الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح — ورقلة
كلية الرياضيات وعلوم المادة — قسم الفيزياء

مذكرة مقدّمة لنيل شهادة ماستر مهني في الفيزياء الطبية

محاكاة وتوصيف زجاج البورات المُطعّم بأكاسيد البزموت والساماريوم كدرعٍ واقٍ من الأشعة السينية وأشعة غاما

من إعداد الطالبتين:
خمقاني تركية - رقيق حفيظة

نوقشت يوم: 2026/06/14

أعضاء لجنة المناقشة

الاسم واللقب	الرتبة العلمية	المؤسسة	الصفة
مامانو عبد اللطيف	أستاذ محاضر ب	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	رئيساً
بن طويلة عمر	أستاذ تعليم عال	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	مشرفاً ومقرّراً
غربي إبراهيم	أستاذ محاضر أ	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	مناقشاً

السنة الجامعية: 2025 / 2026

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والذي وفقنا لإتمام هذا العمل.

نهدي ثمرة جهدنا هذا إلى من كان لهم الفضل بعد الله تعالى في مسيرتنا العلمية:

إلى أمهاتنا وآبائنا الأعزاء، الذين غمرونا بدعواتهم ودعمهم وصبرهم، وكانوا السند والعون في مختلف مراحل حياتنا.

إلى روح أبي الغالي رحمه الله، الذي كان مصدر فخر وأمان، والذي تمنيت أن يشاركني فرحة هذا الإنجاز. أسأل الله أن يجعل هذا العمل صدقة جارية في ميزان حسناته، وأن يرحمه رحمة واسعة ويسكنه فسيح جناته.

إلى أساتذتنا الأفاضل الذين أناروا لنا طريق العلم والمعرفة، وإلى كل من قدم لنا يد العون والنصيحة من قريب أو بعيد.

إلى عائلاتنا وأصدقائنا وزملائنا الذين ساندونا وشجعونا طوال هذه الرحلة.

وأخيرًا، نهدي هذا العمل إلى كل طالب علم يسعى للمعرفة ويؤمن بأن الاجتهاد طريق النجاح.

تركية وحفيظة

كلمة شكر وعرفان

``وَقُل رَّبِّ زِدْنِي عِلْمًا''

صدق الله العظيم

في البداية، نحمد الله عزّ وجلّ ونشكره على توفيقه لنا في إنجاز هذا العمل، فله الحمد أوّلاً وآخراً على نعمه التي لا تُعدّ ولا تُحصى.

نتقدّم بأسمى عبارات الشكر والتقدير والامتنان إلى أستاذنا المشرف **الأستاذ بن طويلة عمر**، على قبوله الإشراف على هذه المذكرة، وعلى توجيهاته القيّمة ونصائحه السديدة وصبره ومتابعته الدؤوبة طيلة مراحل هذا البحث. فجزاه الله عنّا خيرَ الجزاء.

كما نتوجّه بجزيل الشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة الموقّرين، الأستاذة **عياط زهية** والأستاذ **غربي إبراهيم** على تفضّلهم بقبول قراءة هذه المذكرة وتقييمها، وعلى ملاحظاتهم القيّمة التي ستُثري هذا العمل.

ونتقدّم بالشكر الجزيل إلى كل أساتذة قسم الفيزياء بجامعة قاصدي مرباح ورقلة، الذين رافقونا طيلة مشوارنا الدراسي، ولم يبخلوا علينا بعلمهم وخبرتهم.

وفي الأخير، نشكر كلَّ من ساهم من قريبٍ أو بعيد في إنجاز هذا العمل، وكلَّ من قدّم لنا يدَ العون والمساعدة.

ملخّص

تتناول هذه المذكرة دراسةً نظريةً وحاسوبيةً شاملة لمنظومة زجاج البورات المُطعّم بأكسيدَي البزموت والساماريوم وفق الصيغة المولية $(x)\mathrm{Sm_2O_3}-(40-x)\mathrm{Bi_2O_3}-60\mathrm{B_2O_3}$ (حيث $x = 0, 1, 2, 3, 4$ بالمول المئوي)، بهدف تقييمها بديلاً صديقاً للبيئة لزجاج الرصاص في تطبيقات الحماية الإشعاعية الشفافة. حُسبت الخصائص الفيزيائية (الكثافة والحجم المولي) والميكانيكية (معامل يونج وفق نموذج ماكيشيما-ماكنزي) والبصرية (معامل الانكسار وفجوة الطاقة) باستعمال النماذج النظرية المعتمَدة، فيما استُخرجت بارامترات الحماية الإشعاعية باستعمال برنامج Phy-X/PSD عبر مجالٍ طاقي يمتدّ من $0.015\,\mathrm{MeV}$ إلى $15\,\mathrm{MeV}$.

أظهرت النتائجُ، مع زيادة نسبة الساماريوم، انخفاضاً منتظماً في الكثافة (من 6.016 إلى $5.959\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$) والحجم المولي، يقابله تصاعدٌ في معامل يونج (من 60.83 إلى $61.88\,\mathrm{GPa}$) واتساعٌ في فجوة الطاقة البصرية. وأكّدت قيمُ العدد الذري الفعّال المرتفعة (تفوق 74 عند $0.1\,\mathrm{MeV}$) كفاءةَ هذه التراكيب في توهين الفوتونات، بينما أظهر مقطعُ إزالة النيوترونات السريعة تحسّناً مع زيادة الساماريوم. وخلصت الدراسة إلى أن منظومة الزجاج المدروسة تُمثّل بديلاً واعداً لزجاج الرصاص، مع قيمةٍ مضافة في تدريع النيوترونات بفضل الساماريوم.

الكلمات المفتاحية: زجاج البورات، أكسيد البزموت، أكسيد الساماريوم، الحماية الإشعاعية، معامل التوهين، العدد الذري الفعّال، Phy-X/PSD، زجاج خالٍ من الرصاص.

Abstract

This dissertation presents a comprehensive theoretical and computational study of a bismuth–samarium doped borate glass system with the molar composition $(x)Sm_2O_3-(40-x)Bi_2O_3 - 60B_2O_3$ $)x = 0, 1, 2, 3, 4$ mol%), aiming to evaluate it as an environmentally friendly, lead-free alternative for transparent radiation shielding applications. The physical properties (density and molar volume), mechanical properties (Young's modulus via the Makishima–Mackenzie model), and optical properties (refractive index and optical band gap) were computed using established theoretical models, while the radiation shielding parameters were extracted using the *Phy-X/PSD* software over the photon-energy range 15–0.015 MeV.

With increasing samarium content, the results showed a regular decrease in density (from 6.016 to 5.959 g/cm^3(and molar volume, accompanied by an increase in Young's modulus (from 60.83 to 61.88 GPa) and a widening of the optical band gap. The high effective atomic number values (exceeding 74 at 0.1 MeV) confirmed the efficiency of these compositions in photon attenuation, while the fast-neutron removal cross-section improved with samarium addition. The study concludes that the investigated glass system represents a promising lead-free alternative, with added value in neutron shielding owing to samarium.

Keywords: Borate glass, Bismuth oxide, Samarium oxide, Radiation shielding, Attenuation coefficient, Effective atomic number, Phy-X/PSD, Lead-free glass.

الفهرس

الإهداء **1**

كلمة شكر وعرفان **2**

ملخّص **3**

المقدمة العامة **10**

الفصل الأوّل: عموميات حول الإشعاع وتفاعله مع المادة **11**

1.1 مقدمة 11
2.1 تصنيف الإشعاعات 11
1.2.1 التصنيف حسب الكتلة 11
2.2.1 التصنيف حسب التفاعل مع المادة 14
3.1 الإشعاعات المؤيّنة 14
1.3.1 الإشعاعات المؤيّنة المباشرة 15
2.3.1 الإشعاعات المؤيّنة غير المباشرة 16
4.1 تفاعل الفوتونات مع المادة 17
1.4.1 التأثير الكهروضوئي (Photoelectric Effect) 17
2.4.1 تشتّت كومبتون (Compton Scattering) 18
3.4.1 إنتاج الأزواج (Pair Production) 19
4.4.1 مناطق سيادة التفاعلات 19
5.1 تفاعل النيوترونات مع المادة 20
6.1 تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة 21
1.6.1 التأيين والإثارة 21
2.6.1 إشعاع الفرملة (Bremsstrahlung) 21
7.1 تطبيقات الإشعاع 22
1.7.1 التطبيقات الطبية 22
2.7.1 التطبيقات الأخرى 23
8.1 التأثيرات البيولوجية للإشعاع 23
1.8.1 التأثيرات الحتمية (Deterministic Effects) 23
2.8.1 التأثيرات الاحتمالية (Stochastic Effects) 24
9.1 خلاصة 25

الفصل الثاني: أساسيات الحماية من الإشعاع **26**
1.2 مقدمة 26
2.2 تعريف الحماية من الإشعاع 26
3.2 الجرعة الإشعاعية 26
1.3.2 الجرعة الممتصّة (Absorbed Dose) 27
2.3.2 الجرعة المكافئة (Equivalent Dose) 27
3.3.2 الجرعة الفعّالة (Effective Dose) 27
4.2 مواد الحماية من الإشعاع 28
1.4.2 مواد الحماية من الأشعة السينية وأشعة غاما 28
2.4.2 الحماية من إشعاعات ألفا وبيتا والنيوترونات 29
5.2 معاملات الحماية الإشعاعية 29
1.5.2 الكتلة الجزيئية المتوسطة (AMW) 29
2.5.2 معامل التوهين الخطي (LAC) 30
3.5.2 معامل التوهين الكتلي (MAC) 30
4.5.2 سمك نصف القيمة (HVL) 30
5.5.2 سمك عُشر القيمة (TVL) 30
6.5.2 متوسط المسار الحر (MFP) 31
7.5.2 المقطعان العرضيان الذري والإلكتروني (ACS, ECS) 31
8.5.2 العدد الذري الفعّال (Zeff) 31
9.5.2 الكثافة الإلكترونية الفعّالة (Neff) 31
10.5.2 المقطع العرضي لإزالة النيوترونات السريعة (FNRCS) 32
11.5.2 المعاملات المتقدّمة 32
6.2 خلاصة 32

الفصل الثالث: زجاج البورات، النماذج النظرية، وبرنامج Phy-X/PSD **33**
1.3 مقدمة 33
2.3 نظرة عامة حول الزجاج 33
1.2.3 تعريف الزجاج 33
2.2.3 الخصائص العامة للزجاج 33
3.2.3 الانتقال الزجاجي (Glass Transition) 34
4.2.3 أنواع الزجاج 34
3.3 الزجاج المستعمَل في الحماية الإشعاعية 34
1.3.3 دور أكسيد البزموت (Bi_2O_3) 35
2.3.3 الزجاج المطعَّم بالعناصر الأرضية النادرة 35
4.3 النماذج النظرية لحساب الخصائص 35
1.4.3 الكثافة والحجم المولي 36
2.4.3 الخواص الميكانيكية — نموذج ماكيشيما-ماكنزي 36
3.4.3 الخواص البصرية وفجوة الطاقة 36
5.3 برنامج Phy-X/PSD 36

1.5.3 تعريف البرنامج وآلية عمله 37
2.5.3 قاعدة بيانات XCOM 37
3.5.3 برامج محاكاة أخرى 37
6.3 منهجية الدراسة 37
1.6.3 التراكيب الزجاجية المدروسة 37
2.6.3 خطوات العمل 37
7.3 خلاصة 38

الفصل الرابع: النتائج والمناقشة **39**
1.4 مقدمة 39
2.4 الخصائص البنائية: الكثافة والحجم المولي 39
3.4 الخصائص الميكانيكية 40
4.4 الخصائص البصرية وفجوة الطاقة 41
5.4 مُعاملات الحماية الإشعاعية 43
1.5.4 معامل التوهين الكتلي (MAC) 43
2.5.4 معامل التوهين الخطي (LAC) 43
3.5.4 سمك نصف القيمة ومتوسط المسار الحر (HVL, MFP) 46
4.5.4 العدد الذري الفعّال (Zeff) 46
5.5.4 مقطع إزالة النيوترونات السريعة (FNRCS) 48
6.4 المقارنة مع زجاج الرصاص والمواد المرجعية 49
7.4 الجدول الجامع 50
8.4 خلاصة 50

الخاتمة العامة والآفاق **51**
أهمّ النتائج 51
الآفاق المستقبلية 52

قائمة المراجع **52**

قائمة الأشكال

1.1 موجة كهرومغناطيسية جيبية تتكوّن من مجال كهربائي ومجال مغناطيسي متعامدَين . . . 12
2.1 لطيف الكهرومغناطيسي حسب الطاقة والتردّد والطول الموجي. 13
3.1 انبعاث جسيم ألفا من نواة الذرة 15
4.1 انبعاث جسيم بيتا من نواة الذرّة. 16
5.1 انبعاث أشعة غاما من النواة المشعّة 17

6.1 مخطط يوضّح التأثير الكهروضوئي. 18
7.1 هندسة تشتّت كومبتون. 18
8.1 إنتاج الأزواج. 20
9.1 تغيّر معاملات التفاعل بدلالة طاقة الفوتونات لبعض المواد. 20
10.1 مناطق سيادة التفاعلات الثلاثة بدلالة E وZ. 21
11.1 ظاهرة الإثارة. 22
12.1 ظاهرة التأيين. 22
13.1 تأثير إشعاع الفرملة. 23
14.1 استخدامات الإشعاع في الطب. 24
15.1 التأثيرات الحتمية. 24
16.1 التأثيرات الاحتمالية. 25
1.2 مواد الحماية من الإشعاع وقدرات اختراق الإشعاعات المختلفة. 29
1.4 تغيّر الكثافة (ρ) والحجم المولي (V_m) بدلالة نسبة Sm_2O_3. 40
2.4 تغيّر معامل يونج بدلالة نسبة Sm_2O_3. 41
3.4 تغيّر معامل الانكسار (n) وفجوة الطاقة البصرية (E_g) بدلالة نسبة Sm_2O_3. 42
4.4 تغيّر معامل التوهين الكلّي بدلالة طاقة الفوتون للعيّنات الخمس (مقياس لوغاريتمي مزدوج). 44
5.4 تغيّر معامل التوهين الخطي بدلالة طاقة الفوتون للعيّنات الخمس. 45
6.4 تغيّر سمك نصف القيمة بدلالة طاقة الفوتون للعيّنات الخمس. 45
7.4 تغيّر متوسط المسار الحر بدلالة طاقة الفوتون للعيّنات الخمس. 46
8.4 تغيّر العدد الذري الفعّال بدلالة طاقة الفوتون للعيّنات الخمس. 47
9.4 تغيّر مقطع إزالة النيوترونات السريعة بدلالة نسبة Sm_2O_3. 48

قائمة الجداول

1.1 الخصائص الفيزيائية للإشعاعات الكهرومغناطيسية. 12
2.1 خصائص بعض مناطق الطيف الكهرومغناطيسي. 13
3.1 الخصائص الفيزيائية للإشعاعات الجسيمية. 14
1.2 قيم معامل الترجيح الإشعاعي w_R. 27
2.2 قيم معاملات ترجيح الأنسجة w_T. 28
1.3 رموز العيّنات الزجاجية المدروسة وتراكيبها المولية. 38
1.4 الكتلة الجزيئية المتوسطة والكثافة والحجم المولي للعيّنات. 39
2.4 معامل يونج المحسوب بنموذج ماكيشيما-ماكنزي. 40
3.4 معامل الانكسار وفجوة الطاقة البصرية للعيّنات. 42

4.4 معامل التوهين الكتلي MAC (cm^2/g) عند طاقات مختارة. 44
5.4 سمك نصف القيمة HVL (cm) عند طاقات مختارة. 44
6.4 العدد الذري الفعّال Z_{eff} عند طاقات مختارة. 47
7.4 مقطع إزالة النيوترونات السريعة Σ_R (cm^{-1}). 48
8.4 الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والبصرية والإشعاعية الجامعة. قيمة Z_{eff} عند 0.1 MeV. 50

المقدمة العامة

شهدت تطبيقاتُ الإشعاع المؤيِّن تطوراً كبيراً في مجالاتٍ عديدة، خاصةً في الطب والصناعة والطاقة النووية والبحث العلمي، حيث صارت الإشعاعاتُ تُستعمَل في التشخيص الطبي والعلاج الإشعاعي والتصوير الصناعي وحفظ المواد الغذائية. ورغم الفوائد الكبيرة لهذه الإشعاعات، فإن التعرّض المفرط لها قد يُؤدّي إلى تأثيراتٍ بيولوجية خطيرة على الإنسان والبيئة، مما أوجَبَ تطويرَ وسائلَ فعّالة للحماية والتدريع الإشعاعي.

استُعمل الرصاص لفترةٍ طويلة مادةً أساسية في التدريع الإشعاعي بفضل كثافته العالية وقدرته الكبيرة على امتصاص الأشعة السينية وأشعة غاما، إلا أن سُمّيته وتأثيره البيئي دفعا الباحثين إلى البحث عن موادّ بديلةٍ أكثر أماناً [1, 2, 3] وفعالية. ومن بين هذه المواد برز الزجاجُ الواقي من الإشعاع، خاصةً زجاج البورات[4, 5, 6, 7]، لما يتميّز به من شفافيةٍ عالية واستقرارٍ كيميائي جيد وسهولةٍ في التشكيل والتطوير.

في السنوات الأخيرة، ازداد الاهتمامُ بتطوير زجاج البورات المطعَّم بأكاسيد العناصر الثقيلة والنادرة، [8] مثل أكسيد البزموت (Bi_2O_3) [9, 10] وأكسيد الساماريوم (Sm_2O_3) [7, 11]، بهدف تحسين خصائص التدريع الإشعاعي وزيادة قدرة الزجاج على امتصاص الأشعة السينية وأشعة غاما.

تهدف هذه الدراسة إلى محاكاة وتوصيف الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والبصرية والإشعاعية لزجاج البورات المطعَّم بالبزموت والساماريوم وفق الصيغة $(x)Sm_2O_3 - (40-x)Bi_2O_3 - 60B_2O_3$ (حيث $x = 0, 1, 2, 3, 4$ بالمول المئوي)، باستعمال منصّة Phy-X/PSD والنماذج النظرية المعتمَدة. وذلك من خلال حساب مجموعةٍ من معاملات الحماية الإشعاعية --- معامل التوهين الخطي (LAC) والكتلي (MAC)، وطبقة نصف القيمة (HVL)، والمسار الحر المتوسط (MFP)، والعدد الذري الفعّال (Z_{eff}) --- ودراسةِ تأثير الطاقة والتركيب الكيميائي على كفاءة التدريع.

