شارح: الخواص الفيزيائية للفلزات الانتقالية

في هذا الشارح، سوف نتعلَّم كيف نَصِف الخواص الفيزيائية للفلزات الانتقالية، ونقارن بينها.

يمكن إيجاد عناصر الفلزات الانتقالية في الفئة d بالجدول الدوري. فهي مجموعة متنوعة من الفلزات، ولها العديد من الاستخدامات المهمة. يمكن مقارنة الفلزات الانتقالية بعناصر الفلزات بعد الانتقالية؛ لأنها صلبة وبراقة وموصلة جيدة للحرارة والكهرباء.

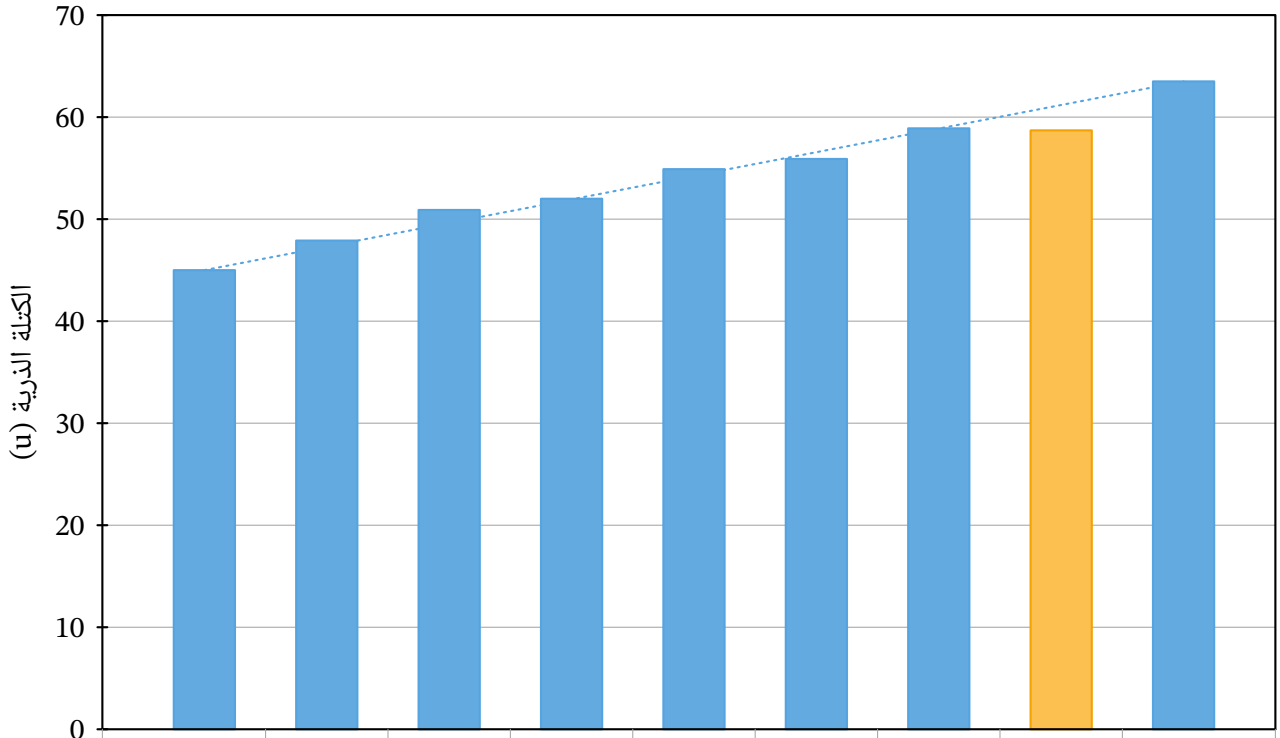
يمكن فهم التطبيقات المختلفة لعناصر الفلزات الانتقالية إذا استغرقنا بعض الوقت لفهم الخواص الفيزيائية للفلزات الانتقالية، وكيف تتغيَّر الخواص الفيزيائية عبر فئة عناصر الفلزات الانتقالية.

تعريف: الفلز الانتقالي

الفلز الانتقالي عنصرٌ ذراتُهُ لها غلاف فرعي d غير مكتمل، أو يمكنه أن يؤدي إلى تكوين كاتيونات بغلاف فرعي d غير مكتمل.

ننظر أولًا إلى قيم الكتلة الذرية لأربعة عناصر من عناصر الفلزات الانتقالية في الدورة الرابعة. يوضِّح الشكل الآتي أن قيم الكتلة الذرية تزيد بوجهٍ عام عندما ننتقل من السكانديوم الواقع في الطرف الأيسر وصولًا إلى النحاس الواقع في الطرف الأيمن. ويُستثنى النيكل من هذا التدرُّج؛ لأن قيمة كتلته الذرية أصغر من قيمة الكتلة الذرية للكوبالت.

