

סוגי החלקיקים:

Gen	I	II	III	Q
Quarks	u	c	t	2/3
	d	s	b	-1/3
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
	e	μ	τ	-1

לפטונים: $m_e=0.51\text{MeV}$; $m_\mu=105.6\text{MeV}$; $m_\tau=1.77\text{GeV}$;
 $t_c > 2.7 \cdot 10^{23} \text{y}$; $t_\mu = (2.197 \pm 0.00004) \cdot 10^{-6} \text{sec}$;
 $t_\tau = (295.6 \pm 3.1) \cdot 10^{-15} \text{sec}$

קווארקים:

$m_u \sim 1.5-5\text{MeV}$; $m_d \sim 3-9\text{MeV}$; $m_s \sim 60-170\text{MeV}$;
 $m_c \sim 1.1-1.4\text{GeV}$; $m_b \sim 4.1-4.4\text{GeV}$; $m_t \sim 174\text{GeV}$

לפטונים לא משתתפים באינטראקציות חזקות.
 ניוטרינו משתתפים רק באינטראקציות חלשות.
 קווארקים משתתפים בכלן.

לקווארקים יש גם מטען צבע: אדום כחול וירוק. לאנטי קווארק יש אנטי-צבע. לכן כאשר מחשבים חתכי פעולה יש לקחת אותו בחשבון כי יש שלוש אפשרויות ליצירת כל קווארק.
 המסה של ניוטרינו היא כמעט אפס.

הדרונים:

הדרונים מורכבים מקווארקים (במקרה הזה נקראים פרטונים):

• מזונים – בוזונים $q\bar{q}$

• בריונים – פרמיונים qqq

• התנע בהדרונים מתחלק בין הפרטונים הנמצאים בהם. בנוסף לכך חלק מהתנע יכול להיות בגלואונים שנמצאים בתוך הדרון או בתוך קווארקים שנוצרים ונהרסים כל הזמן בתוך הדרון.

• המטען של כל החלקיקים חייב לבוא ביחידות שלמות!

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$						Mesons $q\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.						Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin	Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2	π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2	K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
n	neutron	udd	0	0.940	1/2	ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2	B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2	η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

$$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$$

הכוח החזק והצבע:

• לכל גלואון זוג צבעים ומבצעים החלפה של צבע אחד לצבע אחר. לדוגמה גלואון אדום-כחול או גלואון אדום-אנטי ירוק.
 • הדרונים קיימים רק חסרי צבע. כלומר מזון יורכב מחלקיק אדום ואנטי אדום. בריון יורכב משלושה קווארקים, כל אחד בצבע שונה (אדום כחול וירוק-גם חסר צבע).

• ראה לקיום צבע: אלקטרון ופוזיטרון מכיידים זה את זה באינטראקציה א"מ, ויכולים להיווצר כל פרמיון והאנטי-חלקיק שלו, בתנאי שיש מספיק אנרגיה. אם קיים צבע, יכולים להיווצר 3 צבעי זוגות קוורקים, ותדירות יצירת הקוורקים גדלה פי 3: $R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = 3 \sum_q e_q^2$
 (סוכמים את הקוורקים שיוכלו להיווצר מבהינת אנרגיה)

חלקיקי אינטראקציה:

כל חלקיקי האינטראקציה הם בוזונים בעלי ספין 1.

• חזקה: 8 סוגי גלואונים.

• אלקטרומגנטית: פוטונים.

• חלשה: $W^+, W^-, m_W=80.22\text{GeV}$.

$Z^0, m_Z=91.187\text{GeV}$.

חלקיק וירטואלי הוא חלקיק שלא מקיים את האינווריאנטה:

$$E^2 - P^2 = m^2$$

חוקי שימור: (לא לשכוח לבדוק!)