قُسِّمت هذه المذكرة إلى أربعة فصول:

- **الفصل الأول:** يتناول عمومياتٍ حول الإشعاع وأنواعه وتفاعله مع المادة.
- **الفصل الثاني:** يُخصَّص لأساسيات الحماية الإشعاعية ومعاملاتها.
- **الفصل الثالث:** يعرض خصائصَ زجاج البورات، والنماذجَ النظرية، وبرنامجَ Phy-X/PSD المستعمَل في المحاكاة.
- **الفصل الرابع:** يتضمّن النتائجَ المُحصَّل عليها ومناقشتَها ومقارنتَها بالأدبيات.

الفصل الأوّل
عموميات حول الإشعاع وتفاعله مع المادة

1.1 مقدمة

يُعدّ الإشعاع من الظواهر الفيزيائية الأساسية التي تؤدي دوراً محورياً في مجالات علمية وطبية وصناعية عديدة. ويتمثّل في انتقال الطاقة من مصدرٍ إلى آخر على هيئة موجاتٍ كهرومغناطيسية أو جسيماتٍ مادية قادرةٍ على التفاعل مع المادة.

أدى التطور التكنولوجي إلى اتساع استعمال الإشعاع في التطبيقات الطبية كالتصوير الطبي والعلاج الإشعاعي، فضلاً عن استعمالاته في الصناعة وإنتاج الطاقة النووية والبحث العلمي. وفي المقابل، فإن التعرّض المُفرط للإشعاعات المؤيّنة قد يُسبّب أضراراً بيولوجية خطيرة، مما يجعل فهمَ طبيعة الإشعاع وآليات تفاعله مع المادة أمراً ضرورياً لتطوير وسائل فعّالة للحماية والتدريع.

يهدف هذا الفصل إلى تقديم المفاهيم الأساسية المتعلقة بالإشعاع، عبر دراسة تصنيفاته المختلفة وخصائصه الفيزيائية، وأهمّ التفاعلات بين الفوتونات والمادة، إضافةً إلى التأثيرات البيولوجية الناتجة عن التعرّض للإشعاعات المؤيّنة.

2.1 تصنيف الإشعاعات

يمكن تصنيف الإشعاعات بطرقٍ عدّة تبعاً لطبيعتها الفيزيائية أو لكيفية تفاعلها مع المادة. ومن أكثر التصنيفات استعمالاً في الفيزياء الإشعاعية: التصنيف حسب الكتلة، والتصنيف حسب القدرة على التأيين.

1.2.1 التصنيف حسب الكتلة

وفق هذا التصنيف تُقسَّم الإشعاعات إلى إشعاعاتٍ كهرومغناطيسية وإشعاعاتٍ جسيمية، تبعاً لامتلاكها الكتلة والشحنة الكهربائية.

الإشعاعات الكهرومغناطيسية

الإشعاعات الكهرومغناطيسية إشعاعاتٌ تنتج عن اهتزاز الشحنات الكهربائية، وتتكوّن من مجالٍ كهربائي ومجالٍ مغناطيسي متعامدَين ينتشران في الفراغ بسرعة الضوء. تتميّز بانعدام الكتلة والشحنة الكهربائية، وتحمل

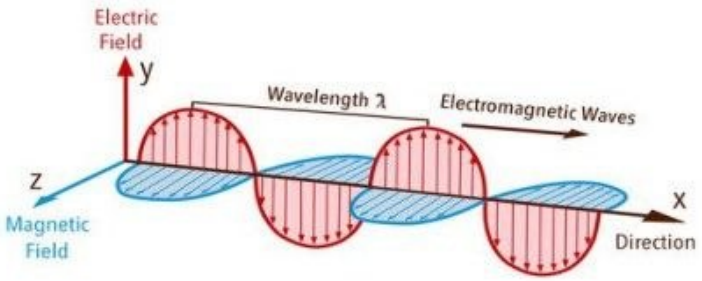
طاقةً تعتمد على التردّد والطول الموجي.

تُلخَّص الخصائص الفيزيائية للإشعاعات الكهرومغناطيسية في الجدول 1.1:

جدول 1.1: الخصائص الفيزيائية للإشعاعات الكهرومغناطيسية.

الخاصية	العلاقة
الكتلة	$m = 0$
سرعة الانتشار	$c = \lambda\nu$
الطاقة المحمولة	$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$
كمية الحركة	$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$
الطول الموجي	$\lambda = \frac{c}{\nu}$
متجه الموجة	$k = \frac{2\pi}{\lambda}$

حيث: h ثابت بلانك، ν التردّد، c سرعة الضوء، λ الطول الموجي، p كمية الحركة.



شكل 1.1: موجة كهرومغناطيسية جيبية تتكوّن من مجال كهربائي ومجال مغناطيسي متعامدَين

الطيف الكهرومغناطيسي. يُمثّل الطيف الكهرومغناطيسي مختلفَ أنواع الإشعاعات مرتَّبةً حسب الطاقة أو الطول الموجي أو التردّد، ويشمل: الموجات الراديوية، والأشعة تحت الحمراء، والضوء المرئي، والأشعة فوق البنفسجية، والأشعة السينية، وأشعة غاما.

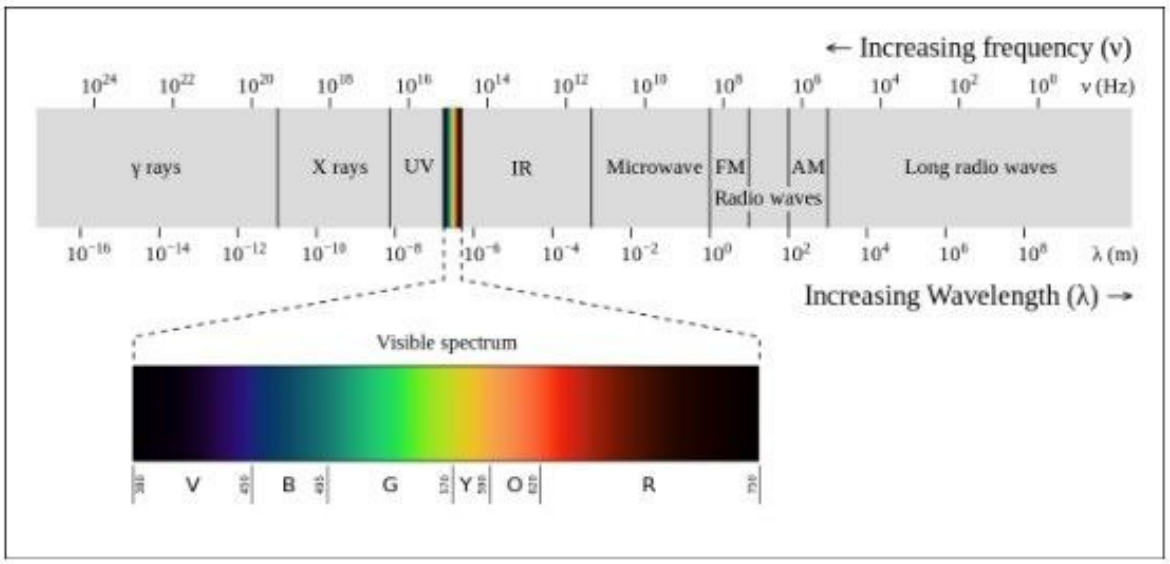
تتميّز أشعة غاما والأشعة السينية بطاقةٍ عالية وقدرةٍ كبيرة على الاختراق، بينما تمتلك الموجات الراديوية أطوالاً موجيةً كبيرة وطاقةً منخفضة. وتعتمد طبيعة التفاعل بين الإشعاع والمادة على طاقة الفوتون الساقط، إذ تزداد قدرة الإشعاع على التأيين بزيادة التردّد والطاقة ونقصان الطول الموجي.

الإشعاعات الجسيمية

الإشعاعات الجسيمية إشعاعاتٌ تتكوّن من جسيماتٍ مادية تمتلك كتلةً وقد تحمل شحنةً كهربائية موجبة أو سالبة أو تكون متعادلة. تتحرّك هذه الجسيمات بسرعاتٍ عالية، وتتفاعل مباشرةً مع المادة عبر التصادم مع

جدول 2.1: خصائص بعض مناطق الطيف الكهرومغناطيسي.

نوع الإشعاع	الطول الموجي	التردد	تطبيقات
الموجات الراديوية	$> 1\,\mathrm{m}$	منخفض	الاتصالات
الموجات الميكروية	$10^{-3}\ -1\mathrm{m}$	متوسط	الرادار والأفران
الأشعة تحت الحمراء	$7.10^{-7}-10^{-3}\mathrm{m}$	أعلى	التصوير الحراري
الضوء المرئي	$4.10^{-7}-7.10^{-7}\mathrm{m}$	متوسط	الرؤية
الأشعة فوق البنفسجية	$10^{-8}-4.10^{-7}\mathrm{m}$	مرتفع	التعقيم
الأشعة السينية	$10^{-11}-10^{-8}\mathrm{m}$	مرتفع جداً	التصوير الطبي
أشعة غاما	$< 10^{-11}\,\mathrm{m}$	عالٍ جداً	العلاج الإشعاعي



شكل 2.1: لطيف الكهرومغناطيسي حسب الطاقة والتردّد والطول الموجي.

الذرات والإلكترونات.

اقترح العالم لويس دي برولي (Louis de Broglie) أن الجسيمات المتحرّكة يمكن أن تمتلك طبيعةً موجية، وهو ما يُعرف بازدواجية الموجة والجسيم (Wave-Particle Duality)، وقد أثبتت تجاربُ التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون صحّةَ هذا المفهوم. وتشمل الإشعاعات الجسيمية: الإلكترونات، والبروتونات، وجسيمات ألفا، وجسيمات بيتا، والنيوترونات، والأيونات الثقيلة.

تُكتب علاقة دي برولي بالشكل:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \tag{1}$$

حيث: m الكتلة، v السرعة، p كمية الحركة، λ الطول الموجي، h ثابت بلانك، k متجه الموجة.

جدول 3.1: الخصائص الفيزيائية للإشعاعات الجسيمية.

الخاصية	العلاقة
الكتلة	$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$
الطاقة الحركية	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$
كمية الحركة	$p = mv$
الطول الموجي	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$
متجه الموجة	$k = \frac{2\pi}{\lambda}$

2.2.1 التصنيف حسب التفاعل مع المادة

اعتماداً على قدرة الإشعاع على تأيين المادة، تُقسَّم الإشعاعات إلى مؤيِّنة وغير مؤيِّنة، وهو من أهمّ التصنيفات في الفيزياء الطبية والحماية الإشعاعية.

الإشعاعات المؤيِّنة (Ionizing Radiation)

الإشعاعات المؤيِّنة إشعاعاتٌ تمتلك طاقةً كافيةً لنزع الإلكترونات من الذرات أو الجزيئات، مكوِّنةً أيوناتٍ موجبةً وسالبة. وتشمل الأشعة السينية وأشعة غاما وجسيمات ألفا وبيتا والبروتونات. تُحدِث هذه الإشعاعات تغيّراتٍ فيزيائية وكيميائية وبيولوجية داخل المادة الحيّة عبر التأيين والإثارة، وتعتمد شدّة تأثيرها البيولوجي على نوع الإشعاع والجرعة ومدة التعرّض.

تُستعمَل الإشعاعات المؤيِّنة طبياً في التصوير بالأشعة السينية، والتصوير المقطعي المحوسب (CT)، والطب النووي، والعلاج الإشعاعي للأورام؛ غير أن التعرّض المفرط لها قد يُتلف الخلايا والأنسجة، مما يستوجب تطبيق معايير صارمة للحماية الإشعاعية.

الإشعاعات غير المؤيِّنة (Non-Ionizing Radiation)

الإشعاعات غير المؤيِّنة إشعاعاتٌ لا تمتلك طاقةً كافيةً لنزع الإلكترونات، ولا تُسبّب تأييناً مباشراً. وتشمل الضوءَ المرئي والأشعةَ تحت الحمراء والموجاتِ الميكروية والراديوية. ورغم كونها أقلّ خطورةً، فقد تُسبّب تأثيراتٍ حرارية أو فيزيولوجية عند التعرّض المكثّف الطويل.

3.1 الإشعاعات المؤيِّنة

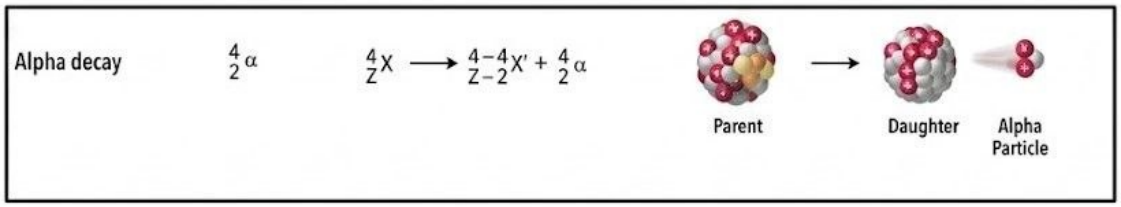
تُقسَّم الإشعاعات المؤيِّنة، حسب كيفية تفاعلها مع المادة، إلى مؤيِّنة مباشرة ومؤيِّنة غير مباشرة.

1.3.1 الإشعاعات المؤيّنة المباشرة

هي إشعاعاتٌ مكوّنةٌ من جسيماتٍ مشحونة تمتلك طاقةً حركيةً كافيةً لإحداث التأيين مباشرةً أثناء مرورها في المادة، إذ تتفاعل مع إلكتروناتٍ الذرات عبر قوى كولوم الكهربائية، فتفقد طاقتها تدريجياً مُحدِثةً التأيين والإثارة.

جسيمات ألفا (α)

تنتج جسيمات ألفا عن التحلّل الإشعاعي لأنويةٍ غير مستقرّة، وتتكوّن من نواة ذرّة الهيليوم (بروتونان ونيوترونان)، وتحمل شحنةً موجبةً مقدارها $+2e$. تمتلك قدرةً تأيينيةً عالية جداً بسبب كتلتها الكبيرة وشحنتها، إلا أن قدرتها على الاختراق ضعيفة، إذ توقفها ورقةٌ أو بضعةُ سنتيمترات من الهواء. ورغم ذلك، تُشكّل خطراً كبيراً عند دخولها الجسم استنشاقاً أو ابتلاعاً.



شكل 3.1: انبعاث جسيم ألفا من نواة الذرة

جسيمات بيتا (β)

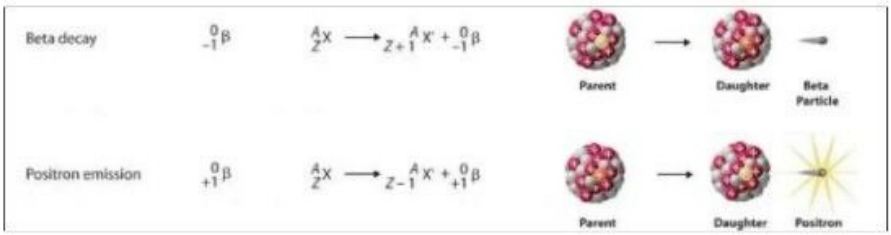
تنتج جسيمات بيتا عن التحلّل الإشعاعي لأنويةٍ غير مستقرّة، وتتمثّل إمّا في إلكتروناتٍ سالبة (β^-) أو بوزيتروناتٍ موجبة (β^+). يحدث تحلّل بيتا السالب عند تحوّل نيوترونٍ إلى بروتونٍ مع انبعاث إلكترونٍ وضدّ نيوترينو:

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}_e \qquad (2)$$

أما تحلّل بيتا الموجب فيحدث عند تحوّل بروتونٍ إلى نيوترونٍ مع انبعاث بوزيترونٍ ونيوترينو:

$$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu_e \qquad (3)$$

تمتلك جسيمات بيتا قدرةَ اختراقٍ أكبر من ألفا بسبب كتلتها الصغيرة، إذ تخترق بضعةَ مليمترات في الأنسجة، لكن قدرتها التأيينية أقلّ. توقفها بضعةُ مليمترات من الألمنيوم أو البلاستيك أو الزجاج. وقد تُنتج جسيماتُ بيتا عالية الطاقة إشعاعَ الفرملة (Bremsstrahlung) عند مرورها في موادّ ذات عددٍ ذري مرتفع.



شكل 4.1: انبعاث جسيم بيتا من نواة الذرّة.

البروتونات (Protons)

البروتونات جسيماتٌ موجبة الشحنة داخل النواة، كتلتها أكبر بكثيرٍ من كتلة الإلكترون. تتميّز بقدرةٍ تأيينيةٍ عالية، وتعتمد قدرتها على الاختراق على طاقتها الحركية. ويزداد فقدان الطاقة قرب نهاية مسارها، فيما يُعرف بذروة براغ (Bragg Peak)، وهي خاصيةٌ تسمح بتركيز الجرعة داخل الورم وتقليل الجرعة في الأنسجة السليمة المحيطة. لذا أصبح العلاج بالبروتونات تقنيةً مهمّة، خاصةً لأورام الدماغ وأورام الأطفال والأورام القريبة من الأعضاء الحساسة.

الأيونات الثقيلة (Heavy Ions)

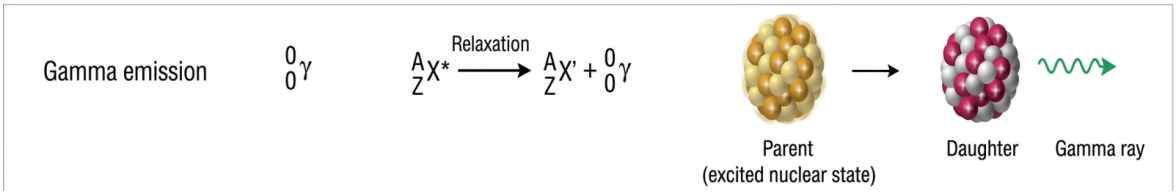
الأيونات الثقيلة جسيماتٌ ذات كتلةٍ وشحنةٍ كبيرتَين مقارنةً بالبروتونات والإلكترونات، كأيونات الكربون والنيتروجين والأكسجين، وتُنتَج غالباً في المسرّعات الجسيمية أو ضمن الأشعة الكونية. تتميّز بقدرةٍ تأيينيةٍ كبيرة وذروةِ براغ واضحة جداً، مما يجعلها فعّالةً في العلاج المتقدّم للأورام العميقة والمقاومة للإشعاع التقليدي، بفعاليةٍ بيولوجيةٍ أعلى من الفوتونات والبروتونات.

