

**החלקיקים היסודיים:**

ישנם  $2 \times 6$  (בסה"כ 12) פרמיונים בעלי ספין  $\frac{1}{2}$  המקיימים את משוואת דיראק:

קווארקים	דור I	דור II	דור III
	u	c	t
לפטונים	d	s	b
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	e	$\mu$	$\tau$

**לפטונים:** אינם מרגישים בכוח החזק.

**קוורקים:** מרגישים בכוח החזק.

יש גם "**חלקיקי כוח**" עבור הכוח החזק, החלש והאלקטרומגנטי, שהם בוזונים.

**הדרונים וקווארקים:**

קיימים שני סוגי **הדרונים:**

**מזונים**  $q\bar{q}$  (בוזונים), ו**בריונים**  $qqq$  (פרמיונים).

**אינטראקציות יסודיות:** חזקה, אלקטרומגנטית, חלשה, וכבידה.

– הקוורקים משתתפים בחזקה, החלשה והא"מ.

– הלפטונים הטעונים בחלשה והאלקטרומגנטיות.

– נויטרינו יופיע רק בחלשה.

– פוטון  $\gamma$  מופיע רק באינטראקציה א"מ.

– חלקיקי  $W_+, W_-$  ו  $Z_0$  יופיעו רק בחלשה.

– שינוי דור מקטין משמעותית את הסיכוי לאינט'.

הכח	חלקיק נושא כוח	הכח	עוצמה	זמן לדעיכה	טווח במ"מ
חזק	גלואון	חזק	1	$10^{-23}$	1.4
א"מ	פוטון	א"מ	1/137	$10^{-16}$	Inf
חלשה	$W^\pm, Z^0$	חלשה	$10^{-5}$	$10^{-10}$	$10^{-3}$
גרווי	גרוויטון	גרווי	$10^{-39}$	--	Inf

**חזק של אינטראקציות**

– לאינטראקציה חזקה יותר, סיכוי (חתך פעולה) גדול יותר.

– כל מה שמותר יתרחש בהסתברות ע"פ חתך הפעולה.

– אם חלקיק יכול לדעוך בדעיכה חזקה הוא יעשה זאת בזמן חיים אופייני של  $\sim 10^{-23}$  שניות.

– קווארק מעורר ידעך מהר בדעיכה חזקה, ובמצב היסוד לאט בחלשה.

– הכוח החזק פועל רק בין חלקיקים בעלי צבע.

– במרחקים קטנים מאוד חתך הפעולה לאינט' החלשה גדול בהרבה מאשר לכוחות האחרים.

– הדרון בעל קווארק מעורר יכול לדעוך להדרון בעל אותו הרכב עם קווארק שאינו מעורר.

– הכוח החלש חלש באנרגיות נמוכות בגלל שבזוונו כבדים, חזק יותר באנרגיות גבוהות.

**החלקיקים נושאי הכוח**

לכל החלקיקים נושאי הכוח המוכרים ספין  $S=1$  והם בוזונים וקטוריים

– א"מ: פוטון  $\gamma$ . מסתו ומטענו 0.

– הכוח החלש: שני בוזוני  $W$  ( $W_+$  ו  $W_-$ ) מסתם  $80.22 \text{ GeV}/c^2$  ובוזון  $Z_0$  שמסתו  $91.187 \text{ GeV}/c^2$ .

– הכוח החזק: 8 גלואונים שמסתם ומטענם 0. קיימים רק 8 בשל סימ'  $SU_3$ .

**מספרים קוואנטיים וחוקי שימור**

**תמיד נשמר:** אנרגייה, תנע, ותנע זוויתי.

**מטען חשמלי:** לקווארקים:  $Q = \frac{2}{3}(N_u + N_c + N_t) - \frac{1}{3}(N_d + N_s + N_b)$

**מס' בריוני:**  $B = \frac{1}{3}(N(q) - N(\bar{q}))$

**מס' לפטוני:**  $L = N(L) - N(\bar{L}) + N(\nu) - N(\bar{\nu})$

**מס' משפחה לפטונית:** למשל:  $L_e = N(e^-) - N(e^+) + N(\nu_e) - N(\bar{\nu}_e)$

**נשמר בחלק מהאינטראקציות**

**זוגיות parity:** אופרטור הזוגיות  $P\psi(r) = A\psi(-r)$ , כאשר  $A = \pm 1$  עבור

פונ' עצמיות של האופרטור. משמעות הזוגיות היא כיצד משתנה  $\psi(r)$  תחת היפוך המרחב  $\vec{x} \leftrightarrow -\vec{x}$ . בקירוב האולטרה יחסותי ( $m=0$ ) חלקיק הוא "ימני" אם התנע מקביל לספין ו"שמאלי" אם התנע אנטי-מקביל לספין.

