פיזיקה 2 חשמל ומגנטיות

פרק 18 - שדות משתנים בזמן

תוכן העניינים

הסברים ותרגילים:

רקע:

ממשוואות מקסוול רואים ששדה מגנטי שמשתנה בזמן יוצר שדה חשמלי ולהפך.

אם נתון שדה מגנטי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה החשמלי אז:
נשתמש במשוואה השלישית של מקסוול כמו חוק פארדי ובמקום הכא״מ נחשב את האינטגרל כאשר בדר״כ יש סימטריה גלילית והאינטגרל הופך ל $E2\pi r$

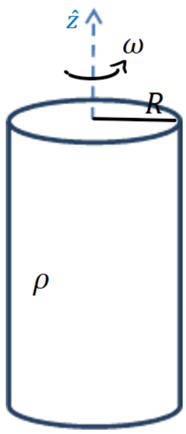
אם נתון שדה חשמלי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה המגנטי אז:
נשתמש במשוואה הרביעית כמו חוק אמפר רק שבמקום זרם יש $\int \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} d\vec{s}$ (או במקום צפיפות זרם $\varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$) שנקרא זרם העתקה (לא באמת זרם).

שאלות:

1) גליל טעון מסתובב בתאוצה

גליל אינסופי מלא ברדיוס R טעון בצפיפות מטען אחידה ליחידת נפח ρ.
הגליל מסתובב סביב ציר הסימטריה שלו במהירות זוויתית המשתנה בזמן $\omega = \alpha t$ כאשר α קבועה ונתונה.

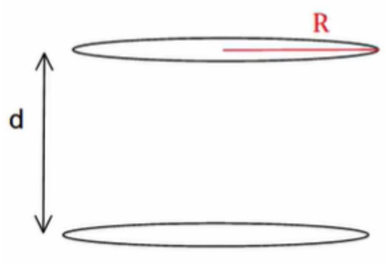
א. מה השדה המגנטי בכל המרחב?
ב. מה השדה החשמלי בכל המרחב?
ג. מה הכוח שפועל על מטען?



2) שדה חשמלי תלוי בזמן בתוך קבל לוחות ווקטור פוינטינג על השפה

קבל לוחות מורכב משני לוחות עגולים ברדיוס R המקבילים זה לזה ונמצאים במרחק d אחד מהשני $d<<R$.

הקבל מחובר למעגל חשמלי המספק לקבל זרם I קבוע (ונתון).



א. מצא את המטען על הקבל כפונקציה של הזמן אם נתון ש-$q(t=0)=0$

ב. מצא את השדה החשמלי כפונקציה של הזמן.

ג. מצא את השדה המגנטי כפונקציה של הזמן והמיקום, בתוך הקבל ומחוץ לו.

ד. מצא את האנרגיה האגורה בין הלוחות.

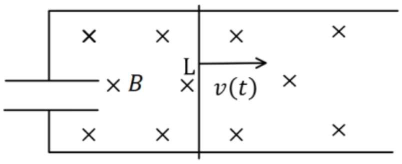
ה. מצא את הוקטור פוינטינג על שפת הקבל וחשב את השטף שלו על מעטפת הקבל.

3) פארדיי עם קבל

קבל לוחות מעגלי ברדיוס a ומרחק בין הלוחות ($d<<a$) מחובר למסילה מוליכה חסרת התנגדות.

על המסילה מונח מוט חסר התנגדות באורך L.

מושכים את המוט כך שהוא מתרחק מהקבל במהירות $v(t)=At$.



במרחב קיים שדה מגנטי B אחיד וקבוע לתוך הדף.

א. מהו המטען על הקבל? על איזה לוח המטען החיובי?

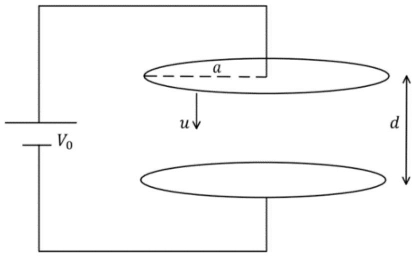
ב. מהו השדה החשמלי בתוך הקבל?

