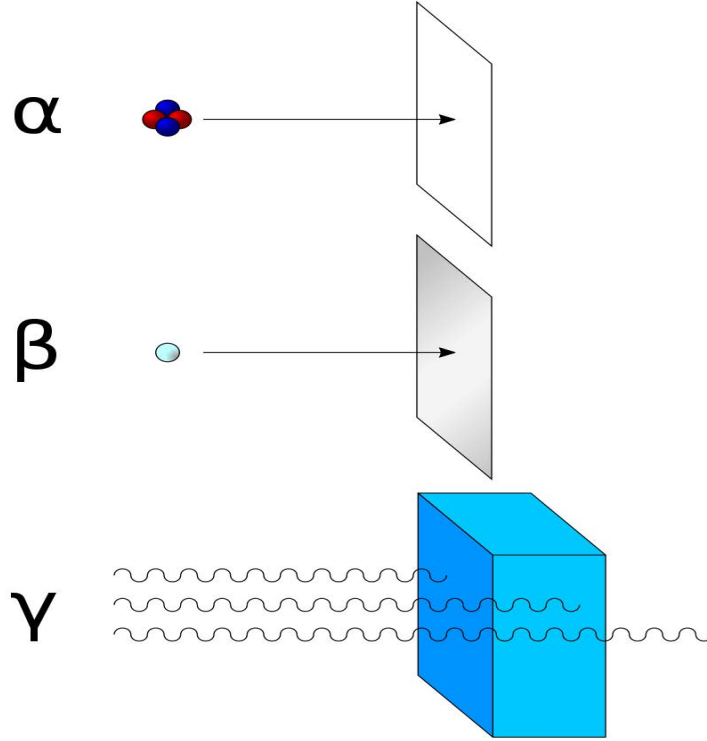


مطياف الكتلة الهجين رباعي الأقطاب لزم من الرحلة.

كانت صناعة النفط هي التي اعتبرت **الجيوفيزياء النووية** وسيلة ممكنة لزيادة تكرير منهجيتها لاستكشاف النفط في الآبار؛ ومن ثم، عززت هذه الصناعة تدريجياً، واستثمرت بشكل متزايد في هذا الفرع من الفيزياء النووية التطبيقية.

كانت القياسات التجارية الأولى عبارة عن سجلات حفر لأشعة غاما **Gamma Ray** الطبيعية أجريت في أواخر الثلاثينات. وقد استخدمت للتمييز بين أنواع الصخور المختلفة التي تتقاطع معها الثقوب.





يتكون إشعاع ألفا α radiation من نوى الهيليوم ويجري إيقافه بسهولة بواسطة ورقة. يجري إيقاف إشعاع بيتا β radiation، الذي يتكون من إلكترونات أو بوزيترونات، بواسطة لوح من الألومنيوم، لكن إشعاع غاما يتطلب حماية بمواد كثيفة مثل الرصاص أو الخرسانة.

لقد حددت الطبقات بشكل فعال جداً وارتبطت جيداً بالبيانات التي تم الحصول عليها من سجلات الإمكانيات الذاتية والمقاومة، والتي كانت مستخدمة بالفعل قبل عقد من الزمن.

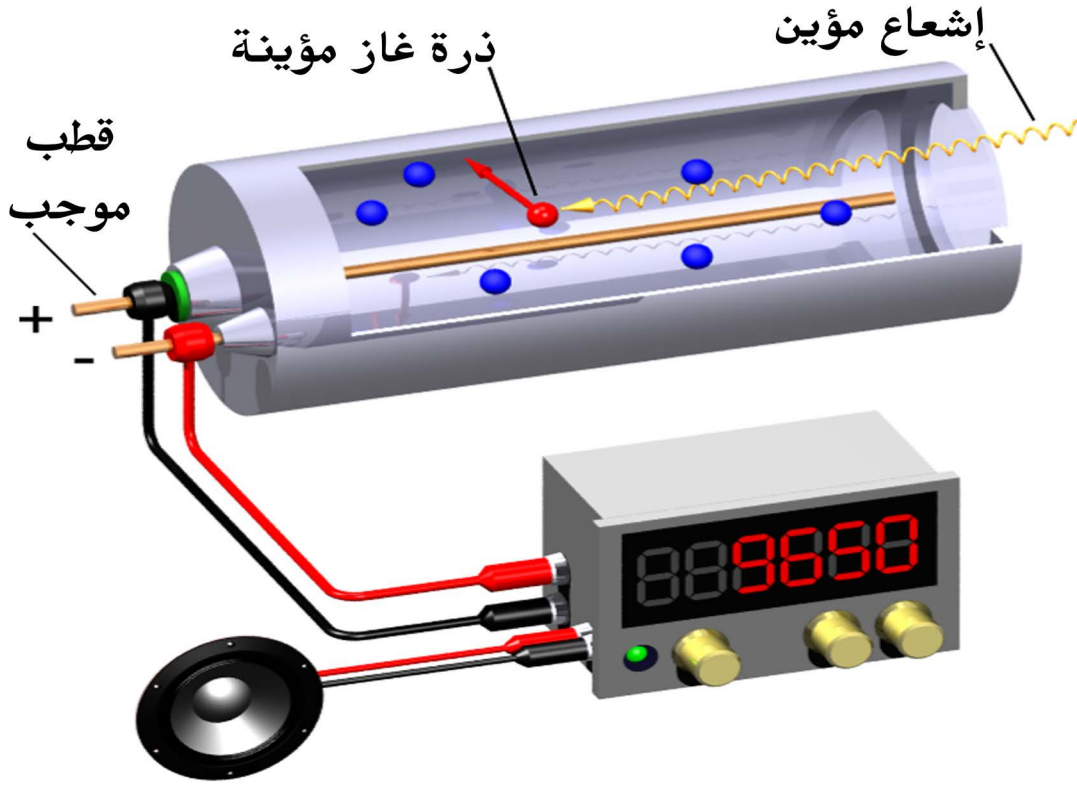
في البداية، يمكن لهذه القياسات فقط التفريق بين الليثولوجيا (دراسة الخصائص الفيزيائية العامة للصخور) على أساس مقدار الإشعاع المنبعث من كل منها.





الجيوفيزياء النووية

هذه الأدوات، التي تستخدم عادة عدادات جيجر-مولر **Geiger-Müller Counters**، لم تستطع التفريق بين الإشعاعات المنبعثة على أساس طاقاتها. ومع ذلك، فقد استخدمت أيضاً عدادات غازية أخرى، مثل عداد حجرة التآين والعدادات النسبية.



عداد جيجر (المعروف أيضاً باسم عداد جيجر-مولر) هو أداة إلكترونية تستخدم للكشف عن الإشعاع المؤين وقياسه. يستخدم على نطاق واسع في تطبيقات مثل قياس الجرعات الإشعاعية والحماية الإشعاعية والفيزياء التجريبية والصناعة النووية. رسم تخطيطي لعداد جيجر باستخدام أنبوب 'نهاية النافذة' للإشعاع المنخفض الاختراق. يستخدم مكبر الصوت أيضاً للإشارة.





لا تزال العدادات النسبية تستخدم بنجاح اليوم في مصانع إثراء المعادن، للتحكم في هذه العمليات من خلال الكشف وقياس طيف الأشعة السينية الفلورية المنبثقة من التغذية وتدفقات المنتج، حيث توضع معدات المراقبة للمساعدة في التحكم في العملية.

في عام 1947 ظهر أول مقياس لمسامية النيوترون في قاع البئر. ومع ذلك، كان هذا نتيجة للثورة العلمية التي أدت إلى فهم نقل النيوترونات في المواد وكذلك القدرة على نمذجة هذا النقل رياضياتياً في أي تكوين هندسي وفي معظم المواد. كان هذا تخصصاً نشأ في مشاريع تطوير الأسلحة النووية وقد جرى تنقيحه لاحقاً في فيزياء المفاعلات النووية والهندسة النووية.

وشهد العام 1947 نفسه إدخال جهاز الكشف عن الومضات، والذي كان قادراً على اكتشاف أشعة غاما بكفاءة؛ وهذا يعني أن قادراً كبيراً من أشعة غاما التي تدخل جهاز الوميض تتفاعل معها بالفعل.



عداد وميض حديث محمول يقرأ جرعة غاما المحيطة. يتم عرض موضع الكاشف الداخلي بواسطة التقاطع.





الجيوفيزياء النووية

يمكن للكاشف أيضاً التمييز بين أشعة غاما المكتشفة على أساس طاقاتها. بدأ هذا التطور عهداً جديداً من الفيزياء النووية التجريبية، ولاحقاً في **الجيوفيزياء النووية الحديثة**.

كاشف الوميض الحديث هو في الأساس مزيج مقترن بصرياً من الكريستال المتألي (أو الوماض) والأنبوب المضخم الضوئي. عندما يتفاعل الإشعاع مع المادة الوماضة، فإنه يصدر وميضاً ضوئياً تتناسب شدته مع الطاقة التي ينقلها الإشعاع إلى البلورة، والتي بدورها تنتج إشارة كهربائية متناسبة من المضاعف الضوئي. كان هذا أول مرة يتوفر فيها كاشف طيفي ذو كفاءة عد عالية لإشعاع غاما النشط.

يمكن أن يفرق بين طاقات الإشعاعات المختلفة المكتشفة، مع الدقة التي جرى تحقيقها لهذا التمايز في البداية كانت تقريبية جداً وكانت الإجراءات المطلوبة مرهقة. ومع ذلك، فقد استغرق الأمر بضع سنوات فقط قبل أن يتحسن هذا الكاشف بحيث يمكنه التمييز بين أشعة غاما والأشعة السينية وفقاً لطاقاتهما.

كان لهذه الخطوة تأثير هائل على جميع الفروع التطبيقية للفيزياء النووية، ولا سيما الطب النووي والمعالجة الصناعية وبالطبع **الجيوفيزياء النووية**.

والسبب في أهميتها هو أن العديد من المواد التي يجب قياسها في أي من هذه العمليات، ولكن لا يمكن مراقبتها بصرياً، يمكن تنشيطها بحيث تنبعث إما أشعة غاما أو أشعة سينية ذات طاقات مختلفة خاصة بالمواد قيد التحقيق.

كما ذكرنا سابقاً، فإن بعض المواد الخاضعة للمراقبة نشطة بشكل طبيعي. لكن يجب تنشيط البعض الآخر بشكل مصطنع، باستخدام جزيئات نووية نشطة





تبعث من مصادر الانبعاثات المشعة مثل المصادر المشعة القوية أو المفاعلات النووية أو مسرعات الجسيمات النووية.

كانت الخطوة المهمة اللاحقة هي تطوير أداة لقياس كفاءة طاقة الإشعاع المكتشف. حتى عام 1960 تقريباً، كانت هناك طريقتان فقط للقيام بذلك. وكانت إحدى الطرائق هي إجراء عدد من القياسات الفردية المتسلسلة على مدى طاقة الإشعاع الوارد. وقد جرى الإشارة إلى هذه الأداة على أنها محلل ذو قناة واحدة **(SCA) Single Channel Analyser**، حيث تؤخذ عينات من نافذة صغيرة في نطاق الطاقة المهمة لفترة زمنية محددة ويمكن استخدامها في وضع المسح، وترفع تلك النافذة بعد ذلك مع زيادة صغيرة في الطاقة إلى عينة مرة أخرى للفترة الزمنية نفسها، وهكذا. ولكن بهذه الطريقة، كان يفلت عدد كبير من الأحداث المكتشفة من التحليل بحيث استغرقت التحليلات وقتاً كبيراً.



تعد محلات القناة الواحدة الحديثة نظاماً فريداً يجمع بين الإلكترونيات المتقدمة وأجهزة الاستشعار الذكية ذات الحالة الصلبة. يسمح النظام بمراقبة العمليات والتحكم فيها بشكل مرن واقتصادي.





الجيوفيزياء النووية

كانت الطريقة الأخرى هي معايرة عدد من محلات القناة الواحدة ذات المستوى الثابت لقياس المناطق ذات الأهمية في أطيف أشعة γ أو أشعة X . تعتبر طريقة التحليل الأخيرة هذه فعالة ولكنها تفتقر إلى الحساسية للمكونات الأولية قيد التحقيق إذا كان هناك تداخل من عناصر أخرى في منطقة الاهتمام.

كانت الخطوة الرئيسية الثانية التي جرى اتخاذها في تطوير تقنيات القياس النووي، والتي سرّعت من تطوير **الجيوفيزياء النووية**، هي المحلل متعدد القنوات **(MCA) Multichannel Analyser**. وقد ظهر لأول مرة في المختبرات في أواخر الخمسينات من القرن الماضي. هذه الأداة قادرة على قياس طاقة كل حدث يكتشف تقريباً.

في البداية، كانت هذه الأدوات بطيئة في تحليل هذه الأحداث وتُظهر طيف الطاقة الذي فحص بتفاصيل 128/1 فقط من نطاقه. ومع ذلك، كان هذا التمايز في الطاقة وهذه السرعة مناسبين بالتأكيد للتطبيقات المتوقعة في ذلك الوقت. كان هذا بسبب حقيقة أن تحليل الطاقة المتاحة لكاشفات الوميض لم يكن جيداً بما يكفي لضمان تمايز أفضل للطاقة.



محلل متعدد القنوات حديث يوفر هذا الطراز كلاً من السرعة ومرونة تطبيق الشبكة. وهو يستخدم للمراقبة الطبية والصناعية والأمنية أو الإشعاع في الوقت الفعلي.





في البداية، لم تكن قدرات التحليل والعد السريع مطلوبة أيضاً، لأن التطبيق الجيوفيزيائي النووي الرئيسي المتوقع كان تحليل أشعة غاما المنبعثة من النظائر المشعة التي تحدث بشكل طبيعي في الأرض، وهي انبعاثات ضعيفة من معظم الصخور.

لقد أتاحت التغييرات السريعة التي حدثت في المكونات الإلكترونية والدوائر الإلكترونية الجديدة منذ عام 1960 إمكانيات جديدة تماماً للقياس في جميع فروع العلوم النووية التطبيقية.

في مرحلة مبكرة نسبياً من تطورها، استخدمت هذه الاحتمالات في الجيوفيزياء النووية، لا سيما في الجيوفيزياء النووية الخاصة بالتنقيب عن النفط في قاع البئر. ومع ذلك، سرعان ما طبقت المفاهيم الكامنة وراء التقنيات التي جرى تطويرها في صناعة النفط للتحكم في معالجة المعادن وتسجيل الآبار للحصول على الموارد الصلبة والقياس الإشعاعي المحمول جواً.

ظهرت أنواع جديدة من كاشفات أشعة غاما لأول مرة خلال الستينيات. اعتمد إنتاجها على التقدم المحرز في فيزياء الحالة الصلبة، ولا سيما فيزياء أشباه الموصلات. كان الكاشف الجديد عبارة عن قطعة بلورية من مادة، عادة ما تكون إما من السيليكون أو الجرمانيوم، والتي لم تكن مثقلة بـ 'الأجزاء المتحركة'، مما يعني أنه لم تكن هناك مغلفات زجاجية تحيط بالخيط المصنعة وما شابه، كما في حالة المكون الضوئي لكاشف الوميض.

في حين أن أجهزة الكشف عن أشباه الموصلات الأصلية، التي صُنعت للكشف عن الجسيمات المشحونة النووية وتمييزها بالطاقة، يمكن تشغيلها في درجات الحرارة العادية، إلا أن أبناء عمومتها الأصغر سناً إلى حد ما التي





طورت للكشف عن أشعة غاما والأشعة السينية كانت تتطلب التبريد بواسطة النيتروجين السائل من أجل التشغيل اللازم.

كان هذا ولا يزال يمثل مشكلة لقياسات **الجيوفيزياء النووية** من هذا النوع التي أجريت في مواقع بعيدة دون دعم البنية التحتية.

ومع ذلك، غالباً ما يبذل الجيوفيزيائيون النوويون جهداً لتنظيم إمدادات المبرد، لأن قدرة هذا النوع من الكاشفات على تحليل طاقات أشعة غاما أفضل بنحو خمسين مرة من تلك الموجودة في كاشف الوميض.

في الحالات التي تحوي فيها المادة العديد من المكونات الأولية التي تتطلب التحليل، فمن المحتمل أن يكون عدد أشعة غاما التي تتطلب تحديد الهوية هائلاً، وكذلك احتمال أن هذا النوع من الكاشفات هو فقط الذي سيتجنب مشكلة تداخلها المتبادل. ومع ذلك، فإن التكلفة المالية لهذا النوع من الكاشفات، عند مقارنتها بكاشف الوميض ذي الحجم المماثل، تكون هائلة.

حتى لو لم تكن التكلفة مشكلة، فإن كاشف الوميض ليس أداة قديمة في العمليات الجيوفيزيائية النووية. يوجد العديد من التطبيقات التي لا تشكل فيها القدرة المحدودة لتمييز الطاقة في جهاز الوميض عائقاً أمام التحليل المطلوب. وحتى عندما تكون عائقاً، غالباً ما تكون هناك معلومات أخرى تمكن المحلل من التغلب على هذا القيد.

وبشكل أكثر تحديداً، يكون جهاز الوميض منقطع النظير في الظروف التي يكون فيها للإشعاع القابل للاكتشاف معدل منخفض من الوقوع على سطح الكاشف كما هو الحال، على سبيل المثال، في مسح التضاريس الجوي الإشعاعي.





في هذا التطبيق، قد تشغل كل قطعة من الألواح الأربعة الضخمة من وحدات وميض يوديد الصوديوم، المستخدمة في وحدة المسح الجوي الإشعاعي الحديثة، حجماً لا يقل عن 8 ديسيمتر مكعب. يوفر هذا معدل العد المطلوب للتفسير الجيد، وقدرته على التمايز الجيد للطاقة لأشعة غاما تتطابق مع النوع نفسه من الوميض عند استخدامه في المختبر.

التقدم الذي أحرز في توفير الإشعاع المستخدم للتفاعل مع عينات المواد المعنية هو عامل حيوي آخر في تقدم **الجيوفيزياء النووية**. إن التوافر التجاري للمصادر المشعة الاصطناعية المستخدمة اليوم يتبع تطوير الأسلحة النووية والمفاعلات النووية.

في الواقع، تعد تقنية المفاعلات النووية جزءاً أساسياً من إنتاج معظم هذه المصادر، مع أن بعضها ينتج باستخدام سرعات الجسيمات. كما أنها حديثة نسبياً. من المؤكد أن مصادر النيوترونات، الأميريكيوم والبريليوم والكاليفورنيوم، المستخدمة حالياً إما للتحكم الصناعي أو في الآبار، لا يمكن تحضيرها بدون التكنولوجيا النووية.

المصدر الآخر للنيوترونات، مولد النيوترونات المشغل إلكترونياً مع أنبوب نيوتروني مغلق، طور في ستينات القرن العشرين. سيكون الكثير من تسجيلات الحفر في آبار النفط التي يجري اليوم بلا معنى بدون هذه المصادر لتجهيز مسابير المسامية النيوترونية في البحث عن النفط.

يستمر البحث بهدف إنتاج مواد وميض أسرع مع قدرة أعلى على إيقاف الإشعاع واستقرار أفضل في درجة الحرارة مقارنة بالمواد الحالية.





كانت آخر الخطوات العظيمة في التكنولوجيا التي دفعت **الجيوفيزياء النووية** إلى الأمام هي التطورات في مجال أجهزة الحاسوب والإلكترونيات. أحد تطبيقات الرياضياتية في الجيوفيزياء هو التنبؤ النظري بنتائج تكوينات معينة للأداة والمصدر والعينة، من حيث كيفية تأثير ذلك على الإشعاع مكانياً وزمناً. في كثير من الحالات، تكون هذه مهمة شاقة إن لم تكن مستحيلة. ومع ذلك، فإن الحاسوب هو الذي زود العلماء بنهج بديل لاستخدام التقريبات العددية، ولاحقاً عمليات المحاكاة لتنفيذ هذه المهمة.

يوفر الحاسوب، وخاصة الحاسوب الشخصي، للعالم أيضاً وسائل للتحكم في إجراءات القياس وتخزين بيانات القياس ومعالجة البيانات وتفسيرها وفقاً لخوارزميات معينة من أجل تعيين قيم للبارامترات الجيوفيزيائية أو الجيولوجية المطلوبة أيضاً كعرض مرئي لنتائج هذه التفسيرات في شكل نسخ ورقية.

يقدم هذا النوع من المخرجات كأرقام مجدولة أو رسوم بيانية توضح تباين بارامتر الاهتمام بالنسبة لبعض الإطارات المرجعية مثل الموقع الجغرافي أو العمق تحت السطح.

كما تتوفر مخرجات المعالجة كشاشات عرض مرئية، بحيث يمكن بالفعل الحصول على نتائج قياسات المراقبة الجيوفيزيائية أثناء تقدمها؛ لا يلزم عمل نسخ ورقية إلا عندما تكون مطلوبة حقاً.

يضمن إمكانية الوصول إذا جرى استيفاء العديد من المعايير بما في ذلك الدقة والموثوقية والمتانة وسهولة الاستخدام. لقد تطورت التكنولوجيا بشكل مثير للإعجاب في جميع هذه الجوانب على مدار العقدين الماضيين. لم تصبح





النتائج التي جرى الحصول عليها أكثر دقة فحسب، بل صارت أيضاً أكثر صلة بما يحاول العملاء المزعومون قياسه في العالم العملي الحقيقي.

كان هذا إلى حد كبير نتيجةً للتقدم المحرز في القضايا المفاهيمية في نظرية النمذجة والمحاكاة والإحصاءات الرياضية. صارت المعدات حالياً قوية، سواء من الناحية المادية أو من ناحية كيفية عملها، ومن ثم فهي أيضاً سهلة الاستخدام، ويرجع ذلك أساساً إلى الإلكترونيات الجديدة وتقنيات الحاسوب.

ومع ذلك، سيكون من الضروري إجراء المزيد من التطويرات على هذا المنوال حتى تحظى التكنولوجيا بقبول واسع في مجالات التطبيق الجديدة، على سبيل المثال، على سطح الفحم، أو في يد عامل المنجم العامل، أو بدلاً من ذلك، في جانب حارس المنتزه الوطني لدى مراقبة ظروف بيئة المنتزه.

إن نتائج المحاكاة الجيوفيزيائية النووية لعينة أو صخرة أو جسم خام معقدة جداً من ناحية تأثيرها على ما نقيسه، ومن أجل حل المشكلة المطروحة، من الضروري في كثير من الأحيان الحصول على علاقات تعريف إضافية من الآخرين، كالقياسات الكيميائية أو الفيزيائية أو الرياضية أو الجيوفيزيائية.

إن أعظم التطورات التي حققتها هذه التكنولوجيا حتى الوقت الحالي لصالح البشرية كانت في مجالات اكتشاف الموارد واستغلالها ومعالجتها. يمكن زيادة صلتها بالمستقبل من خلال إيجاد تطبيقات لحماية البيئة البشرية.





أساسيات الجيوفيزياء النووية

الجيوفيزياء النووية هي دراسة وممارسة الفيزياء النووية كما هي مطبقة على الجيولوجيا. كما تنطبق على جميع الأمور والأنشطة البشرية المرتبطة بالجيولوجيا.

تتناول ممارسة **الجيوفيزياء النووية** الآثار التي نقيسها نتيجة تفاعل الإشعاع النووي مع المواد الجيولوجية ومع الطرائق المختلفة لقياس هذه التأثيرات وتفسيرها الذي يؤدي إلى بناء فرضيات ونظريات جديدة حول القضايا الجيولوجية.

يمكن أن تكون النظريات المعنية ذات طبيعة نظرية، على سبيل المثال، النظرية الكونية، أو النظرية العملية، مثل التباين في درجة الركاز في العينات الأساسية.

يتعلق هذا الموضوع بالتأثيرات التي نقيسها، وكيف نقيس تلك التأثيرات المتعلقة بالحركة، أو ما يسمى بالنقل، للإشعاع النووي من خلال المواد الجيولوجية. نقيس أيضاً تأثيرات تفاعل الإشعاع النووي مع المواد التي تعالج، جزئياً على الأقل، من المواد الجيولوجية الخام، مثل طين الفحم.

• النشاط الإشعاعي للغلاف الصخري

يتراوح تدفق الإشعاعات النووية المنبعثة من الصخور الصلبة للغلاف الصخري من رواسب خام نادرة حيث يكون أكثر من بضعة أمتار مكعبة من اليورانيوم أو الثوريوم إلى رواسب الهاليت الأكثر شيوعاً حيث لا تظهر عدة كيلومترات مكعبة أي نشاط إشعاعي فوق الخلفية الآلية.



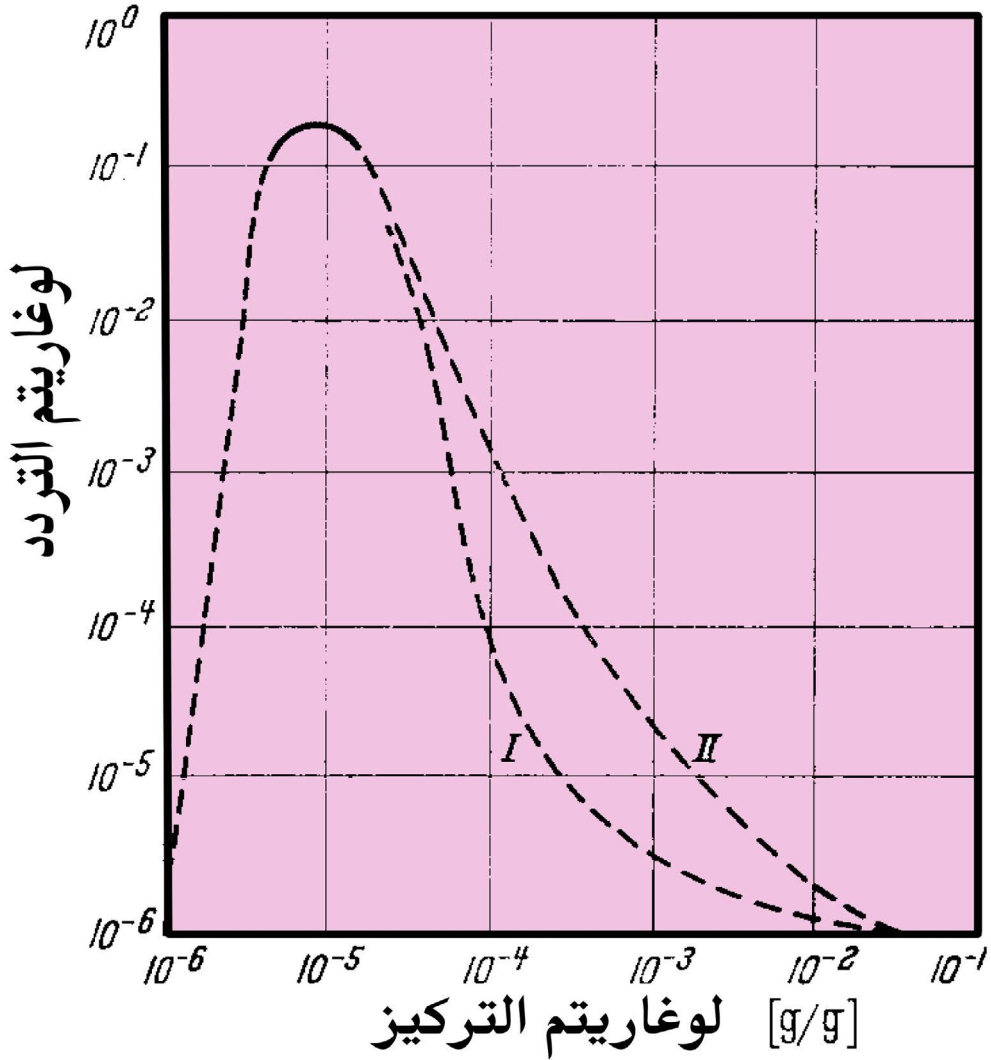


لا يقتصر النشاط الإشعاعي لنطاق الغلاف الصخري على نطاق واسع فحسب، بل إن أخذ عينات الغلاف الصخري الذي يمكن الوصول إليه قليل. يتكون الغلاف الصخري الذي يمكن الوصول إليه حالياً من سطح الأرض، جنباً إلى جنب مع عينات جرى الحصول عليها من الحفر التي قد تتجاوز ستة كيلومترات في القارات وتخترق الأمتار القليلة العلوية من الرواسب في قاع البحار.

وهكذا، من حيث المبدأ، تسمح التقنيات الحالية بأخذ عينات مباشرة من نظام كتلته نحو 10^{23} غراماً؛ أجري ما لا يزيد عن 10^5 تحديداً مفصلة ودقيقة على المستوى العام للنشاط الإشعاعي، ولم ينتج عنها أكثر من تحديد واحد لكل 10^{17} غراماً في أحسن الأحوال. وتجدر الإشارة أيضاً إلى أن بعض المواد موجودة حالياً في نطاق ستة كيلومترات من السطح، على سبيل المثال يجب أن تكون بعض الحمم البركانية قد أتت في الأصل من عمق أكبر.

عند النظر إلى الدرجة التي جرى بها أخذ العينات حتى الوقت الحالي، يجب أن يلاحظ المرء أيضاً أن معظم تحديداً النشاط الإشعاعي في الغلاف الصخري قد أجريت إما فيما يتعلق بالاستكشاف لتركيزات عالية بشكل غير عادي من اليورانيوم أو فيما يتعلق باستخدام إيجابية أو سلبية شذوذ النشاط الإشعاعي في التنقيب عن البترول.





تمثيل لمجموعة واسعة من النشاط الإشعاعي مع تشتت منخفض نوعي. يرسم هنا لوغاريتم تردد وحدة كتلة من الصخور مقابل لوغاريتم تركيز مصدر طبيعي للنشاط الإشعاعي. ولا يزال الشكل الدقيق للجانب الأيمن من المنحني هنا غير معروف ولا يمكن تقديره إلا من خلال معدل الاكتشاف والتسارع في معدل الاكتشاف، مما يحافظ على جهد الاستكشاف ثابتاً وموزعاً بالتساوي. وهكذا، فإن المنحنيين المتقطعين الأول والثاني في الشكل لا يمثلان سوى اثنين من الاحتمالات العديدة للتردد الحقيقي للتركيزات الأعلى.





مع أنه أمكن الحصول على كلا النوعين الرئيسيين من المعلومات في البحث عن تركيزات غير تمثيلية للنشاط الإشعاعي، فإن كليهما يعمل على إثبات بشكل غير مباشر أن كميات كبيرة من الغلاف الصخري لا تختلف بأكثر من عامل اثنين أو ثلاثة في النشاط الإشعاعي.

على وجه الخصوص، أظهرت آلاف الكيلومترات من المسوحات الجوية بأشعة غاما منخفضة المستوى ومئات الكيلومترات في حقول النفط في آبار النفط هذا التباين الصغير من الناحيتين الأفقية والرأسية.

جرت الإشارة أيضاً إلى هذا التباين الصغير في العديد من الصخور الشائعة من خلال:

1. أخذ أوزان متساوية من العديد من المواقع وتحديد النشاط الإشعاعي للركام.
2. اتخاذ قرارات النشاط الإشعاعي على الصخور التي حيث يجب أن تكون العمليات الجيولوجية متجانسة.
3. دراسة التباين في النشاط الإشعاعي في الصخر النفطي المشترك على أساس متر بـعشرة كيلومترات في عشرة كيلومترات.

ومن ثم، فإن الأنماط الخاصة بالصخور الأكثر شيوعاً في الغلاف الصخري الغرانيت والصخر النفطي التي يمكن الوصول إليها هي 11 إلى 15 جزءاً لكل مليون ثوريوم، و 3 إلى 4 أجزاء لكل مليون يورانيوم، ونحو 3 أجزاء لكل مليون بوتاسيوم 40. تمثل هذه الأرقام أيضاً متوسط التركيزات للغلاف الصخري الذي يمكن الوصول إليه لأن الوزن الإحصائي لأنواع وتركيزات الصخور الأخرى منخفض جداً.



كل مصدر رئيسي للنشاط الإشعاعي الطبيعي، من الممكن تحديد وحدة كتلته بحيث تكون الحدود العليا للتركيز، على التوالي: $100\% \text{ThO}_2$ ، و $100\% \text{UO}_2$ ، و $100\% \text{KCl}$ ، مع إهمال الشوائب الصغيرة جداً.

تواتر هذه التركيزات العالية، مع أنه من المعروف أنه منخفض، إلا أنه لا يزال غير مؤكد تماماً لأن الغلاف الصخري الذي يمكن الوصول إليه كبير جداً وأخذ العينات متناثر جداً.

محاولات إظهار أن التوزيع التكراري لتركيز عنصر ثانوي في الغرانيت أو الصخر النفطية يجب أن يتبع وظيفة بسيطة، على سبيل المثال تسجيل عادي، لكنها لم تكن مقنعة حتى الوقت الحالي.

الصعوبات في أخذ العينات ليست بالقدر نفسه من الخطورة لكل مشكلة تطوي على النشاط الإشعاعي للغلاف الصخري. وهكذا، على سبيل المثال، عند حساب كمية الحرارة المتولدة عن الإشعاعات النووية في الغلاف الصخري، فإن متوسط التركيزات الواردة أعلاه كافية لتقدير إنتاج الحرارة في حدود 20% . بالنسبة لمشكلة الحرارة هذه، ليس من الضروري معرفة ما إذا كان 0.01 أو 0.00001% أو أقل من إجمالي المخزون يحدث في التركيزات الاقتصادية العالية؛ تعتبر الأخطاء الأخرى في ثوابت الانحلال وطاقات الإشعاع أكثر أهمية في الحد من الدقة التي يمكن بها حساب إنتاج الحرارة من المصادر النووية.

من ناحية أخرى، فإن مشكلات أخذ العينات هائلة في محاولة تقدير كمية الثوريوم واليورانيوم التي يمكن استعادتها لتوليد الطاقة النووية.





• المواد التي تتعامل معها الجيوفيزياء النووية

تتراوح أمثلة المواد المختلفة التي تتعامل معها الجيوفيزياء النووية من المواد الخام مثل البترول أو الماء أو المعادن أو الفحم إلى المواد المعالجة مثل الزجاج أو المعادن المعالجة أو السيراميك.

علاوة على ذلك، تشتمل المواد ذات الصلة بهذه الدراسات أيضاً على بعض أنواع نفايات المنتجات الصناعية التي تنطوي على استخدام المواد الجيولوجية الخام مثل الرماد المتطاير وثاني أكسيد الكربون المنبعث من احتراق الفحم والنفايات السائلة الكيميائية من مصانع معالجة المعادن.

يجب أن تتعامل الجيوفيزياء النووية أيضاً مع الطريقة التي نقيس بها تأثيرات الإشعاع النووي المتفاعل مع المواد الجيولوجية في مختلف مراحل عمليات تنقيتها، من أجل توفير البيانات التي تساعد في التحكم في هذه العمليات.

قد يساعد تطبيقها البشرية في اكتشاف المزيد من الموارد الطبيعية وفي استخراج هذه الموارد بشكل أكثر فعالية وكفاءة. في جميع هذه الجوانب، قد تساعد ممارسة الجيوفيزياء النووية البشرية عن طريق زيادة أو الحفاظ على توزيع الموارد، ومن ناحية أخرى، عن طريق تقليل نفاياتها، إما أثناء استخراجها من الأرض أو أثناء مرحلة معالجة المعادن.

تعتمد الجيوفيزياء النووية على تفاعل الإشعاع النووي مع المواد الجيولوجية. إذن ما هي هذه الإشعاعات النووية وتفاعلاتها مع المواد بشكل عام؟

إنها الإشعاعات المنبعثة نتيجة للتغيرات في حالات الطاقة السائدة في النوى الذرية. تصدر، على وجه الخصوص، عندما تخضع النوى الموجودة بالفعل في حالة من الإثارة لإزالة الإثارة.





الجيوفيزياء النووية

وتجدر الإشارة إلى أن الأشعة السينية تدخل ضمن الإشعاعات ذات الصلة **بالجيوفيزياء النووية**، مع أنها تتبع في عمليات إزالة الإثارة للإلكترونات الغلاف المحيط بالنواة الذرية.

الآثار التي يكشف عنها أو قياسها هي أيضاً إشعاعات. تتبع هذه الإشعاعات أو تتشتت عندما تتفاعل إشعاعات أخرى مع المواد الجيولوجية. يوفر الأساس العملي للجيوفيزياء النووية من خلال حقيقة أن الخصائص الجيولوجية للمادة هي العوامل التي تحدد خصائص هذه الإشعاعات المكتشفة.

• ماذا نقيس؟

يمكن استخدام تقنيات الفيزياء النووية التطبيقية للكشف أو القياس الكمي لخصائص أي مادة طبيعية متاحة إما في حالتها الخام وغير المصنعة أو، بدلاً من ذلك، في حالة معالجة.

بشكل عام، قد تكون الخصائص المقيسة فيزيائية أو كيميائية. الخصائص الفيزيائية الأكثر شيوعاً المقيسة مباشرة بالتقنيات الجيوفيزيائية النووية هي كثافة ومسامية الصخور والترربة والخامات المعدنية. أما الخصائص الكيميائية التي تقاس عادةً بوساطة هذه التقنيات هي تركيزات العناصر الكيميائية ذات الصلة بحالات صناعية محددة.

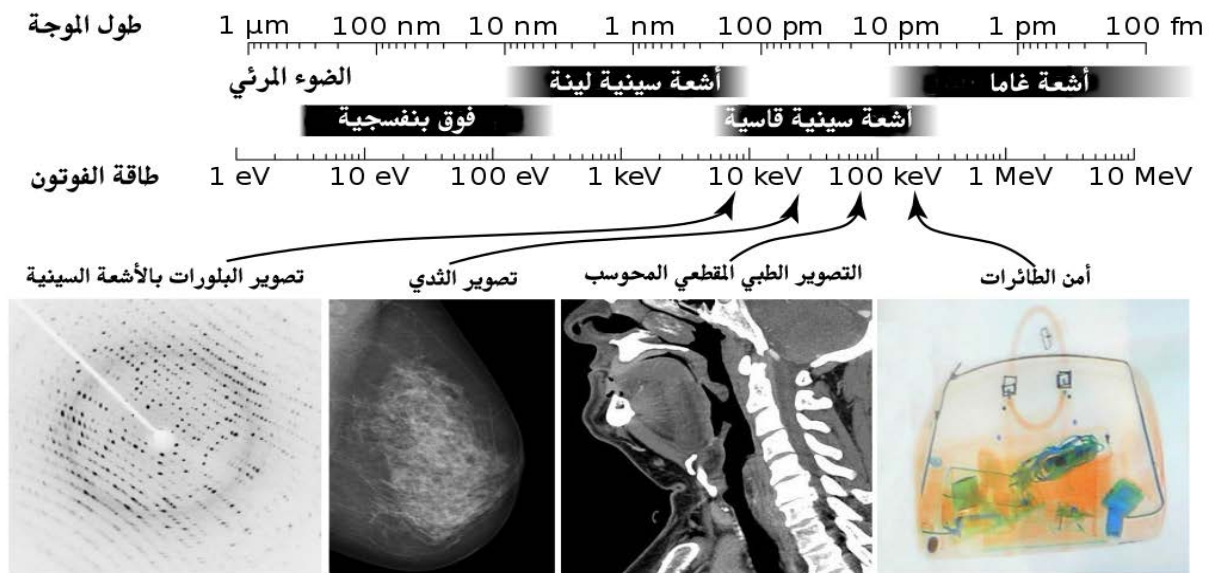
السبب في التركيز على عناصر كيميائية معينة هو أنه لا يوجد نوع واحد من التفاعل النووي من شأنه أن يوفر نظاماً مناسباً وقابلاً للتطبيق بشكل عام للتحليل الكمي ضمن إطار زمني عملي، ولا يمكن تحليل جميع العناصر الكيميائية بوساطة أي نظام واحد من التحليلات.





علاوة على ذلك، بالنسبة لتلك العناصر التي يمكن تحليلها، من المستحيل القيام بذلك لجميع التركيزات التي قد تكون فيها هذه العناصر في العينات الصناعية.

ينطبق هذا القيد على ملاءمة الطريقة لعناصر كيميائية معينة حتى على التحليل الطيفي لانبعاثات الأشعة السينية، وهو غير مناسب لأخف العناصر الكيميائية مع قابليتها للتطبيق لتغطي أوسع نطاق من العناصر الكيميائية.



الأشعة السينية هي جزء من الطيف الكهرومغناطيسي، مع أطوال موجية أقصر من الأشعة فوق البنفسجية. تستخدم التطبيقات المختلفة أجزاء مختلفة من طيف الأشعة السينية.

علاوة على ذلك، ونظراً لأن التحليل الطيفي للأشعة السينية يعاني من تأثيرات الامتصاص الذاتي داخل العينة، فإنه غير مناسب للتحليل الكمي للعينات غير المتجانسة.





ومع ذلك، يمكن تطبيق تقنية الأشعة السينية بشكل فعال على تحليل العينات السائبة المعروفة بأنها متجانسة، من خلال تقديم عينات فرعية صغيرة للتحليل. تعتبر القياسات الجيوفيزيائية النووية مفيدة أيضاً إذا كانت توفر بارامترات مرتبطة بخصائص فيزيائية وكيميائية معينة دون إعطاء القيم المطلقة، من التحليل، للخواص الفيزيائية والكيميائية للمصفوفة.

على سبيل المثال، تعطي أنواع معينة من مسابير البئر، المجهزة بمصادر أشعة غاما، استجابة غير متميزة للتغيرات في الكثافة والتركيب الكيميائي العام للمصفوفة. قد يكون هذا النوع من قياس المسبار مفيداً لتحديد جسم خام، والتمييز بين المناطق المعدنة وطبقات الصخور المضيفة.

• أنواع قياسات العينة

تختلف كتلة وحجم العينات التي يجري تحليلها بواسطة مختلف التقنيات الجيوفيزيائية النووية المتاحة بشكل كبير. يعتمد حجم العينة على التطبيق المعين الذي نظر فيه.

عند الحد الأدنى من نطاق أحجام العينات، قد تكون العينات عبارة عن عينات جيولوجية مطحونة أو بقع غبار متراكمة أو مرشحات أخرى محتجزة في أجهزة أخذ عينات الهواء أو أجهزة أخذ عينات السوائل الأخرى.

قد تتراوح عينات الوزن من هذا النوع من مليغرام فقط إلى عدة غرامات. تحلل هذه العينات بشكل عام باستخدام إما معجل أو مفاعل نووي كمرفق مصدر إشعاع.





في الطرف الآخر في نطاق أحجام العينات، قد تكون العينة هي التضاريس التي جرى مسحها إشعاعياً من الهواء. بدلاً من ذلك، يمكن أن تشمل العينة على التكوين الجيولوجي المتقاطع بوساطة الآبار، حيث توفر الآبار الوصول إلى المسابير الجيوفيزيائية النووية التي تقيس، في الموقع، خصائص التكوين. في هذه الحالة، يحدد حجم العينة الفعلي فقط من خلال نطاق تغلغل الإشعاع النووي المنبعث من داخل العينة المراد اكتشافه في المسبار.

بين هذين الطرفين في نطاق أحجام العينات، نجد تلك العينات الخاصة بالقياس الجيوفيزيائي النووي التي تستخدم بشكل شائع في مراقبة جودة المخرجات من المناجم أو محطات الإثراء.

قد تتكون العينات من مواد مطحونة يصل وزنها إلى 15 كغ، والتي تُفصل أو تُقتطع من عينات كبيرة الحجم. تقاس هذه العينات الفرعية بشكل عام جيوفيزيائياً في حاويات ذات شكل وحجم موحدين.

من ناحية أخرى، قد تتخذ العينات شكلاً إما ملاط من الخام المعدني، والذي يضح عبر الأنابيب كمدخلات أو مخرجات لمحطات الإثراء، أو من الصخور المطحونة والركاز، والتي تنقل على سيور ناقلة. في هذه المواقع الديناميكية، تجري القياسات الجيوفيزيائية على مزيج من المواد التي تنقل بسرعات نقل جماعي تصل إلى العديد من الأطنان في الساعة.

في حالات صناعية أخرى، غالباً ما تكون هناك حاجة لاكتشاف أو قياس خصائص العينة بمعزل عن المواد المحيطة. على سبيل المثال، بالنسبة لمرحلة الاستخراج من تعدين الفحم، من الضروري الكشف عن مناطق الفحم مباشرة،





الجيوفيزياء النووية

من أجل تحديد عمقها وعرضها ونقاوتها، مع أن الفحم كثيراً ما يخلط عرضياً مع الصخور المتداخلة أثناء عملية الاستخراج.

ومع ذلك، في مرحلة لاحقة من عمليات تعدين الفحم، عند إجراء الغسل (للإثراء) أو المزج، تكون البيانات المطلوبة بشكل عام حول جودة خليط الفحم والصخور المستخرجة والذي يمثل المدخلات لأي من هذه العمليات المحددة.

نظراً لقدرتها على القياس السريع للمواد السائبة وأخذ عينات منها بشكل فعال، تطبق **الجيوفيزياء النووية** بشكل مفيد لقياس تركيز الشوائب المعدنية في الفحم. في هذه المرحلة التشغيلية، ستقاس العينات على أحزمة أو في أنابيب تحمل الطين.

تتطلب العديد من المواقع الصناعية التي تستفيد من استخدام القياسات الجيوفيزيائية استخدام قياس غير نووي إلى جانب القياس النووي. مرة أخرى، توفر مراقبة جودة الفحم على طول الخط مثلاً على هذا الموقف.

وذلك لأن البارامترين الحرجين لجودة الفحم، محتوى الرماد والرطوبة، يتطلبان، في ظل ظروف معينة، طرائق قياس مختلفة لتقديرها على طول الخط، تتطلب الأولى طريقة نووية والأخيرة تتطلب إما طريقة السعة البسيطة أو التقنيات الميكروية.

يمكن أن تكون عينات المواد المقيسة بمنهجيات **الجيوفيزياء النووية** في أي مرحلة فيزيائية، أي المادة الصلبة والسائلة أو المرحلة الغازية. ومع ذلك، تعتبر **الجيوفيزياء النووية** من الناحية المفاهيمية غير قابلة للتطبيق على أي مصفوفة مواد مصنعة صناعياً، باستثناء المواد البلاستيكية.





قد تكون المواد التي جرى فحصها بواسطة القياسات الجيوفيزيائية النووية عبارة عن شوائب جسيمية معلقة في السوائل مثل الماء أو الهواء أو الغازات المتدفقة التي يجري تصريفها من المنشآت الصناعية مثل محطات الطاقة.

قد تكون العينات أيضاً ضمن المكونات المشعة (مثل الرادون) لخليط غازي. علاوة على ذلك، قد تكون العينات عبارة عن مكونات، ممتصة على رقائق أو مرشحات، للمخاليط الغازية المنبعثة من الأرض، في هذه الحالة هي عينات جيولوجية.

ومع ذلك، فإن العينات التي تحلل بواسطة تقنيات **الجيوفيزياء النووية** الأكثر شيوعاً هي الصخور والخامات المعدنية والوقود الأحفوري (التي تكون في جميع المراحل).

• المجالات الطبيعية والاصطناعية

تستند القياسات التحليلية التي تجرى بشكل عام إلى اكتشاف التغيرات في مجالات (أو حقول) الإشعاع النووي. ترتبط هذه المجالات بالخصائص الكيميائية والفيزيائية للعينات التي يجري قياسها.

لمناقشة اكتشاف التغيرات في مجال الإشعاع، ينبغي فهمنا لمفهوم أساسي للإشعاع النووي المستخدم لغرض الكشف والقياس. وهذا ما سنتكلم عنه لاحقاً ضمن الأساليب التي نقيس بها الإشعاع النووي.

المفهوم الأساسي هو أنه بغض النظر عن نوع الإشعاع النووي الذي يقاس، يمكن تصويره على أنه تيار من الأجسام الشبيهة بالجسيمات وليس على شكل موجة.





ينطبق هذا المفهوم على الجسيمات دون الذرية مثل النيوترونات والبروتونات والإلكترونات وكذلك على الإشعاعات التي ليس لها كتلة، أي أشعة X وأشعة Y . في حالة أشعة Y أو أشعة X ، فإن الجسيمات عبارة عن فوتونات.

في أثناء حركته، يحمل كل 'جسيم' كمية محددة من الطاقة يشار إليها باسم الكم. عندما تتبعث 'الجسيمات' نتيجة تفاعل نووي، فإنها ستتبعث في مجموعات مختلفة ذات طاقات محددة مميزة. وهذه خاصية للتفاعلات النووية التي تسمح بتحديد وقياس تراكيزات العناصر الكيميائية الفردية في العينة الجيولوجية.

تكون الطاقات الكمومية الفردية بشكل عام صغيرة جداً عند مقارنتها بالطاقات المستهلكة في أنشطتنا المعيشية اليومية. نتيجة لذلك، تستخدم وحدة خاصة من الطاقة، هي الإلكترون فولت (eV) ، لهذا الغرض، حيث إن السعرة الحرارية الواحدة تعادل جول $1eV = 3.8 \times 10^{-20}$

في الواقع، قد تتراوح طاقات الإشعاعات النووية المقيسة من عدة فولتات كهربائية إلى أكثر من 10 ميغا إلكترون فولت (1 ميغا إلكترون فولت = 10^6 إلكترون فولت). ومن ثم، حتى أكبر الكميات التي تم النظر فيها تعتبر صغيرة جداً عند مقارنتها على مقياس طاقة يومي. جرى استعارة فكرة المجال في التطبيقات الجيوفيزيائية النووية من نظريات المجال الكلاسيكي والكهربائي والجاذبية، ربما لأن أدوات الحفر الجيوفيزيائية الأولى كانت الجاذبية والكهربائية (على سبيل المثال سجل الجهد الذاتي $log(SP)$).