ספינור של דירק יכול להכתב כהרכבה של חלק ימני ושמאלי  $\psi = \begin{pmatrix} \psi_L \\ \psi_R \end{pmatrix}$

כאשר כ"א מהם הוא ספינור עם שני רכיבים (Weil spinor).

אופרטור הזוגיות מחליף בין  $\psi_L$  ל  $\psi_R$ :  $P(\psi_L) = \psi_R$

לחלקיקים זוגיות פנימית משלהם  $P\psi = \eta\psi^0\psi(t, -x)$  הזוגיות נשמרת באינטראקציות חזקות וא"מ.

מופרת באינטראקציות חלשות – רק חלקיקים שמאליים (ואנטי חלקיקים

$P_q = 1, P_{\bar{q}} = -1, P_{Nuc} = 1, P_\nu = -1,$

ימניים) משתתפים.

$P_{\bar{\nu}} = 1, P_\gamma = -1', P_{meson}(s=0) = -1^{l+1}$

**Flavour:** לא נשמר באינט' החלשה, אולם לרוב עם  $\Delta F \leq 1$ . הסוגים:

**Charm:**  $C = N_c = N(c) - N(\bar{c})$

**Strangness:**  $S = -N_s = -N(s) + N(\bar{s})$

**Beauty:**  $\bar{B} = -N_b = -(N(b) - N(\bar{b}))$

**Truth:**  $T = -N_t = N(t) - N(\bar{t})$

שינוי טעם יתכן רק בזרם טעון  $W^+, W^-$ .

**איזוספין:** מספר קוואנטי שנוצר כדי להבחין בין 2 חלקיקים עם מסה כמעט

זהה. נשמר רק בחזקה.  $I_3 = \frac{1}{2}(N_u - N_d), I = I_{3max}$

1/2 עבור פרוטון ו-1/2 לניוטרון.

**היפר מטען:**  $Y = B + S + C + \bar{B} + T$ , כך ש  $I_3 = Q - Y/2$

מולטיפלטים: צירוף של  $2I + 1$  חלקיקים כמעט זהה ומסה ושוני מטען.

**בדיקת חוקי שימור:**

(א) תחילה יש לבדוק שימור מסה-אנרגיה.

(ב) לאחר מכן שימור מטען.

(ג) תנע קווי וזוויתי, וספין במידה ומצויין.

(ד) מספרים בריונים ולפטונים.

(ה) אם מתקיימים כל החוקים עד כה אינט' חלשה מותרת.

(ו) על מנת שא"מ תהיה מותרת: שימור זוגיות Flavour.

(ז) על מנת שחזקה תהיה מותרת צריך להישמר גם איזוספין.

**שרטוט דיאגרמות פיינמן:**

(א) זרימת הזמן היא לימין.

(ב) חלקיק נע עם הזמן, ואנטי חלקיק בכיוון הפוך לזמן.

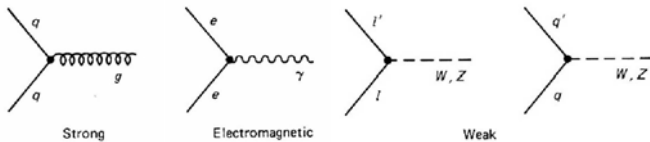
(ג) כל ורטקס מכיל חיץ נכנס וחיץ יוצא.

(ד) סדר הדיאגרמה הוא מספר הורטקסים.

(ה) ורטקס לבדו לא משמר אנרגיה ותנע.

(ו) אי שימור תנע-אנרגיה מותר רק עבור זמן  $\tau > \hbar / \Delta E$

(ז) הסתברות התהליך:  $P \propto \alpha^n$ , כאשר n היא דרגת הדיאגרמה.  $\alpha$  קבוע.



**קביעת יחס הסיעוף:** בעת דעיכת חלקיק לזוגות (או יותר) מאחר וקבועי כ"א מהאינטראקציות הם גלובליים, הסיכוי לכ"א מהתהליכים שווה (כלומר ליצירת

כ"א מהזוגות) אולם בשל מטען הצבע, הסיכוי ליצירת זוג קווארקים הוא פי 3 מאשר ליצירת זוג לפטונים (כי הסיכוי ליצירת זוג כ"א מהצבעים זהה לסיכוי

ליצור זוג לפטונים).

שינוי דור מקטין משמעותית את הסיכוי לאינט'.

