

פתרונות:

## שאלה 1 א.

צריך למצוא את המשוואות התנועה עבור תינ"ז קבוע, עבור חלקיק שנע תחת השפעת פוטנציאלי  $V(r) = \beta r^3$ . ככלומר צריך למצוא שתי משוואות דיפרנציאליות (מספר המשוואות כמספר הנעלמים,  $r$  ו-  $\theta$ ) בלתי תלויות. הדרך הכי פשוטה לעשות את זה, זה עם משוואות אוילר לגראנג'ן:

$$L = \frac{1}{2}m(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) - \beta r^3 \quad (1)$$

נמצא את המשוואת אוילר לגראנג'ן ל-  $r$ :

$$\frac{\partial L}{\partial r} = mr\dot{\theta}^2 - 3\beta r^2 \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} = m\ddot{r} \quad (2)$$

$$mr\dot{\theta}^2 - 3\beta r^2 - m\ddot{r} = 0 \quad (3)$$

ואת המשוואת אוילר לגראנג'ן עבור  $\theta$ :

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = mr^2\dot{\theta} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = \frac{d}{dt} mr^2\dot{\theta} = 0 \quad (5)$$

$$mr^2\dot{\theta} = l \quad (6)$$

ב. התנאי לתנועה מעגלית הוא שלפונציאל האפקטיבי תהיה נקודת מינ/מקס:

$$V_{\text{eff}} = \beta r^3 + \frac{l^2}{2mr^2} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dr} V_{\text{eff}} = 3\beta r^2 - \frac{l^2}{mr^3} = 0 \quad (8)$$

$$r_0 = \left( \frac{l^2}{3\beta m} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (9)$$

**שאלה 2.**

א. הפוטנציאלי הוא  $V(r) = -V_0 e^{-\lambda^2 r^2}$   
לכן הפוטנציאלי האפקטיבי הוא:

$$V_{\text{eff}} = V(r) + \frac{l^2}{2mr^2} = -V_0 e^{-\lambda^2 r^2} + \frac{l^2}{2mr^2} \quad (10)$$

ב. נתון שהחליק נע במסלול מעגלי עם רדיוס  $R$ .  
כמו מקודם התנאי למסלול מעגלי הוא שהגזרת השנייה של הפוטנציאלי האפקטיבי יתאפס:

$$V'_{\text{eff}} = 2\lambda^2 V_0 r e^{-\lambda^2 r^2} - \frac{l^2}{mr^3} \Big|_{r=R} = 0 \quad (11)$$

$$l^2 = 2mV_0\lambda^2 R^4 e^{-\lambda^2 R^2} \quad (12)$$

ג. שיווי משקל יציב מתאפשר כאשר  $0 \leq V''_{\text{eff}} < 0$  ושיווי משקל לא יציב מתאפשר כאשר  $0 > V''_{\text{eff}}$ .

$$V''_{\text{eff}} = 2V_0\lambda^2 e^{-\lambda^2 r^2} (1 - 2\lambda^2 r^2) + \frac{3l^2}{mr^4} \quad (13)$$

משמעותו מה קורה לנגזרת השנייה בנק'  $R$  לכן נציב  $R = r$  וגם נשתמש בקשר שמצאנו בסעיף קודם עבור התנ'ז:

$$V''_{\text{eff}} \geq 0 \quad (14)$$

(15)

$$2V_0\lambda^2 e^{-\lambda^2 R^2} (1 - 2\lambda^2 R^2) + \frac{6}{mR^4} \lambda^2 V_0 R^4 m e^{-\lambda^2 R^2} \geq 0 \quad (16)$$

$$R \leq \frac{\sqrt{2}}{\lambda} \quad (17)$$

$$R_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{\lambda} \quad (18)$$

ד. נשים לב שהtan'ז שמצאנו תלוי ב  $R$  לכן נציב את  $R_{\max}$  שמצאנו בסעיף הקודם.