مع هذا المصطلح لا ينطبق بشكل صارم على مفاهيم القياس الإشعاعي بمعنى أنه ينطبق على النظريات الفيزيائية الكلاسيكية، إلا أن هناك تشابهات





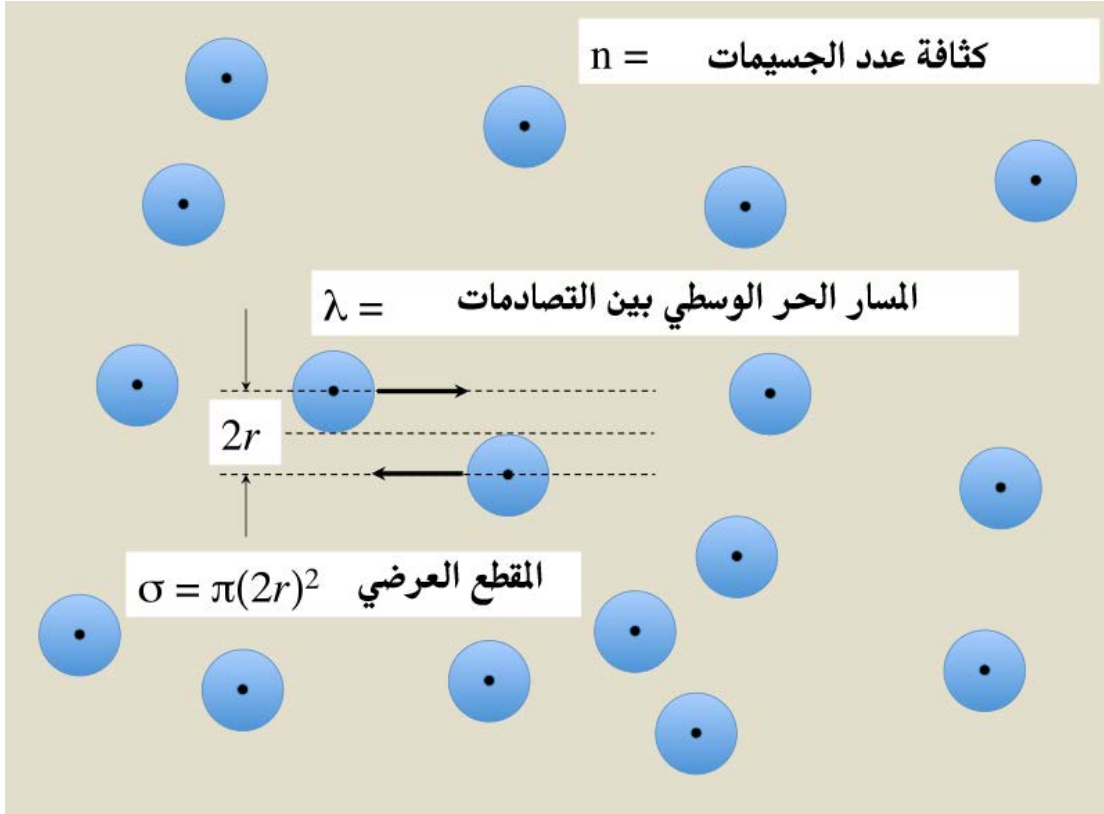
واضحة. بالتأكيد، في حالة مجال الإشعاع النووي، فإن الطاقة التي يتم نقلها من خلال كل وحدة من منطقة المقطع العرضي **Cross-section** تعتمد مكانياً، بطريقة مشابهة للمجالات الكلاسيكية.

ومع ذلك، لا يمكن تعريف شدة مجال الإشعاع بمصطلحات مثل «القوة على وحدة الكتلة»، أو بدلاً من ذلك «القوة على وحدة الشحنة الكهربائية»، وهي مفاهيم مناسبة لنظرية المجال الكلاسيكية.

بشكل عام، يقاس مجال الإشعاع النووي في منطقة معينة أو حجم العينة من خلال شدة الإشعاع النووي الذي يتقاطع مع كل وحدة من منطقة المقطع العرضي في الفضاء المعين. يمكن أن تكون حقول الإشعاع النووي هذه طبيعية المنشأ أو مصنعة.

تُقاس شدة الإشعاع بطريقتين مختلفتين: عدد الجسيمات المشعة أو الفوتونات التي تعبر كل وحدة مساحة في الفضاء لكل وحدة زمنية. وقد تكون الكثافة هي المعدل الزمني الذي يتم فيه نقل الطاقة (أي القدرة) عبر المنطقة نفسها.





المقطع العرضي، في الفيزياء، هو مقياس لاحتمال حدوث عملية معينة عندما يتقاطع نوع من الإثارة الإشعاعية (مثل شعاع الجسيمات أو الضوء أو الأشعة السينية) مع ظاهرة محلية (مثل الجسيم) أو تذبذب الكثافة). في الشكل غاز من الجسيمات ذات القطر الفردي $2r$ ، والمقطع العرضي σ ، للتصادم مرتبط بكثافة عدد الجسيمات n ، ويعني المسار الحر بين الاصطدامات λ .

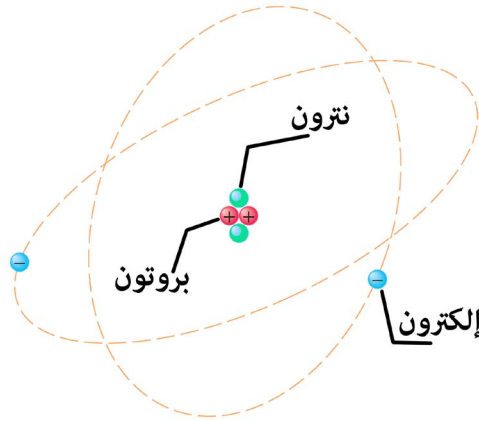
لفهم طبيعة مجالات الإشعاعات، من الضروري أن يكون لدينا بعض التبصر في بنية الذرة وطبيعة مكوناتها، والتي تعد أيضاً مكونات مهمة للإشعاع النووي.





1. بنية الذرة

من باب التبسيط، سنعتبر أن الذرة تتكون من ثلاثة أنواع من الجسيمات: البروتونات والنيوترونات التي تشكل نواة الذرة والإلكترونات التي تدور حول النواة.



البروتونات لها شحنة موجبة والنيوترونات محايدة كهربائياً بحيث تحمل النواة شحنة موجبة صافية. كتلة البروتون والنيوترون أكبر بنحو ألفي مرة من كتلة الإلكترون.

عدد الإلكترونات والبروتونات في ذرة واحدة متساو، وبما أن الشحنات الكهربائية متساوية ومتعاكسة، فإن الذرة متعادلة كهربائياً. قد تتشكل جسيمات أخرى في التفاعلات النووية. ستذكر بعض أكثرها شيوعاً التي تنتج في عملية الكشف عن الإشعاع النووي في الفقرات اللاحقة.





بادئ ذي بدء، يجب علينا أن نُفَرِّق بين الرموز الخاصة بالإلكترونات الذرية (e^-) وجسيمات (β^-)، حيث تتبعث الأخيرة من النويدات المشعة أثناء التحلل الإشعاعي. يشير الرمز β^- في الواقع إلى الجسيمات نفسها، أي الإلكترونات التي لها الشحنة والكتلة نفسها.

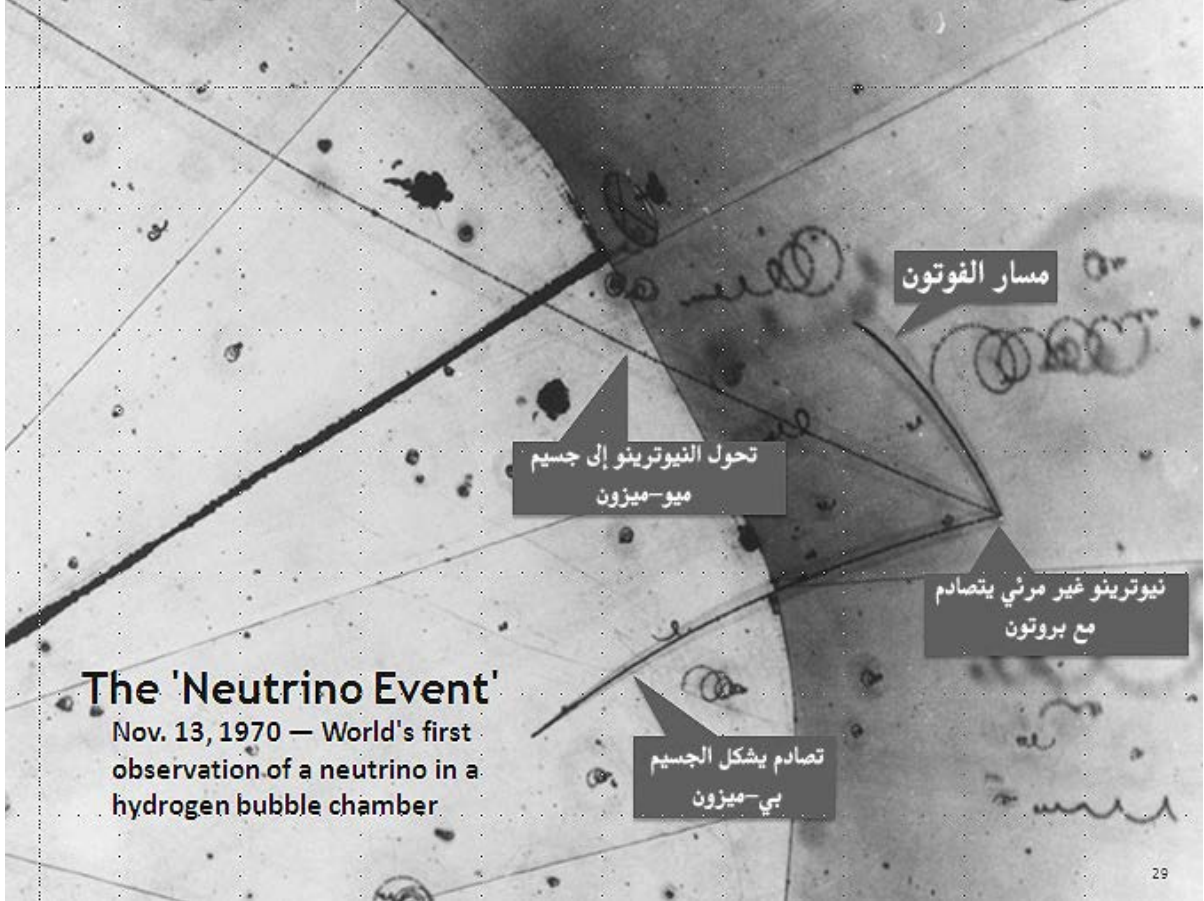
وقد اكتشف البوزيترون (e^+) في الإشعاع الكوني، وله كتلة الإلكترون نفسها ولكنه موجب الشحنة. وقد عثر على جسيم مشابه موجب الشحنة (β^+) ينبعث أثناء الاضمحلال الإشعاعي β^+ ؛ ومن ثم، عُرف على أنه جسيمات β^+ موجبة الشحنة.

يعد اضمحلال النيوترون والبروتون مثالين على تحلل β^- و β^+ ، على التوالي:



حيث ν و $\bar{\nu}$ هما رمزان للجسيمين: النيوتريينو والنيوترينو المضاد، على التوالي. وقد جرى افتراض وجودهما من قبل الفيزيائي النمساوي فولفغانغ باولي **W. Pauli** في عام 1931 لشرح فقدان الطاقة والزخم الزاوي غير الخاضع للمسألة في عملية الانحلال β .





أول استخدام لحجرة فقاعة الهيدروجين لاكتشاف النيوتريونات، في 13 نوفمبر 1970. اصطدم نيوتريينو بروتون في ذرة هيدروجين. وقع التصادم عند النقطة التي تنبثق منها ثلاثة مسارات على يمين الصورة.

جسيم آخر ينبعث في عمليات التفاعل النووي هو الجسيم ألفا α ، وهو ذرة هيليوم متأينة، أي ذرة الهيليوم التي فقدت كلا الإلكترونين. تختلف أشعة غاما والأشعة السينية في أصلها فقط؛ تنشأ أشعة γ من النواة بينما لا تنتج الأشعة السينية.





ينبعث الجسم ألفا α نتيجة تفاعلات معينة بين النيوترونات السريعة والنواة. كما ينبعث نتيجة الاضمحلال الإشعاعي لنظائر اليورانيوم والثوريوم التي تحدث بشكل طبيعي.

2. توهين المجالات الإشعاعية

تؤثر خصائص مصفوفة العينة على شدة مجال الإشعاع من خلال تقليل الإرسال. بمعنى آخر، تعمل مصفوفة المواد على إضعاف الإشعاع.

مع أننا سنفصل لاحقاً آليات التوهين الإشعاعي في مصفوفة عينة، إلا أنه من الجدير بالذكر أن النيوترونات يجري إضعافها في العمليات النووية التي تختلف تماماً عن تلك التي تؤثر على فوتونات الأشعة السينية أو الجسيمات المشحونة. وهذا يعني أن الخواص الكيميائية المختلفة تماماً تحكم نقل هذه الأنواع من الإشعاع إما داخل العينات أو بدلاً من ذلك، من خلال مجموعات التدرّيع.

تتشكّ النيوترونات السريعة بشكل مرّن (ومن ثم يجري إبطائها) بشكل أكثر فاعلية بوساطة نوى العناصر الكيميائية ذات العدد الذري المنخفض Z ، وهو عدد البروتونات في النواة الذرية لعنصر معين.

يعتبر الهيدروجين أكثر العناصر فاعلية في هذا الصدد (أي لأن نواته تحوي بروتون واحد فقط). في الطرف الآخر من المقياس، عناصر Z عالية جداً، على سبيل المثال يعتبر الرصاص أو الثوريوم أو اليورانيوم أكثر فاعلية في إبطاء النيوترونات من خلال الاصطدامات غير المرنة وليس من خلال الاصطدامات المرنة.





يجري امتصاص النيوترونات التي تباطأت بسبب التشتت، إما إلى طاقات الرنين الظهارية أو إلى الطاقات الحرارية، بدرجات متفاوتة من قبل النوى المختلفة في المصفوفة.

ومع ذلك، فإن تشتت وامتصاص الفوتونات يعتمد بشكل أساسي على عدد الجسيمات سالبة الشحنة (الإلكترونات) الموجودة في الذرة. من ناحية أخرى، يتحدد تشتت الجسيمات المشحونة إيجابياً بواسطة الشحنة الموجبة للبروتونات النووية.

نظراً لأن الشحنات الذرية الموجبة والسالبة متوازنة، فإن جميع آليات تشتت الجسيمات المشحونة تعتمد على الشحنة الإلكترونية للذرة.

تنتج الحقول الطبيعية من انبعاث الإشعاع النووي عن طريق النظائر المشعة التي تحدث بشكل طبيعي لمكونات عنصرية كيميائية معينة موجودة في مصفوفة العينة قيد التحقيق.

لجميع الأغراض العملية، فإن مجال الإشعاع النووي الطبيعي على مسافة هواء تزيد عن 10 سم من العينة يرجع إلى حد كبير إلى أشعة γ و X المنبعثة بالقرب من العينة، سيشمل مجال الإشعاع أيضاً جسيمات α و β .

ترتبط النظائر المشعة التي تحدث بشكل طبيعي، والتي تنتج مجالات الإشعاع الطبيعي، في الغالب بالعناصر الكيميائية مثل اليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم. في حالات اليورانيوم والثوريوم، تخضع النظائر المشعة الأم (^{238}U و ^{235}U و ^{232}Th) للاضمحلال الإشعاعي وتولد نظائر مشعة ابنة.



ومع ذلك، يساهم ^{235}U بشكل ضئيل نسبياً في مجال الإشعاع الطبيعي بسبب وفترته المنخفضة (0.27%) مقارنة مع ^{238}U . 'البنات' هي النظائر المشعة التي تنبعث منها أشعة γ التي تنتج مجالات إشعاعية قابلة للقياس.

التحلل الإشعاعي للنظائر المشعة الأم لليورانيوم والثوريوم هي عمليات متعددة المراحل تنتج فيها 'البنات' غير المستقرة، بدورها 'أمهات'. تنتهي عملية الاضمحلال لكل نظير مشع أصلي في النهاية بإنتاج نظير مستقر للرصاص (Pb).

تحدث مجالات الإشعاع الاصطناعي حيث تدخل مصادر الإشعاع في منطقة معينة. ما يجعل المجال اصطناعياً هو حقيقة أن مصادر الإشعاع تدخل، إما عن قصد أو عرضاً.

تتكون مجالات الإشعاع التي نواجهها بشكل شائع من الأشعة السينية والنيوترونات والجسيمات المشحونة النشطة، على سبيل المثال: البروتونات. قد تكون مرافق لمصدر الإشعاع المستخدمة في شكل نظائر مشعة مغلقة أو مفاعلات نووية أو مسرعات الجسيمات المشحونة بالطاقة الكهربائية.

بغض النظر عن طبيعة مجال الإشعاع (أي طبيعي أو اصطناعي)، تحدد خصائص كل من مصدر الإشعاع ومصفوفة العينة شدة المجال في أي نقطة معينة في الفضاء. بشكل عام، في الحقول الاصطناعية، تتضاءل شدة المجال مع البعد عن المصدر، بمعدل أسرع إلى حد ما من علاقة التربيع العكسي.





مع الحقول الطبيعية التي تحدث داخل عينة كبيرة متجانسة من المواد المشعة بشكل طبيعي، لا يوجد تغيير مكاني لشدة المجال لأن حجم العينة هو في حد ذاته مصدر موزع.

هذا يعني أن المصدر موجود في كل مكان داخل حجم العينة قيد النظر. إذا جرى قياس شدة المجال خارج عينة من مادة مشعة بشكل طبيعي، فإن شدة المجال تحكمها القوانين نفسها التي تنطبق على الحقول الاصطناعية.

في الواقع، إن مجال الإشعاع الاصطناعي هو الذي يوفر نطاقاً أكبر بكثير للتطبيقات الجيوفيزيائية النووية العملية. والسبب في ذلك هو أنه من أجل الحصول على أكبر قدر من الحساسية التحليلية المتاحة لخصائص كيميائية أو فيزيائية معينة، من الضروري مطابقة إشعاع المصدر مع الخصائص النووية للعناصر الكيميائية ذات الصلة في العينة، من أجل الحصول على المادة النووية المطلوب رد فعلها داخل العينة. ومن ثم، يختار المصدر ويدخل في تجميع تحليلي، مما يوفر مجالاً اصطناعياً.

يسمح استخدام مجالات الإشعاع الاصطناعي أيضاً بإمكانية إجراء التحليل بدقة وسرعات ذات فائدة عملية لتضخيمها. يحدث ذلك عن طريق مطابقة كثافة المصدر ونوع كاشف الإشعاع المستخدم وكفاءة حساب هذا الكاشف مع البارامترات الحرجة الأخرى التي تحكم التفاعل النووي. هذه البارامترات الحاسمة لتحسين القياس هي احتمالية التفاعل وخصائص الإشعاع النووي الذي هو ناتج التفاعل، أي نوع الإشعاع وتوزيع طاقته.





• انتقال الإشعاعات النووية

يوفر الانضباط الفرعي لنقل الإشعاع الأساس للتنبؤ بالتوزيعات المكانية والطاقة لأنواع مختلفة من الإشعاع النووي داخل أي مصفوفة. يشمل الإشعاع النووي المشار إليه للتو الإشعاع الأولي المنبعث من المصدر وأيضاً الإشعاع الثانوي، الذي يجري إنشاؤه أو تشتته داخل مصفوفة العينة.

ومن ثم، بالنسبة لعينة معينة وتكوين مصدر معين، سيكون من الممكن التنبؤ، من خلال تطبيق نظرية النقل، بكثافة الإشعاع المنبعث من العينة لتجميعها في كاشف.

تركز المناقشة في هذا القسم حول الانتقال الإشعاعي للنيوترونات والأشعة γ . وسوف نولي اهتماماً محدوداً فقط للأشعة السينية ونستبعد فعلياً النظر في الجسيمات المشحونة. إذ يستخدم الشكلين الأخيرين من الإشعاع بشكل حصري تقريباً، في حالة المواد غير المتجانسة، مع عينات صغيرة رقيقة.

كما ذكرنا سابقاً، لا يمثل تحقيق أخذ العينات التمثيلي مشكلة إذا كانت العينات المستخدمة كبيرة ومتجانسة لأن أي عينة فرعية صغيرة يجري اختيارها كعينة تحليلية ستكون ممثلة للعينة بكاملها. لذلك، في هذه الحالات، لا تكون نطاقات الاختراق لإشعاع المصدر ولا الإشعاع المنبعث المثارة ذات أي نتيجة إذا جرى تكوين العينة والكاشف هندسياً لعكس الإشعاع.





1. المفاهيم الأساسية لتفاعلات الإشعاع مع النواة

عندما تتفاعل أشعة γ أو الأشعة السينية أو النيوترونات مع مصفوفة من مادة ما، فإنها تفقد الطاقة وتتحرر عن مسارها الأولي. في كثير من الحالات، يجري استيعابها بالكامل في المصفوفة.

في حين أن العمليات الفيزيائية التي تحكم التشتت والامتصاص تختلف بشكل ملحوظ بالنسبة للنيوترونات والفوتونات (للأشعة γ و X)، فإن المفاهيم المستخدمة لوصف التوزيعات المكانية وطاقاتها متشابهة من الناحية الكمية.

بالنسبة لجميع التفاعلات النووية، يوصف احتمال التفاعل النووي للذرة من حيث معامل يسمى المقطع العرضي المجهري (σ) للتفاعل النووي. وهو من الناحية النظرية منطقة الذرة أو النواة التي تتعرض لهذا النوع المعين من التفاعل. سوف يختلف المقطع العرضي النووي والذري لأنواع الذرية أو النووية نفسها وفقاً لنوع التفاعل الذي جرى النظر فيه. أما أبعاد المقطع العرضي النووي أو الذري هي 2 سنتيمتر لكل نواة أو ذرة. الوحدة المستخدمة هي بارن $= 10^{-24}$ سم².

ومع ذلك، عند النظر في مصفوفة العينة، غالباً ما يكون من الضروري النظر في احتمال التفاعل على نطاق مجهري بدلاً من النوى والذرات بشكل فردي. بعد ذلك، يكون قياس احتمالية التفاعل هو المقطع العرضي العياني (Σ)، وهو المقطع العرضي لكل سم³ من المادة ووحدة قياسه سم⁻¹.

المقطع العرضي العياني هو نتاج المقطع العرضي المجهري وعدد الذرات لكل سم³. هذه الكثافة الذرية هي نتاج الكثافة الظاهرية (ρ) ورقم أفوجادرو (N_A). ورقم



أفوجادرو هو ثابت عالمي يشير إلى عدد الذرات لكل غرام-ذرة، أي عدد الذرات لكل وزن ذري (A)، معبراً عنه بالغرام وتبلغ قيمته $(6.02214076 \times 10^{23})$. يُعرّف الوزن الذري بأنه مجموع عدد البروتونات والنيوترونات في نواة ذرة معينة.

في حالة انتقال أشعة γ ، يُشار إلى المقطع العرضي العياني على أنه إجمالي معامل التوهين الخطي (μ). في حالة النيوترونات، تُعرف البارامترات العامة نفسها بالمقطع العرضي العياني.

بالنسبة لكل من الفوتونات والنيوترونات، يحدد هذا النوع من البارامترات احتمال إزالتها لكل وحدة طول مسار داخل المصفوفة. معكوس هذا النوع من البارامترات هو متوسط المسار الحر (λ). في كلتا الحالتين، متوسط المسار الحر هو متوسط المسافة المقطوعة قبل أن يدخل الفوتون أو النيوترون في تفاعل متغير الحالة.

هذه هي البارامترات التي تشكل الأساس لتقدير نسبة القصف أو الكمية المنبعثة من أشعة γ أو النيوترونات التي يجري امتصاصها في عينة محددة. في حالة استخدام النيوترونات في القياسات الجيوفيزيائية النووية، فإن المتغير الأكثر أهمية هو تدفق النيوترونات **Neutron flux** في منطقة معينة. وتدفق النيوترونات هو المعدل الزمني الذي تعبر فيه النيوترونات منطقة الوحدة في مجموعة معينة من الإحداثيات المكانية.

يحدد هذا المتغير، أي التدفق، المعدل الذي يمكن أن تنتشر به التفاعلات النووية الناشئة عن النيوترونات المرغوبة مع عينات من كتلة معينة وفي هندسة معينة. كما أنه يحدد نوع التدريع المطلوب لحماية الأفراد والأجهزة.





في حالة أشعة γ و X ، يجري تعريف التدفق بالتشابه مع تدفق النيوترونات. أفضل وصف لتغير التدفق داخل المصفوفة هو الدوال التي تأخذ الشكل:

$$[B \exp(-\mu r)] / r^2$$

حيث: r هي المسافة من المصدر داخل مصفوفة العينة إلى النقطة في الفضاء قيد النظر، و m هو معامل التوهين الخطي و B عامل تعزيز شدة الإشعاع عند المصدر. بالطبع، هذه هي الحالة المبسطة لمصدر أشعة γ المتضمن في مصفوفة كبيرة متجانسة.

في الحالات التي يكون فيها الإرسال هو فقط أشعة γ الأولية يكون لدينا $B = 1$. لنقل كل من أشعة γ الأولية والمبعثرة، $B > 1$ ، أو بشكل أكثر دقة، $B = B(r)$ ، وهو ما يسمى عامل تراكم أشعة γ داخل المصفوفة.

في حالة النيوترونات، فإن الدالات التي تصف تغير التدفق تشبه بشكل عام تلك المذكورة أعلاه للأشعة السينية. ومع ذلك، فإن الدالات الفعلية المستخدمة أكثر تعقيداً.

هذا جزئياً لأن الآليات الرئيسية لإزالة النيوترونات تصير فعالة عندما تتباطأ النيوترونات إلى طاقات حرارية أو قريبة من الطاقة الحرارية، أي عندما يكون توزيع طاقتها أساساً هو توزيع ماكسويل وتنتشر النيوترونات بحرية في المصفوفة قبل التقاطها.

في الواقع، يوجد نوعان رئيسيان من تفاعلات نواة النيوترونات المتنافسة والتي تحدد عمليات تباطؤ النيوترونات:



• **التشتت المرن Elastic scattering** الذي يشبه الاصطدامات بين الكرات المطاطية المثالية ذات الأحجام والكتل المختلفة. هنا، يتحدد اتجاه الكرات المرتدة وسرعتها فقط من خلال سرعاتها الأولية، واتجاهات تحركها وكتلتها. ومع ذلك، تنقل بعض طاقة النيوترون الوارد إلى نواة الارتداد. لا تضيع أي طاقة في هذا النوع من المواجهة.

• **التشتت غير المرن Nonelastic scattering** يشبه الأول في كثير من النواحي، باستثناء أن الطاقة يجري استهلاكها في مثل هذه المواجهات. هناك أنواع مختلفة من آليات التشتت غير المرنة والتي تتنافس أيضاً على النوع نفسه من النيوكليدات. وهي تشمل التشتت غير المرن، حيث تنبعث الطاقة المستهلكة تلقائياً كأشعة γ ، ومجموعة متنوعة من تفاعلات الجسيمات النيوترونية (على سبيل المثال: $(n, 2n)$, (n, α) , (n, p)) حيث تطلق الأشعة طاقة إزالة الإثارة النووية.

يوجد أساساً متغيرين (للتوهين / الامتصاص) في الدالة الأسية التي تتنبأ بتدفق النيوترون: طول التباطؤ (L_s) وطول الانتشار (L_d). لكلا البارامترين وظائف معقدة للمقاطع العرضية العيانية للعمليات التي تحكم عمليات التباطؤ، من ناحية، والتقاط الطاقة المنخفضة، ونشر النيوترونات، من ناحية أخرى.

ومع ذلك، في حين أن هذين المتغيرين مفيدان جداً للتنبؤ بتغير تدفق النيوترونات، إلا أنهما ليسا أساسيين من ناحية المفاهيم الأساسية لانتقال الإشعاع. وهما مشتقان من عدة متغيرات أخرى ترتبط ارتباطاً جوهرياً بالظواهر التي تحدد تدفق وامتصاص النيوترونات في الوسائط المادية.

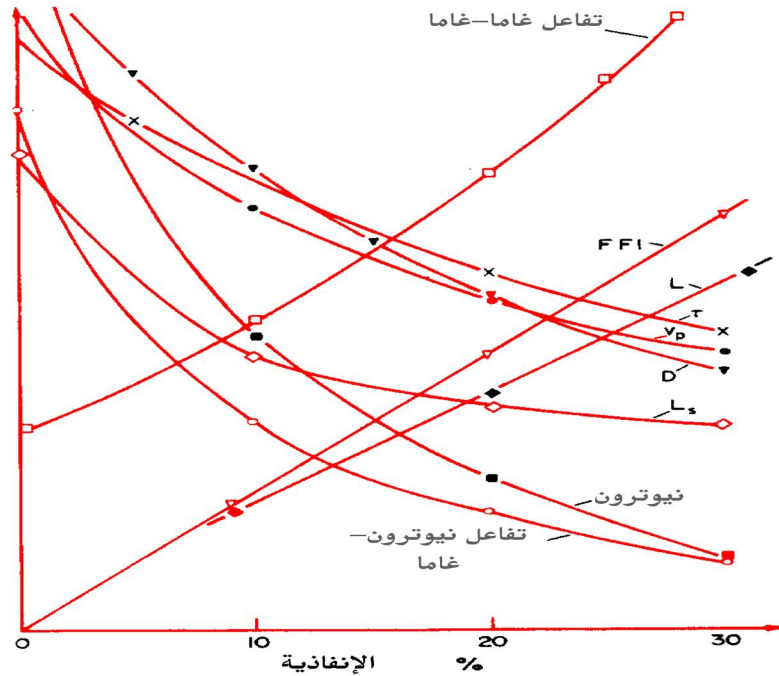
أحد المتغيرات التي ترتبط ارتباطاً وثيقاً بمفاهيم النقل هو المقطع العرضي العياني للتشتت النيوتروني في المادة. متغير آخر هو متوسط الخمول **Lethargy**،





وهو فقدان الطاقة النسبي اللوغاريتمي لكل تصادم (نواة-نيوترون) في المادة. وتجدر الإشارة هنا إلى أنه كلما انخفض الوزن الذري، زاد الخمول.

معامل الانتشار **Diffusion coefficient (D)** هو المتغير الثالث الذي يرتبط بشكل أساسي بمفاهيم النقل الإشعاعي وهو وثيق الصلة بالمفاهيم التي سنتناولها بشكل أكبر لاحقاً. ترتبط قيمته عكسياً بالمقطع العرضي لنقل النيوترونات، حيث يشتمل النقل على كل من التشتت والامتصاص. **D** هو في الأساس المتغير الذي يحدد حجم التيار النيوتروني في أي نقطة في الفضاء (أي معدل تدفق النيوترونات)، مع إعطاء قيمة معينة للحقل النيوتروني (أي المعدل المكاني لتغير تدفق النيوترونات).



البارامترات الجيوفيزيائية الرئيسية مقابل المسامية (محتوى الهيدروجين). إذ توفر مجموعات البارامترات معلومات مهمة حول وجود صخور الخزان. في هذه الحالة المعلومات حول **L_s, μ, τ, D, T**. يمكن الحصول على فهرس السوائل الحرة ومحتويات العناصر المشعة عند مسح كل من الآبار المفتوحة والمغلقة.



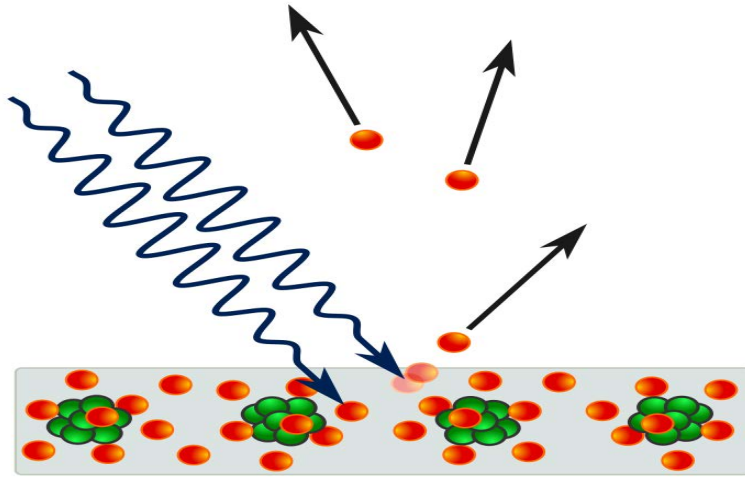


1. تفاعلات الفوتونات مع الذرة

يوجد ثلاثة أنواع رئيسية من التفاعل بين أشعة γ والذرات: التأثير الكهروضوئي **Photoelectric effect** وتشتت كومبتون **Compton scattering** وإنتاج الأزواج **Pair production**.

أ. التأثير الكهروضوئي

هنا ينقل فوتون أشعة γ أو أشعة X كل طاقته إلى أحد الإلكترونات المرتبطة بالذرة. هذه العملية لها أقصى احتمالية عندما تكون طاقة الفوتون أعلى بقليل من طاقة ربط الإلكترون بالذرة. غالباً ما يشار إلى هذه الطاقة باسم طاقة امتصاص الرنين. في الواقع، فإن الإلكترونات الأكثر أهمية للامتصاص الكهروضوئي هي الإلكترونات الداخلية شديدة الارتباط نسبياً.



انبعاث الإلكترونات من صفيحة معدنية بسبب الفوتونات الضوئية. تسمى الإلكترونات المنبعثة بهذه الطريقة بالإلكترونات الضوئية. تدرس هذه الظاهرة في فيزياء المادة المكثفة والحالة الصلبة وكيمياء الكم لاستخلاص استنتاجات حول خصائص الذرات والجزيئات والمواد الصلبة. وجد التأثير في الأجهزة الإلكترونية المتخصصة في الكشف عن الضوء وانبعاث الإلكترون في الوقت المناسب بدقة.





علاوة على ذلك، تزداد طاقات ربط الإلكترونات الداخلية مع الحجم الذري: من نحو 3 كيلو إلكترون فولت للعناصر الخفيفة إلى أكثر من 100 كيلو إلكترون فولت لأثقل العناصر. هذا يعني أنه لا يمكن امتصاص أشعة X و Y ذات الطاقات الأعلى من 100 كيلو إلكترون فولت إلا من خلال التأثير الكهروضوئي إلى حد ملموس إذا كانت الذرات الماصة تنتمي إلى العناصر الثقيلة في الجدول الدوري.

بشكل عام، يتضاءل المقطع العرضي للتفاعل الكهروضوئي مع نوع معين من الذرات (مقياس لاحتمال التفاعل) بسرعة مع زيادة طاقة الفوتون فوق طاقة ربط الإلكترون. كما أنه يزداد بسرعة مع العدد الذري لنواة العنصر الكيميائي Z ، التي يتفاعل معه الفوتون، إذا أخذنا في الاعتبار مادة الهدف الأولية النقية.

يمثل العدد الذري عدد الإلكترونات (أو بدلاً من ذلك، البروتونات) لنوع معين من العناصر. فيما يتعلق باختلاف المقطع العرضي الكهروضوئي مع التركيب الأولي للمصفوفة الممتصة، فإنه يزداد بسرعة مع زيادة العدد الذري بحيث يتغير المقطع العرضي العياني تقريباً للقوة 3.6 للعدد الذري، أي إلى $Z^{3.6}$.

هذه الحساسية الأكبر بشكل غير متناسب للعناصر الأثقل مفيدة في معظم، ولكن ليس كل، المشكلات التحليلية في الجيولوجيا والكيمياء الجيولوجية.

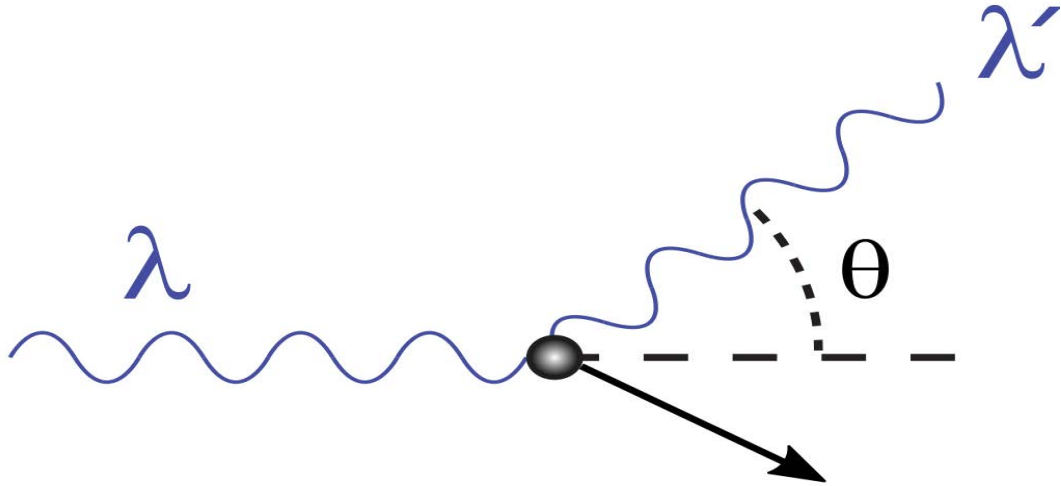
ب. تشتت كومبتون

تشتت كومبتون هو تفاعل أكثر أهمية من الامتصاص الكهروضوئي إذا كانت الذرات والفوتونات ذات الطاقات الوسيطة متضمنة (أي من 200 كيلو إلكترون فولت إلى 3 إلكترون فولت).



في هذا التفاعل، ينقل الفوتون جزءاً فقط من طاقته إلى أحد الإلكترونات الذرية. يتضاءل احتمال حدوث هذا التفاعل مع زيادة الطاقة بشكل تدريجي أكثر من حالة التأثير الكهروضوئي.

أيضاً، بالنسبة للفوتونات من جميع الطاقات، يكون احتمال التفاعل هذا حساساً بشكل أساسي للكثافة الظاهرية، والتي تختلف خطياً بها. إنها مستقلة عن الخواص الكيميائية للمادة، أي مستقلة عن Z .



في تشتت كومبتون يأتي الفوتون ذو الطول الموجي من اليسار، ويصطدم مع هدف في حالة السكون، ويظهر فوتون جديد بطول الموجة بزاوية. يرتد الهدف، ويحمل مقدراً يعتمد على الزاوية من الطاقة الساقطة.

ت. إنتاج الزوج

بالنسبة للفوتونات ذات الطاقات الأعلى من 3 إلكترون فولت، فإن التفاعل الأساسي بين الفوتون والنواة هو التكوين التلقائي لزوج من الإلكترونات ذات قطبية شحنة معاكسة. يُعرف هذا التأثير بإنتاج الزوج. عند تصادمها مع





إلكترونات أخرى ذات قطبية شحنة معاكسة لإلكتروناتها، تفنى الإلكترونات التي تنشأ من إنتاج الزوج. ينتج عن كل حدث فناء انبعاث تلقائي لفوتون له طاقة مكافئة لطاقة الكتلة الباقية للإلكترون (أي 0.51 ميغا إلكترون فولت). يشار إلى هذا الإشعاع عموماً باسم إشعاع الإفناء. يحدث هذا النوع من التفاعل فقط مع الفوتونات ذات الطاقات الأعلى من 1.02 ميغا إلكترون فولت.

ومع ذلك، يرتفع احتمال التفاعل بشكل حاد مع زيادة طاقة الفوتون فوق هذه العتبة بحيث يكون احتمال التفاعل لفوتونات 2 ميغا إلكترون فولت مع ذرات ذات أوزان ذرية متوسطة وكبيرة بالفعل مهماً مقارنة باحتمال تشتت كومبتون.



رسم تخطيطي يوضح عملية إنتاج زوج الإلكترون والبوزيترون. في الواقع، يكون الزوج المنتج على علاقة خطية تقريباً. تمثل النقطة السوداء 'Z' ذرة مجاورة برقم ذري Z.

في الواقع، يتناسب المقطع العرضي لرد فعل إنتاج الزوج مع Z^2 . هذه الخاصية مفيدة في أن استجابة الأداة القائمة على هذا التفاعل أقل حساسية للعناصر الثقيلة بشكل غير متناسب من تلك التي تعتمد على التأثير الكهروضوئي.

تكمن أهمية هذه الاعتبارات في أنها، من ناحية، تساهم جميع أنواع التفاعلات الثلاثة في تخفيف وامتصاص أشعة γ و X في العينات المقدمة للتحليل، وفي أجهزة الكشف المستخدمة في المسابير وفي التدريع الذي جرى





إنشاؤه من أجل حماية الأفراد أو لعزل أجهزة الكشف عن الإشعاع المستخدمة في القياسات من إشعاع الخلفية غير المرغوب فيه.

ومع ذلك، من ناحية أخرى، فمن الصحيح أيضاً أن هناك نطاقات من طاقة الفوتون يسيطر فيها كل نوع من أنواع التفاعل، مع أن النطاقات الفعلية تختلف باختلاف الوزن الذري (وعدد) العناصر في المصفوفة.

تستخدم هذه الحقيقة الأخيرة بشكل متكرر في ابتكار أنظمة القياس الجيوفيزيائية النووية على أساس استخدام مصادر أشعة γ . أحد الأمثلة على ذلك هو مجموعة مسابير قياس الطيف والانتقائية γ - γ باستخدام مصادر ^{60}Co . نظراً لأن طاقات الفوتون هي 1332 كيلو إلكترون فولت و1173 كيلو إلكترون فولت للنظير السابق و662 كيلو إلكترون فولت للنظير الأخير، فإن تفاعلات الإنتاج الزوجي تكاد تكون مهمة.

يمكن لهذه المسابير قياس أشعة γ بشكل منفصل في نطاق طاقة:

1. **في نطاق الطاقة المنخفض** تكون الفوتونات قادرة على الامتصاص الكهروضوئي وتشنت كومبتون، وتستجيب بطريقة حساسة لكل من التركيب الكيميائي الكلي وكثافة الإلكترون.

2. **أما في نطاق الطاقة الأعلى** تتفاعل الفوتونات مع الذرات بشكل حصري تقريباً عن طريق تشنت كومبتون، وهي حساسة لكثافة الإلكترون وحدها. بالنسبة للمخاليط والمركبات الكيميائية التي تحوي بشكل أساسي على عناصر كيميائية غير الهيدروجين، فإن كثافة الكتلة الصخرية تتناسب طردياً مع كثافة الإلكترون. حتى وجود الماء في الخليط أو المركب لا يقلل بشكل كبير من دقة هذا التناسب.





المثال الثاني هو مقياس إنتاج الزوج المستخدم للتحليل بالجملة لنقاوة الفحم ودرجة خام الحديد. في هذه الحال، المصدر هو الراديوم، وهو مناسب لبدء إنتاج الزوج في العينة، متبوعاً بانبعثات إشعاع الفناء.

الراديوم مناسب في هذا الصدد لأنه مصدر للعديد من أشعة γ مع طاقات أعلى من 2 ميغا إلكترون فولت. يسجل المقياس معدلات عد كل من إشعاع الفناء وفوتونات كومبتون المشتتة؛ هذا الأخير يستخدم لتصحيحات الكثافة.

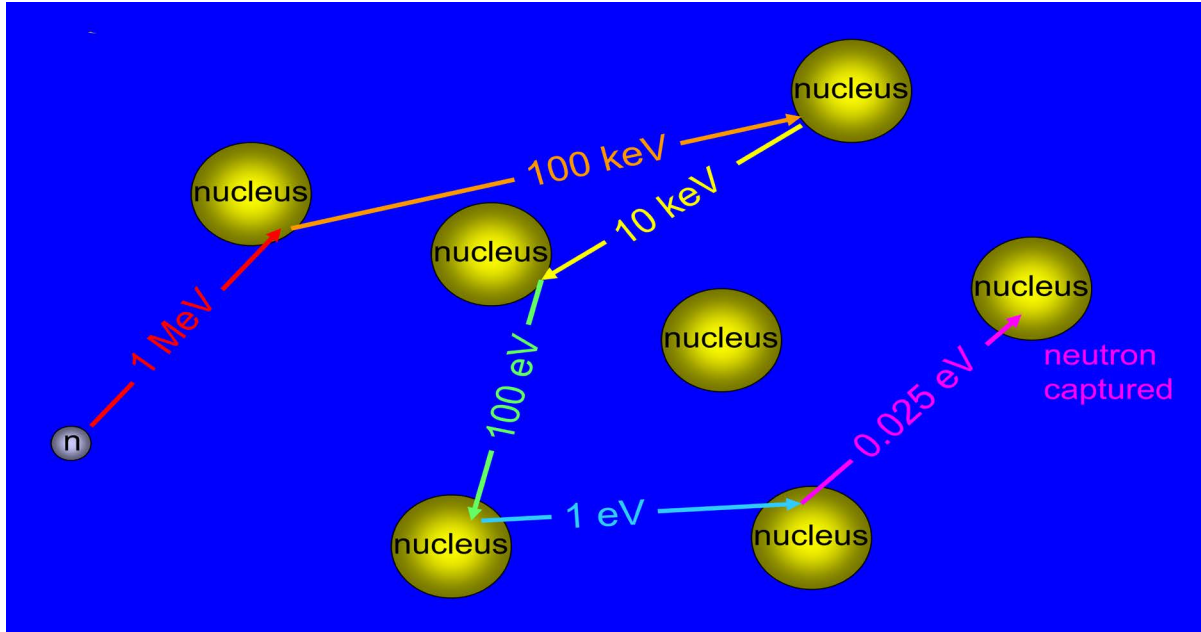
في ضوء الطريقة التي تسود بها تفاعلات الفوتون المختلفة في نطاقات الطاقة المختلفة، تجدر الإشارة إلى القيم النموذجية لمعامل التوهين الخطي للعناصر المختلفة وطاقات الفوتون المختلفة، أي 0.1 ميغا إلكترون فولت و1.0 ميغا إلكترون فولت و5 ميغا إلكترون فولت، على التوالي.

3. تفاعلات نواة النيوترون

كما ذكرنا أعلاه، توجد عمليتان تحكمان التوزيع المكاني للنيوترونات في مصفوفة حيث يصدر المنبع المستخدم نيوترونات سريعة (< 500 كيلو إلكترون فولت): إبطاء النيوترونات السريعة وانتشار النيوترونات الحرارية.

تعد أول هذه العمليات هي الأصعب في صياغتها بدقة. ومع ذلك، فإن نظرية الانتشار متعدد المجموعات كما هي مطبقة على هذه المشكلة تعطي عموماً اتساقاً جيداً بين النظرية والتجربة.





تولد النيوترونات بسرعة. لكنها تتباطأ بسبب التشتت (يشار إليها بالاعتدال) حتى تصل إلى الطاقات الحرارية. أخيراً، تمتصها نواة مستهدفة.

تعتمد الدالات التي تتنبأ بالتدفق الحراري على الفرق بين الدوال الأسية باستخدام طول التباطؤ وطول الانتشار الحراري كأسس. الأسس الفعلية لديها، على التوالي، الأشكال r/L_s و r/L_d .

يعطى تعبير تقريبي لتقييم التدفق من خلال الفرق بين هذين الأسين لكل وحدة زاوية صلبة، مقياساً للفرق بين مربعي L_s و L_d . ومع ذلك، فإن القيم النموذجية لـ L_s و L_d تكون أكثر وضوحاً للقارئ من القيم المعقدة ولكنها فقط التعبيرات التقريبية المتاحة لتدفق النيوترون الحراري.





من المهم ملاحظة أن L_s يتضاءل بسرعة كبيرة مع زيادة محتوى الهيدروجين في المصفوفة، بينما يتضاءل L_d بسرعة مع زيادة المقطع العرضي لالتقاط النيوترونات. يوجد تباين بين قيم L_d للمواد ذات المقاطع العرضية الكبيرة لالتقاط النيوترونات، على سبيل المثال، خام الحديد مثل الهيماتيت، والمواد ذات المقاطع العرضية الصغيرة، مثل الغرافيت، وهو شكل من أشكال الكربون النقي. يستخدم معامل المسافة الثالث، وهو طول الترحيل للنيوترونات L_m ، للتعبير عن فكرة إلى أي مدى يمكن للنيوترونات أن تنتقل في مادة معينة. هذا البارامتر يساوي الجذر التربيعي لمجموع مربعات أطوال التباطؤ والانتشار.

• كيف تؤخذ القياسات في أجهزة القياس الجيوفيزيائية النووية

عادة ما تكون الأدوات المستخدمة في القياسات الجيوفيزيائية النووية وفق ثلاثة تكوينات أساسية: العينة والمصدر وكاشف الإشعاع. في كل هذه التكوينات، قد يكون الإشعاع المكتشف لرصد العملية الجيوفيزيائية عبارة عن أشعة سينية أو نيوترونات أو جسيمات أو أشعة γ . في أحد التكوينات، يكون مصدر الإشعاع الأساسي وكاشف الإشعاع الثانوي خارجين عن العينة.

في العديد من التطبيقات التي تستخدم هذا التكوين، توضع العينة بين المصدر والكاشف. في التطبيقات الأخرى، يقع المصدر والكاشف، مفصولان عن طريق المسافة والدرع الإشعاعي، على الجانب نفسه من العينة.

يتضمن هذا التكوين الأدوات الجيوفيزيائية النووية المستخدمة لتحليل العينات الثابتة التي قد تكون إما صغيرة أو كبيرة، أي عينات سائبة. قد تكون





العينات الصغيرة في شكل مرشحات حبيبية، يجري استخلاصها في العمليات الصناعية، أو عينات غبار مجمعة في مرشحات الهواء.

في هذه الحالات، تكون هندسة المصدر والعينة والكاشف ثابتة بشكل صارم. يتضمن هذا التكوين أيضاً معدات للتحليل على خط الخامات الموجودة على سيور النقل. بشكل عام، تعرّف هذه الهندسة بدقة من حيث المصدر والكاشف، ولكن بشكل خاص من ناحية العينة المناسبة، نظراً لأنه من الصعب إعادة إنتاج هندسة العينة بدقة على حزام متحرك.

تتضمن أمثلة التكوين الثاني مقاييس الملاط حيث يغمر كل من مصدر الأشعة السينية وكاشف الإشعاع في تدفقات الملاط بتدفقات إثراء الخام أو دوائر غسيل الفحم. قد يشمل هذا التكوين الثاني أيضاً مسابير تسجيل البئر وتحقيقات تسجيل الآبار المجهزة بكل من المصدر والكاشف.

ومع ذلك، قد يُنظر إلى هذه الأدوات أيضاً على أنها تنتمي إلى النوع الأول من التكوين، حيث تكون الكتلة الأسطوانية للصخور خارجية إما لتجويف مملوء بالسائل أو تجويف أسطواني مملوء بالهواء، والذي يكون بدوره خارجياً للحاضن الأسطواني لتجميع المصدر والكاشف للمسبار.

بالنسبة للنوع الثالث من التكوين، تشير أكثر الأمثلة شيوعاً إلى قياس المواد المشعة، حيث يكون النشاط الإشعاعي مظهراً إما للنظائر المشعة المكونة بشكل طبيعي للعينة أو للعناصر المطلوبة في المادة التي يجري تنشيطها بوساطة نيوترونات مصدر إشعاع أولي، في وقت محدد قبل إجراء قياس الإشعاع.

في هذه الحالات، تعمل المادة قيد التحقيق كمصدر للإشعاع. ومن ثم، يكون المصدر داخل المادة والكاشف في الخارج.





1. فيزياء الكشف عن الإشعاع النووي

لقد كان أحد معالم الفيزياء النووية اكتشاف النشاط الإشعاعي بوساطة هنري بيكريل في عام 1896. حيث قام بتخزين لوحات فوتوغرافية ملفوفة في ورق مقاوم للضوء بالقرب من أملاح اليورانيوم. عندما أخرجها، وجدها سوداء كما لو أنها تعرضت للضوء.

كانت هذه هي الملاحظة الأولى لوجود إشعاع مخترق من النواة وكذلك الطريقة الأولى التي اكتشفت للكشف عن هذا الإشعاع، أي تشعيع مستحلب فوتوغرافي.

الطريقة الثانية للكشف عن الإشعاع النووي، كاشف التآين المملوء بالغاز، جرى تطويره بعد ملاحظة أن وجود ملح اليورانيوم تسبب في جعل الهواء في محيطه موصلًا كهربائيًا.