עוד מתקיים כי חתך הפעולה פרופ' למכפלת מטעני התוצרים והחלקיקים

הדועכים. למשל:  $\sigma(e^+ + e^- \rightarrow q^+ + q^-) \propto Q_q^2 \cdot Q_e^2$

מכאן נובע כי היחס בין חתכי הפעולה פרופ' למטען. למשל:

$\sigma(e^+ + e^- \rightarrow q^+ + q^-) = Q_q^2 \sigma(e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-)$

**התפרקויות לפי התדירות האופיינית שלהן:**

– לרוב מה שיכול לדעוך חזק ידעך הכי מהר, אח"כ א"מ ולבסוף חלש.

– ככל שהפרש המסה בין המקור לתוצר גדל, גדלה התדירות.

– תהליך שבו יש שינוי של דור, בעל תדירות קטנה בהרבה.

– אם יש אפשרויות רבות לסוג דעיכה מסויים (למשל לקווארקים) ומעט

אפשרויות לאחר (למשל ללפטונים), הסיכוי לכ"א מהאפשרויות עבור הסוג

השני גדול יותר, כי מרחב הפאזה שלו גדול יותר (למשל כאן הסיכוי ללפטונים

גדול בהרבה).

**מערכת מרכז המסה:** הגדלים האינוריאנטיים  $E^2 - P^2$ , כך שמתקיים:

$(\sum E_{lab})^2 - (\sum P_{lab})^2 = (\sum E_{cm})^2 - (\sum P_{cm})^2 = 0$   
 $\Rightarrow (\sum E_{cm})^2 = (\sum E_{lab})^2 - (\sum P_{lab})^2$

בעלי תנע זהה בכיוונים הפוכים, כלומר מערכת המעבדה ומ"מ מתלכדות.

**פנומולוגיה-פיזור נויטרינו-אלקטרון:** נשווה פיזור  $e^- - \bar{\nu}_e$  עם פיזור

$e^- - \bar{\nu}_e$ , (תהליכים חלשים טעונים). נניח כי הפיזור באנרגייה גבוהה

מספיק, כך ש  $m_e \approx 0$ . נגדיר את  $\theta$  כזווית בין ה  $\bar{\nu}_e$  נויטרינו הנכנס וה  $e^-$

היוצא ( $\theta = 0$ ) משמעו שהנויטרינו חוזר אחורה).

רק חלקיקים שמאליים ואנטי חלקיקים ימניים משתתפים באינט' החלשה.

ל  $e_L$  ול  $\bar{\nu}_e$  הליסטי הפוכה, ולכן במרכז המסה הספינים שלהם באותו

כיוון, והספין המשותף = 1. ע"מ שיתפזרו ב  $\theta = 0$  הם צריכים לעבור היפוך

ספין, אבל חלקיקים ימניים (או אנטי שמאליים) לא ישתתפו באינט'

החלשה, ולכן זה לא ייתכן לעומת זאת, ל  $e_L$  ול  $\bar{\nu}_e$  הליסטי זהה, ולכן במרכז

המסה הספין הכולל 0, וייתכן פיזור בכל כיוון.

**יחסות:**  $(\vec{P}, E) = P^\mu = mv^\mu = \gamma_u (m_0 \vec{u}, im_0 c), \beta = \vec{V}/c = \vec{P}/E, \gamma = (\sqrt{1-\beta^2})^{-1}$

אינטרוול:  $ds^2 = c^2 t^2 - (d\vec{x})^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$

**יחידות נייטרליות:**  $\hbar = c = 1$  כך ש  $[T]^{-1} = [E] = [M] = [P] = m^{-1}$

**שרטוט דיאגרמות לגלאים:** - בעת בחינת התפרקות בגלאים

- הגלאי הפנימי רגיש רק לחלקיקים טעונים חשמלית.

- גלאי EM רגיש לפוטונים.

- גלאי Had רגיש להדרונים.

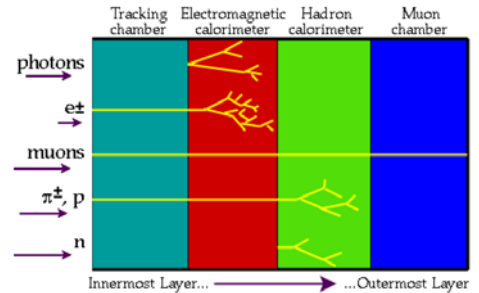
- בגלאי המיואונים יופיעו מיואונים בלבד.

- נויטרינו לא מופיע באף גלאי, ומתגלה רק כחוסר נע.

- פיזור (או דעיכה) לקווארקים יוצר סילוני הדרונים.

- חלקיקים בעלי אורך חיים קצר במיוחד, ידעו לפני ההגעה לגלאי.

- רקע: כל תהליך היוצר תוצרים דומים לתהליך שאנו מודדים.



