

(10 נקודות) Large Hadron Collider

אנא קראו את ההוראות הכלליות שבמעטפה נפרדת לפני תחילת העבודה.

בבעיה זו, נדון בפיזיקה של מאיץ החלקיקים LHC ב-CERN שהיא מעבדת פיזיקת החלקיקים הגדולה ביותר. המטרה המרכזית שלה היא לשפר את ההבנה שלנו בחוקי הטבע היסודיים. שתי אלומות של חלקיקים מואצות לאנרגיות גבוהות, ומאולצות לנוע לאורך טבעת המאיץ על ידי שדה מגנטי חזק, ולאחר מכן הן מכוונות להתנגש האחת בשנייה. הפרוטונים לא מפוזרים אחד על פני היקף המאיץ, אלא מקובצים בקבוצות. החלקיקים הנוצרים בהתנגשויות נמדדים באמצעות גלאים גדולים. מספר נתונים על ה-LHC נמצאים בטבלה 1.

טבעת ה LHC	
26659 m	היקף הטבעת
2808	מספר קבוצות הפרוטונים באלומה
1.15×10^{11}	מספר הפרוטונים בקבוצה
אלומות פרוטונים	
7.00 TeV	אנרגיה של פרוטון
14.0 TeV	האנרגיה של שני פרוטונים במערכת מרכז המסה

טבלה 1: ערכים מספריים טיפוסיים עבור פרמטרים רלוונטיים של ה-LHC.

בפיזיקת חלקיקים משתמשים ביחידות נוחות עבור אנרגיה, תנע ומסה: האנרגיה נמדדת באלקטרון-וולט eV.

על פי הגדרה, 1 eV היא כמות האנרגיה שמקבל חלקיק בעל מטען e אשר עובר דרך הפרש פוטנציאליים של וולט אחד $(1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2)$.

התנע נמדד ביחידות של eV/c והמסה ביחידות של eV/c^2 , כאשר c היא מהירות האור בואקום. כיוון ש-1 eV היא כמות קטנה מאוד של אנרגיה, לעיתים קרובות משתמשים ב-MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), ב-GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) או ב-TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

חלק א עוסק בהאצת פרוטונים ואלקטרונים. חלק ב עוסק בזיהוי של חלקיקים הנוצרים בהתנגשויות ב-CERN.

חלק א. מאיץ LHC (6 נקודות)

מאיץ:

הניחו שהפרוטון הואץ ע"י מתח V כך שמהירותו קרובה מאוד למהירות האור, והזניחו כל הפסד אנרגיה לקרינה או להתנגשויות עם חלקיקים אחרים.

A.1 מצאו ביטוי מדויק עבור המהירות הסופית v של הפרוטונים כפונקציה של מתח ההאצה V 0.7pt
וקבועים פיזיקליים.

ניסוי עתידי ב-CERN מתכוון להשתמש בפרוטונים מה LHC ליצירת התנגשות ביניהם לבין אלקטרונים בעלי אנרגיה 60.0 GeV.

A.2 עבור חלקיקים בעלי אנרגיה גבוהה ומסה נמוכה, ההבדל היחסי $\Delta = (c-v)/c$ בין המהירות הסופית v למהירות האור הוא נמוך מאוד. מצאו קירוב מסדר ראשון עבור Δ וחשבו את Δ עבור אלקטרונים באנרגיה 60.0 GeV באמצעות מתח ההאצה וקבועים פיזיקליים. 0.8pt

קעת נחזור לפרוטונים שב-LHC. הניחו שהאלומה בעלת חתך מעגלי.

- 1.0pt** **A.3** פתחו ביטוי עבור B , צפיפות שטף השדה המגנטי האחיד, הדרוש על מנת לשמור את האלומה במסלול מעגלי. הביטוי צריך להכיל את האנרגיה של הפרוטונים E , ההיקף L , קבועים יסודיים ומספרים. אתם רשאים להשתמש בקירובים מתאימים כל עוד ההשפעה שלהם אינה פוגעת במספר ספרות הדיוק.
חשבו את B , צפיפות השטף המגנטי, עבור פרוטון באנרגיה $E = 7.00 \text{ TeV}$, תוך התעלמות מהאינטראקציה בין הפרוטונים.

הספק מוקרן:

חלקיק טעון מאיץ קורן אנרגיה בצורת גלים אלקטרומגנטיים. ההספק המוקרן P_{rad} של חלקיק טעון הנע במעגל עם מהירות זוויתית קבועה תלוי בתאוצה שלו a , במטען q , במהירות האור c , ובפרמטיביות של הריק ϵ_0 .

- 1.0pt** **A.4** השתמשו בשיקולי יחידות על מנת למצוא ביטוי להספק המוקרן P_{rad} .