كان التقدم المحرز في مجال الكشف عن الإشعاع النووي مثيراً للإعجاب منذ الأيام الأولى. لا يزال ينفذ الكثير من العمل في هذا المجال من الأجهزة من أجل زيادة صقل التقنيات الحالية وتطوير طرق جديدة.

في معظم الطرائق المستخدمة للكشف عن الإشعاع النووي، يتكون جهاز الكشف من جزأين متميزين: الكاشف والإلكترونيات المرتبطة به اللازمة لمعالجة الإشارة الناتجة عن تفاعل الإشعاع النووي مع الكاشف.

الآلية الأساسية المستخدمة في كاشف الإشعاع هي تبديد الطاقة بوساطة جسيم مشحون في وسط مناسب. يمكن أن يكون الوسط صلباً أو سائلاً أو غازياً. عادة ما تحول الطاقة المشتتة بوساطة الجسيم المشحون إلى إشارة





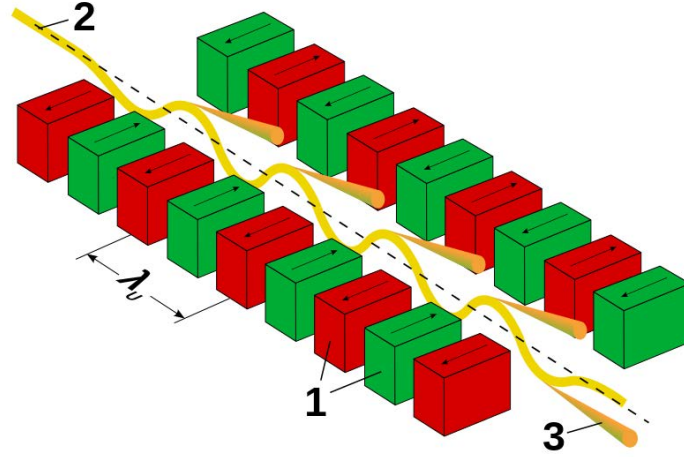
كهربائية. قد تظهر هذه الإشارة على شكل شحنة كهربائية أو جهد أو تيار. لذلك، يمكن للمرء أن يفكر في كاشف الإشعاع على أنه محول طاقة.

قد يكون الجسم المشحون المكتشف داخل الكاشف هو الإشعاع الأساسي. في التطبيقات الجيوفيزيائية، ينتج بشكل أكثر شيوعاً عن تفاعل الإشعاع الأولي المحايد كهربائياً مع مادة الكاشف، مما ينتج عنه لاحقاً جسيم مشحون (على سبيل المثال إلكترون من تفاعلات γ أو أشعة X ؛ أو جسيم من تفاعل نيوتروني).

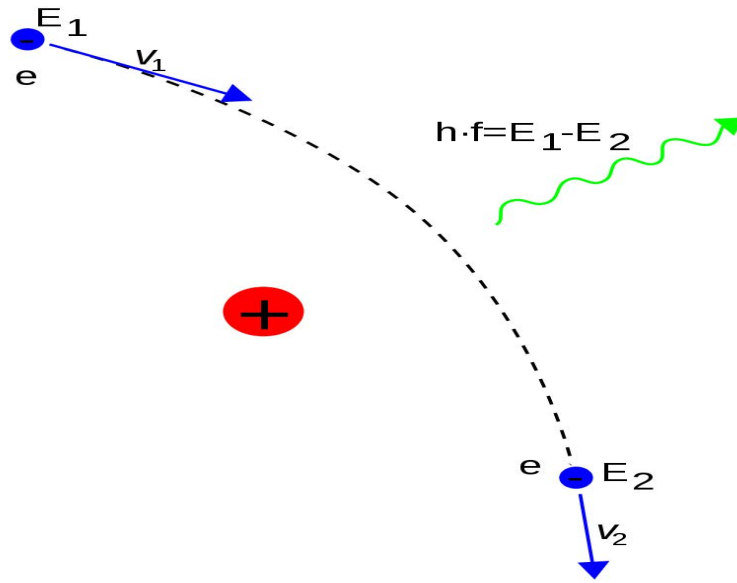
يحدث تبديد الطاقة بشكل رئيسي من خلال عمليتين: التأين والوميض. في عملية التأين، تتجرد الذرات المحايدة من الإلكترونات التي تدور في مدارها لتكوين أيونات موجبة. في عملية الوميض، تتحفز الذرات في البداية وعندما تزول الإثارة، ينبعث الضوء.

توجد أشكال أخرى من تبديد الطاقة مثل التفكك الجزيئي والإشعاعات السينكروترونية **Synchrotron Radiation**، وأشعة الانكباح **Bremsstrahlung** وإشعاع تشيرنكوف **Cherenkov Radiation**، ولكن مناقشة هذه الأشكال خارج نطاق هذا الكتاب.

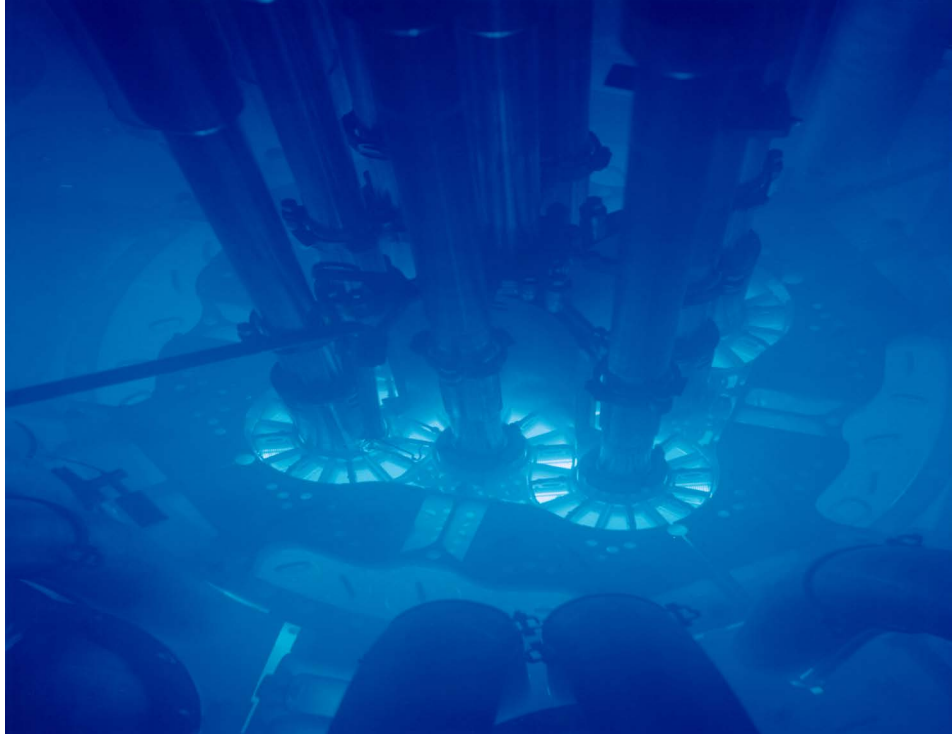




إشعاع السنكروترون هو الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث عندما تخضع الجسيمات النسبية المشحونة لتسارع متعامد مع سرعتها. وهو ينتج عن الحقول المغناطيسية المتناوبة في موج 1: مغناطيس، 2: شعاع إلكتروني، 3: فص إشعاع.



أشعة الانكباح هي إشعاع كهرومغناطيسي الناتج عن تباطؤ الجسيم المشحون عندما ينحرف بواسطة جسيم مشحون آخر، عادةً إلكترون بواسطة نواة ذرية. أي أنها تنتج بواسطة إلكترون عالي الطاقة ينحرف في المجال الكهربائي لنواة الذرة.



إشعاع تشيرنكوف هو إشعاع كهرومغناطيسي ينبعث عندما يمر جسيم مشحون (مثل الإلكترون) عبر وسط عازل بسرعة أكبر من سرعة الطور (سرعة انتشار جبهة الموجة في وسط) من الضوء في ذلك الوسط. نشاهد في الصورة إشعاع تشيرنكوف يتوهج في قلب مفاعل الاختبار المتقدم Advanced Test Reactor.

أ. تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة

عندما يكون الجسيم النووي مشحوناً، على سبيل المثال ينتقل بروتون أو جسيم عبر المادة، ويؤين أو يثير تلك الذرات التي يقترب منها بشكل كافٍ. ويرجع ذلك إلى قوة كولوم، التي يمكن أن تنقل الزخم إلى الإلكترون أثناء مرور الجسيم.





تمثل الطاقة المنقولة إلى الإلكترونات فقداناً للطاقة الحركية مما يجعل الجسم المتحرك يتباطأ ويتوقف في النهاية. نقل الطاقة إلى الأيونات الثقيلة الموجبة التي تنشأ أثناء عملية التأين لا يكاد يذكر. تفقد الإلكترونات الطاقة بالطريقة نفسها التي تفقد بها الجسيمات النووية المشحونة الطاقة.

ومع ذلك، مع وجود كتلة صغيرة، ينحرف الإلكترون بزوايا أكبر بكثير من الجسيمات الثقيلة. لا يحدث تباطؤ الإلكترون على طول خط مستقيم كما يحدث مع الجسيمات النووية الثقيلة المشحونة.

ب. امتصاص أشعة γ

كما ذكرنا سابقاً، تتفاعل أشعة γ مع المادة من خلال ثلاث عمليات رئيسية: التأثير الكهروضوئي وتشتت كومبتون وإنتاج الأزواج.

ت. وقف النيوترونات

تختلف العمليات التي تتفاعل بها النيوترونات مع المادة بشكل ملحوظ عن تلك الخاصة بالجسيمات المشحونة أو أشعة γ . نظراً لأن النيوترونات متعادلة كهربائياً، فلا توجد قوة كولوم بين النيوترونات والإلكترونات الذرية أو النوى. فقط القوى النووية هي التي تؤثر بين النيوترونات والأنوية.

يجري إبطاء النيوترونات ذات الطاقات الأعلى من (0.025 إلكترون فولت) عن طريق التشتت مع النوى وتمتص في النهاية من خلال تفاعلات التقاط



النيوترونات. بالنسبة للنيوترونات ذات الطاقات الأقل من 10 ميغا إلكترون فولت، فإن عملية التباطؤ ترجع أساساً إلى تشتت البروتونات.

نظراً لأن النيوترون والبروتون لهما كتلتان متطابقتان، فإن النيوترون ينقل عملياً كل طاقته إلى البروتون إذا كان الاصطدام وجهاً لوجه. في حالة اصطدام بروتون، ينقل جزء أكبر من الطاقة مقارنةً بالتصادم مع أي نواة أخرى. تستخدم هذه الحقيقة في أنواع معينة من أجهزة الكشف عن النيوترونات والدروع النيوترونية.

ث. كشف الإشعاع ومعالجة الإشارات

توفر عمليات التفاعل المختلفة بين النوى وأنواع مختلفة من الإشعاع الساقط، أي الفوتونات والنيوترونات والجسيمات المشحونة، والتي وصفت سابقاً، الأساس لاكتشاف وقياس هذه الإشعاعات المعينة.

بشكل أساسي، يوجد ثلاثة أنواع من أجهزة الكشف التي سنناقشها بالتفصيل أدناه. النوعان الأولان هما أجهزة الكشف الغازية وكاشفات المصفوفة الصلبة، حيث يوفر تبديد الطاقة للإشعاع الوارد داخل مصفوفة الكاشف، من خلال التأين، إشارة خرج قابلة للقياس مباشرة.

النوع الثالث هو كاشفات الوميض، حيث تكون نتيجة تبديد طاقة الإشعاع الساقط هي ووميض ضوئي، والذي تحوله الأجهزة المستخدمة إلى إشارة كهربائية. ومع ذلك، فإن الخاصية المشتركة لجميع أنواع الكاشف الثلاثة هي أنها تصدر إشارات تعالج لتكوين البيانات التي تشكل أساس جميع التفسيرات الجيوفيزيائية.





1. الحصول على البيانات ومعالجتها

توجد طريقتان أساسيتان لتسجيل وقياس الإشعاع المكتشف في التطبيقات النووية: قياس الطيف وتراكم إجمالي الأعداد. في **الجيوفيزياء النووية**، يعني قياس الطيف تراكم البيانات التي تتوافق مع توزيع الطاقة للإشعاع المكتشف. ويعني تراكم الأعداد الإجمالية أن جميع الإشارات المتولدة في الكاشف تسجل دون التفريق بين اتساعها أو بين طاقات 'جسيمات' الإشعاع الوارد التي تولد الإشارات.

من أجل فهم هذين النهجين، دعونا نفكر في تطبيق بسيط جداً، وهو قياس النشاط الإشعاعي الطبيعي لمادة أو صخرة معينة. كما هو معروف جيداً، يرجع النشاط الإشعاعي الطبيعي إلى وجود العناصر المشعة التي تحدث بشكل طبيعي من عناصر مثل: **U** و **Th** و **K**. يمكننا إجراء هذا القياس بطريقتين:

❖ عن طريق قياس أحداث الإشارة الناتجة عن إشعاع **Y** الكلي للمادة دون تسجيل طاقات إشعاع **Y** (التعداد الكلي).

❖ عن طريق قياس وتسجيل حدوث كل حدث إشارة وشدة، أي طاقة 'جسيم' الإشعاع الذي بدأ حدث الإشارة. وبهذه الطريقة، يبنى طيف طاقة يوفر كبيانات معدلات العد المتباينة للأشعة **Y** المكتشفة من انبعاثات **U** و **Th** و **K**.

ومن ثم، فإن نوع القياس الطيفي يوفر ثروة أكبر بكثير من المعلومات ومن ثم فهو أكثر فاعلية في التطبيقات الجيوفيزيائية. كما سنبين لاحقاً، فإن المعلومات الطيفية ليست فقط ذات قيمة عالية في العديد من التطبيقات الجيوفيزيائية، ولكنها ضرورية أيضاً لحل العديد من المشكلات الجيوفيزيائية.

يعتمد نجاح القياس الطيفي في التطبيقات الجيوفيزيائية النووية على عاملين: كفاءة الكشف، التي تحدد معدل تراكم البيانات، واستبانة الطاقة لأجهزة الكشف





ونظام معالجة الإشارات. تعد كفاءة الكشف مهمة باعتبارها قيماً على الفعالية الاقتصادية المحتملة للتقنية وتحدد بوساطة الهندسة وخصائص مواد الكاشف.

يعد تحليل الطاقة أمراً حيوياً لمدى فعالية التمييز بين الإشعاعات المختلفة. في بعض التطبيقات، تكون فوتونات أشعة γ المنبعثة من نظائر مشعة مختلفة ذات طاقة مماثلة. في هذه الحالات، يعد حل الطاقة الجيد أمراً ضرورياً.

في حالات أخرى، قد تكون طاقات الفوتون متباعدة بحيث تكون متطلبات دقة الطاقة العالية أقل تشدداً. في الواقع، يمكن اعتبار دقة الطاقة بمثابة العامل الذي يحدد في النهاية النسبة بين المعلومات المفيدة وضوضاء المعلومات.

سننظر حالياً في مثال عملي يوضح الفرق بين كاشفات الطيف وأنواع العد الكلي. تُستخدم كاشفات الوميض للتطبيقات الطيفية لأن نبضة الخرج من كاشف الوميض تتناسب طردياً مع الطاقة المودعة بوساطة الفوتون الساقط داخل البلورة.

من ناحية أخرى، لا يمكن استخدام كاشف جيجر-مولر إلا لقياسات العد الكلي لأن سعة النبضة مستقلة عن الطاقة المنفقة داخل الكاشف.

كما أن كاشفات الوميض هي الأجهزة الأكثر كفاءة للكشف عن إشعاع γ والتي تسمح باستخدام مصادر أشعة γ الأولية للأنشطة المنخفضة في التطبيقات الصناعية. نتيجة لذلك، فإن الاتجاه في التطبيقات النووية هو الاستبدال بعدادات جيجر-مولر أجهزة كشف الوميض.

دقة الطاقة في نظام قياس الطيف لها محددان رئيسيان. أولاً، تحليل الطاقة للكاشف، والذي تحكمه كفاءة العملية التي تحول طاقة الإشعاع المكتشف إلى إشارة خرج كهربائي للكاشف، وثانياً، توليد الضوضاء و'التقاطها' في نظام القياس الطيفي والمعدات المرتبطة بها.





2. الأنظمة الإلكترونية

سننتبع الخطوات المتخذة لمعالجة نبضة جهد الخرج التي ينتجها كاشف الوميض.

أ. المضخم والمضخم الأولي

هذه الأجهزة جزء من سلسلة الإلكترونيات التناظرية. تغذي نبضة الجهد الناتجة عن المضخم الضوئي إلى المضخم الأولي الذي سيحولها إلى نبضة إشارة. يوجد سببان لتغذية النبضة إلى المضخم وليس مباشرة إلى المضخم الرئيسي:

- ❖ **الأول:** أن مصدر الإشارة يتمتع بمقاومة عالية جداً للإخراج ولا يمكنه تغذية كبل محوري طويل دون تخفيف النبض وتشويبه بشكل خطير.
- ❖ **الثاني:** الإشارة ضعيفة جداً بحيث لا يمكنها منافسة الضوضاء الملتقطة أثناء انتقالها عبر الكابل.

يتمثل دور المضخم في مطابقة مقاومة خط النقل وتضخيم الإشارة، ومن ثم تقليل أهمية التقاط ضوضاء أثناء الإرسال. يقوم المضخم أيضاً بتغيير عرض النطاق الترددي للإشارة ويرسل جزء فقط من الإشارة يحوي معلومات ذات أهمية. يجب إرفاق المضخم بالقرب من خرج المضاعف الضوئي. ثم تغذي النبضة من خرج المضخم الأولي في المضخم الرئيسي لمزيد من التضخيم والمعالجة.

قد تولد الأنظمة الإلكترونية المرتبطة بمقياس الطيف ضوضاء، من ناحية، وتساعد في تقليلها من ناحية أخرى. يمكن تقسيم الأنظمة الإلكترونية المستخدمة حالياً في التطبيقات النووية إلى مرحلتين متتاليتين:



❖ **تناظرية** وهي مخصصة لمعالجة الإشارات للحصول على دقة عالية في القياسات الطيفية.

❖ **رقمية** وهي مخصصة لرقمنة النبضات التناظرية من أجل تحليل البيانات والتحكم في النظام.

تعالج الإلكترونيات التناظرية نبضات الإدخال لجميع السعات بينما تعالج الإلكترونيات الرقمية نبضات ذات سعة ثابتة وخصائص أخرى (نبضات منطقية). تتوفر المعلومات في الإلكترونيات الرقمية من خلال وجود أو عدم وجود مثل هذه النبضات. من أجل الحصول على أقصى قدر من المعلومات التي يوفرها كاشف الإشعاع، يجب توخي الحذر الشديد مع الإلكترونيات المستخدمة في الحصول على البيانات.

في القياسات الطيفية، تجري تغذية النبضة من خرج المضخم الرئيسي في محلل ارتفاع النبض متعدد القنوات (MCA)، والذي ينتج طيف الطاقة عن طريق فرز النبضات المستلمة من المضخم على أساس اتساعها ويسجل الطيف وفقاً لذلك.

العناصر الرئيسية للمحلل متعدد القنوات هي:

1. محول من تناظري إلى رقمي لقياس إشارات الدخل ورقمنتها؛ يربط كل إشارة دخل بقناة مقابلة لـ MCA، التي يتناسب رقمها التسلسلي مع اتساع الإشارة. هذا ما يمكن MCA من فرز نبضات الإدخال التناظرية وفقاً لاتساعها. تتناسب هذه السعات، بدورها، مع طاقات الجسيمات النووية المكتشفة.





2. جهاز تخزين البيانات الذي يسجل عدد الإشارات التي تقع في كل من قنوات الاتساع.
3. جهاز يعرض البيانات المخزنة في الذاكرة؛ في الواقع، يعرض هذا الجهاز طيف الطاقة.

ب. كسب الاستقرار

يعتبر كسب نظام القياس الطيفي أكثر أهمية في القياسات الجيوفيزيائية النووية القائمة على نهج القياس الطيفي، لا سيما عندما تكون أجهزة الكشف من نوع الوامض. كاشف (BGO) ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) عالي الكفاءة حساس بشكل خاص للتغيرات في درجة الحرارة التي تسبب انحرافاً في سعة نبضات الخرج. من أجل العمل، يتطلب الثبات ذروة مرجعية واضحة في طيف أشعة γ .

ج. أجهزة الحاسوب على الخط

كان للتغيرات السريعة في تكنولوجيا الحاسوب تأثير هائل على التطبيقات النووية. يستخدم الحاسوب الشخصي (PC) لجمع البيانات عبر الخط، وتقليل البيانات عبر الخط والتحكم عبر الخط في المعدات التجريبية.

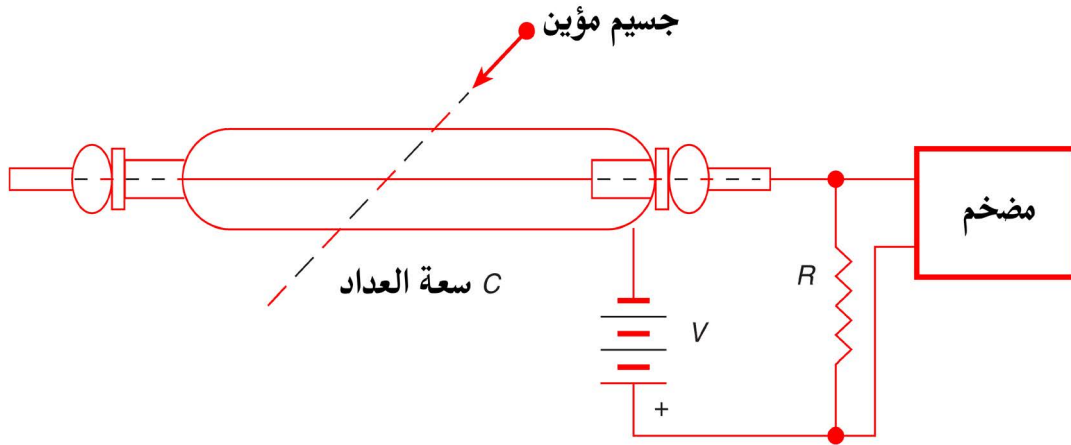
لقد صارت أجهزة الحاسوب هذه حالياً قادرة على التعامل بسرعة مع كميات كبيرة من المعلومات الرقمية الناتجة عن أجهزة الكشف والأجهزة المرتبطة بها. مهد ظهور أجهزة الحاسوب وأحدث الأجهزة الإلكترونية الطريق لتطوير تطبيقات نووية أكثر تعقيداً.





د. عدادات مملوءة بالغاز

يعد العداد المملوء بالغاز أحد أقدم أجهزة الكشف عن الإشعاع النووي. يتكون الكاشف من وعاء مملوء بالغاز مع قطب كهربائي مركزي (قد يكون مجرد سلك) يحتفظ به عند جهد كهربائي موجب بالنسبة لجدار التوصيل للحاوية. يوضح الشكل الآتي عداد مملوء بالغاز بشكل تخطيطي.

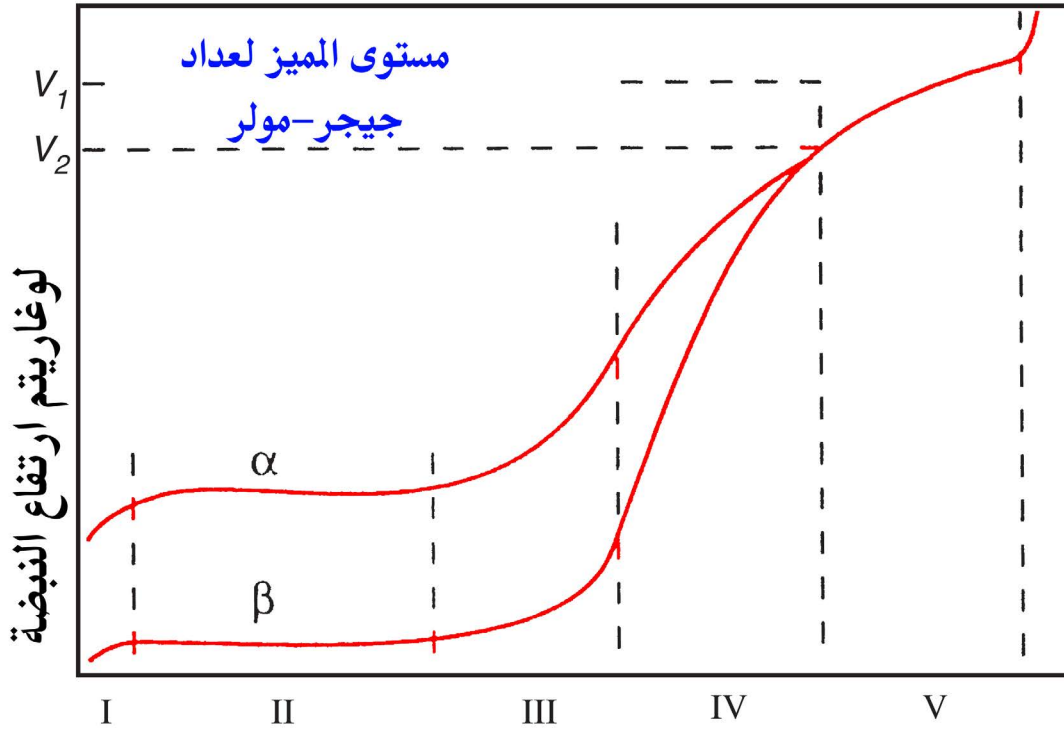


رسم تخطيطي للعداد المملوء بالغاز.

سينتج الإشعاع المؤين الذي يمر عبر الغاز إلكترونات وأيونات موجبة. تتحرك الإلكترونات بشحنتها السالبة نحو السلك المركزي الموجب، وتتحرك الأيونات الموجبة نحو الجدران الخارجية.

سيؤدي هذا إلى ظهور نبضة جهد V عبر المقاومة R ، والتي تعتمد اتساعها على الجهد V المطبق بين السلك المركزي والجدران. تظهر العلاقة بين $\log V$ و V في الشكل الآتي لكل من إلكترون مؤين منخفض وجسيم شديد التأين.





خصائص عداد الغاز لمقدار النبض مقابل الجهد المطبق.

في المنطقة **I**، يكون الجهد **V** منخفضاً بحيث يعاد تركيب الأيونات الموجبة والسالبة ولا تساهم كل أزواج الأيونات التي يتكون منها الجسيم النووي في **V**.

في المنطقة **II**، يكون الجهد **V** مرتفعاً بدرجة كافية، ومقدار إعادة التركيب ضئيل. تسمى هذه المنطقة منطقة الحجرة الأيونية.

عند الجهد العالي، المقابل للمنطقة **III**، تسرع الإلكترونات التي تقترب من





القطب الموجب بشكل كافٍ لإنتاج تأين إضافي وتزداد الشحنة المجمعة بوساطة عامل مقداره M .

مضاعفة جهد معين مستقل عن التأين الأولي، ومن ثم الحفاظ على تناسب أحجام النبضات. تسمى هذه المنطقة التي تتناسب فيها الشحنة المجمعة مع التأين الأولي المنطقة التناسبية.

المنطقة IV منطقة ذات تناسب محدود؛ عند استمرار قيم V الأعلى، في المنطقة V ، يفقد التناسب، وحتى الحد الأدنى من الجسيمات المؤينة سينتج نبضاً كبيراً جداً.

المنطقة V تسمى منطقة جيجر-مولر. في هذه المنطقة، يؤدي التأين الأولي إلى انهيار كامل للغاز يجب إيقافه قبل احتساب الحدث اللاحق. يمكن تحقيق هذا الإيقاف إلكترونياً أو في الغاز نفسه.

إذا زاد الجهد V إلى ما بعد المنطقة V ، تحدث أعطال زائفة غير مزعجة، وعند الجهد العالي يكون هناك تفريغ مستمر غير قابل للإخماد. توجد ثلاثة أنواع من أجهزة الكشف المملوءة بالغاز سنناقشها كما يأتي:

1. عدادات حجرة التأين

يجب الاحتفاظ بجهد التشغيل الموجب بين القطب المركزي وجدار الحجرة في المنطقة II من الشكل السابق. يمكن استخدام حجرة التأين كمقياس طيف للجسيمات المشحونة، على سبيل المثال كاشف قادر على عد الجسيمات المشحونة وقياس طاقاتها.





قوة التحليل هي من أجل واحد في المائة. تُستخدم الحجرة المؤينة أيضاً لقياس شدة الإشعاع، وهو أمر مهم في السلامة الإشعاعية، خاصة بالنسبة للأشعة γ .

2. العدادات التناسبية

تعمل هذه العدادات في المنطقة III من الشكل السابق. التناسب بين حجم النبضة والتأين الأولي يجعل من الممكن التمييز بين الجسيمات المشحونة التي تنتج تأينات أولية مختلفة. هذا يجعل من الممكن حساب الجسيمات في حال وجود جسيمات β .

3. عدادات جيجر-مولر

تسمى العدادات المملوءة بالغاز والتي تعمل في المنطقة V من الشكل السابق أنابيب جيجر - مولر. تستخدم على نطاق واسع في التطبيقات النووية بسبب موثوقيتها وتكلفتها المنخفضة. يقوم عداد جيجر - مولر بتسجيل جميع الأحداث التي تنتج على الأقل زوجاً واحداً من الأيونات، ومن ثم، لا يمكنه قياس طاقة الجسيم أو التمييز بين أنواع مختلفة من الجسيمات.

هـ. كاشفات الوميض

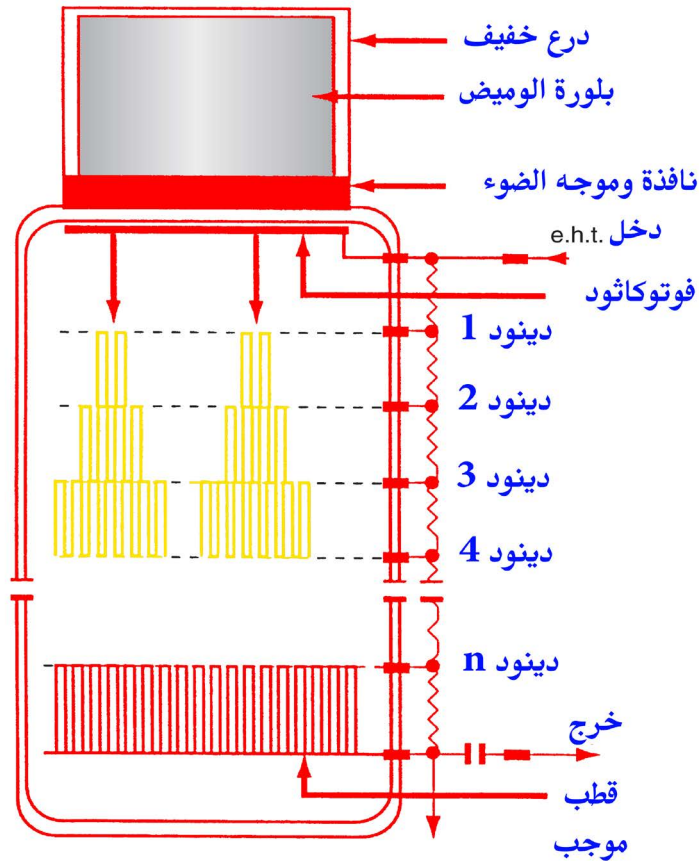
يعد كاشف الوميض أحد أكثر أجهزة الكشف شيوعاً في التطبيقات النووية أو الأبحاث النووية. هناك تشابه ملحوظ بين تصميم كاشف الوميض والتجارب





الشهيرة على تشتت الجسيمات التي أجراها رذرفورد وزملاؤه لإثبات أن الشحنة الموجبة للذرة تتركز في نواة صغيرة.

لقد أجريت تجارب تشتت الجسيمات عن طريق عرض الوميض الذي تسببه الجسيمات التي تصطدم بشاشة كبريتيد الزنك. في كاشف الوميض، تستبدل العين البشرية بأنبوب مضاعف ضوئي. يوضح الشكل الآتي بشكل تخطيطي مبدأ تشغيل كاشف الوميض.



رسم تخطيطي لكاشف الوميض.



ينتج الجسيم النووي المكتشف وميضاً من الضوء في جهاز الوميض. ينتقل جزء من هذا الضوء إلى الكاثود الضوئي للأنبوب المضاعف الضوئي، والذي ينتج بدوره الإلكترونات الضوئية.

تضاعف الإلكترونات الضوئية عدة مرات بواسطة دايودات الأنبوب المضاعف الضوئي وتنتج نبضاً للجهد يعالج بواسطة الإلكترونيات المرتبطة بكاشف الوميض. تتناسب نبضة الجهد مع الطاقة المنقولة عن طريق الإشعاع الأولي إلى البلورة، مما يتيح لكاشف الوميض أن يستخدم كمقياس طيف، على سبيل المثال لتسجيل الجسيمات النووية وقياس طاقاتها. يُحاط جهاز الوميض بعاكس ذي معامل انعكاسية مرتفع لتقليل عدد الفوتونات التي تفلت من جهاز الوميض.

يستخدم كاشف الوميض بشكل متكرر بشكل خاص في التحليل الطيفي للأشعة γ . أكثر أجهزة الوميض شيوعاً هي NaI (TI) أو CsI (TI) أو CsI (Na) أو BGO .

يعد ووميض NaI (TI) الكاشف الأكثر استخداماً. إنه يعمل في درجات حرارة محيطية ولديها أفضل دقة طاقة متاحة. يحوي CsI على أعلى كثافة (4510 كغ / م³) من (3670 كغ / م³) NaI . وهذا يجعله أكثر كفاءة لاكتشاف أشعة γ عالية الطاقة. ومع ذلك، فإن دقة تحليل الطاقة لـ CsI بشكل عام أدنى قليلاً من دقة NaI . كل من NaI و CsI مسترطبان. أدت التحسينات في التصميم والتعبئة والتغليف إلى زيادة قدرة كاشف الوميض على تحمل الصدمات والتغيرات الكبيرة في درجات الحرارة.

BGO هو كاشف ووميض جرى تطويره مؤخراً. لديه قدرة إيقاف أكبر بكثير للفوتونات من NaI أو CsI ، خاصة لأشعة γ عالية الطاقة. كثافة BGO هي



7100 كغ / م³. بلورة BGO ليست مستطرية. ومع ذلك، فإن استبانة الطاقة لكاشف الوميض BGO أدنى من استبانة NaI و CsI. علاوة على ذلك، فإن إشارة الخرج الخاصة به تتضاءل بسرعة أكبر مع زيادة درجة الحرارة مما هو الحال مع الكاشفين الآخرين.

ومن الواضح أن الاختيارات التي تجري بشأن نوع الكاشف الذي سيستخدم ستحكمها ظروف التطبيق المتوخاة. للحصول على الأداء الأمثل، من الضروري اختيار الكاشف بشكل صحيح لتطبيق معين.

و. كاشفات الحالة الصلبة

كاشفات الحالة الصلبة هي نظائر حجرة تأين الغاز. كما ذكرنا سابقاً، ينتج الإشعاع الوارد في حجرة التأين أزواجاً من الإلكترونات والأيونات. في المادة الصلبة، تنتج أزواج ثقوب إلكترونية، حيث يكون الثقب عبارة عن كيان متحرك موجب الشحنة يحدث داخل مصفوفة كاشف الحالة الصلبة.

كما هو الحال مع العدادات المملوءة بالغاز، فإن اكتشاف الإشعاع في المادة الصلبة يصير مشكلة تطبيق مجال كهربائي لتجميع الشحنة الكهربائية الناتجة عن تبديد الطاقة للإشعاع الساقط.

الميزة المهمة لكاشف الحالة الصلبة هي أنه بالنسبة لصرف الطاقة الإشعاعية نفسها داخل الكاشف، ينتج عدد أكبر من أزواج الثقوب الإلكترونية أكثر من أزواج الإلكترون والأيون في كاشف الغاز أو الإلكترونات الضوئية عند الكاثود الضوئي لمضاعف ضوئي.





ومن ثم، فإن نبضة الشحنة الناتجة عندما يبدد فوتون ذو طاقة معينة (على سبيل المثال 100 كيلو إلكترون فولت) طاقته داخل المصفوفة الصلبة للكاشف ستكون أكبر بعدة مرات مما يحدث عند تبديد الطاقة نفسها في مصفوفة غازية أو في كاشف وميض. هذا الحجم المتزايد لنبضة الشحنة يحسن بشكل متناسب من قوة طريقة قياس الطيف للتمييز بين الإشعاعات الواردة من الطاقات المختلفة.

من أجل فهم الآليات التي تحدد دقة طاقة الكاشف، يجب أن ندرك أنه بالنسبة لصرف معين من الطاقة، من خلال الإشعاع الوارد، فإن الحجم الفعلي لنبضة الشحنة يخضع للتغيرات الإحصائية العشوائية (بواسوني).

يعتمد هذا الاختلاف على عدد كيانات الشحنة الكهربائية الفردية الناتجة عن صرف الطاقة الإشعاعية وهو نتيجة لعملية تحويل الطاقة لشحنها. (في الواقع، مقياس هذا التقلب في سعة شحنة الخرج، أي الانحراف المعياري، يساوي الجذر التربيعي لعدد كيانات الشحنة المنتجة).

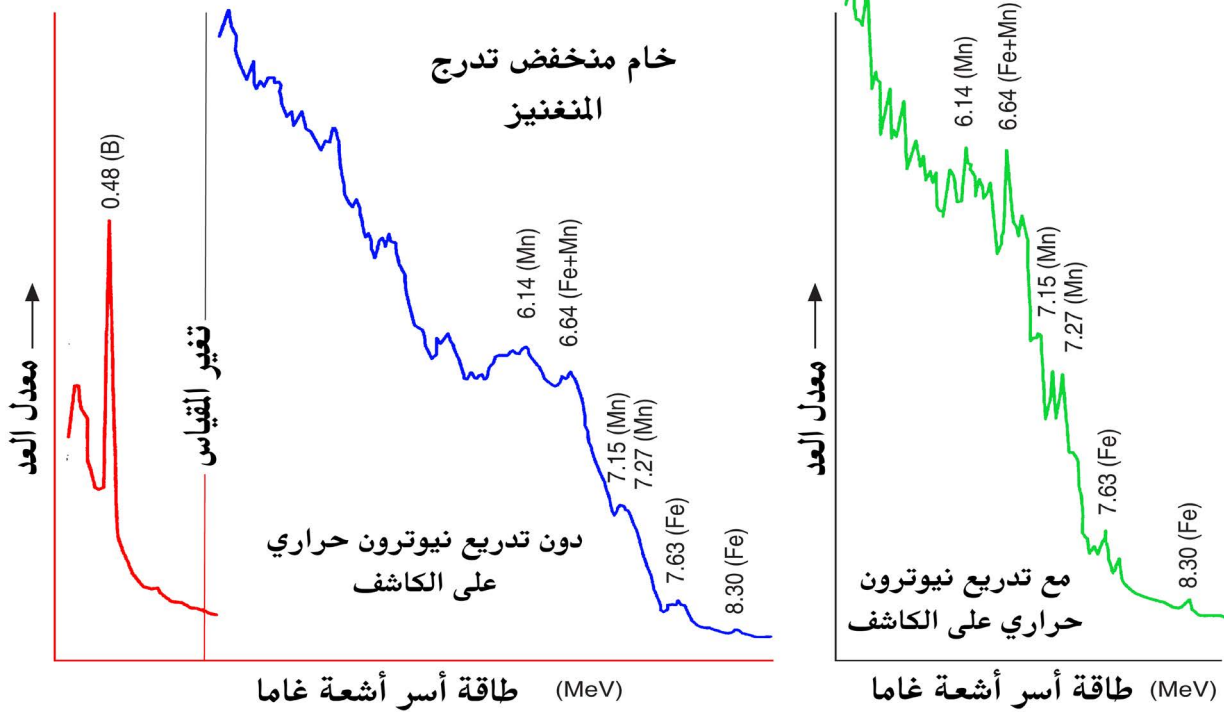
كمثال يتيح المقارنة بين كاشفات الحالة الصلبة والغازية، تبلغ الطاقة المصروفة في السيليكون لكل زوج من الثقوب الإلكترونية 3 فولت تقريباً، بدلاً من 30 فولت اللازمة لإنشاء زوج إلكترون-أيون في غاز.

هذا يعني أنه بالنسبة لفقدان الطاقة نفسها داخل مصفوفة الكاشف للإشعاع الوارد، فإن نبضة الشحن الناتجة في كاشف الحالة الصلبة ستكون أكبر بعشر مرات من عداد الغاز. كنتيجة لنبضة الشحن الكبيرة هذه، تكون التقلبات الإحصائية في سعة نبضات الجهد أقل بعامل أكبر من ثلاثة. يوفر هذا لكاشف الحالة الصلبة دقة طاقة أفضل بثلاث مرات من حجرة الأيونات.



الجيوفيزياء النووية

في حين يمكن تشغيل كاشفات السيليكون في درجة حرارة الحجرة دون وجود تيار تسرب مفرط، فإن قدرتها المنخفضة على إيقاف الفوتونات تقيد استخدامها في اكتشاف الجسيمات المشحونة. يستخدم الجرمانيوم للكشف عن أشعة γ بسبب قدرته الكافية على الإيقاف. حيث تفوق دقة الطاقة التي تتحقق باستخدام كاشف الجرمانيوم على أي نوع آخر من أجهزة الكشف.



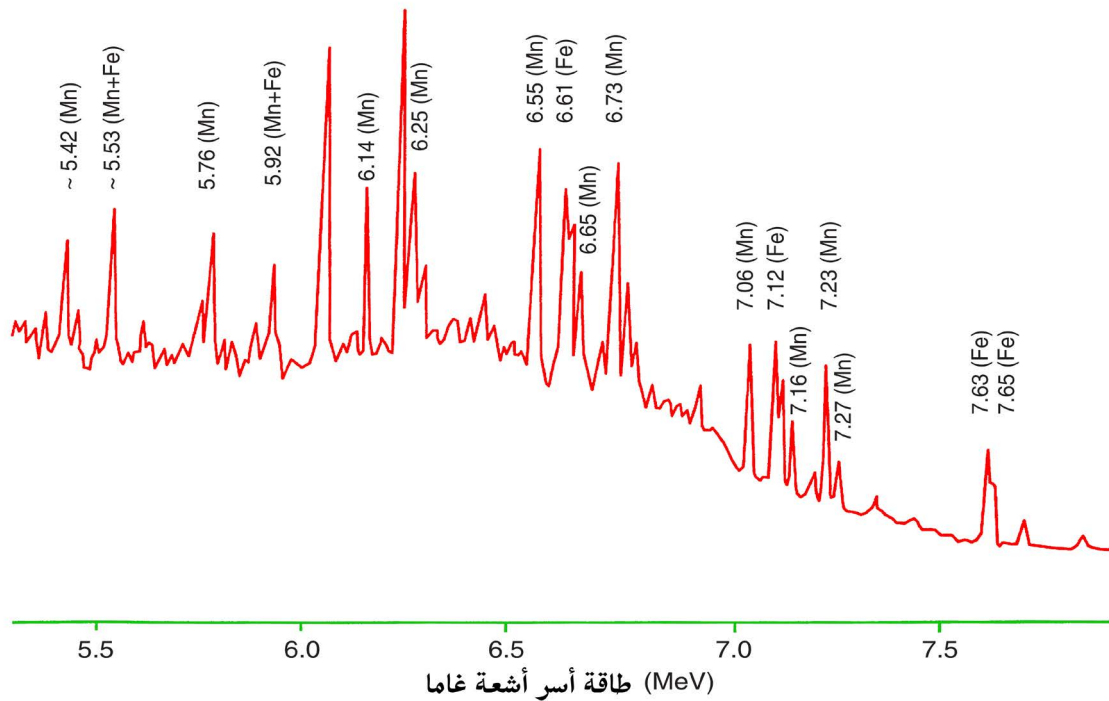
سجلت أطياف أشعة غاما النيوترونية الفورية لخام المنغنيز منخفض الدرجة مع أو بدون درج نيوتروني لكاشف الوميض (NaI (Tl).





ومع ذلك، فإن التكلفة المالية وتكاليف الصيانة لكاشف الجرمانيوم أعلى بكثير من تلك الخاصة بكاشف الوميض، ويجب تشغيله في درجات حرارة شديدة البرودة، مما يجعل استخدامه مرهقاً إلى حد ما.

ومن ثم، يستخدم بشكل روتيني فقط في التطبيقات التي تتطلب دقة طاقة عالية جداً. يوضح الشكل الآتي منطقة الطاقة نفسها لطيف أشعة غاما النيوتروني الفوري لخام المنغنيز المسجل باستخدام، على التوالي، عداد وميض وكاشف الجرمانيوم المبرد.



سُجل طيف أشعة غاما النيوتروني الفوري لخام المنغنيز منخفض الدرجة باستخدام كاشف الجرمانيوم المبرد.





• كشف النيوترونات

لا يمكن الكشف عن النيوترونات بشكل مباشر لأنها ليست مشحونة كهربائياً ومن ثم لا تسبب تأيناً أو انبعاثاً للضوء، وهي التأثيرات التي تُستخدم للكشف عن الجسيمات المشحونة.

تستخدم كاشفات النيوترونات إنتاج جسيمات ثانوية مشحونة من التفاعلات النووية التي تحدثها النيوترونات. العمليات المتضمنة في الكشف عن النيوترونات مذكورة أدناه.

أ. التفاعلات النووية المستحثة بالنيوترونات والتي تسفر عن إنتاج جسيمات مشحونة

1. الكاشف الشائع القائم على رد الفعل (n, α) هو عداد البورون للنيوترونات البطيئة. يعتمد هذا الكاشف على التفاعل النيوتروني: $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha + \gamma$

يحتوي هذا التفاعل على مقطع عرضي كبير بشكل استثنائي للنيوترونات الحرارية (3840 بارن)، أي للنيوترونات التي تبلغ طاقتها 0.025 إلكترون فولت. معنى هذا التفاعل هو أن النواة ^{10}B تلتقط نيوتروناً حرارياً مكوناً نواة مركبة لـ ^{11}B في حالة مثارة. وسوف يتحلل ^{11}B على الفور، ويصدر جسيماً ونواة الارتداد ^7Li . كل من الجسيم و ^7Li لهما نطاقات قصيرة جداً.

عداد البورون هو عداد غازي مع جدار داخلي مبطن بالبورون أو مملوء بغاز BF_3 ، ويفضل أن يكون مخصباً بـ ^{10}B .

العداد يعمل في المنطقة النسبية. يجري إيقاف الجسيم ونواة ^7Li في الغاز، وينتج نبضة جهد لكل نيوترون التقط.



2. يعتمد كاشف النيوترون الشائع الآخر على تفاعل (n, p):

$n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + \text{P}$ يحوي هذا التفاعل على مقطع عرضي كبير للنيوترونات الحرارية (5400 بارن). الكاشف يعمل في المنطقة النسبية. تستخدم كاشفات النيوترونات ${}^3\text{He}$ على نطاق واسع في التطبيقات النووية. يمكن أن تكون وعرة وتستخدم في بيئات معادية تماماً.

3. لا تنتج النيوترونات التأين مباشرة في بلورات الوميض، ولكن يمكن الكشف عنها من خلال تفاعلها مع نوى الوميض. تتفاعل النيوترونات مع نوى ${}^6\text{Li}$ لإنتاج جسيم α والتريتيوم (${}^3\text{H}$)، والذي يمكن بدوره اكتشافه من خلال الوميض الذي ينتجه في LiI (Eu) . إن أجهزة الوميض LiI (Eu) و ${}^6\text{Li(Eu)}$ متوفرة بسهولة بلورات غير عضوية مفيدة في عد النيوترونات.

ب. الانشطار المستحث

في عملية الانشطار، تطلق طاقة تقارب 200 ميغا إلكترون فولت كطاقة حركية على شكل جسيمات ثقيلة قصيرة المدى. يحوي ${}^{235}\text{U}$ على مقطع عرضي انشطاري كبير للنيوترونات الحرارية، ويحوي ${}^{235}\text{U}$ على مقطع عرضي انشطاري كبير للنيوترونات السريعة.

يعد عداد الغاز المبطن باليورانيوم الطبيعي بمثابة عداد فعال لكل من النيوترونات الحرارية والسريعة. عن طريق حماية الكاشف بالبورون أو الكادميوم، ستمتص النيوترونات الحرارية، ويقاس المكون النيوتروني السريع فقط.



ج. كاشفات ارتداد البروتون

تعمل هذه الكواشف على مبدأ الكشف عن البروتونات التي تتحرك من خلال الاصطدام بالنيوترونات. يعد عداد الغاز الذي يحوي نسبة من الهيدروجين في خليط الغاز ويعمل في المنطقة المتناسبة كاشفاً سريعاً للنيوترونات. تعد المستحلبات النووية والمومضات البلاستيكية أمثلة أيضاً على أجهزة الكشف عن النيوترونات التي تعمل وفقاً لهذا المبدأ.

د. طريقة التنشيط النيوتروني

يمكن استخدام التنشيط النيوتروني لقياسات تدفق النيوترونات. تحوي العديد من النويدات على مقاطع عرضية كبيرة جداً لامتصاص النيوترونات الحرارية وتتشط بعد التقاط النيوترون الحراري. ^{115}In في مثل هذا المثال. النواة المتبقية، ^{116}In ، والتي تكونت في $^{115}\text{In} (n, \gamma) ^{116}\text{In}$ في التفاعل، هي مشعة وتحلل وتتبعث منها جسيمات β وأشعة γ .

تتناسب كمية ^{116}In الناتجة مع تدفق النيوترونات ويمكن قياسها باستخدام كاشف الأشعة β أو γ . المواد الأخرى المستخدمة في قياسات تدفق النيوترونات هي الذهب والمنغنيز والديسبروسيوم.

هـ. طرائق أخرى للكشف عن الإشعاع النووي

الطرائق الموصوفة أعلاه هي الأكثر شيوعاً في التطبيقات النووية وقد وصفناها بالتفصيل. يوجد أنواع أخرى من أجهزة الكشف وطرائق الكشف، على سبيل المثال، طريقة التصوير، وكاشفات المسار العازل الصلب أو حجرات الشرارة. ومع ذلك، لا تستخدم هذه الأساليب على نطاق واسع في هذه التطبيقات النووية.





تقنيات الجيوفيزياء النووية

قدمنا سابقاً عدداً من المفاهيم النظرية المهمة فيما يتعلق **بالجيوفيزياء النووية** والتي سنتكلم عنها بشكل أكبر هنا. كما تكلمنا سابقاً أيضاً أن أي تقنية جيوفيزيائية نووية لتحديد خصائص مادة معينة غير تقنية أشعة γ الطبيعية، تستلزم إثارة النوى أو الإلكترونات الذرية، في حالة إنتاج الأشعة السينية، باستخدام بعض أشكال الإشعاع النووي لتوفير هذه الإثارة. يشار إلى هذا الإشعاع البادئ بالإشعاع الأولي.