الكتلة الذرية للفلزات الانتقالية في الدورة الرابعة



	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
(m)	45.0	47.9	50.9	52.0	54.9	55.9	58.9	58.7	63.5

مثال ١: تحديد الاستثناءات بالنسبة إلى التدرُّج في الكتلة الذرية في خواص الفلزات الانتقالية بالدورة الرابعة

يُمكِن ملاحظة التدرُّج في زيادة الكتلة الذرية عَبْرَ دورات الجدول الدوري من اليسار إلى اليمين. أيُّ فلز انتقالي من الدورة الرابعة استثناء لهذا التدرُّج؟

أ. المنجنيز

ب. النيكل

ج. الكروم

د. السكانديوم

هـ. الحديد

الحل

العناصر في الجدول الدوري مرتَّبة حسب زيادة العدد الذري. وعلى هذا النحو، فإنه خلال التحرُّك عبر الدورة الرابعة، يزيد العدد الذري، ما يعني زيادة عدد البروتونات في نواة الذرات المختلفة. وكلما ازداد عدد البروتونات في نواة الذرة، ازداد عدد النيوترونات؛ ممَّا يُحدِث زيادة عامة في الكتلة الذرية عند التحرُّك من اليسار إلى اليمين في الجدول الدوري.

يظهر هذا التدرُّج في الفلزات الانتقالية في الدورة الرابعة؛ وبالرغم من ذلك، يُعَد النيكل الذي كتلته الذرية النسبية تساوي 58.7 استثناءً؛ لأن عنصر الكوبالت الذي يسبقه كتلته الذرية تساوي 58.9. ومن ثَمَّ، فإن الإجابة الصحيحة هي الإجابة (ب).

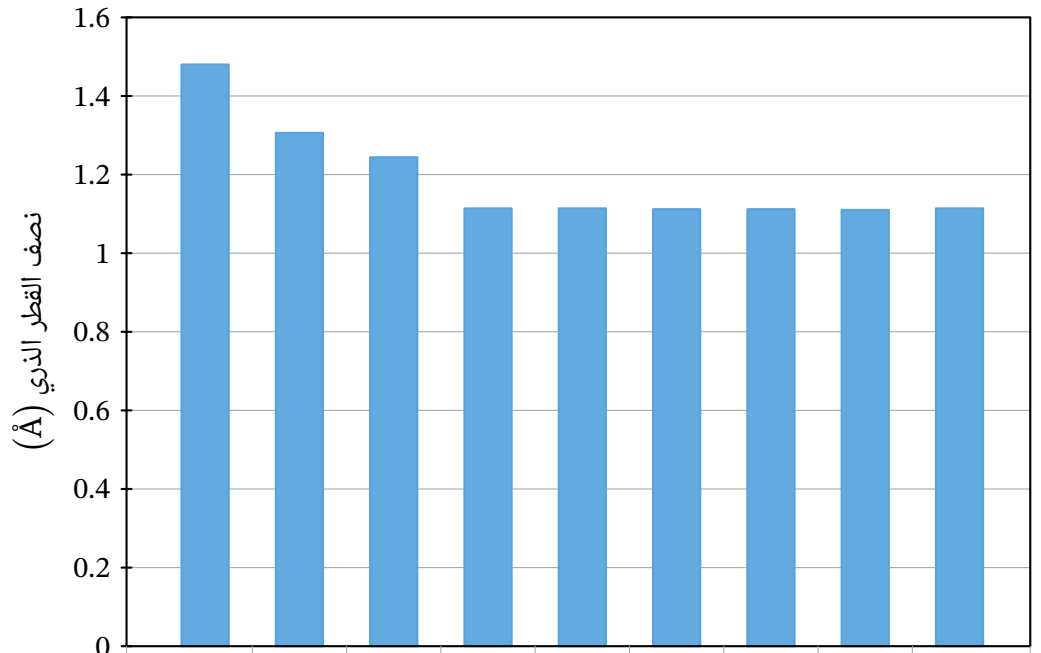
يمكننا أيضًا التفكير في كيفية تغيُّر أنصاف الأقطار الذرية عند التحرُّك من السكانديوم إلى النحاس. قيم نصف القطر الذري لا تزيد أو تنخفض على نحو منتظم عندما نتحرَّك عبر صف الدورة الرابعة للفلزات الانتقالية. العلاقة بين قيم أنصاف الأقطار الذرية والأعداد الذرية معقَّدة للغاية، ولا يمكن تفسيرها إلا إذا نظرنا في التوزيعات الإلكترونية لهذه العناصر. يَستخدم الشكل الآتي مزيجًا من الترميزات المكثَّفة والأسهم الأحادية الجانب لتوضيح كيف يتغيَّر التوزيع الإلكتروني عبر العناصر الفلزية في الدورة الرابعة.

