

פרק ז: מודל הגלים האלקטרומגנטיים של האור

1. שדה אלקטרומגנטי מתפשט כך: שדה חשמלי משתנה יוצר שדה מגנטי משתנה. השדה המגנטי המשתנה יוצר שדה חשמלי משתנה וכך הלאה. שני השדות - החשמלי והמגנטי יוצרים זה את זה ומתפשטים. גודל מהירותם בריק היא $300,000$ ק"מ בשנייה.
2. המקור של גל האלקטרומגנטי, על-פי התאוריה האלקטרומגנטית, הוא **מטען חשמלי מואץ**.
3. הגל המתואר באיור ג שבגוף השאלה הוא בעל אנרגיה מרבית (על-פי התאוריה האלקטרומגנטית), כי המשרעת של השדה החשמלי (ושל השדה המגנטי) של הגל המתואר באיור ג גדולה מהמשרעות של הגלים האלקטרומגנטיים המתוארים באיורים א ו-ב.
4. א. על-פי מודל הגלים המכניים אור הוא גל המתפשט כתוצאה מתנודות חלקיקי תווך חומרי. על-פי מודל הגלים האלקטרומגנטיים אור הוא גל ה"מורכב" משדות חשמליים ומגנטיים משתנים, ולא נדרש תווך כדי להעביר אותו.
ב. הייתרון של מודל הגלים האלקטרומגנטיים על פני מודל הגלים המכניים הוא בכך שבמודל הגלים האלקטרומגנטיים לא נדרש להעלות הנחה שקיים תווך (אתר) במרחב הבין כוכבי המאפשר את התפשטות האור.
5. הגל יכונה "גל רדיו" אם מגלים אותו באמצעות מקלט רדיו, והוא יכונה "קרין תת-אדומה" אם מגלים אותו באמצעות חיישן חום.
6. קרינה אלקטרומגנטית שאורך הגל שלה שווה ל- 100 nm שייכת (על-פי איור 9 בגוף הפרק שבספר לתלמיד) לקרינה על-סגולה.
7. התקלה נובעת מכך שקרינת רנטגן המגיעה מן החלל אינה חודרת דרך אטמוספירת הארץ, לכן אינה יכולה להגיע לטלסקופ.
8. א. מבין הגוונים השונים של האור הנפלט מן השמש - לגוון הירוק (אורך גל של כ- 470 nm) יש עוצמה מרבית.
ב. מבין הגוונים השונים של האור הנפלט מן השמש ומגיעים לקרקע הארץ - לגוון הצהוב (אורך גל של כ- 600 nm) יש עוצמה מרבית.
9. הידלדלות שכבת האוזון גורמת לכך שקרינה על-סגולה, שאורכי הגל שלה קצרים, אינה נבלעת על ידי האוזון, והיא מגיעה לקרקע הארץ. הסכנה הנשקפת מכך היא עליה בשכיחות מחלת סרטן העור, וירידה ביבולים החקלאיים.
10. לשמיים גוון אדמדם בצהרי היום כאשר יש אבק רב באוויר, כי האבק מפזר את הקרינה האדומה של אור השמש. חלקיקי האבק גדולים מחלקיקי האוויר (הנקי) לכן הם מפזרים גם גלים אלקטרומגנטיים בעלי אורכי גל גדולים - הצבע האדום של האור.
11. גלי רדיו מוחזרים על ידי היונספירה.
12. א. תחנת הרדיו גלגל"צ, למשל, משדרת בתדירות 91.8 MHz (במרכז הארץ).
ב. אורך הגל של "הגל הנושא" את השידורים של גלגל"צ (במרכז הארץ) הוא:

$$c = \lambda f \Rightarrow 3 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 91.8 \cdot 10^6 \Rightarrow \lambda \approx 3.27 \text{ m}$$

13. גלי רדיו אינם יכולים לחדור לתוך מכונת, משום שמכונת עשויה ממתכת. מקלט רדיו "רגיל" המשמש במכונת מחובר לאנטנה **חיצונית** הקולטת את גלי הרדיו.

14. משך התפשטות הפולס מתחנת המכ"מ עד למטוס הוא $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$. לכן המרחק, x , של המטוס מתחנת המכ"מ (ברגע המדידה) הוא:

$$x = vt = 3 \cdot 10^8 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} = 1.5 \cdot 10^5 \text{ m} = 150 \text{ km}$$

15. אין משתמשים בצוללות במכ"מ המבוסס על גלי מיקרו כי **גלי מיקרו נבלעים במים** (ואגב כך מחממים אותם); המים שקופים לאור נראה, אך אטומים לגלי מיקרו.