	Q[e]	[GeV]	S	C	$\tilde{B}$	T	$N_B$	I	$I_3$	Mean Life	Example	Process
d	-1/3	~0.35	0	0	0	0	0	1/2	1/2	900	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	$d \rightarrow u + W^-$
u	2/3	~0.35	0	0	0	0	0	1/2	1/2	---	$p + p \rightarrow n + p + e^+ + \nu_e$	$u \rightarrow d + W^+$
s	-1/3	~0.5	1	0	0	0	0	0	0	$1.24e^{-8}$	$\kappa^- \rightarrow \pi^0 + e^- + \bar{\nu}_e$	$s \rightarrow u + W^-$
c	2/3	~1.5	0	1	0	0	0	0	0	$1.1e^{-12}$	$D^+ \rightarrow \kappa^- + \pi^0 + \pi^+ + e^+ + \nu_e$	$c \rightarrow s + W^+$
b	-1/3	~4.5	0	0	-1	0	0	0	0	$1.3e^{-12}$	$B^0 \rightarrow D^- + e^+ + \nu_e$	$b \rightarrow c + W^-$
t	2/3	~180	0	0	0	1	0	0	0	---	---	$t \rightarrow b + W^+$

**טבלת הפטונים, הבריונים, והמזונים:**

דעיכות	B	C	S	מסה [MeV]	הרכב	האנטי מזון	מזון	דעיכות	S	$N_B$	ספין	מסה [MeV]	הרכב	בריון
$\mu^+ + \nu_\mu$	0	0	0	139.6	$u\bar{d}$	$\pi^-$	$\pi^+$	---	0	1	1/2	938.3	uud	p
$2\gamma$	0	0	0	135.0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$	$\pi^0$	$\pi^0$	$p + e^- + \bar{\nu}_e$	0	1	1/2	939.6	ddu	n
$\mu^+ + \nu_\mu, \pi^+ + \pi^0$	0	0	1	493.7	$u\bar{s}$	$\kappa^-$	$\kappa^+$	$p + \pi^-, n + \pi^0$	-1	1	1/2	1115.6	uds	$\Lambda^0$
$2\pi^0, \pi^+ + \pi^-$	0	0	1	497.7	$1^*$	$\kappa_s^0$	$\kappa_s^0$	$p + \pi^-, n + \pi^0$	-1	1	1/2	1189.4	uus	$\Sigma^+$
$\kappa^+ + e^- + \nu_e$	0	0	1	497.7	$1^*$	$\kappa_L^0$	$\kappa_L^0$	$\Lambda^0 + \gamma$	-1	1	1/2	1192.5	uds	$\Sigma^0$
$2\gamma, 3\mu$	0	0	0	548.8	$2^*$	$\eta^0$	$\eta^0$	$n + \pi^-$	-1	1	1/2	1197.3	dds	$\Sigma^-$
---	0	0	0	958	$2^*$	$\eta^{0'}$	$\eta^{0'}$	$p + \pi^+$	0	1	3/2	1232	uuu	$\Delta^{++}$
$\pi + \pi$	0	0	0	770	$u\bar{d}$	$\rho^-$	$\rho^+$	$p + \pi^0$	0	1	3/2	1232	uud	$\Delta^+$
---	0	0	0	770	$u\bar{u}, d\bar{d}$	$\rho^0$	$\rho^0$	$n + \pi^0$	0	1	3/2	1232	udd	$\Delta^0$
---	0	0	0	782	$u\bar{u}, d\bar{d}$	$\omega^0$	$\omega^0$	$n + \pi^-$	0	1	3/2	1232	ddd	$\Delta^-$
$\kappa^+ + \kappa^-, \kappa^0 + \bar{\kappa}^0$	0	0	0	1020	$s\bar{s}$	$\phi$	$\phi$	$\Lambda^0 + \pi^0$	-2	1	1/2	1315	uss	$\Xi^0$
$\kappa + \_, e + \_$	0	1	0	1869.4	$c\bar{d}$	$D^-$	$D^+$	$\Lambda^0 + \pi^-$	-2	1	1/2	1321	dss	$\Xi^-$
$\kappa + \mu, \kappa + e$	0	1	0	1864.6	$c\bar{u}$	$\bar{D}^0$	$D^0$	$\Xi^0 + \kappa^-, \Lambda^0 + \kappa^-$	-3	1	3/2	1672	sss	$\Omega^-$
$\kappa^+$	0	1	1	1969	$c\bar{s}$	$D_s^-$	$D_s^+$	---	0	1	1/2	2281	udc	$\Lambda_c^+$
$e^+ + e^-, \mu^-, \mu^+$	0	0	0	3096.9	$c\bar{c}$	$J/\psi$	$J/\psi$	<b>זמן חיים</b>	$L_\tau$	$L_\mu$	$L_e$	מסה [MeV]	האנט', לפטון	לפטון $\nu$
$D^0 + \dots$	1	0	0	5279	$b\bar{u}$	$B^+$	$B^-$	יציב	0	0	1	0.511	$e^+$	$e^-$
---	1	0	0	5279	$d\bar{b}$	$\bar{B}^0$	$B^0$	יציב	0	0	1	$< 7e^{-6}$	$\bar{\nu}_e$	$\nu_e$
---	1	0	0	5375	$s\bar{b}$	$\bar{B}_s^0$	$B_s^0$	$2e^{-6}$	0	1	0	105.7	$\mu^+$	$\mu^-$
$e^+ + e^-, \mu^-, \mu^+$	0	0	0	9460.4	$b\bar{b}$	$Y$	$Y$	יציב	0	1	0	$< 0.27$	$\bar{\nu}_\mu$	$\nu_\mu$
								$3e^{-13}$	1	0	0	1777	$\tau^+$	$\tau^-$
								יציב	1	0	0	$< 31$	$\bar{\nu}_\tau$	$\nu_\tau$