العنصر	التوزيع الإلكتروني	4s	3d	3d	3d	3d	3d
Sc	$[Ar]\ 4s^2 3d^1$	↑ ↓	↑				
Ti	$[Ar]\ 4s^2 3d^2$	↑ ↓	↑	↑			
V	$[Ar]\ 4s^2 3d^3$	↑ ↓	↑	↑	↑		
Cr	$[Ar]\ 4s^1 3d^5$	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Mn	$[Ar]\ 4s^2 3d^5$	↑ ↓	↑	↑	↑	↑	↑
Fe	$[Ar]\ 4s^2 3d^6$	↑ ↓	↑ ↓	↑	↑	↑	↑
Co	$[Ar]\ 4s^2 3d^7$	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑	↑	↑
Ni	$[Ar]\ 4s^2 3d^8$	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑	↑
Cu	$[Ar]\ 4s^1 3d^{10}$	↑	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓

في البداية، يبدأ نصف القطر في الانخفاض مع زيادة الشحنة النووية. تزداد الشحنة النووية نظرًا لتزايد عدد البروتونات في نواة الذرة. تواصل الإلكترونات الإضافية ملء المدار 3d، وتقترب أكثر من النواة.

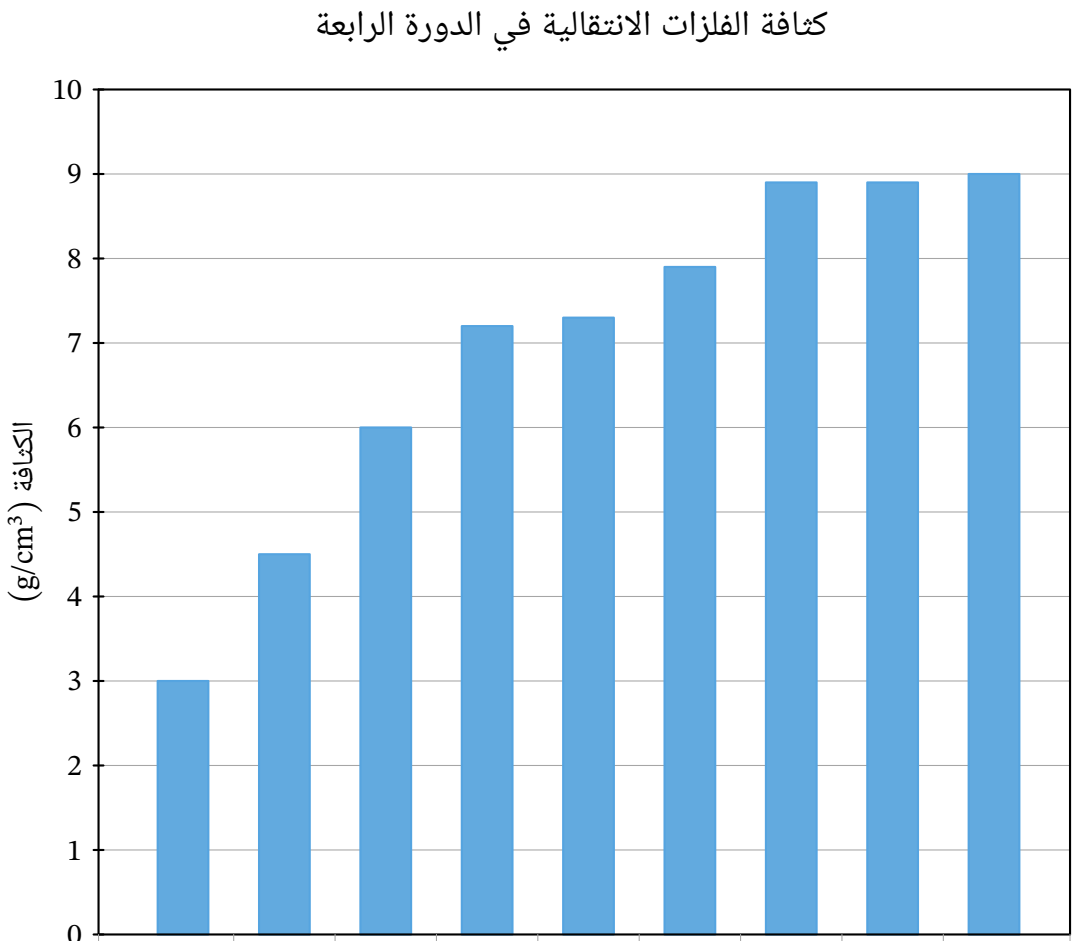
بالرغم من ذلك، عند وصولنا إلى الكروم، يُولِّد التزايد في عدد الإلكترونات في المدار 3d تنافرًا بين الإلكترونات كافيًا لإيقاف النقصان في أنصاف الأقطار الذرية، وتظل قيم نصف القطر الذري ثابتة بشكل أساسي بالتحرُّك من الكروم إلى النحاس.