العملية الأساسية الأخرى لأي تقنية جيوفيزيائية نووية هي الكشف عن الإشعاع النووي الثانوي الناتج، ويفضل قياس خصائص معينة لهذا الإشعاع. أبسط نوع من الخصائص القابلة للقياس هو معدل العد. خاصية إضافية، والتي توفر الأساس للتمييز المحسن بشكل كبير بين خصائص المواد، وهي توزيع الطاقة للإشعاع الثانوي. بشكل عام، يُطلق على أي أداة تهدف إلى الكشف عن الإشعاع الثانوي في المواد الجيولوجية اسم مسبار **Probe**.

يستخدم المسبار مصدر أشعة γ للإشعاع المبدئي الذي يؤدي إلى تشتيت خلفي **γ إشعاع**. هذا الإشعاع هو إشعاع ثانوي داخل الصخر أو المعدن الخام؛ وهو ناتج عن التشعيع بالإشعاع الأولي. قد يعطي تحليل هذا الإشعاع الثانوي معلومات عن كل من الكثافة الظاهرية والتركيب الكيميائي العام للصخر. على وجه الخصوص، قد يشير التحليل إلى وجود عناصر ثقيلة، أي عناصر ذات عدد ذري مرتفع **Z**. وقد تشمل هذه العناصر العالية **Z** الرصاص (**Pb**)، والقصدير (**Sn**)، والحديد (**Fe**)، والنحاس (**Cn**) والزنك (**Zn**).





تصدر المصادر النيوترونية المستخدمة في المسابير نيوترونات من جميع الطاقات. هذه المصادر، التي تتكون أساساً من مسرعات صغيرة تعمل إلكترونياً للجسيمات المشحونة، تبعث فعلياً من نيوترونات أحادية الطاقة ذات طاقة عالية جداً (14 ميغا إلكترون فولت لتلك المنبعثة من تفاعل الديوتيريوم والتريتيوم).

من ناحية أخرى، فإن النيوترونات المنبعثة من النظائر المشعة الاصطناعية شائعة الاستخدام لها طاقات تتوزع باستمرار في جميع أنحاء طيف الطاقة، حتى الطاقات العالية.

النوى المستهدفة الأكثر فعالية في إبطاء النيوترونات من خلال الاصطدامات المرنة هي تلك الخاصة بالعناصر ذات الأعداد الذرية المنخفضة. في هذا الصدد، يعتبر الهيدروجين فعالاً بشكل بارز.

إذا كان كاشف الإشعاع الخاص بمسبارنا يستجيب إما للنيوترونات البطيئة (الحرارية أو الظهارية) أو لإجمالي إشعاع γ الناتج عن النيوترونات في الصخور، فإن معدل العد من المسبار قد يوفر مقياساً لمحتوى الهيدروجين في الصخور، أي الماء أو الهيدروكربونات (النفط أو الغاز)، اعتماداً على تكوين المسبار المستخدم.

توفر التفاعلات النووية التي تحدثها النيوترونات السريعة تطبيقات مهمة للقياسات في الصخور والخامات. من الأهمية بمكان تفاعل التشتت غير المرن (المشار إليه بوساطة n, n', γ) المستخدم لقياس تركيزات الكربون (C) والأكسجين (O) ومن ثم نسبة C/O، وهو أمر مهم في التطبيقات لاستكشاف مخازن البترول.

لقد رأينا أيضاً أن النيوترونات السريعة تتباطأ إلى طاقات حرارية من خلال فقد الطاقة المبذولة في تفاعلات تشتت نواة النيوترونات. حيث تمتص هذه





النيوترونات الحرارية أخيراً في النوى الذرية للمادة من خلال عملية الالتقاط الإشعاعي، مما ينتج عنه انبعاث إشعاع γ .

قد يزودنا هذا الإشعاع γ ، المنبعث من طاقات محددة مميزة للعناصر الكيميائية المختلفة، ببيانات عن تركيزات العناصر في الصخور والخامات للعديد من العناصر المكونة، مثل الهيدروجين (H)، والسيليكون (Si)، والكالسيوم (Ca)، الحديد (Fe) والنيكل (Ni) والكروم (Cr) والكوبالت (Co) والنحاس (Cu) والكبريت (S) والجادولينيوم (Gd) والتيتانيوم (Ti) والبوتاسيوم (K) والكلور (Cl)، لذكر بعض عناصر الاهتمام فقط.

ومع ذلك، فإن تركيز البوتاسيوم، الذي له أهمية خاصة في تطبيقات البحث عن البترول، يتحدد بشكل أكثر ملاءمةً عن طريق مقياس الطيف الطبيعي لأشعة γ ، والذي ينتج أيضاً تركيزات اليورانيوم والثوريوم. يمكن استخدام قيمة تركيز البوتاسيوم التي جرى الحصول عليها بواسطة طريقة أشعة γ الطبيعية كمدخل مقيد لتحليل بيانات الالتقاط الإشعاعي لأشعة γ . يوفر النشاط الإشعاعي الطبيعي المنبعث من الصخور أيضاً تطبيقات مهمة لمختلف الصناعات المعدنية.

يوفر تسجيل بئر أشعة γ الطبيعي أيضاً معلومات قيمة للتقيب عن البترول حول المحتوى الموجود في الصخور من المواد الشبيهة بالطين والتي تحد من المسامية والنفاذية. هاتان الخاصتان الصخريتان، حيويتان لتقييم قدرات التكوين على الاحتفاظ بالسوائل وإنتاجها للاستخراج.

يوفر استخدام طريقة القياس الطيفي نطاقاً، ليس فقط لقياس المستوى العام للنشاط الإشعاعي للصخور ولكن أيضاً للتمييز بين الأنواع المختلفة من



المكونات المعدنية للصخور، خاصة تلك الغنية بالبوتاسيوم، مثل الإيليت، من تلك التي تكون غنية نسبياً ببنيات اليورانيوم والثوريوم.

تكمن أهمية عملية التمايز هذه في أنها توفر معلومات عن درجة تجوية الصخور، والتي يُستدل عليها من حقيقة أن البوتاسيوم واليورانيوم عموماً أكثر قدرة على الحركة من الثوريوم. ومن ثم، يميل الثوريوم إلى البقاء في الصخور المتجمدة بينما تكون المكونات الأخرى المشعة منخفضة التركيز بشكل غير طبيعي.

في تطبيقات الصناعات المعدنية الصلبة، تتيح طرائق أشعة γ الطبيعية أيضاً التمايز بين الصخور الرسوبية والصخرية، والخامات المشعة والصخور القاحلة، وبين المواد الصخرية في الشوائب والمواد التي يجري جنيهاً أثناء عملية التعدين، سواء كانت تلك المواد خامات معدنية أو فحم.

تعد قدرة التقنية على إجراء هذا التمايز أمراً مهماً في كل من بيئة بنية الصخور، وصنع الهيكل (أي تسجيل حفر البئر). ومن الأمثلة على هذه البيئات مخازن التخزين والطبقات التي يوجد فيها المورد.

نتيجة للإشعاع النيوتروني لمصفوفة العينة، فإن النظائر المشعة الاصطناعية التي تشكلت على هذا النحو تخضع لاضمحلال β لتتبعث، بعد بعض التأخير، كلاً من إشعاع γ وجسيمات β .

أحد النظائر المشعة الاصطناعية المستخدمة بشكل شائع في كل من الصناعات البترولية والصناعات المعدنية الصلبة هو ^{28}Al . يطبق في البحث عن البترول، لفحص محتوى الألومنيوم في الصخور.





بالنسبة للصناعات المعدنية الصلبة، هناك تطبيقات محتملة لتقدير السيليكا والألومينا في وقت واحد في البوكسيت المستخرج. تحليل التنشيط النيوتروني له أيضاً استخدام محتمل لمعايرة النحاس في الأجسام المعدنية.

يوفر القياس المتزامن لكل من نظائر الأم ونظائر الابنة في الاضمحلال الإشعاعي للنظائر التي تحدث بشكل طبيعي فرصة لتأسيس علاقات زمنية تمتد من نهاية العصر الرباعي إلى عصر ما قبل الكمبري.

عندما تتحلل النواة الأصل (الأم)، يتشكل نظير ابنة مستقر، إما بشكل مباشر أو كمنتج في سلسلة الاضمحلال. كنتيجة للانحلال النووي، فإن الظروف مواتية لاستخدام هذه العملية لقياس الوقت.

يخضع المعدل الزمني لانحلال النويدات المشعة المحددة لاحتمال الاضمحلال، الذي يتميز بثابت الانحلال λ أو مقلوبه، أي نصف وقت الاضمحلال $T_{1/2}$.

يمكن مقارنة الساعة الإشعاعية بالساعة الرملية. في البداية يحتوى كل الرمال في الخزان العلوي. في الوقت المناسب، يصرف بعيداً، ويملاً الخزان السفلي. وكذلك الحال مع النظائر المشعة، يكون النظير الأصلي فقط موجوداً في البداية، ولكن مع تقدم الوقت، تخضع نوى النظائر الأصل للاضمحلال، وفي الواقع، تجري إزالتها من مجموعة النوى (مثل «الخزان العلوي» في الساعة الرملية).

بالتزامن مع عملية إزالة النوى الأم، تظهر نوى النظائر البنت، تماماً كما تظهر الرمل في الخزان السفلي للساعة الرملية. إذا تحققنا من العملية في وقت معين، فإن نسبة نظائر الأم والابنة هي مقياس للوقت المنقضي منذ الحالة الأولية.



أهم طرائق قياس الزمن هذه هي استخدام العناصر: Rb / Sr و K / Ar و Sm / Nd و $U / Th / Pb$ ، حيث K و Ar و Rb و Sr و U و Th و Pb و Sm و Nd ، على التوالي، وهي تشير إلى رموز العناصر الآتية: البوتاسيوم والأرجون والروبيديوم والسترونشيوم واليورانيوم والثوريوم والرصاص والساماريوم والنيوديميوم. حيث تعتمد النطاقات الزمنية للتأريخ الفعال على ثابت اضمحلال النظائر الأصل. بالنسبة للتأريخ على فترات أقصر من تلك المذكورة أعلاه، فإن النويدات المشعة المفيدة هي تلك التي تنتجها التفاعلات بين النوى والإشعاع الكوني (النويدات المشعة المولدة للكون)، على سبيل المثال: ^{10}Be ، ^{36}Cl ، ^{26}Al ، ^{14}C ، 3H ، إلخ. وهي تمتد في النطاق العمري من $1a$ إلى نحو $15Ma$.

1. بارامترات المواد

تتبع معرفتنا بوجود إشعاع نووي من البحث الذي أجراه هنري بيكريل عام 1896 حول المواد الجيولوجية، ولا سيما تلك التي تحوي معادن اليورانيوم. منذ البداية، اجتذب هذا العمل اهتمام علماء مثل ج. ج. جولي في فرنسا **J.J. Joly** و **R. Ambronn** في ألمانيا (في إشارة إلى استخدام النشاط الإشعاعي الطبيعي في فحص العينات الجيولوجية).

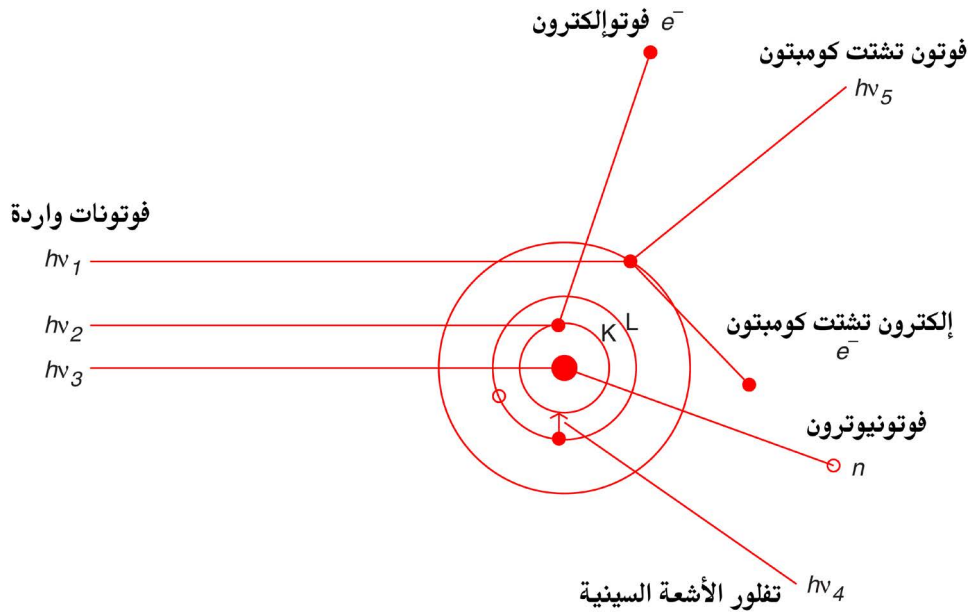
ومع ذلك، لم تُجر القياسات الأولى للنشاط الإشعاعي الطبيعي للصخور في الموقع إلا في عام 1937، مما يمثل بداية **الجيوفيزياء النووية** الحديثة. أجريت القياسات الأولى في الاتحاد السوفيتي عام 1937، وفي الولايات المتحدة الأمريكية عام 1938. وقد عجلت نتيجة عملهم في التطوير الفوري للتقنيات الجيوفيزيائية النووية للتطبيقات الروتينية، بناءً على استخدام المصادر المشعة الاصطناعية.





عند النظر إلى النشاط الإشعاعي الطبيعي للصخور، فإن البارامترات البارزة هي تركيز العنصر المشع (أو العناصر) في الصخر. بالنسبة لتركيزات القيمة التجارية في التعدين، فإن المصطلح المقابل ذا الصلة هو الدرجة.

كما ذكرنا في السابق، فإن احتمالية حدوث نوع معين من تفاعل الإشعاع - النواة (أو الإشعاع - الذرة) يتميز بالمقطع العرضي المجهري. يُعرّف المقطع العرضي من ناحية الذرة أو الإلكترون أو النواة.



تفاعلات الفوتونات مع الذرة ونواتها.

يجري استشعار التكوينات الصخرية، وهي عبارة عن خليط من النوى من أنواع مختلفة، بوساطة الإشعاع النووي من خلال المقاطع العرضية العيانية، وهي مجموع كل المقاطع العرضية المجهرية الموجودة في كل وحدة حجم من الصخر (معبراً عنها بوحدات سم³) من كل النوى المكونة للصخرة (أو الإلكترونات).

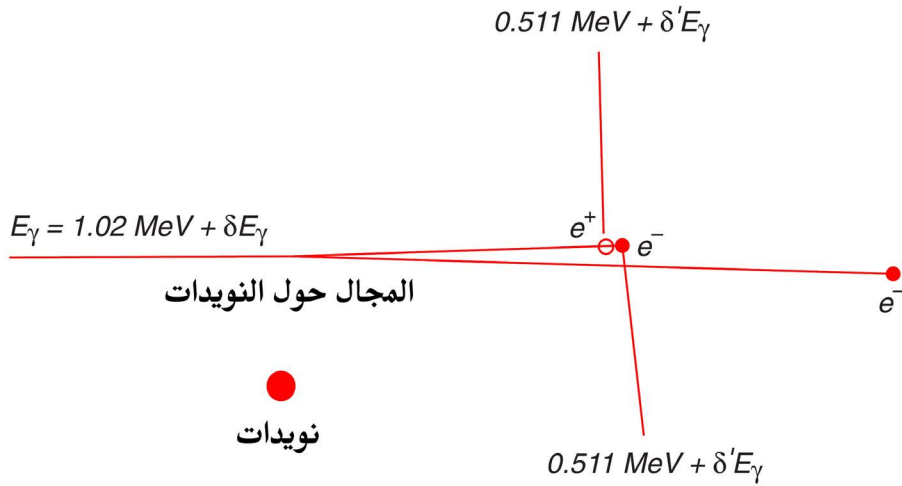




الجيوفيزياء النووية

تطبيق هذا المفهوم واضح تماماً للمواد غير المسامية. ومع ذلك، تظهر مشكلات مع النموذج الصخري البسيط عند التعامل مع التكوينات الجيولوجية غير المتجانسة بطبيعتها. تتكون عينة الصخور الحقيقية من حبيبات الصخور والنفط.

سوف تحوي المسام محلولاً ملحياً أو زيتاً أو غازاً. في الواقع، عندما تزال العينة من بيئتها تحت السطحية، ستحوي المسام أيضاً على الهواء. لذلك، لتقديرات المقطع العرضي العياني، يجب أن تكون قيمة الكثافة الظاهرية المستخدمة هي قيمة مصفوفة الصخور الحقيقية، بما في ذلك جميع الموائع الموجودة في مسامها، بدلاً من كثافة حبيبات الصخور.



تشكل زوج (e^- , e^+) بواسطة فوتون وفناء e^+ بوزيترون.

في الواقع، تعتبر المعلومات المتعلقة بمسامية الصخور وتوزيع الماء والنفط والغاز في مسامها ذات أهمية عملية كبيرة من حيث إنها تشير إلى مقدار النفط والغاز الذي يمكن استخراجه من الصخر.

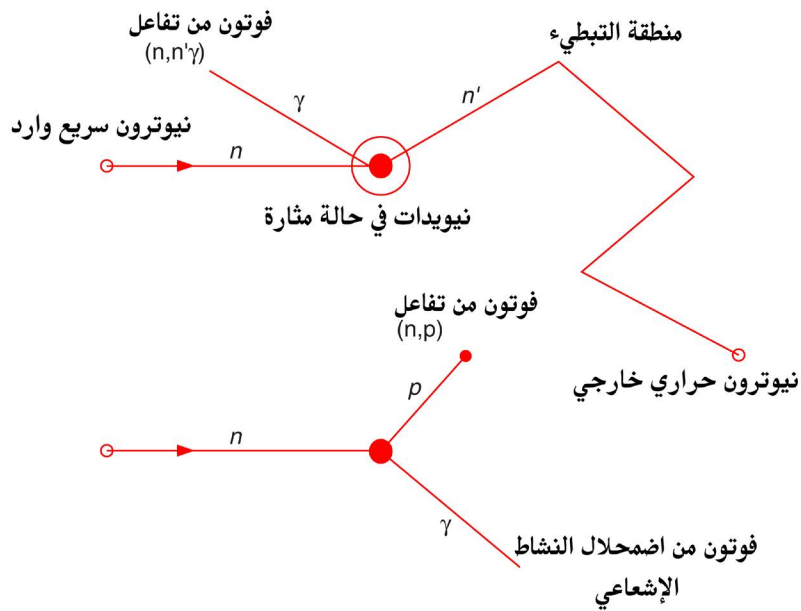
ميزة أخرى مهمة للبارامترات النووية للمواد هي أنها تعتمد على نوع النوى





التي تشكل الصخر، وعلى الطاقة E للإشعاع الساقط وعلى نوع الإشعاع (أي النيوترون، والإلكترون، والفوتون، وما إلى ذلك).

في الجيوفيزياء النووية، فقط بعض أنواع تفاعلات النواة الإشعاعية هي ذات أهمية عملية. كما في الشكل الآتي:



تفاعلات النيوترونات السريعة مع النوى.

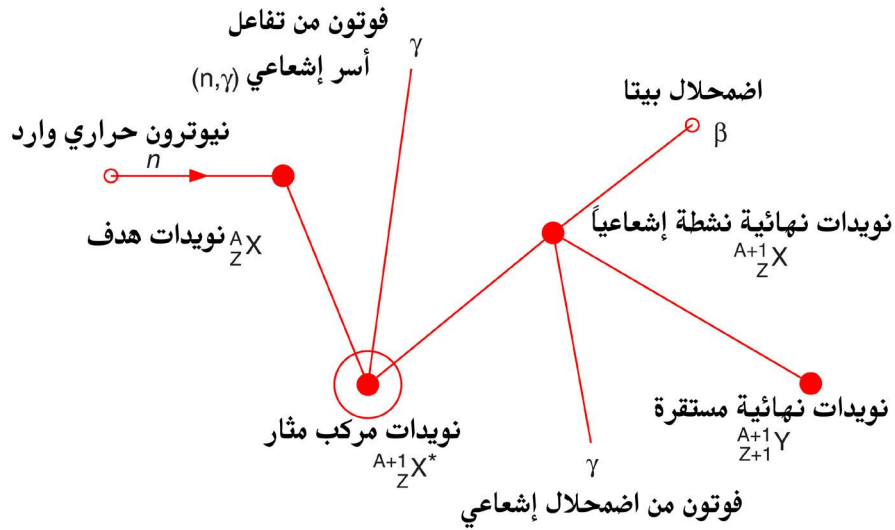
بالنسبة لإشعاع γ الأولي، فإن عمليات التفاعل هي تشتت كومبتون، والامتصاص الكهروضوئي (الذي يستلزم أيضاً انبعاث أشعة سينية مميزة)، وإنتاج الزوج وتفاعلات الفوتون والنيوترون.



الجيوفيزياء النووية

عندما تكون النيوترونات هي الإشعاع الأساسي، فإن العمليات تتباطأ وتنتشر، التفاعلات النووية في منطقة طاقة نيوترونية أعلى (تشتت غير مرن، تفاعلات n-p)، الالتقاط الإشعاعي للنيوترونات الحرارية، التنشيط بالنيوترونات الحرارية والانشطار النووي.

تجمع البيانات التي تصف هذه التفاعلات في قواعد بيانات نووية كبيرة، أشهرها قواعد البيانات هي **ENDF** (ملفات البيانات النووية المقيمة) لمختبر بروكهافن الوطني بالولايات المتحدة الأمريكية.



تفاعلات النيوترونات الحرارية مع النوى.

ونظراً لتعقيد العمليات باستخدام قاعدة بيانات **ENDF**، فقد جرى تحويل الأجزاء التي تنطبق على **الجيوفيزياء النووية** إلى تسميات ملائمة لهذا التطبيق.

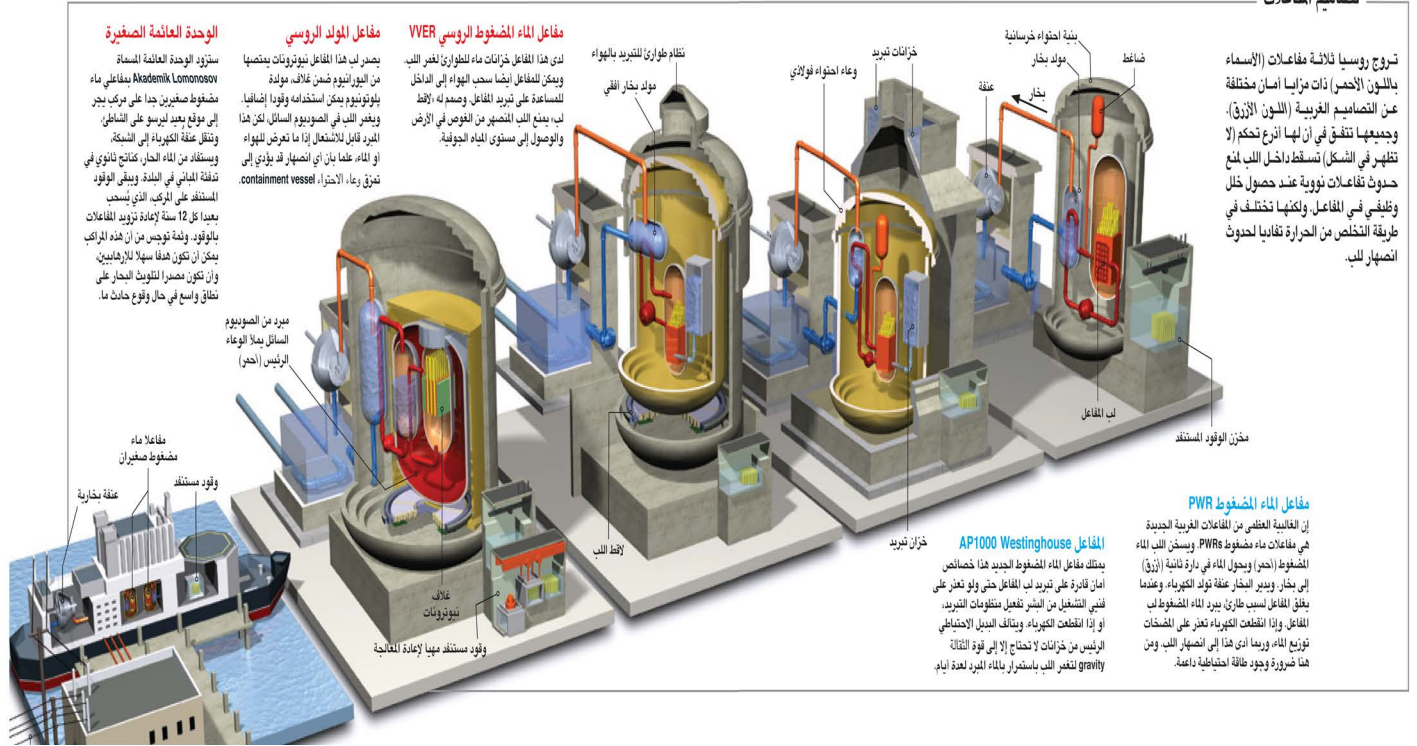
نفذ هذا العمل في **RSIC (Obninsk)** ومختبر لوس ألاموس **Los Alamos**





الوطني ومختبرات أخرى تعمل أيضاً في حسابات تصميم المفاعلات النووية. للأسف، لا يوجد سوى اتفاق متغير بين التنبؤات بناءً على الرموز المطورة في المختبرات المختلفة.

تصاميم المفاعلات



نماذج تصاميم المفاعلات النووية





• قياس البارامترات الأولية

عندما يجري تسجيل الإشعاع γ الطبيعي لتكوين جيولوجي (سجل شعاع γ ، قياس γ على العينات، مسح الجدار، إلخ)، فإن البارامتر الأساسي الذي يؤثر على استجابة الأداة هي درجة المكون المشع. وعندما يمكن تمييز طاقات أشعة γ المختلفة التي يكشف عنها عن بعضها بعضاً، يُشار إلى نوع القياس المستخدم باسم مقياس الطيف.

تعتمد الاستجابة الطيفية المسجلة لأشعة γ المختلفة بشكل مباشر على درجة النظائر المشعة المحددة الموجودة في المادة التي جرى فحصها والتي تنبعث منها أشعة γ الخاصة. بالنسبة للمواد والتكوينات الجيولوجية، فإن الدرجات التي نقيسها بهذه الطريقة هي تلك الخاصة باليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم. بالنسبة لتحقيقات البئر المجهزة بمصادر أشعة γ ، فإن الإشارة المسجلة، التي يُشار إليها بالرمز I ، تنتج عن اكتشاف الإشعاع المنتشر من الجدران الصخرية لحفر البئر.

ومع ذلك، فإن المصادر المستخدمة في هذه التطبيقات تنبعث منها أشعة γ أولية مع طاقة غير كافية لإنتاج تفاعلات إنتاج زوجية، إما بشكل عام أو، كما في حالة ^{60}Co ، على مستوى كبير من المقارنة مع تشتت كومبتون. ثم تعتمد الإشارة التي جرى الحصول عليها من المسبار على الكثافة الظاهرية والرقم الذري المكافئ Z_{eq} للتكوينات الجيولوجية.

لقد علمنا أن قيمة Z لعنصر ما مهمة جداً في تحديد الشدة التي تحدث بها عملية الامتصاص الكهروضوئي. وذكرنا أن المقطع العرضي الكهروضوئي العياني لعنصر يختلف تقريباً مثل القوة 3.6 للعدد الذري، أي $Z^{3.6}$.





ومع ذلك، فإن المواد الجيولوجية هي بشكل عام مخاليط من عناصر كيميائية مختلفة. لذلك، لتحليل هذه المواد المركبة بتقنيات تعتمد على التأثير الكهروضوئي، يجب أن نستخدم مفهوم العدد الذري الفعال، والذي يُسمى عموماً العدد الذري المكافئ Z_{eq} .

السبب وراء استخدام ميزة Z_{eq} للمناقشة التفصيلية هو أن نجاح تقنية تحليل طيفي معينة تعتمد على هذا البارامتر. تستلزم هذه التقنية الخاصة حساب بارامتر استجابة مسبار معينة، والذي يتناسب تقريباً بشكل مباشر مع Z_{eq} للمادة قيد التحقيق.

ونظراً لأن المقاطع العرضية الكهروضوئية للعناصر المكونة تعتمد على القيم الأسية لأعدادها الذرية، لا يمكن أن يكون البارامتر Z_{eq} ببساطة متوسط قيمة حسابية لهذه الأرقام الذرية للعناصر المكونة، وإنما مرجح تركيزاتها النسبية في المادة.

في الواقع، يعتمد Z_{eq} على مجموع عدد من عوامل الترجيح. يعكس كل عامل ترجيح الحجم النسبي للمساهمة التي يقدمها كل مكون عنصري في المقطع العرضي العياني للمادة. يعتمد عامل الترجيح المرتبط بالمكون الأولي i ، ومن ثم، على كل من القيمة المقابلة لـ $Z_i^{3.6}$ وتركيزه الكيميائي p_i في المادة.

يعتبر سلوك Z_{eq} مع الاختلافات في التركيب الكيميائي أمراً حيوياً لتحليل الخامات المعدنية باستخدام تقنية أشعة γ الطيفية المرتدة، والتي يشار إليها أيضاً باسم تقنية γ - γ ، من أجل الإيجاز.

غالباً ما تكون المكونات المرغوبة اقتصادياً لهذه الخامات إما عناصر انتقالية (مثل الحديد والنحاس) أو المعادن الثقيلة (مثل الرصاص). تحوي الخامات





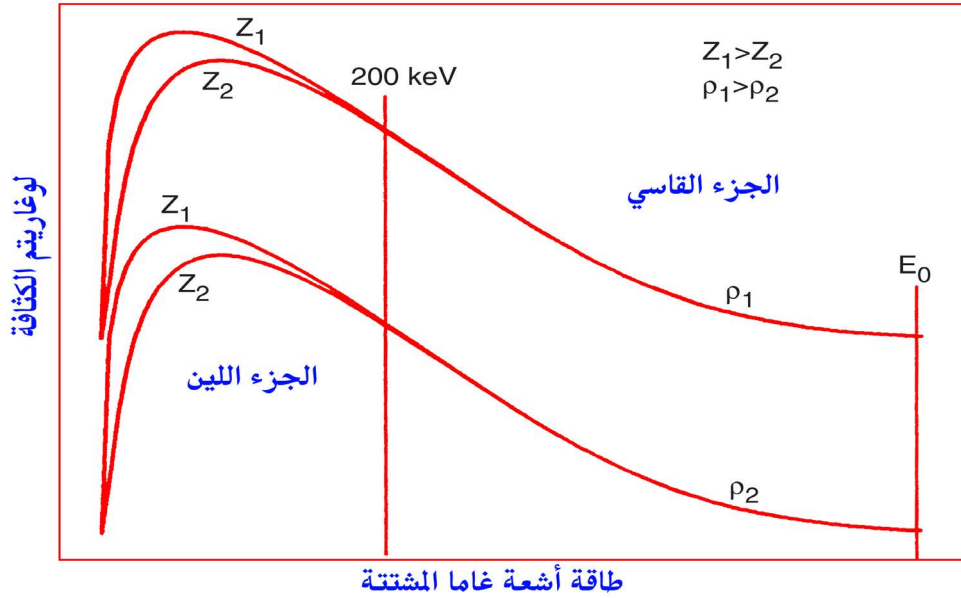
أيضاً على العناصر الكيميائية التي تشكل شوائب الخامات (مثل Si ، Al ، Mg).
في هذه الحالات، يكون للعناصر الكيميائية المكونة للشوائب أعداد ذرية أقل
بكثير من العناصر المرغوبة اقتصادياً.

ويترتب على ذلك أن أي تغيير في تركيز العناصر المعدنية في الخام سيكون
له تأثير أكبر، نسبياً، في تغيير قيمة Z_{eq} من التغيير النسبي لتركيزات العناصر
في مواد.

هذه الظاهرة مهمة بالمثل فيما يتعلق بتحليل الفحم. في حالة الفحم، تكون
العناصر الكيميائية المكونة للشوائب ذات عدد ذري أعلى بكثير من تلك التي
تشكل المواد القابلة للاحتراق، والتي تتكون أساساً من الكربون والهيدروجين.
نتيجة لذلك، فإن عناصر الشوائب هي تلك التي تحكم التغيرات في قيمة Z_{eq} ،
وليس مكونات القيمة الاقتصادية.

فيما يتعلق بتقنيات γ - γ الطيفية، يوضح الشكل الآتي تباين الشدة مع
الطاقة لأشعة غاما المنتشرة في الصخور والتي تختلف من ناحية كثافتها الكتلية
وأعدادها الذرية Z_{eq} ، حيث تكون أشعة γ أحادية الطاقة هي الإشعاع الأساسي
للطاقة E_0 .





مخطط أطيف الإشعاع المشتتة لقيمتين مختلفتين للكثافة الظاهرية وقيم Z_{eq} . يبين الشكل نظرة ثابتة للأفكار الأساسية ذات الصلة لكيفية تأثير تباين تقاطعات كومبتون وتشتت امتصاص الأشعة الكهروضوئية مع خصائص المواد على الشكل الطيفي لأشعة γ المشتتة.

يمكن تقسيم أطيف γ - γ إلى منطقتين: منطقة تمثل الإشعاع 'اللين' ذا الطاقة المنخفضة نسبياً بينما تمثل المنطقة الطيفية الأخرى إشعاع الطاقة 'القاسي' الأعلى. من الواضح أن كثافة الصخور تضعف طيف الطاقة بكامله. إذا زادت كثافة الصخور، تقل شدة الإشعاع المشتتة في جميع أنحاء الطيف. على النقيض من ذلك، يؤثر Z_{eq} فقط على الجزء 'اللين' من الطيف.





هاتان الحقيقتان مجتمعتان هما الأساس لتقنية تستند إلى بارامترين للاستجابة الطيفية، أحدهما حساس لكثافة الصخور والآخر يتناسب بشكل مباشر مع Z_{eq} .

تتفد هذه التقنية ببساطة عن طريق ضبط نوافذ الطاقة بشكل مناسب في أجهزة التسجيل (عن طريق البرامج أو الأجهزة) والتي تتوافق مع مناطق طيف أشعة γ المشتتة المصنفة على أنها 'لينة' و 'قاسية'.

من حيث المبدأ، يمكن معايرة المسابير من أجل الكثافة والعدد الذري المكافئ Z_{eq} ، من خلال إجراء القياسات (وحساب بارامترات الاستجابة وفقاً لذلك) في الآبار ذات قطر الحفر القياسي المحاط بالصخور ذات الكثافة المعروفة و Z_{eq} ، أي أن إجراء المعايرة تعتمد هذه التقنية على بيئة بئر موحدة.

ومع ذلك، من الناحية العملية، تختلف الآبار اختلافاً كبيراً في القطر على مدى فواصل العمق الكبيرة، حتى عند الحفر باستخدام لقمة حفر قياسية واحدة. كما أن الآبار لا تخلو في الغالب من سائل البئر ولا مملوءة بالكامل.

الاختلافات في قطر البئر التي تحدث بشكل شائع قد تسبب اختلافات كبيرة في استجابات المسبار، للظروف التي تبقى فيها الكثافة الظاهرية والعدد الذري المكافئ ثابتاً.

لذلك، فإن قيم بارامترات الاستجابة التي نبنى عليها تنبؤات قيم الكثافة الظاهرية والعدد الذري المكافئ ستختلف أيضاً وفقاً للاختلاف في قطر البئر $2R$. يعبر عن هذا السلوك للإشارة المسجلة I بالتعبير الرياضي:

$$I = I(\rho_b, Z_{eq}, 2R)$$





للدلالة على اعتماد استجابة المسبار على الكثافة الظاهرية والعدد الذري المكافئ وقطر البئر.

ومع ذلك، بالنسبة لقياسات الكثافة الظاهرية، من المهم أن تضع في اعتبارك أن ما يستجيب له المسبار مباشرة هو كثافة الإلكترونات (لذلك، فإنه يستجيب بشكل غير مباشر فقط للكثافة الظاهرية).

كثافة الإلكترونات هي نتاج الكثافة الظاهرية ورقم أفوجادرو و (Z/A)، حيث Z و A هي القيم المتوسطة لهذه البارامترات.

بالنسبة لجميع العناصر الكيميائية، باستثناء الهيدروجين والعناصر الثقيلة، فإن النسبة $Z_1/A_1 \approx 0.5$ هي تقدير تقريبي ممتاز. لذلك، فإن كثافة الإلكترون والكثافة الظاهرية تتناسب طردياً (بتقريب جيد) للمخاليط والمركبات الكيميائية التي تتكون من العناصر الجيولوجية الأكثر شيوعاً.

• تقنيات تحت السطح

كما ذكرنا في السابق، يوجد عدة بيئات تجرى فيها القياسات الجيوفيزيائية النووية. اثنان من البيئات ذات الأهمية هما باطن الأرض ومصنع معالجة المعادن.

تقنيات القياس المختارة للمناقشة في هذه البيئات هي تقنيات أشعة (نيوترون-غاما) تحت السطح، المتتبع الإشعاعي لكل من السطح تحت السطحي ومصنع تحضير المعادن وتقنيات الأشعة السينية لمصنع معالجة المعادن.

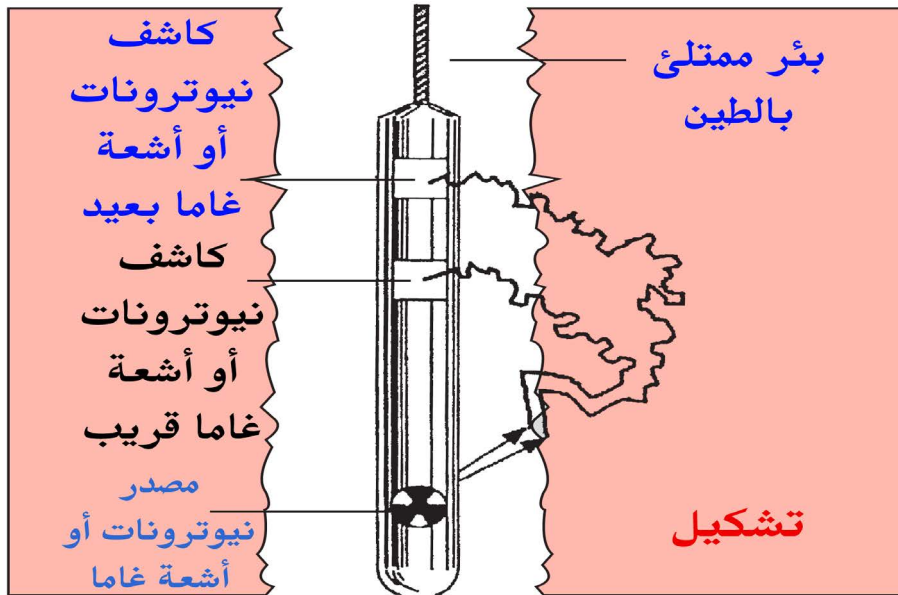
تجري معظم القياسات تحت السطحية عن طريق وضع أداة في بئر جرى





حضره من خلال تكوین صخري من المتوقع أن يكون لديه موارد اقتصادية قابلة للاسترداد اقتصادياً. الفرض من القياسات هو تحديد الوجود الفعلي للمورد الاقتصادي، وتحديد مداه والحصول على معلومات حول سياقه الجيولوجي التي قد تكون ذات صلة بإمكانية استرداده التجاري.

ومع ذلك، فإن الحاجة إلى إجراء قياسات من داخل حفرة البئر، تقدم قيدين أساسيين على التقنيات النووية من بيئة البئر هما: القيد الهندسي ووجود مادة غير مثيرة للاهتمام والتي تلوث القياس. يمكن تصور القيود الهندسية بسهولة أكبر، كما يتضح من الشكل الآتي، الذي يُظهر أداة تسجيل نووي عامة موجودة في حفرة بئر.



تمثيل تخطيطي لأداة تسجيل عامة في البئر. وعادة ما يتم ملء البئر بالطين.

يجب احتواء جميع المعدات في عبوة ضغط أسطوانية لتحمل الضغوط المحيطة. بالنسبة للتقيب عن النفط والغاز، قد تصل الضغوط إلى 150 ميغا باسكال، وتصل درجات الحرارة بشكل روتيني إلى 150 درجة مئوية أو أعلى.





بالنسبة لتحليل البئر في الموقع للموارد الصلبة، فإن أعماق البئر لأغراض الاستقصاء تكون عموماً مئات الأمتار فقط، وليس آلاف الأمتار بالنسبة للنفط، بحيث تكون درجات حرارة التشغيل والضغط أقل وفقاً لذلك.

ومع ذلك، لا يزال يتعين عليهم تحمل ضغوط ودرجات حرارة كبيرة، وغالباً ما يجب إجراء القياسات من داخل الآبار المليئة بالمواد. القياسات ملوثة لأنه غالباً ما يتم حفر الآبار مع وجود الطين في الحفرة؛ عادة ما يصبح هذا الطين جزءاً من القياس الكلي، وبما أنه يتم الحفاظ على تدرج الضغط بين الحفرة والصخور المحيطة، تتكون عجينة طينية على سطح الصخر.

في كثير من الحالات، يتم تثبيت غلاف فولاذي في البئر لتجنب انهيار البئر. قد تكون بعض أو كل هذه المواد موجودة في بئر معين لتقييم مورد اقتصادي. ومع ذلك، في بعض الحالات، تكون شركات التعدين أو مقاولو الحفر على استعداد لتنظيف الحفرة من طين الحفر.

يمكن توضيح بعض العوامل التي تعقد قياسات **الجيوفيزياء النووية** تحت السطحية من خلال النظر في المشكلة البسيطة الظاهرة لتحديد تركيز الألومنيوم (Al) في صخور التكوين.

أساس طريقة القياس هو استخدام مصدر نيوتروني ^{252}Cf وكاشف أشعة γ لقياس النشاط المتأخر من تفاعل $^{27}\text{Al} (n, \gamma) ^{28}\text{Al}$. لتحديد التركيز الأساسي المطلق للألمنيوم من معدل العد المقاس يتضمن العديد من البارامترات الجيوفيزيائية.

كل من المقاطع العرضية لامتناس النيوترون الحراري والعياني والتكوين، Σ_{bh} و Σ_{form} ، طول تباطؤ النيوترون، L_s ، والكثافة الظاهرية، ρ ، سرعة التسجيل وحجم البئر كلها مطلوبة لتحديد التطابق بين معدل العد الكاشف ومحتوى الألمنيوم في



الصخور. بالإضافة إلى ذلك، من الضروري التأكد من أن قوة المصدر وكفاءة الكاشف قد جرى معايرتهما بعناية.

ومن ثم، فإن التحديد الصحيح لتركيزات العناصر يتطلب معلومات موثوقة حول العديد من البارامترات الجيوفيزيائية، بالإضافة إلى المعلومات الطيفية المحددة المتعلقة بالعنصر الفردي.

بالإضافة إلى أهمية هذه المعلومات لتحديد التركيزات الأولية، تحدد هذه العوامل أيضاً دقة القياس. تعد معرفة دقة تركيزات العناصر أمراً مهماً للاستخدام الذكي لجميع أنواع البيانات الجيوفيزيائية والعنصرية.

أخيراً، تتطلب معايرة قياس التنشيط المتأخر تشكياً مخبرياً لمحتوى Al المعروف كمعيار مطلق، وإجراء معايرة في الموقع لحساب الاختلافات من أداة إلى أداة وإنشاء خوارزمية تصحيح بيئي ميداني، لحساب الاختلافات في نقل النيوترونات والأشعة الجينية الناتجة عن وسيط الاستقصاء الكبير نسبياً.

تضمن كل هذه الإجراءات أن أشعة γ المكتشفة من تفاعل $^{28}Al(n,\gamma)$ مع نوى التكوين ستتحوّل بشكل صحيح إلى تركيزات Al من التكوين. هناك مصدران آخران لأشعة $^{28}Al\gamma$ التي تساهم في خلفية غير مرغوب فيها للقياس: السيليكون في الصخور والألمنيوم في الطين.

يحتوي المصدر ^{252}Cf المستخدم في قياس التنشيط المتأخر على متوسط طاقة منخفض نسبياً يبلغ 2.35 ميغا إلكترون فولت، ولكن يصدر جزء كبير من النيوترونات أعلى من عتبة 3.9 ميغا إلكترون فولت لتفاعل $^{28}Si(n,p)^{28}Al$.

سيحتوي نشاط Al المقاس بعد ذلك على كمية معينة بسبب وجود السيليكون





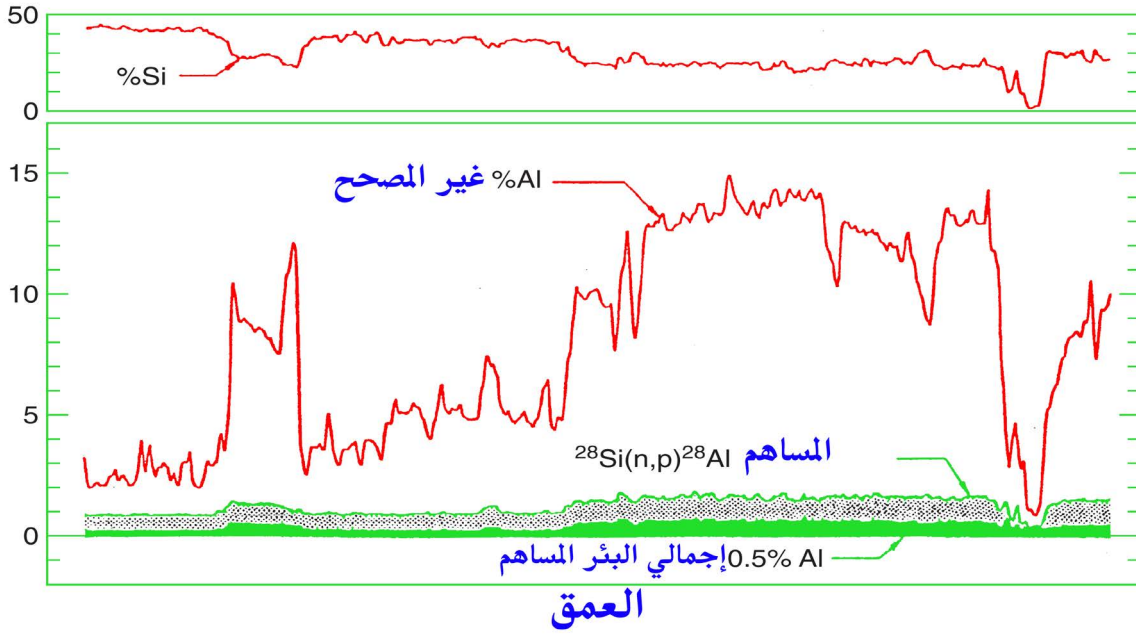
في الصخر. يجب إجراء تصحيح لمعدل عدد Al المقاس قبل تحويله إلى تركيز Al . ومن ثم، لتحديد تركيز Al بدقة معقولة، من الضروري أولاً تحديد تركيز Si . أي عدم يقين أو عدم دقة في تحديد تركيز السيليكون يزيد من عدم اليقين ويقلل من دقة قياس Al .

لحسن الحظ، حتى بالنسبة لأكثر الصخور السليكونية، عندما تقاس باستخدام مصدر ^{252}Cf ، فإن نسبة مئوية صغيرة مكافئة فقط من Al ترجع إلى Si . يوضح الشكل الآتي (في التظليل الخفيف) جزء نسبة وزن Al الظاهرية والتي ترجع إلى تفاعل $^{28}Al (n,p) ^{28}Si$ ، بالنسبة لبئر نموذجي.

في الرمال الصخرية، تكون المساهمة، عادةً، نحو وزن واحد في المائة. إنه لا يتتبع بالضبط تركيز Si الذي يظهر في الشكل، كما قد يتوقع المرء أولاً، لأن التصحيحات البيئية المطبقة على كل آلية تفاعل مختلفة. هناك حاجة إلى تصحيحات بيئية حرارية للنيوترونات من أجل قياس Al الطبيعي.

ومع ذلك، فهي ليست مناسبة للنيوترونات السريعة التي تنتج تفاعل (n, p) . لذلك يجب حساب الفرق بين هذه التصحيحات عند تحويل نسبة وزن السيليكون التي جرى الحصول عليها من تفاعل التقاط النيوترون الحراري إلى المساهمة في ^{28}Al النشاط الناتج عن تفاعل (n, p) على السيليكون.





إجمالي المساهمة المقيسة للنشاط المتأخر من ^{28}Al ، والتي توضح مساهمات Al الموجود في البئر والمساهمة من تفاعل $^{28}\text{Si} (n,p) ^{28}\text{Al}$ ، الناتج عن تدفق النيوترونات في التكوين بمصدر ^{252}Cf ويتركز صخر Si الذي يظهر في المنحنى العلوي.

المشكلة الثانية لقياسات التنشيط المتأخرة في الآبار النموذجية هي وجود الطين، والذي سيحوي في كثير من الأحيان على معادن تحمل Al. لا يمكن للقياس فصل Al في الطين عن ذلك الموجود في الصخر، ومن ثم من الضروري تصحيح تركيز Al المقاس للمساهمة من الطين. البارامترات المطلوبة هي محتوى Al للطين، المحدد من مكونات الإدخال لنظام الطين أو، بشكل مفضل، من قياس محتوى Al في عينة مأخوذة من نظام تدوير الطين، وحجم البئر.





المنطقة المظلمة في الشكل السابق هي حساب مساهمة بئر افتراضية بافتراض وجود طين 1.2 غرام / سم³ يحوي 0.5 % AI بالوزن، والتركيز ربما يكون على الجانب المرتفع ولكنه لا يجب أن يكون نادراً.

في حين أن المساهمة المحسوبة لتركيز AI هذا البئر الثابت يختلف اختلافاً كبيراً مع البيئة، فإن القاعدة العامة الجيدة هي أن مساهمة البئر AI في التكوين الظاهر AI في المائة من الوزن تساوي تقريباً النسبة المئوية للوزن AI في سائل البئر.

بطبيعة الحال، مثل معظم القياسات، فإن مقدار التصحيح يعتمد بشدة على حجم البئر. ستؤدي الزيادة في حجم البئر إلى زيادة كبيرة في مساهمة البئر في القياس الكلي، لأن كمية AI في البئر ستزداد مع مربع الزيادة في نصف قطر البئر. علاوة على ذلك، بالطبع، ستخفض مساهمة AI في صخور التكوين.

• تقنيات التتبع الإشعاعي

تقنيات التتبع الإشعاعي لها العديد من التطبيقات الصناعية. لقد قدمت منذ فترة طويلة أداة لاستشعار مادة معينة لأن المواد المشعة تصدر إشعاعاً يمكن اكتشافه دون فصل الكاشف عن المادة الموجودة فيه.

ونظراً لأن الطبيعة الكيميائية للنظير المشع هي نفسها للنظير غير المشع للعنصر الكيميائي نفسه، فيمكن دمجهم في المركب الكيميائي لاستخدامه كمتتبع، ثم يتصرف بالطريقة نفسها مثل المركب غير المشع.

في المختبر، أو في التطبيقات الصناعية الموجودة على السطح، غالباً ما تُستخدم أدوات التتبع لتحليل العمليات، لتحديد المكونات غير الفعالة أو تلك التي تظهر تآكلاً غير عادي. في الاستخدام تحت السطحي، لطالما استخدمت





أدوات التتبع لدراسة النظم الهيدرولوجية لتقييم خصائص الخزان الجوفي.