2.3.1 الإشعاعات المؤيِّنة غير المباشرة

هي إشعاعاتٌ لا تُسبّب التأيين مباشرةً، وإنما تُنتج جسيماتٍ مشحونةً تقوم لاحقاً بالتأيين. وتشمل أشعةَ غاما والأشعةَ السينية والنيوترونات، وتعتمد في تأثيرها على تفاعلاتٍ ثانوية كالتأثير الكهروضوئي وتشتّت كومبتون وإنتاج الأزواج.

أشعة غاما (γ)

أشعة غاما إشعاعاتٌ كهرومغناطيسية عالية الطاقة تنبعث من الأنوية غير المستقرّة أثناء التحلّل الإشعاعي. لا تمتلك كتلةً أو شحنة، وتنتشر في الفراغ بسرعة الضوء، وتتميّز بقدرة اختراقٍ عالية جداً، لذا تحتاج إلى موادّ كثيفة ذات عددٍ ذري مرتفع كالرصاص أو التنغستن لتدريعها. تتفاعل أساساً عبر التأثير الكهروضوئي وتشتّت كومبتون وإنتاج الأزواج، وتعتمد سيادة كلٍّ منها على طاقة الفوتون والعدد الذري للمادة الممتصّة.



شكل 5.1: انبعاث أشعة غاما من النواة المشعّة

4.1 تفاعل الفوتونات مع المادة

عند مرور الفوتونات في المادة قد تحدث تفاعلاتٌ فيزيائية تؤدي إلى امتصاص الفوتون أو انحرافه أو انتقال جزءٍ من طاقته إلى إلكترونات الذرات. وتعتمد طبيعة هذه التفاعلات على: طاقة الفوتون الساقط، والعدد الذري للمادة الممتصّة، وكثافة المادة.

تُعدّ دراسة هذه التفاعلات من أهمّ مفاهيم الفيزياء الطبية والتدريع، إذ تُتيح فهم آليات امتصاص الإشعاع داخل المواد الواقية. وأهمّها: التأثير الكهروضوئي، وتشتّت كومبتون، وإنتاج الأزواج، وتشتّت طومسون-رايلي.

1.4.1 التأثير الكهروضوئي (Photoelectric Effect)

يحدث التأثير الكهروضوئي عند تفاعل فوتونٍ مع إلكترونٍ مرتبطٍ [12, 13] بقوّةٍ في أحد المدارات الداخلية للذرّة (غالباً الطبقة K). فإذا فاقت طاقة الفوتون طاقةَ ارتباط الإلكترون، نقل الفوتون كاملَ طاقته إلى الإلكترون واختفى نهائياً. تتحوّل طاقة الفوتون إلى طاقة ارتباطٍ للإلكترون وطاقةٍ حركيةٍ للإلكترون المنبعث:

$$E_k = h\nu - E_b \tag{4}$$

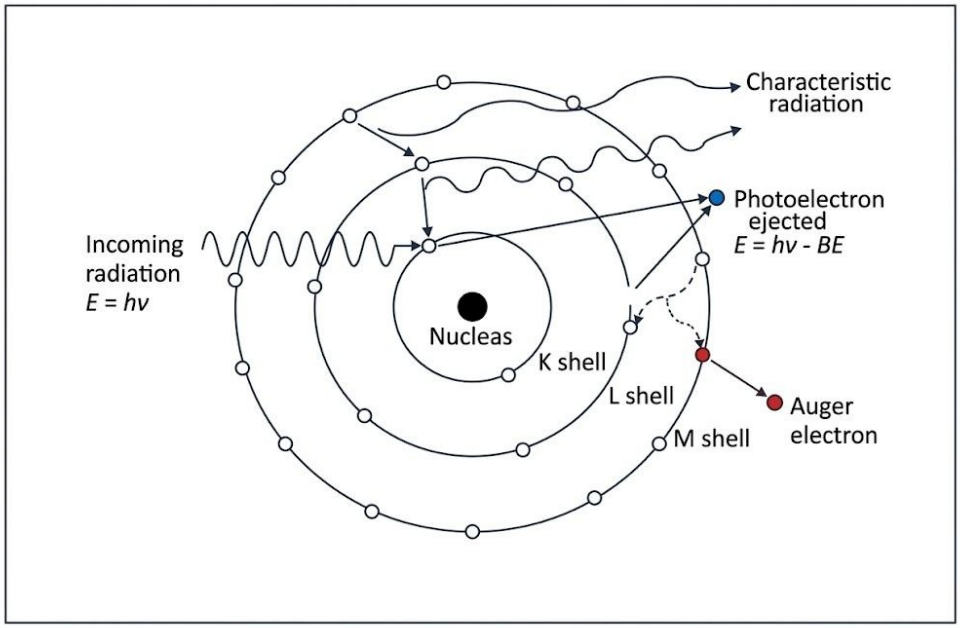
حيث: E_k الطاقة الحركية للإلكترون، $h\nu$ طاقة الفوتون الساقط، E_b طاقة ارتباط الإلكترون.

بعد طرد الإلكترون تصبح الذرّة غير مستقرّة لوجود فجوةٍ إلكترونية، فتنتقل إلكتروناتٌ من مستوياتٍ أعلى لملئها، وينتج عن ذلك انبعاثُ أشعةٍ سينية مميزة (Fluorescence X-rays) أو إلكترونات أوجيه (Auger Electrons).

معامل التوهين الكهروضوئي. يخضع توهين شدّة الحزمة بسبب الامتصاص الكهروضوئي للعلاقة الأُسّية:

$$I = I_0\, e^{-\tau x} \tag{5}$$

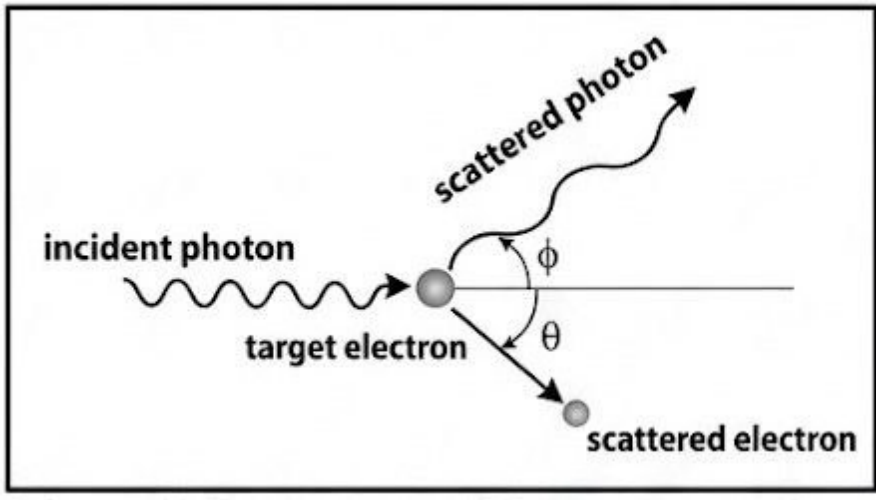
حيث: I_0 عدد الفوتونات الساقطة، I عددها بعد عبور السماكة x، τ معامل التوهين الكهروضوئي. ويتناسب τ تقريباً مع $Z^{4-5}/(h\nu)^3$، مما يُفسّر سيادته عند الطاقات المنخفضة وفي العناصر ذات العدد الذري المرتفع.



شكل 6.1: مخطط يوضّح التأثير الكهروضوئي.

2.4.1 تشتّت كومبتون (Compton Scattering)

يتفاعل الفوتون الساقط ذو الطاقة المرتفعة مع إلكتروناتٍ ضعيفةِ الارتباط [12] أو حرّة (وهي الأكثر عدداً في المادة). خلال التصادم يمتصّ الإلكترونُ جزءاً من طاقة الفوتون، فيتشتّت الفوتون بزاوية θ بالنسبة لاتجاهه الأصلي وتنخفض طاقته، بينما يُقذَف الإلكترون بطاقةٍ حركية ويُمتَصّ محلياً لقصر مداه.



شكل 7.1: هندسة تشتّت كومبتون.

توازن الطاقة. تُعطى طاقة الفوتون المتشتّت بدلالة طاقته الساقطة وزاوية التشتّت:

$$E' = \frac{E}{1 + \dfrac{E}{m_e c^2}\,(1 - \cos\theta)} \tag{6}$$

حيث: E طاقة الفوتون الساقط، E' طاقة الفوتون المتشتّت، m_e كتلة الإلكترون، c سرعة الضوء، θ زاوية التشتّت.

علاقة كومبتون. يتغيّر الطول الموجي للفوتون بعد التصادم وفق:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}\,(1 - \cos\theta) \tag{7}$$

حيث: λ الطول الموجي الساقط، λ' الطول الموجي المتشتّت، والمقدار $h/(m_e c) = 2.43 \times 10^{-12}\,\mathrm{m}$ يُعرف بطول موجة كومبتون.

معامل توهين كومبتون. يُعدّ معامل توهين كومبتون مستقلاً تقريباً عن طبيعة المادة (لا يعتمد كثيراً على Z)، ويتناقص أساساً بدلالة طاقة الفوتون الساقط، مما يجعله الظاهرةَ المسيطرة عند الطاقات المتوسطة.

3.4.1 إنتاج الأزواج (Pair Production)

لا يحدث إنتاج الأزواج إلا إذا تجاوزت طاقةُ الفوتون قيمةً حدّيةً [12, 14] تعادل مجموع كتلتَي السكون للإلكترون والبوزيترون:

$$E_{\mathrm{th}} = 2 m_e c^2 = 1.022\,\mathrm{MeV} \tag{8}$$

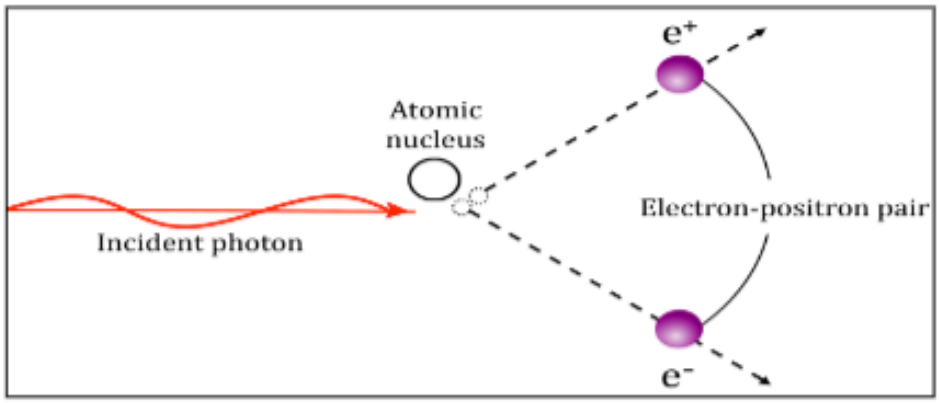
أثناء هذا التفاعل يختفي الفوتون قربَ النواة (بفعل مجالها الكهربائي القوي) ويتحوّل إلى إلكترونٍ وبوزيترون يتقاسمان الطاقةَ الزائدة. ثم يفقد البوزيترون طاقته تدريجياً، فيخضع لعملية إفناء (Annihilation) مع إلكترون، مُنتِجاً فوتونَي غاما بطاقة $0.511\,\mathrm{MeV}$ لكلٍّ منهما، يتحرّكان في اتجاهَين متعاكسَين.

تزداد احتمالية إنتاج الأزواج بزيادة العدد الذري Z وطاقة الفوتون، ويتناسب معاملها تقريباً مع Z^2، فيكون أقلَّ من معامل كومبتون عند الطاقات المنخفضة ويصبح هو المسيطر عند الطاقات المرتفعة جداً.

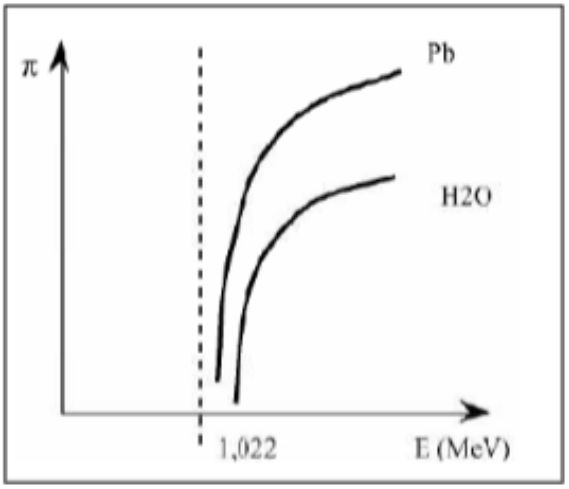
4.4.1 مناطق سيادة التفاعلات

تعتمد الأهمية النسبية للظواهر الثلاث على طاقة الفوتون E والعدد الذري للمادة Z:

- يسود **التأثير الكهروضوئي** عند الطاقات المنخفضة ومع المواد الثقيلة ذات العدد الذري المرتفع.
- يسود **تشتّت كومبتون** عند الطاقات المتوسطة وفي المواد الخفيفة ذات العدد الذري المنخفض.
- يسود **إنتاج الأزواج** عند الطاقات المرتفعة جداً ومع المواد الثقيلة.



شكل 8.1: إنتاج الأزواج.



شكل 9.1: تغيّر معاملات التفاعل بدلالة طاقة الفوتونات لبعض المواد.

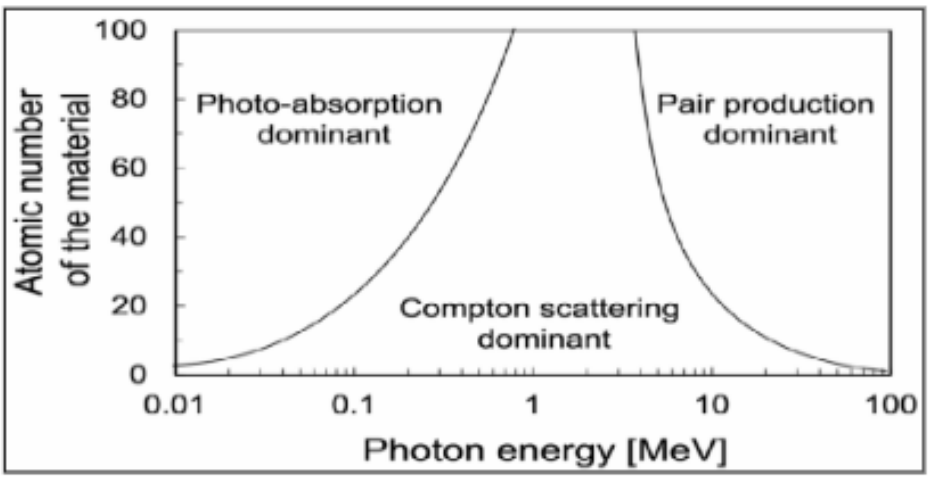
5.1 تفاعل النيوترونات مع المادة

نظراً لأن النيوترونات جسيماتٌ غير مشحونة، فإن تفاعلها مع إلكترونات المادة ضعيفٌ جداً، وتتفاعل أساساً مع نوى الذرات عبر عدّة عمليات:

التصادم المرن: تنقل النيوترونات جزءاً من طاقتها الحركية إلى النواة دون تغيّر الطاقة الكلية للنظام.

التصادم غير المرن: تنقل جزءاً من طاقتها مُثيرةً النواةَ إلى مستوىً طاقي أعلى.

الالتقاط الإشعاعي: تُمتصّ النيوترونات في النواة مكوِّنةً نظيراً أثقل، مع انبعاث أشعة غاما غالباً. ويُستعمَل هذا التفاعل واسعاً في إنتاج النظائر المشعّة الاصطناعية.



شكل 10.1: مناطق سيادة التفاعلات الثلاثة بدلالة E وZ.

6.1 تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة

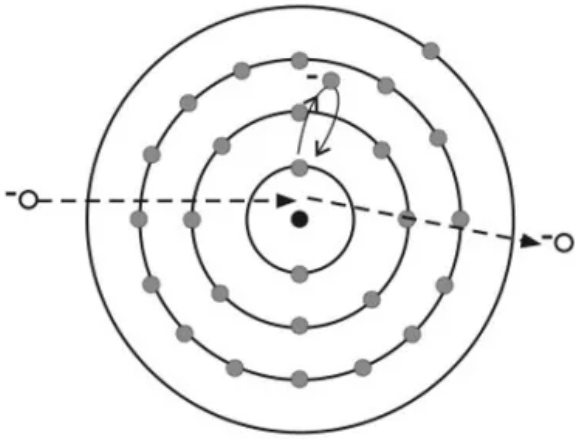
عند مرور الجسيمات المشحونة في المادة تتفاعل أساساً مع إلكترونات الذرات ونادراً مع النواة. تؤدي التصادمات مع الإلكترونات إلى فقدان الطاقة وإثارة الإلكترونات إلى مستوياتٍ أعلى، ثم تعود الذرات المُثارة إلى حالتها الأساسية بإصدار فوتونات. وقد تتفاعل أيضاً مع النواة عبر قوة كولوم (فقدان طاقةٍ ضعيف نسبياً)، أو عبر القوة النووية الشديدة عند المسافات القصيرة جداً (فقدان طاقةٍ كبير).

1.6.1 التأيين والإثارة

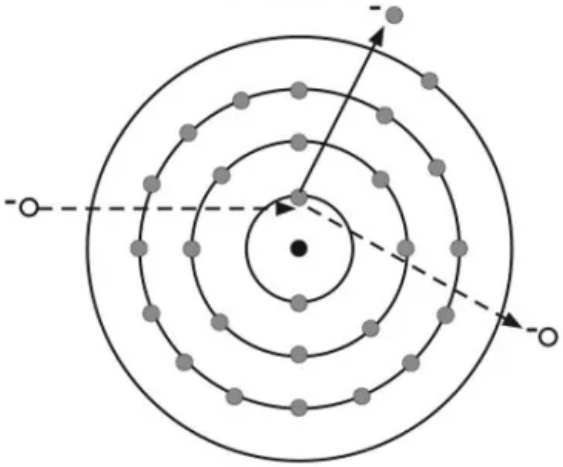
تُعدّ ظاهرتا التأيين والإثارة الكولومية أهمَّ العمليات المسيطرة. فإذا ساوت الطاقة المنتقلة فارقَ الطاقة بين مستويَين إلكترونيَّين، انتقل إلكترونٌ إلى مستوىً أقلّ ارتباطاً (**الإثارة**)، وغالباً ما يكون من الإلكترونات الخارجية ضعيفة الارتباط. أما إذا فاقت الطاقةُ المنتقلة طاقةَ ربط الإلكترون، فيُقذَف الإلكترون خارج الذرّة (**التأيين**)، وتتعرّض لذلك خاصةً إلكترونات الطبقة K شديدة الارتباط.