نصف القطر الذري للفلزات الانتقالية في الدورة الرابعة



	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
نصف القطر الذري	1.44	1.33	1.22	1.17	1.17	1.16	1.16	1.15	1.17

ترتبط الكثافة بكتلة الجسم وحجمه، وعندما نتحرَّك من اليسار إلى اليمين عبر الدورة الرابعة، تزيد كتلة الذرة. بالنسبة إلى نصف القطر الذري، كما ذكرنا من قبل، يقل نصف القطر، لكن ليس بانتظام. عندما يجتمع هذان التدرُّجان العامان، يصبح لدينا تدرُّج زيادة الكثافة أثناء التحرُّك عبر الدورة الرابعة، كما هو موضَّح في التمثيل البياني الآتي.



تجدر الإشارة هنا إلى أن الفلزات الانتقالية بوجهٍ عام لها كثافة أكبر من كثافة فلزات الفئة s التي تنتمي إلى الدورة نفسها. يُعَد كلٌّ من البوتاسيوم والكالسيوم من فلزات الدورة الرابعة، لكنهما ليسا من عناصر الفلزات الانتقالية. وتبلغ قيمتا كثافتَي البوتاسيوم والكالسيوم $0.89\ g/cm^3$ و$1.54\ g/cm^3$.

مثال ٢: المقارنة بين كثافتَي الفاناديوم والنحاس

أيُّ العبارات الآتية التي تُقارِن بين عنصرين من عناصر الفئة d صواب؟

أ. الفاناديوم أكثر كثافة من النحاس وله نصف قطر ذري أصغر.

ب. الفاناديوم أقل كثافة من النحاس وله نصف قطر ذري أكبر.

ج. الفاناديوم أكثر كثافة من النحاس وله نصف قطر ذري أكبر.

د. الفاناديوم أقل كثافة من النحاس وله نصف قطر ذري أصغر.

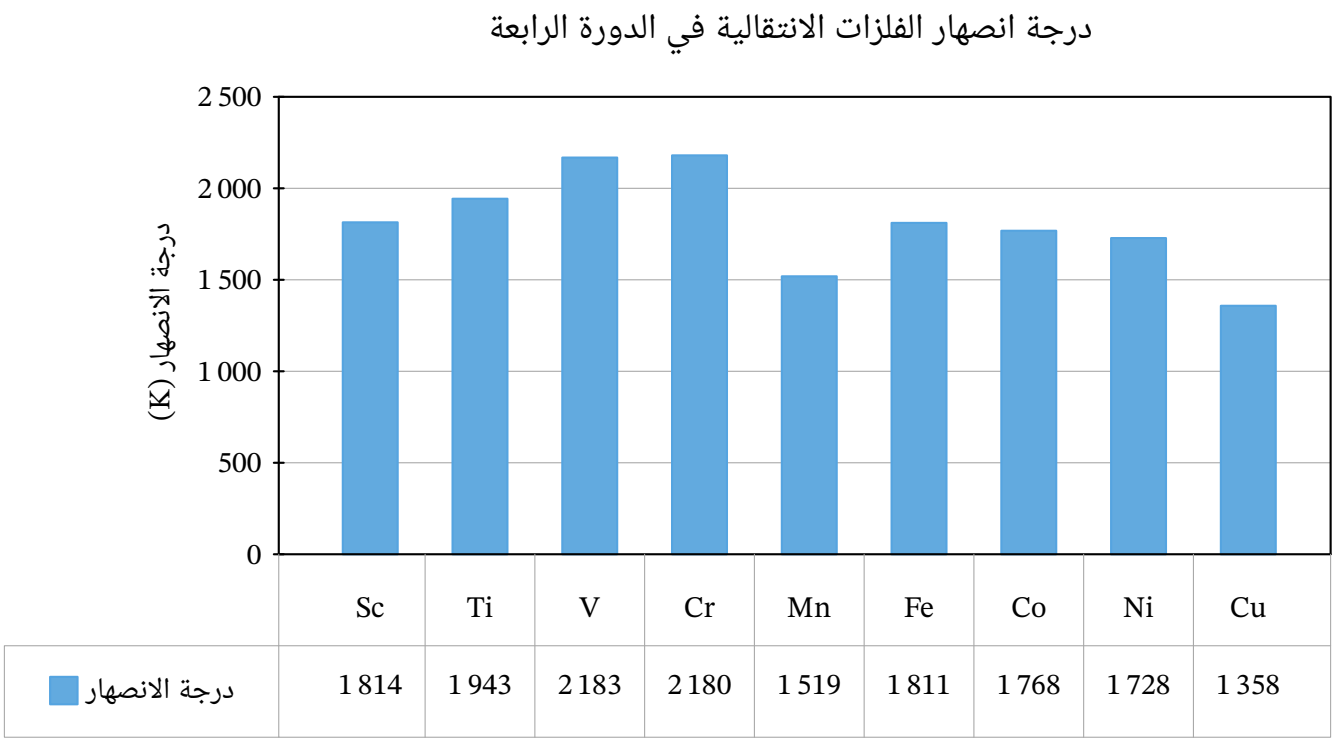
الحل

على الرغم من أن التدرُّج في الخواص الفيزيائية للفلزات الانتقالية في الدورة الرابعة ليس واضحًا دائمًا أو متسقًا تمامًا عبر جميع العناصر المختلفة، فإن من الممكن ملاحظة وجود فروق دقيقة.