ג. מהו השדה המגנטי בתוך הקבל ומחוץ לו, גודל וכיוון (התעלם מהשדה שנוצר ע"י התיילים והמוט)?

ד. מהו הכוח שיש להפעיל על המוט על מנת שינוע במהירות הנתונה אם מסת המוט היא M?

4) לוחות בקבל מתקרבים בזמן

קבל לוחות מורכב משני לוחות מעגליים ברדיוס a ומרחק $a \ll d$ ביניהם.
הקבל מחובר למקור מתח קבוע V_0.
בזמן $t = 0$ מתחילים לקרב את הלוח העליון אל התחתון במהירות קבועה ונמוכה u.



א. מהו המתח בין לוחות הקבל כתלות בזמן?
ב. מהו השדה החשמלי בין לוחות הקבל כתלות בזמן?
ג. מהו השדה המגנטי בין לוחות הקבל ומחוץ להן כתלות בזמן?
ד. חזור על כל הסעיפים אם ניתקו את הקבל מהמקור רגע לפני תחילת ההזזה של הלוח.

תשובות סופיות:

1) א. $r<R$ $\vec{B}=\mu_0\rho\omega\frac{R^2-r^2}{2}\hat{z}$, $r>R$ $\vec{B}=0$

ב. $r<R$ $\vec{E}=-\mu_0\rho\alpha\frac{1}{2r}\left(R^2\frac{r^2}{2}-\frac{r^4}{4}\right)\hat{\theta}+E_r(r)\hat{r}$, $r>R$ $\vec{E}=\frac{-\mu_0\rho\alpha}{2r}\left(\frac{R^4}{4}\right)\hat{\theta}+(E_r)\hat{r}$

ג. $\vec{F}=q\vec{E}$

2) א. $q(t)=It$ ב. $\vec{E}=\frac{-q(t)}{\varepsilon_0\pi R^2}\hat{z}$ ג. $\vec{B}=\frac{-\mu_0 Ir}{2\pi R^2}\hat{\theta}$

ד. $U=\frac{I^2t^2d}{2\varepsilon_0\pi R^2}+\frac{\mu_0 I^2 d}{16\pi}$ ה. $\vec{S}=\frac{-1}{\mu_0}\cdot\frac{q(t)}{\varepsilon_0\pi R^2}\frac{\mu_0 IR}{2\pi R^2}\hat{r}$, $\phi_{\vec{S}}=\frac{-I^2td}{\varepsilon_0\pi R^2}$

3) א. $q_c=\frac{\varepsilon_0\pi a^2}{d}BLAt$, עליון. ב. $\vec{E}=\frac{BLAt}{d}\hat{z}$ ג. $r<a$ $\vec{B}=\frac{\mu_0\varepsilon_0 B_0LAr}{2d}\hat{\theta}$,

$a<r$ $\vec{B}=\frac{\mu_0\varepsilon_0 BLAa^2}{2dr}\hat{\theta}$ ד. $F=MA+\frac{\varepsilon_0\pi a^2}{d}B_0^2L^2A$

4) א. $V_c(t)=V_0$ ב. $\vec{E}=\frac{-V_0\hat{z}}{d-ut}$ ג. $r<a$ $\vec{B}=\frac{\mu_0\varepsilon_0 V_0ur\hat{\theta}}{2(d-ut)^2}$,

$r>a$ $\vec{B}=\frac{\mu_0\varepsilon_0 V_0ua^2\hat{\theta}}{2(d-ut)^2r}$ ד. $\vec{B}=0$, $\vec{E}=\frac{-V_0z}{d}$, $V_c(t)=\frac{d-ut}{d}\cdot V_0$