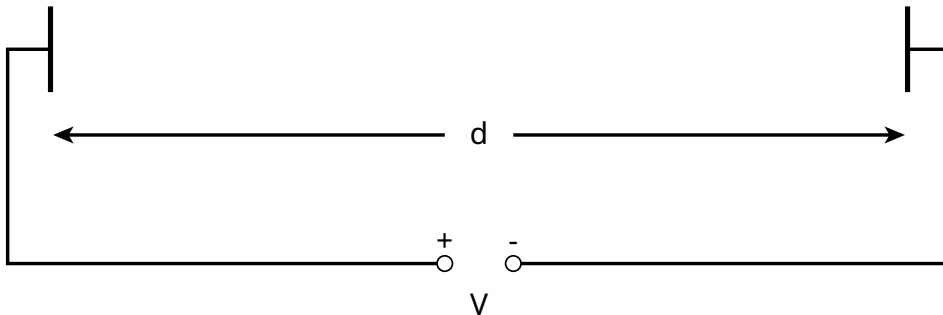
הנוסחה הנכונה עבור ההספק המוקרן מכילה גורם של $1/(6\pi)$. בנוסף, ניתוח יחסותי נותן גורם כיפלי נוסף γ^4 , כאשר $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- 1.0pt** **A.5** חשבו את P_{tot} , ההספק המוקרן של ה-LHC עבור פרוטון בעל אנרגיה $E = 7.00 \text{ TeV}$ (ראו טבלה 1). אתם רשאים להשתמש בקירובים מתאימים.

מאיץ ליניארי

ב-CERN, פרוטונים במנוחה מואצים על ידי מאיץ ליניארי באורך $d = 30.0 \text{ m}$ דרך הפרש פוטנציאליים של $V = 500 \text{ MV}$. הניחו שהשדה החשמלי הוא אחיד. מאיץ ליניארי מורכב משני לוחות כפי שמוצג בתרשים 1.

- 1.5pt** **A.6** קיבעו את הזמן T הדרוש לפרוטונים לעבור דרך השדה.



תרשים 1: תרשים של מאיץ

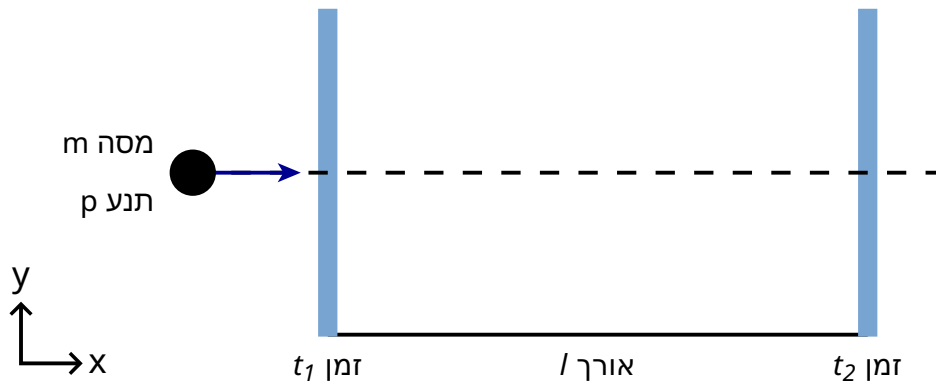
חלק ב. זיהוי חלקיקים (4 נקודות)

זמן מעוף:

זה חשוב לזהות את החלקיקים האנרגטיים שנוצרים בהתנגשות על מנת להסביר את תהליך האינטראקציה. שיטה פשוטה היא למדוד את הזמן t שדרוש לחלקיק עם תנע ידוע בשביל לעבור מרחק l בגלאי זמן-מעוף (ToF). חלקיקים טיפוסיים אשר מזוהים בגלאי והמסות שלהם מופיעים בטבלה 2.

חלקיק	מסה [MeV/c ²]
דיאטרון	1876
פרוטון	938
קאון טעון	494
פיון טעון	140
אלקטרון	0.511

טבלה 2: חלקיקים והמסות שלהם.