على سبيل المثال، عند التحرُّك من السكانديوم إلى النحاس، تزداد كثافة الفلزات المختلفة؛ ولكن في الوقت نفسه، يقل نصف القطر الذري، ويرجع ذلك جزئيًا إلى زيادة الشحنة النووية.

من خلال دمج هذين التدرُّجين، يمكننا تحديد الإجابة (ب) باعتبارها الإجابة الصحيحة؛ لأن الفاناديوم أقل كثافة من النحاس وله نصف قطر ذري أكبر.

لا يبدو أن هناك أي تدرُّج أو نمط عام واضح بين درجات الانصهار والأعداد الذرية لعناصر الفلزات الانتقالية بالدورة الرابعة. يمكننا ملاحظة ذلك في الشكل الآتي.



	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
درجة الانصهار	1 814	1 943	2 183	2 180	1 519	1 811	1 768	1 728	1 358

ولكن يمكننا صياغة عبارة محدَّدة واحدة متعلِّقة بفلزات الفئة s في الدورة الرابعة. درجة انصهار البوتاسيوم تساوي 336.5 K ودرجة انصهار الكالسيوم تساوي 1 115 K، وهكذا فإن درجات انصهار الفلزات الانتقالية في الدورة الرابعة أكبر بكثير من درجات انصهار فلزات الفئة s المناظرة لها. ترتبط الروابط الفلزية بدرجة الانصهار، ممَّا يُشير إلى أن الفلزات الانتقالية في الدورة الرابعة لها روابط فلزية أقوى من البوتاسيوم والكالسيوم.

مثال ٣: المقارنة بين درجات انصهار الفلزات الانتقالية ودرجات انصهار فلزات الفئة s

عنصر الكالسيوم الموجود بالفئة s له خواص فيزيائية مختلفة عن الفلزات الانتقالية المُجاوِرة الموجودة في الدورة نفسها.

١. أكمل الآتي: درجة انصهار الكالسيوم ـــــــــ من درجة انصهار الكروم.

أ. أعلى
ب. أقل

٢. أيُّ العبارات الآتية تُفسِّر هذا الفرق في درجة الانصهار؟

أ. الكالسيوم له درجة انصهار أقل؛ نظرًا لوجود إلكترونات أقل؛ ولذا يوجد تنافر داخلي أقل بين الإلكترونات المزدوجة.
ب. الكروم له درجة انصهار أقل بسبب الترابط الفلزي الأضعف الناتج عن حجب النواة بواسطة إلكترونات المدار 3d.
ج. الكالسيوم له درجة انصهار أعلى؛ لأن كثافته الأكبر تؤدِّي إلى ترابط فلزي أقوى.
د. الكروم له درجة انصهار أعلى؛ لأن إلكترونات المدار 3d يُمكِن ألَّا تتمركز، وأن تُسهِم في تكوين ترابط فلزي أقوى.

الحل

الجزء الأول

أولًا، من خلال الاستدعاء أو الاستخدام الفعلي لمصدر البيانات، يمكننا تحديد أن درجة انصهار الكالسيوم أقل من درجة انصهار الكروم. ومن ثَمَّ، فالخيار (ب) هو إجابة الجزء الأول من هذا السؤال.

يتضح السبب وراء انخفاض درجة الانصهار هذه في الجزء الثاني.

الجزء الثاني

ونحن نتحرَّك من الفئة s في الدورة الرابعة إلى الفئة d، نبدأ في ملء المدار 3d. ومع بدء امتلاء هذه المدارات، يزداد عدد الإلكترونات المشاركة في الترابط الفلزي، وتُنتِج تداخلات هذه الإلكترونات قوة جذب أكبر بين أيونات الفلزات الانتقالية وبحر الإلكترونات غير المتمركزة.

ترتبط الروابط الفلزية الأقوى بدرجة انصهار أعلى. نتوقَّع أن يكون للكروم درجة انصهار أعلى من الكالسيوم؛ لأنه يحتوي على إلكترونات المدار 3d التي يمكن أن تجعل الترابط الفلزي أكثر قوة. وهذا الشرح ملخَّص في الخيار (د)، وهو الإجابة الصحيحة.

يمكننا تصنيف الفلزات الانتقالية بدلالة خواصها المغناطيسية. بعض الفلزات بارامغناطيسي، والبعض الآخر دايامغناطيسي. الذرة أو الأيون أو الجزيء يُعَد كلٌّ منها بارامغناطيسيًّا عندما يحتوي على ذرات بها إلكترونات منفردة. هذه الإلكترونات المنفردة لها عزم ثنائي القطب مغناطيسي، وتعمل باعتبارها مغناطيسات متناهية الصغر بسبب انجذابها نحو المجالات المغناطيسية المُطبَّقة خارجيًّا. يكون مقدار العزم المغناطيسي في أي مادة بارامغناطيسية أكبر إذا كانت هذه المادة تحتوي على عدد أكبر من الإلكترونات المنفردة.