הרצאות ותרגילים

רקע

$$x = r\cos\theta$$
$$y = r\sin\theta$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$
$$\tan\theta = \frac{y}{x}$$

$$\hat{r} = \cos\theta\,\hat{x} + \sin\theta\,\hat{y}$$
$$\hat{\theta} = -\sin\theta\,\hat{x} + \cos\theta\,\hat{y}$$

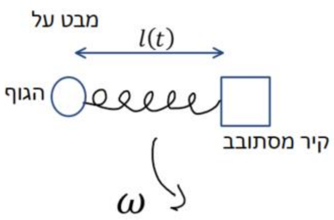
$$\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} = r\hat{r}$$

$$\vec{v} = \dot{r}\hat{r} + r\dot{\theta}\hat{\theta}$$

$$\vec{a} = \left(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2\right)\hat{r} + \left(2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}\right)\hat{\theta}$$

שאלות

1) מסה קשורה עם קפיץ לקיר מסתובב



גוף נקודתי מחובר ע"י קפיץ לקיר שמסתובב במהירות זוויתית קבועה ω במישור האופקי.
אורך הקפיץ משתנה בזמן ונתון לפי: $l(t) = l_0 + A\sin(\Omega t)$ כאשר A , Ω ו- l_0 הם קבועים חיוביים ומתקיימים $A < l_0$.

א. מהי תאוצת הגוף בקואורדינטות פולריות?

ב. נניח ש- A , Ω ו- ω ידועים, מהו התנאי על l_0 כך שבנקודות זמן מסוימות כיוון התאוצה יהיה רק בכיוון $\hat{\theta}$?

ג. מהי התשובה המספרית לסעיף ב' אם: $\Omega = 3\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$, $A = 0.2\text{m}$, $\omega = 1\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$?

2) דני מסתובב במעגלים

דני בן השלוש מתחיל לרוץ במעגלים ממנוחה.

דני מתרחק מהנקודה בה התחיל לרוץ לפי: $r = \mathrm{A}t^2$ והוא מסתובב במהירות זוויתית הולכת וגדלה: $\omega = \mathrm{B}t$. $\left(\mathrm{A} = 0.4167\frac{\mathrm{m}}{\sec^2}, \mathrm{B} = 1\frac{\mathrm{rad}}{\sec^2}\right)$.

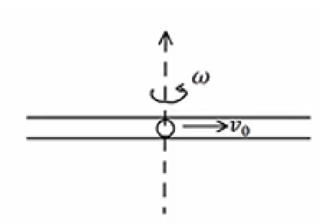
א. מצא את המהירות של דני כתלות בזמן בקואורדינטות פולריות.

ב. מצא את התאוצה של דני כתלות בזמן בקואורדינטות פולריות.

ג. כאשר דני מגיע לתאוצה השווה ל- g הוא מקבל סחרחורת ונופל (על הטוסיק כמובן), מתי ייפול דני?

3) כוח מסתורי בצינור

צינור מסתובב במהירות זוויתית קבועה ω סביב מרכזו.



כדור קטן בעל מסה m נמצא ב- $t = 0$ במרכז הצינור.

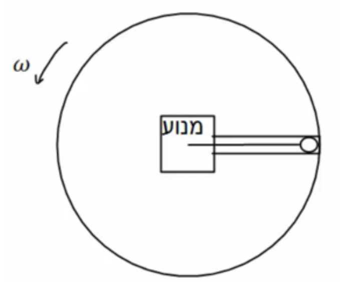
לכדור מהירות התחלתית v_0 בכיוון הרדיאלי.

כוח מסתורי F (לא בהכרח קבוע) פועל על הכדור ושומר על מהירות הכדור ביחס לצינור להיות קבועה ושווה ל- v_0. בין הצינור לכדור אין חיכוך.

א. מה מיקום הכדור כתלות בזמן?

ב. מהו הכוח F כתלות בזמן הפועל על הכדור?