$$l^2(R = R_{\max}) = 2\lambda^2 V_0 \frac{4}{\lambda^4} m e^{-\lambda^2 \frac{2}{\lambda^2}} = 8 \frac{V_0}{\lambda^2} m e^{-2} \quad (19)$$

$$l_{\max} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{8V_0 m e^{-2}} \quad (20)$$

ה. שואלים אותנו האם זה אפשרי שתertiaה תנועה מעגלית עבור רדיוס  $R$  שמקיים  $V_{\text{eff}} < 0$  ו-  $0 \geq V_{\text{eff}}$ . צריך לשים פה לב, התן'ז הוא פונקציה של  $R$  (כמו שמצאנו בסעיף ב') וישנו ערכים מסוימים של תנ'ז שלא מאפשרים מסלול מעגלי, לכן אנחנו צריך לבדוק את עבור ערכי  $l$  שכןאפשרים מסלול מעגלי, וזה בבדיקה התנאי שמצאנו בב'.  
נכיב את הביטוי בפוטנציאלי האפקטיבי:

$$V_{\text{eff}} = V_0 e^{-\lambda^2 R^2} (\lambda^2 R^2 - 1) \quad (21)$$

נקבל עבור  $R < \frac{1}{\lambda}$ ,  $V_{\text{eff}}$  שלילי.  
עבור  $R \geq \frac{1}{\lambda}$  מתקיים  $V_{\text{eff}} \geq 0$ .  
לכן שני התנאים מתקיים.

הערה:  
שים לב שכאשר  $l$  מקיים מסלול מעגלי, ו-  $R$  גדול מ  $\frac{1}{\lambda}$  גורר ש  $V_{\text{eff}} \geq 0$ . זה לא אומר שבכרכח כל  $r \geq \frac{1}{\lambda}$  גורר תנועה מעגלית סגורה.  
(ואותה הערה ל  $R < \frac{1}{\lambda}$ ).

## שאלה 3

קודם כל שימו לב שהכוונה ב-  $\ln\left(\frac{r^\alpha}{r_0^\alpha}\right)$  היא:

נשתמש במשוואות בינה :

$$\frac{d}{du}V\left(\frac{1}{u}\right) = -\frac{1}{u^2}F\left(\frac{1}{u}\right) \quad (22)$$

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = \pm \frac{m}{l^2 u^2} F\left(\frac{1}{u}\right) \quad (23)$$

(+) עבור כוח דוחה ו(-) עבור כוח מושך.  
נמצא קודם כל את הכוח ואח"כ את הפוטנציאלי.

$$\ln\left(\frac{r^\alpha}{r_0^\alpha}\right) = \theta \Rightarrow r = r_0 e^{\theta/\alpha} \Rightarrow u = \frac{1}{r_0} e^{-\theta/\alpha} \quad (24)$$

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} = \frac{1}{\alpha^2 r_0} e^{-\theta/\alpha} = \frac{1}{\alpha^2} u \quad (25)$$

נציב ב :

$$\frac{1}{\alpha^2} u + u = -\frac{m}{l^2 u^2} F\left(\frac{1}{u}\right) \Rightarrow \left(\frac{1}{\alpha^2} + 1\right) \frac{1}{r} = -\frac{m}{l^2} r^2 F(r) \quad (26)$$

$$F(r) = -\frac{l^2(1+\alpha^2)}{m\alpha^2 r^3} \quad (27)$$

נמצא כעת את הפוטנציאלי:

$$V(r) = -\int F(r) dr = \frac{l^2(1+\alpha^2)}{m\alpha^2} \int \frac{1}{r^3} dr = -\frac{l^2(1+\alpha^2)}{2m\alpha^2} \frac{1}{r^2} + C \quad (28)$$

