



זרקורים בצבעי
אדום, כחול וירוק
מאירים קיר לבן.
האורות מתחברים
ללבן, אך לצללים
הנוצרים יש
צבעים זוהרים.

הכלנית צבעה אדום, ואילו החלמונית צהובה; אמנים ומדענים כאחד תהו מאז ומעולם על סודו של הצבע. מבחינתו של הפיסיקאי, צבעם של עצמים אינו בחומר שממנו הם עשויים ואפילו לא באור שהם פולטים או מחזירים. הצבע הוא תחושה המבטאת פעילות פיסיולוגית המתרחשת בעיניים ובמוח. לכן, אם רצוננו לדייק, באמרנו שצבעה של הכלנית אדום, כוונתנו שהוא נראה לנו אדום. יצורים חיים רבים, ובכללם בני אדם בעלי ליקוי בראיית צבעים, לא יבחינו כלל בצבעה האדום של הכלנית.

הצבעים שאנו רואים תלויים בתדירותו של האור המגיע לעינינו. אנו חשים תדירויות שונות כצבעים שונים; את התדירות הנמוכה ביותר שאנו מסוגלים לראות חשים מרבית האנשים כאדום, ואת התדירות הגבוהה ביותר - כסגול. ביניהם משתרע שלל הגוונים העצום המהווה את ספקטרום צבעי הקשת. מקובל לקבץ אותם לשבעה צבעים: אדום, כתום, צהוב, ירוק, כחול, אינדיגו וסגול. כל האורות הצבעוניים הללו, בהתמזגם יחד, נראים לעינינו כאור לבן. האור הלבן מן השמש הוא צירוף של כל תדירויות האור הנראה.

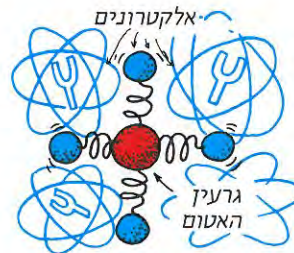
איור 26.3

הריבוע משמאל מחזיר
כל האור המאיר אותו. ב
השמש הוא לבן. אם הוא
מואר באור כחול, הוא כ
הריבוע מימין בולע את
האור המאיר אותו. באור
השמש הוא יתחמם יותר
הריבוע הלבן.

מלבד אותם עצמים כמו מנורות, שפופרות התפרקות ולייזרים (שבהם נדון בפרק 29), רוב העצמים שמסביבנו אינם פולטים אור אלא רק מחזירים אותו. הם מחזירים רק חלק מן האור הפוגע בהם - אותו חלק המעניק להם את צבעם.

הכלנית, למשל, אינה פולטת אור; היא מחזירה אור. אם נעביר את קרני השמש דרך מנסרה משולשת ונציב כלנית אדומה בחלקיו השונים של הספקטרום (איור 26.1), הכלנית תיראה שחורה או חומה בכל חלקיו של הספקטרום מלבד באור האדום. בחלקו האדום של הספקטרום עלי הכותרת ייראו אדומים, אך הגבעול והעלים הירוקים ייראו שחורים. הדבר מוכיח שהכלנית האדומה ניחנה ביכולת להחזיר אור אדום, אך אינה מסוגלת להחזיר סוגי אור אחרים. העלים הירוקים מסוגלים להחזיר אור ירוק אך לא סוגי אור אחרים. אם מאירים את הכלנית באור לבן, עלי הכותרת נראים אדומים והעלים נראים ירוקים, מכיוון שעלי הכותרת מחזירים את חלקו האדום של האור הלבן והעלים - את חלקו הירוק. כדי להבין מדוע עצמים מסוימים מחזירים אור בצבעים אלה או אחרים, עלינו להפנות את תשומת ליבנו לאטום.

האור מוחזר מעצמים באופן דומה לזה שבו הקול "מוחזר" מקולן מוסיקלי בשעה שמקישים בקולן אחר הנמצא בקרבתו ומרעידים אותו. גם אם תדירויותיהם של שני הקולנים אינן תואמות בדיוק, הקולן השני עשוי להתנווד, אף כי במשרעת פחותה בהרבה. הדברים נכונים גם לגבי אטומים. אם נשתמש במודל הקפיצים של האטום, נוכל לחשוב על האטומים והמולקולות כעל קולנים תלת-ממדיים שבהם האלקטרונים מתנהגים כמתנודים זעירים המתנוודים כאילו הם מחוברים באמצעות קפיצים סמויים (איור 26.2). ניתן להביא את האלקטרונים לידי תנודה מאולצת באמצעות שדות חשמליים מתנוודים או גלים אלקטרומגנטיים. מרגע שהחלו להתנווד, האלקטרונים עצמם מתחילים לשגר גלים אלקטרומגנטיים ממש כפי שקולנים מוסיקליים מתנוודים פולטים גלי קול.



לאטומים (ולמולקולות) תדירויות טבעיות משלהם; ניתן להביא אלקטרונים באטום מסוג אחד לידי תנודה בתדירויות השונות מאלה שבאטומים מסוגים אחרים. בתדירויות התהודה - שבהן משרעות התנודה גדולות במיוחד - האור ייבלע. אך בתדירויות גבוהות או נמוכות מתדירויות התהודה, האור שב ונפלט. אם החומר שקוף, האור ששב ונפלט יכול לעבור דרך החומר. הן בחומר שקוף והן בחומר אטום, האור שנפלט חזרה אל התווך שממנו הגיע הוא האור המוחזר.

החזרה ברירנית



איור 26.1

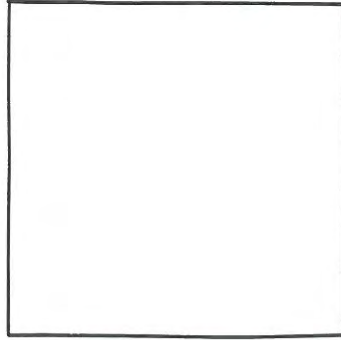
צבעם של עצמים תלוי בצבעו של האור שמאיר אותם.

איור 26.2

האלקטרונים החיצוניים באטום מתנוודים כאילו היו מחוברים לגרעין באמצעות קפיצים. בשל כך, התנהגותם של האטומים והמולקולות לגבי האור דומה להתנהגותם של קולנים מוסיקליים לגבי הקול.

איור 26.4

הפרווה סביב עיניה של הפנדה, על אוזניה ועל בולעת את כל אנרגיית הקרינה שבאור השמש הפוגע בה ולכן היא שח. הפרווה שבשאר חלקי ג מחזירה את כל תדירויות האור, ולכן היא לבנה.



איור 26.3

הריבוע משמאל מחזיר את כל האור המאיר אותו. באור השמש הוא לבן. אם הוא מואר באור כחול, הוא כחול. הריבוע מימין בולע את כל האור המאיר אותו. באור השמש הוא יתחמם יותר מן הריבוע הלבן.

על פי רוב, החומר בולע תדירויות אור מסוימות ומחזיר את היתר. אם חומר מסוים בולע את רוב תדירויות האור הנראה ומחזיר, למשל, רק את האדום, החומר נראה אדום. אם הוא מחזיר את כל תדירויות האור הנראה - כמו חלקו הלבן של דף זה, לדוגמה - הוא נראה באותו צבע של האור הפוגע בו. אם חומר בולע את כל האור הפוגע בו, כלומר - כלל אינו מחזיר אור, הוא נראה לנו שחור.

כשאור לבן פוגע בפרח, חלק מתדירויות האור נבלעות בתאי הפרח וחלקן מוחזרות. תאים המכילים כלורופיל בולעים את מרבית התדירויות ומחזירים את חלקו הירוק של האור הפוגע. עלי הכותרת של הכלנית, לעומת זאת, מחזירים בעיקר את האור האדום ומעט מן האור הכחול. מעניין לציין שעלי הכותרת של רוב הפרחים הצהובים, כדוגמת הנרקיס הצהוב או החלמונית, מחזירים גם את האור האדום והירוק, נוסף על הצהוב. נרקיסים צהובים מחזירים פס רחב של תדירויות. צבעיהם המוחזרים של רוב העצמים אינם צבעים טהורים בעלי תדירות יחידה, אלא הם מורכבים מטווח מסוים של תדירויות.