4) מנוע מושך כדור בתוך דיסקה מסתובבת



דיסקה ברדיוס R מונחת על שולחן ומקובעת במרכזה אך מסתובבת סביב מרכזה במהירות זוויתית קבועה ω.

בתוך הדיסקה ישנה תעלה, כדור בעל מסה m מונח בקצה של התעלה ויכול לזוז רק בתוך התעלה.

במרכז הדיסקה נמצא מנוע המחובר בחוט לכדור.

המנוע מושך את הכדור למרכז הדיסקה כך שתאוצת הכדור ביחס לדיסקה היא a_0.

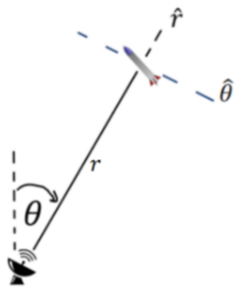
א. מצא את מיקום המסה כתלות בזמן ביחס לדיסקה וביחס למעבדה, בקואורדינטות פולריות.

ב. מה הכוח שמפעיל המנוע על הכדור כתלות בזמן?

ג. מה הכוח שמפעילים הקירות על הכדור?

5) מכ"מ מזהה טיל

מכ״מ מזהה טיל הנמצא מעט מעל האטמוספירה עם מנוע כבוי.
הבעיה דו מימדית.



נתון כי: $\dot{\theta} = 1.5 \cdot 10^{-2}\,\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$, $\dot{r} = 1100\,\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, $\theta = 30^{\circ}$, $r = 70\text{km}$.

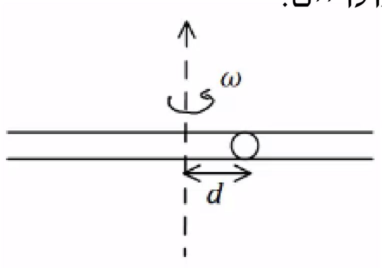
החיכוך עם האוויר זניח בגובה רב והתאוצה היחידה היא
תאוצת הכובד השווה ל- $\frac{9.6^{\text{m}}}{\text{sec}^2}$ (התאוצה קטנה מעט בגלל
המרחק ממרכז כדור הארץ).

א. מהו גודלה של מהירות הטיל?

ב. מצאו את הערך של $\ddot{r}$ ושל $\ddot{\theta}$.

6) כדור חופשי בתוך צינור מסתובב

צינור מסתובב במהירות זוויתית קבועה ω סביב מרכזו.
כדור קטן בעל מסה m נמצא בתוך הצינור.
ב- $t = 0$ הכדור נמצא במנוחה ביחס לצינור ובמרחק d ממרכז הצינור.
בין הצינור לכדור אין חיכוך.



א. רשום את הכוחות הפועלים על הכדור בצירים פולריים.

ב. רשום את משוואת התנועה בכיוון הרדיאלי.

ג. בדוק כי הפתרון: $r(t) = \text{A}e^{\omega t} + \text{B}e^{-\omega t}$ מתאים
למשוואה שמצאת ומצא את הקבועים A , B.

ד. מהו הכוח הנורמאלי הפועל מהצינור על כדור?

7) משוואות לתנועת חלקיק

תנועת חלקיק מתוארת ע״י המשוואות: $r = \text{A} \cdot t^{\alpha}$ ו- $\dot{\theta} = \omega = const$
כאשר α , A קבועים.

א. הביעו את r כתלות ב- θ.

ב. שרטטו את התנועה עבור: $\alpha = 0$, $\alpha < 0$, $\alpha > 0$.

ג. הניחו כי הגוף מתחיל מהראשית וכי: $\alpha = 1$, $\text{A} = 4\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, $\omega = 2\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$.
כמה סיבובים יעבור הגוף עד שהרדיוס יהיה 30_{m}?

8) חללית במסלול ספיראלי

חללית 1 נעה במסלול ספיראלי (בדו מימד) כך ש- $r_1(t)=\mathrm{A}t^{\alpha}$, כאשר A ו- α הם קבועים חיוביים נתונים.