- ✓ אנרגיה ומסה (במיוחד אם יש רק חלקיק יחיד שמתפרק- כי אז האנר' היא המסה שלו בלי תנע)
- ✓ תנע ותנ"ז
- ✓ מספר בריוני
- ✓ מספר לפטוני (כללי וגם של כל דור בנפרד)
- ✓ מטען חשמלי
- ✓ הופעת לפטונים \leq אינטראקציה חלשה או א"מ.
- ✓ הופעת ניוטרינו \leq אינטראקציה חלשה.
- ✓ הופעת פוטון \leq אינטראקציה א"מ. פוטון לא יכול להיווצר לבדו. אין כזה דבר פוטון בלי תנע, הוא חייב להיווצר עם חלקיקים נוספים בתור תוצר סופי, אחרת אנר' מרכז המסה היא אפס.
- ✓ אין שימור טעם \leq אינטראקציה חלשה.

מספר בריוני B:

- המספר הבריוני של בריון הוא 1, של אנטי-בריון 1-.
- מס' בריוני של קווארק הוא 1/3, של אנטי-קווארק 1/3-.
- המספר הבריוני של מזון הוא 0.
- המספר הבריוני נשמר בכל האינטראקציות.

איזוספין:

- האיזוספין הוא מספר קוונטי נוסף שהינו דומה מאוד לספין, ולרוב מתיחסים לרכיב z שלו המסומן ב- I_3 . הרעיון הוא שחלקיקים כמו הפרוטון והניוטרון הם בעצם שני מצבים של אותו חלקיק, והם מהווים דאבלט. הפיונים מהווים טריפלט.

$$I_3 = \frac{1}{2}(N_u - N_d)$$

- I_3 נשמרים באינט' חזקות, באלקטרומגנטיות נשמר I_3 .
- לכל הקווארקים מלבד u ו d יש איזוספין 0
- $u: I=1/2, I_3=1/2$ $d: I=1/2, I_3=-1/2$

$$I = 1/2 \begin{cases} I_3 = -1/2 = n \\ I_3 = +1/2 = p \end{cases} \quad I = 1; \begin{cases} I_3 = +1 = \pi^+ \\ I_3 = 0 = \pi^0 \\ I_3 = -1 = \pi^- \end{cases}$$

מספרים קוונטיים של קווארקים:

- $b \rightarrow \tilde{B}$ Beauty = -1, $S \rightarrow$ Strangeness = -1
- $c \rightarrow$ Charm = 1, $t \rightarrow$ Truth = 1
- הסימן נקבע לפי סימן המטען.

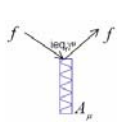
מאיצים:

מאיצים את החלקיקים ע"י נקודות במרווחים קבועים לאורך המאיץ שבהם יש גלי רדיו (שדה א"מ) שגורמים לדחפת החלקיקים. במאיץ מעגלי יש מגבלה להאצה בגלל "קרינת סינכרוטרון" שגורמת לאיבוד אנרגיה.

בד"כ עדיף להאיץ אלומות אחת כלפיי השנייה וכך נקבל אנרגיה גבוהה יותר לעומת אלומה ומטרה נייחת.
 LEP/LC – אלקטרון-פוזיטרון. LHC – פרוטון-פרוטון.

גלאים:

- חלקיקים טעונים הנעים במהירות גבוהה יכולים לגרום ליינון של האטומים בגלאי וכך ניתן לראות את מסלולם.
- גלאי "נצנוץ" פועלים כך שכאשר הם מיוננים הם פולטים קרינה (יש בהם חומר מיוחד שכאשר הוא מתיינן פולט פוטונים שאפשר לראות) לעיתים יש להשתמש ב wavelshifter (=מוסיפים חומר אחר שקולט את הפוטונים של הניצנוץ ופולט פוטונים משל עצמו בא"ג אחר) כדי שהאור הנפלט לא ייקלט בחזרה, ובשביל שיהיה נוה להעביר אותו לאלקטרוניקה.
- גלאי מסלולים, משתמשים בחוטים טעונים כדי לפענח מהאלקטרונים הנפלטים ביוניזציה את מסלול החלקיק.
- קלורимטרים הם גלאים הסופגים חלקיקים במלואם ויכולים כך למדוד את האנרגיה שלהם וגם לשמש כמסננים לפני הגלאים הבאים. בקלורимטרים נוצרים ממטרים של החלקיקים אותם הם בולעים (ולא חתימות דקות של מסלול).