16. חישוב תדירות גלי מיקרו שאורך הגל שלהם 3 ס"מ:

$$c = \lambda f \Rightarrow 3 \cdot 10^8 = 0.03 \text{ m} \cdot f \Rightarrow f \approx 10^{10} \text{ Hz} = 10 \text{ GHz}$$

17. דוגמאות לשימושים בגלי מיקרו: מכ"מ, תקשורת לוויינים, תנורי מיקרו-גל, טלפונים סלולריים.

18. אפשר לכוון שלט של טלוויזיה לעבר קיר בכיוונים שונים, ובכל פעם ללחוץ על מתג ההפעלה של השלט עד למצב שבו הטלוויזיה נדלקת. במצב שבו הטלוויזיה נדלקת בוחנים האם מתקיימים חוקי ההחזרה. התנהגות קיר לקרינה תת-אדומה דומה להתנהגות מראה לאור נראה.

19. קרינה תת-אדומה שפוגעת בגוף מחממת אותו בדרך כלל במידה רבה מאשר קרינת אור לבן, כי בדרך כלל תדירות התנודות של מולקולות חומר שווה בקירוב לתדירות של קרינה תת-אדומה. כאשר בגוף כזה פוגעת קרינה תת-אדומה - הקרינה נבלעת היטב בגוף, כך שהיא מגבירה את תנודות חלקיקי הגוף. הביטוי המקרוסקופי של הגברת תנודות חלקיקי הגוף הוא עלייה בטמפרטורת הגוף.

20. א. משתמשים בחקלאות בחממות כדי שהטמפרטורה בתוכן תהיה גבוהה מזו שמחוץ לחממות, ואפשר יהיה לגדל בהן גידולים חקלאיים הדורשים טמפרטורה גבוהה.

ב. כאשר קרינת השמש פוגעת בחממה, הקרינה התת-אדומה חודרת דרך יריעות הפלסטיק של החממה, פוגעת בקרקע, נבלעת בה, לכן מחממת אותה. הקרקע פולטת אומנם חזרה קרינה תת-אדומה, **אולם אורך הגל שלה ארוך מזה של הקרינה שחדרה לתוך החממה**, ויריעות הפלסטיק אטומות למעבר קרינה תת-אדומה באורכי גל אלה. וכך האנרגיה של הקרינה התת-אדומה שחדרה לחממה נשארת ברובה בתוך החממה.

21. השמש פולטת (בין השאר) קרינה על-סגולה. חלק מקרינה זו - הקרינה בעלת אורכי הגל הקצרים יותר נבלעת ברובה בשכבת האוזון. הקרינה העל-סגולה בעלת אורכי הגל הארוכים יחסית מגיעה לקרקע הארץ, אך גם היא בעוצמה נמוכה מזו שפגעה באטמוספירת הארץ.

22. בנורות פלואורסצנט מצוי גז כספית. כאשר מפעילים את הנורה, עובר זרם חשמלי דרך גז הכספית, וגורם לאטומי הכספית לפלוט קרינה שעיקרה בתחום העל-סגול, הסגול והכחול. כאשר קרינה זו פוגעת בחומר הפלואורסצנטי המצפה את הדופן הפנימית של נורת הפלואורסצנט - היא נבלעת בו, ובמקומה נפלטת קרינה בתחום הנראה.

23. תפקיד הנורה המצויה במטהרי מים, אשר פולטת קרינה על-סגולה הוא להשמיד את החיידקים המצויים במים (הקרינה הורסת את ה-DNA של החיידקים).

24. כאשר אור לבן וקרינה על-סגולה פוגעים בחומר צהוב רגיל, החומר הצהוב בולע את האור הלבן ואת הקרינה העל-סגולה, ומחזיר (בעיקר) את האור הצהוב ש"הרכיב" את האור הלבן.

הערה: "אור לבן" הוא אור הכולל את כל אורכי הגל של האור הנראה.

כאשר אור לבן וקרינה על-סגולה פוגעים בחומר צהוב של עט הדגשה - לאור הלבן קורה מה שקורה בפגיעתו בחומר הצהוב רגיל. גם הקרינה העל-סגולה נבלעת, **אולם תחתיה פולט החומר הצהוב של עט ההדגשה אור בצבע צהוב. אור צהוב זה מצטרף לאור הצהוב שמוחזר כתוצאה מפגיעת האור הלבן.** לכן כמות האור הצהוב המוחזר על ידי החומר הצהוב של עט הדגשה גדולה מכמות האור הצהוב המוחזר על ידי חומר צהוב רגיל, והוא נראה זוהר.

25. עקיפה של קרינה על-סגולה קטנה מזו של אור נראה, וכושר ההפרדה גדל ככל שיש פחות עקיפה.

26. במערכת הניסוי שבה השתמש נטגן - קרינת X נפלטת מדופן השפופרת שהיתה עשויה מזכוכית - הדופן שבה פגעו חלק מן האלקטרונים שהוצאו בשפופרת.