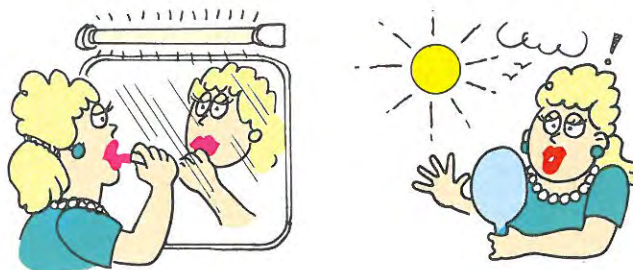
איור 26.4

הפרווה סביב עיניה של הפנדה, על אוזניה ועל רגליה בולעת את כל אנרגיית הקרינה שבאור השמש הפוגע בה ולכן היא שחורה. הפרווה שבשאר חלקי גופה מחזירה את כל תדירויות האור, ולכן היא לבנה.

עצם מסוגל להחזיר רק תדירויות המצויות באור שמאיר אותו. מראהו של כל עצם תלוי, לכן, בטיבו של האור שבו משתמשים. להבה של נר מפיצה אור שחסר בו כחול; אור הנר הוא צהבהב. נורת להט מאירה באור העשיר בתדירויות הנמוכות יותר, ומדגישה בכך את הצבע האדום. באריג שיש בו מעט אדום, האדום יבלוט יותר באורה של נורת להט מבאור של מנורה פלואורסצנטית. מנורות פלואורסצנט עשירות יותר בתדירויות הגבוהות, לכן באור כזה צבעי הכחול בולטים יותר. ישנם סוגי תאורה שבהם קשה לומר מה צבעם "האמיתי" של עצמים. באור יום צבעים רבים נראים שונים משהם נראים באורך של מנורות שונות (איור 26.5).

איור 26.5

הצבע תלוי במקור האור.



צבעו של עצם שקוף תלוי בצבע האור שהוא מעביר. פיסת זכוכית אדומה נראית כך מפני שהיא בולעת את כל האורות המהווים את האור הלבן - מלבד האור האדום, שאותו היא מעבירה. כך, פיסת זכוכית כחולה נראית כחולה מפני שהיא מעבירה בעיקר את האור הכחול ובלועת את האורות האחרים שמאירים אותה. בפיסת הזכוכית יש צבענים (פיגמנטים) - חלקיקים זעירים הבולעים באורח ברירני תדירויות מסוימות ומעבירים באורח ברירני תדירויות אחרות. מן הבחינה האטומית, האור הפוגע גורם לתנודות האלקטרונים שבמולקולות הצבען. חלק מהתדירויות נבלעות בצבען וחלקן שבות ונפלטות בזכוכית ממולקולה למולקולה. האנרגיה של התדירויות הנבלעות מגדילה את האנרגיה הקינטית של המולקולות, והזכוכית מתחממת. זכוכית חלונות רגילה היא חסרת צבע מפני שהיא מעבירה במידה שווה את כל תדירויות האור הנראה.

העברה ברירנית

איור 26.6 רק האנרגיה בתדירות האור הכחול מועברת; האנרגיה בתדירויות האחרות נבלעת ומחממת את הזכוכית.



ערבוב אורות צבעוניים

איור 26.7

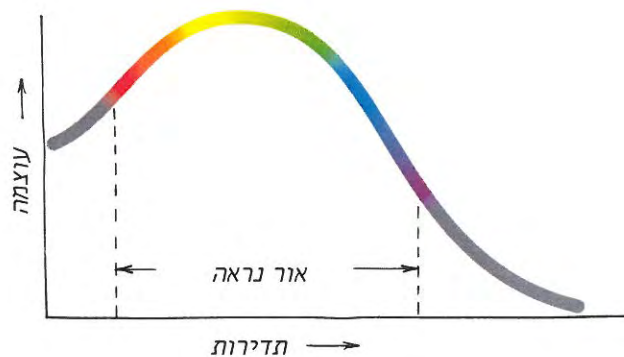
עקום הקרינה של אור הנ הוא גרף עוצמת האנרגיה כנגד התדירות. באור השמש העוצמה מרבית באזור הצהוב-ירוק שבאמצע התחום הנראה.

שאלות

1. כשאור אדום פוגע בכלנית אדומה, מדוע מתחממים העלים יותר מעלי הכותרת?
2. כשאור ירוק פוגע בכלנית, מדוע נראים עלי הכותרת שחורים?
3. אם תחזיקו גפרור, נר דולק או כל מקור קטן אחר של אור לבן ביניכם לבין פיסת זכוכית אדומה, תוכלו להבחין בשתי החזרות מהזכוכית: אחת מהמשטח הקדמי ואחת מהמשטח האחורי. אילו צבעים תראו מוחזרים מכל משטח?

ערבוב אורות
צבעוניים

את העובדה שאור השמש הלבן הוא צירוף של כל תדירויות האור הנראה אפשר להדגים בנקל אם מעבירים את האור דרך מנסרה ומתבוננים בשלל צבעי הקשת - בספקטרום. התפלגות התדירויות של אור השמש אינה שווה. עוצמת האור מרבית באזור הצהוב-ירוק של הספקטרום. מעניין לציין שהעין האנושית התפתחה כך שרגישותה היא מרבית בדיוק בתחום זה של הספקטרום. זו הסיבה לתופעה הרווחת של צביעת מכוניות כיבוי ורכבי הצלה אחרים בצבעי צהוב-ירוק, במיוחד בנמלי תעופה, שבהם ראות טובה היא חיונית. עובדה זו מסבירה גם מדוע בלילה אנו מייטיבים לראות לאורה של מנורת אדי נתרן יותר מאשר לאורה של מנורת תיל-טונגסטן בעלת אותה בהירות. התיאור הגרפי של התפלגות עוצמת האור כנגד התדירות נקרא עקום הקרינה של אור השמש (איור 26.7). זה גם העקום המאפיין, במרבית המקרים, את האור המוחזר ממשטחים לבנים המוארים באור השמש.



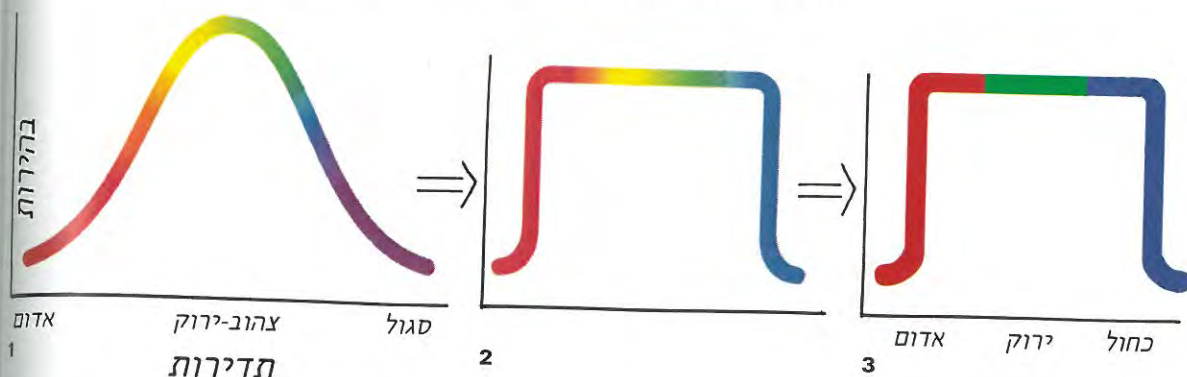
איור 26.7

עקום הקרינה של אור השמש הוא גרף עוצמת האנרגיה כנגד התדירות. באור השמש העוצמה מרבית באזור הצהוב-ירוק שבאמצע התחום הנראה.

תשובות:

1. העלים אינם מחזירים את האור האדום אלא בולעים אותו, ולכן הם מתחממים יותר.
2. עלי הכותרת אינם מחזירים את האור הירוק אלא בולעים אותו, ומכיוון שהאור היחיד הפוגע בכלנית הוא הירוק, אשר אינו כולל מרכיב אדום שאותו עלי הכותרת יכולים להחזיר, הם אינם מחזירים כל אור ונראים לעינינו שחורים.
3. האור המוחזר מהמשטח הקדמי הוא לבן מפני שאינו חוזר לתוך הזכוכית הצבעונית, שבה האור שאינו אדום נבלע. אל המשטח האחורי מגיע רק אור אדום, ולכן האור שאנו רואים מוחזר ממשטח זה הוא האדום.