איבר מסה של שדה כיוול בוזוני: $-\frac{1}{2}mA^\mu A_\mu$

האיבר $eq\bar{\psi}_i\gamma^\mu A_\mu\psi_i$ מתאר קודקוד בסיסי:

• $G \cdot x_1\gamma^\mu x_2 Y$ - איבר בלגרנז'יאן.

Y-חלקיק אינטראקציה, Z, W, H או A (לפוטון)

x_1, x_2 הפרמיונים המגיבים. יסומנו ב L או R. (אם זה אנטי חלקיק האות הרשומה הפוכה, למצב הקיים)

G - מקדם האינטראקציה.

o באינט' חלשה - G לא תלוי בחלקיקים.

o בא"מ - G תלוי במטען. $G \propto \sqrt{q(x_1)q(x_2)}$

o בהיגס - תלוי במסה. $G \propto \sqrt{m(x_1)m(x_2)}$

• שבירת זוגיות באינטראקציה חלשה: קיים רק ניוטרינו שמאלי (או אנטי ניוטרינו ימני). החלק השמאלי של פונקציית הגל נתון ע"י: $\frac{1}{2}(1-\gamma^5)\psi$, החלק הימני ע"י: $\frac{1}{2}(1+\gamma^5)\psi$

יחס סיעוף=BR:

• ה BR הוא ההסתברות שתהליך יקרה. הגדרנו:

• $BR(\text{reactors} \rightarrow \text{products}) = \frac{\Gamma(\text{reactors} \rightarrow \text{products})}{\Gamma(\text{reactors} \rightarrow \text{all products})}$

• Γ פרופורציוני ל G^2 .

• במכנה יש סכימה על כל ה Γ האפשריות כדי לקבל את היחס הכולל.

• לא לשכוח להכפיל ב 3 לצבע.

• אם יש יותר מסוג אינטראקציה (חזקה חלשה א"מ) אחת בחישוב צריך לדעת את היחס בין ה Gים השונים.

ההיגס:

• הוסף ללגרנז'יאן כדי לספק מסה לבוזוני הכיוול.

• האינטראקציה של ההיגס פרופורציונית למסה. יחס הסיעוף פרופורציוני למסה בריבוע.

נושאים מתקדמים:

• מעבר דורות קורה בגלל שבירת CP (P-זוגיות, C-הפיכת חלקיק לאנטי).

• כמסתבר המטריצה שמייצגת את המסות מכילה אברים לא אלכסוניים ולכן יש קשר בין הדורות עם העדפה לחומר ולא לאנטי חומר. לכן גם יש יותר חומר מאנטי.

• $Z_1 W$ יוצרו ממשיים ברזוננס שלהם, כאשר אנרגית מרכז המסה קרובה מאוד למסת החלקיקים הממשיים.

• Three Gauge Coupling: קודקוד של Z ו שני ה W. נדיר אבל אפשרי, בגלל האיבר הקינטי של שדה הכיוול.

קצת יחסות:

במערכת מרכז המסה סה"כ התנע הוא אפס

$\vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c}, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

אנרגית מנוחה של חלקיק: $E_0 = m_0 c^2$

אנרגיה כוללת: $E = \gamma m_0 c^2 = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + (pc)^2}$

תנע של חלקיק יחסותי: $\vec{p} = \gamma m \vec{v} = \frac{\vec{\beta} E}{c}$

האינווריאנטה של לורנץ: $(mc^2)^2 = E^2 - (pc)^2 = const$

האינווריאנטה למערכת $c = \hbar = 1$ $(\sum E)^2 - (\sum p)^2 = const$

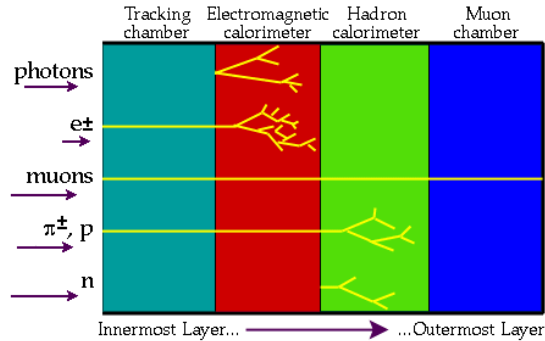
דיאגרמות פיינמן:



• חלקיק נכנס = אנטי-חלקיק יוצא.