ليس للمادة الدايامغناطيسية أي عزم مغناطيسي كلي؛ لأن جميع مداراتها ممتلئة بإلكترونات مزدوجة. دائمًا ما تُبعِد المواد الدايامغناطيسية المجالات المغناطيسية المُطبَّقة خارجيًّا.

عادةً ما يمكن استخدام التوزيع الإلكتروني للذرات والأيونات والجزيئات لتحديد إذا ما كانت المواد دايامغناطيسية أو بارامغناطيسية. وباستخدام الفاناديوم مثالًا، يكون لذرات الفاناديوم التوزيع الإلكتروني $[Ar]\ 3d^3 4s^2$. يوضِّح الحد $3d^3$

أن الفاناديوم يحتوي على إلكترون واحد منفرد على الأقل، ويمكن استخدام هذه الحقيقة لتحديد أن الفاناديوم مادة بارامغناطيسية.

تتميَّز عناصر النيكل والحديد والكوبالت وسبائكها بنوع من المغناطيسية مثير للاهتمام إلى حدٍّ ما يُعرَف باسم الفرومغناطيسية. الفرومغناطيسية هي الآلية الأساسية التي يُكوِّن بها بعض المواد مغناطيسات دائمة. تتميَّز عناصر النيكل والحديد والكوبالت وسبائكها بأنها فرومغناطيسية بسبب بنياتها غير المعتادة.

مثال ٤: تحديد الأيونات الفرومغناطيسية

أيٌّ من الآتي فرومغناطيسي؟

أ. Fe^{2+}

ب. V^{3+}

جـ. Mn^{2+}

د. Cu^{2+}

هـ. Ti^{2+}

الحل

ترتبط الفرومغناطيسية بقدرة العنصر على تكوين مغناطيس دائم. لا تحدث هذه الخاصية بشكل متكرِّر في عناصر الجدول الدوري. يمكن أن تكون عناصر الحديد والنيكل والكوبالت وسبائكها فرومغناطيسية. ويُمكن أن تكون سبائك الفلزات الأرضية النادرة أيضًا فرومغناطيسية. يأتي الحديد في الخيار (أ). وبناءً على ما ذُكِر، يمكننا القول بأن الخيار (أ) هو الإجابة الصحيحة لهذا السؤال.

تختلف الفلزات الانتقالية في الدورة الرابعة بشكلٍ ملحوظ في تفاعلاتها أو نشاطها الكيميائي مع المواد الأخرى. للنحاس معدل تفاعلية منخفض بشكل ملحوظ مع معظم الجزيئات الغازية، أما الحديد فيصدأ عندما يُترك في مكان مفتوح؛ بحيث يمكن أن يتفاعل مع جزيئات الأكسجين والماء الموجودة في الهواء. أما الفلزات الأخرى مثل السكانديوم فيمكن أن تتفاعل بقوة مع الماء إذا قُسِّمَت إلى جسيمات دقيقة. يُنتِج فلز السكانديوم أيونات الهيدروكسيد (OH^-) أثناء استبدال ذرات الهيدروجين في جزيئات الماء:

$$2\,Sc(s) + 6\,H_2O(l) \longrightarrow 2\,Sc(OH)_3(aq) + 3\,H_2(g)$$

نُوقِش استخدام الفلزات الانتقالية بشكلٍ أكثر شمولًا في شارح آخر، لكن من المهم أن نذكر هنا أن العديد من الفلزات الانتقالية تُستخدَم في الصناعة نظرًا لنشاطها الحفزي.

يُستخدَم فلز النيكل المقسَّم بدقة عاملًا حفَّازًا لإنتاج السمن النباتي خلال عمليات الهدرجة. يُستخدم الحديد المقسَّم عاملًا حفَّازًا لتعزيز عملية هابر-بوش، وهي عملية صناعية لتثبيت النيتروجين، والطريقة الصناعية الرئيسية لإنتاج الأمونيا.