2.6.1 إشعاع الفرملة (Bremsstrahlung)

يحدث عند تفاعل جسيمٍ مشحون مع المجال الكولوني للنواة، وهو أكثر أهميةً للإلكترونات بسبب كتلتها الصغيرة. فعند انحراف الجسيم بفعل التجاذب الكهروستاتيكي للنواة، يُصدر إشعاعاً كهرومغناطيسياً يُعرف بإشعاع الفرملة أو الكبح. وتتعلّق هذه الظاهرة أساساً بالإلكترونات عالية الطاقة المارّة في أوساطٍ عالية الكثافة، ويتناسب فقدان الطاقة الإشعاعي تقريباً مع Z^2E.



شكل 11.1: ظاهرة الإثارة.



شكل 12.1: ظاهرة التأيين.

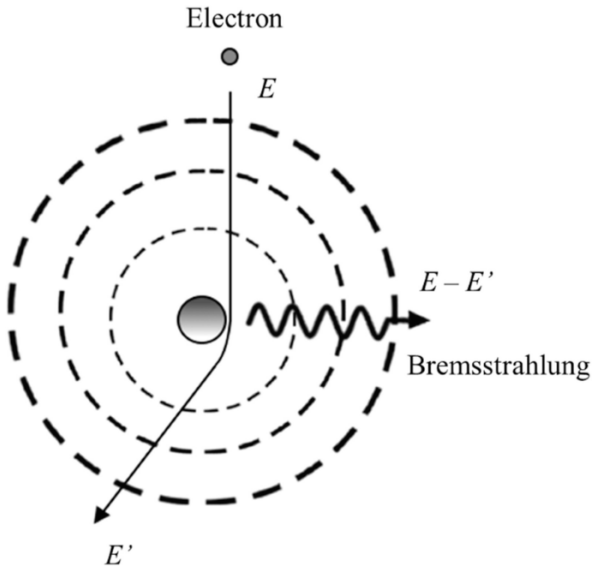
7.1 تطبيقات الإشعاع

يُستعمَل الإشعاع في مجالاتٍ متعدّدة كالطب والصناعة والبحث العلمي وإنتاج الطاقة.

1.7.1 التطبيقات الطبية

التشخيص. يُستعمَل الإشعاع في فحوصاتٍ تتدرّج من الأشعة السينية الروتينية إلى التصوير المقطعي المحوسب (CT) والطب النووي، حيث تُحقَن موادّ مشعّة لتصوير أعضاءٍ محدّدة أو دراسة وظائفها.

العلاج الإشعاعي. يعتمد على توجيه جرعاتٍ مرتفعة من الإشعاع المؤيِّن نحو منطقةٍ محدّدة بهدف القضاء على الخلايا السرطانية، ويُستعمَل كذلك في بعض الحالات كأمراض الشرايين التاجية.



شكل 13.1: تأثير إشعاع الفرملة.

2.7.1 التطبيقات الأخرى

الاتصالات. تُشكّل الإشعاعات الكهرومغناطيسية أساسَ أنظمة الاتصالات الحديثة، إذ تنقل الصوت والصور والبيانات عبر تعديل خصائص الموجة الكهرومغناطيسية.

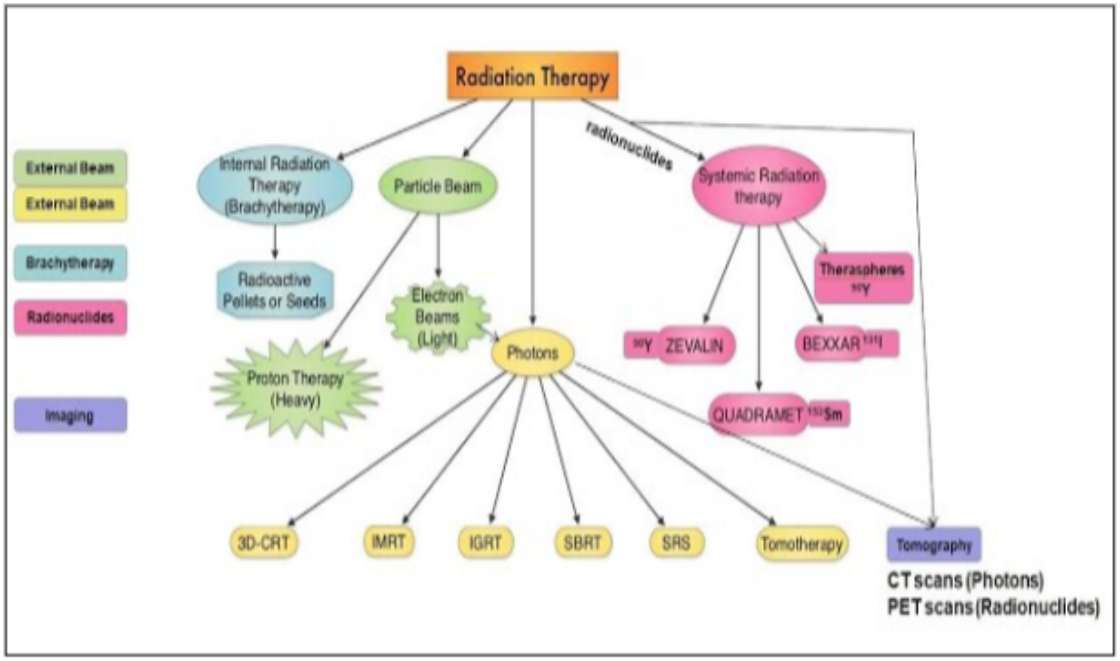
التطبيقات العلمية. تُستعمَل الذرات المشعّة في التأريخ بالكربون المشع (Radiocarbon Dating) والتأريخ الإشعاعي (Radiometric Dating)، وكذرّات متتبّعة لرصد الملوّثات، وفي تحليل التنشيط النيوتروني (Neutron Activation Analysis) لتحديد تركيب المواد.

8.1 التأثيرات البيولوجية للإشعاع

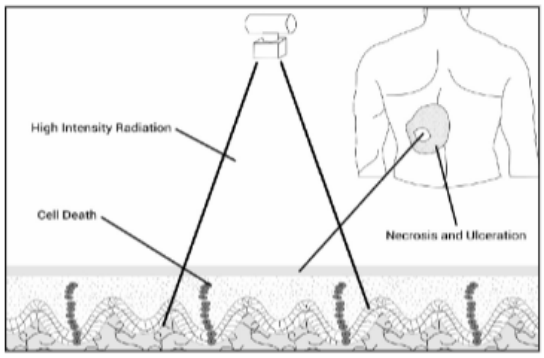
قد يُسبّب الإشعاع تأثيراتٍ ضارّة على الأنظمة البيولوجية تبعاً لنوع الإشعاع والجرعة الممتصّة ومدة التعرّض. وتُصنَّف التأثيرات الصحّية إلى حتمية واحتمالية.

1.8.1 التأثيرات الحتمية (Deterministic Effects)

وفق الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) [15]، التأثير الحتمي هو ما يحتاج إلى مستوىً معيّن من التعرّض (عتبة) قبل ظهوره، وتزداد شدّته بزيادة الجرعة. تنتج عن تلفٍ شديد للخلايا أو موتها عندما يكون عددُ الخلايا المتضرّرة كبيراً بما يكفي لإحداث خللٍ واضح في الأنسجة. وهي قصيرة المدى ومتوقّعة وقابلة للتكرار، ومن أمثلتها: الحروق الإشعاعية الجلدية، ومتلازمة الإشعاع الحادّة، وإعتام عدسة العين، والعقم.



شكل 14.1: استخدامات الإشعاع في الطب.

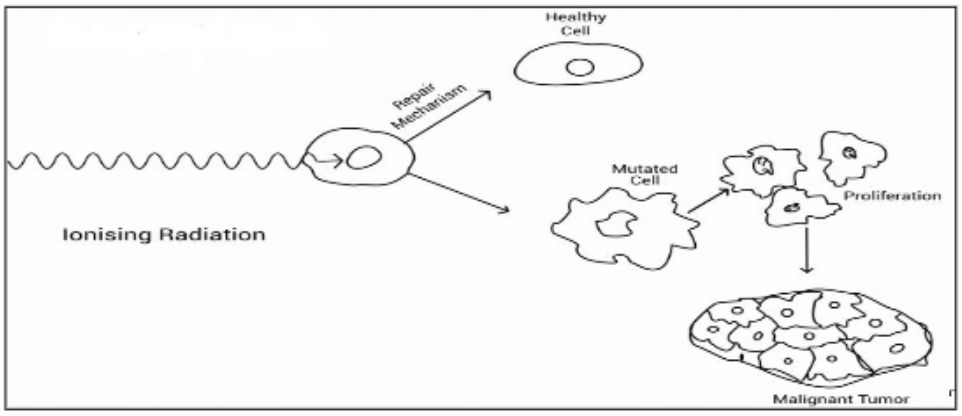


شكل 15.1: التأثيرات الحتمية.

2.8.1 التأثيرات الاحتمالية (Stochastic Effects)

على عكس الحتمية، تحدث التأثيرات الاحتمالية بشكلٍ عشوائي دون عتبةٍ واضحة، ويزداد احتمال ظهورها بزيادة الجرعة، بينما لا ترتبط شدّتُها مباشرةً بقيمة الجرعة. وقد تظهر بعد سنواتٍ من التعرّض، ويصعب ربطها مباشرةً بالتعرّض الإشعاعي لوجود عواملَ أخرى. ومن أمثلتها: السرطان، والتغيّرات الوراثية والجينية.

يُعدّ فهمُ هذه التأثيرات ضرورياً لتطبيق إجراءات الوقاية في الطب والصناعة والطاقة النووية، إذ يُسهم تقليلُ التعرّض وتطبيقُ بروتوكولات السلامة في الحدّ من المخاطر المرتبطة بالإشعاعات المؤيّنة.



شكل 16.1: التأثيرات الاحتمالية.

9.1 خلاصة

قدّم هذا الفصل أساساً شاملاً لفهم الطبيعة المتعدّدة للإشعاع، إذ عُرضت التصنيفات المختلفة (الإشعاعات الكهرومغناطيسية والجسيمية، المؤيّنة وغير المؤيّنة)، ودُرست الآليات الأساسية لتفاعل الإشعاع مع المادة – التأثير الكهروضوئي، وتشتّت كومبتون، وإنتاج الأزواج – التي تُحدّد سلوك الإشعاع وتأثيره عند مروره في المواد المختلفة.

كما اسْتُعرضت التطبيقات الواسعة للإشعاع في الطب والاتصالات والبحث العلمي، ودُرست تأثيراته البيولوجية الحتمية والاحتمالية. ويتّضح من ذلك أن فهم تفاعلات الإشعاع مع المادة خطوةٌ أساسية لفهم مبادئ الحماية الإشعاعية، وهو موضوعُ الفصل القادم الذي يتناول طرقَ ومواد الحماية المستعملة لتقليل المخاطر الناتجة عن التعرّض للإشعاعات المؤيّنة.

الفصل الثاني
أساسيات الحماية من الإشعاع

1.2 مقدمة

في عالمنا الحديث الذي يعتمد بشكلٍ متزايد على الإشعاع — سواءً في التصوير الطبي أو إنتاج الطاقة النووية — باتت السلامة الإشعاعية تتطلّب استراتيجيات فعّالةً للحماية. يهدف هذا الفصل إلى تقديم المبادئ الأساسية للحماية الإشعاعية ودراسة كيفية تفاعل المواد المختلفة مع الإشعاع.

في الفصل السابق عُرضت أهمّ آليات التفاعل: التأثير الكهروضوئي الذي يختفي فيه الفوتون بعد نقل كامل طاقته، وتشتّت كومبتون الذي يفقد فيه الفوتون جزءاً من طاقته. ومن خلال قياس هذا التوهين باستعمال معاملاتٍ مثل معامل التوهين الكتلي (MAC) وسمك نصف القيمة (HVL)، يمكن تصميم أنظمة حمايةٍ فعّالة توفّر بيئةً أكثر أماناً للعاملين والمتعرّضين للإشعاع.

2.2 تعريف الحماية من الإشعاع

الحماية من الإشعاع عمليةُ تقليلِ تأثير الإشعاع بوضع حاجزٍ من مادةٍ ماصّةٍ بين المصدر المشعّ وبين الشخص أو منطقة العمل أو الأجهزة الحساسة. ويُمكن للدرع المناسب أن يُقلّل بشكلٍ كبير من الجرعة الممتصّة أو يُزيلها كلياً.

تعتمد فعالية الحماية على عدّة عوامل، أهمّها: نوع الإشعاع المنبعث، ونشاط المصدر الإشعاعي، ومستوى الحماية المطلوب — الذي يُحدَّد عادةً بمعدّل الجرعة المسموح به خارج مادة الحماية. وبالتالي يعتمد اختيار وتصميم المادة الواقية على جميع هذه العوامل لإنشاء حاجزٍ فعّالٍ يحمي الإنسان والبيئة.

3.2 الجرعة الإشعاعية

تُشير الجرعة الإشعاعية إلى كمية الطاقة التي يُودِعها الإشعاع المؤيِّن في المادة، وهي مقياسٌ لكمية الإشعاع الممتصّة. وتوجد عدّة أنواع منها.

1.3.2 الجرعة الممتصّة (Absorbed Dose)

هي كمية الطاقة التي يُودِعها الإشعاع في كيلوغرامٍ واحدٍ من المادة:

$$D = \frac{dE}{dm} \tag{9}$$

حيث: D الجرعة الممتصّة، dE الطاقة الممتصّة، dm كتلة المادة. وحدتها في النظام الدولي هي الغراي (Gray, Gy)، حيث $1\,\mathrm{Gy} = 1\,\mathrm{J/kg}$، والوحدة القديمة هي الراد (rad)، والعلاقة بينهما:

$$1\,\mathrm{Gy} = 100\,\mathrm{rad} \tag{10}$$

2.3.2 الجرعة المكافئة (Equivalent Dose)

تأخذ بعين الاعتبار نوعية الإشعاع، أي مدى قدرته على إحداث ضررٍ بيولوجي [16, 17]، وتُحسَب بضرب الجرعة الممتصّة في معامل الترجيح الإشعاعي w_R:

$$H_T = w_R \, D_{T,R} \tag{11}$$

وعند وجود عدّة أنواعٍ من الإشعاع:

$$H_T = \sum_R w_R \, D_{T,R} \tag{12}$$

حيث: H_T الجرعة المكافئة، $D_{T,R}$ الجرعة الممتصّة من الإشعاع R في النسيج T، w_R معامل الترجيح الإشعاعي. وتُقاس بوحدة السيفرت (Sievert, Sv).

جدول 1.2: قيم معامل الترجيح الإشعاعي w_R.

نوع الإشعاع	w_R
أشعة غاما والأشعة السينية وبيتا	1
البروتونات	2
النيوترونات	5.2 -- 21
جسيمات ألفا والأيونات الثقيلة	20

3.3.2 الجرعة الفعّالة (Effective Dose)

تُحسَب بضرب الجرعة المكافئة في معامل ترجيح النسيج w_T [16] المرتبط بالعضو المعرّض، ثم بالجمع على جميع الأنسجة:

$$E = \sum_T w_T \, H_T \tag{13}$$

حيث: E الجرعة الفعّالة، H_T الجرعة المكافئة للنسيج T، w_T معامل ترجيح النسيج. وتُقاس أيضاً بالسيفرت.

جدول 2.2: قيم معاملات ترجيح الأنسجة w_T.

النسيج	w_T
نخاع العظم، القولون، المعدة، الرئة، الثدي، باقي الأنسجة	12.0
الغدد التناسلية	08.0
المثانة، المريء، الكبد، الغدة الدرقية	04.0
سطح العظام، الدماغ، الغدد اللعابية، الجلد	01.0

4.2 مواد الحماية من الإشعاع

صُمّمت مواد الحماية لوقاية الإنسان والأجهزة والبيئة [2] من التأثيرات الضارّة للإشعاعات المؤيّنة، وتُستعمَل في الطاقة النووية والتصوير الطبي والصناعات الفضائية وفيزياء الجسيمات. وتعتمد فعاليتها على ثلاثة عوامل رئيسية:

الكثافة: المواد الأعلى كثافةً توفّر توهيناً أفضل لزيادة عدد الذرات في وحدة الحجم.

العدد الذري Z: المواد ذات العدد الذري المرتفع أقدرُ على امتصاص الأشعة السينية وأشعة غاما.

نوع وطاقة الإشعاع: تختلف فعالية المادة حسب نوع الإشعاع ومجال طاقته.

1.4.2 مواد الحماية من الأشعة السينية وأشعة غاما

الرصاص (Pb): من أكثر المواد استعمالاً بسبب كثافته العالية ($\rho = 11.34\,\mathrm{g/cm^3}$) وعدده الذري المرتفع ($Z = 82$)، ويُستعمَل في غرف الأشعة والطب النووي والدروع الواقية. لكنّ سُمّيته وتأثيره البيئي السلبي دفعا للبحث عن بدائلَ أكثر أماناً.

الخرسانة: متوفّرة ورخيصة، تُستعمَل خاصةً مع الأشعة منخفضة الطاقة، وتعتمد فعاليتها على كثافتها القابلة للتحسين بإضافة موادّ ذات عددٍ ذري مرتفع.

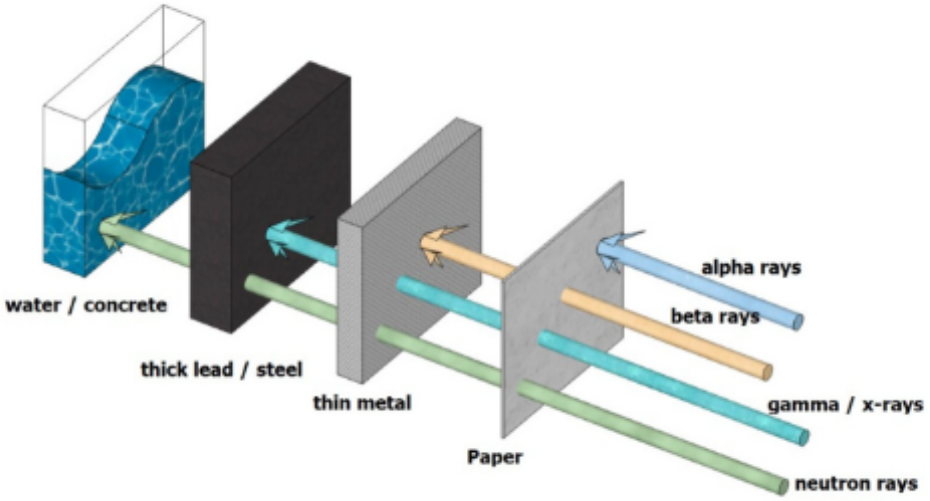
التنغستن (W): كثافته أكبر من الرصاص ($\rho \approx 19.3\,\mathrm{g/cm^3}$) وعدده الذري مرتفع ($Z = 74$)، يوفّر حمايةً ممتازة ضد أشعة غاما عالية الطاقة، لكن تكلفته المرتفعة تحدّ من استعماله.