أحد قطاعات الصناعة التي تعتبر تطبيقاتها مهمة بشكل خاص هو صناعة الموارد البترولية، في كل من مرحلة الاستكشاف ومرحلة الإنتاج. يستخدم هذا القطاع الصناعي نوعين رئيسيين من تقنيات التتبع: طريقة المؤشر الإشعاعي **RaDioactive Indicator Method** وطريقة تتبع النيوترونات **(NTM) Neutron Tracer Method**.

تقدم طريقة المؤشر الإشعاعي نشاطاً إشعاعياً اصطناعياً أو طبيعياً إما في محلول أو في رمال مشعة. يستلزم أسلوب التشغيل في طريقة **NTM** حقن مواد غير مشعة قوية تمتص النيوترونات.

لدى تطبيق أي من الطريقتين، يتحدد مدى تغلغل المادة في مصفوفة المادة من خلال نفاذه بينما تعتمد كمية المادة الموجودة على مساميتها الفعالة. عندما تحقن هذه المواد في آبار النفط، تؤدي المسامية المتزايدة أساساً إلى زيادة استجابة الكاشف الذي يراقب النشاط الإشعاعي في البئر إذا كانت المادة المحقونة متتبعاً إشعاعياً.

ينتج عن هذا استجابة منخفضة للكشف عن النيوترونات لمصدر نيوتروني، في حالة تطبيق **NTM**. في حالة تسجيل الآبار، تُستخدم هذه الطرائق لتقدير المسامية الديناميكية ونفاذية التكوين أو يمكن تطبيقها في مراقبة الظروف الفنية والتشغيلية للآبار.

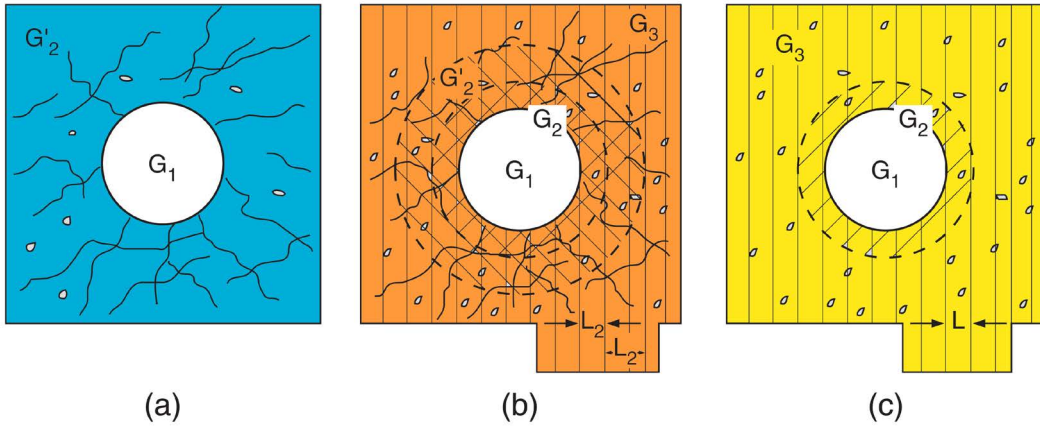
بالنسبة لطريقة المؤشر الإشعاعي، هناك عدد من الاستراتيجيات المختلفة مع تطبيقاتها الخاصة. تُستخدم مقتطفات من (^3H) المسمى التريتيوم لتحديد





خصائص التدفق أو الترشيح التي قد توجد بين عدد من آبار النفط المتقاطعة مع مكمن البترول.

يتحدد خصائص الترشيح (أي سرعة واتجاه التدفق) للمصفوفة بين الآبار من خلال وقت وصول النشاط الإشعاعي المتبع، الذي يراقب في بئر الإنتاج، بعد حقن المتبع في بئر الضخ. قد تكشف هذه التقنية أيضاً عن وجود عدم تجانس بنيوي في الخزان. يوضح الشكل الآتي أنواع الهياكل المصادفة في مكامن النفط والتي غالباً ما تفسر بشكل مرضٍ من خلال استخدام طرائق المتبع هذه.



أنواع الخزانات المستخدمة في النموذج البتروفيزيائي لتقنية المتبع الإشعاعي: (a) خزان متصدع مع مصفوفة مدمجة ومتجانسة وغير منفذة عملياً؛ (b) الخزان المسامي مع مصفوفة كهفية غير متجانسة ومسامية؛ (c) خزان مسامي بين الحبيبات مع مادة أساس متجانسة قابلة للاختراق. G_1 هو عامل هندسي شعاعي (RGF) يصف البئر؛ G_2 هو RGF لمنطقة الاختراق لتتبع السوائل بسبب قنوات المسامية؛ G_3 هو RGF للجزء غير المضطرب من القاع).



تستخدم التطبيقات الأخرى، التي تستخدم الضخ الدوري في بئر النظائر قصيرة العمر مثل ^{24}Na و ^{82}Br ، والتي جرى اختيارها لأسباب بيئية، لتحديد ظروف تشغيلها. تُستخدم الغازات المشعة كمتبعتات أثر لتحديد النفاذية والمسامية الديناميكية في الخزانات البترولية ذات الهياكل المعقدة والتمعدنات.

تتكون طريقة تتبع البئر لتحديد النفاذية والمسامية الديناميكية من المراحل الآتية: قياس شعاع الخلفية، وملء البئر بسائل يحمل الكاشف، وقياس شعاع التحكم، وغسل الحفرة نفسها من التتبع، وقياس البئر النهائي من خلال بقايا التتبع المتبقية في التكوين.

في صناعة النفط والغاز، كثيراً ما تُستخدم أدوات التتبع لتقييم خصائص التدفق على مسافات طويلة. مع تطور أجهزة الكشف عن الأشعة γ والإلكترونيات المرتبطة بها، صارت قادرة على اكتشاف أشعة γ الفردية التي تساهم في الطيف. هذا جعل من العملي استخدام أدوات تتبع مشعة متعددة وتحلل مساهمة كل مكون في الطيف الكلي المرصود بطريقة التحليل الطيفي. وقد أدى ذلك إلى استخدام هذه التقنيات لحل المشكلات الأكثر تعقيداً. على سبيل المثال، يمكن إدخال أدوات تتبع مختلفة في سوائل الحقن في آبار الحقن المتعددة، ويمكن تحليل السوائل المكتشفة في بئر الإنتاج لتحديد كمية السائل التي تصل إلى البئر المنتجة والتي تأتي من كل بئر حقن.

كما استخدمت أدوات التتبع المشعة جنباً إلى جنب مع الكشف الطيفي لأشعة γ لتحديد كفاءة التكسير الهيدروليكي، وتحديد كفاءة المراحل المختلفة لتعبئة الحصى ومراقبة القطر والمدى الرأسي لعمود الأسمنت.

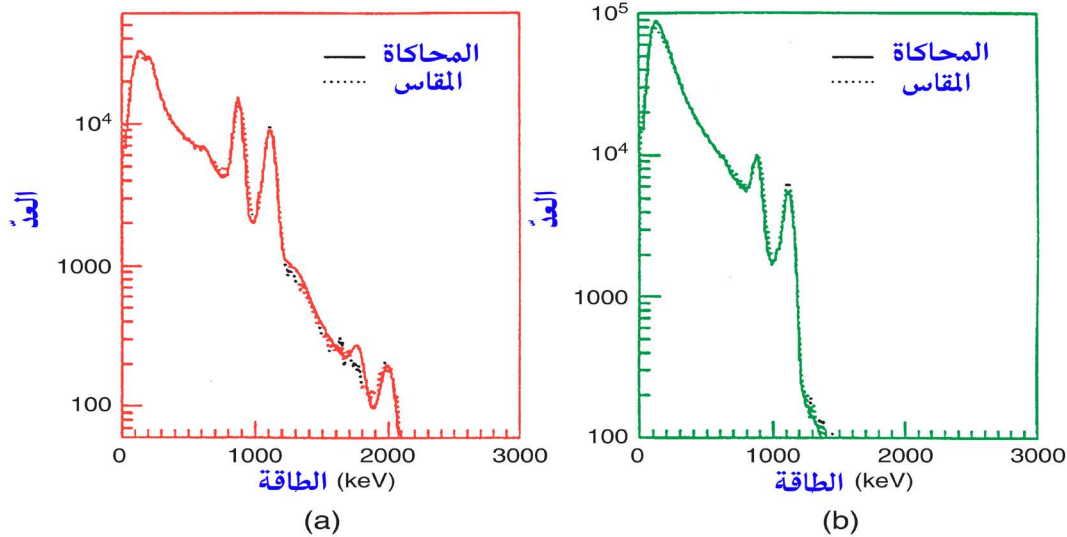




كان من الأمور ذات الأهمية الخاصة في تطبيق هذه التقنيات بشكل أفضل إدراك أنه يمكن الحصول على بعض المعلومات حول المسافة الشعاعية للمقتضي من الأداة في حفرة البئر من خلال تحليل شكل الطيف المكتشف.

تتمتع أشعة غاما التي تنشأ بالقرب من الأداة، أي في حفرة البئر أو على سطح الصخر، بنسب أعلى من التسارع الضوئي إلى كومبتون لأنها كانت أقل فرصة للتشتت في المواد المتداخلة قبل الوصول إلى كاشف أشعة γ في الأداة.

من المرجح أن تتعرض أشعة غاما التي تنشأ من داخل صخرة التكوين لحدث أو أكثر من أحداث تشتت كومبتون في المادة المتداخلة قبل الوصول إلى كاشف أشعة γ في الأداة الموجودة في البئر، وستكون لها نسبة تسارع ضوئي أقل إلى كومبتون. يظهر هذا التأثير بوضوح في الشكل الآتي.



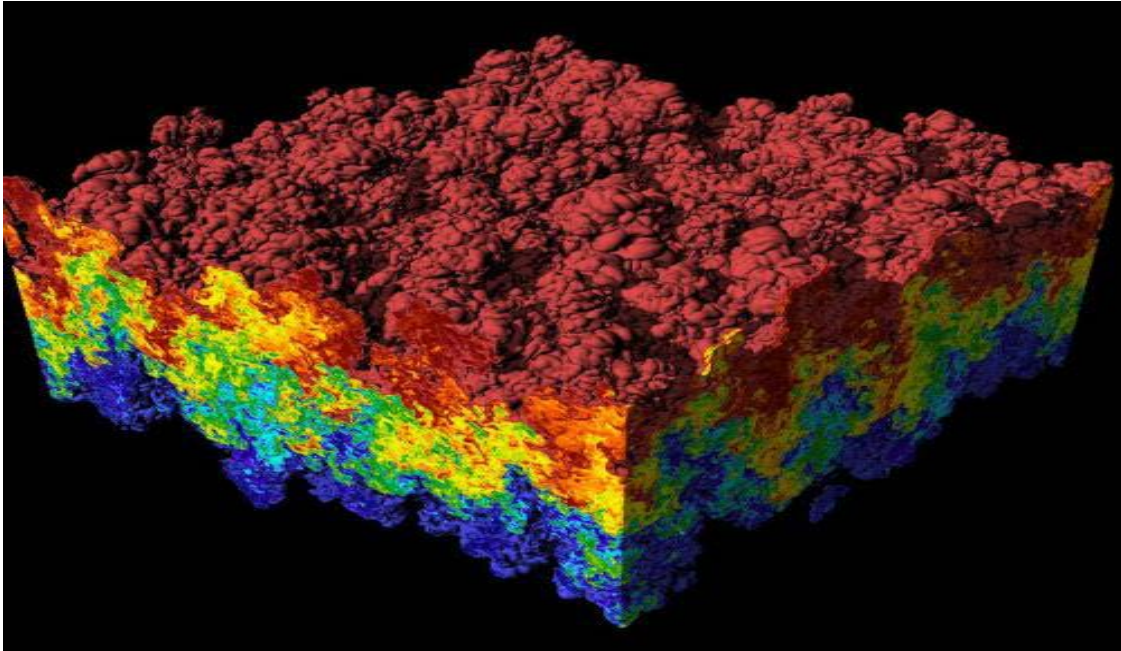
مقارنة بين الأطياف المقیسة والمحاكاة عددياً لجهاز تتبع (a) ^{46}Sc التتبع في سائل البئر؛ (b) التتبع في التكوين.





المنحنيات الصلبة في الأشكال هي محاكاة للردود على أساس حسابات مونت كارلو. وقد طبقت هذه التقنية لتحديد كفاءة محاولات تكسير صخر التكوين هيدروستاتيكيًا لزيادة إنتاج الغاز والنفط.

يوفر تغليف الكسور بالرمل بسهولة مثلاً بسيطاً على هذا التعزيز. في هذا التطبيق، من المرغوب فيه بشكل متكرر تحديد فعالية عملية دعم الكسر بناءً على استخدام تقنية دعامة الرمل. لذلك، من المستحسن معرفة ارتفاعات كل من الرمال في الكسر والكسر نفسه.



تعد طرائق مونت كارلو فئة واسعة من الخوارزميات الحسابية التي تعتمد على أخذ العينات العشوائية المتكررة للحصول على نتائج عددية. في الصورة التصور العلمي لمحاكاة كبيرة جداً لمشكلة عدم استقرار رايلي-تايلور. جرى إنشاء هذه الصورة بواسطة نظام VisIt المرئي.





من أجل قياس هذه البارامترات، تستخدم أدوات اقتفاء مختلفة في مائع التكسير، الذي يفتح الكسور، وفي الحشوة، أي خليط الرمل والطين الذي من شأنه أن يمنع الكسور من الالتحام.

يجري توفير الرمل المستخدم لتعبئة الكسر بمزيج من الرمل المسمى التتبع والذي يوفر علامة عمودية قابلة للقياس لمسبار أشعة γ الطبيعي. سيفصل القياس الطيفي، كدالة للعمق في البئر، بوضوح المادة الموجودة في البئر عن تلك التي جرى اختراقها في التكوين. يتيح ذلك تحديد موقع الكسور المفتوحة المستحثة في الصخور والتي من المحتمل أن تنتج الهيدروكربونات. من هذا القياس، من الممكن استنتاج المدى الشعاعي للكسر.

يوفر استخدام طرائق القياس الطيفي تقديراً أفضل لنفاذية المناطق الواقعة خلف جدار البئر من خلال المراقبة الكمية لاختراق التتبع المحقون. كما سبق وأشارنا، تختلف نسبة ارتفاع الذروة إلى ارتفاع سلسلة كومبتون باختلاف طول المسير الذي يجب أن تأخذه أشعة γ قبل الكشف.

نتيجة لذلك، ستكشف أطراف التتبع التي يجري تسجيلها في ظل ظروف اختراق متتبع منخفض في الوسط (أي نفاذية منخفضة للمصفوفة)، عن تعريف طيفي أفضل بكثير من حيث نسبة الذروة إلى الاستمرارية من تلك المسجلة في ظروف عالية النفاذية.

يجب أن تصدر أدوات التتبع المطلوبة في هذه التطبيقات أشعة γ عالية الطاقة لاختراق الصخور بشكل كافٍ، بينما تتوافق مع المتطلبات البيئية لنصف عمر نظيري قصير.





العديد من أدوات التتبع التي تقي بهذه المتطلبات هي ^{131}I و ^{192}Ir و ^{198}Au ، والتي لها فترات نصف عمر تتراوح من 3 إلى 84 يوماً، تتبع منها أشعة γ في نطاق طاقة من 300-1100 كيلو إلكترون فولت ومن ثم يكون اختراق الصخور يصل إلى 30 سم.

يجري التقدير الكمي لاختراق التتبع من خلال معايرة الاستجابات الطيفية في النماذج مقابل الحالات المختلفة لاختراق المتتبع المحاكى. النماذج عبارة عن خزانات من الرمل المشبعة بسائل يحمل الكاشف.

يجري تجميع النماذج في شكل مناطق منفصلة متحدة المركز تحيط بالبئر المركزي لمحاكاة مختلف المناطق التي يمكن تحديدها والموجودة خلف البئر. الأبعاد الحلقية للمناطق قابلة للتعديل لمحاكاة النطاق المتغير لاختراق التتبع في التكوين. ومن ثم تجمع مكتبة للاستجابات الطيفية المسجلة لتوفير الأساس لاستنتاج مدى تغلغل التتبع الذي يحدث في قياس المجال الفعلي، أي أنه يستخدم في عملية فك بيانات المجال. يمكن استخدام التقنية نفسها لتحديد ما إذا كان السائل الذي يحمل علامة التتبع موجوداً داخل أو خارج غلاف البئر.

تساعد أدوات التتبع المشعة أيضاً في التشغيل الاقتصادي لمصانع معالجة المعادن من خلال المراقبة، وأثناء عملية الضبط، وكفاءة كل مرحلة من المراحل المختلفة لعمليات التخصيب ذات الدرجة المنخفضة من الخام التي تسبق صهر الخام المعالج.

ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أنها تشتمل على العديد من إجراءات الطحن والتصنيف التكرارية، والتي يتبعها التعويم لفصل الخام المخضب عن الشوائب.





تتكون عملية الضبط من مراقبة المتتبع الراديوي في دفع الإدخال لوحدة صناعية معينة، عند النقطة التي تحقق فيها كنبضة، وعند الإخراج. يشير التأخير إلى سرعة التدفق بينما يشير تشتت المتتبع، الذي يظهر في كاشف المخرجات، إلى درجة الخلط التي تحدث خلال مرحلة معينة من العملية. البارامترات التي يتميز بها إجراء المراقبة هذا هي متوسط وقت الإقامة، وشدة الخلط، ومعاملات الفصل وسرعة تدفق الطور، حيث يوجد أكثر من مرحلتين في الخليط.

بشكل عام، تكون عمليات الضبط موجزة لتجنب تعطيل العملية الصناعية، والنظائر المشعة المستخدمة قصيرة العمر لتقليل التأثير البيئي ويكون النشاط ضئيلاً لضمان سلامة الأفراد. يراقب الكاشف عند نقطة الحقن في مدخلات كل عملية.

تجري عملية منخفضة التكلفة لوضع العلامات الإشعاعية على خامات النحاس عن طريق تنشيط النيوترون لعينات الخام الخشنة (لإنتاج ^{66}Cu ، من عمر النصف 12.4 $T_{1/2}$ ساعة)، والتي تضاف بعد ذلك إلى تيار الإدخال وتستخدم لمراقبة المواد التي تمر عبر طحن الدوائر.

توفر طريقة المتتبع بيانات موثوقة بشكل فعال حول معدلات تغذية المدخلات المطلوبة لتحقيق قيمة جيدة لجزء خام الأرض بنجاح. يتيح ذلك لمشغلي المحطة اتخاذ قرار بشأن التوازن المناسب بين معدل التغذية واستهلاك الطاقة لتحقيق أكثر ظروف التشغيل الاقتصادية.

وبالمثل، تراقب عملية التعويم بحثاً عن فقدان النحاس الذي لا يزال نشطاً في المخلفات (أي الشوائب التي تغرق في مصنع التعويم)، حيث يكون للمشكلة





أسباب محتملة إما طحن غير صحيح أو مشكلات ميكانيكية في تجريف خام النحاس الطاي في سرعة كافية. أيضاً، إذا ظهر مستوى غير ضروري من النشاط الإشعاعي في المادة الملتقطة في بطاريات الهيدروسيكلون، يرجع هذه المادة لمزيد من الطحن قبل إعادة تقديمها للتصنيف.

• تقنيات الأشعة السينية ومعالجة المعادن

التقنيات التي تدعم التحليل أثناء التدفق في مصانع معالجة المعادن والفحم هي تقنيات التآلق بالأشعة السينية (XRF) وتقنيات الامتصاص التفضيلي للأشعة السينية، وتستخدم الأخيرة لتحديد تراكيز العناصر ذات الأعداد الذرية العالية (Z)، على سبيل المثال اليورانيوم والرصاص والزنك والتتغستن.

كثافة الملاط والمواد الصلبة مطلوبة ويتم تحديدها بواسطة امتصاص الأشعة السينية. بالإضافة إلى ذلك، تم ابتكار تنوع في طريقة XRF لتحليل الملاط أثناء التدفق في بولندا، استناداً إلى استخدام الأشعة السينية الأولية لطاقتين مختلفتين، وذلك لتوفير بيانات للتحكم في حجم الجسيمات.

إن أكثر تجميعات كاشف المصدر والعينة شيوعاً هي من نوع الإثارة المباشرة التي يوضع فيها مصدر الإشعاع بين العينة والكاشف، وهو الجزء العلوي.

يرتب النظام بحيث يجري حماية الكاشف من المصدر، ويقوم المرشح، بين العينة والكاشف، بحجب الأشعة السينية الفلورية غير المرغوب فيها. على سبيل المثال، في عجائن خام الزنك، يكون المرشح المطلوب مصنوعاً من النحاس، والذي ينقل أشعة الزنك X إلى الكاشف، لكنه يرشح أشعة K X للحديد وأشعة الرصاص L X كإشعاع غير مرغوب فيه.





عندما يكون التحكم في المعالج مطلوباً في الملاط الذي يحوي تركيزات منخفضة جداً من المعدن المطلوب، تستخدم مرشحات متوازنة مناسبة، يجري تصنيعها من العناصر المجاورة في الجدول الدوري.

وهي متوازنة فيما يتعلق بمنتج معامل امتصاص الكتلة وكثافة سطح المرشح، بحيث يؤدي استخدام المرشحين إلى إنشاء نطاق شفافية (أو ما يسمى شريط التمرير) للأشعة السينية ذات الأهمية. يقع شريط الشفافية هذا داخل نطاق امتصاص يقوم بتصفية الإشعاع X غير المرغوب فيه. في حالة انخفاض تركيزات الزنك في الملاط، فإن المرشحات المتوازنة المستخدمة في قياسات منفصلة مصنوعة من النحاس والنيكل.

ثم يمثل الفرق بين معدلات العد المسجلة باستخدام مرشحين مختلفين معدل تعداد الأشعة السينية المرغوبة. حقيقة أن هناك حاجة إلى قياسات منفصلة تعني أن التحليل أثناء التدفق يتطلب كاشفين منفصلين لكل عنصر كيميائي يجري تحليله.





الجيوفيزياء النووية وخصائص التربة

لقد استخدمت تقنيات **الجيوفيزياء النووية** في الكثير من المجالات، ومن بينها تحديد خصائص التربة من ناحية قياس الكثافة الظاهرية للتربة والمواد الصخرية في الموقع في دراسات الهندسة الجيولوجية والهيدروجيولوجية.

كما أنها تستخدم لدراسة كثافة التربة وديناميات الرطوبة في منطقة ترابية غير مشبعة، وتستخدم أيضاً لمراقبة هجرة مكونات النفايات المشعة عبر التربة والأرض.

• تقنية تحديد كثافة التربة

المبدأ الأساسي لهذه الطرائق هو أن امتصاص حزمة معينة من أشعة غاما في مادة معينة يعتمد على الكتلة الكلية بين المصدر والكاشف وفي ظل ظروف معينة، تعتمد كثافة أشعة غاما المرسله فقط على الكثافة الظاهرية لمتوسط الامتصاص.

نظراً لأنه يمكن استخدام طريقة الامتصاص لتحديد كتلة المادة على طول المسار الذي تجتازه أشعة غاما، فإن هذا يعني أن الطريقة بهذا المعنى تعادل الوزن كوسيلة لتحديد الكتلة.

علاوة على ذلك، يمكن 'وزن' المواد الأرضية أو الصخرية بمساعدة أشعة غاما في ظل الظروف الطبيعية، أي في الموقع الطبيعي نفسه. يمكن استكشاف طبقات الأرض بسُمك 40-50 سم بهذه الطريقة ومن ثم يمكن تحديد الكثافة المتوسطة للطبقة بكاملها.





ومن ثم، على عكس طريقة أخذ العينات المباشرة، توفر طريقة امتصاص أشعة غاما بيانات الكثافة الظاهرية التي تمثل أكثر مواد التربة. مزايا الطريقة هي :

1. يمكن إجراء القياسات مباشرة في الميدان مع إنفاق منخفض للعمالة والوقت.
 2. يمكن قياس كثافة أي أرض بشكل مستقل عن تركيبها الحبيبية والمعدنية والكيميائية وأيضاً بشكل مستقل عن حالتها الإجمالية وخصائصها الهيكلية وملمسها.
 3. يمكن استخدام هذه الطريقة لتحديد كثافة المواد الأرضية والصخرية بأي نوع من الاتساق (الرمال المتحركة، والرمل المشبع بالماء، والطين، وما إلى ذلك).
- من المعروف أن أشعة غاما ذات الطاقة المعتدلة تخضع للتفاعلات الأساسية الآتية مع المادة:

أ. الامتصاص الكلي (التأثير الكهروضوئي).

ب. تشتت كومبتون بوساطة الإلكترونات.

ج. إنتاج أزواج الإلكترون والبوزيترون في المجال الكهربائي للنواة.

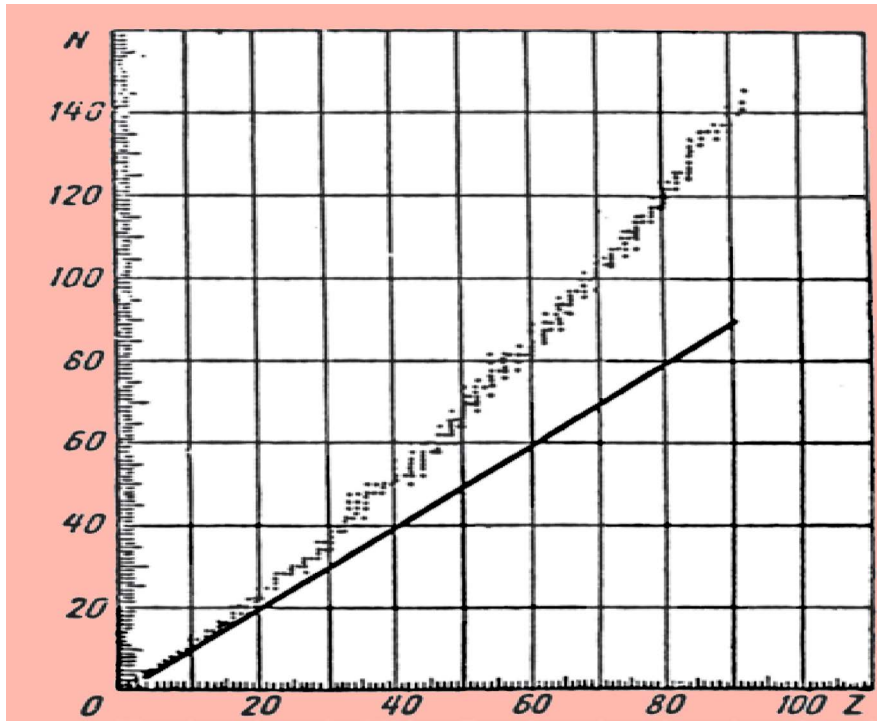
يمكن تقسيم تغير الطاقة المحتمل عندما تتفاعل أشعة غاما مع المادة إلى ثلاثة نطاقات: في كل نطاق، يكون أحد التفاعلات الأساسية الثلاثة المذكورة أعلاه هو الأكثر احتمالاً. في النطاقات المنخفضة، تتفاعل أشعة غاما بشكل أساسي من خلال التأثير الكهروضوئي. يسود تأثير كومبتون في النطاقات





الجيوفيزياء النووية

الوسيلة، وأخيراً، يعتبر إنتاج الزوج هو العملية الرائدة في الطاقات العالية. في نطاق الطاقة الذي يسود فيه تشتت كومبتون، فإن معامل امتصاص الكتلة μ هو دالة متغيرة ببطء شديد للعدد الذري Z . ويترتب على الشكل الموضح الآتي أنه بالنسبة للعناصر الخفيفة وأشعة غاما ذات الطاقة المتوسطة، يكون معامل امتصاص الكتلة μ مستقلاً عن العدد الذري ومن ثم عن التركيب الكيميائي للمادة. هذا هو الأساس المادي لاستخدام امتصاص أشعة غاما بطاقة وسيطة في قياسات كثافة الوسائط متعددة المكونات مثل الصخور ومواد التربة.



الاعتماد على عدد النيوترونات (N) لكل ذرة من العدد الذري Z للنظائر المستقرة: $Z / A = \dots ; 1/2$





بشكل عام فإن الطرائق الأكثر استخداماً في تحديد كثافة التربة هي:

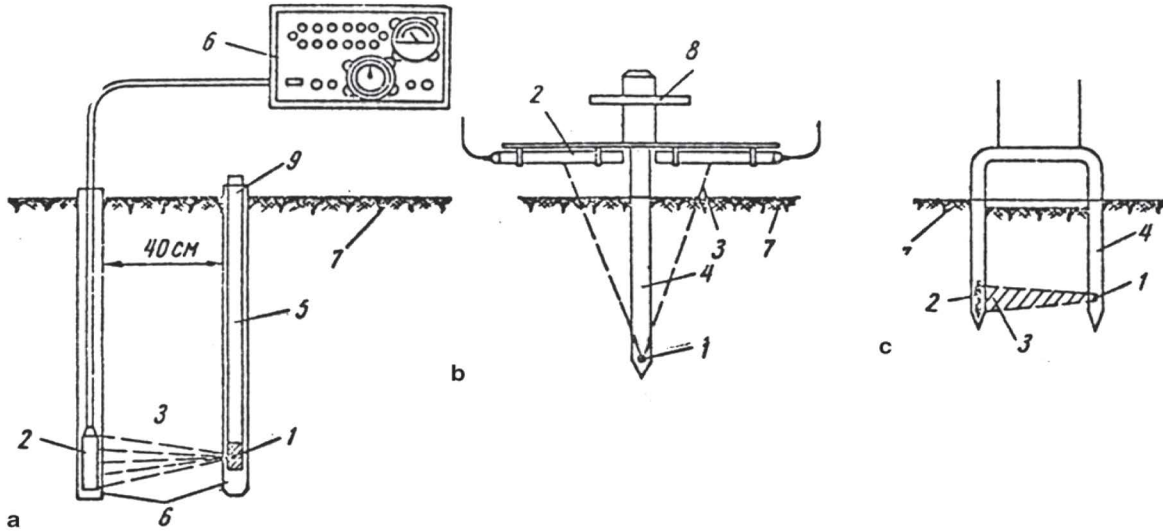
أ. الامتصاص الأفقي لأشعة غاما بين المصدر والكاشف على أعماق مختلفة في الأرض.

ب. الامتصاص الرأسي لأشعة غاما باستخدام حساس يدخل في الأرض مع وضع مصدر أشعة غاما في الطرف السفلي والكاشف في الطرف العلوي.

وفي كلتا الطريقتين، يفضل أن يكون سمك طبقة التربة الأرضية المدروسة **30-50 سم**، حيث تؤدي أطوال المسار الأكبر إلى انخفاض كبير في كثافة الإرسال، أي معدل عد أقل بكثير.

هذا يعني أنه ما لم يزد نشاط المصدر، فإن أخطاء العد الإحصائي تصير أكبر. من ناحية أخرى، فإن الأنشطة ذات المصدر الأعلى غير مرغوب فيها من وجهة نظر خطر الإشعاع. صارت قرارات الكثافة الناتجة عن امتصاص أشعة غاما شائعة منذ عام 1955.





(a) طريقة الإشعاع الأفقي، (b) طريقة الإشعاع العمودي، (c) طريقة الشوكة المشعة: 1 - مصدر أشعة غاما، 2 - كاشف؛ 3 - شعاع أشعة غاما، 4 - شوكة، 5 - حقيبة تحمل مصدر أشعة غاما؛ 6 - مقياس إشعاع. 7 - الأرض. 8 - مقبض؛ 9 - أنابيب.

اشتملت معظم الأعمال المبكرة على تحديد الكثافة الظاهرية على قياسات الامتصاص الأفقي لحزمة أشعة غاما بين أنبوبين متوازيين. كان كاشف أشعة غاما عادة عبارة عن عداد مملوء بالغاز وكان المصدر إما ^{60}Co أو ^{137}Cs . استبدل الأنبوبين المتوازيين بترتيبات على شكل حرف U (الشوكة المشعة) تتكون من عمودين مدببين متوازيين مثبتين على إطار يضغطان في الأرض إلى العمق المطلوب.

كان مصدر أشعة غاما عبارة عن تحضير إما ^{60}Co أو ^{137}Cs يقع في الطرف السفلي المدبب لأحد العمودين ويوضع الكاشف (عداد مملوء بالغاز) في نهاية





العمود الآخر. جرت معايرة معدات العد أولاً في ظل ظروف معملية، باستخدام مواد ذات كثافة معروفة، بحيث جرى الحصول على رسم بياني لمعدل العد كدالة للكثافة، أو جرى تحديد أولي لـ μ_{eff} .

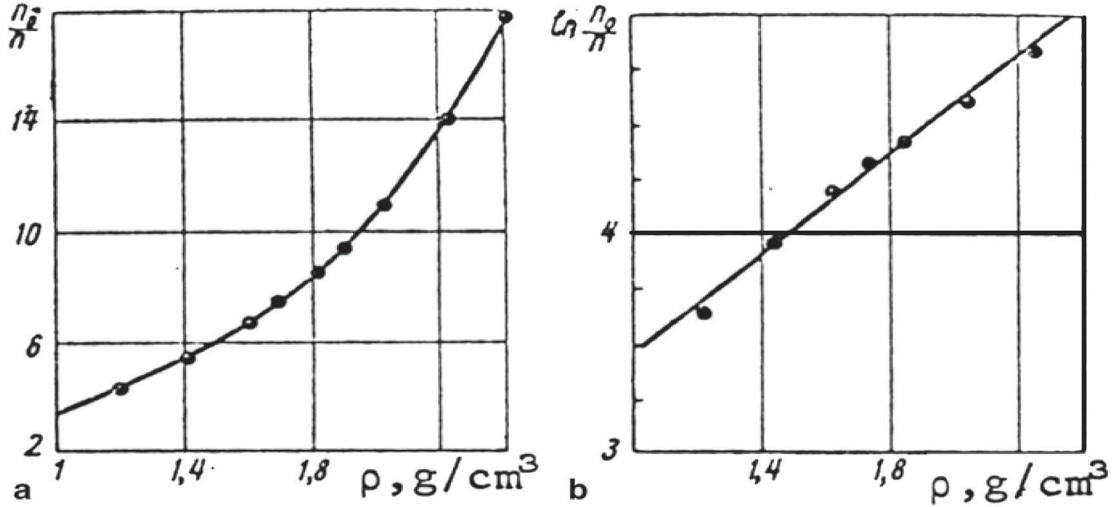
وقد وجد أن الفرق بين كثافة الأرض التي حصل عليها بالطريقة التقليدية القديمة من جهة وطريقة امتصاص أشعة غاما من جهة أخرى لا تزيد أبداً عن 1.5-2.0 %.

يلاحظ أن μ_{eff} التي حصل عليها نتيجة لمعايرة مقاييس الكثافة تزداد عند استخدام الموازنة. وهكذا، للحصول على هذه النتيجة استخدم الباحثون عداد STS-5 في مضروف رصاصي (شاشة) بسماكة جدار 1 سم ونافذة مقطوعة بطول الكاثود.

عندما يصل سمك مادة الأرض الموضوعية في مسار أشعة غاما غير الموازية إلى 30 سم (للكثافات في النطاق 1.5-1.6 غرام / سم³)، يزداد معامل امتصاص الكتلة الفعال بشكل طفيف فقط بعد الزيادة بسمك أكثر. على سبيل المثال، وجد أن المعامل يتغير بمقدار 2.35 فقط عند زيادة سمك طبقة الرمل من 28 إلى 48 سم.

عندما تزيد كتلة جهاز الامتصاص عن 60-70 غرام / سم²، يبقى معامل امتصاص الكتلة ثابتاً عملياً ثم تستخدم أشعة غاما ^{60}Co .

تتمثل إحدى طرائق معايرة مقاييس كثافة أشعة غاما في رسم نسبة الشدة n_0/n كدالة لـ ρ لسمك الامتصاص المحدد. وعند رسمها على مقياس شبه لوغاريتمي، تعطي هذه العلاقة خطأً مستقيماً. تعمل هذه الطريقة على التخلص من الأخطاء الناتجة عن انحلال المصدر والانجراف في جهاز القياس.



النسبة n_0 / n كدالة لكثافة الأرض (a)؛ النسبة n_0 / n كدالة لكثافة الأرض على مقياس شبه لوغاريتمي (b)؛ $h = 30$ ، $\mu = 0.04$ سم.

يجري الحصول على نتائج أقل دقة في ظل الظروف الميدانية عندما يعطى الرسم البياني للمعايرة في الشكل $n = f(\rho)$. تُستخدم طريقة المعايرة هذه بالطبع فقط لمقاييس معدل الأصل.

أظهرت دراسات أن μ_{eff} يختلف بشكل ملحوظ بالقرب من مصدر الأرض عندما يُفحص الأخير بحزمة أشعة غاما الأفقية العريضة أو الموازية جزئياً.

ارتفاع الطبقة الأرضية فوق حزمة أشعة غاما الأفقية التي تتوقف عندها μ_{eff} يصل إلى 1 - 1.5 متوسط المسارات الحرة (عندما $\rho = 1.5$ غرام / سم³ و $14-16$ سم لـ ^{60}Co). عندما يفحص الطبقة العليا من الأرض (15 سم)، يجب أن تكون قيم μ_{eff} هي تلك التي أمكن الحصول عليها لهذه الطبقة المعينة، أو يجب





أن تستخدم أجهزة قياس كثافة أشعة غاما مع أجهزة استشعار تدخل عمودياً في الأرض. تعتبر القياسات الصحيحة لمعدل عدّ أشعة غاما n_0 في الهواء ذات أهمية كبيرة لتحديد الكثافة بدقة. تكون أشعة غاما المنبعثة من مصدر على مقربة من سطح الأرض وتنتشر جزئياً بوساطتها ويجري اعتراض بعض منها بوساطة الكاشف.

ومن ثم، فإن الجهاز لن يحسب فقط الأشعة الأولية وإنما أيضاً بعض أشعة غاما المشتتة على السطح. أظهرت التجارب أنه إذا كان معدل عدّ أشعة غاما على ارتفاع 90 سم فوق السطح هو 100 %، فعند ارتفاع 5 سم يصل إلى 107.8 %.

نظراً لأن معايرة مقاييس كثافة أشعة غاما للمواد الأرضية ذات الكثافة المختلفة ومحتوى الرطوبة عملية شاقة جداً، فقد استخدم بعض العمال قيم μ_{eff} لنطاقات محتوى رطوبة مختلفة، على سبيل المثال، 5-15 % و 15-30 % ووفقاً لبيانات الباحثين، لم يكن الخطأ المرتبط بالكثافة المقيسة لشعاع ^{60}Co من أشعة غاما الموازية جزئياً أكثر من ± 0.03 غرام / سم³.

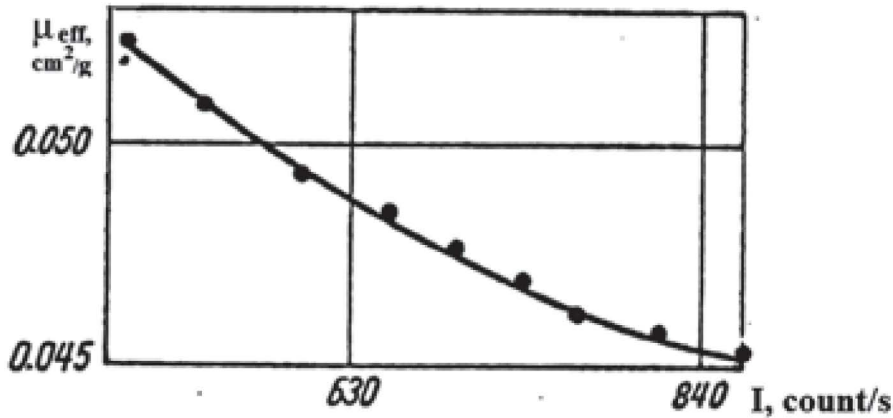
جرى تحقيق زيادة في حساسية ودقة الطريقة في ظل الظروف الميدانية بوساطة الباحث نيستيروف **Nesterov**، الذي كان أول من نجح في استخدام كاشف وميض الكريستال **NaI (TI)**، وهو نظام قياس توفرت فيه تمييز السعة.

كانت الدقة نحو 1% والتناقض مع البيانات التي أمكن الحصول عليها بطريقة حلقة القطع (العينات المباشرة) بلغ 2% في الحالات الفردية. وكانت قيمة μ_{eff} لأشعة غاما ^{60}Co التي حصل عليها في عام 1959 بوساطة نيستيروف قريبة من القيم النظرية وبلغت تقريباً 0.051 سم² / غرام. حيث استخدمت الطريقة المعتادة لتحديد هذا المعامل.



جرى قياس معدل العد أولاً في فجوة الهواء بين الأنبوب ثم تكررت القياسات في الأرض ذات الكثافة المعروفة. من خلال قياس معدلات العد المختلفة في الهواء كدالة لمستوى التمييز ثم تكرار ذلك في الأرض، حصل نيستيروف على سلسلة من قيم μ_{eff} التي استخدمها بعد ذلك في الممارسة.

يوضح الشكل الآتي الاعتماد بين معدل العد في الهواء و μ_{eff} التي حصل عليها نيستيروف. وتجدر الإشارة إلى أن نتيجة نيستيروف $\mu_{\text{eff}} = 0.051$ سم² / غرام تتفق مع القيمة التجريبية.



رسم معامل الامتصاص الفعال كدالة لمعدل العد الذي جرى الحصول عليه باستخدام كاشف NaI (TI).

الطرائق التي تعتمد على استخدام الثقوب المتوازية مقيدة جداً، لأنه غالباً ما يكون من الصعب في ظل الظروف الميدانية التأكد من أن الثقوب متوازية تماماً، خاصة على أعماق تزيد عن متر واحد.

في حالة المواد الأرضية المضغوطة، يصعب إدخال الشوكة المشعة في الأرض ومن ثم يجب عمل فتحات أولية. على سبيل المثال، إذا تغيرت المسافة بين





الأنابيب من 40 إلى 39 سم، فإن معدل العد يتغير بنسبة 5% من أجل الكثافة نفسها.

يتسبب هذا التغيير في تعداد أشعة غاما لـ $\mu_{\text{eff}} = 0.050$ سم² / غرام في حدوث خطأ إضافي في الكثافة يصل إلى 1.6% تقريباً لـ $\rho = 1.5$ غرام / سم³. يزداد هذا الخطأ مع زيادة كثافة الأرض والعكس صحيح.

للحصول على نتائج دقيقة، من الضروري التأكد من أن الثقوب متوازية تماماً وأن الحد الأدنى من الفجوات الممكنة (أقل من 3 مم) موجودة بين جدران الفتحة من جهة والمصدر والكاشف من جهة أخرى.

كما هو مذكور أعلاه، تستخدم المقاييس المشعة في قياسات كثافة الطبقات العليا من الرواسب القابلة للتفتت والصخور المكشوفة. اقترح أحد الباحثين هذه الطرق كوسيلة لفحص ديناميكيات المحتوى الرطوبي في التربة.

استخدمت أنواع المقاييس الموضحة سابقاً في الممارسة الجيولوجية الهندسية وفي صناعة الخث. الميزة الخاصة لهذه الطريقة هي أن مصدر أشعة غاما يدخل إلى الأرض بعمق محدد بدقة وأن المسافة بين المصدر وعدادات أشعة غاما ثابتة.





• تقنيات قياس غاز الرادون في التربة

الرادون هو عضو في عائلة الاضمحلال الطبيعي. إنه غاز مشع تنبعث منه جسيمات α ، إنه غاز نبيل ومن ثم لا يتفاعل كيميائياً مع بيئته. يحوي الرادون على ثلاثة نظائر:

- ❖ ^{222}Rn (Rn)، والذي ينشأ من سلسلة ^{238}U وله عمر نصف يبلغ 3.82 يوم.
- ❖ ^{220}Rn (Tn) أو ثورون، والذي يأتي من سلسلة ^{232}Th وله عمر نصف 55 ثانية.
- ❖ ^{219}Rn أو أكتينيوم (Ac) من اضمحلال ^{235}U ، والذي له نصف عمر 4 ثوانٍ فقط.

يشير اسم الرادون عادةً إلى العنصر Rn، لأن لها أطول عمر نصفي وهو النظير الذي يُرصد تركيزه.

ينتج الرادون (Rn) في الصخور التي تحوي اليورانيوم ومنتجاته في حالة توازن مؤقت من خلال اضمحلال ^{226}Ra . تستخدم قياسات الرادون في التنقيب عن اليورانيوم والنفط.

يقاس الرادون أيضاً في المناجم تحت الأرض أو الكهوف أو المباني، حيث توجد علاقة بين التعرض لغاز الرادون وزيادة خطر الإصابة بسرطان الرئة لدى البشر.

وقد عثر على تركيزات أعلى من الحدود المقبولة في المباني لأن إنتاج الرادون يحدث في المواد المستخدمة في البناء، مثل الغرانيت، أو في الأرض.





يعرض غاز الرادون في بعض الكهوف مستكشفي الكهوف لمستويات عالية جداً من الإشعاع. وجدت دراسة استقصائية استمرت لمدة عام على 40 كهفاً بريطانياً أن متوسط مستوى الإشعاع كان 2900 بيكريل / متر³. على سبيل الاهتمام، في كهف Giant's Hole الذي يقع في المملكة المتحدة، كان متوسط تركيز الرادون (للسنة) 46000 بيكريل / متر³. على النقيض من ذلك، فإن الحد الذي يوصي به المجلس الوطني البريطاني للحماية من الإشعاع بإجراء لإزالة الرادون من المنازل هو 200 بيكريل / متر³.

• دراسات ديناميكيات محتوى الرطوبة في التربة

تبين أعلاه أنه يمكن استخدام طريقة امتصاص أشعة غاما لتحديد كتلة المادة (غرام / سم³) بين المصدر والكاشف. ومن ثم، فإن طريقة أشعة غاما تمكنا من قياس التربة بشكل فعال في الموقع.

من خلال الفحص المنتظم لطبقة أرضية معينة حيث تبقى كتلة الطور الصلب ثابتة، من الممكن التحقق من ديناميكيات محتوى الرطوبة في هذه الطبقة.

هذه الطريقة لها المزايا الآتية غير المشكوك فيها:

1. يمكن استخدامها لفحص ديناميكيات المحتوى الرطوبي في الطبقات غير المضطربة من مواد الأرض دون أخذ عينات مباشرة للتجفيف وبدون بذل الكثير من الجهد.
2. يمثل محتوى الرطوبة الذي يتم الحصول عليه بهذه الطريقة بشكل كبير الوسط ككل، لأنه يأخذ تلقائياً المتوسط الضروري، على عكس طريقة العينة المباشرة التي تنتج محتوى الرطوبة في نقطة معينة.





لقد طُرحت طريقة امتصاص أشعة غاما لقياس محتوى الرطوبة في الأرض لأول مرة ودراستها في الاتحاد السوفياتي السابق. يمكن التعبير عن محتوى الرطوبة بالمليمترات من طبقة الماء أو بوزن النسبة المئوية.

يجب تحديد محتوى الرطوبة الأولي للطبقة الماصة بأقصى قدر ممكن من الدقة عن طريق أخذ عينات من نقاط مختلفة في جميع أنحاء الطبقة التي تجري فيها عمليات مراقبة منتظمة لمحتوى الرطوبة عن طريق امتصاص أشعة غاما.

إن ضرورة التحديد الدقيق لمحتوى الرطوبة الأولي w_0 بواسطة طريقة الوزن الثرموستاتي يمليه التباين المكاني لمحتوى الرطوبة في الأرض.

يمكن الحصول على الكثافة الظاهرية للهيكل الأرضي الذي يحدد فيه محتوى الرطوبة بواسطة طريقة امتصاص غاما كما هو موضح أعلاه.

استخدم مقياس كثافة أشعة غاما **GP-0-50** للتحقيق في ديناميكيات الرطوبة في الطبقة العليا من التربة حتى عمق 50 سم. كل ما هو ضروري هو إدخال أنبوب بقطر **15-16** ملم عمودياً في التربة.

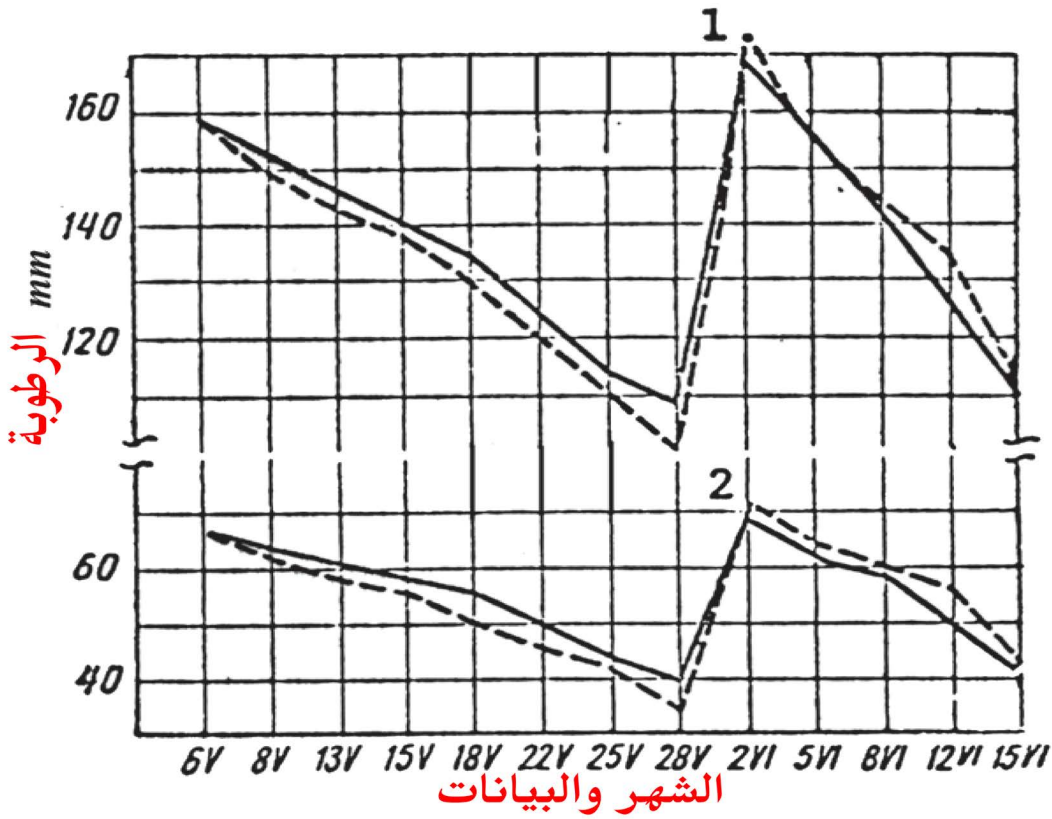
يدخل بعد ذلك مسبار القضيب في الأنبوب إلى أعماق محددة بدقة، على سبيل المثال **0-30** و **0-40** و **0-50** سم. يعتمد عدد هذه الأنابيب في منطقة معينة على المشكلة المحددة ودرجة الموثوقية المطلوبة لمحتوى الرطوبة النهائي.