ניתן להגדיר  $V(\infty) = 0$  ולקבל

$$V(r) = -\frac{l^2(1+\alpha^2)}{2m\alpha^2} \frac{1}{r^2} \quad (29)$$

ב. נמצא קודם את  $\dot{r}$  בעזרת:

$$\dot{r} = \sqrt{\frac{2}{m} \left( E - \left( V(r) + \frac{l^2}{2mr^2} \right) \right)} \quad (30)$$

$$\dot{r} = \sqrt{\frac{2}{m} \left( E - \left( -\frac{l^2(1+\alpha^2)}{2m\alpha^2} \frac{1}{r^2} + \frac{l^2}{2mr^2} \right) \right)} = \sqrt{\frac{2}{m} \left( E + \frac{l^2}{2m\alpha^2 r^2} \right)} \quad (31)$$

המהירותים עבור  $\theta$  היא הקשר הרגיל של התנ"ז

$$\dot{\theta} = \frac{l}{mr^2} \quad (32)$$

הפוטנציאלי האפקטיבי הוא :

$$V_{\text{eff}} = -\frac{l^2}{2m\alpha^2 r^2} \quad (33)$$

לפוטנציאלי לא קיימות נק' קיצון, ולכן עבור כל אנרגיה קטנה מ-0, הפוטנציאלי יושוך את החלקיק. ניתן לראות גם לפי: במשוואת בינה משתמשים בפוטנציאל הכבידתי ולא הפוטנציאלי האפקטיבי:

$$V(r) = -\frac{l^2(1+\alpha^2)}{2m\alpha^2} \frac{1}{r^2} \quad (34)$$

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = -\frac{m}{l^2} \left[ \frac{d}{du} V\left(\frac{1}{u}\right) \right] \quad (35)$$

נציב  $\frac{1}{u}$  ב-

$$V\left(\frac{1}{u}\right) = -\frac{l^2(1+\alpha^2)}{2m\alpha^2} u^2 \quad (36)$$

$$\frac{d}{du} V\left(\frac{1}{u}\right) = -\frac{l^2(1+\alpha^2)}{m\alpha^2} u \quad (37)$$

נציב במשוואת 35 :

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} = -u + \frac{(1+\alpha^2)}{\alpha^2} u = \frac{1}{\alpha^2} u \quad (38)$$

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} - \frac{1}{\alpha^2} u = 0 \quad (39)$$

קיבלונו מד"ר שניtinן לפטור עם  $u = e^{\lambda\theta}$ . הפתרון הכללי הוא :

$$u = ae^{\theta/\alpha} + be^{-\theta/\alpha} \quad (40)$$

פתרונות עבור  $r$ :

$$r = \frac{1}{ae^{\theta/\alpha} + be^{-\theta/\alpha}} \quad (41)$$

ניתן לראות שעבור  $\theta \rightarrow \infty$  (כלומר המון סיבובים),  $r$  שואף לאפס. זה אין מסלול מעגלי.

**שאלה 4.**

צריך להסתכל על הפוטנציאלי האפקטיבי של הבועה ולהבין מה קורה שם :

$$V_{\text{eff}} = \left( \frac{l^2}{2m} - B \right) \frac{1}{r^2} = (b^2 E - B) \frac{1}{r^2} \quad (42)$$

אנחנו ידעים שהחלקיק צריך להיבלו ולא להתפזר, לכן המקדם של  $1/r^2$  צריך להיות שלילי.  
אנחנו מקבלים את התנאי הזה עבורי-  $b^2 E - B < 0$ .  
מכאן אפשר למצוא את  $b$ :

$$b < \sqrt{\frac{E}{B}} \Rightarrow b_{\max} = \sqrt{\frac{E}{B}} \quad (43)$$

וחתך הפעולה הוא:

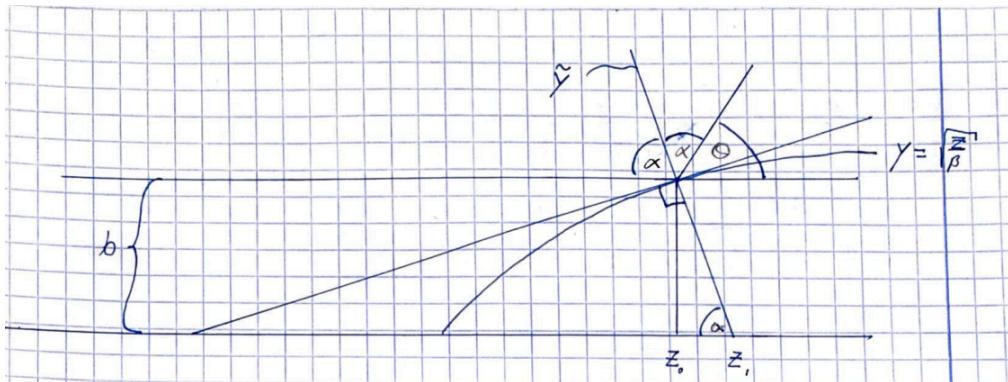
$$\sigma = \pi b_{\max}^2 = \pi \frac{E}{B} \quad (44)$$

## שאלה 5. א.

צריך לחשב את חתך הפעולה הדיפרנציאלי לפיזור החלקיקים מהעוקמה  $:z = \beta y^2$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{b}{\sin \theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right| \quad (45)$$

נמצא קודם כל את  $b(\theta)$ .  
אנחנו רוצים למציא את הקשר  $\tan \alpha = \frac{b}{\Delta z}$ , ולבסוף את הנעלמים בקשר זה רק עם הקבועים  $b$  ו-  $\theta$ .



נמצא את  $z_0$  שעבורו הפונקציה  $y$  שווה ל-  $b$ .

$$y(z_0) = b = \sqrt{\frac{z_0}{\beta}} \Rightarrow z_0 = \beta b^2 \quad (46)$$

נמצא את הביטוי ל-  $\tilde{y}$ , שהוא הישיר הניצב למשוואת המשיק בנק'  $z_0$ .

$$y'(z) = \frac{1}{2\beta\sqrt{z/\beta}} \Rightarrow y'(z_0) = \frac{1}{2\beta b} \quad (47)$$

SHIPOU הניצב למשיק הוא:

$$m \cdot \frac{1}{2\beta b} = -1 \quad (48)$$

$$m = -2\beta b \quad (49)$$

$$\tilde{y} = -2\beta bz + \tilde{y}_0 \quad \text{with} \quad \tilde{y}(z_0) = b \Rightarrow \tilde{y}_0 = b(1 + 2\beta^2 b^2) \quad (50)$$

$$\tilde{y} = -2\beta bz + b(1 + 2\beta^2 b^2) \quad (51)$$

אנחנו רוצים למציא את נק' החיתוך  $z$  : נציב 0 ב-  $\tilde{y}$  ונקבל

$$\Delta z = \frac{1}{2\beta} + \beta b^2 \quad (52)$$

נשים לב ש שתי הזרויות אלפה וטטא יושבות על אותו ישר. לכן  $\pi = 2\alpha + \theta$ .  
כעת ניתן להציב הכל ב-  $\tan \alpha = \frac{b}{\Delta z}$  ולפתור עבור  $b$ .

$$\tan \alpha = \tan \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2} \right) = \frac{1}{\tan(\theta/2)} = \frac{b}{\Delta z} = 2b\beta \quad (53)$$

$$\frac{1}{\tan(\theta/2)} = 2b\beta \quad (54)$$

$$b(\theta) = \frac{1}{2\beta \tan(\theta/2)} \quad (55)$$

נמצא כעת את  $\left| \frac{db}{d\theta} \right|$

$$\left| \frac{db}{d\theta} \right| = \frac{1}{4\beta \sin^2(\theta/2)} \quad (56)$$

נציב הכל ב- 45 :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{b}{\sin \theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right| = \frac{1}{2\beta \tan(\theta/2) \sin(\theta)} \frac{1}{4\beta \sin^2(\theta/2)} = \frac{1}{16\beta^2 \sin^4(\theta/2)} \quad (57)$$