اليورانيوم المنضب: قدرةٌ عالية جداً على الحماية لكثافته ($\rho = 19.05\,\mathrm{g/cm^3}$) وعدده الذري الكبير ($Z = 92$)، لكن نشاطه الإشعاعي يستوجب إجراءاتٍ صارمة.

2.4.2 الحماية من إشعاعات ألفا وبيتا والنيوترونات

جسيمات ألفا أقلّ الإشعاعات اختراقاً، توقفها ورقةٌ عادية. أما بيتا فأكثر اختراقاً، تُمتَصّ ببضعة مليمترات من الألمنيوم، وتُستعمَل لبيتا عالية الطاقة موادُّ ذات عددٍ ذري منخفض (البلاستيك، الخشب، الماء، الأكريليك) لتجنّب إنتاج إشعاع الفرملة.

تختلف حماية النيوترونات إذ لا تزداد الفعالية بالضرورة مع العدد الذري؛ فتُستعمَل موادّ كالبورون والكادميوم لامتصاصها، والماء والبولي إيثيلين وشمع البارافين لإبطائها وامتصاصها. وقد يُسبّب امتصاصُ النيوترونات تنشيطاً نيوترونياً يحوّل النواةَ إلى نظيرٍ مشعّ، مُحدِثاً خطراً إشعاعياً ثانوياً.



شكل 1.2: مواد الحماية من الإشعاع وقدرات اختراق الإشعاعات المختلفة.

5.2 معاملات الحماية الإشعاعية

تُحدِّد معاملاتُ الحماية الإشعاعية مدى فعالية المواد في الوقاية من الإشعاعات المؤيِّنة، وهي ضرورية عند تصميم أنظمة الحماية. ونُفصّل فيما يلي المعاملاتِ الأساسية المستعمَلة في هذه الدراسة، ثم نُجمِل المعاملاتِ المتقدّمة في القسم 11.5.2.

1.5.2 الكتلة الجزيئية المتوسطة (AMW)

هي مجموع كتل الجزيئات مقسوماً على عددها الكلي:

$$\mathrm{AMW} = \sum_i x_i M_i \tag{14}$$

حيث: x_i النسبة المولية للمركّب i، M_i كتلته الجزيئية (g/mol).

2.5.2 معامل التوهين الخطي (LAC)

معامل التوهين الخطي μ ثابتٌ يصف الجزء من الفوتونات الساقطة الذي يُوهَّن لكلّ وحدة سماكةٍ من المادة، مع الأخذ بكل أنواع التفاعلات (التشتّت المتماسك، وكومبتون، والكهروضوئي). يخضع توهين شدّة الحزمة للقانون الأُسّي [12, 13]:

$$I = I_0\, e^{-\mu x} \tag{15}$$

حيث: I الشدّة عند العمق x، I_0 الشدّة الابتدائية، μ معامل التوهين الخطي (cm^{-1}). وبأخذ اللوغاريتم:

$$\mu = \frac{1}{x}\,\ln\!\left(\frac{I_0}{I}\right) \tag{16}$$

يزداد μ بزيادة العدد الذري والكثافة، ويتناقص بزيادة طاقة الفوتون عموماً، عدا قفزاتٍ مفاجئة عند طاقات ربط إلكترونات الطبقة K (حواف الامتصاص).

3.5.2 معامل التوهين الكتلي (MAC)

يُعرَف أيضاً بمعامل الامتصاص الكتلي، وهو معامل التوهين الخطي مقسوماً على كثافة المادة، مما يُلغي اعتماده على الحالة الفيزيائية:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho x}\,\ln\!\left(\frac{I_0}{I}\right) \tag{17}$$

ووحدته cm^2/g. وفي المركّبات والخلائط يُحسَب بقاعدة الجمع المرجّح بالكسور الوزنية w_i:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\mathrm{mix}} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \tag{18}$$

4.5.2 سمك نصف القيمة (HVL)

سماكة المادة اللازمة لتخفيض شدّة الحزمة إلى نصف قيمتها الأصلية. بوضع $I = I_0/2$ في العلاقة (15):

$$\mathrm{HVL} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \tag{19}$$

5.5.2 سمك عُشر القيمة (TVL)

السماكة اللازمة لتخفيض الشدّة إلى عُشر قيمتها الأصلية. بوضع $I = I_0/10$:

$$\mathrm{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2.303}{\mu} \tag{20}$$

6.5.2 متوسط المسار الحر (MFP)

متوسط المسافة التي يقطعها الفوتون بين تصادمَين متتاليَين، ويُعطى بمقلوب معامل التوهين الخطي:

$$\mathrm{MFP} = \frac{1}{\mu} \tag{21}$$

المادة التي سماكتها مسارٌ حرٌّ متوسطٌ واحد ($x = 1/\mu$) تسمح بنفاذ نحو 37 % من الفوتونات (إذ $e^{-1} \approx 0.37$)، أي أنها تُوهِّن نحو 63 % منها.

7.5.2 المقطعان العرضيان الذري والإلكتروني (ACS, ECS)

المقطع العرضي الذري σ_a احتمالُ حدوث تفاعلٍ بين الفوتون والذرّة، وله أبعاد المساحة (cm^2 أو barn):

$$\sigma_a = \frac{1}{N_A}\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\mathrm{AMW} \tag{22}$$

أما المقطع العرضي الإلكتروني σ_e فيُحسَب بقسمة الذري على العدد الذري الفعّال:

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A}\sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i}\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \tag{23}$$

حيث: N_A عدد أفوغادرو، f_i النسبة المولية، A_i الكتلة الذرية، Z_i العدد الذري.

8.5.2 العدد الذري الفعّال (Zeff)

مفهومٌ مشابهٌ للعدد الذري لكنه يُستعمَل للمركّبات والخلائط بدل العناصر النقية. يُحسَب من نسبة المقطعَين العرضيَّين الذري والإلكتروني:

$$Z_{\mathrm{eff}} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} \tag{24}$$

ويُعدّ معامِلاً حاسماً في تقييم كفاءة التدريع، إذ ترتبط فعاليةُ الامتصاص ارتباطاً وثيقاً بقيمته.

9.5.2 الكثافة الإلكترونية الفعّالة (Neff)

عدد الإلكترونات لكل وحدة كتلةٍ من المادة، ويُعطى للخلائط بـ:

$$N_{\mathrm{eff}} = \frac{N_A\, Z_{\mathrm{eff}}}{\langle A \rangle} = \frac{\mu/\rho}{\sigma_e} \tag{25}$$

حيث: $\langle A \rangle$ متوسط الكتلة الذرية للمادة. وتُقاس بوحدة electrons/g.

10.5.2 المقطع العرضي لإزالة النيوترونات السريعة (FNRCS)

يصف توهينَ النيوترونات السريعة، ويمثّل احتمالَ التفاعل الأول للنيوترون في المادة. في المركّبات والخلائط يُعطى بـ:

$$\Sigma_R = \sum_i \rho_i \left(\frac{\Sigma_R}{\rho}\right)_i \tag{26}$$

حيث: ρ_i الكثافة الجزئية للمكوّن i، $(\Sigma_R/\rho)_i$ مقطعه الكتلي لإزالة النيوترونات (cm^2/g)، وΣ_R بوحدة cm^{-1}.

11.5.2 المعاملات المتقدّمة

إلى جانب المعاملات السابقة، توجد معاملاتٌ متقدّمةٌ تُستعمَل في الدراسات المعمّقة، نُجملها فيما يلي دون تفصيلٍ لخروجها عن النطاق الأساسي لهذه الدراسة:

العدد الذري المكافئ (Z_{eq}): معاملٌ يعتمد على الطاقة، يُستعمَل لوصف خصائص المادة بمقارنتها بعناصرَ مكافئة، ويدخل في حساب عوامل التراكم.

عامل تراكم التعرّض (EBF): يصف الزيادةَ في التعرّض الناتجة عن التشتّت المتعدّد للفوتونات داخل المادة.

عامل تراكم امتصاص الطاقة (EABF): يشبه السابق لكنه يركّز على الزيادة في امتصاص الطاقة.

معاملات GP الخمسة (a, b, c, d, X_k): تُستعمَل في طريقة المتتالية الهندسية (Geometric Progression) لحساب عاملَي التراكم، وتعتمد على Z_{eq} وطاقة الفوتونات.

6.2 خلاصة

تناول هذا الفصل المبادئَ الأساسية للحماية من الإشعاع، فعُرض مفهومُ التوهين وآلياتُ تفاعل الإشعاع مع المواد، ودُرست أنواعُ الجرعات الإشعاعية (الممتصّة والمكافئة والفعّالة)، إضافةً إلى أهمّ معاملات الحماية: معامل التوهين الخطي والكتلي، وسمك نصف القيمة وعُشرها، ومتوسط المسار الحر، والعدد الذري الفعّال، والكثافة الإلكترونية، ومقطع إزالة النيوترونات.

كما دُرست خصائصُ مواد الحماية المختلفة وتأثيرُ الكثافة والعدد الذري ونوع الإشعاع في كفاءتها. ويتّضح من ذلك أنه لا توجد مادةٌ واحدةٌ مثالية لجميع أنواع الإشعاع، بل يعتمد اختيارها على طبيعة التطبيق ونوع الإشعاع ومستوى الحماية المطلوب. وسيُخصَّص الفصلُ القادم لدراسة الزجاج وبرامج المحاكاة المستعمَلة في تصميم وتحليل مواد الحماية الإشعاعية.

الفصل الثالث
زجاج البورات، النماذج النظرية، وبرنامج Phy-X/PSD

1.3 مقدمة

دُرست في الفصل السابق المبادئُ الأساسية للحماية من الإشعاع، مع التركيز على معاملات التوهين وخصائص مواد التدريع. وتبيّن أن كفاءة مادة الحماية تعتمد أساساً على الكثافة والعدد الذري والتركيب الكيميائي ونوع الإشعاع وطاقته.

في العقود الأخيرة، لم يَعُد الرصاص المادةَ الوحيدة المستعمَلة في الحماية الإشعاعية بسبب سُمّيته وتأثيره البيئي وصعوبة التخلّص من نفاياته. لذا اتّجهت الأبحاثُ نحو موادّ جديدةٍ تجمع بين الفعالية الإشعاعية المرتفعة والشفافية البصرية والاستقرار الكيميائي والتأثير البيئي الأقل. ومن أبرزها الزجاجيات المحتوية على الأكاسيد الثقيلة والمطعَّمة بالعناصر الأرضية النادرة.

يتناول هذا الفصل: نظرةً عامة على الزجاج وأنواعه، والزجاجياتِ الواقية من الإشعاع، ودورَ أكسيد البزموت وأكسيد الساماريوم، والنماذجَ النظرية لحساب الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والبصرية، وأخيراً برنامجَ Phy-X/PSD ومنهجيةَ الدراسة.

2.3 نظرة عامة حول الزجاج

1.2.3 تعريف الزجاج

الزجاج مادةٌ صلبةٌ غير متبلورة (Amorphous Material) تنتج عن تبريد المصهور بسرعةٍ تمنع الذرات من الانتظام في شبكةٍ بلوريةٍ دورية. وعلى عكس المواد البلورية، لا يمتلك الزجاج ترتيباً ذرياً طويل المدى ولا درجةَ انصهارٍ ثابتة، بل ينتقل تدريجياً من الحالة الصلبة إلى اللزجة مع ارتفاع الحرارة. ويتميّز بتماثل الخواص (Isotropy)، أي تساوي خواصه الفيزيائية في جميع الاتجاهات.

2.2.3 الخصائص العامة للزجاج

يمتلك الزجاج خصائصَ جعلته مادةً أساسية في التطبيقات الصناعية والطبية، أهمّها: الشفافية العالية، ومقاومة التآكل الكيميائي، والاستقرار الحراري، وسهولة التشكيل، والعزل الكهربائي، وإمكانية تعديل خصائصه

بإضافة الأكاسيد. لكنه يتميّز أيضاً بالهشاشة (Brittleness)، إذ ينكسر عند الإجهادات الميكانيكية المرتفعة.

3.2.3 الانتقال الزجاجي (Glass Transition)

عند تبريد المصهور بسرعة، لا تتمكّن الذرات من ترتيب نفسها في بنيةٍ بلورية منتظمة، فيتكوّن الزجاج. وتُعرف منطقة الانتقال من السائل فوق المبرَّد (Supercooled Liquid) إلى الحالة الزجاجية باسم الانتقال الزجاجي (Glass Transition)، وتُعدّ درجةُ حرارته من أهمّ الخصائص الفيزيائية للمواد الزجاجية.

4.2.3 أنواع الزجاج

يُصنَّف الزجاج حسب تركيبه الكيميائي إلى أنواعٍ رئيسية:

الزجاج الأكسيدي (Oxide Glass): الأكثر انتشاراً، يتكوّن أساساً من أكاسيد ذات روابطَ أيونية-تساهمية تكوّن شبكاتٍ ثلاثية الأبعاد مستقرّة. يتميّز بالاستقرار الكيميائي والشفافية والمقاومة البيئية وسهولة التصنيع. وتمتلك الزجاجيات الأكسيدية الثقيلة معاملاتِ انكسارٍ مرتفعةً وخصائصَ ممتازةً للحماية الإشعاعية.

الزجاج الهاليدي (Halide Glass): يتكوّن من الهالوجينات مع عناصرَ ثقيلة (الزركونيوم، الباريوم، الهافنيوم). خصائصه البصرية ممتازة وانتقاله للأشعة تحت الحمراء عالٍ، لكن مقاومته الكيميائية ضعيفة وقابليته للتبلور مرتفعة.

الزجاج الكالكوجيني (Chalcogenide Glass): يتكوّن أساساً من الكبريت والسيلينيوم والتيلوريوم، ويُستعمَل في الألياف البصرية والأجهزة تحت الحمراء والتطبيقات البصرية المتقدّمة.

3.3 الزجاج المستعمَل في الحماية الإشعاعية

يؤدي الزجاج دوراً مهماً في الحماية من الإشعاع في المستشفيات والمخابر النووية والنوافذ الواقية وغرف التصوير بالأشعة، نظراً لشفافيته وإمكانية تحسين خصائصه الإشعاعية بإضافة الأكاسيد الثقيلة.

الزجاج العادي. يمتلك الزجاج السيليكاتي العادي قدرةً محدودة على الحماية بسبب انخفاض كثافته وعدده الذري الفعّال، فيُستعمَل فقط مع الإشعاعات منخفضة الطاقة أو كطبقةٍ أوّلية في أنظمة الحماية متعدّدة الطبقات.

الزجاج المحتوي على الأكاسيد الثقيلة. تؤدي إضافةُ الأكاسيد الثقيلة إلى زيادة الكثافة ورفع العدد الذري الفعّال وتحسين امتصاص أشعة غاما والأشعة السينية. ومن أهمّها أكسيد الرصاص (PbO) المُستعمَل

لسنواتٍ طويلة لكنّ مشاكله البيئية دفعت للبحث عن بدائل، وأكسيد البزموت (Bi_2O_3) الذي يُعدّ من أفضل البدائل الحديثة لارتفاع عدده الذري ($Z = 83$) وانخفاض سُمّيته.

1.3.3 دور أكسيد البزموت (Bi_2O_3)

تؤدي إضافةُ Bi_2O_3 إلى زيادة الكثافة ورفع معامل التوهين وزيادة العدد الذري الفعّال، ومن ثَمّ تحسين الحماية ضد أشعة غاما. ويُعزى ذلك إلى العدد الذري المرتفع للبزموت ($Z = 83$) الذي يُعزّز التأثير الكهروضوئي عند الطاقات المنخفضة.

2.3.3 الزجاج المطعَّم بالعناصر الأرضية النادرة

أصبحت العناصرُ الأرضية النادرة تُستعمَل واسعاً لتحسين الخصائص البصرية والفيزيائية والإشعاعية للزجاجيات، عبر آلياتٍ عدّة:

زيادة التأثير الكهروضوئي: إذ ترفع العناصرُ ذات العدد الذري المرتفع احتمالَ امتصاص الفوتونات (التأثير الكهروضوئي يتناسب تقريباً مع Z^{4-5}).

التقاط النيوترونات: إذ تمتلك بعض العناصر (كالغادولينيوم والساماريوم) مقاطعَ امتصاصٍ نيوترونيةً مرتفعة.

تعديل الكثافة الإلكترونية: مما يؤثّر في سلوك تشتّت الفوتونات.

أكسيد الساماريوم (Sm_2O_3). يُعدّ من أهمّ الأكاسيد الأرضية النادرة في الزجاجيات الواقية. يمتلك الساماريوم عدداً ذرياً $Z = 62$ وخصائصَ امتصاصٍ جيدة للفوتونات، فضلاً عن مقطعٍ عرضي استثنائي لامتصاص النيوترونات الحرارية للنظير ^{149}Sm. وتؤدي إضافتُه إلى تحسين الاستقرار البنيوي وزيادة الكثافة ورفع العدد الذري الفعّال وتحسين الحماية الإشعاعية.

4.3 النماذج النظرية لحساب الخصائص

تُتيح النماذجُ النظرية استنتاجَ الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والبصرية للزجاج انطلاقاً من تركيبه الكيميائي، دون الحاجة إلى قياساتٍ تجريبية. نعرض فيما يلي النماذجَ المعتمَدة في هذه الدراسة.

1.4.3 الكثافة والحجم المولي

تُحسَب الكثافة النظرية لخليط الأكاسيد بقاعدة التراكيب الوزنية المعيارية [18]:

$$\rho_{\text{th}} = \frac{\sum_i x_i M_i}{\sum_i \frac{x_i M_i}{\rho_i}} \tag{27}$$

ويُعرَّف الحجم المولي بـ:

$$V_m = \frac{\sum_i x_i M_i}{\rho_{\text{th}}} \tag{28}$$

حيث: x_i النسبة المولية، M_i الكتلة المولية (g/mol)، ρ_i كثافة الأكسيد النقي (g/cm^3).

2.4.3 الخواص الميكانيكية — نموذج ماكيشيما-ماكنزي

يُقدّر معامل يونغ E انطلاقاً من طاقة تفكك الروابط الكلية G_t وعامل التعبئة الذري V_t [19]:

$$G_t = \sum_i w_i\, G_i, \qquad V_t = \frac{1}{V_m}\sum_i x_i V_i \tag{29}$$

$$E = 2\, V_t\, G_t \times 4.184 \tag{30}$$

حيث: w_i الكسر الوزني، G_i طاقة تفكك روابط الأكسيد (kcal cm^{-3})، V_i حجمه الذري المولي $(\text{cm}^3\,\text{mol}^{-1})$، والضرب في 4.184 لتحويل الوحدات إلى GPa.