ערבוב* של כל תדירויות האור הנראה יוצר, איפוא, אור לבן. עובדה מעניינת היא שגם תערובת של שלושה אורות בלבד - אדום, ירוק וכחול - אנו תופסים כאור לבן. נוכל להבין זאת אם נפשט במידה רבה את עקום הקרינה של השמש, המתואר באיור 26.7, ונחלק את הקרינה לשלושה תחומים, כמתואר באיור 26.8. האור בשליש הנמוך של התפלגות הספקטרום מעורר את המדוכים ברשתית הרגישים לתדירויות הנמוכות, ונראה לנו אדום; האור בשליש האמצעי מעורר את המדוכים הרגישים לתדירויות הביניים ונראה לנו ירוק; האור בשליש הספקטרום של התדירויות הגבוהות מעורר את המדוכים הרגישים לתדירויות אלה ונראה כחול.



איור 26.8

- (1) עקום הקרינה של אור השמש (2) בצורתו המפושטת (3) ולאחר חלוקתו לשלושה תחומים.

אם נקרין את שלושת האורות הצבעוניים האלה על מסך באופן שיחפפו זה את זה, הצבעים יתחברו זה עם זה וייצרו לבן. תערובת הנוצרת בחיבור של כמה אורות צבעוניים נקראת תערובת צבעים חיבורית, ובמקרה זה - תערובת חיבורית של שלושה אורות שונים היוצרים לבן. אם מתחברים רק שניים מן האורות, התוצאה תהיה היווצרות צבע שלישי (איור 26.9). אם נחבר כמויות מתאימות של אור אדום, ירוק וכחול - התחומים שאליהם רגישים שלושת סוגי המדוכים שבעינינו - נוכל ליצור כל אחד מצבעי הספקטרום. זו הסיבה לכך שהצבעים אדום, ירוק וכחול נקראים **צבעי יסוד חיבוריים**. אם נבחן מקרוב את התמונה על רוב מסכי הטלוויזיה הצבעוניים נגלה כי היא מורכבת מאוסף של "כתמים" זעירים, כל אחד קטן ממילימטר, שכל אחד מהם הוא מקור זעיר לאור צבעוני. עם הפעלת המכשיר, אחדים מן הכתמים הם אדומים, אחדים ירוקים ואחרים כחולים; ממרחק מה, התערובות של האורות בצבעי יסוד אלה יוצרות את כל מגוון הצבעים, ובכללם את הלבן**.

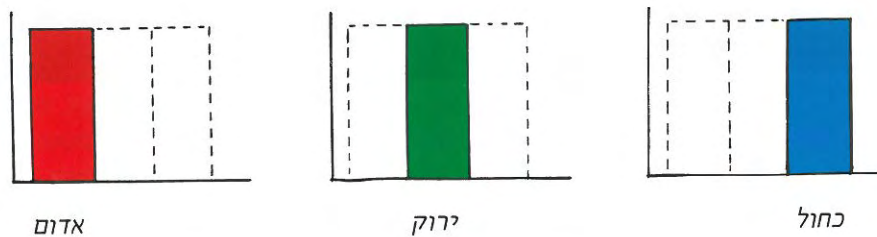
* ערבוב צבעים - בעברית גם: פיתוך (המתרג').

** מעניין לציין כי "השחור" שרואים בקטעים האפלים ביותר של השידור על מסך טלוויזיה שחור-לבן הוא פשוט צבעו של המסך עצמו, שלרוב אינו שחור אלא אפור בהיר. מכיוון שעניינו מבחינות כי מאזר זה מגיע אור בעוצמה הפחותה מ-3% מעוצמת החלקים המוארים של המסך, אנו רואים אותו כשחור.



איור 26.9

כשמתרחשת חפיפה בין אור מחלקו התחתון של הספקטרום (אדום) לבין אור מאמצע הספקטרום (ירוק) ולבין אור מתחום התדירויות הגבוהות (כחול), נוצר אור לבן. לכן הכדור הלבן נראה לבן כשמאירים אותו באורות בצבעי אדום, ירוק וכחול. התדעו מדוע הצללים שמטיל הכדור הם בצבעי ציאן, מגנטה וצהוב – הצבעים המשלימים לאדום, ירוק וכחול?



איור 26.10

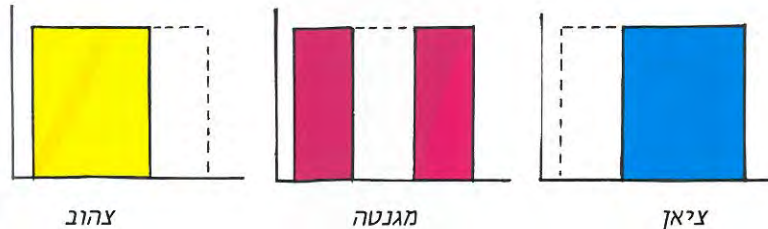
שלושת תחומי עקום הקרינה של אור השמש נראים בצבעי אדום, ירוק וכחול. אלה הם צבעי היסוד החיבוריים.

ערבוב צבענים

איור 26.13

כשאור לבן פוגע בצבען ב: ציאן, הרכיב האדום נבלע. צבען צהוב בולע את הרכיב הכחול. אם מערבבים צבע ציאן וצבען צהוב, הירוק א נבלע והוא הרכיב היחיד ש האור הלבן שמוחזר.

כל צייר יודע כי אם יערבב צבעי שמן בגוני אדום, ירוק וכחול, התוצאה לא תהיה צבע לבן אלא חום כהה דמוי אדמה. מתערובת של אדום וירוק בוודאי לא יתקבל צהוב, אף שזו התוצאה בתערובת צבעים חיבורית. ערבוב של חומרי צבע (פיתוך צבענים) הוא תהליך שונה לחלוטין מערבוב אורות צבעוניים. הצבעים המשמשים את הצייר או את הצֶבֶע מורכבים מצבענים - חלקיקים מוצקים זעירים שיוצרים את גוניהם האופייניים בתהליך של בליעה ברירנית או העברה ברירנית של תדירויות. אם מערבבים צבענים אדומים וירוקים, התערובת בולעת מן המרכיבים שבאור הלבן הפוגע בה, ולכן היא כהה. (גונה הוא חום. חום הוא "צהוב בעוצמה נמוכה", המתקבל גם בערבוב של צהוב עם שחור).



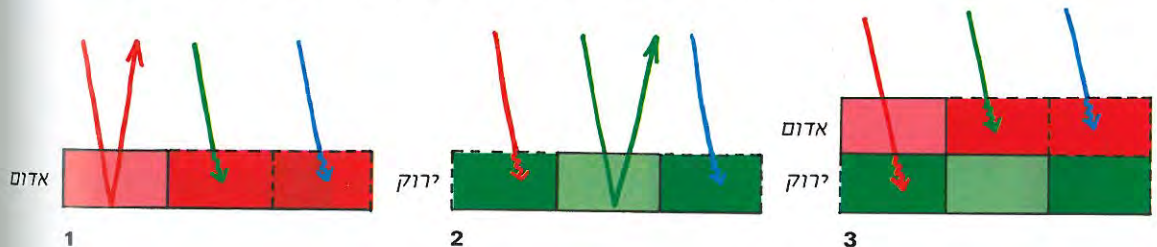
איור 26.11

אור אדום + אור ירוק = צהוב.
אור אדום + אור כחול = מגנטה (ורוד-סגול). אור ירוק + אור כחול = ציאן (טורקיז).
צהוב, מגנטה וציאן הם צבעי היסוד החיסוריים.

איור 26.14

צבען מגנטה בולע את הירוק; צבען צהוב בולע את הכחול. רק האדום אינו נבלע בתערובת של צבען מגנטה וצבען צהוב. לכן התערובת נראית אדומה.

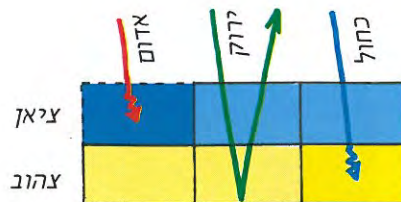
נוכל להבין ביתר בהירות את עניין ערבוב הצבעים אם נציב זו מעל זו (איור 26.12) את "תיבות" התפלגות הצבעים שהצגנו באיורים 26.10 ו-26.11. כאשר אור לבן מגיע מלמעלה, הצבען האדום שמעל לירוק (אם כי לסדר אין חשיבות) יבלע במידה רבה את חלקו הירוק ואת חלקו הכחול של האור הלבן - חלקים אלה מצוירים בגוון כהה כדי לציין בליעה. הצבען האדום מעביר את האור האדום, אך אור זה נבלע ברובו בצבען הירוק (הבולע אדום וכחול ומעביר רק ירוק). כך נבלע רוב האור הפוגע, ותערובת הצבענים נראית כהה מאוד.