جرى فحص ديناميكيات الرطوبة في التربة والمواد الأرضية الأخرى من خلال طريقة امتصاص أشعة غاما من قبل العديد من الباحثين. وقد أظهرت أعمالهم أنه يمكن تحديد محتوى الرطوبة لهذه المواد في حدود **1 - 1.5 %**، أي





تقريباً بدقة طريقة الوزن الثرموستاتي نفسها. في حالة منطقة التهوية، يمكن استخدام طريقة امتصاص أشعة غاما ضمن الدقة نفس هاعلى الأقل مثل طريقة الوزن الثرموستاتي.



ديناميات محتوى الرطوبة في التربة التي جرى الحصول عليها عن طريق طرائق امتصاص أشعة غاما (°) والتجفيف الحراري (°). يبين الشكل مقارنة بين قياسات المحتوى الرطوبي بهاتين الطريقتين في منطقة نهر المرقاب (تركمانستان). كما يوضح الشكل الاختلافات في محتوى الرطوبة التي أمكن الحصول عليها من خلال قياسات الوزن الثرموستاتي المتكررة. التناقض بين البيانات الذي حصل عليه من خلال الطريقتين لا يزيد عن 1-2%.



نلاحظ أنه وفقاً للبيانات التجريبية لطبقة التربة من 0 إلى 100 سم، فإن التباين الأقصى هو 11 ملم، وهو أقل من 1% بالوزن من الرطوبة. إذا قارنا انحرافات النسبة المئوية لمحتوى الرطوبة عن القيم المتوسطة، التي أمكن الحصول عليها نتيجة أربعة قياسات متكررة عن طريق امتصاص أشعة غاما وبالتجفيف الحراري، نجد أن طريقة امتصاص أشعة غاما تؤدي إلى اختلافات أصغر.

أمكن الحصول على نتائج مماثلة لمواقع مختلفة. على سبيل المثال، في محطة دوبوفسكايا للبحوث العلمية للهيدروولوجيا (المنطقة الجنوبية، روسيا)، أظهر 158 قياساً متوازياً بالطريقتين أن التناقض بينهما كان أقل من 2% في 84% من جميع الحالات وليس أكثر من 1% بالوزن في 52% من جميع الحالات.

• هجرة مكونات النفايات المشعة عبر التربة والأرض

يحدد نشاط الترحيل لعنصر ما ونظائره من خلال الشكل الفيزيائي والكيميائي للمهاجر، والخصائص الهيدروجيولوجية والمائية والجيوكيميائية للوسط والخصائص الفيزيائية المائية والفيزيائية والكيميائية للتربة والأراضي والصخور الحاوية على المياه.

أهم مؤشر لخصائص وسيط الهجرة هو تركيز العنصر المهاجر. ومن ثم، باستخدام متوسط التركيز بالوزن لبعض العناصر التي توجد نظائرها في النفايات السائلة المشعة، من الممكن تقدير قوتها المهاجرة بين معاملات هجرة المياه.





ومع ذلك، في بعض المناطق، قد يكون نشاط الترحيل للعناصر الفردية أو النظائر مختلفاً تماماً عن البيانات المتوسطة، اعتماداً على الأحماض القلوية وظروف تقليل الأكسدة، ونوع وتركيز العناصر النموذجية، وتركيز وشكل وخصائص الغرويات العضوية وغير العضوية، وهي شكل مكونات دقيقة في ظل ظروف معينة وما إلى ذلك.

جرى تأكيد ذلك من خلال الدراسات الميدانية والمخبرية لحركة نواتج الانشطار، والتي تعطي توزيعاً مختلفاً إلى حد ما لنشاط الترحيل عن ذلك المحدد من متوسط التركيز بوزن العناصر المقابلة (على سبيل المثال: $^{137}\text{Cs} > ^{140}\text{Ba} > ^{155}\text{Ce} > ^{90}\text{Sr} > ^{106}\text{Ru} > ^{131}\text{I}$).

تعد قدرة المعادن الطبيعية والمواد الماصة العضوية على التمييز بين الملوثات المشعة المختلفة عاملاً مهماً جداً يتحكم في معدل هجرة الملوثات في الوسط المحيط. من ناحية الأفكار الحديثة، يمكننا التمييز بين المواد الماصة القطبية وغير القطبية، اعتماداً على الطبيعة والسمات المحددة للتفاعل على الامتصاص.

الامتصاص بوساطة المواد الماصة القطبية هو الاستبدال المتكافئ للأيونات القادرة على التبادل وربطها بقوى كولوم بالتكافؤ الرئيسي للبنية الماصة بوساطة الأيونات في محلول التلامس (التبادل الأيوني). قد يكون التبادل الأيوني مصحوباً ببعض العمليات الشاذة، والتي غالباً ما تعتمد بشكل كبير على حجم وطبيعة الامتصاص وتؤدي أحياناً إلى عدم الرجوع. تشمل هذه العمليات الامتصاص الكيميائي، والامتصاص غير النوعي، والتبادل من النوع الثاني، والتكوين أو الاختزال، والانتقائية المعززة للمادة الماصة لأيون معين، وما إلى ذلك.



أظهرت محاولات التقدير الكمي لدور التبادل الأيوني وما يصاحبه من شذوذ أثناء امتصاص المكونات المشعة بوساطة مواد ماصة طبيعية غير عضوية وعضوية أنه في معظم الحالات يكون الامتصاص الناتج عن التبادل الأيوني أكبر بكثير من الامتصاص الناتج عن العمليات الأخرى.

وهذا يمكننا من اعتبار وسائط التربة الأرضية إلى حد كبير مبادلات أيونية تتحدد خصائصها الامتصاصية من خلال قدرة التبادل الأيوني لمكوناتها العضوية والمعدنية ويمكن تمييزها كميًا بقدرة التبادل لكل وحدة وزن. من الآن فصاعدًا، سنستخدم مصطلح 'قوة الامتصاص' للتربة والأراضي للإشارة إلى المجموعة المدمجة من التبادل الأيوني وخصائص الامتصاص الأخرى.

في الوقت الحاضر، الأدوات النظرية الرئيسية لوصف عملية التبادل الأيوني هي طرائق الديناميكا الحرارية. ومع ذلك، فإن تطبيق هذه الأساليب مقيد بحقيقة أن الكميات المختلفة التي تدخل التحليل لا يمكن عادةً تحديدها تجريبيًا بطريقة مستقلة.





الجيوفيزياء النووية والهيدرولوجيا

تعد المياه الجوفية مصدراً مهماً لإمدادات المياه للاستخدامات المختلفة ويتطلب تزايد الطلب عليها في القطاعات الزراعية والصناعية والمنزلية تقييماً مناسباً لموارد المياه واستراتيجيات إدارتها.

يمكن أن تؤدي الإدارة غير السليمة لموارد المياه الجوفية إلى مشكلات مختلفة مثل ارتفاع تكلفة الضخ، وانخفاض الغلة، وفشل الآبار، وتسرب مياه البحر إلى طبقات المياه الجوفية في المناطق الساحلية، وتصريف المياه الجوفية البحرية الفرعية (SGD) وهبوط الأرض.

من أجل التقييم المناسب لموارد المياه الجوفية وميزانيات المياه الجوفية، نحتاج إلى فحص البارامترات المائية الجيولوجية وخصائص الخزان الجوفي بشكل أكثر دقة.

كانت دراسة المياه الجوفية قضية مهمة خلال العقدين الماضيين بسبب الاستخراج غير المستدام، وتدهور جودة المياه، والتهديدات الناشئة عن تلوث الموارد الصالحة للشرب. أُبلغ عن ذلك في العديد من الدراسات التي أجريت على مستوى العالم. أظهرت الملاحظات القائمة على الأقمار الصناعية أن هناك خسارة صافية كبيرة في تخزين المياه الأرضية (TWS).

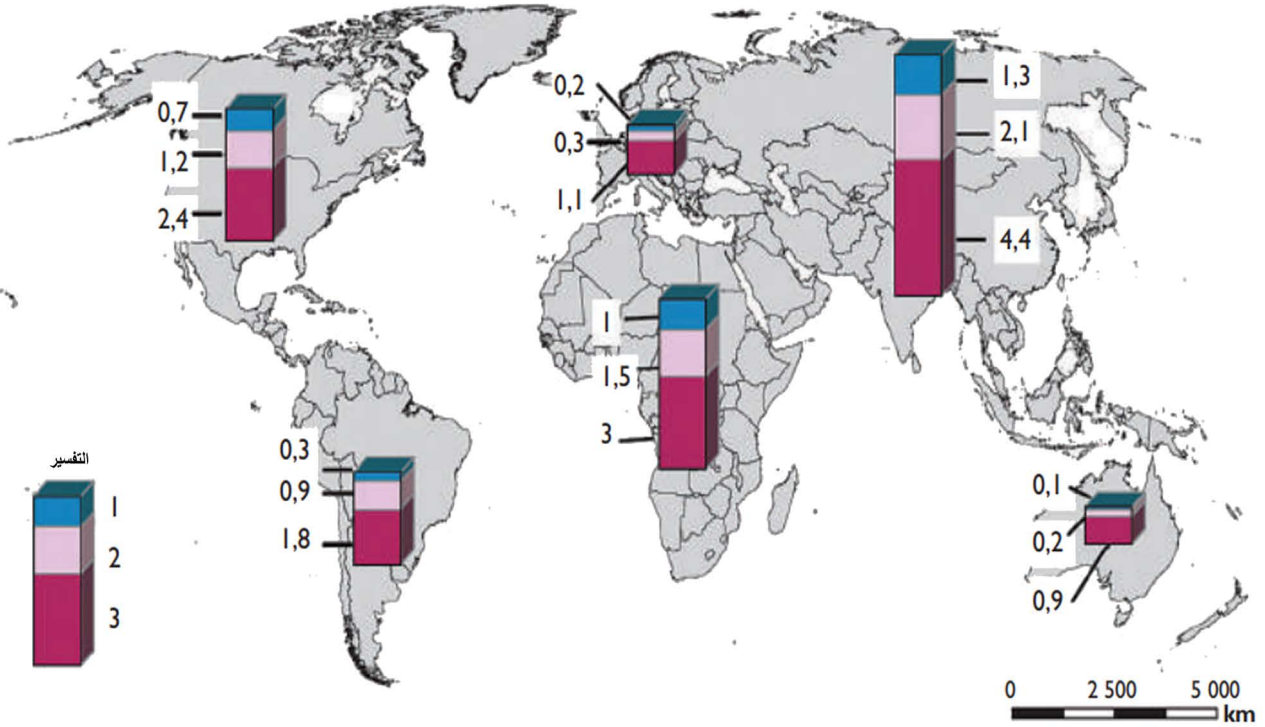
لذلك، فإن وضع خطط فعالة لإدارة المياه لتوصيف وفهم الأسباب يتطلب ملاحظات ميدانية عالية الدقة. سنتعرف فيما يأتي على التقنيات الحديثة القائمة على قياسات التتبع النظرية البيئية لفهم استجابة موارد المياه الجوفية للاستخراج المستدام.





الجيوفيزياء النووية

لقد صارت أدوات التتبع البيئية أداة شائعة لفهم العمليات المنخفضة للمياه الجوفية، وميزانية المياه، والأصول، وعمليات التفاعل الكيميائي، ومصادر التغذية ومناطق طبقات المياه الجوفية العميقة وزمن الإقامة (المياه القديمة والقديمة) بما في ذلك التحقق من صحة أو معايرة نماذج النقل المنخفضة باستخدام المياه الجوفية.



ترتيب كميات المياه الجوفية المخزنة في العالم، حسب القارة (بملايين الكيلومترات المكعبة، أو 10^{15} م³). حيث إن: 1 - منطقة التبادل النشط أو طبقات المياه الجوفية أو المياه الجوفية المحصورة حتى عمق 100 متر - المياه العذبة (الإجمالي العالمي: 3.6). 2 - منطقة التبادل النشط المعتدل، غالبًا ما تكون طبقات المياه الجوفية المحصورة، بين 100 و 200 متر من العمق - مياه عذبة في الغالب (الإجمالي العالمي: 6.2). 3 - منطقة قليلة التبادل النشط، عمق يصل إلى 2000 متر، يغلب عليها الماء المالح (الإجمالي العالمي: 13.6).





• النشاط الإشعاعي الطبيعي للمياه

أهم سلسلتين مشعة في الصخور هما سلسلة اليورانيوم والثوريوم. إن وجود العنصر الغازي في هذه السلسلة، الرادون، معروف منذ فترة طويلة ولكن الاقتدار إلى الأساليب التحليلية المناسبة حال دون البحث عن الأعضاء الأوائل في السلسلة، $U-238$ و $Th-232$. في السنوات الأخيرة، جُمع قدر كبير من المعلومات حول هذه الأمور. هي، بالطبع، الأكثر وفرة من بين جميع العناصر في السلسلة بحيث إن تحليل اليورانيوم والثوريوم يمثل عملياً هذين النوعين النظيريين. ومن ثم فإن النسبة U/Th هي نحو 3.5 كمتوسط لجميع الصخور التي تكون متماثلة تقريباً في الصخور النارية والرسوبية.

في الأرض، ستذوب هذه النظائر ونواتج الاضمحلال بوساطة الماء بدرجات متفاوتة. في الآونة الأخيرة فقط أجريت تحليلات لمياه الأنهار لمثل هذه المواد، ولا سيما اليورانيوم والراديووم.

من وجهة نظر كيميائية، يشكل $U-238$ و $Th-232$ الكتلة الرئيسية للمواد المشعة في الصخور ومن ثم في مياه النهر أيضاً. من وجهة نظر الإشعاع، يجب أن يكون لكل عضو في السلسلة أهمية متساوية إذا جرى تحقيق توازن الإشعاع بدقة.

فيما يتعلق بالسلسلة المختلفة، مع الأخذ في الاعتبار النسبة U/Th وأعمار النصف لـ $U-238$ و $Th-232$ ، يجب أن يكون معدل تحلل كل عضو في السلسلة عند التوازن أكبر بنحو 10 مرات لسلسلة اليورانيوم.

حالياً، تختلف الخصائص الكيميائية للأعضاء المختلفة، بالطبع، بحيث لا يمكن للمرء أن يتوقع أنها تذوب بالمعدل نفسه. يمكن للمرء أن يتوقع أن يذوب



اليورانيوم أسهل من الثوريوم، بسبب قدرته على تكوين أنيون (أيون سالب) **Anion** مستقر في وجود الأكسجين، وهي خاصية تفتقر إليها العناصر الأخرى.

يمكن أيضاً توقع أن الأعضاء الغازية، نظائر الرادون، تهرب بسهولة إلى طور الماء أكثر من أي من الأعضاء الأخرى. لذلك لا يمكن توقع التوازن الإشعاعي في التربة والصخور الملامسة للماء، أو في الماء، أو في خليط الصخور والماء طالما أن الماء يتحرك.

العناصر الأكثر بروزاً في السلسلة المشعة هي: **U-238** و **Th-230** (أيونيوم) و **Ra-226** و **Rn-222** (الرادون) في سلسلة اليورانيوم و **Th-232** و **Rn-220** (الثورون) في سلسلة الثوريوم. الخصائص الكيميائية لنواتج الاضمحلال لغاز الرادون هي من النوع الذي سيمتص بشكل كبير من المواد الصخرية، ولأنها قصيرة العمر، فلا توجد قياسات متاحة عليها.

لدى مناقشة التوازن الجيوكيميائي للأعضاء الأكثر بروزاً فيما يتعلق بمحتوى مياه المحيط من المواد المشعة، أمكن حساب متوسط تركيز **U-238** و **Th-230** و **Th-232** في مياه النهر باستخدام رقم 0.7×10^{-16} غرام / مل لتركيز الراديوم في مياه الأنهار.

من الواضح أن **U-238** و **Th-232** يسيطران مرة أخرى ولكن النسبة بين **U-238** و **Th-232** أعلى بكثير مما هي عليه في الصخور، مما يشير إلى الاختلاف في الطابع الكيميائي بين هذين العنصرين.

يُلاحظ أيضاً أن التركيز الفعلي لـ **Th-230** و **Ra-226** أقل من تركيز التوازن، مما يُظهر مرة أخرى قابلية ذوبان أكبر لليورانيوم مقارنة بالاثنتين الأخرين.





ومع ذلك، فإن الرادون $Rn-222$ ، يتصرف بشكل مختلف لأنه يجري إثراؤه بعدة كميات من حيث الحجم بالنسبة للأعضاء الأخرى كما هو متوقع. وبسبب هذا التخصيب فإن الرادون سيساهم عملياً بمفرده في النشاط الإشعاعي للمياه الجوفية. قد يساهم الثورون في بعضها ولكن بسبب نصف عمره القصير، فإنه سيختفي بسرعة كبيرة من المياه الجوفية التي تدخل مجاري المياه.

نظراً لأن عمر النصف للرادون قصير إلى حد ما، يمكن بسهولة تحديد حالة ثابتة في المياه الجوفية حيث يساوي معدل اضمحلال ذرات الراديوم لكل وحدة حجم من الصخور معدل اضمحلال ذرات الرادون في الحجم نفسه.

إذا عُثر على معظم الرادون في طور الماء، فسوف يعطي مؤشراً على التركيز الحجمي للراديوم في الصخور الملامسة للماء. هذه عملياً هي المعلومات الوحيدة التي يمكن للمرء أن يستمدّها من تحليلات الرادون للمياه الجوفية.

إذا كان تركيز الراديوم في المادة الصخرية الملامسة للماء معروفاً، فيمكن بالطبع حساب المحتوى المائي للمادة الصخرية (على سبيل المثال في الأحجار الرملية المسامية) ولكن إلى أي مدى يمكن القيام بذلك عملياً هو يصعب اتخاذ القرار.

تم ذكره سابقاً أنه يمكن الوصول إلى التوازن الإشعاعي للمادة السائبة إذا تحرك الماء ببطء. أخذ توازن الراديوم-الرادون وقت التخزين في مادة موحدة لمدة أسبوعين من شأنه أن يؤدي إلى التوازن.

ومن ثم، فإن الخروج من هذا التوازن يشير إلى تخزين أقصر أو وقت دوران للمياه. في حالة $Th-230-Ra-226$ ، فإن وقت الدوران لعدة آلاف من السنين من





شأنه أن يعطي التوازن ولكن في الحسابات الفعلية في حالة عدم التوازن، يجب على المرء أيضاً مراعاة معدلات حل هذين النظيرين. لا يمكن تحديد عدم التوازن بين نظيرين في منطقة المياه الجوفية إلا بسبب الاختلافات في معدلات انحلال النظائر.

قد يكون هناك المزيد من الاحتمالات غير المستكشفة باستخدام أعضاء آخرين من سلسلة اليورانيوم للغرض نفسه على سبيل المثال **RaD-RaE** حيث يتمتع **RaD** بعمر نصف يبلغ 25 عاماً و**RaE** لمدة 5 أيام.

كونها عناصر مختلفة كيميائياً، قد تختلف خصائص قابليتها للذوبان، ومن ثم يمكن إنشاء عدم التوازن بشرط أن يكون وقت دوران المياه الجوفية في حدود بضعة عقود. من حيث المبدأ، ينبغي أن يكون من الممكن تحديد تاريخ المياه الجوفية باستخدام أزواج أعضاء مناسبين من سلسلة اليورانيوم.

يمكن أن يهرب الرادون في الأنهار إلى الغلاف الجوي وربما يغادره على الأرجح سريعاً بسبب الظروف المضطربة عموماً في الأنهار. تحدث الإضافات بالطبع من القاع والمياه الجوفية الواردة حتى يمكن الوصول إلى حالة ثابتة. لا يبدو أن مسوحات الرادون في مياه الأنهار قد أجريت.

تحدث إضافات الرادون في البحيرات من خلال الروافد والينابيع المغمورة ومن المواد السفلية في حين تحدث عمليات الطرح عبر السطح ومن خلال منافذ المياه والانحلال. قد يكون من الممكن أن يؤدي توزيع غاز الرادون في بحيرة إلى إعطاء معلومات عن دوران المياه في البحيرة وظواهر الاختلاط، لكن يبدو أن هذا الاحتمال لم يستكشف بعد.





• استخدام أدوات التتبع الجيوفيزيائية النووية في دراسات المياه

يمكن استخدام أدوات الجيوفيزياء النووية في التتبع البيئي والاصطناعي في دراسات المياه السطحية والمياه الجوفية والرواسب، مع الأخذ بعين الاعتبار كلاً من المواد المستقرة والمشعة.

تشمل المتتبعات البيئية تلك التي تسمح باختلافات وفرتها الطبيعية باستدلال الأصول أو الحركة أو تاريخ الترسيب للمياه أو الرواسب وتلك التي يرجع وجودها في البيئة إلى أنشطة الإنسان الماضية.

ومن الأمثلة على النوع السابق النظائر المستقرة للهيدروجين والأكسجين والكبريت والغازات النبيلة والنظائر المشعة للكربون 14 وسلسلة اليورانيوم. يتضمن النوع الأخير من أدوات التتبع البيئية عناصر مشعة من اختبار القنبلة النووية ومركبات الفلوروكربون.

توصف أدوات التتبع الاصطناعية، المصنفة إلى متتبعات إشعاعية وقابلة للتفعيل وكيميائية وجسيمات مع تطبيقاتها في قياس التدفق وقياس وقت الجريان السطحي وديناميكيات البحيرة ودراسات حركة المياه الجوفية.

يشار أيضاً إلى طرائق القياس الحالية والتطورات الأخيرة في تحليل النظائر البيئية المأخوذة من عينات صغيرة.

1. استخدام الرادون

ذكرنا سابقاً أن الرادون هو عنصر مشع طبيعي، عديم اللون والرائحة، وهو غاز حامل كيميائياً (يشكل جزيئات ثابتة مع أيونات عالية الكهربية)، لا





طعم له، وقابل للذوبان في الماء والمذيبات العضوية. إنه منتج وسيط في سلسلة اضمحلال اليورانيوم على النحو الآتي:

يورانيوم 238 (نصف عمر: 4.5 مليار سنة) ← راديوم 226 (نصف عمر: 1600 سنة) ← غاز الرادون 222 لديه الوقت للتسرب إلى الهواء (نصف العمر: 3.8 أيام) ← رصاص 210 (نصف عمر: 22 سنوات) ← رصاص 206 (مستقر).

الرادون الطبيعي هو أداة تتبع ممتازة لتحديد مناطق تصريف المياه الجوفية بكميات كبيرة بسبب طبيعتها المحافظة، وفترة نصف العمر القصيرة، ووفرة عالية في المياه الجوفية مقارنة بالمياه السطحية وسهولة القياس.

إن كمية الرادون ^{222}Rn النشط في المياه الجوفية غالباً ما تكون 2-4 مرات أعلى من تلك الموجودة في مياه البحر؛ ومن ثم، حتى بعد التخفيفات الكبيرة في المياه الساحلية، يمكن اكتشافه بتركيزات منخفضة جداً.

الرادون ^{222}Rn مفيد بشكل خاص في تحديد مواقع ينابيع المياه العذبة المغمورة حيث لم يخصب الراديوم في ظل هذه الظروف. أحد قيود ^{222}Rn هو كونه غازاً خاملاً، فإنه يهرب إلى الغلاف الجوي. من خلال المراقبة المستمرة لـ ^{222}Rn في المياه الساحلية، من الممكن قياس تصريف المياه الجوفية تحت سطح البحر (SGD).

يمكن اكتشاف SGD على أساس أربعة شروط مختلفة اعتماداً على العلاقة بين EC والرادون في الماء.

بشكل عام، تساعد دراسات تصريف المياه الجوفية تحت سطح البحر في التخطيط للاستغلال الأمثل للمياه الجوفية لطبقات المياه الجوفية الساحلية



مع الحفاظ على رابطة مياه البحر جيداً داخل المناطق الساحلية. أيضاً، يمكن استكشاف المواقع المثالية لبناء الحواجز الجوفية لوقف تصريف المياه الجوفية.

2. استخدام الغازات النبيلة

تصنع الغازات النبيلة مجموعة من العناصر الكيميائية ذات الخصائص المتشابهة. في ظل الظروف القياسية، تكون جميعها غازات عديمة الرائحة وعديمة اللون وذات تفاعل كيميائي منخفض جداً.

الغازات النبيلة الستة التي تحدث بشكل طبيعي هي الهيليوم (He) والنيون (Ne) والأرجون (Ar) والكريبتون (Kr) والزينون (Xe) والرادون المشع (Rn).

جرى قياس الغازات النبيلة في مياه البحر والمياه الجوفية ولب الجليد والصخور من أجل معالجة مجموعة متنوعة من المشكلات المهمة في العلوم البيئية مثل تبادل الغازات الجوية والبحرية، والإنتاج البيولوجي البحري، ودرجات حرارة المياه الجوفية، ودرجة حرارة وسمك الحديد، وأعمار التعرض السطحي، إلخ.

• تحديد كمية المياه المخزنة في الغطاء الجليدي

الغطاء الجليدي وتحديد كمية المياه المخزنة في الغطاء لهما أهمية عملية وعلمية كبيرة، خاصة في دول مثل روسيا وكندا والولايات المتحدة الأمريكية حيث تغطي الثلوج مناطق شاسعة على مدار فترة زمنية طويلة من العام.





تعد البيانات المتعلقة بالغطاء الثلجي وما يعادله من المياه ضرورية لحساب وتقديرات القدرة على تحمل المياه للأنهار وتراكم المياه في الخزانات وأنظمة الري وخزانات رطوبة التربة.

تتعلق هذه المعلومات بظواهر كارثية مثل الفيضانات والانهارات الأرضية. تعتبر ملاحظات حالة الغطاء الثلجي وسمكه في هذه المناطق أمراً ضرورياً للتنبؤ بانزلاقات الجليد التي تؤدي إلى تضرر الطرقات والجسور والمرافق الأخرى.

فيزيائياً، يمكن تحديد المكافئ المائي للغطاء الثلجي عن طريق امتصاص أشعة غاما كما في حالة المواد الأرضية، باستثناء أنه عند استخدام حزمة أشعة غاما العمودية، تعطي النتيجة النهائية مكافئ الماء مباشرة بالسنتيمتر H_2O أو غرام / سم²، لأن كتلة الثلج لـ $\rho_w = 1$ تعادل سماكة طبقة الماء بالسنتيمتر.

تُستخدم أجهزة قياس أوتوماتيكية عن بعد خاصة لتحديد المكافئ المائي للغطاء الثلجي في المناطق الجبلية التي يتعذر الوصول إليها. تقوم هذه الأجهزة بنقل البيانات بوساطة **UNF** لأجهزة الراديو ذات الموجة القصيرة. وهي تتضمن مسدد أشعة، ومصدر أشعة غاما، والكاشف (واحد أو عدد من عدادات جيجر)، ومقياس معدل أو وحدة قياس، وآلية تشفير، وجهاز برمجة (عادة ساعة) وجهاز إرسال لاسلكي مع الإمدادات المناسبة.

تستخدم أجهزة القياس عن بعد لتحديد المكافئ المائي للغطاء الثلجي في العديد من البلدان. للحصول على بيانات أكثر دقة حول متوسط المكافئ المائي للثلج، في اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفياتية السابقة مثلاً، كانت تستخدم عدد من مصفوفات العداد **STS-6**.





تثبت في عدادات معدنية وتوضع على ارتفاع 4 أمتار فوق المسدّد التي تحوي مصادر ^{60}Co . تبلغ المسافة بين أجهزة ترميز القياس وكاشف أشعة غاما (عدادات STS-6) نحو 30 متراً في الاتجاه الشعاعي، بحيث يغطي النظام مساحة تبلغ نحو 3000 متر مربع.

خلال فترة الإرسال اللاسلكي للبيانات الخاصة بالمكافئ المائي للغطاء الثلجي، توصل العدادات على التوالي لمدة دقيقتين في المرة الواحدة بوحدة القياس بواسطة جهاز البرمجة وبعد كل دورة عد نبض (من كل كاشف يتكون من ثلاثة عدادات STS-6) ترسل البيانات إلى جهاز الاستقبال وفق رمز تلغراف. وهنا يستخدم جهاز إرسال ذو موجة قصيرة باستطاعة 15 واط لقياسات المكافئ المائي للغطاء الثلجي الذي أمكن الحصول عليه من ثلاث مجموعات من العدادات مثبتة في ثلاث نقاط مختلفة ومتصلة بجهاز ترميز واحد.

تجرى قياسات التحكم في المكافئ المائي للغطاء الثلجي بالقرب من مصدر الإشعاع أثناء تشغيل الجهاز.

جرى تحديد معدل العد الأولي n_0 لكل كاشف (ثلاثة عدادات STS-6) قبل تساقط الثلوج وحدد معامل μ_{eff} للمياه في التجارب الأولية. عثر على قيم هذا المعامل لتكون ثابتة عملياً لطبقات المياه حتى 400 ملم والمسدّدات المعطاة.

أدرج جهاز القياس 15 وحدة إطلاق على أساس TKh-48 ثيراترون بسعة إجمالية تبلغ 32768 نبضة. في الممارسة العملية، كان لعدد أشعة غاما (n_0) نحو 29000 نبضة لكل دورة.

لم تتعد مقارنة النتائج التي أمكن الحصول عليها بواسطة مقياس الثلج





الأوتوماتيكي بأشعة غاما ومقياس وزن الثلج النسبة 5%-7%. لم يكن التناقض بين نتائج أشعة غاما والقياسات المباشرة للهطول أكثر من 2%-3%. هذه التناقضات مقبولة تماماً إذا تذكرنا أن الثلج لا يترسب بشكل موحد بسبب الانجراف والعواصف الثلجية.

بالنسبة للقياسات الميدانية للمكافئ المائي للثلج، طور الباحثون مقياساً للثلج يتكون من عمود من الدورالومين وهو متدرج بشكل مناسب مع مصدر غاما (^{60}Co) عند الطرف السفلي المدبب وعداد أشعة غاما مغلق في مظروف معدني في الأعلى.

حتى بالنسبة للغطاء الثلجي غير المنتظم بدرجة عالية في المناطق الجبلية من هذه المنطقة، فقد وجد أن متوسط النتائج التي أمكن الحصول عليها بالطريقتين متقارب تماماً.

يمكن تحديد كثافة الثلج على أعماق مختلفة عن طريق القياس مع تحديد كثافة المواد الأرضية في الموقع باستخدام حزمة أشعة غاما الأفقية. يتراوح سمك طبقة الثلج الماصة التي يمكن فحصها بشعاع عريض من 100 إلى 200 سم.

من الأفضل استخدام عدادات الوميض مع تمييز ارتفاع النبضة في مقياس الجليد بأشعة غاما المحمولة، بحيث يمكن استخدام μ_{eff} ثابت قريب من القيمة المحسوبة (النظرية). يمكن زيادة فعالية المسوحات الثلجية بعامل قدره 25-30 باستخدام مقياس الثلج بأشعة غاما المحمولة عندما يزيد عمق الغطاء الثلجي عن 120 سم.





يمكن استخدام طريقة امتصاص أشعة غاما في نقاط تمثيلية للتحقيق في انخفاض احتياطي المياه للغطاء الثلجي أثناء ذوبان الجليد في الربيع، ومن ثم التحقق من ديناميكياته.

• دراسات عمليات تبخر الماء

تعتبر دراسات التوازن المائي في التربة ذات أهمية فيما يتعلق بالعمليات المسؤولة عن تكوين المياه الجوفية ودينامياتها. أحد العناصر التي تؤثر على توازن الماء في الأرض هو التبخر من السطح.

يمكن التحقيق في هذا النوع من المشكلات عن طريق امتصاص أشعة غاما دون ترجيح العينات. أجريت تجارب ميدانية من هذا النوع بين عامي 1958-1957 بواسطة الباحث دانييلين Danilin في مختبرات Valdayskaya & Dubovskaya للأبحاث العلمية الهيدرولوجية وأيضاً في «Gigant State Farm» بالقرب من روستوف في روسيا.

كانت الطريقة المستخدمة مماثلة تماماً لتلك المستخدمة في دراسات المحتوى الرطوبي، مع حزم أشعة غاما الرأسية، الموازية جزئياً. حيث وضع LED مواز بقطر 8 سم وفتحة 8 مم تحت مبخر من النوع GGI-500-59. كان مصدر أشعة غاما Co^{60} مع نشاط 6-7 mCi.

وضع عداد STS-6 يعمل جنباً إلى جنب مع قشارة M-30M فوق المبخر الذي يحوي عينة التربة وعلى مسافة محددة بدقة من ذلك. كان عدد النبضات المحسوبة في كل دورة قياس نحو 49000. وقد أمكن تحديد معامل امتصاص الكتلة الفعال للماء μ_w بشكل تجريبي ووجد أنه 0.036 سم² / غرام.



عثر على متوسط الكميات الإجمالية للماء المتبخر بين 9 يوليو و21 أغسطس 1959 التي أمكن الحصول عليها بطريقة امتصاص أشعة غاما وبوزن المبخر (كان التباين 1.2 ملم).

• طريقة التنشيط المستحث لتحليل الصخور والمياه الجوفية

لقد أدت التطورات الأخيرة في **الجيوفيزياء النووية** إلى طريقة جديدة بشكل أساسي، وهي طريقة النشاط المستحث أو تحليل التنشيط. يحوي تحليل التنشيط على حساسية عالية جداً، والتي تتجاوز -بالنسبة لعناصر معينة- حساسية جميع الطرائق القديمة. يمكن استخدامها غالباً لتحليل العينات متعددة المكونات ولتحديد محتويات عدة عناصر في العينة في وقت واحد. يعتمد مبدأ الطريقة على قصف المواد التي جرى تحليلها بجزيئات نووية. هذه العملية مصحوبة بتفاعلات نووية تؤدي إلى تكوين نظائر مشعة. يستخدم تحليل التنشيط لتحديد مقدار مجموعة واسعة جداً من العناصر.

1. مبادئ ونطاق التطبيق

من المعروف جيداً أنه لا يمكن تحقيق التصنيف الأكثر صرامة للقسم الجيولوجي إلا من خلال مراعاة التركيب الكيميائي والمعدني للصخور، المستخلص من البيانات التي أمكن الحصول عليها عن طريق التحليل الكيميائي والمعدني للنوى أو العينات. في حالة الصخور الرسوبية، من المهم الحصول على بيانات عن الوفرة النسبية للعناصر الرئيسية المكونة للصخور مثل: O و Si و Al و Fe و Ca و K و Mg و C و Na و Mn.





القياس الأكثر اكتمالاً ودقةً لمحتوى جزيئات الطين في الصخور الرملية الحجرية هو نسبة تركيز Al_2O_3 إلى تركيز SiO_2 . يشار إلى هذه النسبة عادةً بمعامل سيليكات الألومنيوم.

على سبيل المثال، يكون الانتقال من الرمال المغسولة النقية إلى الطين مصحوباً بزيادة في تركيز Al_2O_3 من بضعة أعشار من النسبة المئوية إلى 20-40% وبتقليل متزامن في كمية SiO_2 من نحو 100% إلى 50-60%. يكون التغيير المقابل لمعامل سيليكات الألومنيوم من 0 إلى 1 وفي بعض الحالات (على سبيل المثال، في البوكسيت)، قد تكون القيم أعلى.

أمكن حتى الوقت الحالي فحص التركيب الأولي للصخور الرسوبية بالطرائق الكيميائية والطيفية. كقاعدة عامة، هذه التحليلات شاقة وتتضمن العديد من العمليات وهي صعبة جداً ومكلفة.

أدت التطورات الأخيرة في **الجيوفيزياء النووية** إلى طريقة جديدة بشكل أساسي، وهي طريقة النشاط المستحث أو تحليل التنشيط. تستخدم هذه التقنية بشكل متزايد في التحليل العملي للخصائص الجيولوجية والجيوكيميائية، وكذلك في تحقيقات **الجيوفيزياء النووية**.

يمكن تلخيص مبدأ الطريقة على النحو الآتي: عندما تقصف مادة معينة بجسيمات نووية، ينتج عن مجموعة متنوعة من التفاعلات النووية المصاحبة تكوين نظائر مشعة. تتحلل النظائر بنصف عمر مميز، وينبعث إشعاع γ و β من طاقة محددة ويمكن استخدام هذا الإشعاع لتحديد نواتج التفاعل الإشعاعي من كمية النشاط المستحث، يمكن للمرء بعد ذلك استنتاج كمية المادة الأم المشاركة في التفاعلات النووية، لذلك فإن تحليل التنشيط له مزايا عديدة.



خلال وقت قصير، احتلت هذه الطريقة مكانة رائدة، وفي كثير من الحالات، حلت محل الأساليب الأخرى.

يمكن استخدام تحليل التنشيط لتحديد مقدار مجموعة واسعة جداً من العناصر. على سبيل المثال، تحدد معظم العناصر في الجدول الدوري عن طريق تحليل التنشيط في تدفقات النيوترونات البطيئة (في المفاعلات).

لتحليل التنشيط حساسية عالية جداً، والتي بالنسبة لعناصر معينة تتجاوز حساسية جميع الطرائق القديمة. يمكن استخدامها غالباً لتحليل العينات متعددة المكونات ولتحديد محتويات عدة عناصر في العينة في وقت واحد.

يمكن إجراء التحليل غالباً دون إتلاف العينة ويمكن تكراره عدة مرات. يمكن الاحتفاظ بالعينة التي جرى تحليلها لإجراء دراسات لاحقة مختلفة. يمكن تحليلها بأنواع مختلفة من أجهزة العد وفي مختبرات مختلفة، بحيث يمكن بسهولة إنشاء استتساخ النتائج في ظل ظروف مختلفة.

علاوة على ذلك، يمكن استخدام تحليل التنشيط لتحديد محتويات بعض العناصر في الموقع في ظل الظروف الطبيعية للوسط الذي جرى فحصه. هذه الميزة الأخيرة مهمة بشكل خاص في الجيولوجيا.

يستخدم تحليل التنشيط النيوتروني بالفعل على نطاق واسع في **الجيوفيزياء النووية** لتحديد الألمنيوم والسيليكون أثناء التنقيب عن رواسب البوكسيت وتقييمها. كما أنها تستخدم لتحديد النحاس أثناء التنقيب عن الخامات الصناعية وكذلك بعض الحالات الأخرى.

تحليل التنشيط النيوتروني هو الأسلوب الأكثر استخداماً في الوقت الحاضر.

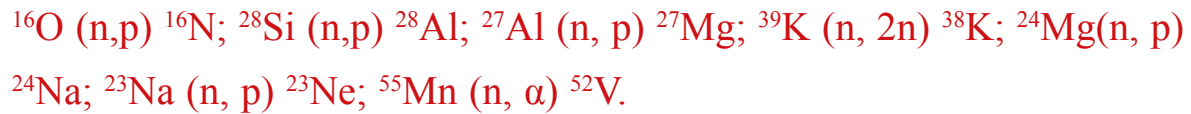




وذلك لأن النيوترونات غير مشحونة ويمكنها اختراق نوى العناصر المختلفة بسهولة. ومن ثم، فإن احتمال التنشيط بواسطة النيوترونات، والذي يمثله المقطع العرضي للتفاعل النووي المقابل، أعلى من احتمال الجسيمات الأخرى. ينطبق هذا بشكل خاص على النيوترونات الحرارية، التي أمكن تحقيق أعلى حساسية لها في تحليل التنشيط.

2. تفاعلات التنشيط في مبادئ تشكيل الصخور والمياه

تحليل التنشيط السريع في ظل الظروف المخبرية وفي حالات تسجيل الآبار، باستخدام تدفقات النيوترونات الموجودة والمتاحة حالياً من 10^{10} - 10^8 نيوترون / ثانية، عادةً ما تستخدم فقط بعض تفاعلات التنشيط السريع للنيوترونات الممكنة، وهي:



ونظراً للوفرة المنخفضة نسبياً لعناصر مثل **K** و **Mg** و **Na** و **Mn** في الصخور الرسوبية، يمكن استخدام التفاعلات بنجاح إذا كان هناك مصدر نيوتروني سريع مع ناتج لا يقل عن 10^{10} نيوترون / ثانية.





• مصادر التلوث الإشعاعي للمياه

تتطلب التكنولوجيا الصناعية في كثير من الأحيان استخدام كميات كبيرة جداً من المياه. وقد تكون التغييرات المصاحبة في الحموضة والملح والتركيبة البكتيري واللون ودرجة الحرارة وما إلى ذلك كبيرة جداً بحيث لا يمكن استخدام الماء مرة أخرى في دورة التصنيع وإذا كان التجديد باهظ التكلفة أو لا يمكن تنفيذه على الإطلاق، فإن الماء عادة ما يجري تصريفه في الخزانات أو المنافذ الطبيعية أو الاصطناعية (البحار، البحيرات، الأنهار البرك، القنوات، إلخ) أو في التكوينات الجيولوجية السطحية أو الغاطسة.

التكوينات السطحية التي يمكن استخدامها لهذا الغرض هي إما أحواض طبيعية أو اصطناعية (المنخفضات المغلقة، وحقول الترشيح، والخنادق، والمصارف الضحلة).

التكوينات الجيولوجية العميقة التي يمكن استخدامها هي طبقات الزيت الحاملة للماء أو المهجورة، والهياكل الكارستية، ومناطق التشقق، والقشرة الأرضية أو الأقبية البلورية المتجمدة وما إلى ذلك. ومع ذلك، في الحالة الأخيرة، تكون الترتيبات الخاصة ضرورية (آبار الحقن، والمصارف العميقة الامتصاص، وما إلى ذلك).

في كثير من الأحيان، تحوي المخلفات الصناعية السائلة على مكونات غير مرغوب فيها بتركيزات، حتى بعد القيام بتنقية أولية لها، تتجاوز بكثير المستويات المسموح بها.





هذا يعني أنه يجب تخزين المياه حتى يمكن إخضاعها للمعالجة اللازمة. عندما يكون حجم هذه المياه كبيراً جداً، فإن الطريقة الوحيدة لتخزينها هي تصريفها في تكوينات جيولوجية.

عند اختيار طريقة التخزين الفعال والأمن للنفايات الصناعية السائلة، من الضروري:

- ❖ أولاً تحديد السعة القصوى لتكوين مكونات التلوث.
- ❖ وثانياً التنبؤ بالتغيرات المحتملة في الهيدروديناميكية، والخصائص الهيدروكيميائية والفيزيوكيميائية للتكوين بسبب وجود السائل وتقدير تأثير هذه التغيرات على سلوك الملوثات في الوسط.
- ❖ وثالثاً من الضروري تطوير تقنية تخزين تضمن استخدام خصائص الامتصاص للتكوين بأقصى قدر من الكفاءة. تحتل النفايات السائلة التي تحوي ملوثات مشعة، والتي تكون سُميتها أعلى بكثير من الملوثات العادية، مكانة خاصة بين النفايات السائلة الصناعية.

من أهم خصائص المياه التي يمكن تصريفها من قبل الصناعة والملوثة بالنظائر المشعة النشاط المحدد. تعتمد طريقة التخلص وكذلك ضرورة وطريقة المعالجة الأولية على النشاط المحدد والتركيب النظائري للتلوث الإشعاعي.

من الملائم تقسيم النفايات السائلة إلى ثلاث مجموعات وفقاً لنشاطها المحدد:

1. النفايات السائلة منخفضة النشاط التي يكون فيها أقل من 10^{-3} كوري/ لتر.



2. نفايات سائلة متوسطة النشاط تتراوح ما بين 10^{-3} و 1.0 كوري / لتر.

3. نفايات سائلة عالية النشاط تتراوح ما بين 1 و 100 كوري / لتر.

كقاعدة عامة، يجب تخزين النفايات السائلة عالية النشاط في خزانات معزولة خصيصاً عن الوسط المحيط. من المستحسن إجراء معالجة أولية لتقليل الحجم، على سبيل المثال عن طريق التبخر.

في كثير من الأحيان يمكن تحويل الملوثات المشعة إلى مرحلة صلبة من السائل المركز ثم يجري تثبيتها عن طريق التزجيج مثلاً وغير ذلك من الطرائق. ثم يمكن إزالتها مع مواد النفايات الصلبة الأخرى.

نظراً لأن حجم النفايات السائلة ذات النشاط المتوسط أعلى (في المتوسط بمعامل قدره خمسة)، كما أن المعالجة الأولية المقابلة المصممة لتقليل الحجم والتخزين تصير غير مجدية من الناحية العملية.

ومن ثم، فإن النفايات السائلة ذات النشاط المتوسط التي تحوي مكونات قصيرة العمر ومتوسطة العمر يمكن تخفيفها ببساطة بالماء النقي، أو يمكن الاحتفاظ بها لفترة زمنية كافية حتى ينخفض النشاط المحدد إلى مستوى يمكن تصريف النفايات السائلة فيه إلى الوسط الخارجي.

ومع ذلك، إذا كانت النفايات السائلة تحوي نظائر طويلة العمر وشديدة السمية، فيجب إجراء المعالجة الأولية (مثل الترسيب، والترسيب المشترك، والامتصاص، إلخ)، بحيث يمكن إزالة النظائر الأكثر خطورة من الناحية البيولوجية جزئياً أو كلياً.





يمكن تصريف النفايات السائلة منخفضة النشاط في وسط خارجي، نظراً لأن حجمها أعلى بمعامل قدره 10-100 من حجم النفايات السائلة عالية النشاط.

لا يعاد معالجة النفايات السائلة منخفضة النشاط، لأنها تحوي نظائر قليلة السمية أو لا تحوي نظائر عالية السمية. إذا لم يكن الأمر كذلك، فيجب أن تخضع لمعالجة أولية مثل النفايات السائلة ذات النشاط المتوسط.

في أغلب الأحيان، يكون نشاط هذه النفايات السائلة ناتجاً عن نظائر قصيرة العمر، ومن ثم، يجب تخزينها لفترة زمنية كافية حتى يتحلل النشاط قبل التصريف.

عندما يتجاوز النشاط المحدد للنفايات السائلة بما لا يزيد عن عامل قدره 100 (الحد المسموح به للمياه في الخزانات المفتوحة في حالة أنصاف العمر حتى 60 يوماً) وبمعامل قدره 10 في حالة النصف، تعيش أكثر من 60 يوماً، يمكن تصريف النفايات السائلة في نظام الصرف الصحي العادي شريطة أن تخفف عشرة أضعاف بوساطة النفايات السائلة غير النشطة في المجمع أو في المؤسسة المعينة.

عندما يجري إدخال النفايات السائلة مباشرة في الماء، يجب ألا يتجاوز تركيز النظائر المشعة الحدود المسموح بها وفق أحدث المعايير العالمية.



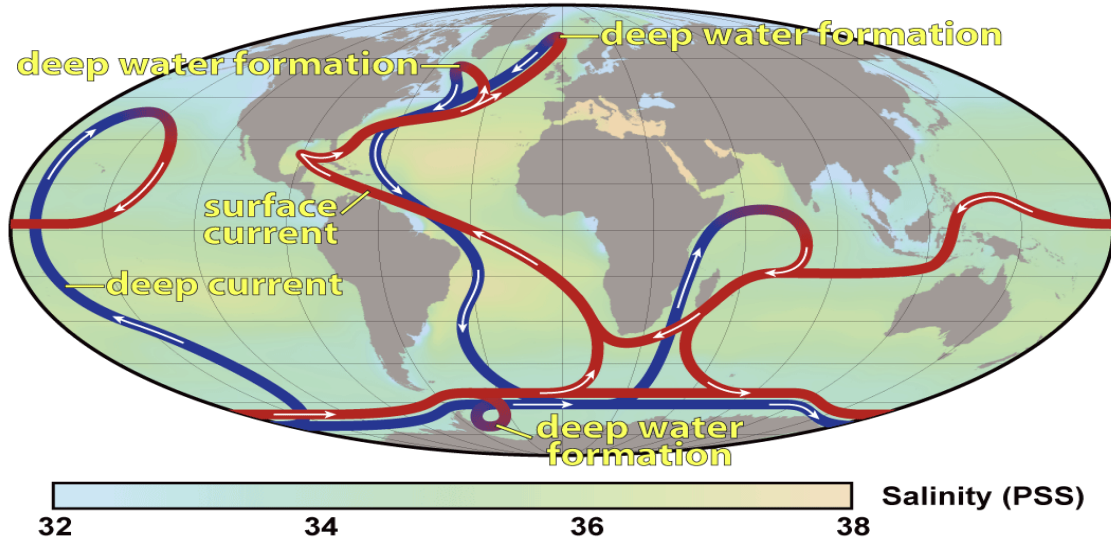


الجيوفيزياء النووية في علم المحيطات

لا تزال الكثير من الثروات الكامنة في البحار والمحيطات في طور الاستكشاف، ويتوقع أن تسهم **الجيوفيزياء النووية** بدور كبير في الكشف عن هذه الثروات.

وقد ازدادت أهمية العناصر المشعة في علم المحيطات بشكل مطرد خلال العشرين سنة الماضية نتيجة لتطور الكيمياء الإشعاعية والتحسينات في تقنيات الكشف.

في أواخر الثلاثينات لم يدرس سوى عدد قليل من العناصر المشعة الطبيعية. بينما حالياً، أمكن قياس الأطياف الكاملة للعناصر المشعة الموجودة في الطبيعة تقريباً في المحيط واستخدم العديد منها لدراسة مشكلات علم البحار (الأوقيانوغرافية **Oceanographic**).



علم المحيطات هو الدراسة العلمية للمحيطات. في الشكل تظهر الدورة الملحية الحرارية في المحيطات وهي جزء من دوران المحيط على نطاق واسع مدفوعاً بتدرجات الكثافة العالمية الناتجة عن حرارة السطح وتدفقات المياه العذبة.





يوجد عدة أسباب لهذا التطور السريع. تتناسب العناصر المشعة تماماً مع دراسة عمليات الانتشار في مياه المحيطات والرواسب حيث يمكن اكتشافها بتركيزات دقيقة من خلال تفككها الإشعاعي.

للسبب نفسه، تستخدم لتحديد الكتل المائية، وهي تقنية يمكن من خلالها تتبع مسار الكتل المائية لمسافات طويلة. تسمح تقنيات مماثلة بوصف دوران مياه المحيط وخلطها وتحديد عنصر الوقت المتضمن في انقلاب مياه المحيط.

تؤثر العمليات الجيوكيميائية على أعضاء السلاسل المشعة الطبيعية بدرجات مختلفة. في الواقع، يعد المحيط بالتأكيد أكبر مثال على عدم توازن السلاسل المشعة في الطبيعة، ليس فقط من ناحية الامتداد وإنما أيضاً من ناحية الحجم.

يستخدم اختلال التوازن في هذه السلسلة لدراسة بعض العمليات الجيوكيميائية المعنية. عثر على استخدام مهم للعناصر المشعة في تطبيقها لتحديد عمر المعادن وطبقات الرواسب. الدافع الآخر لدراسة العناصر المشعة يأتي من الاستخدام المتزايد للطاقة النووية وأجهزة التتبع الإشعاعية. منتجات النفايات المشعة جداً؛ يجب التخلص منها وقد اقترح أن الطريقة الاقتصادية للقيام بذلك هي استخدام المحيط. يجب إجراء العديد من الدراسات للوصول إلى حل آمن لتجنب المخاطر الصحية والتلوث المحيطي غير المبرر.