• חלקיק האינטראקציה יכול להיות מדומה ולא לשמור את האינווריאנטה של לורנץ. **חייב לשמור מטען!**

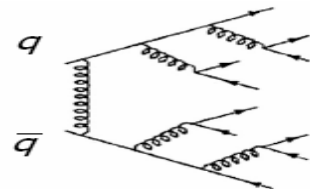
- קלורימטר א"מ: בולע ומראה מסלולים של פוטונים ואלקטרונים. כמו כן מראה מסלולים של חלקיקים טעונים אחרים.
- קלורימטר הדרוני: בולע ומראה מסלולים של כל ההדרונים - גם הלא טעונים. כמו כן הקלורימטר מראה מסלולים של חלקיקים טעונים אחרים.
- גלאי מיואונים: מראה מסלולים של חלקיקים טעונים ובולע מיואונים בד"כ ממקום בסוף.
- ניוטרינו: יש לזכור שניוטרינו לא מופיעים בגלאי ויפיעו בחישוב מסה אינווריאנטית כאנרגיה חסרה.
- ממטר א"מ: $e^- \rightarrow e^- + \gamma, \gamma \rightarrow e^- + e^+$. מספר החלקיקים גדל פי 2 בכל התנגשות, האנרגיה לחלקיק קטנה.
- הבדלים בין ממטר הדרוני לא"מ: המרחק בין התנגשויות גדול, מספר החלקיקים הנוצרים בהתנגשות גדול מ-2, זוויות הפיזור גדולות יותר. מבנה טיפוסי של גלאי:



- חלקיקים ניטרליים (מלבד הפוטון) לא מבצעים אינטראקציה בקלורימטר א"מ.
- ל-ATLAS רזולוציה של $50 - 70 \mu m$, ולכן ניתן לראות מסלולים של חלקיקים בעלי ct גדול מזה. עבור חלקיקים בעלי זמן חיים קצר יותר, נראה רק את תוצרי ההתפרקות שלהם.

סילון הדרוני:

- כאשר יש התנגשות בין חלקיקים, לדוגמה $e^- e^+$, או דעיכה של חלקיק, ונוצרים קווארקים, יוצרו מתוך שדה הצבע עוד ועוד קווארקים עד למצב של יצירת הדרונים. מצב זה נקרא סילון או ממטר הדרוני. בחתימה בגלאי נראה קבוצות של סילונים לכיוונים שונים, ולא פיזור אחיד.



הלגרנז'יאן:

נזכיר את הלגרנז'יאן של המודל הסטנדרטי $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{fermions}$ כאשר

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^i F^{\mu\nu i} - \frac{1}{4}f_{\mu\nu} f^{\mu\nu}$$

$$F_{\mu\nu}^i = \partial_\mu b_\nu^i - \partial_\nu b_\mu^i + g\epsilon_{ijk} b_\mu^j b_\nu^k$$

$$f_{\mu\nu} = \partial_\nu a_\mu - \partial_\mu a_\nu$$

$$\mathcal{L}_{fermions} = \bar{\psi} i \gamma^\mu (\partial_\mu + \frac{ig'}{2} a_\mu Y) \psi + \bar{\psi} i \gamma^\mu (\partial_\mu + \frac{ig'}{2} a_\mu Y + \frac{ig}{2} \tau \cdot \vec{b}_\mu) \psi$$

$$R = e_R \quad L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$$

- חלקיק שמאלי: תנע וספין הפוכים. חלקיק ימני: תנע וספין באותו כיוון.