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

- ספינורים הם שדות המקיימים את משוואת דיראק, ומייצגים חלקיקים בעלי ספין 1/2.
- תכונות מטריצות  $\gamma$ :

$$\{\gamma_\mu, \gamma_\nu\} = 2g_{\mu\nu}$$

- המט' יוצרות 4-קטור של מטריצות, כך ש  $P^\mu \gamma_\mu$  אינווריאנט לורנץ.
- קיימות 5 מט' 4x4 המקיימות זאת:

$$\gamma_i = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_i \\ -\sigma_i & 0 \end{pmatrix}, \gamma_0 = \begin{pmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{pmatrix}, \gamma_5 = \begin{pmatrix} -I & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}$$

- למשוואת דיראק 2 פתרונות:

$$\psi(x) = u(p)e^{-i\vec{p}\cdot\vec{x}}, \psi(x) = v(p)e^{i\vec{p}\cdot\vec{x}}$$

- בהצמדת שדה דיראק לשדה חשמלי ניתן לראות ששני הפתרונות מתחברים במטענים הפוכים, ואז u מייצג אלקטרון ו v פוזיטרון.
- בקירוב אולטרה יחסותי  $m=0$ , ניתן להפריד את הספינור ל  $\psi = \psi_L + \psi_R$ , כאשר  $\psi_L = \frac{1-\gamma_5}{2}\psi$ ,  $\psi_R = \frac{1+\gamma_5}{2}\psi$

- לשני הספינורים  $\psi_L, \psi_R$  שני רכיבים מאופסים כך שאפשר לרשום  $\psi = \begin{pmatrix} \psi_L \\ \psi_R \end{pmatrix}$  כשכ"א מהם ספינור של 2 רכיבים.

- $\gamma_5 \psi_L = -\psi_L, \gamma_5 \psi_R = \psi_R$ : הכיריליות:  $\psi_L$  בכיוון התנע,  $\psi_R$  נגד כיוון התנע.

- הליסטי - היטל הספין על התנע  $\vec{\sigma} \cdot \vec{P}$ . לחלקיק ימני  $(\vec{\sigma} \cdot \vec{P})\psi_R = \psi_R$  ולשמאלי  $(\vec{\sigma} \cdot \vec{P})\psi_L = -\psi_L$

#### סימטריות בפיסיקה של חלקיקים:

$$L = \frac{1}{2} \left[ \partial^\mu \phi \partial_\mu \phi - m^2 \phi^2 \right]$$

- הסימטריות בלגרנז'ין הן סימטריות מרחב זמן, שמהן נגזרים חוקי שימור התנע-אנרגיה, תנ"ז, ואת האופרטורים C, P, T, וסימטריות פנימיות הפועלות על השדות ולא על המרחב.

(Charge Conjunction) C - סימטריות הקשורות למטען  $(C(e^\pm) = e^\mp)$

- P (Parity) - סימטריית הזוגיות P מחליף בין חלקיקים זוגיים לאי זוגיים.
- T (Time Reversal invariance) - כל תהליך שמתרחש בכיוון אחד בזמן יכול להתרחש גם בכיוון השני.

#### חבורות הסימטריה

- U(1) - חבורת כל המספרים הקומפלקסים בעלי גודל 1. זו חבורת הסימטריה שנותנת את האינט' הא' ומייצגת אינווריאנטיות כיוול מקומית. ממנה נובע בין היתר שימור המטען החשמלי.