נתון גם כי: $\ddot{\vec{r}}(t)\cdot\hat{r}=\mathrm{A}\alpha(\alpha-1)t^{\alpha-2}-\mathrm{AC}^2t^{\alpha}e^{2\mathrm{C}t}$.

החללית נעה נגד כיוון השעון ו- C הוא גם קבוע חיובי נתון.

בזמן $t=0$ החללית חוצה את ציר ה- x השלילי.

א. מצאו את מיקום החללית בקואורדינטות קרטזיות.

ב. חללית 2 נעה על מסלול ספיראלי כך ש- $r_2(t)=\frac{1}{2}r_1(t)$ ובאותה זווית כמו חללית 1.
מצאו את המיקום, המהירות והתאוצה של חללית 1 ביחס לחללית 2.

ג. תארו באופן מילולי את תנועתה של חללית 1 ביחס לחללית 2 אם $\alpha=2$.

9) עכביש הולך על דיסקה מסתובבת

עכביש נמצא במרכזה של דיסקה המסתובבת במהירות זוויתית $0.2\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{sec}}$.

העכביש מתחיל לנוע במהירות קבועה ובקו ישר ביחס לדיסקה עד לקצה הדיסקה ברדיוס $2\mathrm{m}$. הזמן שלוקח לעכביש להגיע לקצה הוא 4 שניות.

א. מצאו את וקטורי מהירותו ותאוצתו של העכביש (ביחס למעבדה).

ב. הסבירו מדוע יש לעכביש תאוצה אם הוא הולך במהירות קבועה ביחס לקרוסלה.

ג. הסבירו באופן איכותי את כל אחד מהרכיבים של תאוצת העכביש.

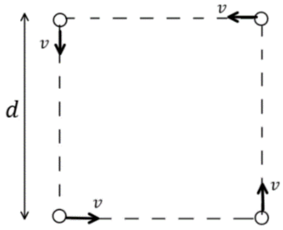
10) מהירות מינימאלית ללווין

לווין שעובר בסמוך לפני כדה"א מרגיש תאוצה $\vec{a}=-g\hat{r}$ (בהזנחת התנגדות האוויר).

מצאו מה צריכה להיות המהירות המינימלית של הלווין כך שלא יתנגש בפני כדה"א וישלים סיבוב.

11) משחק תופסת*

ארבעה ילדים משחקים תופסת, הם מתחילים לרוץ מארבע פינות של ריבוע בגודל $d \times d$. כל ילד רץ במהירות קבועה v לעבר הילד שמשמאלו (הכיוון הוא תמיד לכיוון הילד שמשמאלו).



א. תאר את תנועת הילדים וקבע היכן ייפגשו.

ב. כעבור כמה זמן ייפגשו?

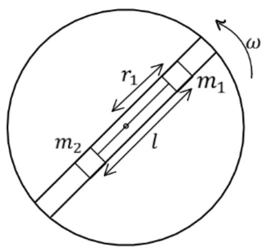
ג. כמה סיבובים עשה כל ילד עד למחצית מהזמן שנפגשו?

ד. מצא את וקטור המיקום של הילד המתחיל ברביע הראשון כפונקציה של הזמן בקואורדינטות קרטזיות.

רמזים : מהי הסימטריה בבעיה? איזה צורה יוצרים הילדים בכל רגע? רשום את המהירות של כל ילד בקואורדינטות פולריות.

12) שתי מסות מחוברות בחוט בתוך דסקה מסתובבת*

על דסקה המסתובבת במהירות זוויתית קבועה ω ישנה מסילה העוברת דרך מרכז הדסקה. במסילה ישנן שתי מסות m_2 , m_1 המחוברות בחוט באורך l. המערכת מונחת על שולחן אופקי (ז״א כיוון כוח הכובד לתוך הדף).



א. מצא את היחס בין המסות על מנת שרדיוס כל מסה יישאר קבוע במהלך התנועה.