27. קבעו לראשונה שקרני X הן קרינה אלקטרומגנטית כך: הטילו קרני X על גביש. הקרינה עברה דרך הגביש, וכאשר היא פגעה בסרט צילום התגלתה עליו תבנית עקיפה. העקיפה התרחשה במרווחים שבין יוני הגביש, שגודלם הוא מסדר גודל של אורך הגל של קרינת X.

28. א. אין צורך להאפיל את החדר בשעת צילום בקרינת נטגן כיוון שלוח הצילום נתון בתוך קופסת אלומניום. האור הנראה בחדר אינו חודר דרך דפנות האלומניום של הקופסה, אולם קרינת הנטגן יכולה לחדור דרכן.

ב. ההגדלה בצילום נטגן תלויה ביחס שבין המרחק מפתח שפופרת הנטגן (שאפשר לראות בו מקור נקודתי לקרינת נטגן) עד לאיבר שאותו מצלמים לבין המרחק מהאיבר שאותו מצלמים עד לסרט הצילום. הדבר דומה לצל הנוצר על-ידי אור נראה: אם יש מקור אור במרחק מסוים ממסך, ומציבים את היד קרוב למסך - הצלילית של היד על המסך קטנה: אם מרחיקים את היד מן המסך (ומקרבים למקור האור) - הצלילית גדלה.

29. קרינת נטגן מסוכנת לאדם כיוון שפגיעתה ברקמות הגוף של האדם גורמת להרס של תאים, כתוצאה מיצירת יונים.

30. א. קרינת α : קרינת חלקיקים. כל חלקיק מורכב משני פרוטונים ומשני נייטרונים.

ב. קרינת β : קרינת חלקיקים. החלקיקים הם אלקטרונים.

ג. קרינת γ : קרינה אלקטרומגנטית שתחום אורכי הגל שלה משתרע מ- 0.1 nm עד 10^{-6} nm .

31. נהוג לעצור קרינת גמא על ידי עופרת שעוביה סנטימטרים אחדים, או באמצעות בטון שעוביו מטרים אחדים.

32. חישוב אורך הגל: $c = \lambda f \Rightarrow 3 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 5 \cdot 10^9 \Rightarrow \lambda = 0.06 \text{ m} = 6 \text{ cm}$

גלים אלה הם גלי מיקרו.

ב. "מקורות שווי-מופע" הם מקורות של גלים שווי תדירות, היוצרים בו-זמנית את שיאי הגלים.

ג. תחילה נחשב בעזרת משפט פיתגורס, את המרחק S_2D :

$$S_2D = \sqrt{(S_1S_2)^2 + (S_1D)^2} = \sqrt{15^2 + 36^2} = 39 \text{ m}$$

הפרש מרחקי הנקודה D משני המקורות הוא $39 - 36 = 3 \text{ cm}$. הפרש זה שווה לחצי אורך גל (אורך הגל הוא 6 cm). מכאן שהגלים מגיעים ל- D במופע מנוגד. לכן בגלאי יש התאבכות הורסת הגורמת לעוצמת גלים

מינימלית.

ד. אם רוחבו של הפתח יהיה 6 ס"מ ומטה, עקיפתו של פס המקסימום המרכזי תהיה מלאה.

33. א. היגד (1) אינו נכון.

היגד (2) אינו נכון.

היגד (3) אינו נכון.

ב. כשהגלאי נמצא ב-O הוא קולט עוצמת גל מרבית, כי הנקודה O נמצאת במרחקים שווים מ-S₁ ומ-S₂ שהם מקורות שווי מופע. לכן ב-O מתרחשת התאבכות בונה, לכן עוצמת הגל מרבית.

ג. (1) נחשב את הזווית θ_1 שבה מתקבלת x_1 : $\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d} \Rightarrow \sin \theta_1 = \frac{1.2}{3} \Rightarrow \theta_1 = 23.6^\circ$

הזווית θ_1 גדולה, כך שהקירוב $\tan \theta \approx \sin \theta$ אינו תקף.

$$(2) \quad \tan \theta_1 = \frac{x_1}{L} \Rightarrow \tan 23.6^\circ = \frac{x_1}{10} \quad (2)$$

$$x_1 = 0.0436 \text{ m} = 4.36 \text{ cm}$$

$$(3) \quad \sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d} \quad .7$$

$$\sin \theta_n \leq 1 \Rightarrow n \frac{\lambda}{d} \leq 1 \Rightarrow n \leq \frac{d}{\lambda} = \frac{3}{1.2} = 2.5$$

$$n_{\max} = 2 \quad \text{לכן:}$$

$$2n_{\max} + 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5 \quad \text{לכן מספר הנקודות שבהן נקלטה עוצמת גל מרבית:}$$

34. א. גלי רדיו עוקפים בניינים כיוון שממדי הבניינים הם מאותו סדר גודל כמו אורך הגל של גלי רדיו. אור אינו עוקף בניינים כי ממדי הבניינים הרבה יותר גדולים מאורך הגל של אור.