ניתנת להכללה ("ע"י הכפלה במט' יחידה מתאימה) להרחבה למוטיליפטים. SU(2) - חבורת כל המט' האוניטריות 2x2, עם דטרמיננטה 1. זו חבורת

סימטריה לא אבלית המשמשת לתיאור ספין. נוצרת ע"י  $\sigma_i, \tau_i = \sigma_i / 2$

מטריצות פאולי. פועלת על דובלטים של לפטון שמאלי והנויטרנו שלו.

SU(3) - חבורת סימטריה של מט' 3x3 עם דט' 0. יוצרי הסימטריה הן 8 מט' הרמיטיות בת"ל עם עקבה 0. וקטורי הבסיס של החבורה הם הוקטורים העצמיים של כ"א מהצבעים.

#### שבירה ספונטנית של סימטריה

אחת הבעיות במודל הסטנדרטי הייתה שבזווי הכיוול חסרי מסה  $L, B$ , למרות שבמציאות הם בעלי מסה. הוספת איבר מסה  $m^2 A_\mu A^\mu$  גרמה לכך שכעת

לא נשמרה סימטריה, במיוחד בכוח החלש. בעייה זו נפתרה ע"י הוספת תיקון

$$L = L_{symmetric} + L_{a,symmetric}$$

אפשרות זו נותנת שבירה ספונטנית של הסימטריה.

#### מאפיני חלקיקים

ההאצה מתבצעת ע"י סדרת RF Cavities (חללי תדירות רדיו) המחוללות גל א"מ נע הדוחף איתו חלקיקי אלומה. חלקיקים מהירים יותר מואצים פחות, כך שלבסוף כל החלקיקים באותה אנרגיה. עיקום האלומה נעשה בעזרת מגנטי דיפול המונחים בין חללי RF, והשדה B משתנה עם ההאצה ע"מ לשמור את מסלול האלומה. יש גם מגנטי קוואדרופול למיבוד האלומה.

#### סוגי מאיצים:

**מאיץ קווי:** מאיץ בקו ישר. כל חלקיק עובר בכל נק' פעם אחת.

**מאיץ סינכרוטרון:** (למשל LHC ו NLC) מאיץ במעגלים. כל חלקיק עובר בכל מקום פעמים רבות, מה שמגדיל את סיכווי ההתנגשות. החיסרון - אובדן האנרגיה בקרינת הסינכרוטרון:

חלקיק בעל מטען Q במסלול ברדיוס R פולט כל סיבוב אנרגיה בשיעור של

$$\Delta E = 0.008 \frac{E^4}{R} \left[ \frac{Energy}{length} \right], \Delta E = \frac{4\pi}{3} \frac{Q^2}{R} \gamma \beta^3$$

#### סוגי נסיונות:

##### מטרה נייחת:

מספר המאורעות לשנייה מוגדר כ:  $N = n\rho L\sigma$ , כאשר n הוא שטף החלקיקים, L אורך המטרה ו  $\sigma$  צפיפות הנוקלאונים במטרה. ההארה:  $\ell = N/\sigma$

החיסרון: קשה מאוד להגיע לאנרגיות גבוהות.

האנרגיה הזמינה במרכז המסה: מאחר  $m_2 \gg m_1$  במנוחה:

$$s = E_{cm}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{P}_1 - \vec{P}_2)^2 =$$

$$m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 E_2 (1 - \beta_1 \beta_2 \cos \theta) = m_1^2 + m_2^2 + 2E_{lab} m_2$$

#### אלומות מתנגשות:

$$s = (E_{1cm} + E_{2cm})^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{P}_1 - \vec{P}_2)^2 =$$

$$m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 E_2 (1 - \beta_1 \beta_2 \cos \theta)$$

האנרגיה המקסימלית שתקבל עבור 2 אלומות באנרגיה זהה ובכיוונים

$$s = 2E$$

( $\cos \theta = \cos \pi = -1$ ) ותהיה

$$\ell = n_1 n_2 f B / F$$

F חתך הקרן, הקרן מסתובבת בתדירות f, B הוא מספר קבוצות החלקיקים. החיסרון: ההארה קטנה בהרבה מאשר במטרה נייחת, מאחר וצפיפות האלומה קטנה בהרבה מצפיפות של מוצק.

**גלאים:** מתבססים על כך שחלקיק העובר בחומר מותיר בו סימנים:

חלקיק טעון יגרום ליינון, אלקטרונים פולטים פוטונים, פוטונים יוצרים זוגות אלקטרון-פוזיטרון, והדרונים מתנגשים עם גלאים.

#### אינט' של אלקטרונים ופוטונים בחומר:

- אלקטרונים מאבדים אנרגיה בחומר בקרינת האטה (Bremsstrahlung), כך שקצב איבוד האנרגיה פרופ' E. הפרשי האנרגיה נפלטים כפוטונים.