כעת חותכים את החוט.

נסמן את הזמן שבו חותכים את החוט ב- $t=0$.

ב. רשום משוואה דיפרנציאלית שפתרונה ייתן את $r_1(t)$.

ג. פתור את המשוואה ומצא את $r_1(t)$.

הנח כי r_1 הוא מיקום המסה ברגע השחרור.

13) רוכב אופנוע*

רוכב אופנוע מתחיל את תנועתו ממנוחה.

מרחקו מנקודת ההתחלה משתנה לפי $r = Ct$, כאשר C קבוע.

בנוסף הרוכב מסתובב במהירות זוויתית קבועה ω.

מצא את המרחק המקסימלי אליו יגיע הרוכב אם נתון מקדם החיכוך הסטטי μ_s.

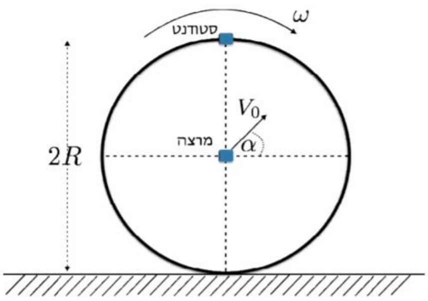
14) סטודנט ומרצה על גלגל ענק*

סטודנט נמרץ פוגש מרצה בעת ביקורו בפארק שעשועים.
הסטודנט נחוש בדעתו להראות שהוא יודע מכניקה ומשכנע את המרצה לטפס למרכז גלגל ענק. הסטודנט עולה על הקרון של הגלגל. הגלגל מסתובב במהירות זוויתית קבועה ω עם כיוון השעון ורדיוסו R. כשהסטודנט מגיע לשיא הגובה המרצה זורק כרית במהירות התחלתית v_0 ובזווית α ביחס לאופק.
בזמן מסוים לאחר זריקת הכרית הסטודנט קופץ מהקרון כך שמהירותו היא המהירות המשיקית של הקרון ביחס למרצה. הסיכוי היחידי של הסטודנט לא להיפצע בעת הפגיעה בקרקע הוא אך ורק אם ינחת על הכרית.
הנח שתנועת הכרית היא כתנועת אבן.
לפני הזינוק של הסטודנט:

א. רשמו את ווקטור המיקום של הכרית בקואורדינטות קרטזיות ביחס למרצה.
ב. רשמו את ווקטור המיקום של הכרית בקואורדינטות פולריות ביחס למרצה.
ג. רשמו את ווקטור המיקום של הסטודנט בקואורדינטות קרטזיות ביחס למרצה.
ד. רשמו את ווקטור המיקום של הסטודנט בקואורדינטות פולריות ביחס למרצה.
ה. רשמו את ווקטור המיקום של הכרית בקואורדינטות קרטזיות ביחס לסטודנט.
ו. מה צריכה להיות גודלה של המהירות ההתחלתית v_0 והזווית α כדי שהכרית תעבור ליד הסטודנט לאחר זמן t_0.

הסטודנט מחליט לקפוץ כשהכרית עוברת לידו (אסור לו לתפוס אותה כשהיא לידו).

ז. הכרית יכולה לעבור ליד הסטודנט כשהיא לפני שיא הגובה, בשיא הגובה או אחריו. באיזה משלושת המקרים על הסטודנט לקפוץ על מנת לחסוך את הוצאות החיוב של האמבולנס? (נמקו את תשובתכם).
ח. על פי הסעיף בהינתן שהסטודנט והכרית בקרקע באותו הזמן.
מה הוא הקשר בין ווקטורי המהירויות של הסטודנט והכרית בעת הקפיצה כך שהסטודנט לא יפגע?
ט. חשבו את הגובה בו תתרחש הקפיצה.
בטאו את הגובה הנ״ל בעזרת קבועי הבעיה בלבד
(t_0 הוא לא קבוע בעיה עבור שאלה זו).