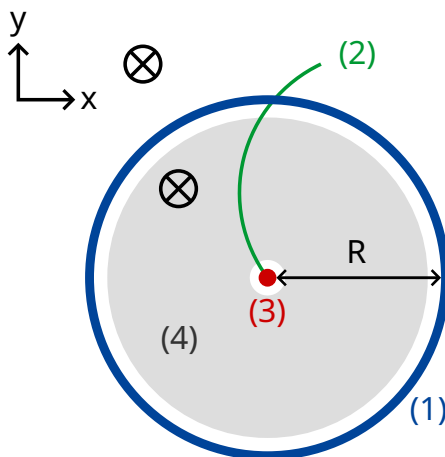


תרשים 2: תצוגה סכמטית של גלאי זמן-מעוף

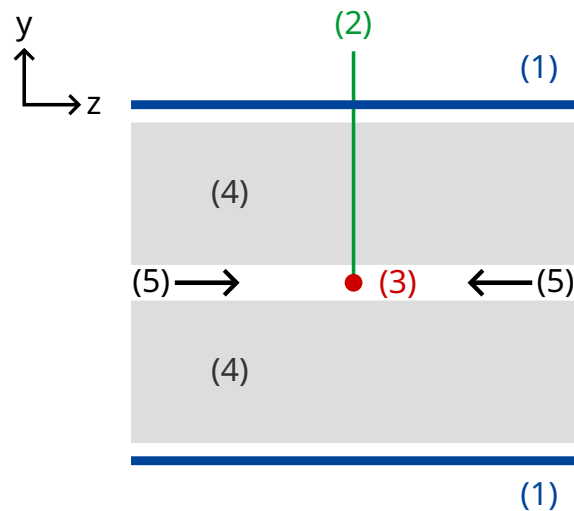
B.1 הביעו את מסת המנוחה של החלקיק m במונחי התנע p , מרחק המעוף l וזמן המעוף t , 0.8pt בהנחה שהחלקיקים בעלי מטען יסודי e ונעים במהירות הקרובה ל- c במסלול ישר בתוך גלאי ה- ToF ומסלול התנועה ניצב לשני מישורי הגלאי.

B.2 חשבו את האורך המינימלי l של גלאי ה ToF אשר מאפשר להבדיל בקלות בין קאון טעון 0.7pt לפיון טעון בהינתן שהתנע של שניהם נמדד להיות $1.00 \text{ GeV}/c$. עבור הבחנה טובה, נדרש שההבדל בזמן המעוף יהיה גדול יותר מ- 3 פעמים רזולוציית הזמן של הגלאי. הרזולוציה הטיפוסית של גלאי ToF היא 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$).

בהמשך, חלקיקים המיוצרים בגלאי LHC טיפוסי מזוהים ע"י גלאי דו-שלבי המורכב מגלאי עקיבה וגלאי ToF. תרשים 3 מראה את המערכת במישור ניצב לאלומה ובמישור המכיל את האלומה. שני הגלאים הם צינורות המקיפים את איזור האינטראקציה כאשר האלומה עוברת במרכז הצינור. גלאי העקיבה מודד את המסלול של חלקיק טעון אשר עובר דרך שדה מגנטי אשר מכוון במקביל לאלומת הפרוטונים. הרדיוס r של המסלול מאפשר לקבוע את התנע הניצב לאלומה של p_T של החלקיק. כיוון שזמן ההתנגשות ידוע, גלאי ה ToF זקוק לצינור אחד בלבד על מנת למדוד את זמן המעוף (הזמן בין ההתנגשות לבין הזיהוי בגלאי). צינור זה נמצא מיד לאחר גלאי העקיבה. עבור משימה זו, אתה רשאי להניח שכל החלקיקים הנוצרים בהתנגשות נעים בניצב לאלומת הפרוטונים, וזה אומר שאין להם תנע במקביל לאלומה.



מישור ניצב לאלומה



חתך של

תצוגה אורכית במרכז

הצינור לאורך קו האלומה

- (1) - צינור ToF
- (2) - מסלול
- (3) - נקודת ההתנגשות
- (4) - צינור עקיבה
- (5) - אלומת פרוטונים
- ⊗ - שדה מגנטי

תרשים 3: מערכת הניסוי עבור זיהוי חלקיק באמצעות גלאי עקיבה וגלאי ToF. שני הגלאים הם צינורות המקיפים את נקודת ההתנגשות שבאמצע. משמאל: תצוגה במישור ניצב לאלומה. מימין: תצוגה אורכית במישור מקביל לאלומה. החלקיק נע בניצב לקו האלומה.

B.3 בטאו את מסת החלקיק במונחי צפיפות השטף המגנטי B , הרדיוס R של צינור ה- ToF, 1.7pt , קבועים יסודיים, והגדלים הנמדדים: הרדיוס r של המסלול וזמן המעוף t .

גילינו 4 חלקיקים ואנו רוצים לזהות אותם. ציפות השטף המגנטי בגלאי העקיבה הייתה $B = 0.500 \text{ T}$. הרדיוס R של צינור ה-ToF היה 3.70 m , ואלו המדידות ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

חלקיק	רדיוס המסלול $r[\text{m}]$	זמן תעופה $t[\text{ns}]$
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

0.8pt

B.4 זהו את 4 החלקיקים באמצעות חישוב המסות שלהם.