3.4.3 الخواص البصرية وفجوة الطاقة

يُحسَب معامل الانكسار n بمعادلة لورنتز-لورنز [18]:

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = \frac{R_m}{V_m} \tag{31}$$

حيث الانكسارية المولية الكلية $R_m = \sum_i x_i R_i$. وتُحسَب فجوة الطاقة البصرية E_g بنموذج ديميتروف-ساكا [20]:

$$E_g = 20\left(1 - \frac{n^2-1}{n^2+2}\right) \tag{32}$$

5.3 برنامج Phy-X/PSD

تُستعمَل البرامجُ الحاسوبية واسعاً لدراسة الخصائص الإشعاعية للمواد بفضل دقّتها العالية وتقليلها للتكاليف وسهولة دراستها مجالاتٍ طاقيةً واسعة.

1.5.3 تعريف البرنامج وآلية عمله

Phy-X/PSD منصّةٌ إلكترونيةٌ متخصّصة في حساب معاملات التوهين والعدد الذري الفعّال وعوامل التراكم [21]. يعتمد البرنامج على قاعدة بيانات NIST XCOM المرجعية لمقاطع التفاعل بين الفوتونات والعناصر، ويُتيح إدخالَ التركيب الكيميائي (بالنسبة المولية أو الوزنية) وحساب المعاملات الإشعاعية عبر مجالٍ طاقي واسع.

من أهمّ المعاملات التي يحسبها: معامل التوهين الكتلي (MAC) والخطي (LAC)، وسمك نصف القيمة (HVL)، ومتوسط المسار الحر (MFP)، والعدد الذري الفعّال (Z_{eff})، والكثافة الإلكترونية، ومقطع إزالة النيوترونات السريعة، وعوامل التراكم.

2.5.3 قاعدة بيانات XCOM

قاعدة NIST XCOM Database توفّر معاملاتِ التفاعل بين الفوتونات والعناصر أو المركّبات ضمن مجالٍ واسعٍ من الطاقات، وتُعدّ مرجعاً عالمياً في الفيزياء الطبية والحماية الإشعاعية.

3.5.3 برامج محاكاة أخرى

إلى جانب Phy-X/PSD، توجد برامجُ محاكاةٍ أخرى نذكرها بإيجاز: FLUKA وMCNP، وكلاهما يعتمد على طريقة مونت كارلو (Monte Carlo) لمحاكاة انتقال الجسيمات وتفاعلات الإشعاع في الأوساط المختلفة، ويتميّزان بدقّةٍ عالية وإمكانية دراسة هندساتٍ معقّدة، لكنهما أكثرُ تعقيداً وكلفةً حسابيةً من Phy-X/PSD الذي يكفي لأغراض هذه الدراسة.

6.3 منهجية الدراسة

1.6.3 التراكيب الزجاجية المدروسة

دُرست منظومةٌ زجاجية من خمس عيّناتٍ بالصيغة المولية:

$$(x)\,Sm_2O_3 - (40-x)\,Bi_2O_3 - 60\,B_2O_3, \quad x = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ 4\ (\text{mol}\%) \qquad (33)$$

بحيث يُستبدَل أكسيد البزموت تدريجياً بأكسيد الساماريوم مع تثبيت نسبة B_2O_3 عند 60 %. يُلخّص الجدول 1.3 رموزَ العيّنات وتراكيبها.

2.6.3 خطوات العمل

اتُّبعت الخطواتُ التالية في إنجاز الدراسة:

1. حساب الكثافة النظرية والحجم المولي لكل عيّنةٍ بالعلاقتَين (27) و(28).

جدول 1.3: رموز العيّنات الزجاجية المدروسة وتراكيبها المولية.

الرمز	x	(%) B_2O_3	(%) Bi_2O_3	(%) Sm_2O_3
S1	0	60	40	0
S2	1	60	39	1
S3	2	60	38	2
S4	3	60	37	3
S5	4	60	36	4

2. إدخال التراكيب الكيميائية والكثافات المحسوبة في برنامج Phy-X/PSD.
3. تحديد المجال الطاقي للدراسة، الذي يغطّي نطاق الأشعة السينية التشخيصية وأشعة غاما.
4. استخراج معاملات الحماية الإشعاعية (Z_{eff}, MFP, TVL, HVL, LAC, MAC, الكثافة الإلكترونية, FNRCS) لكل عيّنة.
5. حساب الخصائص الميكانيكية والبصرية بالنماذج النظرية (المعادلات (29)--(32)).
6. تحليل العلاقة بين التركيب الكيميائي والخصائص المدروسة، ومقارنة النتائج بزجاج الرصاص والمواد المرجعية.

7.3 خلاصة

تناول هذا الفصل الزجاجَ وأنواعه والزجاجياتِ الواقية من الإشعاع، ودورَ أكسيد البزموت وأكسيد الساماريوم في تحسين الكثافة والعدد الذري الفعّال ومعاملات التوهين. كما عُرضت النماذجُ النظرية لحساب الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والبصرية، وبرنامجُ Phy-X/PSD المعتمِد على قاعدة بيانات NIST XCOM، إضافةً إلى منهجية الدراسة وتراكيب العيّنات الخمس وخطوات العمل.

وستُعرَض في الفصل القادم النتائجُ المُحصَّل عليها ومناقشتُها، بدءاً من الخصائص البنائية والميكانيكية والبصرية، ووصولاً إلى بارامترات الحماية الإشعاعية عبر مختلف الطاقات ومقارنتها بزجاج الرصاص.

الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

1.4 مقدمة

يَعرِض هذا الفصل النتائجَ المُحصَّل عليها لمنظومة الزجاج $(x)Sm_2O_3-(40-x)Bi_2O_3-60B_2O_3$ ويناقشها مناقشةً معمّقة في ضوء الأدبيات المنشورة. تنقسم النتائج إلى محورَين: الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والبصرية المحسوبة بالنماذج النظرية، وبارامترات الحماية الإشعاعية المستخرجة من برنامج Phy-X/PSD عبر مجالٍ طاقي يمتدّ من $0.015\,\mathrm{MeV}$ إلى $15\,\mathrm{MeV}$. وتُقارَن النتائجُ في كل محورٍ بدراساتٍ مماثلة على أنظمة زجاج البورات-البزموت المطعَّمة بالأكاسيد الثقيلة والعناصر الأرضية النادرة.

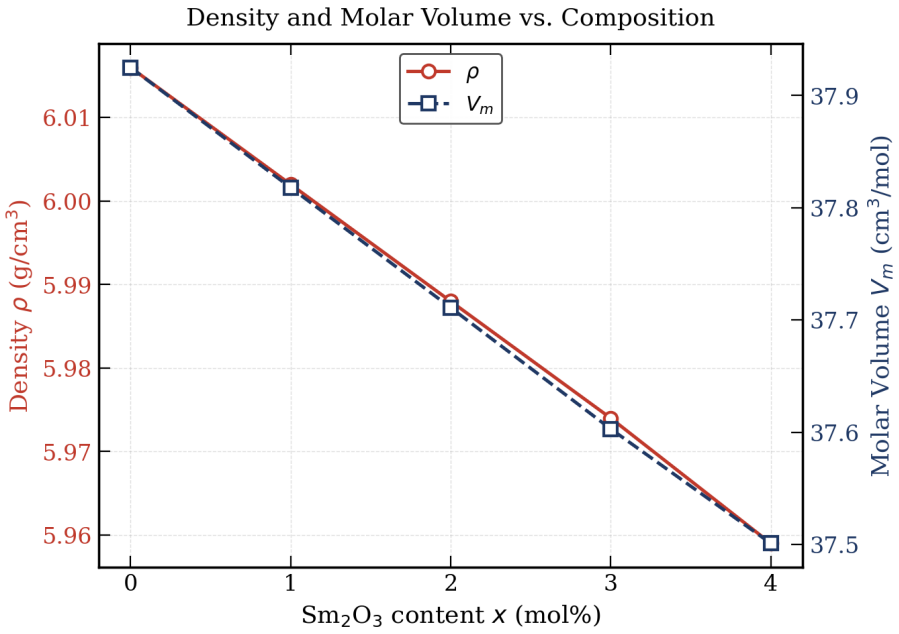
2.4 الخصائص البنائية: الكثافة والحجم المولي

جدول 1.4: الكتلة الجزيئية المتوسطة والكثافة والحجم المولي للعيّنات.

الرمز	x	**AMW** $(\mathrm{g\,mol^{-1}})$	ρ $(\mathrm{g\,cm^{-3}})$	V_m $(\mathrm{cm^3\,mol^{-1}})$
S1	0	228.1557	6.016	37.925
S2	1	226.9833	6.002	37.818
S3	2	225.8109	5.988	37.711
S4	3	224.6385	5.974	37.603
S5	4	223.4661	5.959	37.501

تنخفض الكثافة انخفاضاً خطياً منتظماً من $6.016\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$ عند $x=0$ إلى $5.959\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$ عند $x=4$ (الشكل 1.4). ويُعزى ذلك إلى أن الكتلة المولية لأكسيد الساماريوم $(348.72\,\mathrm{g\,mol^{-1}})$ أقلُّ من نظيرتها لأكسيد البزموت $(465.96\,\mathrm{g\,mol^{-1}})$، فيُؤدّي إحلالُ البزموت بالساماريوم إلى تقليص الكتلة الكلية للمنظومة.

يتناقص الحجم المولي بدوره من $37.925\,\mathrm{cm^3\,mol^{-1}}$ إلى $37.501\,\mathrm{cm^3\,mol^{-1}}$. وهذا التناقص المتزامن في الكثافة والحجم المولي يستحقّ تفسيراً دقيقاً: إذ إن الكثافة لا تُحدَّد بالكتلة وحدها بل بنسبة الكتلة إلى الحجم.



شكل 1.4: تغيّر الكثافة (ρ) والحجم المولي (V_m) بدلالة نسبة Sm_2O_3.

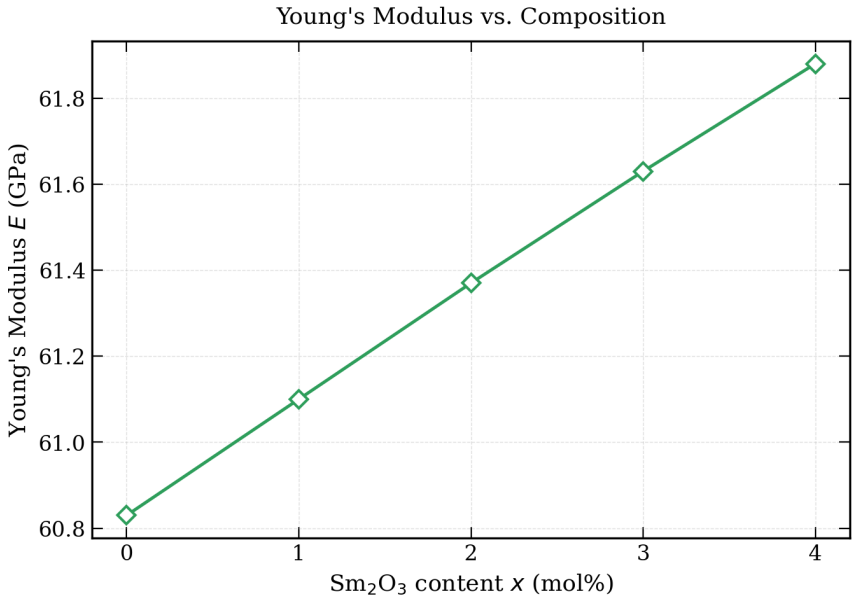
وبما أن نصف القطر الأيوني لـSm^{+3} (نحو 0.958 Å) أصغرُ من نصف قطر Bi^{+3} (نحو 1.03 Å)، فإن إحلالَ الساماريوم يُقلّص الحجمَ المتاح للأيون، مُحدِثاً انكماشاً في الشبكة وزيادةً في تراصّها رغم انخفاض الكثافة الكلية.

يتوافق هذا السلوك مع ما رُصد في أنظمةٍ مماثلة. ففي دراسةٍ على زجاج البورات المطعَّم بأكسيد الأنتيموان، وُجد أن زيادة محتوى المُطعِّم ترفع الكثافة وتُقلّص الحجم المولي مكوِّنةً شبكةً أكثر تراصاً [22]. والفرق في حالتنا أن الكثافة تنخفض (لا ترتفع) لأن الساماريوم أخفّ من البزموت المُستبدَل، بينما يتناقص الحجم المولي في الحالتَين بفعل الانكماش البنيوي، وهو اتساقٌ منهجي يؤكّد سلامة النتائج.

3.4 الخصائص الميكانيكية

جدول 2.4: معامل يونج المحسوب بنموذج ماكيشيما-ماكنزي.

الرمز	x	G_t (kcal cm^{-3})	V_t	E (GPa)
S1	0	15.0382	0.4834	60.83
S2	1	15.1934	0.4806	61.10
S3	2	15.3502	0.4777	61.37
S4	3	15.5087	0.4749	61.63
S5	4	15.6688	0.4720	61.88



شكل 2.4: تغيّر معامل يونج بدلالة نسبة Sm_2O_3.

يتصاعد معامل يونج تصاعداً منتظماً من 60.83 GPa إلى 61.88 GPa (الشكل 2.4). والمُلاحَظ أن طاقة التفكك الكلية G_t ترتفع بوضوح مع x (من 15.04 إلى 15.67 $\mathrm{kcal\,cm^{-3}}$)، بينما ينخفض عاملُ التعبئة V_t انخفاضاً طفيفاً (من 0.483 إلى 0.472). والمحصّلة زيادةٌ صافية في $E = 2V_tG_t$، إذ يَغلِب أثرُ ارتفاع G_t على أثر انخفاض V_t.

يُعزى ارتفاع G_t إلى أن روابط Sm--O تحمل طاقةَ تفككٍ أعلى من روابط Bi--O ($G_{Sm_2O_3} \approx 20.40\,\mathrm{kcal\,cm^{-3}}$ مقابل $G_{Bi_2O_3} = 11.49\,\mathrm{kcal\,cm^{-3}}$). وبالتالي فإن إحلالَ الساماريوم محلَّ البزموت يُحسّن المتانةَ الميكانيكية، وهي ميزةٌ عملية مهمة في تطبيقات الدروع التي تتعرّض لإجهاداتٍ ميكانيكية.

تقع قيمُ معامل يونج المحسوبة 60.8 GPa إلى 61.9 GPa ضمن النطاق المُبلَّغ عنه لزجاج البورات-البزموت في الأدبيات من 50 GPa إلى 70 GPa، مما يدعم معقوليةَ التقدير النظري وفق نموذج ماكيشيما-ماكنزي.

4.4 الخصائص البصرية وفجوة الطاقة

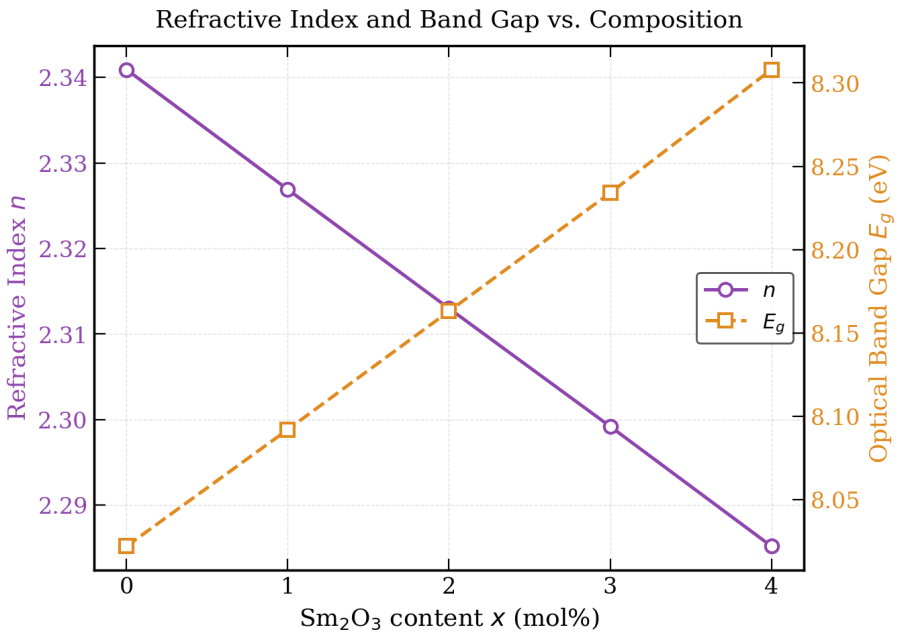
يتناقص معامل الانكسار من $n = 2.341$ إلى $n = 2.285$، بينما ترتفع فجوة الطاقة البصرية من 8.022 eV إلى 8.308 eV (الشكل 3.4). والعلاقة بينهما عكسيةٌ مُتوقَّعة من نموذج ديميتروف-ساكا، إذ يرتبط n وE_g بالمقدار نفسه R_m/V_m. ويُعزى تناقص n إلى أن أكسيد البزموت يمتلك انكساريةً مولية عالية جداً (لقابلية استقطاب أيون Bi^{+3} الكبيرة)، فإحلالُه بالساماريوم الأقلّ استقطابيةً يُخفّض الانكسارية الكلية ومعها معامل الانكسار.

يتطابق هذا الاتجاه عكسياً مع نظام الأنتيموان-بورات، حيث أدّت زيادةُ المُطعِّم الثقيل إلى رفع معامل الانكسار وخفض فجوة الطاقة [22]. وفي حالتنا، بما أننا نُزيل المُطعِّم الأثقل (البزموت) لصالح الأخفّ

(الساماريوم)، ينعكس الاتجاه: ينخفض n وتتّسع E_g — وهو اتساقٌ فيزيائي يؤكّد صحّة النموذج المُطبَّق. ويُعدّ اتساعُ فجوة الطاقة مؤشراً على تحوّل الزجاج نحو سلوكٍ عازلٍ أكثر وتحسّن شفافيته البصرية، وهي خاصيةٌ مرغوبة في نوافذ المراقبة الشفافة.

جدول 3.4: معامل الانكسار وفجوة الطاقة البصرية للعيّنات.

الرمز	x	n	E_g (eV)
S1	0	2.3409	8.022
S2	1	2.3269	8.092
S3	2	2.3130	8.163
S4	3	2.2992	8.234
S5	4	2.2852	8.308



شكل 3.4: تغيّر معامل الانكسار (n) وفجوة الطاقة البصرية (E_g) بدلالة نسبة Sm_2O_3.