איור 26.12

(1) הצבען האדום מיוצג באמצעות שלוש "תיבות". בתחום הירוק והכחול הן כהות יותר כדי לציין בליעה בתחומים אלה. רק הרכיב האדום של האור עובר. (2) הצבען הירוק מיוצג בשלוש תיבות שהאדום והכחול נבלעים בהן. (3) תערובת של צבען אדום וצבען ירוק בולעת את כל האור הלבן הפוגע וכל אור אינו מוחזר.

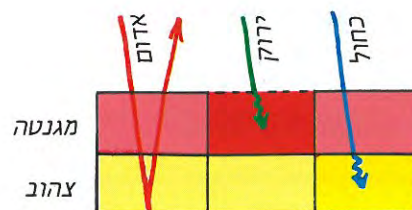
נתבונן, לעומת זאת, בתערובת של ציאן וצהוב המתוארת באיור 26.13. צירוף זה בולע אדום וכחול אך מחזיר את הירוק. אם מערבבים חומרי צבע בגוני ציאן וצהוב, מתקבל ירוק. מערבוב של מגנטה וצהוב מתקבל אדום (איור 26.14). באמצעות תערובות של צבענים בגוני מגנטה, ציאן וצהוב ניתן ליצור



איור 26.13

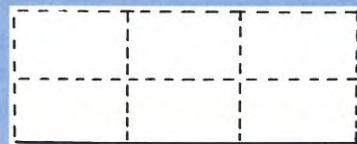
כשאור לבן פוגע בצבען בצבע ציאן, הרכיב האדום נבלע. צבען צהוב בולע את הרכיב הכחול. אם מערבבים צבען ציאן וצבען צהוב, הירוק אינו נבלע והוא הרכיב היחיד של האור הלבן שמוחזר.

את צבעי היסוד החיבוריים - אדום, ירוק וכחול. נוכל לסכם איפוא את תוצאות חיבור הצבעים בקביעה שניתן ליצור כל אחד מצבעי היסוד החיבוריים בצירופים של צבענים בצבעי ציאן, מגנטה וצהוב, שניים בכל פעם. ערבובם של הצבענים הבולעים גורם להפחתת צבעים; המתבונן רואה את האור הנשאר לאחר שהתרחשה הבליעה. זו הסיבה לכך שצבעים אלה - ציאן, מגנטה וצהוב - נקראים **צבעי יסוד חיסוריים**. בציור או בדפוס, נוהגים לעיתים לדבר על אדום, צהוב וכחול כעל צבעי היסוד, אך למעשה מתכוונים למגנטה, צהוב וציאן. מצירופים של צבעים אלה ניתן ליצור את כל צבעי הספקטרום בצביעה ובהדפסה.



איור 26.14

צבען מגנטה בולע את הירוק; צבען צהוב בולע את הכחול. רק האדום אינו נבלע בתערובת של צבען מגנטה וצבען צהוב. לכן התערובת נראית אדומה.



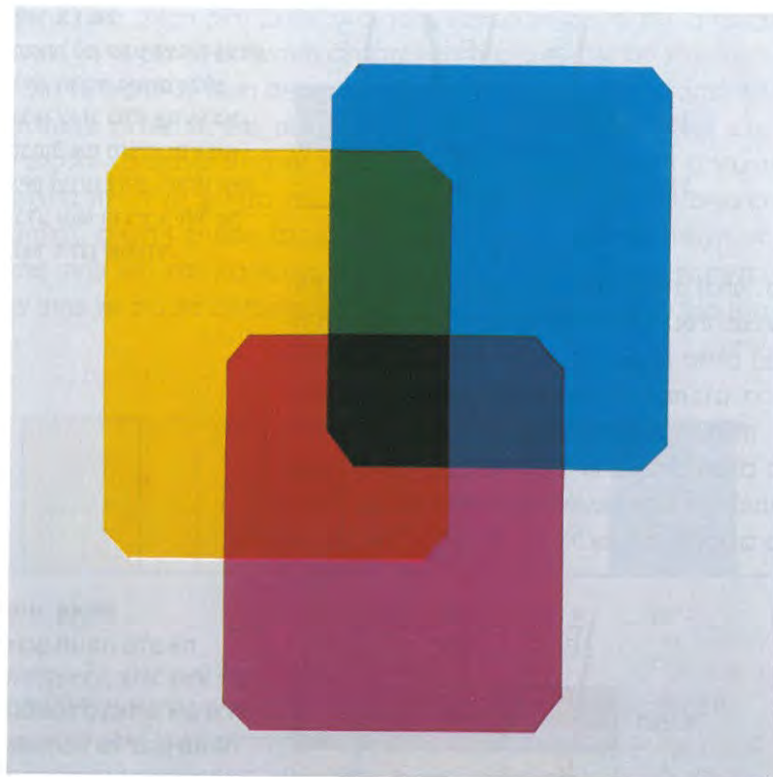
השלימו את דיאגרמת התיבות כדי לחזות איזה צבע יתקבל מערבוב של צבעי שמן בגוני ציאן ומגנטה. סמנו והדגישו בצבע כהה את המשבצות המתאימות, כדוגמת איורים 26.13 ו-26.14.

שאלה

דפוס צבע הוא אחד היישומים המעניינים והחשובים של ערבוב צבעים. כדי להדפיס איור צבעוני, מצלמים אותו שלוש פעמים: דרך מסנן בגון מגנטה, דרך מסנן צהוב, ודרך מסנן בצבע ציאן. צילומים אלה מכונים הפרדות הצבע. על כל אחד משלושת הנגטיבים המתקבלים, מתקבלת תבנית שונה של משטחים, המתאימה לסוג המסנן שבו השתמשו ולהתפלגות הצבעים באיור המקורי. דרך נגטיבים אלה מקרינים אור על לוחות מתכת שהוכנו כך שיקלטו את דיו הדפוס רק במשטחים שנחשפו לאור*. את כמות הדיו הנקלטת על חלקיו השונים של הלוח מווסתים באמצעות נקודות זעירות. אם תבחנו מקרוב, בעזרת זוכית מגדלת, את תמונות הצבע בספר זה ובספרים אחרים, תראו כיצד חפיפה של נקודות בשלושה צבעים יוצרת תמונה בכל גוני הקשת. תוכלו לראות זאת גם אם תקרבו את עיניכם לכרזת חוצות צבעונית.

* כיום קיימות גם שיטות ממוחשבות חדישות, שבהן אין צורך להשתמש בלוחות מתכת.

מדוע כחולים השמים



איור 26.15

חומרי צבע או צבענים – כאלה שבדיו צבעוני, בצבעי שמן ובחומרי צילום כדוגמת שלושת השקפים שבאיור – בולעים תדירויות מסוימות ומחסרים אותן ביעילות מהאור, ולכן הם מעבירים רק את חלקו של הספקטרום. צבעי היסוד החיסוריים הם צהוב, ציאן ומגנטה. כשאור לבן פוגע בשקפים חופפים בצבעים אלה, כל התדירויות נחסמות (מתחסרות) ומתקבל שחור. במקום שבו חופפים רק הצהוב והמגנטה מתחסרות כל התדירויות מלבד האדום. חיסור תדירויות, ביחסים שונים, באמצעות צהוב, ציאן ומגנטה נותן למעשה את כל הצבעים. הצבעים בדף מודפס זה, למשל, מתקבלים באמצעות צבע דפוס בשלושה צבעים בלבד: צהוב, ציאן ומגנטה. נסו לזהות את הכתמים הזעירים בעזרת זכוכית מגדלת.

איור 26.16

אלומת אור פוגעת באטום וגורמת לאלקטרונים שבו להתנודד. האלקטרונים המתנודדים שבים ופולטים אור בכיוונים שונים. האור מתפזר.