15) קרוסלה**

חיפושית נעה על קרוסלה המסתובבת במהירות זוויתית קבועה ω_0.
רדיוס הקרוסלה R. החיפושית נעה מקצה הקרוסלה למרכזה במהירות קבועה v_0 ביחס לקרוסלה.

א. מצא את מיקום החיפושית בקורדינטות קרטזיות ובקורדינטות פולריות ביחס לצופים הבאים:

i. צופה A- הנמצא על הקרוסלה בנקודת ההתחלה של החיפושית.

ii. צופה B - הנמצא על הקרוסלה במרכזה.

iii. צופה C - הנמצא במרכז הקרוסלה אך אינו מסתובב איתה.

iv. צופה D - הנמצא בקצה הקרוסלה ואינו מסתובב עם הקרוסלה.

ב. מצא את המהירות והתאוצה ביחס לאותם צופים.

תשובות סופיות

1) א. $\vec{a} = -\left(\left(\Omega^2+\omega^2\right)A\sin\Omega t + \omega^2 l_0\right)\hat{r} + \left(2\Omega A\cos\Omega t\right)\hat{\theta}$

ב. $\theta < l_0 \le \dfrac{\Omega^2+\omega^2}{\omega^2}\cdot A$

ג. $\theta < l_0 \le 2\text{m}$

2) א. $\vec{r} = 2At\hat{r} + At^2\cdot Bt\hat{\theta}$

ב. $\vec{a} = \left(2A - B^2At^4\right)\hat{r} + \left(5ABt^2\right)\hat{\theta}$

ג. $t = 2\sec$

3) א. $r = v_0\cdot t\ ,\ \theta(t) = \omega\cdot t$

ב. $F_r = m\left(0 - \omega^2 v_0 t\right)$

4) א. ביחס לדיסקה: $\theta'(t) = 0\ ,\ r'(t) = R - \frac{1}{2}a_0 t^2$,

ביחס למעבדה: $\theta(t) = \omega t\ ,\ r(t) = R - \frac{1}{2}a_0 t^2$

ב. $T = m\left(a_0 + \omega^2\left(R - \frac{1}{2}a_0 t^2\right)\right)$

ג. $N_z = mg$

5) א. $\left|\vec{v}\right| \approx 1521\dfrac{m}{\sec}$

ב. $\ddot{\theta} \approx -4.03\cdot 10^{-4}\dfrac{rad}{\sec^2}\ ,\ \ddot{r} = 7.44\dfrac{m}{\sec^2}$

6) א. $\sum F_r = 0\ ,\ \sum F_\theta = N_\theta\ ,\ \sum F_z = N_z - mg$

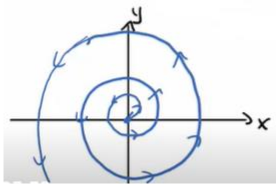
ב. $\ddot{r} - \dot{\theta}^2 r = 0$

ג. $\dot{r} = \omega A e^{\omega t} - \omega B e^{-\omega t}\ ,\ A = B = \dfrac{d}{2}$

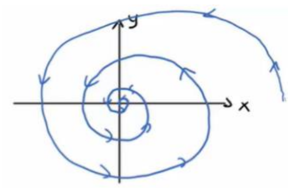
ד. $N_\theta = m\omega^2 d\left(e^{\omega t} - e^{-\omega t}\right)\ ,\ N_z = mg$

7) א. $r = A\left(\dfrac{\theta}{\omega}\right)^\alpha$

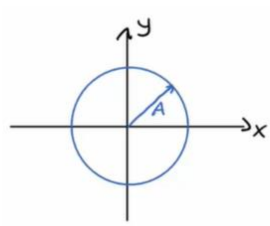
ב. $\alpha > 0$:



$\alpha < 0$:



$\alpha = 0$:



ג. $N \approx 2.39$

8) א. $\vec{r}(t) = At^\alpha\left(-\cos\left(e^{ct}-1\right)\hat{x} - \sin\left(e^{ct}-1\right)\hat{y}\right)$

ב. $x(t) = -\frac{1}{2}At^\alpha\ ,\ y(t) = 0$

$v_x(t) = -\frac{1}{2}A\alpha t^{\alpha-1}\ ,\ a_x(t) = -\frac{1}{2}A\alpha(\alpha-1)t^{\alpha-2}$

ג. תנועה בתאוצה קבועה בקו ישר.