- כמו כן אובד אנרגיה ביוניזציה בקצב שפרופ'  $\ln E$

- ב  $E_C$  שווה קצב איבוד האנרגיה בשני התהליכים.

- פוטונים מאבדים אנרגיה ע"י יצירת זוגות  $e^+ - e^-$

- כאשר אלקטרון או פוטון אנרגטי עוברים בתוך צפוף, נוצר **ממטר א"מ** כתוצאה מקרינת האטה ויצירת הזוגות.

- מט' החלקיקים בכל שלב  $N(t) = 2^t$  והאנר' לחלקיק:  $E(t) = E_0 2^t$

- האנרגיה המקס' נמדדת במרחק:  $t_{max} = \ln(E_0 / E_c) / \ln 2$

- **ממטרים הדרוניים** נוצרים כחלק מתוצרי התנגשויות חלקיקים עם גרעיני הגלאי. מההתנגשויות נוצרים חלקיקים נוספים (לרוב פיונים) שגם הם עשויים להתנגש בגרעינים, כך שנוצר ממטר הדרונים. אם

נוצר  $\pi^0$  הוא עשוי לדעוך לפוטונים ומתחיל ממטר א"מ. ממטר הדרוני רחב יותר מא"מ.

**קלוריימטרים** מודדים אנרגיית חלקיקים ע"י יצירת ממטר ומדידת האנרגיה שנשפגה בקלוריימטר.

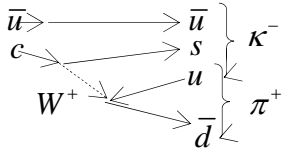
#### משוואת דיראק, ספינורים ומטריצות $\gamma$

משוואת דיראק:  $(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$  או  $Hu = (\vec{\alpha} \cdot \vec{P} + \beta m)u(\vec{p})$

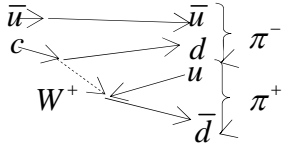
$$\gamma^\mu = (\beta, \alpha_i) = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & \sigma_i \\ \sigma_i & 0 \end{pmatrix}$$

תרגיל כיתה – דעיכת פיו

רק הטעם לא נשמר, ולכן ידעך בחלשה.  
 $D^0 \rightarrow \kappa^- + \pi^+$  (ג)  
 $[c\bar{u}] \rightarrow [s\bar{u}] + [u\bar{d}]$



רק הטעם לא נשמר, ולכן יכול לדעוך בחלשה.  
 $D^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$  (ד)  
 $[c\bar{u}] \rightarrow [\bar{u}d] + [u\bar{d}]$



(ה)  $D^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^+$  : לא ייתכן בשל שימור מטען.

(ו)  $D^0 \rightarrow \kappa^- + \tau^+ + \nu_\tau$  : לא ייתכן בשל שימור אנרגייה.

כיצד יראו התהליכים בגלאי?

inner	EM	Had	Muon
---	---	---	---
---	---	---	---
---	---	---	---

תהליכים נוספים לדוגמא בגלאי:

inner	EM	Had	Muon
---	---	---	---
---	---	---	---
---	---	---	---
---	---	---	---

תרגיל כיתה – האם התהליכים הבאים מותרים?

(א)  $\pi^- + p \rightarrow \pi^+ + \pi^- + n$  מתקיים.  
 $[\bar{u}d] + [uud] \rightarrow [u\bar{d}] + [\bar{u}d] + [udd]$

(ב)  $\bar{p} + p \rightarrow \pi^0 + \pi^-$  : אין שימור מטען.

(ג)  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$  : אין שימור מטען לפטוני לפי משפחה.

(ד)  $e^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$  : אין שימור אנרגיה, כי  $m_\mu > m_e$ .

(ה)  $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$  : אין שימור מוזרות, ולכן ידעך חלש.  
 $[sdd] \rightarrow [udd]$

(ו)  $\mu^- + \mu^+ \rightarrow \gamma$  : לא יתכן בשל שימור תנע: במערכת מרכז המסה

התנע הוא אפס, ופוטון לא יכול להיווצר עם תנע אפס (יכולים להיווצר 2)

(ז)  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$  : מתקיימים כל חוקי השימור. ייתכן בא"מ (פוטונים).

$\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + \pi^0$

(ח)  $[uuc] \rightarrow [uus] + [u\bar{d}] + [\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})]$

יתכן באינט' חלשה, כי אין שימור טעם.  
 נכתב ע"י יניב טננבאום קטן, 2007

(1) נבחן את הדעיכות הבאות של  $\pi^-$  :

$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

$\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$

$\pi^- \rightarrow \tau^- + \bar{\nu}_\tau$  : לא ייתכן, בשל שימור אנרגייה.