כללי ערבוב צבעים

את כל כללי חיבור הצבעים וחיסורם ניתן להסיק מאיור 26.9 ומאיור 26.15. אנו רואים כי חיבור של אור אדום ואור כחול הוא מגנטה; חיבור של אור ירוק ואור כחול הוא ציאן; וחיבור של אור אדום ואור ירוק הוא צהוב (יש בכך היגיון - זיכרו כי הצהוב נמצא בין האדום לירוק בספקטרום). נוהגים לומר שמגנטה הוא הצבע הנגדי לירוק, שציאן הוא הצבע הנגדי לאדום, ושצהוב הוא הצבע הנגדי לכחול; חיבור של צבע עם הצבע הנגדי לו נראה לבן. כל זוג אורות צבעוניים שבחיבורם (פיתוסם) מתקבל לבן נקראים **צבעים משלימים**. שימו לב לצל שמטיל הכדור באיור 26.9. הצל האמצעי נוצר על ידי הפנס הירוק; הוא אינו אפל מפני שמאירים אותו הפנס האדום והפנס הכחול, שאורותיהם חופפים ובחיבורם יוצרים מגנטה. בדומה לכך, הצל שמטיל הפנס הכחול נראה צהוב מפני שהוא מואר באור אדום ובאור ירוק. התוכלו להסביר מדוע הצל שמטיל הפנס האדום נראה בגון ציאן?

שאלות

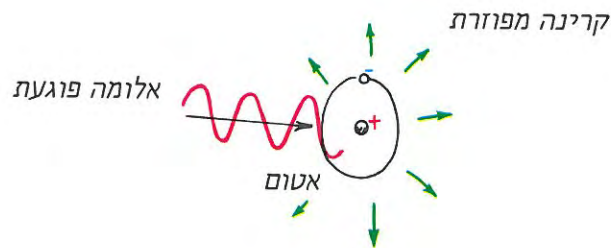
- היעזרו באיורים 26.9 ו-26.15 ומיצאו את המשלימים לאורות הצבעוניים ציאן, צהוב ואדום.
- אדום + כחול = _____.
- לבן - אדום = _____.
- לבן - כחול = _____.

מדוע כחולים השמים

אם מכוונים "אלומת" קול בעל תדירות מסוימת לעבר קולן בעל תדירות דומה, הקולן יתחיל להתנוודד, ובפועל יגרום להתפשטות הקול בתדירות זאת לכיוונים רבים. הקולן מפזר את הקול. תהליך דומה מתרחש בעת פיזור האור על ידי אטומים וחלקיקי חומר מרוחקים זה מזה, כפי שקורה באטמוספירה*.

ידוע כי אטומים מתנהגים כאילו היו "קולנים" אופטיים זעירים; הם שבים ופולטים גלי אור שמאירים עליהם. גם חלקיקי אבק זעירים נוהגים כך. ככל שהחלקיקים קטנים יותר, תדירות האור שהם מפזרים גבוהה יותר. הדבר מזכיר פעמונים: ככל שהם קטנים יותר הם מצלצלים בצלילים גבוהים יותר. מולקולות החנקן והחמצן וחלקיקי החומר המרחפים באטמוספירה הם מעין פעמונים זעירים אשר "מצלצלים" בתדירויות גבוהות לאחר שנטענו באנרגיה מן השמש. בדומה לקול הפעמונים, האור ששב ונפלט נשלח לכל הכיוונים. הוא מתפזר (איור 26.16).

הקרינה העל-סגולה המגיעה מהשמש נבלעת ברובה בשכבת מגן דקה של גז האוזון בשכבות הגבוהות של האטמוספירה. האור העל-סגול שלא נבלע מתפזר על ידי מולקולות האטמוספירה ועל ידי הגרגרים המרחפים בה. מבין תדירויות האור הנראה, הסגול מתפזר במידה מרבית, ואחריו - בזה הסדר - הכחול, הצהוב, הירוק, הכתום, והאדום - שמתפזר אך מעט. שיעור הפיזור של האדום הוא רק כעשירית מזה של הסגול. אף שהסגול מתפזר יותר מהכחול, עינינו



איור 26.16

אלומת אור פוגעת באטום וגורמת לאלקטרונים שבו להתנוודד. האלקטרונים המתנוודדים שבים ופולטים אור בכיוונים שונים. האור מתפזר.

תשובות:

- אדום, כחול, ציאן.
- מגנטה.
- ציאן.
- צהוב.

* סוג זה של פיזור נקרא פיזור ריילי והוא מתרחש כל אימת שהחלקיקים המפזרים קטנים בהרבה מאורך הגל של האור הפוגע, וכשתדירויות התהודה של חלקיקים מפזרים אלה גבוהות מתדירויות האור הפוגע. ככל שאורך הגל של האור קצר יותר, אור רב יותר מתפזר.

איור 26.17

באוויר הצח פיזור בתדירויות הגבוהות של האור מעניק לשמים את צבעם הכחול. אם האוויר מלא בחלקיקים גדולים יותר ממולקולות, גם תדירויות נמוכות יותר מתפזרות. אלה מצטרפות ומעניקות לשמים גוון לבנבן.



איור 26.18

בשעת השקיעה על קרני השמש לעבור מרחק גדול יותר באטמוספירה מאשר בצהריים. לפיכך, יותר כחול מתפזר מן האלומה בשקיעה בשעה שאלומה של אור שהיה בתחילה לבן מגיעה לקרקע, נותרות בה רק התדירויות הנמוכות, והן המעניקות לשקיעה את צבעה האדום.

אינן רגישות ביותר לאור סגול. הכחול, אף שהוא מועט יותר, משפיע יותר על עינינו, וכך נראים לנו השמים כחולים!

כחול השמים משתנה במקומות שונים ובתנאים שונים. גורם עיקרי המשפיע על גוון הוא תכולת אדי המים באטמוספירה. ביום בהיר ויבש צבע השמים הוא כחול עמוק בהרבה מצבעם ביום בהיר שבו הלחות גבוהה. מקומות שבהם שכבות האוויר הגבוהות יבשות במיוחד, כמו ארצות הים התיכון, ניחנו בשמים שצבעם כחול נפלא ומעניקים השראה לציירים זה מאות בשנים. במקומות שבהם יש באוויר חלקיקי אבק וחלקיקים רבים אחרים הגדולים ממולקולות החנקן והחמצן, תדירויות האור הנמוכות מפוזרות במידה רבה יותר. הדבר גורם לשמים להיראות פחות כחולים, כמעט לבנבנים. לאחר ירידת גשם, השוטף את חלקיקי האבק מן האוויר, השמים מקבלים גוון כחול עמוק יותר.

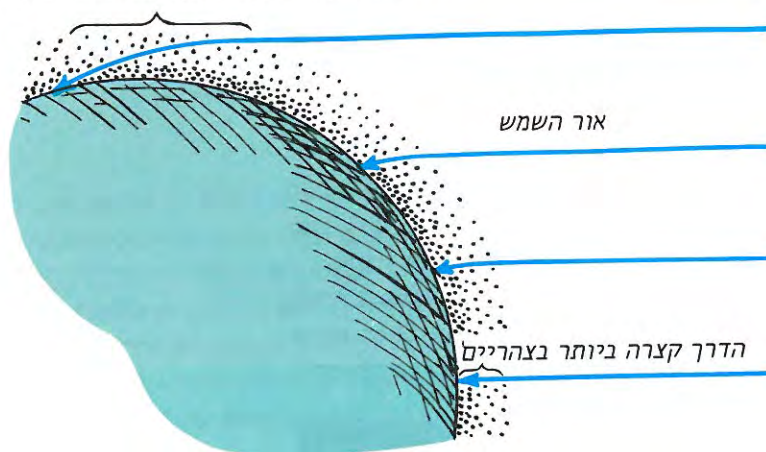
ההסבר לאובך האפרפר שקיים תמיד בשמיהן של ערים גדולות הוא קיומם של חלקיקים הנפלטים ממנועי השריפה של כלי הרכב וממפעלי התעשייה. גם בעת פעולת סרק, מנוע מכונת ממוצעת פולט למעלה מ-100 מיליארד חלקיקים בכל שנייה! רובם אינם נראים, והם מהווים רק בסיס שאליו נצמדים חלקיקים אחרים. כך מופיעים חלקיקים המפזרים אור בתדירויות נמוכות יותר. בגדולים שבין חלקיקים אלה התהליך העיקרי הוא בליעה ולא פיזור, ולכן לאובך שהם יוצרים יש גוון חום.