تفاعل: تكوين الأمونيا في عملية هابر-بوش

$$N_2(g) + 3\,H_2(g) \xrightarrow[500°C,\ 200\ atm]{\text{عامل حفّاز Fe/Mo}} 2\,NH_3(g)$$

خامس أكسيد الفاناديوم (V_2O_5) عبارة عن مركب لفلز انتقالي معروف يمكن استخدامه عاملًا حفَّازًا لتعزيز إنتاج حمض الكبريتيك خلال عملية التماس:

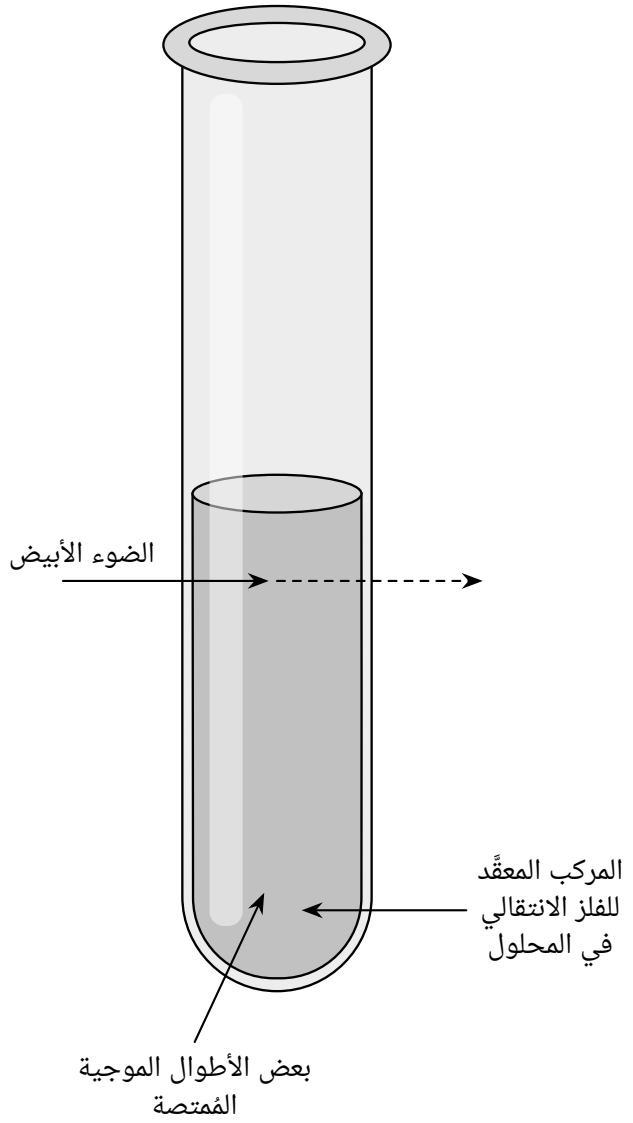
$$2\,SO_2(g) + O_2(g) \xrightarrow[450°C]{V_2O_5} 2\,SO_3(g)$$
$$H_2SO_4(l) + SO_3(g) \longrightarrow H_2S_2O_7(l)$$
$$H_2S_2O_7(l) + H_2O(l) \longrightarrow 2\,H_2SO_4(l)$$

وأخيرًا، يمكن استخدام ثاني أكسيد المنجنيز لتحفيز تفاعل تفكُّك بيروكسيد الهيدروجين:

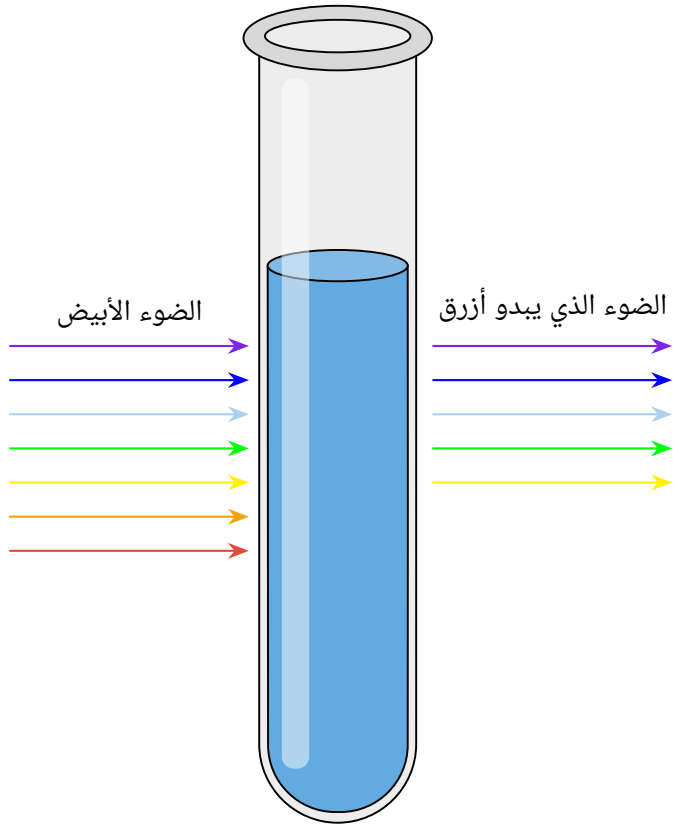
$$\text{بيروكسيد الهيدروجين} \xrightarrow{MnO_2} \text{أكسجين} + \text{ماء}$$
$$2\,H_2O_2(l) \xrightarrow{MnO_2} 2\,H_2O(l) + O_2(g)$$

تتميَّز الكيمياء التي تفسِّر النشاط الحفزي لعناصر الفلزات الانتقالية ومركباتها بالتعقيد. ولكن يمكن أن يُعزى جزء كبير من النشاط الحفزي إلى وجود إلكترونات المدارين 4s و3d، وحقيقة أنهما يسمحان بحدوث التفاعلات عبر مسارات كيميائية مختلفة. وقد تتضمَّن المسارات البديلة، على سبيل المثال، تكوين أيونات معقَّدة وسيطة أو تكوين مركبات معقَّدة من جزيئات المتفاعلات التي تُمتص على أسطح العامل الحفَّاز.