• مصادر النشاط الإشعاعي في مياه المحيطات

إن مصادر النشاط الإشعاعي وحدوثه في المحيطات عديدة ومتنوعة. لتبسيط وصف هذه المصادر واستخداماتها، يمكن استخدام تصنيف جيوكيميائي.

يتكون الغلاف المحيطي من ثلاث روابط: تلك الموجودة مع الغلاف الجوي، والتي تمر بالحوض الذي يخضع لترسب الرواسب، ومع القارات.

من الغلاف الجوي، أنتجت الأشعة الكونية نويدات مشعة تدخل طور المحيط وبعضها لديه نصف عمر كافٍ لدخول مرحلة الرواسب. يحدث بعض التبادل للتيار المعاكس في رابطة الماء في الغلاف الجوي مع تبخر الماء وطرح ثاني أكسيد الكربون. تدخل النظائر المشعة الناتجة عن الانشطارات المحيطية أيضاً من خلال التساقط من الغلاف الجوي.

أكبر قدر من النشاط الإشعاعي، من السلاسل الإشعاعية الطبيعية الثلاثة، يساهم في المحيطات من القارات، وعن طريق تدفق النهر وإمدادات المياه الجوفية والغبار المحمول جواً. تتزايد مواد التتبع المشعة ونواتج الانشطارات التي يساهم بها تمركز الإنسان والتخلص من النفايات من حيث الكمية عاماً بعد عام.

عند السطح البيئي للرواسب السفلية، يحدث تبادل للتيار المعاكس للنظائر المشعة مع ترسيبها من المحلول في المحيط، ومن امتصاص الجسيمات والترسيب اللاحق، ومن محلول الرواسب.

عثر على مساهمات النشاط الإشعاعي من الغلاف الجوي والتي أعيد تدويرها من الرواسب في قاعدة المحيط لتكون مفيدة جداً لتقدير معدلات





الاختلاط وتتبع كتل المياه. استخدم ترسيب العناصر المشعة المرتبطة بالجسيمات في المقام الأول لتقدير معدلات الترسيب وتحديد العمر.

• التركيب النظائري لمياه المحيطات

يوجد في المتوسط 320 جزيء من HDO و 420 جزيء من $H_2^{17}O$ ونحو 2000 جزيء من $H_2^{18}O$ لكل 106 جزيء من $H_2^{16}O$ في المياه الطبيعية على الأرض. نسبة الوفرة النظيرية من الديوتيريوم إلى البروتيوم هي:

$$D / H = 0.000155 \text{ (ذرة \% 0.0150)}$$

ونسبة الأكسجين هي:

$$^{18}O/^{16}O = 0.002 \text{ (ذرة \% 0.2)}$$

الاختلافات في حدود تباين الديوتيريوم أعلى بمقدار واحد أو أكثر من تلك المتعلقة بالأكسجين الثقيل. يمكن تفسير ذلك من خلال الفصل الأكثر فعالية بين D و H في العمليات الطبيعية من أي زوج آخر من النظائر المستقرة بسبب الاختلاف الأكبر في أوزانها الذرية. لهذا السبب، يمكن اعتبار D كواحد من أكثر النظائر إثارة للاهتمام من وجهة نظر جيوكيميائية. منذ نهاية الخمسينات من القرن الماضي، فضل الباحثون الذين يدرسون التركيب النظائري للمياه الطبيعية تحديد نظيري هيدروجين الماء والأكسجين في وقت واحد.

من بين جميع المياه الطبيعية، تبقى المحيطات، وهي خزانات فريدة، أكثر ثباتاً فيما يتعلق بنظائرها وخصائصها الفيزيائية والكيميائية الأخرى. وقد أظهر





العديد من الباحثين أن مياه المحيط على عمق أكثر من 500 متر متجانسة في التركيب النظيري. سمح ذلك للباحث كريغ Craig عام 1961 باقتراحه كميّار للإبلاغ عن تركيزات D و ^{18}O المحتوى في المياه الطبيعية.

يحتوي معيار مياه المحيط (SMOW) على القيم الآتية للنسب النظيرية D و ^{18}O :

$$D / H = (155.76 \pm 0.08) \cdot 10^{-6}$$

$$^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = (2005.20 \pm 0.45) \cdot 10^{-6}$$

تنشأ التقلبات في نسب القيم المطلقة لنظائر الهيدروجين والأكسجين من الصعوبات التي تحدث في الإعداد الدقيق لخلائط النظائر الاصطناعية لمعايرة مطياف الكتلة.

يبلغ التباين في المحتوى النسبي لـ D في طبقة أعماق المحيط نحو 4% و ^{18}O من أجل 0.3%. في طبقة سطح المحيط، الاختلافات الإقليمية، اعتماداً على درجة حرارة الماء، هي 35 درجة مئوية للديوتيريوم ونحو 3 درجات للأكسجين 18.

يتشكل المحتوى المنخفض من الديوتيريوم في طبقة المحيط السطحية في تلك المناطق التي يؤثر فيها ذوبان الجليد على التركيب النظيري. في خطوط العرض المرتفعة، حيث تكون الطبقة السطحية للمحيط متجمدة، يكون عامل التجزئة النظيري في هذه الحالة تقريباً 1.0180 للديوتيريوم وتقريباً 1.0030 للأكسجين 18. وفي المنطقة الاستوائية من المحيط، حيث يحدث تبخر مكثف للمياه، هناك إثراء للطبقة السطحية بالنظائر الثقيلة.

على أساس التحقيقات التي أجراها مجموعة من الباحثين، يمكننا تكوين صورة مفصلة بما فيه الكفاية لتوزيع D و ^{18}O في مياه المحيط. يشير اختيار





العينات، التي أخذت من أكثر النقاط المميزة للأحواض الفردية وفقاً لبيانات علم البحار الشائعة الاستخدام، جنباً إلى جنب مع الدقة العالية للقياس وتوافق البيانات التجريبية مع الاستنتاجات الرئيسية التي توصل إليها مؤلفون مختلفون، أن النتائج التي أمكن الحصول عليها موثوقة.

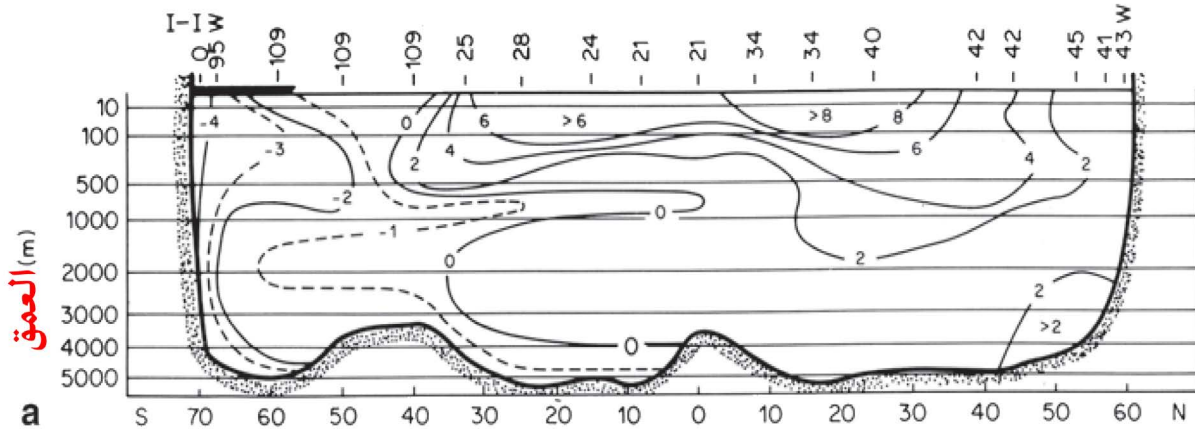
يوضح الشكلان الآتيان توزيع الديوتيريوم في المظهر الجانبي وفي الطبقات السطحية للمحيطين الأطلسي والقطب الشمالي التي رسمها ريدفيلد وفريدمان عام 1964.

عادة ما تتميز ثلاث طبقات وفقاً لظروف توزيع تركيزات النظائر الفردية والصورة المرصودة لمياه المحيطات المختلطة بالعمق:

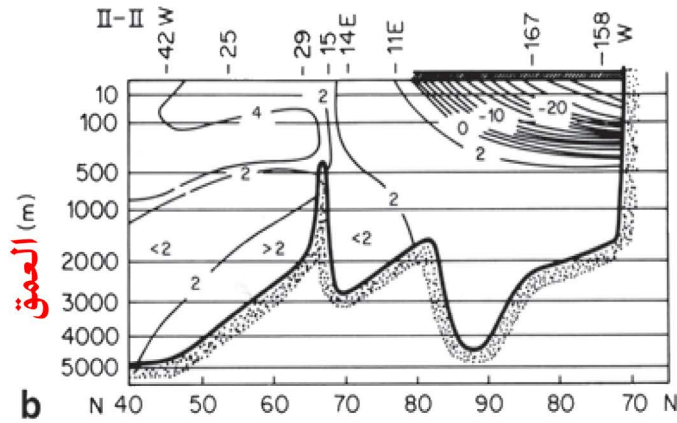
- ❖ تتميز الطبقة السطحية (حتى 500 متر تقريباً) بأكبر نطاقات من الاختلافات المحلية والإقليمية في التركيب النظيري.
 - ❖ تتميز الطبقة العميقة (أقل من 1000 متر تقريباً) بخلط دقيق للمياه وتكوين نظائر موحدة في المحيط بكامله.
 - ❖ تتميز الطبقة الوسيطة أو طبقة الخلط (من 500 إلى 1000 متر تقريباً) ببعض البارامترات الوسيطة.
- في بعض الأحيان، يمكن تمييز طبقة سفلية في قطاع المياه المحيطية، والتي لها خصائص إقليمية مميزة في بعض الأحواض.



الجيوفيزياء النووية



a



b



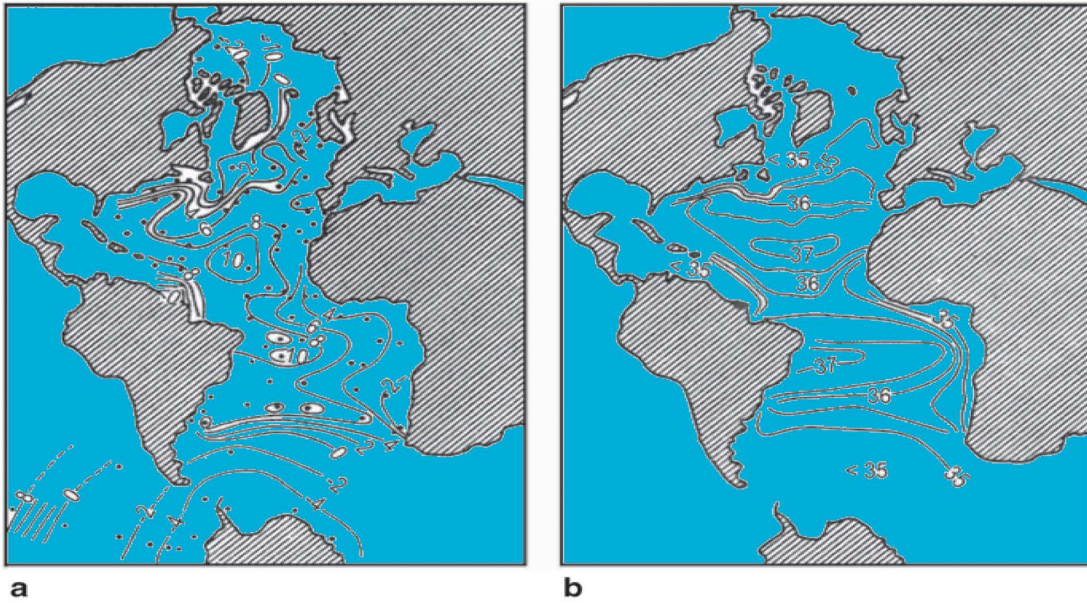
c

توزيع تركيزات الديوتيريوم (δD ‰) في قسم رأسي من المحيط الأطلسي ومياه حوض القطب الشمالي: (a) قسم من القطب الجنوبي عبر المحيط الأطلسي إلى غرينلاند. (b) من شمال المحيط الأطلسي عبر البحر النرويجي والمحيط المتجمد الشمالي إلى ألاسكا. (c) التخطيطي التخطيطي للأقسام.





يمكن اعتبار طبقة المحيط العميقة، بما في ذلك ما يقرب من ثلاثة أرباع كتلتها الإجمالية، ممثلة لجميع الغلاف المائي للأرض. على أساس البيانات التجريبية، أعطى ريدفيلد وفريدمان القيم المتوسطة اللاحقة للديوتيريوم (بالنسبة لمعيار **SMOW**) لكتل المياه العميقة الرئيسية في المحيطات الفردية.



توزيع تركيزات الديوتيريوم (في a) ($\delta D\%$) والملوحة (في b). في المياه السطحية للمحيط الأطلسي.

من تحليل بيانات قيم الأكسجين - 18 لمياه المحيطات العميقة - وفقاً لبيانات الباحثين كريغ وجوردون - أمكن الحصول على المبادئ الآتية للاختلافات بين D و ^{18}O في مياه المحيطات العميقة.

1. مياه المحيطات في نصف الكرة الشمالي أثقل في الديوتيريوم والأكسجين - 18 من تلك الموجودة في نصف الكرة الجنوبي.





2. إن مياه المحيط المتجمد الشمالي موحدة إلى حد كبير في التركيب النظيري وتختلف قليلاً عن مياه البحر النرويجي ولكنها تختلف اختلافاً كبيراً عن مياه شمال الأطلسي العميقة.

3. تختلط مياه المحيط الأطلسي بشكل تفضيلي باتجاه الشمال ولها اختلافات كبيرة حتى في خطوط العرض شبه الاستوائية في نصف الكرة الشمالي.

4. المياه العميقة للمحيطين الهندي والهادئ متجانسة جداً في التركيب النظيري ولكن لها بعض الاختلافات في خطوط العرض الجنوبية المرتفعة. حيث يصير التركيب النظيري للماء أثقل في اتجاه خطوط العرض المنخفضة.

5. تتشابه مياه المحيط الهادئ والمحيط الأطلسي ومياه القطب الجنوبي حول القطب الشمالي تقريباً في التركيب النظيري.

6. في أعماق المحيط الهادئ، يجري إثراء المياه في ^{18}O بنحو 0.2% مقارنة بالجزء الأكبر من المياه العميقة في هذا المحيط.

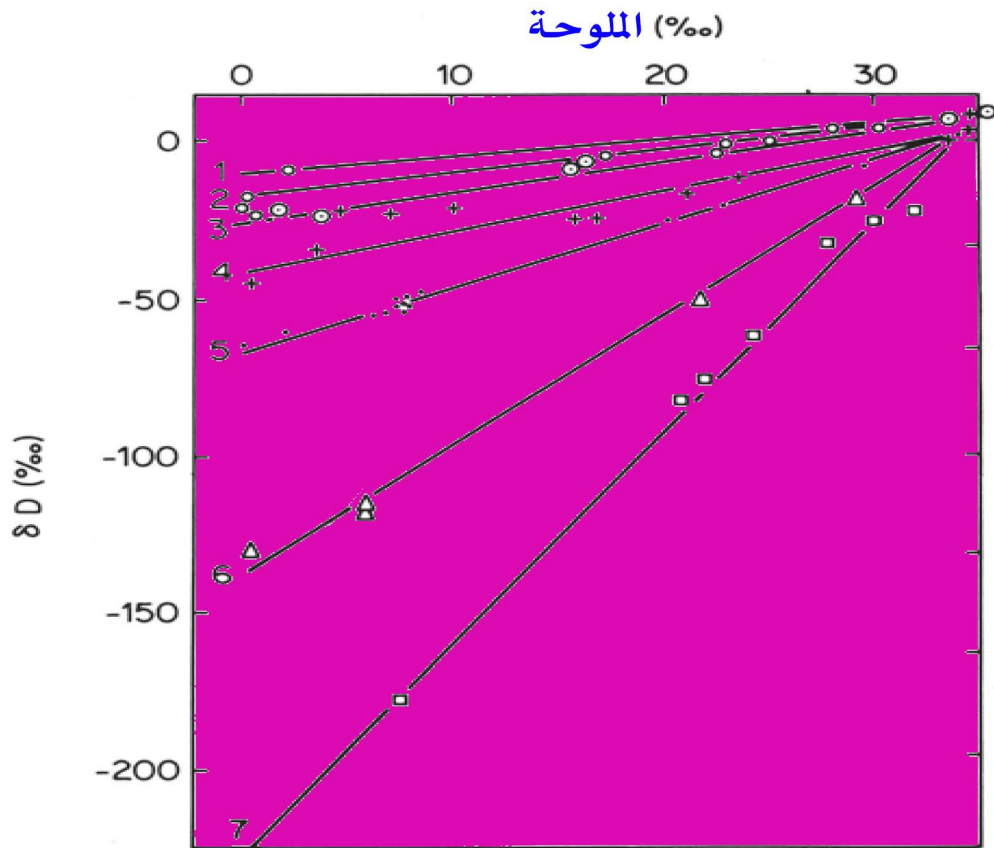
7. بالنسبة لمياه المحيطات العميقة ككل، هناك علاقة بين D و ^{18}O ، وهي قريبة بدرجة كافية من الخطية: $\delta\text{D} = n\delta^{18}\text{O}$ ؛ حيث إن قيمة n تساوي تقريباً 10، مع بعض الانحرافات الإقليمية.

يبدو من المعلومات المتعلقة بتوزيع النظائر الثقيلة أن مياه المحيط تظهر ميلاً طبيعياً نحو التركيب النظيري الثابت. العوامل الرئيسية التي تحكم الاختلافات D و ^{18}O هي تلك العمليات التي تحدث في مياه المحيط السطحية ولها طابع إقليمي.





في المياه السطحية يحدث التخصيب أو النضوب المستمر للماء بالنظائر الثقيلة بسبب تبخر الماء وتبادله مع الغلاف الجوي. يعاد توزيع النظائر في المحيط نتيجة اختلاط المياه السطحية والعميقة على المستويين العالمي والإقليمي.



العلاقة بين محتوى **D** والملوحة لمختلف المياه الساحلية: (1) خليج فنزويلا. (2) ساحل جورجيا؛ (3) ألبمارل، نورث كارولاينا؛ (4) خليج تشيسابيك، فيرجينيا؛ (5) بحر البلطيق؛ (6) لابرادور، هاميلتون إنليت؛ (7) مضائق غرينلاند.





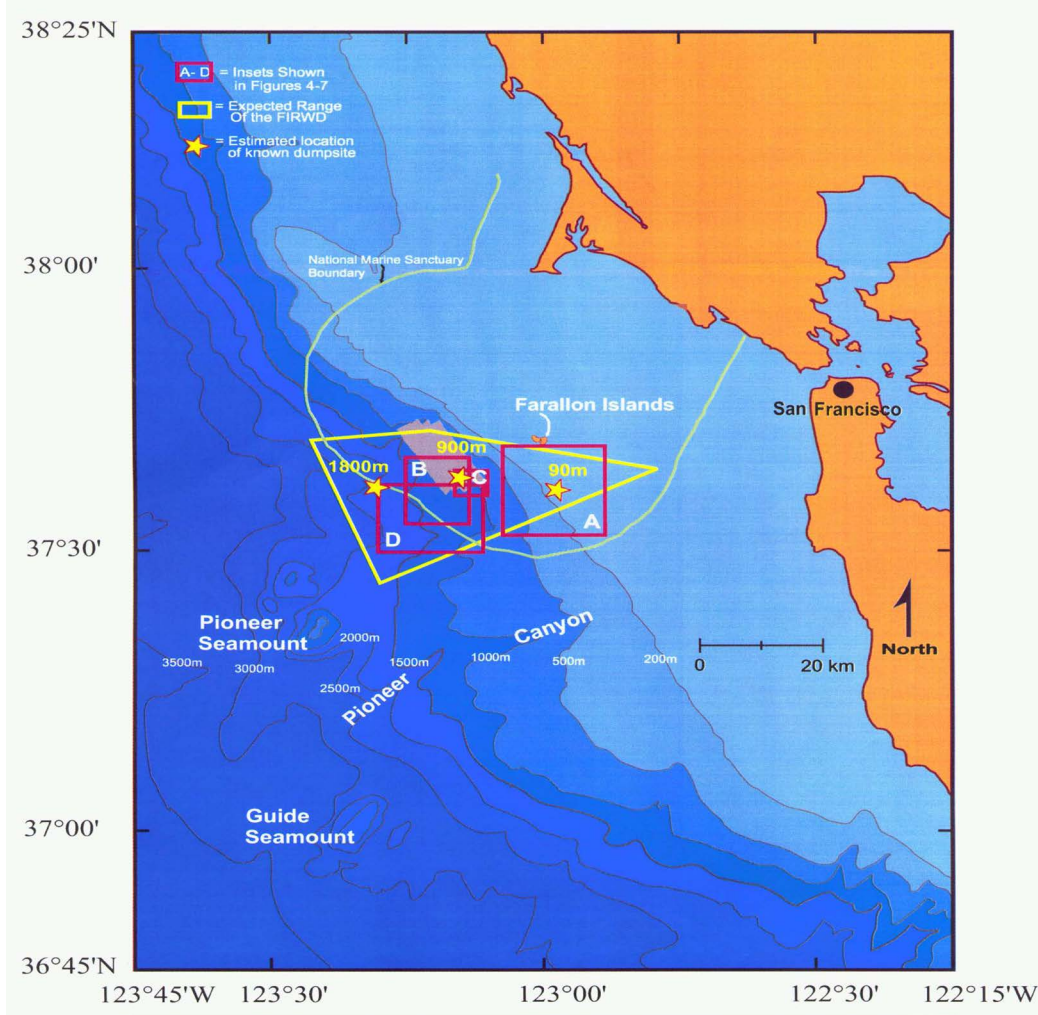
• تتبع النفايات النووية المشعة في البحار

بين عامي 1946 و 1970، ألقى ما يقرب من 47800 برميل سعة 55 غالوناً وكتل خرسانية وحاويات أخرى من النفايات المشعة منخفضة المستوى قبالة شاطئ خليج سان فرانسيسكو. حيث خصصت ثلاثة مواقع على الجرف القاري والمنحدر المتآخم لجزر فارالون للتخلص من النفايات.

وفقاً للسجلات، رسب ما يقرب من 150 برميلاً في عمق المياه نحو 90 متراً، و 3600 في عمق المياه نحو 900 متراً، و 44000 في عمق المياه الاسمي البالغ 1800 متر. يشار إلى هذه المواقع هنا على أنها مواقع 90 متر و 900 متر و 1800 متر، مع أعماق المياه الفعلية في كل موقع وحوله تختلف عن القيم الاسمية.

في الواقع، ربما لم يجر التخلص من العديد من البراميل في مواقع محددة. من الأرجح أنها تتشتت على مساحة 1400 كيلومتر مربع من قاع البحر، مقلب النفايات المشعة لجزيرة فارالون، المحدد بواسطة المضلع غير المنتظم في الشكل الآتي.





مواقع تفريغ النفايات المشعة لجزر فارالون: خريطة موقع تُظهر مواقع 90 و 900 و 1800 متراً. تُظهر الأشكال الداخلية A-D المناطق التي تغطيها الأشكال 4-7، على التوالي.

باستثناء التريتيوم، جرى التخلص من إجمالي يقدر بنحو (Ci 14500) من الثوريوم واليورانيوم وما بعد اليورانيوم ومنتجات التشييط الأخرى ومنتجات الانشطار المختلط في المواقع الثلاثة.





الكميات الدقيقة للنويدات المشعة الفردية غير معروفة. بالإضافة إلى النفايات المشعة، أقيمت أيضاً النفايات الأخرى، بما في ذلك الفينولات والسيانيد والزئبق والبريليوم والمعادن الثقيلة الأخرى وغنائم التجريف والمتفجرات والقمامة في المنطقة وحولها.

لقد طوّر نظام **EEL** ونظام هيئة المسح الجيولوجي البريطانية (**BGS**) **British Geological Survey** لاستخدامهما في الجرف القاري وجرى تشغيله في الغالب على أعماق أقل من 200 متر، مع استخدامه لفترة وجيزة على ارتفاع 600 متر. وقد أمكن إجراء تعديلات كبيرة على نظام مسح فارالون للتعامل مع أعماق أكبر بكثير.

استلزم ذلك رفع مستوى وعاء الضغط الذي يضم الكاشف إلى طول 3000 متر، والتحول إلى نقل البيانات الرقمية للسماح بنقل الإشارات عبر 6000 متر من الكابلات، والتحديث الكامل للإلكترونيات التحكم وبرامج تسجيل البيانات.

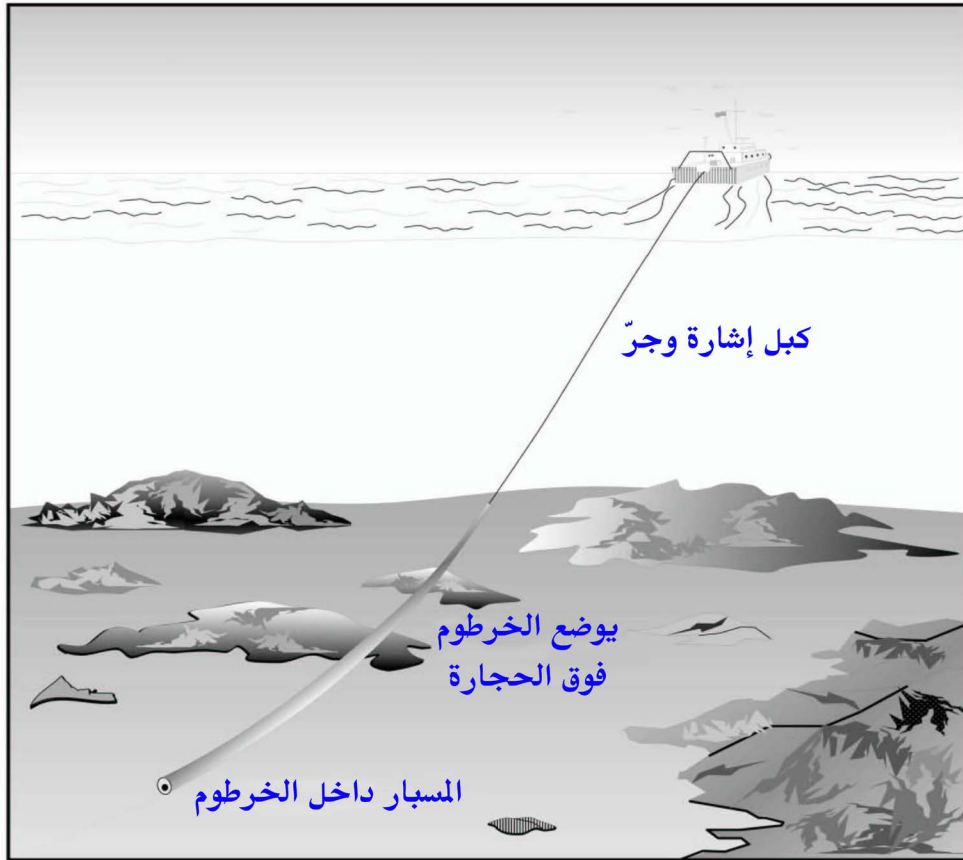
بالإضافة إلى ذلك، أمكن إضافة مستشعرات إضافية إلى مسبار قاع البحر لإعطاء معلومات الضغط (= العمق) ودرجة الحرارة والضوضاء (= الهياج). وقد استخدمت شاشة **Saddleback** لقياس الضغط على كابل القطر لضمان بقاء هذا ضمن حدود العمل الآمنة. يتضمن هذا أيضاً عداداً للكابلات لتتبع طول الكبل المنشور.

يسحب مسبار الكشف عن **EEL** في قاع البحر، محمياً داخل خرطوم بولي كلوريد الفينيل بطول 30 متراً. كان كاشف أشعة غاما المستخدم في المسح عبارة عن كاشف وميض البزموت جرمانيت (**BGO**). عندما تتفاعل أشعة غاما مع الكاشف، تنبعث ومضات من الضوء (وميض) تتحول إلى نبضات جهد وتضخم





ثم تُفرز حسب ارتفاع النبض. تتناسب شدة الوميض وارتفاع النبضة مع طاقة أشعة غاما. ومن ثم يمكن للكاشف قياس الطيف الكامل لأشعة غاما، مما يتيح تحديد المساهمات من النشاط الإشعاعي الطبيعي والاصطناعي وتحديد كميتها. يقيس الجهاز بواعث غاما في مادة قاع البحر السطحية إلى أقصى عمق فعال يبلغ نحو 30 سم.



مخطط طريقة EEL.





يتغير طول كابل القطر، باستخدام جهاز تحكم عن بعد، للحفاظ على المسبار في قاع البحر مع تغير عمق المياه أو لاستيعاب التغيرات في سرعة سفينة المسح.

يُلاحظ انخفاض واضح في الإشارة إذا فقد المسبار الاتصال بقاع البحر. يتضح هذا في كل من بيانات أشعة غاما والإشارة الصوتية ويمكن الكشف، قدر الإمكان، من البقاء في قاع البحر.

مع إمكانية تطويرها في الأصل لرسم الخرائط الجيولوجية واستكشاف المعادن، فقد استخدمت المعدات لاحقاً في مجموعة متنوعة من المسوحات البيئية. وتشمل هذه الخرائط خرائط النويدات المشعة الاصطناعية المنبعثة من محطة سيلافيلد النووية في البحر الأيرلندي.

• تطبيقات بيانات النشاط الإشعاعي في علم البحار

كان قياس النظائر الاصطناعية والأشعة الكونية المنتجة في مياه البحر والغلاف الجوي أكثر شيوعاً في العقد الماضي، في حين كان القياس في مياه البحر للأعضاء السفلية من السلسلة المشعة الطبيعية أكثر محدودة.

ومع ذلك، لا ينبغي أن يوجد مثل هذا الافتقار إلى الاهتمام من ناحية مستويات النشاط الإشعاعي. على سبيل المثال، فإن النشاط المُبلغ عنه لـ ^{137}CS في مياه البحر يكاد يكون مساوياً لما يجب إيجاده لـ ^{210}Pb ، إذا كان موجوداً تقريباً في حالة توازن مع ^{226}Ra . بالتوازي مع الزيادة في القياسات، كان الجزء الأكبر





من التطبيقات الحديثة في طور المحيط مع استخدام نظائر الأشعة الكونية والنشاط الإشعاعي الاصطناعي.

1. الرابط بين الغلاف الجوي والمحيط

جرى تطبيق النظائر المشعة قصيرة العمر والأقل وفرة الناتجة عن الإشعاع الكوني في المقام الأول على دراسات دوران الغلاف الجوي وغيرها من مشكلات الأرصاد الجوية. إمكانية استخدامها في دراسات مياه المحيط محدودة لأن التخفيف يمثل هذا الحجم الكبير من الماء يجعل اكتشافها صعباً جداً إن لم يكن مستحيلاً.

تتعلق دراسة علم البحار الأولية في هذا السطح بقياس معدل تبادل ثاني أكسيد الكربون بين المحيط والغلاف الجوي، وزمن إقامة الكربون المشع والتريتيوم في الغلاف الجوي. إن معرفة الزمن، منذ الإنتاج، المطلوب لهذه النظائر المشعة لغزو المحيط أمر مرغوب فيه كعامل مساعد في تحديد عمر المياه السطحية بناءً على تركيزات النظائر المشعة.

في حالة ثاني أكسيد الكربون، يمكن تعريف زمن الإقامة τ ، على أنه الوقت الذي يستغرقه البحر في امتصاص جزيء ثاني أكسيد الكربون، كعضو في خزان الكربون في الغلاف الجوي.

نظراً لأن $\tau = 1/k$ ، حيث k هو معدل نقل ثاني أكسيد الكربون سنوياً، يمكن التعبير عن قيم تصريف ثاني أكسيد الكربون بالوحدة المعتادة، عدد مولات ثاني أكسيد الكربون / متر² في السنة المحسوبة من وقت الإقامة مع إدخال الكميات الإضافية من إجمالي ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ومساحة سطح البحر.





لقد استخدمت طريقتان مختلفتان ومعدتان إلى حد ما لتقدير زمن الإقامة τ ، بافتراض حالة مستقرة لتبادل ^{14}C بين الخزانين. تعتمد إحداها على متوسط نسبة $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ لمياه المحيطات والاختلاف في نسبة $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ بين الغلاف الجوي ومياه سطح المحيط، مع تصحيحات للجزء النظيري بين الخزانات.

وتعتمد الطريقة الأخرى على إجمالي مخزون الكربون في الغلاف الجوي والمحيطات السطحية المستخدمة مع بارامتر جوي إضافي؛ إما حجم التأثير الصناعي، أو إضافة الكربون المشع بوساطة القنابل النووية، أو معدل إنتاج الأشعة الكونية ^{14}C .

استخدم بعض الباحثين مزيجاً من الطريقتين، واستخدم بعضهم طريقة تأثير القنبلة النووية المقدرة لفترة إقامة أقل إلى حد ما بـ 3.3 سنوات، في حين أن جميع الطرائق الأخرى أسفرت عن أزمنة إقامة من 7 إلى 10 سنوات.

يبدو أن أفضل تقدير من هؤلاء الباحثين هو نحو 7 سنوات لزمن إقامة ثاني أكسيد الكربون بين الغلاف الجوي والامتصاص في المحيط ومعدل تبادل يبلغ نحو 20 مولاً من ثاني أكسيد الكربون / متر² في السنة.

وجد أحد الباحثين اتفاقاً عاماً في معدل نقل ثاني أكسيد الكربون في البحر مستخلصاً من النقل الجزيئي والمضطرب ومعدل التبادل المقدر من بيانات $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ في البحر والجو.

لقد قيّم التباين في خطوط العرض في كل من وقت الإقامة ومعدل إنتاج التريتيوم في الستراتوسفير، وقدر أن متوسط زمن إقامة التريتيوم في





الستراتوسفير يبلغ نحو 1.6 سنة.

باستخدام النماذج الرياضية للتبادل المضطرب للتريتيوم في الغلاف الجوي، أظهر الباحثون أنه يمكن استخدام تركيزات التريتيوم لتقدير متوسط التبخر العالمي بناءً على التدرج الرأسي لبخار الماء فوق المحيط.

2. الرابط بين القارة والمحيط

نظراً لأن معظم النظائر المشعة البدائية تساهم في مياه المحيطات وقاع المحيط من مصادر في القارات، فسيجري توجيه المزيد من التحقيقات الإشعاعية إلى هذه العناصر لدراسة تبادل المادة على وجه التحديد عبر هذه الرابطة.

إحدى المشكلات المهمة التي لا تُفهم كثيراً هي التأثيرات المختلفة للبيئات الجليدية وبين الجليدية على مساهمة الرواسب في المحيط. وعندما ندرس الكمية الإجمالية للثوريوم واليورانيوم في طين أعماق البحار، من اللافت للنظر أن اليورانيوم يظهر تركيزاً أقل من الطين الأرضي. وهذا يشير إلى أن مياه البحر لا تزود رواسب أعماق البحار باليورانيوم.

من الواضح أن تفاعل التبادل يحدث في عملية نقل المواد الأرضية إلى أعماق البحار، وفي المقام الأول يذوب اليورانيوم ويعاد ترسيبه على الرف القاري حيث توجد مناطق مختزلة ذات معدل ترسيب مرتفع.

في حالة الثوريوم، يبدو واضحاً، من حقيقة أن مياه النهر ومياه البحر تحوي نسبة منخفضة جداً من الثوريوم، حيث ينقل الجزء الرئيسي من الثوريوم إلى قاع البحر مع جزيئات الرواسب.





لا يترسب اليورانيوم بشكل تفضيلي في معظم المناطق غير المختزلة وفي مثل هذه المواقع على الرف القاري مع عمود المياه الضحلة أعلاه، تحدث مساهمات منخفضة جداً من ^{230}Th و ^{231}Pa من تفكك اليورانيوم في محلول في مياه البحر ووجود هذين النظيرين سيكون أساساً من أصل أرضي، ولن ينفصل أبداً عن جزيئات الرواسب.

يجب أن يوجد كل من ^{230}Th و ^{231}Pa الأرضيين بما يزيد عن المطلوب لتوازن الإشعاعي مع اليورانيوم ولكن ليس بالقدر الذي يحدث في رواسب أعماق البحار.

لقد أثبت هذا الاستنتاج من خلال إعطاء بيانات عن قلب مأخوذ على عمق 90 متراً من بحر بيرنغ. وكانت تتضمن نتائج الباحثين تحليلات في طبقات رسوبية متقاربة لليورانيوم والثوريوم مع تحديدات منفصلة للنظائر ^{230}Th و ^{226}Ra .

إذا أُجري تحديد إضافي لـ ^{231}Pa ، يمكن تقدير معدل الترسيب باستخدام تعديل الطريقة لرواسب أعماق البحار بناءً على نسب $^{231}\text{Pa} / ^{230}\text{Th}$ المتناقصة من نسبة التوازن بدلاً من نسبة $^{231}\text{Pa} / ^{230}\text{Th}$ المخصصة كما هو مستخدم في حالة رواسب أعماق البحار.

باستخدام عنصر الزمن المستنتج من تقدير معدل الترسيب، فإن التباين في مقدار زيادة ^{230}Th أو ^{231}Pa فوق تركيز توازن اليورانيوم سيوفر بارامتر واحدة يتعلق بآثار التبادل البيئي لدورة جليدية واحدة على الأقل.





3. طور المحيط

أثبت استخدام الكربون المشع لدراسة الخلط المحيطي أنه أحد أكثر تقنيات التتبع قيمة التي أمكن تطبيقها في علم المحيطات. تشير نتائج التحليلات الكيميائية الإشعاعية ^{14}C التي ساهم بها مؤخراً العديد من الباحثين المختلفين إلى وجود نمط ثابت تماماً لعمر الكربون المشع (نسبة $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$) في الكتل المائية التي جرى دراستها.

شهدت مياه المحيط الأطلسي زيادة طفيفة في (نسبة $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$) من خط عرض 50 درجة جنوباً إلى خط عرض 50 درجة شمالاً، ونسبة تناقص سريع في خطوط العرض العليا في جنوب المحيط الهادئ ومياه أنتاركتيكا. تظهر عينة واحدة من المياه السطحية في القطب الشمالي أيضاً نسبة أقل قليلاً.

المياه المركزية لها عمر الكربون المشع وسيط بين المياه العميقة والمياه السطحية. المياه العميقة للمحيط الأطلسي التي تنشأ في خطوط العرض العليا للمحيط الجنوبي لديها نسبة أقل من تلك التي تنشأ في نصف الكرة الشمالي، وهو ما يتوافق مع التوزيع الموجود في المياه السطحية.

لسان المحيط في غرب شمال المحيط الأطلسي بين 1200 و2400 متر له نسبة أعلى قليلاً، والتي تُعزى إلى امتداد من المياه الأصغر عمراً تخترق المياه العميقة في شمال المحيط الأطلسي.

يبدو أن مياه القاع على الجانب الشرقي من سلسلة جبال وسط المحيط الأطلسي لها عمر ظاهر أكبر من المياه المجاورة على الجانب الآخر من التلال، وأكبر من المياه العميقة في شمال المحيط الأطلسي. يبدو أن المياه العميقة في





المحيط الهادئ هي الأقدم وجوداً في المحيطات ويبلغ عمرها نحو 1500 عام. نظراً لأن دوران المياه في المحيطات معقد جداً حيث تتفاعل جميع الكتل المائية مع بعضها بعضاً، فلا يمكن تفسير توزيع الكربون المشع بالكامل بدون مساعدة من أدلة أوقيانوغرافية إضافية.



يمكن رؤية لسان المحيط (TOTO) على طول الساحل الشرقي لجزيرة أندروس. يقع الجزء العلوي من هذه الصورة إلى الشرق قليلاً من الشمال. لسان المحيط هو اسم منطقة ذات مياه أعمق بكثير في جزر البهاما تفصل بين جزيرتي أندروس ونيو بروفيدنس.





واحدة من أكثر البارامترات المفيدة التي يمكن من خلالها تفسير بيانات الكربون المشع هي معدلات الخلط بين كتل الماء حيث يقدر زمن مكوث جزيء H_2O داخل كتلة مائية معينة.

غالباً ما تُصمم 'النماذج الصندوقية' لتقييم الافتراضات المختلفة المتعلقة بتوزيع الكربون المشع المطلوب لتقدير أوقات الإقامة. استندت تقديرات متوسط أوقات إقامة جزيئات الماء على كتل المياه الجوفية إلى الافتراضات الآتية:

1. الدوران في المحيطات في حالة مستقرة.
2. نسبة ($^{14}C / ^{12}C$) المصححة للمياه السطحية في منطقة التقارب هي النسبة في المياه الجديدة التي تضاف باستمرار إلى كتل المياه الجوفية.
3. الخلط بين كتل المياه الجوفية المجاورة لا يغير بشكل ملموس للنسبة ($^{14}C / ^{12}C$).
4. لا يغير ثاني أكسيد الكربون الذي يمكن توفيره لكتلة المياه العميقة من خلال محلول رواسب كربونات ومن خلال أكسدة المواد العضوية نسبة ($^{14}C / ^{12}C$) من ثاني أكسيد الكربون الموجود في البداية في كتلة الماء.

لقد صمم الباحثون 'نموذج صندوقي' مشابه إلى حد ما لتدفق الحرارة الجوفية من خلال رابطة رواسب المحيطات، والتباين في محتوى الملح ودرجة الحرارة بين الخزانات، والمتاح باستخدام بيانات ^{14}C .

الخزانات النموذجية المستخدمة هي المياه الشائعة في المحيط الهادئ، ومياه قاع القطب الجنوبي، والمياه الوسيطة في المحيط الهادئ والهندي، والمياه العميقة في شمال المحيط الأطلسي.



وهكذا، استبعدت افتراضات النموذج السابق المتعلقة بخلط المياه السطحية ومعدلات تبادل ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. مع وجود بعض الاختلافات بين النموذجين فيما يتعلق بمساهمات الكتل المائية في المياه الشائعة في المحيط الهادئ، إلا أن النتائج لم تختلف كثيراً.

أشارت النماذج الأخيرة إلى زمن إقامة يبلغ نحو 1200 عام لمياه المحيط الهادئ المشتركة ونحو 300 عام لمياه المحيط الأطلسي الوسيطة. بالنسبة للطبقة الوسيطة الأطلسية، فقد قُدرت الحركة الصافية الصاعدة في المياه السطحية للمحيط الأطلسي وحركة الهبوط في المياه العميقة من 1 إلى 3 متر / سنة.

وحسب أن مياه القطب الجنوبي تتدفق شمالاً تحت المياه السطحية الأطلسية بمعدل 0.03 إلى 0.1 سم / ثانية عند خطوط العرض 40 إلى 500 جنوباً.

استناداً إلى القياسات القليلة لعنصر ^{90}Sr على أعماق مختلفة في المحيط الأطلسي، قدر الباحثون أنه يمكن الإشارة إلى أقل من 5 سنوات للوقت المطلوب للخلط حتى أعماق تصل إلى 500 متر.

نظراً لأن نسبة ($^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$) للمياه بين 200 و500 متر هي متوسط تقريباً بين تلك الموجودة في الماء أعلاه والماء أسفل هذا العمق، فإن معدل الخلط الرأسي سيكون بترتيب أكبر من ذلك المحسوب من ^{14}C . ستكون هناك حاجة إلى نماذج لمعادلة التوزيع المرصود توزيع ^{14}C و ^{90}Sr . يعتبر هذا الاحتمال غير ممكن، ويجب إجراء قياسات ^{90}Sr إضافية والنظائر الاصطناعية الأخرى قبل تقييم فائدتها الحقيقية.

تركيز ^{226}Ra في المياه السطحية والطبقة المختلطة هو نحو نصف ذلك في





المياه العميقة التي يضاف إليها الراديوم عند الانتشار من الرواسب بمعدل ثابت تقريباً فوق قاع البحر العميق بكامله.

إذا كان هذا النقص ناتجاً عن الاضمحلال الإشعاعي فقط، فإنه يشير إلى أن زمن المكوث للسطح المدمج بالإضافة إلى الخزان الوسيط سيكون نحو نصف عمر ^{226}Ra ، أي نحو 1600 سنة، أو أن النقل الصافي لمياه القاع أبطأ بكثير من تلك المحسوبة من نماذج الكربون المشع.

لحساب النقل البطيء إلى الأعلى، اقترح الباحثون أن الخط الحراري، بسبب ثباته الكبير، يمثل حاجزاً رئيسياً بين المياه العميقة والمياه الوسيطة والسطحية.

لاستيعاب كل من بيانات ^{14}C و ^{226}Ra ، اقترح نموذج مكون من أربعة مكامن، وهو يتميز بوجود نظامين دائريين مستقلين تقريباً يتألفان من محيط وسيط مع التبادل بين سطح المحيط والتبادل البطيء مع المحيط القطبي وأعماق المحيط الذي يتبادل مع المحيط القطبي فقط. وتشير النتائج من هذا النموذج إلى أن أزمنا الإقامة أطول قليلاً من المقترحة، باستثناء المحيط المتوسط الذي يبلغ نحو 300 عام.

تتوافق سرعة المياه العمودية من 0.6 إلى 2 متر / سنة المحسوبة من بيانات ^{226}Ra جيداً مع تلك المقدرة للطبقات الوسيطة الأطلسية. وهكذا يبدو أن هناك حاجزاً كيميائياً إلى حد ما بين المياه الوسيطة والعميقة وفقاً لكل من تراكم بيانات النشاط الإشعاعي حتى الوقت الحالي.

بالإضافة إلى تقدير السرعة الرأسية، فإن المعالجة الرياضية المماثلة لمعادلات الانتشار القائمة على التوزيع الرأسي للراديوم وتقدير انتشار الدوامات





على أي مستوى سيسمح بحساب تباين انتشار الدوامة مع العمق. وقد استنتج من هذه الدراسة أن انتشار الدوامة يزداد باتجاه قاع المحيط وأن حجم مكونه الرأسي مرتبط باستقرار كتلة الماء. ويعتبر النقل العمودي عبر طبقة الانتشار الدنيا على عمق نحو 1500 متر في المقام الأول دالة للمكون الرأسي للتيار. يعد استخدام التريتيوم الطبيعي محدوداً جداً لدراسة الدورة الدموية تحت السطحية لأن:

1. تركيزه تحت الطبقة المختلطة أقل بكثير من حدود الكشف الحالية.

2. مستويات تركيز ما قبل القنبلة في المحيط غير مؤكدة جداً.

يبدو من المرجح أن استخدامه في المستقبل سيقصر على تتبع التريتيوم الاصطناعي، باستثناء البحار القطبية.

سيكون التطبيق الأكثر احتمالاً للنشاط الإشعاعي الاصطناعي هو دراسة توزيع النشاط الإشعاعي بين مياه البحر من جهة والأسماك والحيوان والحياة النباتية في المحيط من جهة أخرى.

اقترحت العديد من النماذج الرياضية لتقييم التوزيع بينما على أساس نظري، وقورن النقل البيولوجي للعناصر المشعة بالنقل المادي للعناصر في البحر.

4. الرابط بين المحيط والرواسب

على عكس هجرة ^{226}Ra و ^{14}C عن طريق الانتشار إلى المحيط، فإن الاتجاه الأساسي لحركة العناصر المشعة هو ذلك المرتبط بالجسيمات التي تتراكم ببطء في قاع البحار العميقة.





يساهم الثوريوم في الغالبية العظمى من النشاط الإشعاعي الذي تمثله هذه العملية مع تضمين نظائر Th^{232} و ^{230}Th والنمو اللاحق لمنتجات ابعثيهما. هذه مع كمية صغيرة من ^{14}C مدمجة في الأصداف الجيرية للكائنات البحرية وكمية أقل بكثير من النشاط الإشعاعي ^{40}K في الطين تمثل 98% من إجمالي النشاط الإشعاعي في الجزء العلوي من عمود الرواسب في أعماق البحار. استخدمت كل هذه المكونات الإشعاعية الرئيسية الثلاثة في الدراسات الأوقيانوغرافية مع التطبيق الأولي على كرونولوجيا العصر الجليدي.

استخدم ^{14}C مبدئياً في علم المحيطات لتوفير معايرة زمنية للبارامترات الأخرى المتعلقة بالرواسب والتي يُعتقد أنها مستقلة عن الوقت وستوفر، في هذه الحالة، امتداداً للمقياس الزمني.

أمكن تأريخ الأفق المحدد في الجزء العلوي من عمود الرواسب بقياس ^{14}C لمكون كربونات مناسب؛ من تلك النقطة إلى أسفل في عمود الرواسب، استخدم البارامتر بافتراض أن تباينه الزمني ثابت من أجل الحصول على أعمار الطبقات الأعمق.

لقد استخدمت معايرة بارامتر التيتانيوم بافتراض وجود معدل ثابت لتراكم التيتانيوم في الرواسب للحصول على سجل مناخي، بناءً على تباين المكونات الحيوية في قلب المحيط الهادئ.

كما استخدمت تواريخ ^{14}C في منخربات فوراميفيرا *Foramifera* في العديد من النوى الأطلسية والكاريبية، والتي جرى تحديدها لمعايرة تذبذبات درجة الحرارة التي يُفترض أنها ذات فترة تذبذب ثابتة، وإنشاء منحني عام للحرارة القديمة لسطح المحيط خلال 300000 سنة الماضية.





كان التأريخ مؤقتاً ولكنه ثبت أنه صحيح تقريباً كما أظهرت القياسات اللاحقة. تستنتج درجة الحرارة القديمة من تباين نسبة $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$ في منخريات فورامينيفيرا *Foraminifera* السطحية في قلب غولبيجيرانيا أوز *Globigerina* ooze.

جرى الحصول على تواريخ ^{14}C ، على فترات متعددة، في تسعة مراكز أساسية في المحيط الأطلسي والكاربيبي، وربطت هذه التواريخ بدرجات الحرارة القديمة للمحيط السطحي، بناءً على وفرة الثقبية النسبية.

في وقت لاحق، باستخدام هذه البيانات إلى جانب الأدلة من الرواسب القارية، ظهر وجود تغير مفاجئ في المناخ منذ ما يقرب من 11000 عام، مع ظهور فترة دافئة.

بالإضافة إلى ذلك، يشير تأريخ ^{14}C إلى أن التغيير حدث في أقل من 1000 عام تقريباً مع انخفاض كبير في معدلات ترسيب الطين و CaCO_3 في المحيط الأطلسي والبحر الكاريبي العميق.

يقترّب علم تحديد العمر في مجموعة متنوعة من الرواسب البحرية من المرحلة التي يمكن فيها دراسة النطاق الزمني بكامله. يمكن حالياً تداخل ^{14}C تاريخياً مع التسلسل الزمني $^{231}\text{Pa} / ^{230}\text{Th}$ ، والذي أمكن تمديده إلى حد ما في الوقت المناسب من خلال التسلسل الزمني المحتمل لـ $^{230}\text{Th} / \text{U}$ و $^{230}\text{Th} / ^{232}\text{Th}$.