תדירויות האור הנמוכות הן המתפזרות פחות מכל באמצעות מולקולות החנקן והחמצן, שהן רכיביה העיקריים של האטמוספירה שלנו. לפיכך, האדום, הכתום והצהוב מועברים דרך האטמוספירה במידה רבה יותר מן הסגול והכחול. האור האדום, שמתפזר פחות מכול, עובר דרך האטמוספירה יותר מכל אור אחר. לכן, בשעה שאור לבן עובר דרך שכבת אטמוספירה עבה במיוחד, התדירויות הגבוהות מפוזרות במידה מרבית בעוד התדירויות הנמוכות מועברות בפיזור מזערי. אטמוספירה עבה כזאת עומדת בדרכה של קרינת השמש בעת השקיעה.

מדוע אדומות השקיעות

בשעת הצהריים עוביה של האטמוספירה שקרינת השמש עוברת דרכה אל פני כדור הארץ הוא הקטן ביותר. רק שיעור מועט של קרינה בתדירויות גבוהות מתפזר אז מאור השמש. די בכך להעניק לשמש גוון צהוב. עם חלוף השעות וכאשר השמש ממוקמת נמוך יותר בשמים (איור 26.18), דרכה של הקרינה דרך האטמוספירה ארוכה יותר, ושיעור רב יותר של כחול מתפזר מאור השמש. הרחקתו של הכחול מותירה את האור המועבר כשהוא נראה מעט אדמדם יותר בגוונו. צבעה של השמש הולך ומאדים - מצהוב לכתום, ובסופו של דבר לאדום-כתום בשעת השקיעה*.

דרכו של אור השמש דרך האטמוספירה ארוכה ביותר בשעת השקיעה (או בזריחה)



איור 26.18

בשעת השקיעה על קרני השמש לעבור מרחק גדול יותר באטמוספירה מאשר בצהריים. לפיכך, יותר כחול מתפזר מן האלומה בשקיעה. בשעה שאלומה של אור שהיה בתחילה לבן מגיעה לקרקע, נותרות בה רק התדירויות הנמוכות, והן המעניקות לשקיעה את צבעה האדום.

צבעי השקיעה תואמים את חוקי ערבוב הצבעים שהכרנו. כשמחסרים כחול מאור לבן, הצבע המשלים שנותר הוא הצהוב. כשמחסרים את הירוק, שתדירותו בינונית, נותר הצבע מגנטה. צירופי הצבעים המתקבלים משתנים בהתאם לתנאים האטמוספיריים, ואלה משתנים מיום ליום ומעניקים לנו מגוון של שקיעות.

כשאנו מתבוננים מפני כדור הארץ אל האטמוספירה על רקע החלל החיצון האפל, היא נראית לנו כחולה - בצבע השמים. אך האסטרונוטים, המתבוננים מלמעלה כלפי מטה אל אותה אטמוספירה עצמה על רקע פניו הבהירים של כדור הארץ, אינם רואים את האטמוספירה כחולה. הסיבה לכך היא שהאור הכחול המפוזר הוא מועט יחסית וחיוור. ניתן לראות אור חלש על רקע כהה, אך לא על רקע בהיר.

* זריחות ושקיעות צבעוניות במידה בלתי רגילה היו מתרחשות אילו היה באוויר מספר גדול במיוחד של חלקיקים שגודלם עולה על זה של מולקולות האטמוספירה. זה היה המצב על פני כדור הארץ כולו בשלוש השנים שלאחר התפרצות הר הגעש קראקטואה, בשנת 1883. אז נפלטו כמויות עצומות של חלקיקים בגודל של כמיקרון (אלפית המילימטר) והתפזרו על פני אטמוספירת כדור הארץ כולו. תופעה דומה התרחשה - אף כי במידה פחותה - לאחר התפרצות הר הגעש פינאטובו שבפיליפינים בשנת 1991.

שאלות

1. אילו גרמו המולקולות בשמים לפיזור חזק יותר של האור בתדירויות הנמוכות מאשר זה של האור בתדירויות הגבוהות, מה היו אז צבעי השמים והשקיעה?
2. להרים כהים ורחוקים יש גוון כחלחל. ממה נובע הגוון הכחול? (רמז: מה בדיוק נמצא בינינו לבין ההרים שאנו רואים?)
3. הרים רחוקים מכוסים שלג מחזירים אור רב ונראים בהירים. אך יש להם גם גוון צהבהב, והדבר תלוי במרחקם מאיתנו. מדוע הם נראים צהבהבים? (רמז: מה קורה לאור הלבן המוחזר בדרכו מן ההרים אלינו?)

מדוע לבנים העננים

העננים הם צבירים של מולקולות מים בעלי גדלים שונים. הואיל והצבירים הם בגדלים שונים, מתקבל מגוון של תדירויות מפורזות: הצבירים הזעירים ביותר מפזרים כחול; צבירים גדולים מעט יותר מפזרים ירוק; וצבירים גדולים עוד יותר מפזרים אדום. התוצאה הכוללת היא ענן לבן. אלקטרונים הקרובים זה לזה בצביר מתנוודדים יחד במתואם, ובשל כך עוצמתו של האור המפוזר גדולה יותר מכפי שהיתה אילו היה האור מתפזר מאותו מספר של אלקטרונים המתנוודדים בנפרד. זו הסיבה לבהירותם של העננים.

בטיפות גדולות יותר מתרחשת בליעה, ועוצמת האור המפוזר מהן קטנה. העננים נראים כהים יותר. אם הטיפות גדולות עוד יותר הן נופלות לאדמה; גשם מתחיל לרדת.

בעתיד, כשתמצאו את עצמכם עומדים ומתפעלים מן השמים הכחולים, מצחור העננים על מגוון צורותיהם או מיופיה של שקיעה אדומה, חישבו על כל אותם קולני-אור זעירים שבתנוודותיהם יוצרים מחזות נפלאים אלה, והתפעלותכם תגדל אף יותר!



איור 26.19

הענן מורכב מחלקיקים במגוון של גדלים. הזעירים ביותר מפזרים את הכחול, הגדולים מעט יותר מפזרים ירוק, וחלקיקים גדולים עוד יותר מפזרים אדום. התוצאה הכוללת היא ענן לבן.

תשובות:

1. אילו התפזרו התדירויות הנמוכות, שמי הצהריים היו נראים אדמדם-כתומים. בשעת השקיעה היה מתפזר אור אדום רב יותר במסלולו הארוך יותר של האור באטמוספירה, ואור השמש היה נראה בעיקר כחול וסגול. השקיעות היו כחולות!
2. כשמתבוננים בהרים רחוקים מאוד, רק אור מועט ביותר מגיע מהם אלינו. הגוון השליט אז הוא התכול של האטמוספירה שבין ההרים לבינינו. זהו הכחול של "השמים" הנמוכים שבינינו לבינם, וזו הסיבה לצבעם הכחלחל של ההרים.
3. הסיבה לכך שהרים בהירים מכוסים שלג נראים צהבהבים היא שהאור הכחול מן ההרים המושלגים מתפזר בדרכו אלינו. וכך, בשעה שהאור מגיע אלינו, הוא חלש בתדירויות הגבוהות וחזק בתדירויות הנמוכות - ומכאן צבעו הצהבהב. במרחקים גדולים יותר, גדולים מאלה שבהם אנו רואים הרים בדרך כלל, הם היו נראים לעינינו כתומים מאותה סיבה שצבע השקיעה כתום.

איור 26.20

צבע המים הוא ציאן מפ של טיפות מים במגוון ש

מדוע צבע המים כחול-ירקרק



איור 26.21

אין כל צבען כחול בנוצו של העורבני. אך בסעיפי נוצותיו ישנם תאים בוע זעירים המפזרים את האור בעיקר בתדירויות הגבוהות הסיבה לכך שכנפי העורבני הן כחולות היא גם הסיבה לכך שהשמים כחולים - האור.



איור 26.20

צבע המים הוא ציאן מפני שהמים בולעים אדום. הקצף שעל המים לבן מפני שבדומה לענן, הוא מורכב מצבירים זעירים של טיפות מים במגוון של גדלים, המפזרים את כל תדירויות האור הנראה.