א. הסבירו מדוע  $\pi^-$  ידעך דעיכה חלשה:

$\pi^- = \bar{u}d$  . דעיכה חזקה וא"מ לא ייתכנו, מאחר ולא ניתן לשמור טעם, ולכן הדעיכה חייבת להיות חלשה. הדעיכה תהייה לפוטונים בלבד, מאחר והפיון מורכב מהקוורקים הקלים ביותר.

ב. מדוע הדעיכה היא דרך הזרם הטעון בלבד  $W^\pm$  ?

בשל שימור מטען חשמלי הדעיכה חייבת להיות בזרם טעון.

ג. מדוע כמעט תמיד הדעיכה היא לזוג מיואון-נויטרינו מיואון?

לפי פיינמן קבוע הצימוד של הדעיכה הוא גודל גלובלי, ולכן נצפה להתכי פעולה שווים לכ"א מהדעיכות. בפועל הדעיכות הן כמעט תמיד למיואון, וכמעט אף פעם לא לאלקטרון. ההסבר:

ההבדל היחיד בין מיואון לאלקטרון הוא במסה. ל  $\pi^-$  יש ספין 0, ולכן גם הליסטי 0. ראינו כי ניתן לכתוב  $H\psi = \begin{pmatrix} m & \vec{\sigma} \cdot \vec{P} \\ \vec{\sigma} \cdot \vec{P} & m \end{pmatrix} \psi$  עבור  $m=0$ .

ההמילטוניאן מתחלף עם ההליסטי  $\vec{\sigma} \cdot \vec{P}$ , ולכן ההליסטי נשמרת  $\Rightarrow$  לתוצרים תהיה גם הליסטי 0. מאחר ואלקטרון מסה קטנה, היא בקירוב טוב

0, וההליסטי אכן נשמרת.  $e^-$  חלקיק שמאלי ולכן בעל הליסטי  $\langle 0|$ ,

ו  $\bar{\nu}_e$  ימני (כי  $V_e$  שמאלי) ולכן ההליסטי  $\langle 0|$ , אבל הוא בעל תנע בכיוון הפוך

לאלקטרון, כלומר הליסטי  $\langle 0|$ , ובפרט סה"כ ההליסטי  $\langle 0|$ .

לפיכך זוג אלקטרון-נויטרינו כמעט לא נוצר בשל שימור ההליסטי.

המיואון, לעומתו, כבד בהרבה, ולכן ההליסטי לא חילופית עם ההמילטוניאן מסודרים נמוכים יותר, ונשברת ביתר קלות.

(2) סדרו את החלקיקים הבאים לפי אורך חייהם והסבירו:

הגורמים המשפיעים על אורך חיים:

-סוג האינטראקציה שבה דועך החלקיק. מה שיכול לדעוך חזק דועך הכי מהר, אה"כ א"מ ולבסוף חלשה.

- מרחב הפאזה: ככל שתוצרי הדעיכה קלים יותר, גדל מרחב הפעולה לדעיכה (האפשרויות לכיוון וסוג החלקיקים שנוצרו) מה שיגדיל את חתך הפעולה:

(א)  $m_\phi = 1029 \pm 0.02 [MeV] : \phi = c_1 [u\bar{u} + d\bar{d}] + c_2 [s\bar{s}]$

ידעך חזק (יכול למשל ליצור  $\pi^0$ )

(ב)  $m_{B^0} = 5279.4 \pm 0.5 [MeV] : B^0 = d\bar{d}$

ידעך חלש כי אין שימור טעם (ללפטון).

(ג)  $m_{\pi^+} = 139.57 \pm 0.00035 [MeV] : \pi^+ = u\bar{d}$

ידעך חלש כי אין שימור טעם (ללפטון).

(ד)  $m_{\pi^0} = 134.9766 \pm 0.0006 [MeV] : \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [u\bar{u} + d\bar{d}]$

ידעך א"מ 2 פוטונים לפחות. לא ידעך ל  $\pi^\pm$  כי המסה שלו קטנה משלהם.

(ה)  $m_p = 938.27 \pm 0.00 [MeV] : p = uud$

חלקיק יציב. לא דועך כי המספר הבריוני שלו שונה משל התוצרים האפשריים.

תרגיל כיתה – דעיכת המזון  $D^0$

$D^0 = c\bar{u}$  . למי מהבאים יכול לדעוך ובאיזה סוג של דעיכה?

(א)  $D^0 \rightarrow \kappa^- + e^+ + \bar{\nu}_e$  : לא ייתכן כי אין שימור מס' לפטוני.

(ב)  $D^0 \rightarrow \kappa^- + \mu^+ + \nu_\mu$  : יתכן באינט' חלשה (כי יש נויטרינו)