9) א. $\vec{v} = 0.5\hat{r} + 0.1t\hat{\theta}$, $\vec{a} = -0.02\cdot t\hat{r} + 0.2\hat{\theta}$

ב. כי הוא לא זז במהירות קבועה ביחס למעבדה.

ג. רכיב רציאלי: תאוצה רציאלית מהתנועה.

רכיב θ: $v_\theta = \omega r$ בגלל ש- r משתנה צריך תאוצה בכיוון θ שתגדיל את המהירות בכיוון θ אפילו ש- ω קבוע.

10) $\sqrt{gR_E}$

11) א. התנועה היא של הפינות של ריבוע הקטן ומסתובב. המפגש יהיה במרכז.

ב. $\frac{d}{v}$ ג. $\frac{\ln 2}{2\pi}$

ד. $\vec{r}(t) = \left(-\frac{vt}{\sqrt{2}} + \frac{d}{\sqrt{2}}\right)\left[\cos\left(\ln\left(\frac{d}{d-vt}\right) + \frac{\pi}{4}\right)\hat{x} + \sin\left(\ln\left(\frac{d}{d+t}\right) + \frac{\pi}{4}\right)\hat{y}\right]$

12) א. $\frac{m_1}{m_2} = \frac{r_2}{r_1}$ ב. $\ddot{r}_1 = \omega^2 r_1$ ג. $r_1(t) = \frac{r_1}{2}\left(e^{\omega t} + e^{-\omega t}\right)$

13) $r_{max} = \sqrt{(\mu_s g)^2 - (2C\omega_0)^2}\left(\frac{1}{\omega_0}\right)$

14) א. $x_1 = v_0\cos\alpha\cdot t$, $y_1 = v_0\sin\alpha\cdot t - \frac{1}{2}gt^2$

ב. $\tan\theta = \frac{v_0\sin\alpha t - \frac{1}{2}gt^2}{v_0\cos\alpha t}$, $r = \sqrt{(v_0\cos\alpha\cdot t)^2 + \left(v_0\sin\alpha t - \frac{1}{2}gt^2\right)^2}$

ג. $x_2 = R\cos\left(\frac{\pi}{2} - |\omega|t\right)$, $y_2 = R\sin\left(\frac{\pi}{2} - |\omega|t\right)$ ד. $r = R$, $\theta = \frac{\pi}{2} - |\omega|\cdot t$

ה. $x_{1,2} = v_0\cos\alpha t - R\cos\left(\frac{\pi}{2} - |\omega|t\right)$, $y_{1,2} = v_0\sin\alpha t - \frac{1}{2}gt - R\sin\left(\frac{\pi}{2} - |\omega|t\right)$

ו. $\tan\alpha = \frac{\frac{1}{2}gt_0^{\,2} + R\sin\left(\frac{\pi}{2} - |\omega|t_0\right)}{R\cos\left(\frac{\pi}{2} - |\omega|t_0\right)}$

$v_0^{\,2}t_0^{\,2} = \left(\frac{1}{2}gt_0^{\,2} + R\sin\left(\frac{\pi}{2} - |\omega|t_0\right)\right)^2 + R^2\cos^2\left(\frac{\pi}{2} - |\omega|t\right)$

ז. אחריו.

ח. וקטורי המהירות חייבים להיות שווים בגודל ובכיוון.

ט. $y = \frac{v_0\cos\alpha}{|\omega|}$

15) א. ראו סרטון.   ב. ראו סרטון.