מדוע צבע המים כחול-ירקרק



איור 26.21

אין כל צבען כחול בנוצותיו של העורבני. אך בסעיפי נוצותיו ישנם תאים בועתיים זעירים המפזרים את האור – בעיקר בתדירויות הגבוהות. הסיבה לכך שכנפי העורבני הן כחולות היא גם הסיבה לכך שהשמים כחולים – פיזור האור.

צבעם של המים אינו הכחול העמוק והמרהיב שאנו רואים על פני אגם או בים. כחול זה הוא צבעם של השמים המשתקפים במים. צבעם של המים עצמם, כפי שאפשר לראות אם מתבוננים בגוף לבן השקוע במים, הוא כחול-ירקרק חיוור. אף שהמים שקופים כמעט לכל תדירויות האור הנראה, הם בולעים במידה רבה את הגלים התת-אדומים. הסיבה לכך היא שמולקולות המים מתנוודות בתהודה עם תדירויות התת-אדום. אנרגיית הגלים התת-אדומים מומרת לאנרגיה פנימית של המים, ולכן קרינת השמש מחממת את המים. מולקולות המים גם מתנוודות בתהודה, אף כי חלשה ביותר, בתדירות האור האדום הנראה, ועקב כך מתרחשת בליעה קלה של האור האדום במים. אור אדום ייחלש לרבע מבהירותו ההתחלתית אם יעבור דרך עמוד מים שעומקו 15 מטרים. מעט מאוד אור אדום נותר באור השמש החודר לעומק העולה על 30 מטרים של מים. כשמרחיקים את האדום מאור לבן, איזה צבע נותר? אפשר לנסח שאלה זאת באופן אחר: מהו צבעו המשלים של האדום? המשלים של האדום הוא ציאן – צבע כחול-ירקרק. לכן במעמקי הים הכול נראה ירקרק. מעניין לציין כי סרטנים ויצורים ימיים רבים אחרים, הנראים שחורים במעמקי הים, מתגלים כאדומים כשמוציאים אותם מהמים. במעמקים אי אפשר להבחין בין אדום לשחור, ונראה שגם מנגנוני הברירה של האבולוציה לא הבחינו ביניהם במעמקי הים.

וכך, בעוד השמים כחולים מפני שהכחול מתפזר במידה רבה על ידי המולקולות שבאטמוספירה, צבע המים הוא כחול-ירקרק מפני שהאדום נבלע במולקולות המים. נמצאנו למדים שצבעם של דברים תלוי בצבעים המפוזרים ובצבעים המוחזרים מהמולקולות, וגם בצבעים שהמולקולות בולעות*.

* צבען של עיניים כחולות נובע מפיוור של אור מחלקיקים רחוקים יחסית זה מזה בקשתית העין, ולא מקיומם של צבענים כלשהם. צבען של עיניים חומות נובע מבליעה בצבענים שבעיניים אלה.

ולסיום, נציין שוב כי תחושות הצבעים שאנו רואים נמצאות בנו ולא בעולם שמסביבנו. העולם מלא בתערובות של תנודות - מגוון של גלים אלקטרומגנטיים המגיבים עם הקולטנים דמויי החרוט - המדוכים - שברשתיות עינינו, ובעקבות זאת מעוררים את אזורי המוח המשרים בנו תחושת צבע. העולם הצבעוני שאנו רואים הוא תוצאה של פעולת הגומלין בין האור לבין העין ובין העיניים לבין אזורי התחושה שבמוח.

תקציר מונחים

צבעים ראשוניים חיבוריים שלושת האורות הצבעוניים - אדום, כחול וירוק - שצירופיהם ביחסים המתאימים נותנים את כל צבעי הספקטרום.

צבעים ראשוניים חיסוריים שלושת הצבעים של צבענים בולעים - מגנטה, צהוב וציאן - שערבובם ביחסים המתאימים יכול להשרות בנו תחושות של כל הצבעים.

צבעים משלימים זוג אורות צבעוניים שבצירופם מתקבל אור לבן.

שאלות חזרה

1. מה הקשר בין תדירותו של אור לצבעו?

החזרה ברירנית

2. מה קורה לאור בחומר שתדירותו הטבעית שווה לזו של האור?

3. מה קורה לאור הפוגע בחומר שתדירותו הטבעית גדולה מזו של האור או קטנה ממנה?

4. מה ההבדל בין צבעו הלבן של דף זה לבין צבעו השחור של צבע הדפוס שעליו מבחינת האור הלבן הפוגע בשניהם?

5. כיצד משתנה צבעו של עצם כאשר הוא מואר פעם באור של נר ופעם באור ממנורת פלואורסצנט?

העברה ברירנית

6. מהו צבען?

7. מה צבעו של האור העובר דרך פיסת זכוכית אדומה?

8. איזו פיסת זכוכית תתחמם מהר יותר באור השמש - חסרת צבע או צבעונית? מדוע?

ערבוב אורות צבעוניים

9. כיצד אפשר להוכיח את הטענה כי אור השמש הלבן מורכב מכל צבעי הספקטרום?

10. מה צבעה של התדירות בעלת העוצמה המרבית בקרינת השמש?

11. מה צבעו של האור שרגישותו של עינינו אליו היא המרבית?

12. מהו עקום קרינה?

13. בעקום הקרינה, מהם תחומי התדירות של האור האדום, הירוק והכחול?

14. מדוע מכונים האדום, הירוק והכחול צבעי יסוד חיבוריים?

ערבוב צבענים

15. מדוע נראית תערובת של צבענים בצבעי אדום וירוק בגוון חום כהה מאוד?

16. מדוע נראית תערובת של צבענים בצבעי ציאן וצהוב בגוון ירוק?

17. מדוע מכונים מגנטה, צהוב וציאן צבעי יסוד חיסוריים?

18. אם תתבוננו דרך זכוכית מגדלת בתמונת צבע המודפסת בעיתון צבעוני, תבחינו בדיו בשלושה צבעים ובשחור. מהם שלושת הצבעים?

כללי ערבוב צבעים

19. מהו הצבע המתקבל מצירוף של האורות אדום, כחול וירוק בעוצמות שוות?

20. מהו הצבע המתקבל מצירוף של אור כחול ואור ירוק בעוצמות שוות?

21. מהו הצבע המתקבל מצירוף של אור אדום ואור בצבע ציאן בעוצמות שוות?

22. מדוע מכונים האדום והציאן צבעים משלימים?

מדוע כחולים השמים

23. אילו פעמונים מגיבים יותר לקול שצלילו גבוה, גדולים או קטנים?

24. אילו חלקיקים מגיבים יותר לאור בעל תדירות גבוהה, גדולים או קטנים?

25. האם נכונה הטענה הבאה: השמים כחולים מפני שצבען של מולקולות החנקן והחמצן כחול?

26. מדוע לעיתים נראים השמים לבנבנים?

27. מדוע צבעם הכחול של השמים עמוק יותר לאחר שיורד גשם שוטף?

מדוע אדומות השקיע

28. האם נכונה הטענה הבאה השקיעה מפני שאז צבען של אדום?

29. מדוע צבעה של השמש נר ובשעת השקיעה, אך לא בצהר?

30. מדוע משתנה צבעה של ה

מדוע לבנים העננים

31. התוכלו להביא ראיה לכך במגוון של גדלים?

32. מה הראיה לכך שבענני ג במיוחד?

מדוע צבע המים כחול

33. איזה תחום של הספקטרו במים במידה מרבית?

34. איזה תחום של הספקטרו נבלע במים במידה מרבית?

35. איזה צבע מתקבל כשמו

36. מדוע נראים המים בצבע

37. באיזה צבע ייראה לנו סו

מטלות בית

1. התבוננו בגיליון של נייר צ אחר כך התבוננו בגיליון של ברשתית העין הרגישים לצבע ותראו בבואה מאוחרת של ה במשטח הלבן. זאת משום שו למוח אות מוחלש. צירוף של צירוף של כל הצבעים פחות! המשלים לצבע החסר. נסו ו

2. גזרו לכם דיסקת קרטון אחדים. נקבו בדיסקה שני ח כך שניתן יהיה להשחיל בהם באיור. סובבו את הדיסקה כ בדומה לגומייה בטיסני צעצ במשיכתו כלפי חוץ ותגרמו חצי דיסקה בצהוב ואת חצי

שתסחררו אותה הצבעים יתערבבו והדיסקה תיראה לבנה כמעט (עד כמה היא אכן תיראה לבנה - הדבר תלוי בגווי הצבעים). חיזרו על הניסוי בזוגות אחרים של צבעים משלימים.