5.4 مُعاملات الحماية الإشعاعية

1.5.4 معامل التوهين الكتلي (MAC)

يُظهر المنحنى (الشكل 4.4) السلوكَ النموذجي لمعامل التوهين الكتلي في زجاج البورات-البزموت، ويمكن تقسيمه إلى ثلاث مناطق:

منطقة الطاقات المنخفضة ($E < 0.1\,\mathrm{MeV}$): قيمٌ مرتفعة جداً لـMAC (تبلغ $85.4\,\mathrm{cm^2/g}$ عند $0.015\,\mathrm{MeV}$)، حيث يسود التأثيرُ الكهروضوئي المتناسب مع Z^{4-5}. ويظهر في المنحنى **قفزةٌ حادّة عند نحو** $0.1\,\mathrm{MeV}$ تُمثّل حافةَ امتصاص الطبقة K للبزموت (K-edge عند $90.5\,\mathrm{keV}$).

منطقة الطاقات المتوسطة ($0.1\,\mathrm{MeV} < E < 1\,\mathrm{MeV}$): تناقصٌ حادّ في MAC مع زيادة الطاقة، في منطقة سيادة تشتّت كومبتون المتناسب مع Z خطياً.

منطقة الطاقات العالية ($E > 1\,\mathrm{MeV}$): بلوغُ MAC أدنى قيمةٍ نحو $5\,\mathrm{MeV}$، يليه ارتفاعٌ طفيف بسبب بدء آلية إنتاج الأزواج (عتبتها $1.022\,\mathrm{MeV}$، المتناسبة مع Z^2).

ويُلاحَظ **انعكاسٌ في الترتيب** يستحقّ الانتباه: عند $0.015\,\mathrm{MeV}$ تتفوّق العيّنةُ الغنية بالبزموت (S1)، بينما عند $0.06\,\mathrm{MeV}$ تتفوّق العيّنةُ الغنية بالساماريوم (S5). ويُعزى ذلك إلى موقع حافة امتصاص الطبقة K للساماريوم ($46.8\,\mathrm{keV}$) التي ترفع MAC قرب هذه الطاقة، في حين تكون حافةُ البزموت أبعدَ. هذا التفصيل الدقيق يُبرز أهمية اختيار العيّنة وفق نطاق الطاقة المستهدَف.

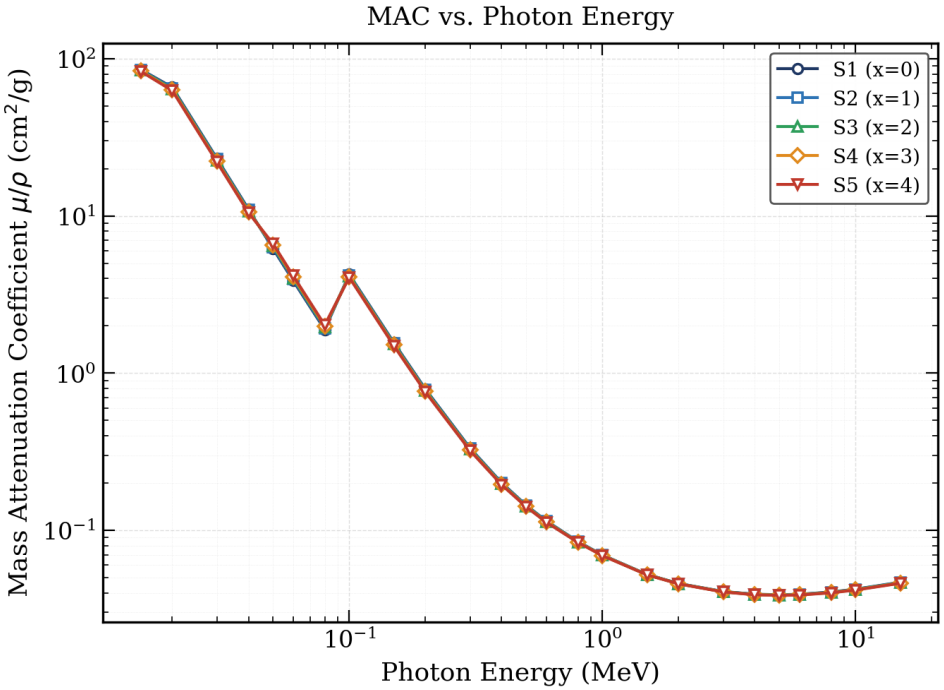
ظهور قمّةٍ في MAC حول $0.1\,\mathrm{MeV}$ لجميع التراكيب أمرٌ مُوثَّق في الأدبيات، يُعزى إلى آليات التفاعل المسيطرة بين فوتونات غاما ومكوّنات الزجاج عند هذه الطاقة [22]. كما أن تناقص MAC المنتظم مع زيادة الطاقة، وتفوّقَ التراكيب الزجاجية على الخرسانة البورتلاندية التقليدية، نتيجتان شائعتان في دراسات زجاج البورات-البزموت [3, 22].

2.5.4 معامل التوهين الخطي (LAC)

المناقشة. يتبع معامل التوهين الخطي μ السلوكَ نفسه لـMAC مع الطاقة (الشكل 5.4)، إذ $\mu = (\mu/\rho)\cdot\rho$. وعند الطاقة $0.1\,\mathrm{MeV}$ تبلغ قيمُه $25.536\,\mathrm{cm^{-1}}$ للعيّنة S1، وتتناقص تدريجياً إلى $24.198\,\mathrm{cm^{-1}}$ للعيّنة S5، تبعاً لتناقص الكثافة. والفرق بين سلوك MAC وLAC جوهري: فبينما يَعزِل MAC أثرَ الكثافة (مُقيِّماً المادةَ ذاتها)، يَعكِس LAC الأداءَ الفعلي للدرع بسماكةٍ معيّنة، وهو الأهمّ في التصميم العملي.

جدول 4.4: معامل التوهين الكتلي MAC (cm^2/g) عند طاقاتٍ مختارة.

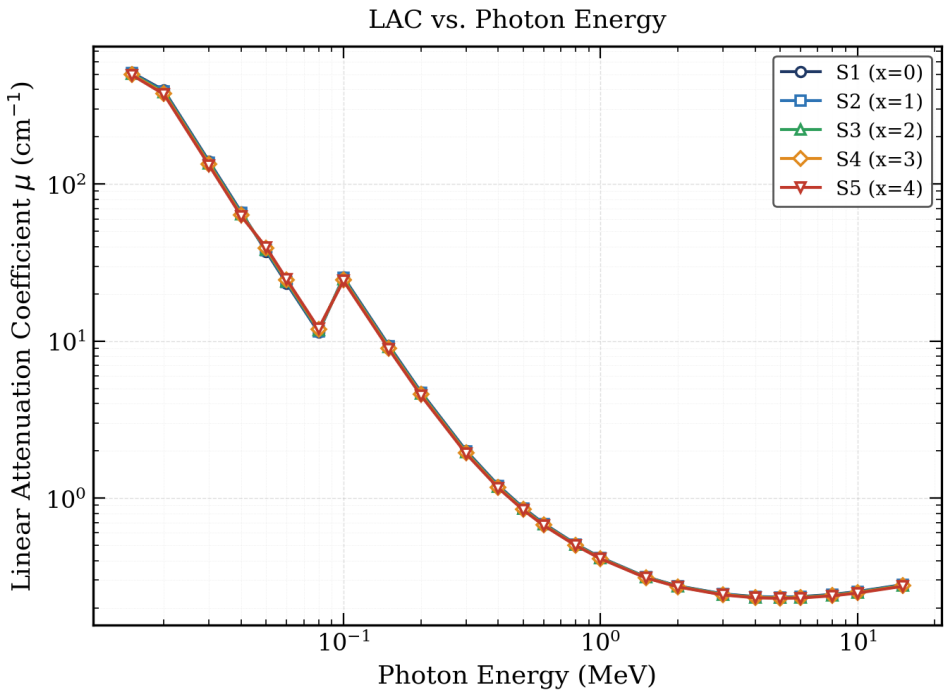
S5	S4	S3	S2	S1	(MeV) E
83.148	83.716	84.278	84.835	85.385	0.015
4.170	4.097	4.025	3.954	3.884	0.060
4.061	4.108	4.154	4.199	4.245	0.100
0.321	0.324	0.327	0.330	0.333	0.300
0.069	0.069	0.069	0.069	0.070	1.000
0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	5.000
0.046	.0460	.0460	0.047	0.047	15.00



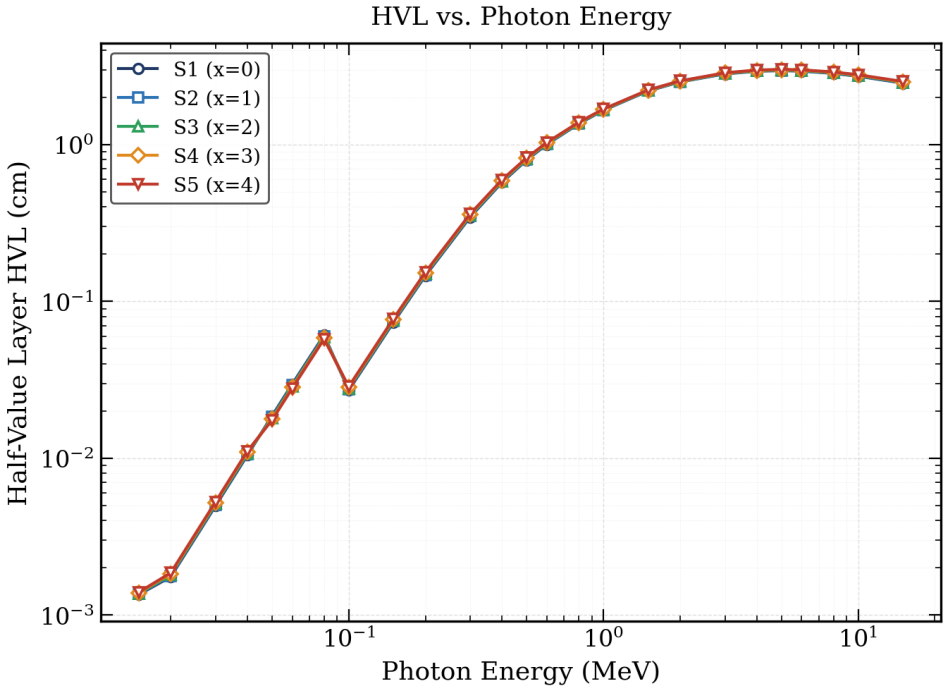
شكل 4.4: تغيّر معامل التوهين الكتلي بدلالة طاقة الفوتون للعيّنات الخمس (مقياس لوغاريتمي مزدوج).

جدول 5.4: سمك نصف القيمة HVL (cm) عند طاقاتٍ مختارة.

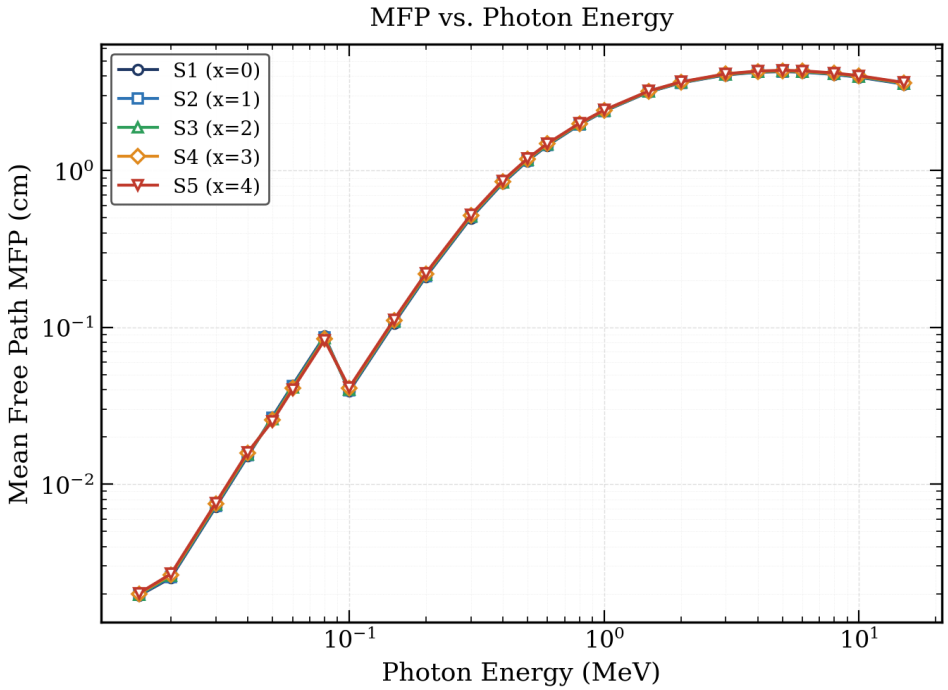
S5	S4	S3	S2	S1	(MeV) E
0.0286	0.0282	0.0279	0.0275	0.0271	0.100
0.3619	0.3576	0.3535	0.3496	0.3457	0.300
1.6866	1.6784	1.6705	1.6627	1.6551	1.000



شكل 5.4: تغيّر معامل التوهين الخطي بدلالة طاقة الفوتون للعيّنات الخمس.



شكل 6.4: تغيّر سمك نصف القيمة بدلالة طاقة الفوتون للعيّنات الخمس.



شكل 7.4: تغيّر متوسط المسار الحر بدلالة طاقة الفوتون للعيّنات الخمس.

3.5.4 سمك نصف القيمة ومتوسط المسار الحر (HVL, MFP)

كلّما صَغُر سمكُ نصف القيمة دلّ ذلك على فعاليةِ تدريعٍ أعلى. تمتلك العيّنةُ S1 أصغرَ قيمةٍ لـHVL عند كل الطاقات (الشكلان 6.4 و7.4)، مما يجعلها الأكفأ من حيث السماكة المطلوبة، تليها العيّنات بترتيب تناقص نسبة البزموت. ويزداد HVL مع الطاقة لجميع العيّنات بسبب تناقص معامل التوهين، إذ تحتاج الفوتوناتُ الأعلى طاقةً إلى سماكةٍ أكبر لتوهينها.

يتوافق هذا مع القاعدة الراسخة في الأدبيات بأن العيّنة الأعلى محتوىً من البزموت تمتلك أعلى Z_{eff} وأصغر HVL، بينما العيّنة الأقلّ بزموتاً تمتلك أدنى Z_{eff} عند كل الطاقات [8].

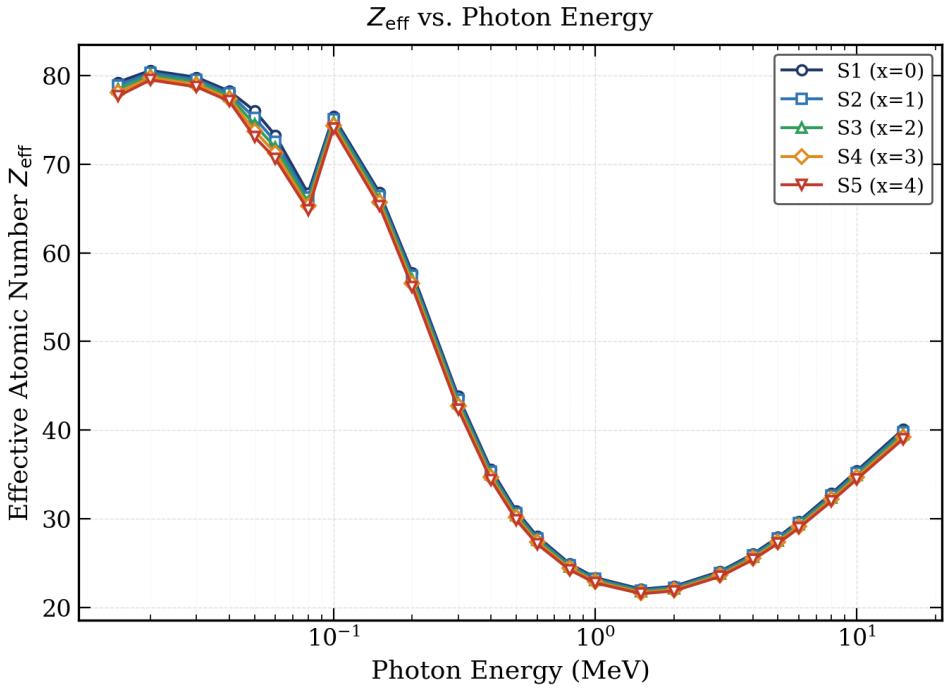
4.5.4 العدد الذري الفعّال (Zeff)

يُجسّد المنحنى (الشكل 8.4) تعاقبَ آليات التفاعل الثلاث بوضوح: يبلغ Z_{eff} أعلى قيمةٍ عند الطاقات المنخفضة (نحو 79 عند 0.015 MeV) حيث يسود التأثيرُ الكهروضوئي شديدُ الاعتماد على Z، ثم يتناقص بحدّةٍ في منطقة كومبتون ليبلغ أدنى قيمةٍ (نحو 22) قرب 1.5 MeV، ثم يرتفع ثانيةً عند الطاقات العالية مع بدء إنتاج الأزواج. وتظهر قفزةُ حافة الطبقة K للبزموت عند 0.1 MeV بوصفها انقطاعاً موضعياً في المنحنى.

عند طاقةٍ ثابتة، يتناقص Z_{eff} تناقصاً طفيفاً مع زيادة x، نتيجةَ إحلال عنصرٍ ذي رقمٍ ذري أعلى (البزموت، $Z = 83$) بعنصرٍ ذي رقمٍ ذري أقل (الساماريوم، $Z = 62$). ومع ذلك تبقى القيمُ مرتفعةً جداً لجميع العيّنات (تفوق 74 عند 0.1 MeV)، مما يؤكّد كفاءتها العالية في توهين الفوتونات.

جدول 6.4: العدد الذري الفعّال Z_{eff} عند طاقاتٍ مختارة.