ב. ערוצי טלוויזיה המשדרים בתדירות נמוכה נקלטים טוב יותר כי אורך הגל שלהם גדול יותר, לכן הגלים עוקפים טוב יותר את המחסומים המקשים על הקליטה.

$$c = \lambda f \Rightarrow 3 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 30 \cdot 10^6 \Rightarrow \lambda = 10 \text{ m} \quad .35 \text{ א.}$$

$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d} \quad .7 \text{ ב.}$$

$$\sin \theta_n \leq 1 \Rightarrow n \frac{\lambda}{d} \leq 1 \Rightarrow n \leq \frac{d}{\lambda}$$

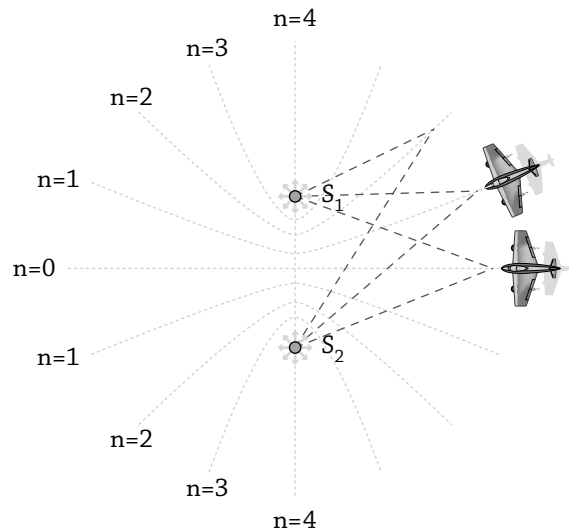
$$n \leq \frac{40}{10} = 4$$

$$n_{\max} = 4 \quad \text{לכן:}$$

$$2n_{\max} + 1 = 2 \cdot 4 + 1 = 9 \quad \text{מספר קווי המקסימום:}$$

נוצרים 9 קווי מקסימום.

ג. תרשים קווי המקסימום.



טייס יכול להיעזר במערכת לנחיתה כך: ברגע שהוא קולט במכשיר הרדיו שלו צליל בתדירות של 30 MHz הוא "ננעל" על הקו שלאורכו נשמע הצליל, עד אשר הוא מגיע לשדה התעופה. ד. נחשב את הזווית שבה מתקבל קו מקסימום מסדר 1: $\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d} \Rightarrow \sin \theta_1 = \frac{\lambda}{d} \Rightarrow \sin \theta_1 = \frac{10}{40}$

$$\theta_1 = 14.48^\circ \quad \text{מכאן:}$$

$$\tan \theta_1 = \frac{y}{x} \Rightarrow y = x \tan \theta_1 \Rightarrow y = 2 \cdot \tan 14.48^\circ$$

$$y = 0.516 \text{ km} = 516 \text{ m}$$

ה. במצב המתואר יש שתי תבניות התאבכות. לשתייהן יש מקסימום משותף מסדר 0, אך אין חפיפה בין קווי המקסימום מסדרים שונים מאפס. לכן כאשר הטייס מוצא אות חזק ב-30 MHz ואות חזק ב-33 MHz - סימן שהמטוס טס לאורך מקסימום מסדר אפס, ישר לעבר מסלול הנחיתה.

ו. אם היחס בין שתי התדירויות הוא שבר פשוט, עלולה להתרחש חפיפה בין קו מקסימום בתדירות אחת עם קו מקסימום מסדר אחר בתדירות האחרת, ואז הטייס עלול לחשוב שהוא טס לאורך קו מקסימום מסדר אפס. לדוגמה, אם היחס בין אורכי הגל הוא $\frac{3}{4}$ אז קו המקסימום מסדר 4 של הגלים בעלי אורך הגל הקצר יחפוף לקו המקסימום מסדר 3 של הגלים בעלי אורך הגל הארוך (החפיפה אינה מלאה, אך היא קרובה יותר למלאה ככל שהמטוס טס רחוק יותר מהאנטנות).

ז. מערכת האנטנות תתקרב במצב זה למערך של סריג עקיפה, כלומר תהפך לשורה של מקורות קוהרנטיים, לכן פסי המקסימום יהיו חזקים וחדים יותר, לכן מסלול הטיסה יהיה מוגדר טוב יותר. כתוצאה מכך המטוס עשוי להזדקק לפחות הקפות סביב שדה התעופה בניסיון לאתר את קו המקסימום המרכזי.