3. כסו את שני קצותיו של גליל קרטון בנייר אלומיניום ונקבו בהם חורים, האחד בקוטר של כ-3 מ"מ והאחר בקוטר כפול מזה. צפו דרך השפופרת בצבעים של עצמים שונים על רקע השחור שבשפופרת. תבחינו בכך שגווי הצבעים נראים שונים במידה ניכרת מכפי שהם נראים על רקע סביבתם הרגילה.

4. ערכו הדמיה משלכם של שקיעת השמש: הוסיפו טיפות חלב אחדות לכוס מים והתבוננו דרכה בנורה דולקת. הנורה תיראה אדמדמה או כתומה ואילו האור המפוזר לצדדים ייראה כחלחל. נסו ותיווכחו.

תרגילים

1. מדוע יתחממו עליה של כלנית אדומה יותר מעלי הכותרת שלה אם יאירו אותה באור אדום? מדוע לובשים תושבי אזורים חמים מסוימים בגדים לבנים?
2. לקוחה בחנות אופנה המוארת בתאורה פלואורסצנטית מתעקשת לקחת את הבגד שהיא בוחנת אל אור השמש בפתח החנות כדי לראות את צבעו. האם היא נוהגת בהיגיון? הסבירו.
3. אילו היה אור השמש ירוק ולא לבן, מה היה צבעם המומלץ של הבגדים ביום חם במיוחד? ביום קר במיוחד?
4. מדוע איננו מונים את השחור ברשימת הצבעים?
5. מדוע צובעים בשחור את חלקם הפנימי של מכשירים אופטיים?
6. באיזה צבע ייראה בגד אדום אם יואר באור השמש? באור אדום משלט ניאון? באור בצבע ציאן?
7. מדוע גיליון נייר לבן נראה לבן באור לבן, אדום באור אדום, כחול באור כחול, וכך בכל אור בצבע אחר?
8. מצפים זרקור בנייר צבעוני שאינו מעביר את האור

מדוע אדומות השקיעות

28. האם נכונה הטענה הבאה: השמים אדומים בשעת השקיעה מפני שאז צבען של מולקולות החנקן והחמצן אדום?

29. מדוע צבעה של השמש נראה אדמדם בשעת הזריחה ובשעת השקיעה, אך לא בצהריים?

30. מדוע משתנה צבעה של השקיעה מיום ליום?

מדוע לבנים העננים

31. התוכלו להביא ראיה לכך שבעננים יש חלקיקים במגוון של גדלים?

32. מה הראיה לכך שבענני גשם יש חלקיקים גדולים במיוחד?

מדוע צבע המים כחול-ירקרק

33. איזה תחום של הספקטרום האלקטרומגנטי נבלע במים במידה מרבית?

34. איזה תחום של הספקטרום האלקטרומגנטי הנראה נבלע במים במידה מרבית?

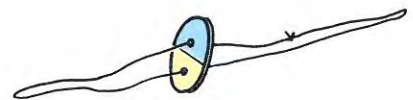
35. איזה צבע מתקבל כשמחסרים את האדום מאור לבן?

36. מדוע נראים המים בצבע ציאן?

37. באיזה צבע ייראה לנו סרטן אדום במעמקי הים?

מטלות בית

1. התבוננו בגיליון של נייר צבעוני מזווית של כ-45 מעלות. אחר כך התבוננו בגיליון של נייר לבן. אותם מדוכים ברשתית העין הרגישים לצבע הנייר הראשון מתעייפים, ותראו בבואה מאוחרת של הצבע המשלים כשתבוננו במשטח הלבן. זאת משום שהמדוכים העייפים משגרים למוח אות מוחלש. צירוף של כל הצבעים נראה לבן, אך צירוף של כל הצבעים פחות אחד יוצר תחושה של הצבע המשלים לצבע החסר. נסו ותראו!
2. גיזרו לכם דיסקת קרטון בקוטר של סנטימטרים אחדים. נקבו בדיסקה שני חורים במרחק מה מן המרכז, כך שניתן יהיה להשחיל בהם לולאת חוט משיכה כמתואר באיור. סובבו את הדיסקה כמתואר, באופן שהחוט יתלפף בדומה לגומייה בטיסני צעצוע. אחר כך מיתחו את החוט במשיכתו כלפי חוץ ותגרמו לסחרור הדיסקה. אם תצבעו חצי דיסקה בצהוב ואת חציה האחר בכחול, בעת



רקע שמים זרועי כוכבים, או שמא הם יראו את הכוכבים רק בשעה שיימצאו בצילה של מושבת החלל שלהם?

18. כיצד קשורה העובדה שניתן ללקות בכוויות שמש גם אם שוהים בצל לעובדה שהאור העל-סגול שלא נבלע באטמוספירה מתפזר בה בשיעור ניכר?

19. מה דעתכם על הטענה הבאה: "הו, השקיעה האדומה הנפלאה הזאת, זה רק האור שנשאר ולא התפזר במעברו דרך האטמוספירה."

20. אילו היו השמים מורכבים ממולקולות המפזרות בעיקר אור כתום ולא כחול, מה היה אז צבען של השקיעות?

21. חלקיקים זעירים, בדומה לפעמונים קטנים, מפזרים גלים בתדירות גבוהה יותר מאשר גלים בתדירות נמוכה. חלקיקים גדולים, בדומה לפעמונים גדולים, מפזרים בעיקר גלים בתדירויות נמוכות. חלקיקים ופעמונים בינוניים מפזרים בעיקר תדירויות בינוניות. כיצד קשורות עובדות אלו לצבעם הלבן של העננים?

22. חלקיקים גדולים מאוד, כמו טיפות מים, בולעים אור רב מזה שהם מפזרים. כיצד קשורה עובדה זו לכהות ענני גשם?

23. אילו היה עובי האטמוספירה של כדור הארץ גדול פי חמישים, האם עדיין היה השלג נראה לבן או שמא היה לו צבע אחר? איזה צבע?

24. עובי האטמוספירה של כוכב הלכת צדק הוא יותר מ-1000 ק"מ. האם תצפו לראות שמש לבנה מפניו של כוכב לכת זה?

25. שבירת אורן של כל השקיעות והזריחות על פני כדור הארץ גורמת לירח להיראות אדמדם בזמן ליקוי ירח. הסבירו כיצד מתרחש הדבר.

הצהוב מתיל הלהט המלווה שבנורתו. מה צבעה של אלומת האור הבוקעת מהזרקור?

9. כיצד אפשר להשתמש בזרקורים המאירים את בימת התיאטרון כדי להפוך לפתע את צבעם הצהוב של בגדי השחקנים לשחור?

10. מאירים מסך לבן באור משני פנסים - האחד מכוסה בזכוכית כחולה והאחר בזכוכית צהובה. איזה צבע מתקבל על המסך אם שתי אלומות האור חופפות? אם ירכיבו את שני לוחות הזכוכית על פנס אחד, מה יקרה אז?

11. כיצד פועלת טלוויזיית צבע, בחיבור צבעים או בחיסור צבעים? באילו כתמים צריכים האלקטרונים לפגוע כדי ליצור צבע צהוב? מגנטה? לבן?

12. היעזרו באיור 26.9, והשלימו את המשוואות הבאות:

אור צהוב + אור כחול = אור _____

אור ירוק + אור _____ = אור לבן

האורות מגנטה + צהוב + ציאן = אור _____

13. הסתייעו באיור 26.9 כדי לקבוע האם נכונות הטענות הבאות. אחר כך השלימו את המשפט האחרון (כל הצבעים מתקבלים מצירופי אורות צבעוניים).

אדום + ירוק + כחול = לבן

אדום + ירוק = צהוב = לבן - כחול

אדום + כחול = מגנטה = לבן - ירוק

ירוק + כחול = ציאן = לבן - _____

14. מדוע איננו רואים כוכבים באור היום?

15. מדוע צבעם הכחול של השמים כהה יותר במקומות גבוהים? (רמז: מהו צבע השמים על הירח?)

16. האם ניתן לראות את הכוכבים מן הירח כשעל הירח יום, כלומר - בעת שהשמש זורחת?

17. האם תושביה של מושבת חלל יראו את השמש על

החזרה ושבירה