S5	S4	S3	S2	S1	E (MeV)
77.67	78.07	78.47	78.86	79.24	0.015
74.04	74.39	74.72	75.05	75.38	0.100
42.33	42.70	43.06	43.43	43.79	0.300
22.74	22.89	23.04	23.19	23.34	1.000
38.97	39.25	39.52	39.79	40.06	15.00



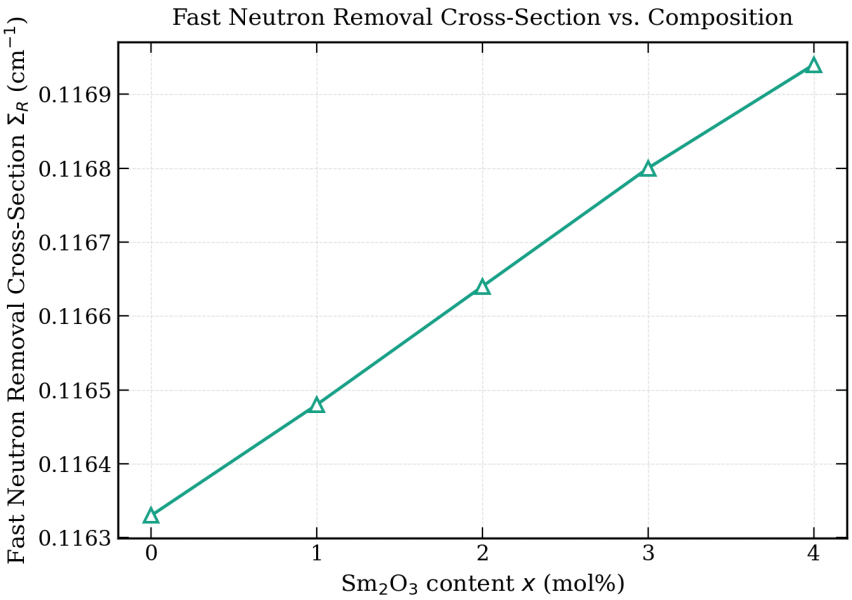
شكل 8.4: تغيّر العدد الذري الفعّال بدلالة طاقة الفوتون للعيّنات الخمس.

سلوك Z_{eff} المرصود — أعلى قيمةٍ للعيّنة الأغنى بالبزموت وأدنى قيمةٍ للأقلّ بزموتاً عند كل الطاقات — مطابقٌ تماماً لما رُصد في زجاج البورات-البزموت المطعَّم بأكسيد الكادميوم [8]. كما أن شكل المنحنى ثلاثي المناطق (قمّة عند الطاقات المنخفضة، حضيض عند المتوسطة، ارتفاع عند العالية) خاصيةٌ نموذجية موثَّقة في هذا النوع من الزجاج [3].

5.5.4 مقطع إزالة النيوترونات السريعة (FNRCS)

جدول 7.4: مقطع إزالة النيوترونات السريعة Σ_R (cm^{-1}).

الرمز	x	Σ_R (cm^{-1})
S1	0	0.116 33
S2	1	0.116 48
S3	2	0.116 64
S4	3	0.116 80
S5	4	0.116 94



شكل 9.4: تغيّر مقطع إزالة النيوترونات السريعة بدلالة نسبة Sm_2O_3.

على عكس مُعاملات الفوتونات، **يزداد** مقطعُ إزالة النيوترونات السريعة مع زيادة نسبة الساماريوم، من $0.116\,33\ \text{cm}^{-1}$ عند $x = 0$ إلى $0.116\,94\ \text{cm}^{-1}$ عند $x = 4$ (الشكل 9.4). ورغم أن الزيادة طفيفة عددياً، فإن اتجاهها ذو دلالةٍ مهمة: فهو يُثبت كمياً أن إضافة الساماريوم تُحسّن قدرةَ الزجاج على توهين النيوترونات، خلافاً لتأثيرها الطفيف المُنقِص على بارامترات الفوتونات.

والأهمّ أن الساماريوم يمتلك ميزةً مزدوجة في تدريع النيوترونات لا يُظهرها مقطعُ النيوترونات السريعة وحده: فنظيرُ $^{149}\mathrm{Sm}$ يمتلك مقطعاً عرضياً هائلاً لالتقاط النيوترونات الحرارية يبلغ نحو $74\,500\,\mathrm{b}$، وهو من أعلى القيم بين العناصر، يفوق البزموت بآلاف المرّات (مقطع البزموت لا يتجاوز $0.034\,\mathrm{b}$). وميزةُ الساماريوم الإضافية أنه يُنتج — على عكس الغادولينيوم — أشعةَ غاما ثانوية منخفضة الطاقة، مع امتلاكه رقماً ذرياً مرتفعاً نسبياً ($Z = 62$) يُسهم في توهين تلك الأشعة الثانوية.

تقع قيمُ Σ_R المحسوبة (نحو $0.116\,\mathrm{cm^{-1}}$) قريبةً جداً من القيمة المُبلَّغ عنها لزجاجٍ مماثل في التركيب ($10\mathrm{SrO}$-$60\mathrm{Bi_2O_3}$-$30\mathrm{B_2O_3}$)، التي بلغت $0.1199\,\mathrm{cm^{-1}}$ باستعمال Phy-X/PSD نفسه [23]. هذا التوافق الكمّي الوثيق يُعزّز الثقةَ في نتائجنا. كما أن الدور المزدوج للساماريوم (امتصاص النيوترونات الحرارية وتوهين غاما الثانوية) موثَّقٌ جيداً في أدبيات تدريع النيوترونات [24, 25].

6.4 المقارنة مع زجاج الرصاص والمواد المرجعية

تُظهر النتائجُ أن العيّناتِ المدروسة تمتلك عدداً ذرياً فعّالاً مرتفعاً (يفوق 74 عند $0.1\,\mathrm{MeV}$)، وهي قيمٌ تُقارِب أو تفوق أداءَ زجاج الرصاص التقليدي في النطاق التشخيصي، مع امتلاكها مزايا إضافية تُلخّصها النقاطُ التالية:

- **السلامة البيئية:** خلوّها من الرصاص السامّ، تماشياً مع التوجّه العالمي نحو موادّ خاليةٍ من المعادن الثقيلة السامة.
- **الشفافية البصرية:** فجوةُ طاقةٍ واسعة (نحو $8\,\mathrm{eV}$) تجعلها مناسبةً لنوافذ المراقبة.
- **المتانة الميكانيكية:** معاملُ يونج مرتفع (نحو $61\,\mathrm{GPa}$) يضمن مقاومةً جيدة للإجهادات.
- **تدريع النيوترونات:** ميزةٌ إضافية يوفّرها الساماريوم ولا يوفّرها زجاجُ الرصاص.

وقد أوصت دراساتٌ عدّة على زجاج البورات-البزموت باستعماله بديلاً لزجاج الرصاص في منشآت تدريع غاما، خاصةً التراكيب الأغنى بالبزموت [3, 8]، وهو ما تؤكّده نتائجُنا مع إضافة البُعد النيوتروني الذي يُسهم به الساماريوم.

7.4 الجدول الجامع

جدول 8.4: الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والبصرية والإشعاعية الجامعة. قيمة Z_{eff} عند 0.1 MeV.

Σ_R (cm^{-1})	Z_{eff}	E_g (eV)	n	E (GPa)	V_m ($\text{cm}^3\,\text{mol}^{-1}$)	ρ ($\text{g}\,\text{cm}^{-3}$)	x
0.116 33	75.38	8.022	2.3409	60.83	37.950	6.016	0
0.116 48	75.05	8.092	2.3269	61.10	.81837	.0026	1
0.116 64	74.72	8.163	2.3130	61.37	37.711	5.988	2
0.116 80	74.39	8.234	2.2992	61.63	37.603	5.974	3
0.116 94	74.04	8.308	2.2852	61.88	37.501	5.959	4

8.4 خلاصة

كشفت النتائجُ عن اتجاهاتٍ منتظمة عند زيادة نسبة الساماريوم من $x = 0$ إلى $x = 4$: انخفاضُ الكثافة والحجم المولي، وتصاعدُ معامل يونج، وتناقصُ معامل الانكسار مع اتساع فجوة الطاقة، وتناقصٌ طفيف في العدد الذري الفعّال يقابله تحسّنٌ في مقطع إزالة النيوترونات. وقد أُكّدت جميعُ هذه الاتجاهات بمقارنتها بدراساتٍ منشورة على أنظمةٍ مماثلة، فضلاً عن التوافق الكمّي الوثيق في قيمة Σ_R مع مرجعٍ يستعمل نفسه Phy-X/PSD.

وبموازنة هذه الاتجاهات، يتبيّن أن لكل عيّنةٍ مزاياها: فالعيّنة S1 (الغنية بالبزموت) الأكفأُ في توهين الفوتونات عند الطاقات المنخفضة جداً وأصغرُها HVL، بينما توفّر العيّنة S5 (الغنية بالساماريوم) توازناً أفضل يجمع بين متانةٍ ميكانيكية أعلى، وشفافيةٍ بصرية أوسع، وتدريعٍ نيوتروني محسَّن، مع احتفاظها بكفاءةٍ إشعاعية عالية للفوتونات. وتؤكّد هذه النتائجُ مجتمعةً أن منظومة الزجاج المدروسة تُمثّل بديلاً واعداً وصديقاً للبيئة لزجاج الرصاص في تطبيقات الحماية من الأشعة السينية وأشعة غاما، مع قيمةٍ مضافة في البيئات التي تتطلّب تدريعاً نيوترونياً.

الخاتمة العامة والآفاق

تناولت هذه المذكرة دراسةً نظريةً وحاسوبيةً شاملة لمنظومة الزجاج:

$$(x)\mathrm{Sm_2O_3} - (40{-}x)\mathrm{Bi_2O_3} - 60\mathrm{B_2O_3}$$

بوصفها مادةً واعدةً للحماية الإشعاعية الشفافة الخالية من الرصاص. وقد جمعت الدراسةُ بين النماذج النظرية لحساب الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والبصرية، وبرنامج Phy-X/PSD لاستخراج مُعاملات الحماية الإشعاعية عبر مجالٍ طاقي واسع.

أهمّ النتائج

أظهرت النتائجُ، عند زيادة نسبة الساماريوم من $x = 0$ إلى $x = 4$، الاتجاهاتِ المنتظمة التالية:

1. **انخفاض الكثافة والحجم المولي** (من 6.016 إلى $5.959\ \mathrm{g\,cm^{-3}}$، ومن 37.93 إلى $37.50\ \mathrm{cm^3\,mol^{-1}}$)، مما يعكس تغيراً بنيوياً منتظماً وزيادةً في تراصّ الشبكة الزجاجية.
2. **تصاعد معامل يونج** (من 60.83 إلى $61.88\ \mathrm{GPa}$)، نتيجةَ ارتفاع طاقة تفكك روابط Sm--O مقارنةً بروابط Bi--O، مما يُحسّن المتانة الميكانيكية.
3. **تناقص معامل الانكسار واتساع فجوة الطاقة** (من 2.341 إلى 2.285، ومن 8.022 إلى $8.308\ \mathrm{eV}$)، مما يُوسّع نطاق الشفافية البصرية.
4. **كفاءة إشعاعية عالية** مع تناقصٍ طفيف في العدد الذري الفعّال ($Z_{\mathrm{eff}} > 74$ عند $0.1\ \mathrm{MeV}$)، يقابله تحسّنٌ في مقطع إزالة النيوترونات السريعة (من 0.11633 إلى $0.11694\ \mathrm{cm^{-1}}$).

وبموازنة هذه الاتجاهات، تبيّن أن لكل عيّنةٍ مزاياها: فالعيّنة الغنية بالبزموت (S1) الأكفأُ في توهين الفوتونات عند الطاقات المنخفضة، بينما توفّر العيّنة الغنية بالساماريوم (S5) توازناً أمثل يجمع بين المتانة الميكانيكية والشفافية البصرية والتدريع النيوتروني المحسَّن. وتؤكّد النتائجُ مجتمعةً أن منظومة الزجاج المدروسة بديلٌ واعدٌ وصديقٌ للبيئة لزجاج الرصاص في تطبيقات الأشعة السينية التشخيصية وأشعة غاما.

الآفاق المستقبلية

تفتح هذه الدراسةُ آفاقاً بحثيةً عدّة، نذكر منها:

- **التحقّق التجريبي:** تصنيعُ التراكيب المثلى مخبرياً بطريقة التبريد السريع للمصهور، والتحقّقُ التجريبي من الكثافة والخصائص البصرية والإشعاعية المحسوبة.
- **التوصيف البنيوي:** إجراءُ قياسات XRD وFTIR وRaman لتأكيد البنية غير المتبلورة ودراسة وحدات البورات.
- **توسيع المجال الطاقي:** دراسةُ السلوك عند طاقاتٍ أعلى لتطبيقات العلاج الإشعاعي، وحسابُ عوامل التراكم (EABF ,EBF) بطريقة المتتالية الهندسية.
- **التدريع النيوتروني المتقدّم:** دراسةٌ تفصيلية لامتصاص النيوترونات الحرارية مستفيدةً من المقطع العرضي العالي للنظير ^{149}Sm، باستعمال محاكاة مونت كارلو (MCNP أو FLUKA).
- **استكشاف مُطعِّمات أخرى:** دراسةُ تأثير إضافة أكاسيدَ أرضية نادرة أخرى (مثل Gd_2O_3 و Nd_2O_3) لتحسين خصائصَ محدّدة.

قائمة المراجع

[1] A. Benhadjira, M.I. Sayyed, O. Bentouila, K.E. Aiadi, "Artfiicial neural network approach for calculating mass attenuation coefficient of dffierent glass systems," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. ,56 no. ,1 pp. ,105–100 .2024
DOI: https://doi.org/10.1016/j.net.2023.09.013

[2] A.M. El-Khatib et al., "A comprehensive review on composite-based radiation protection materials: properties, challenges, and future directions," *Progress in Nuclear Energy*, .2023

[3] M.S. Al-Buriahi et al., "Tailoring bismuth borate glasses by incorporating PbO/GeO_2 for protection against nuclear radiation," *Scientfiic Reports*, vol. ,11 p. ,7849 .2021
DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-87256-1

[4] M. Kamislioglu, "Research on the effects of bismuth borate glass system on nuclear radiation shielding parameters," *Results in Physics*, vol. ,22 p. ,103844 .2021
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.103844

[5] A. Acikgoz, I. Izguden, Y. Tasgin, D. Yilmaz, G. Demircan, S. Kalecik, B. Aktas, "Influence of praseodymium oxide on the structural, mechanical and photon, charged particles, and neutron shielding properties of alumina borate glass," *Ceramics International*, vol. ,50 no. ,19 pp. ,34584–34573 .2024
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.06.265

[6] Z. Aygun, M. Aygun, "Computational study of radiation shielding characteristics for Nd^{3+} doped Al_2O_3–Na_2O–WO_3–B_2O_3 borate glasses," *Afyon Kocatepe University Journal of Science & Engineering*, vol. ,25 no. ,5 .2025

[7] E.R. Ilik et al., "Impact of controlled oxidation and incorporation of high entropy rare-earth alloys (HE-REAs) on the structural, physical, optical, and radiation shielding performance of zinc-borate glasses," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. ,1036 p. ,181904 .2025

[8] E.B. Moustafa, O.E. Salem et al., "Computational and empirical assessment of bismuth cadmium borate glass containing samarium ions for radiology and radiation shielding protection," .2025

[9] M.I. Sayyed, S.Q. Mawlud, A.A. Ahmed, K.A. Mahmoud, "Lead-free borate glasses for radiation protection: Effects of partial B_2O_3 substitution by Bi_2O_3

and Sm_2O_3 on structural, optical, mechanical, and shielding properties," *Ceramics International*, .2026
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2026.05.274

[10] S. Emikönel, İ. Akkurt, "Radiation shielding properties of B_2O_3–Bi_2O_3 glass," *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, vol. ,11 no. ,2 .2025
DOI: https://doi.org/10.22399/ijcesen.2157

[11] K. Bansal, S. Kumar, K. Singh, S. Singh, "Comprehensive analysis of physical, mechanical, thermal and attenuation characteristics of NaF–B_2O_3–Bi_2O_3–Sm_2O_3 glasses for gamma radiation shielding applications," *Ceramics International*, vol. ,50 no. ,21 pp. ,44550–44543 .2024
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.302

[12] E.B. Podgoršak, *Radiation Physics for Medical Physicists*, 3rd ed., Springer, Cham, .2016

[13] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, .2010

[14] J.R. Cunningham, "Interactions of Radiation with Matter," in *Diagnostic Radiology Physics: A Handbook for Teachers and Students*, IAEA, Vienna, .2014

[15] International Atomic Energy Agency, *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part ,3 Vienna, .2014

[16] International Commission on Radiological Protection, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," ICRP Publication ,103 *Annals of the ICRP*, vol. ,37 no. ,4–2 .2007

[17] International Commission on Radiological Protection, "Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (w_R)," ICRP Publication ,92 *Annals of the ICRP*, vol. ,33 no. ,4 .2003

[18] F.H. El-Batal, M. Gabr, S.Y. Marzouk, A.M. Abdelghany, "Optical and structural studies of bismuth borate glasses," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. ,605 pp. ,167–157 .2014

[19] A. Makishima, J.D. Mackenzie, "Direct calculation of Young's modulus of glass," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. ,17 no. ,2 pp. ,157–147 .1975

[20] V. Dimitrov, S. Sakka, "Electronic oxide polarizability and optical basicity of simple oxides," *Journal of Applied Physics*, vol. ,79 no. ,3 pp. ,1740–1736 .1996

[21] E. Şakar, Ö.F. Özpolat, B. Alım, M.I. Sayyed, M. Kurudirek, "Phy-X / PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. ,166 p. ,108496 .2020
DOI: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108496

[22] "Optimizing gamma radiation shielding of low bismuth borate glass via antimony addition: optical and physical insights," *Scientfiic Reports*, vol. ,16 .2026 DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-026-37686-6

[23] "Detailed Inspection of γ-ray, Fast and Thermal Neutrons Shielding Competence of Calcium Oxide or Strontium Oxide Comprising Bismuth Borate Glasses," *Materials*, vol. ,14 no. ,9 p. ,2265 .2021

[24] "Investigation of mechanical and radiation shielding properties of Sm–Sm_2O_3 reinforced Al–B_4C composite," *Radiation Physics and Chemistry*, .2024

[25] "Effect of rare earth oxides on the neutron shielding performance of dffierent glass systems," *Ceramics International*, .2025

[26] C.S. Lakshmi, S. Rahman, M. Shareefuddin, "Physical and optical properties of CdO–CaO–B_2O_3 glasses," *Journal of Non-Oxide Glasses*, vol. ,4 no. ,1 pp. ,8–1 .2012

[27] "Physical, structural, and shielding properties of cadmium bismuth borate-based glasses," *Journal of Applied Physics*, vol. ,127 no. ,17 p. ,175102 .2020

[28] "Photon and neutron shielding characteristics of samarium doped lead alumino borate glasses containing barium, lithium and zinc oxides determined at medical diagnostic energies," *Results in Physics*, .2019

[29] M.J. Berger et al., *XCOM*: *Photon Cross Section Database* (*version* (1.5, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, .2010

[30] L. Ranjbar, "Radiation Interactions with Matter," in *Emerging Radiation Detection*, K. Iniewski, H. Gadey (eds.), Springer, Cham, .2024 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-63897-8_1