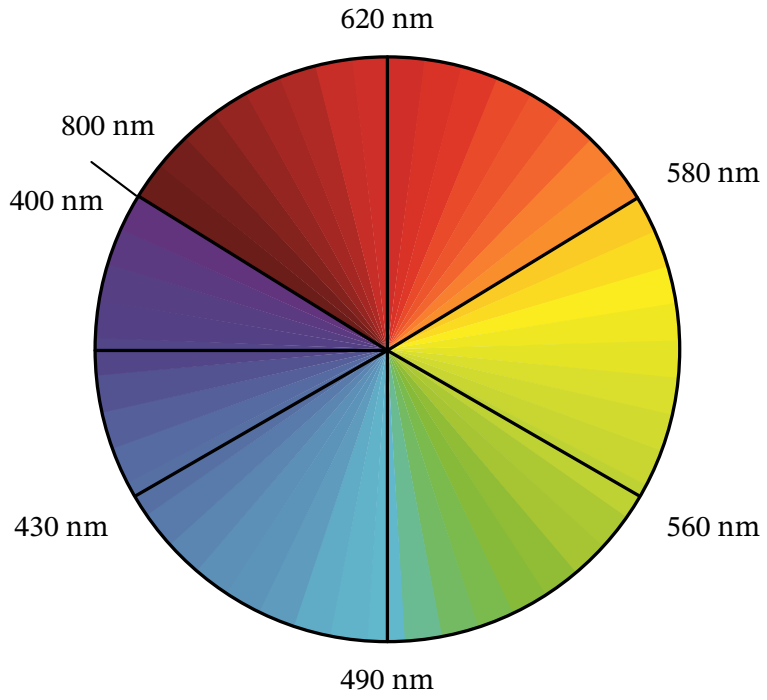
وعادةً ما تُكوِّن العناصر الانتقالية مركبات ملوَّنة. تنشأ الألوان عن امتصاص بعض الأطوال الموجية للضوء الأبيض بواسطة الفلز الانتقالي ومركبه. ولا ينتج عن هذا الامتصاص سوى بعض الأطوال الموجية للضوء الأبيض الذي يمر عبر المحلول.



عندما يذوب الأيون المعقَّد $[Cu(H_2O)_6]^{2+}$، الموجود في بلورات كبريتات النحاس الثنائي، في الماء، فإنه يمتص الأطوال الموجية للَّونين الأحمر والبرتقالي. كما نرى في الشكل الآتي.



تُشير عجلة الألوان الآتية إلى العلاقة بين الأطوال الموجية للضوء التي تمتصها الكاتيونات المختلفة واللون المناظر الذي تراه العين البشرية. عند امتصاص الضوء الأحمر والبرتقالي، ترى عين الإنسان اللونين المقابلين لهما على العجلة؛ ومن ثَمَّ يبدو لون المحلول أزرق. تُمتص طاقة الضوء بواسطة الإلكترونات الموجودة في أيونات بها مدارات d ممتلئة جزئيًا.



النقاط الرئيسية

- تزداد الكتلة الذرية للفلزات الانتقالية في الدورة الرابعة من المجموعة 3 إلى المجموعة 11 باستثناء النيكل.
- في البداية يقل نصف القطر الذري للفلزات الانتقالية في الدورة الرابعة، ثم يظل ثابتًا بشكل أساسي بدءًا من الكروم إلى النحاس.
- تزداد كثافة فلزات الدورة الرابعة عبر الجدول الدوري، لكن لا تزداد قيم الكثافة بمعدل تغيُّر ثابت.
- تكوِّن الفلزات الانتقالية بوجهٍ عام روابط فلزية قوية، وهذا يعني أن لها درجات انصهار عالية.
- غالبًا ما تكون الفلزات الانتقالية بارامغناطيسية أو دايامغناطيسية، وتعتمد خواصها المغناطيسية على توافر الإلكترونات المنفردة.
- فلزات الحديد والنيكل والكوبالت وسبائكها مواد فرومغناطيسية.
- العديد من عناصر الفلزات الانتقالية ومركباتها لها خواص حفزية.
- يمكن أن تكون مركبات الفلزات الانتقالية ملوَّنة؛ لأن الفلزات الانتقالية بها إلكترونات في المدارات d الممتلئة جزئيًا التي يمكن أن تمتص أنواعًا معيَّنة من الضوء المرئي.