إن تحديد أعمار $^{40}\text{Ar} / ^{40}\text{K}$ إلى الحد الأدنى لترتيب 100000 سنة هو حالياً احتمال مؤكد، بافتراض توافر المعادن الأصلية الحاملة للبتواسيوم المتكونة





في المحيط. وقد تكون طريقة عمر ^{10}Be الموصوفة، احتمالاً للتمديد في دراسات الوقت إلى بضعة ملايين من السنين.

يمكن أن تقتصر الدراسات ذات التمديد الزمني الأكبر على تحديد عمر مادة المصدر، حيث تتداخل طرائق عمر **K-Ar**، كونها تكمل الجيولوجيا الزمنية لطرائق نظائر الرصاص التي أمكن مراجعتها الطيف.





الجيوفيزياء النووية والتنقيب عن النفط والغاز

تُستخدم تحقيقات **الجيوفيزياء النووية** على نطاق واسع وبنجاح في التنقيب عن حقول النفط والغاز واستكشافها وتطويرها. هذه الطرائق هي الأكثر فعالية في الاستكشاف الإضافي لحقول النفط المنتجة، والتحكم في تطوير حقول النفط والغاز وفي حساب احتياطيات حقول النفط والغاز الكبيرة.

تستخدم في ذلك طرائق جيوفيزيائية نووية محددة (تسجيل γ التقليدي والقياسي الطيفي، تسجيل γ - γ ، والتسجيل النيوتروني، والتسجيل النيوتروني النابض وتعديلاته، والتسجيل الرنين المغناطيسي النووي)، وتعد تقنيات التطبيق بمثابة أمثلة على المشكلات التي جرى حلها في عمليات التنقيب عن حقول النفط والغاز.

لقد باتت **الجيوفيزياء النووية** عنصراً إلزامياً لتقنية التنقيب والاستكشاف وتطوير حقول النفط والغاز في جميع أنحاء العالم. يمكن مقارنة نطاق تطبيق التقنيات النووية في الجيوفيزياء فقط بصناعة الطاقة نفسها. عملياً تمسح جميع الآبار باستخدام طرائق النيوترون وأشعة γ وأشعة X . وتستخدم الآلاف من مجموعات معدات القياس الإشعاعي لهذا الغرض.

لقد صارت الأعماق التي ينقب فيها عن حقول النفط والغاز واستكشافها أكثر تعقيداً. حيث تستخدم طرائق استخراج النفط الثانوية والثالثية على نطاق واسع. في ظل هذه الظروف، تتزايد أهمية الأساليب الجيوفيزيائية الميدانية ويستمر محتوى المعلومات في الازدياد.

جرى حل المشكلات الجديدة والصعبة بمساعدة الأساليب الجيوفيزيائية





النووية، وزادت هذه الحلول بشكل كبير من الكفاءة الجيولوجية والتجارية للاستقصاءات الجيوفيزيائية. يمكن تحديد مجالات الفوائد كما يأتي:

1. القيام بالمزيد من التنقيب عن حقول النفط المنتجة والتي أعادت تحقيق زيادة في احتياطيات النفط التجارية وإنتاج النفط دون استثمار رأسمالي كبير.

2. أدت زيادة محتوى المعلومات وموثوقية التحكم في تطوير حقول النفط والغاز إلى انخفاض عمليات الحفر العميقة في عدد من الحالات وزيادة الكفاءة التجارية لإنتاج النفط وزيادة عوامل الاستخراج في بعض الحقول.

3. أدى الجمع بين الأساليب الفيزيائية النووية والطرائق الأخرى لمسح الآبار إلى زيادة موثوقية حسابات احتياطيات النفط والغاز.

• الطرق النووية الجيوفيزيائية المستخدمة

سنتعرف على التقنيات الممارسة في مجال **الجيوفيزياء النووية** المستخدمة في أعمال التنقيب عن حقول النفط والغاز.

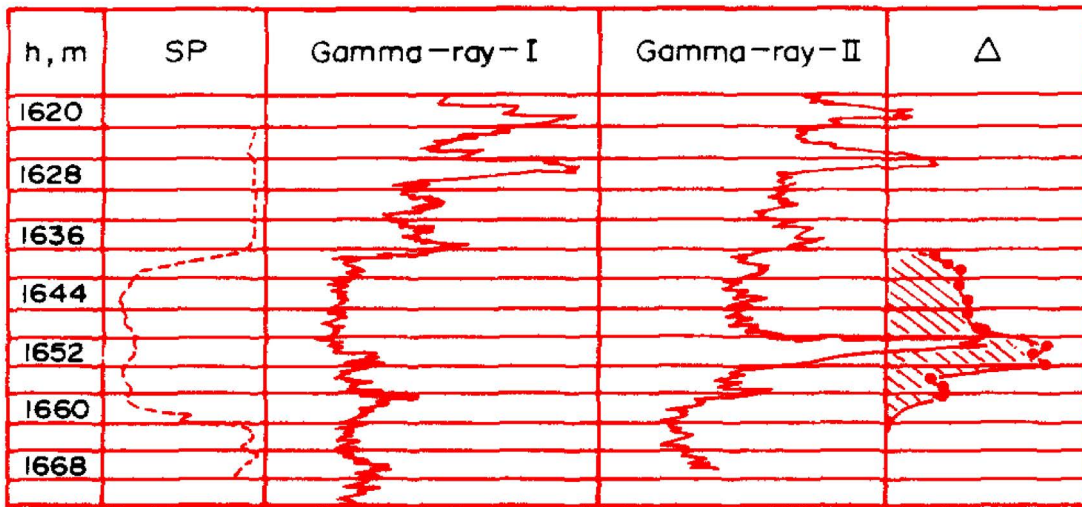
1. تسجيل الحفر باستخدام أشعة γ

تستخدم هذه الطريقة لقياس النشاط الإشعاعي الطبيعي على نطاق واسع لدراسة التركيب الصخري للصخور في المقطع العرضي للبئر. يمكن التمييز بين الصلصال والصخور غير الطينية في الرواسب الأرضية. وقد استخدمت أجهزة قياس الطيف مع أجهزة الكشف شبه الموصلة لقياس النشاط الإشعاعي الطبيعي.





وقد أدى ذلك إلى محتوى معلوماتي أعلى لتقنيات تسجيل الدخول إلى أشعة γ . صارت التطبيقات الجديدة، مثل تقييم الظروف الجيوكيميائية الطبقيّة، وتسجيل حركات مياه التكوين في عملية تطوير حقل النفط، ممكنة على أساس التسجيل المتكرر لأشعة γ كما في الشكل الآتي.



مخطط الكشف عن شذوذ جيوكيميائي إشعاعي (باستخدام أشعة γ) في بئر في حقل نفط.

2. قياس طيف تسجيل حفر أشعة γ

يسمح تطبيق عدادات الوميض بقياس تركيزات Ra و Th و K . فقد عثر على العديد من الارتباطات مع معاملات الصخور المهمة بالإضافة إلى تحديد تركيزات هذه العناصر.

يمكن حل العديد من المشكلات من دراسات أطياف الإشعاع الطبيعي لأشعة γ . على سبيل المثال، من الممكن الحكم على الصخر من خلال تركيزات Th و K وتشبع النفط والغاز بتركيز Ra في عدد من المناطق.





في عام 1975، طور عداد وميض لدرجات حرارة عالية (تصل إلى 150 درجة مئوية) لدراسات توزيع طاقة إشعاع γ من (40-4000 كيلو إلكترون فولت) في آبار النفط والغاز (على عمق 5000 متر).

وقد أثبتت اختبارات المطياف التي أجريت في عدد من حقول النفط والغاز بهدف دراسة النشاط الإشعاعي الطبيعي أنه كان من الممكن حل المشكلات الآتية:

1. التقسيم الطبقي والتشكيلات.
 2. تقييم محتوى الطين في صخور الخزان المتعددة الأشكال بوساطة تركيزات Ra و U و Th.
 3. التحقيق في أصل الشذوذ الجيوكيميائي الإشعاعي في عملية تطوير حقل النفط. يوفر هذا إمكانية التحكم السريع في زحف إنتاج مياه التكوين. مع توفر الوسائط المرجعية لتركيزات العنصر المشع الطبيعي، من الممكن الحصول على توزيعات التركيز الكمي لهذه العناصر على طول تجويف البئر وهذا يوسع نطاق المشكلات التي يمكن حلها بطرائق القياس الطيفي.
- لقد طور مطياف- γ للبئر في عام 1980، وهو يتحمل درجات حرارة تصل إلى أكثر من 180 درجة مئوية وضغوط تصل إلى 170 ميغا باسكال.

إلى جانب تطوير مطياف- γ للبئر مع كاشفات الوميض، يجري تطوير مطياف- γ مع كاشفات أشباه الموصلات. صممت هذه الأدوات للتحليل متعدد العناصر للصخور من خلال معالجة نتائج القياسات في حفرة البئر لتوزيع الطاقة كمات أشعة γ التي تحدث أثناء تفكك النظائر المشعة الطبيعية، أو نتيجة للإشعاع النيوتروني للصخور. هذا مهم للتمايز الصخري بوساطة العناصر المكونة للصخور الرئيسية ولتحديد تركيزات عنصر النويدات المشعة.

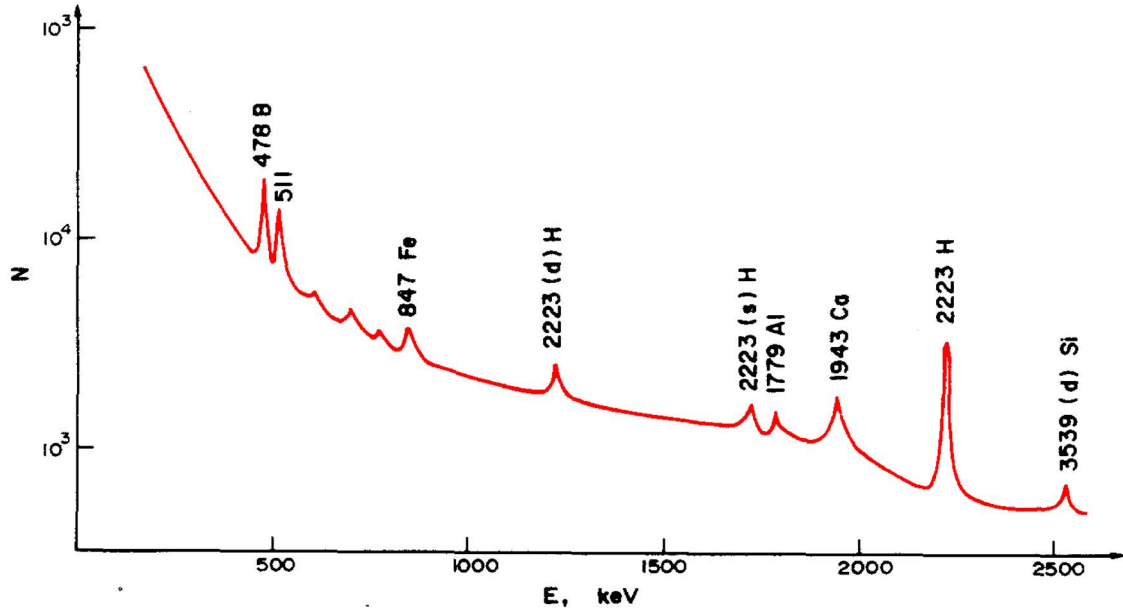




الميزة الرئيسية لأجهزة الكشف عن أشباه الموصلات مقارنة بأجهزة الكشف عن الوميض هي في استبانة الطاقة التي تساوي 2-5 كيلو إلكترون فولت من أجل كمات أشعة γ بطاقة 1 ميغا إلكترون فولت تقريباً (تتميز كاشفات الوميض بدقة 60-70 كيلو إلكترون فولت ضمن نطاق الطاقة هذا).

سيسمح تطبيق كاشفات أشباه الموصلات في صناعات النفط والمعادن بزيادة حساسية ودقة التحليلات الأولية وسيوسع مجال تطبيق مقياس طيف أشعة γ عن طريق تحديد العناصر التي لا يمكن دراستها باستخدام كاشفات الوميض. على سبيل المثال، سيسمح تقييم محتوى الكبريت بتحديد طبقات الجبس، والتي قد تكون بمثابة تكوين حاملة للنفط. سيسمح تحديد السيليكون والألومنيوم والكالسيوم والمغنيسيوم أيضاً بتقييم محتوى الطين في صخور المكمن، وإنشاء صخور الدولوميت كما في الشكل الآتي.





جرى الحصول على طيف الأشعة السينية لانتقاط الإشعاع بمساعدة كاشف Ge(Li) في بئر في حقل نفط.

سيسمح تطبيق أجهزة الكشف عن أشباه الموصلات بالحصول على معلومات جيولوجية جديدة. على سبيل المثال، يمكن إنشاء العلاقة بين النظائر الأم وابنتها في سلسلة التفكك الإشعاعي مما يسمح بتقييم معدلات ووقت هجرة العناصر المشعة وتشتتها وتركيزاتها.

لقد سمحت العلاقات التاريخية بين أعضاء سلسلة التفكك الإشعاعي بدراسة ديناميكيات العمليات الجيوكيميائية في عدد من المجالات الأخرى.





الجيوفيزياء النووية والبيئة

كوكبنا، الأرض، مكان رائع ومناسب للعيش على سطحه منذ آلاف السنين. إنها تلزمننا بالحفاظ عليها ورعايتها. مع استمرار نمو حجم الاستثمار في الاقتصاد المعولم، تتقاطع الظلال البيئية أكثر فأكثر على هذا الكوكب.

إن مفهوم التنمية المستدامة، الذي يعني بشكل عام تلبية احتياجات الحاضر دون المساس بحقوق الأجيال القادمة، يجري تناوله وتنفيذه من قبل العديد من البلدان لإدارة البيئة بطريقة متساوية.

ومع ذلك، هناك بعض الدول التي تحقق النمو لاقتصاداتها بغض النظر عن الآثار السلبية على البيئة المفتوحة. لقد صارت التطبيقات النووية والتطبيقات ذات الصلة متاحة في كل مكان لحل العديد من مشاكل البشرية.

قد تؤدي هذه التطبيقات، إذا لم تجر إدارتها بشكل صحيح، إلى تأثيرات ضارة لتلوث بيئتنا عن طريق إضافة مواد مشعة إلى النشاط الإشعاعي الموجود بالفعل من أصل طبيعي.

حتى لا نكون نحن وأجيالنا القادمة ضحايا لمختلف أنواع التلوث بالمخاطر، يجب علينا الحفاظ على بيئتنا. تظهر العديد من النماذج عندما تقدم الشركات الكبيرة منتجاتها دون الالتفات إلى الآثار طويلة المدى على صحة الإنسان أو الاستقرار البيئي.

تسمح بعض الدول بتصدير المنتجات المحظورة أو الباقي داخل البلاد لأنها ليست آمنة في الاستخدام المحلي. في هذا الصدد، هناك بعض الحديث عن اتفاقيات لدفن النفايات الخطرة (مثل النفايات المشعة في الصحاري).





نحن ندرك ذلك من خلال تطوير الحلول والمعايير المناسبة لأداء المهام المطلوبة. غالباً ما تتطلب هذه الإجراءات توفر معلومات دقيقة ويجب أن تكون أسهل بكثير لتسهيل اتخاذ القرارات.

تتطلب مراقبة الإشعاع البيئي، على سبيل المثال، مجموعة متنوعة من القياسات، لذلك فهي بحاجة إلى تطوير معدات قادرة على إجراء قياسات سريعة ودقيقة عند الطلب بالإضافة إلى تدريب الأشخاص الذين يتعاملون مع المواد المشعة.

• الحماية من الإشعاع من المصادر الطبيعية

تلقى هذا الموضوع بعض الاهتمام من قبل العديد من الباحثين في هذا المجال. بغض النظر عن الوضع العام للسلامة وحالات التعرض، هناك عدد من القضايا المفاهيمية التي لا تزال مفتوحة. وقد يشمل ذلك مراجعة أفضل لمفاهيم الحماية للتعامل مع ظروف التعرض المزمّن طويل الأمد الناتج عن المصادر الطبيعية.

تطوير منهجيات في العالم الحقيقي لتقييم وتنظيم المواقع التي يكون فيها احتمال التعرض ومعالجة جوانب السلامة طويلة الأجل للنفايات المشعة ذات المنشأ الطبيعي أمراً ضرورياً. لعقود من الزمان، أجريت العديد من الدراسات حول سلوك النويدات المشعة في البيئة ونقلها إلى البشر من خلال السلاسل البيئية والغذائية.





ركزت معظم الأبحاث على تلوث إطلاق السلسلة الغذائية في البيئة وتطوير نماذج رياضية لوصف الانتقال البيئي وتقييم التعرض العام. يعد استمرار البحث البيولوجي الأساسي ذا أهمية خاصة للتقدم في حماية الإنسان والحيوان والبيئة من مخاطر الإشعاع، لذلك يجب دعمها بقوة.

ومع ذلك، من المهم أيضاً السماح بعلم الأوبئة، وخاصة دراسات الجرعات المنخفضة من السكان، وتحسين فهم الظواهر البيئية من ناحية صلتها بالحماية من الإشعاع، حتى لا نعرض أنفسنا للخطر.

قد تؤدي العديد من الممارسات في الوقت الحاضر إلى زيادة خطر تلوث السطح بالنشاط الإشعاعي الذي يحتاج إلى التحكم، مثل التقيب عن الأسمدة الفوسفاتية والتخلص غير القانوني من النفايات المشعة في المناطق النائية.

يمكن أن توفر المراقبة البيئية وسائل قيمة لفهم توزيع المخاوف الطبيعية للنظام البيئي. لذلك، من الضروري زيادة معرفتنا بالنظام بوسائل أفضل وتقديم معلومات كافية للمنظمين وصناع القرار والجمهور.

تقوم السلطات والمحققون بعمل بيانات أساسية مثل خرائط المخاطر لتحديد المناطق ذات التركيزات المنخفضة أو العالية لبعض العناصر المشعة وغير المشعة.





• العينات البيئية وأخذ العينات

تشمل العينة البيئية أي شيء موجود على الأرض (التربة، والصخور، والنباتات، والمياه، والرواسب، والهواء، وما إلى ذلك). من المهم أن العينات المأخوذة من أي مكان يجب أن تكون ممثلة لذلك المكان مع الحرص على عدم انتقال العينات الملوثة.

تشمل هذه الاحتياطات أيضاً تخزين العينات في مكان آمن لمنع الظروف التي يمكن أن تغير خصائص العينة. يجب أن تبقى العينات مختومة أثناء التخزين أو النقل لفترات طويلة.

قبل أخذ العينات من البروتوكول، يجب وضع استراتيجية أخذ العينات وكتابة جميع سجلات أخذ العينات الميدانية في سجل معين. يحتوي السجل البسيط على معلومات أساسية عن العينات وأخذ العينات (التاريخ / الوقت، والإحداثيات، والظروف المناخية، وقراءات معدل الجرعة، وما إلى ذلك) وقد يحوي معلومات إضافية مثل مكان وكيفية أخذ العينات.

على سبيل المثال، يمكن أخذ عينات من التربة باستخدام مثقاب بعمق يصل إلى 20 سم (بعد إزالة الجزء العلوي 2-3 سم). يجب تحديد مواقع العينات مسبقاً على خريطة تقريبية، ومن كل موقع، يمكن أخذ مجموعة من العينات الثلاثية.

بعد ذلك تُحضّر العينات للقياسات في الإجراءات المعيارية (التجفيف، والطحن، والغريلة، إلخ). ويرد وصف تفاصيل تحضير العينة في سلسلة التقارير الفنية للوكالة الدولية للطاقة الذرية رقم 295.





• مراقبة الإشعاع في البيئة في الوقت الحقيقي

يمكن أخذ مستوى إشعاع الخلفية بالإعتبار في الإجراءات العلاجية في حالة حدوث التلوث. إذا جرى القياس باستمرار، فإنه يعطي معلومات حول الاتجاهات مع الوقت وتأثير الأنشطة التي من صنع الإنسان. ومن ثم، من المهم إجراء تحقيقات منهجية حول جرعة أشعة غاما المحيطة طوال الوقت لإنشاء قاعدة بيانات أساسية لتقييم الضبط المستقبلي حيث تعمل كنظام إنذار مبكر. يتكون نظام الإنذار المبكر من أجهزة كشف مثبتة في مواقع مختلفة ومتصلة بالخادم المركزي عبر نظام الاتصالات المتاح. يمكن تركيب أي نوع من أجهزة الكشف أو عدادات المسح واستخدامها لتلبية المتطلبات.

ميزة هذا النظام هي أنه يمكن الدولة إنشاء خريطة إشعاع وطنية، تظهر مستويات الإشعاع البيئي (العدد الإجمالي للنشاط الإشعاعي) في جميع أنحاء منطقة معينة محدثة في الوقت الفعلي. كما يسمح للمواطن (أو لأي شخص) بمعرفة مستويات الإشعاع الموجودة داخل تلك المنطقة المحددة في أي حال.

• نظام المعلومات الجغرافية (GIS) لرصد النشاط الإشعاعي

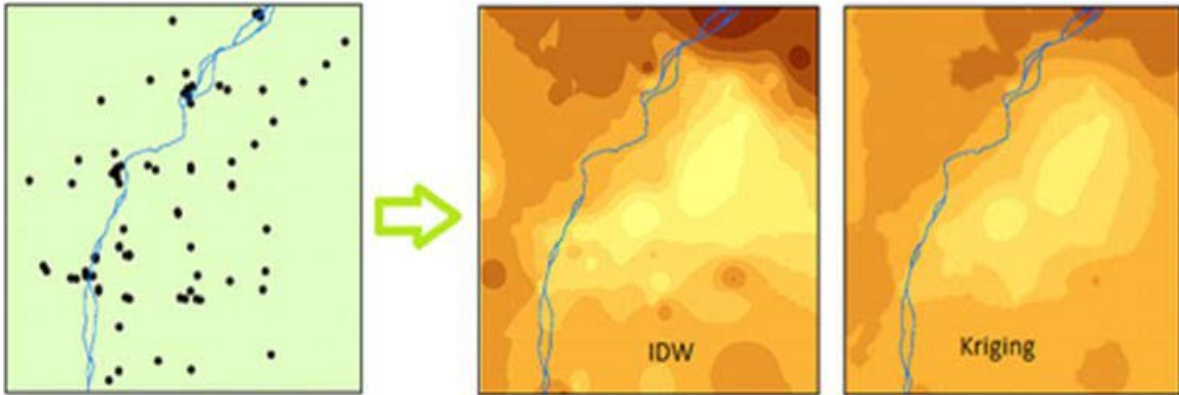
بشكل بسيط، تعرف نظم المعلومات الجغرافية على أنها مجموعة من أجهزة وبرامج الحاسوب المصممة للحصول على المعلومات المرجعية جغرافياً وتخزينها ومعالجتها وعرضها والإبلاغ عنها لغرض معين في الفضاء. يمكن تقديم المساحة بواسطة أنظمة الإحداثيات الجغرافية.





لذلك، يحدد GIS العلاقات بين معلومات قاعدة البيانات المختلفة والمواقع الجغرافية داخل نظام الموقع. جنباً إلى جنب مع أدوات الإحصاء الجغرافية، يعد نظام المعلومات الجغرافية مفيداً لاستيفاء بيانات التشتت عن طريق تحويل النقاط المقيسة إلى أسطح مستمرة.

يوجد العديد من الطرائق المتاحة، واختيارها يعتمد على البيانات نفسها. من بين هذه الطرائق، تجدر الإشارة إلى طريقتين: وهما الترجيح العكسي للمسافة (IDW) وطريقة كريجينغ Kriging.



يمكن تحويل الجرعة المحيطة المقيسة المبعثرة إلى سطح مستمر باستخدام طريقة الترجيح العكسي للمسافة (IDW) أو طريقة الإحصاء الجيولوجي كريجينغ.



الجيوفيزياء النووية وفهم المجتمع للقضايا البيئية

نحن نعيش في عصر يمر فيه الوعي العام بالعلم بتحول مهم، وهو تحول كان قيد التقدم على مدار العقود الماضية. في المزاج السائد، فإن أي تقدم يمكن إحرازه في العلم لم يعد يملأ عامة الناس بالتفاؤل والفخر.

على العكس من ذلك، تثير هذه التطورات لدى العديد من الأشخاص شعوراً بالشك بشأن الموثوقية والفوائد المحتملة للاكتشافات الجديدة وحتى الشعور بالقلق بشأن مستقبل الكوكب.

وقد تجلى هذا الوضع بشكل مباشر من خلال التأسيس واسع النطاق للحركات البيئية العامة والدعم المقدم لهذه الحركات من قبل مختلف قادة الجمهور، سواء في مجموعات المجتمع أو في المجالات الأوسع للسياسة الوطنية والدولية. عادة ما تشير النقاشات السياسية حول هذه القضية إلى الأدلة التي أمكن الحصول عليها والنظريات التي جرى تطويرها في علوم الأرض.

في هذه الحالة، من المهم بشكل خاص أن يفهم المجتمع بشكل صحيح ما هو معروف في العلوم الحديثة حول خصائص كوكبنا وما هي القدرات الموجودة للتنبؤ بالتغير البيئي ومراقبته.

في هذه الفترة، من المهم أن يكون الجمهور قادراً على التمييز بين المواقف التي تكشف عن انتظام موثوق في البيانات المتعلقة بقضايا الصحة والسلامة من تلك الأمور المتعلقة بالقيم الأخلاقية والمعنوية.

تزود **الجيوفيزياء النووية** البشرية بمجموعة واسعة من البيانات حول كوكبنا. نشأ هذا الفرع من العلم مع ولادة الفيزياء النووية الأساسية في عام 1896، عندما





اكتشف هنري بيكريل ظاهرة النشاط الإشعاعي الطبيعي في كلوريد اليورانيوم. وغالباً ما ساهمت **الجيوفيزياء النووية** بشكل ملحوظ في فهم العمليات التي حدثت في الماضي ولا تزال جارية على كوكبنا.

تشمل مجالات الدراسة في علوم الأرض وبعض التقنيات التي فتحتها الفيزياء النووية ما يأتي:

1. الكيمياء الجيولوجية للنظائر والعناصر المشعة والمعادن المفيدة.
2. تطوير فهم نظري شامل للخصائص النووية للصخور، مما أدى إلى تطوير تقنيات مهمة لاستخدام الفيزياء البتروفيزيائية والفيزياء المعدنية للمساعدة في استكشاف الموارد الطبيعية وتطويرها واستخراجها ومعالجتها.
3. التفاعلات بين الإشعاع النووي والصخور، وهي مصادر لتطبيقات مختلفة في التحقيقات الجيولوجية، على سبيل المثال. كاشفات مسار الانشطار لتحديد التركيزات الدقيقة لليورانيوم في الصخور.
4. استخدام طرائق القياس الإشعاعي في الجيولوجيا الزمنية والطبقات لتحديد عمر الصخور.
5. معادن المواد التي تحوي عناصر مشعة، وجيولوجيا أجسام الخامات المشعة، ومعالجة المواد المشعة واستخدامها الصناعي.
6. دراسات حالات النظائر المشعة في الغلاف الجوي وعلى سطح الأرض، على سبيل المثال في رواسب الأنهار والبحيرات، القديمة منها والقائمة، والتي ساهمت بشكل ملحوظ في فيزياء الغلاف الجوي والجيولوجيا المائية.
7. دراسات نسب النظائر المشعة في قشرة الأرض، والتي ساهمت بالمثل في معرفتنا في علوم الأرض للديناميكا الأرضية وعلم البراكين.





تكشف بنية قشرة الأرض - طبقة رقيقة تضم أيضاً المحيط الحيوي - عن التاريخ الجيولوجي الكامل للأرض. من بين أهم إنجازات **الجيوفيزياء النووية** تطبيق عملية التحلل الإشعاعي لتوفير معيار مرجعي زمني يسمح بإعادة البناء الزمني للأحداث الجيولوجية.

جعلت دراسة النسبة النظرية للعينات الطبيعية من الممكن متابعة ديناميكيات نقل المواد من وشاح الأرض إلى قشرتها وربط هذه العملية بالحركة المعقدة للحمل متعدد المراحل للمادة داخل الوشاح.

تؤدي مثل هذه العمليات إلى نشوء النشاط التكتوني لكوكبنا، والذي ينتج بدوره ضغطاً متعددًا ومناطق تصدع. في هذه المناطق، بسبب التحلل المكثف للكوكب، تتشكل تدفقات لكل من الغازات المشعة وغير المشعة والهباء الجوي والتي تختلف في توزيعاتها الزمانية والمكانية.

يمكن إثراء هذه الهباء الجوي بالمعادن (خاصة بالمعادن الثقيلة) والجمعيات العضوية (مثل البنزوبيرين)، والتي تشكل خطراً على الصحة. يوفر استخدام الأساليب التحليلية النووية في دراسة الهباء الجوي طريقة لتحديد تركيبها متعدد العناصر بدقة لا يمكن الوصول إليها بالطرائق الأخرى. في هذه الطرائق، يعمل كل من النظائر قيد البحث كعلامة تمكنا من متابعة الدائرة الكاملة لنقل المادة داخل المحيط الحيوي.

كما مكنت الطرائق النووية من الكشف عن آثار حادثة تشيرنوبيل في القارة القطبية الجنوبية. سمحت مسارات منتجات اضمحلال اليورانيوم بإعادة بناء النمط السائد للرياح في أوروبا قبل 19.9 مليون سنة.





من الأمور ذات الأهمية الخاصة الانبعاث الطبيعي لغاز الرادون، والذي يمكن اكتشافه بسهولة ويعمل كمؤشر على المناطق النشطة تكتونياً. إلى جانب العناصر المشعة الأخرى ومنتجاتها الانشطارية، يطبق الرادون بنجاح في رسم الخرائط الجيولوجية والتنقيب عن رواسب الخام. تشير العديد من التحقيقات إلى إمكانية التنبؤ الموثوق به للزلازل والانفجارات البركانية باستخدام اختلافات تدفق الرادون المقيسة بالاقتران مع طرائق أخرى.

إن حدوث زيادة انبعاث الرادون يشكل خطراً على صحة أولئك الذين يسكنون هذه المناطق. عند التخطيط لبناء منازل في مثل هذه المناطق، من المهم مراعاة أي مخالفات في توزيع انبعاثات غاز الرادون على مساحة كبيرة بما فيه الكفاية في موقع البناء المحتمل.

في المساكن التي أقيمت في مثل هذه المناطق، قد تكون تركيزات الرادون أعلى بعشرات المرات من القيمة المحيطة العادية. ونتيجة لذلك، يتعرض السكان لمخاطر صحية كبيرة مثل سرطان الرئة على سبيل المثال. من ناحية أخرى، يبدو أن التعرض لجرعات الرادون التي تكون أعلى بقليل من المعتاد له تأثير علاجي.

توفر الأشعة الكونية أيضاً مساهمة كبيرة في إشعاع الخلفية على سطح الأرض. لم يجذب عنصر الطاقة المنخفض لهذه الأشعة اهتماماً كبيراً حتى وقت قريب لأنه لا يخترق سوى الطبقات العليا من الغلاف الجوي للأرض وغالباً ما يبقى خارج هذه الحدود.

لقد أوجد هذا المكون من الإشعاع الكوني بعض الاهتمام العلمي فيما يتعلق بظاهرة إضاءة السماء (الشفق القطبي) واضطرابات المجال المغناطيسي





للأرض. ومع ذلك، فقد فسر المؤمنون بالخرافات دائماً هذه الظواهر غير التقليدية على أنها نذير شؤم لأحداث مستقبلية، حيث إن الأحداث الأرضية (الحروب، أو الزلازل) قد حدثت بلا شك من حين لآخر عن طريق الصدفة بعد ظهور هذه الظواهر.

جرى تعزيز المحاولات الرائدة الأولية التي قام بها العلماء في تحقيقاتهم حول أحداث السماء المضيئة هذه من خلال توفر البيانات الكونية. أظهرت القياسات المباشرة التي أمكن إجراؤها من مكوكات الفضاء أن الظاهرة هي ببساطة مكون الأشعة الكونية منخفض الطاقة (البلازما)، وهو المسؤول عن الحالة الفيزيائية للفضاء بالقرب من الأرض.

تطلب التحقيق في الفضاء الكوني تراكم المعرفة التفصيلية لخصائص وسلوك البلازما وطبقات الغلاف الجوي المحيطة بالكوكب، والتي لم تحظ في البداية إلا باهتمام علمي ضئيل. وقد منع هذا أي تقدم في توضيح الآليات التي تؤثر بها العمليات الكونية على العمليات الأرضية. لقد تغير الوضع في هذا الصدد بشكل كبير في السنوات الأخيرة.

جذبت المشكلات البيئية وتحليل العواقب المحتملة للحرب النووية انتباه الباحثين إلى دراسة خصائص الغلاف الجوي. وصارت سلسلة عمليات نقل التأثير الناتجة عن مثل هذا الحدث مفهومة حالياً.

تعدل البلازما الكونية تدفق مكون الأشعة الكونية عالي الطاقة. يندمج الأخير مع طبقة الغلاف الجوي ومن ثم يؤثر على خصائصه الفيزيائية والكيميائية. هذا يغير شفافية الغلاف الجوي ونسبة الإشعاع الكهرومغناطيسي النجمي الذي يصل إلى الأرض، وهنا يوفر الظروف المناسبة لوجود الحياة.





تؤثر العمليات الكونية بشكل حاسم على ظواهر الغلاف الجوي مثل الأعاصير وحركات تدفق الرياح والعديد من الأحداث الأخرى التي لا يمكن التنبؤ بها بدقة من خلال المقاييس الحديثة. إن الفهم الصحيح لهذه الظواهر سيؤدي بلا شك إلى تحسين التنبؤات بتلك الحالات الشاذة في الطقس على المدى القصير والتي تؤثر بشكل كبير على الحياة اليومية والنشاط الاقتصادي للناس.

تؤثر الاضطرابات في طبقات الغلاف الجوي العليا (الأيونوسفير) بشكل كبير على الاتصالات اللاسلكية لمسافات طويلة، والتي تتحكم مع مرافق الاتصالات عبر الأقمار الصناعية في توفير المعلومات في المجتمع. جرى تجميع أدلة جوهرية على تأثير الظواهر الفضائية على صحة الجنس البشري.

يتحكم مكون الأشعة الكونية منخفض الطاقة خارج الغلاف الجوي في كمية الأوزون في الطبقة الوسطى من الغلاف الجوي عن طريق تعديل مكون الأشعة الكونية عالي الطاقة. إلى جانب ذلك، يتزايد القلق داخل المجتمع بشأن إمكانية استنفاد طبقة الأوزون بسبب التأثير التكنولوجي على طبقات الغلاف الجوي.

وهكذا، فإن **الجيوفيزياء النووية** قد وفرت للبشرية القدرة على فهم مجموعة واسعة من الظواهر الطبيعية التي تؤثر بشكل مباشر على وجودها على هذا الكوكب.

تتيح **الجيوفيزياء النووية** توضيح عواقب أحداث معينة وتقربنا من فهم العمليات الجيولوجية والفيزيائية الأساسية. حيث تنطبق أساليبها على تقييم دور تأثير بيئي معين من صنع الإنسان على خلفية التغيرات الطبيعية للبارامترات التي جرى النظر فيها بشكل خاص.



قد تؤدي الاستنتاجات التي أمكن التوصل إليها بمساعدة **الجيوفيزياء النووية** إلى تحسين وعي المجتمع في العصر الحالي للأزمة البيئية. سبب أي نقص في الوعي هو نقص المعلومات الواقعية داخل المجتمع حول الظواهر الطبيعية، وشعور المجتمع بالقلق وحتى القلق بشأن الخطر البيئي الوشيك.

تسهل المعرفة الدقيقة التي توفرها **الجيوفيزياء النووية** إنشاء مجتمع مستتير. من خلال توضيح الروابط بين الأحداث الطبيعية المختلفة وتتبع سلاسل التأثير الطويلة، تدعم **الجيوفيزياء النووية** بشكل كبير تعليم المتخصصين والمجتمع في القضايا العلمية والفلسفية العامة.

نأمل أن يتمكن المجتمع بهذه الطريقة من حماية التنوع المحفوظ للغلاف الحيوي لكوكب الأرض.





الاتجاهات المستقبلية للجيوفيزياء النووية

في حين أن جميع أنظمة القياس المستخدمة حتى الوقت الحالي في الجيوفيزياء قوية في التطبيقات المناسبة، إلا أنه لا يوجد أي شخص قادر على قياس أي من خصائص مصفوفة الصخور الخام المطلوبة سواء أكان مهندس التعدين أم عالم المعادن.

لذلك فإن أقرب نهج للتسجيل النووي المباشر هو اعتماد تقنية γ - γ لتقدير الكثافة الظاهرية. ومع ذلك، فإن هذا القياس في الواقع هو أحد كثافة الإلكترون، ومن ثم، فإن صحة القيمة المتوقعة للكثافة الظاهرية تعتمد نظرياً على ثبات النسبة بين العدد الذري والوزن الذري للمكونات الكيميائية.

أيضاً، بدرجات متفاوتة، في العديد من هذه التقنيات، سواء كانت نووية أم غير نووية، يمكن الحصول على استجابة المسبار نفسه من خلال مجموعات مختلفة من الظروف الكيميائية والفيزيائية في مصفوفة العينة و / أو بيئتها. هذا الأمر يجعل من المستحيل التنبؤ بخصائص فيزيائية أو كيميائية محددة على أساس الاستجابات المقيسة من المسابير.

يوجد قيود أخرى. في النظام المثالي، لا ينبغي فقد أو تشويه أي جزء من استجابة المسبار المرغوبة، كما يحدث غالباً في الممارسة العملية بسبب قيود الأجهزة في التعامل مع التغييرات في بيئة العينة.

على سبيل المثال، قد تكون التغييرات في البيئة التي تسبب هذه التشوهات في الاستجابات هي الاختلافات في قطر البئر، في حالة الجيوفيزياء النووية البئر، أو إدراج الهواء في الملاط، في حالة تحليل الطين المعدني.





علاوة على ذلك، في جميع أنواع القياس الجيوفيزيائي النووي تقريباً، لم تنجح النماذج التفسيرية والمعايرة بشكل كاف لتوفير تحليلات دقيقة للتغيرات الكبيرة في التركيب الكيميائي أو الفيزيائي للعينات المقيسة.

يطرح السؤال أيضاً ما الذي يقيسه المسبار فعلاً؟

من الممكن، على سبيل المثال، أن يسهم التباين العشوائي لسماك كعكة الطين على جدار البئر والمرشح في المصفوفة المسامية خلف الجدار مباشرة بشكل غير متناسب في القياس ما لم يتخذ أي من الاحتياطات لتنظيف الحفرة قبل التسجيل أو طرائق القياس التي تعوض عن هذا التأثير. أيضاً، قد تسبب عملية الحفر في إتلاف المصفوفة الموجودة خلف جدار البئر، ومن ثم تقليل الكثافة الظاهرية في المنطقة المجاورة.

بشكل عام، تكمن المشكلة في وجود المزيد من البارامترات التي يمكن ملاحظتها في أي نظام قياس، والتي تؤخذ على حدة، أكثر من العلاقات المعروفة بين الأسباب والتأثيرات. بمعنى آخر، يمكن أن تؤدي مجموعات مختلفة من التأثيرات المختلفة إلى استجابة المسبار نفسه.

ومن ثم، غالباً ما تفشل أنظمة القياس الجيوفيزيائي النووي لدينا في توفير تحديد بارامترات عينة معينة مع اليقين المطلق، ما لم يكن اللجوء متاحاً لاستخدام العلاقات التي أمكن الحصول عليها إما من أنواع أخرى من القياسات أو من النظرية. هذه هي مشكلة ما يسمى بالنظام غير المحدد. إذ تنشأ هذه المشكلة بشكل أقل بكثير في بيئة المختبر، والتي يمكن التحكم فيها، منها في بيئة البئر.





يمكن التقليل من التداخل الناجم عن التأثيرات البيئية أو الثانوية عن طريق زيادة عدد بارامترات القياس المستقلة. تتمثل إحدى طرائق تحقيق ذلك في إجراء عدة قياسات (أو سجلات في حالة الآبار) بناءً على عمليات فيزيائية مختلفة ثم ربط الاتجاهات الرئيسية في السجلات، مما يتيح القضاء على الآثار الثانوية. لكن عيب هذا النهج هو أن إجراءات التفسير لا تزال تتطلب ذاتية القياس.

الأسلوب الآخر المفضل هو زيادة عدد متغيرات استجابة المسبار المستقلة إلى الحد الأقصى، ضمن القياس نفسه حيثما أمكن ذلك، والتي ترتبط من خلال تفاعلات فيزيائية بخصائص مصفوفة معينة مطلوبة.

هذا هو النهج الذي يمكن تنفيذه بسهولة في بعض المواقف التحليلية باستخدام التقنيات الجيوفيزيائية النووية القائمة على الكشف عن أشعة γ أو أشعة X . وهي تتطلب أن يُكشف عن الإشعاع وتسجيله ومعالجته بطريقة قياس الطيف على أساس العلاقات المعروفة بين المكونات المختلفة للطيف وخصائص العينة. تشمل هذه الخصائص التحليلات المطلوبة والتأثيرات الثانوية، على سبيل المثال، تأثير المصفوفة في XRF وتأثير ثبات البئر.

ومع ذلك، غالباً ما تكون المعلومات المسبقة مطلوبة من القياسات الخارجية للقياسات المعنية. يوفر الوضع في البئر مثلاً على كل من الحل ونوع المشكلة التي تبقى من خلال استخدام هذا النهج. على سبيل المثال، لا يمكن أن يوفر قياس كثافة $\gamma - \gamma$ المصنوع من مسبار بئر مركزي مغمور في سائل البئر معلومات دقيقة عن تغيرات قطر البئر.





ومع ذلك، فإن قياسات الفرجار الكهروميكانيكي **Electromechanical caliper**، المستقل عن قياس الكثافة، يوفر هذه المعلومات بدقة تامة، ويمكن بعد ذلك إجراء تصحيحات على هذا الأساس لقياس الكثافة، إما من المعايير السابقة في ثقب الاختبار أو من النظرية.

تكمن المشكلة في هذا النهج المعين في أن التباين في قطر الثقب الذي يشعر به مسبار الكثافة قد لا يتوافق تماماً مع ذلك الذي يستشعره الفرجار، حتى لو كانت قراءة الفرجار دقيقة حقاً.

ترتبط المشكلة، في هذه الحالة، بحقيقة أن معنى قيمة قطر البئر، في أفق معين من حفرة اللفائف أو الحفرة المنهارة جزئياً، والتي تلي كلا النوعين من القياس، لا يمكن تحديدها بدقة.

للأسف، فإن العديد من أنواع القياسات الجيوفيزيائية النووية لها نظائر لهذا النوع من المشكلات، مع الطريقة التي يمكن التعبير عن المشكلة بها غالباً ما تكون أقل وضوحاً مما في المثال المعطى للتو.

يتمثل أحد تحديات المستقبل في القياسات الجيوفيزيائية النووية في المراجعة المستمرة لصلاحية وملاءمة ما نستخدمه إما كمعلومات مضمنة أو مسبقة لحل العلاقات التفسيرية.





موسوعة الأمري في العلوم والطبيعية





المراجع

Clayton, C. G., (1983), **Nuclear Geophysics: Selected Papers on Applications of Nuclear Techniques in Minerals Exploration**, Mining and Process Control, Pergamon Press Ltd.

Ferronsky, V. I., (2015), **Nuclear Geophysics: Applications in Hydrology, Hydrogeology, Engineering Geology**, Agriculture and Environmental Science, Springer International Publishing Switzerland.

Jones, D.G., et al., (2001), **Measurement of Seafloor Radioactivity at the Farallon Islands Radioactive Waste Dump Site**, California, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Krishan, Gopal, (2015), **Environmental tracer techniques in Groundwater investigations**, Water and Energy International, Central Board of Irrigation and Power, India.

KREBS, A., & H. I., Editors, (1962), **Nuclear Radiation in Geophysics**, Springer-Verlag OHG I Berlin'.

Lee, Sunggyu, & James G. Speight, Sudarshan K. Loyalka, (2007), **Handbook of alternative fuel technologies**, Taylor & Francis Group, LLC.

Margat, Jean & Jac van der Gun, (2013), **Groundwater around the World: A Geographic Synopsis**, CRC Press, Taylor & Francis Group, Broken Sound Parkway NW.

Musa, Isam Salih Mohamed, (2019), **Environmental Radiation: Natural Radioactivity Monitoring**, Licensee IntechOpen.

Nuclear geophysics and its applications, (1999), (**IAEA TRS-393**), International Atomic Energy Agency, Vienna.







أ.د. عبد الله بن محمد العمري

www.alamrigeo.com E.mail : alamri.geo@gmail.com Cell : +966505481215

المناصب الإدارية والفنية

- ❖ دكتوراه في الجيوفيزياء عام 1990 م من جامعة مينيسوتا - أمريكا.
- ❖ المشرف على مركز الدراسات الزلزالية- جامعة الملك سعود.
- ❖ المشرف على كرسي استكشاف الموارد المائية في الربع الخالي.
- ❖ المشرف على مركز الطاقة الحرارية الأرضية بجامعة الملك سعود.
- ❖ رئيس الجمعية السعودية لعلوم الأرض.
- ❖ رئيس قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود.
- ❖ مؤسس ورئيس تحرير المجلة العربية للعلوم الجيولوجية AJGS.
- ❖ رئيس فريق برنامج زمالة عالم مع جامعة أوريغون الحكومية ومعهد ماكس بلانك الألماني.

الاستشارات والعضويات

- مستشار مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية.
- مستشار هيئة المساحة الجيولوجية وهيئة المساحة العسكرية والدفاع المدني.
- مستشار مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة.
- مستشار هيئة الرقابة النووية والإشعاعية.
- باحث رئيس في عدة مشاريع بحثية مدعمة من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية وشركة أرامكو.
- باحث رئيس في مشاريع مدعمة من وزارة الطاقة الأمريكية وجامعة كاليفورنيا ومعهد ليفرمور الأمريكي LLNL.
- عضو الجمعية الأمريكية للزلازل.
- عضو الاتحاد الأمريكي للجيوفيزياء.
- عضو الاتحاد الأوروبي للجيولوجيين.
- عضو لجنة كود البناء السعودي وعضو المنتدى الخليجي للزلازل GSF.
- عضو لجنة تخفيف مخاطر الزلازل في دول شرق البحر الأبيض المتوسط RELEMR.
- باحث رئيسي ومشارك في مشاريع بحثية مع جامعات الاباما وبنسلفانيا وأوريغون الأمريكية.
- ضمن قائمة (المنجزون البارزون العرب) من قبل منظمة ريفاسيمنتو الدولية.
- ضمن قائمة Who's Who في قارة آسيا للتميز العلمي.
- ضمن قائمة Who's Who في العالم للإسهامات العلمية.

النشر العلمي والتأليف

- ❖ نشر أكثر من 200 بحثاً علمياً في مجلات محكمة.
- ❖ ألف 35 كتاباً علمياً.
- ❖ أصدر موسوعة رقمية في علوم الأرض من 14 مجلداً و 107 ملفات علمية.

المشاريع البحثية

- ❖ أنجز 40 مشروعاً بحثياً محلياً و 16 مشروعاً بحثياً دولياً و 74 تقريراً فنياً.

المؤتمرات والندوات

- ❖ شارك في أكثر من 125 مؤتمراً محلياً ودولياً و 75 ندوة وورشة عمل متخصصة.

التعاون الدولي

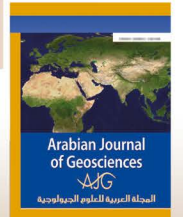
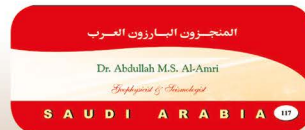
- ❖ باحث رئيسي في 13 مجموعة عمل أمريكية وألمانية.

الجوائز

- ❖ حصل على جائزة المراعي للإبداع العلمي عام 2005 م.
- ❖ حصل على جائزة التميز الذهبي من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية عام 2006 م.
- ❖ حصل على جائزة أبها التقديرية للإسهامات العلمية عام 2007 م.
- ❖ حصل على جائزة جامعة الملك سعود للتميز العلمي عام 2013 م.
- ❖ حصل على جائزة الاتحاد الأمريكي للجيوفيزياء للتعاون الدولي والنشاط البحثي عام 2013 م.
- ❖ حصل على جائزة جامعة السلطان قابوس للإسهامات العلمية عام 2013 م.
- ❖ حصل على جائزة الملك سعود لإدراج المجلة العربية للعلوم الجيولوجية في قائمة ISI.
- ❖ حصل على جائزة أفضل رئيس تحرير مجلة علمية عام 2017 من الناشر الألماني SPRINGER.
- ❖ حصل على جائزة ألبرت نيلسون ماركيز للإنجاز مدى الحياة عام 2018 من منظمة Who's Who العالمية.

درع التكريم

- ❖ حصل على 85 درعاً تكريمياً وشهادات تقدير من المملكة وعمان والكويت والإمارات والأردن ومصر وتونس والجزائر وألمانيا وأمريكا.





موسوعة أمري في علوم الأرض



Al-Amri's Encyclopedia of Earth Sciences



المد
والجزر



المعادن
والتعدين



التركيب
الداخلي للأرض



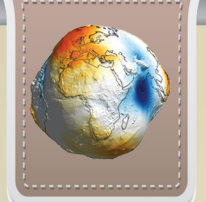
الجاذبية
الأرضية وتطبيقاتها



شكل
الأرض وحركاتها



تقدير
عمر الأرض



الأغلفة
المحيطة بالأرض



جيولوجية
القمر



البراكين
وسبل مجابقتها



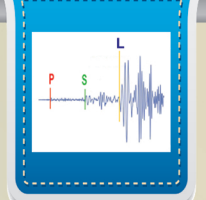
تقييم
مخاطر الزلازل



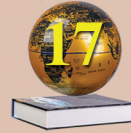
الزلازل
والتفجيرات



موجات
التسونامي



التصحّر
والجفاف



الأمطار
السيول والسدود



الانزلاقات
والانهيارات والفيضانات



التشجير
التحديات والحلول



التغيرات المناخية
والاحتباس الحراري



المشاكل
البيئية وحلولها



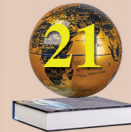
دليل كتابة
الرسائل والنشر العلمي



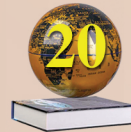
الجيولوجيا
الطبية



الجيوفيزياء
النووية



هل انتهى
عصر النفط؟



الطاقة
الحرارية الأرضية



مستقبل
الطاقة في عالمنا



300 سؤال وجواب
في الجيوفيزياء
التطبيقية



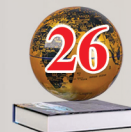
303 سؤال وجواب
في علم الزلازل
والزلزالية الهندسية



380 سؤال وجواب
في المخاطر
الجيولوجية



358 سؤال وجواب
في الثروات
الطبيعية



325 سؤال وجواب
في علم الصخور
والجيوكيمياء



321 سؤال وجواب
في تطور
الأرض



www.alamrigeo.com