הלגרנז'יאן הא"מ המלא:

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} (i \gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi + q \bar{\psi} \gamma^\mu A_\mu \psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

איבר קינטי של איבר קינטי של איבר מסה של הפרמיון איבר אינטראקציה בין השדה לפרמיון איבר מסה של הפרמיון איבר קינטי של שדה הכיוול

חוקי אינטראקציות

- לא לשכוח חוקי שימור !!!!
- (הס. גבוהה) חזקה \ll א"מ \ll חלשה (הס. נמוכה).
- חלקיקים שהם מצב מעורר של חלקיקים אחרים ידעו חזק.
- מרחב הפאזה – ככל שיש הפרש גדול יותר בין המסות של המגיבים והתוצרים יש יותר אפשרויות היווצרות מבחינת התנע ואז יש יותר סבירות להתרחשות.
- מעבר דור של קוורקים הינו בהסתברות נמוכה יותר מאשר דעיכה באותו דור.
- הטעם לא יכול להשתנות באינט' עם זרם נייטרלי !!! FCNC (flavour changing neutral current)
- helicity: מכפלת הספין והתנע. נשמר באופן עקרוני אבל רק למסה אפס. ככל שהמסה של החלקיקים גדולה יותר ככה ה-helicity נשבר יותר בקלות כאשר כיוון הספין נמדד ביחס לכיוון התנע ולפי זה קובעים את המכפלה. אם רוצים לחשב את ההליסיטי של שני חלקיקים ב"ז צריך לקבוע ציר תנע אחד.

התפלגויות

- **בינומית:** n- מספר הנסיונות. P – ההסתברות להצלחה בנסיון בודד. ההסתברות לקבל r הצלחות מתוך n נסיונות:
$$P = p^r (1-p)^{n-r} \frac{n!}{r!(n-r)!}$$
- התוחלת: $\langle r \rangle = np$. סטיית התקן $\sigma = \sqrt{np(1-p)}$
- פואסונית: תהליך בינומי בו מספר ההצלחות ידוע אך מספר הנסיונות לא. ג מספר המאורעות המצופים. ההסתברות למדוד r מאורעות באותו פרק זמן הוא: $P = \frac{e^{-\lambda} \lambda^r}{r!}$ וסטיית תקן: $\sigma = \sqrt{\lambda}$

חלקיקים חשובים:

- פרוטון:** p
 $p = uud$; $M = 938.272 \text{ MeV}$; $Q = +1$; $\text{Spin} = +\frac{1}{2}$
- ניוטרוני:** n
 $n = udd$; $M = 939.565 \text{ MeV}$; $Q = 0$; $\text{Spin} = +\frac{1}{2}$.
- פירוק עיקרי: $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

פיון: π^\pm דועך באינט' חלשה ללפטון טעון + (אנטי) ניוטרינו. היינו מצפים לקבל יחס סיעוף זהה עבור אלקטרון ומיואון, כי הצימוד אליהם זהה, אולם מקבלים $\mu^+ \nu_\mu \rightarrow \pi^+$ ב- 99.9%, זאת מכיוון שה-helicity לא נשמרת בתהליך. מסת האלקטרון קטנה בהרבה ממסת המיואון, ולכן ה-helicity תישבר בהסתברות נמוכה יותר עבור אלקטרון.

הקוורק top: דועך ל- W^+ , b. ה- W^+ דועך בתורו דעיכה קוורקית או סמי-לפטונית. $W^+ \rightarrow b \bar{c}$ לפטונים אנרגטיים מאוד, b \leftarrow לפטונים פחות אנרגטיים.

זיהוי המאורע: חיפוש לפטון אנרגטי. מדידת ה-t: נשתמש בדעיכת ה- \bar{t} בערוץ הקוורקי, כי זאת מדידה פשוטה- ממטרים הדרוניים.

כש- $t\bar{t}$ נוצרים מהתנגשות פרוטונים, הפרוטונים ממשיכים להתקיים ולא נעלמים- הזוג נוצר מהואקום.

יצירת לפטונים: גלואונים פוטונים ו Z^0 ייצרו תמיד לפטון והאנטי שלו. ב W^\pm יהיו קוודקדים של לפטון והניוטרינו שלו.

- W דועך ללפטון והניוטרינו שלו עם $BR=0.1$, לכל אחת משלושת הקבוצות (e, tau, mu).
- הצימוד של W^\pm (וירטואלי או ממשי) ללפטונים השונים זהה (אותו יחס סיעוף). הצימוד הזה גם זהה לצימוד שלו עם הספינור של ud ו sc צריך לזכור את הצבע (להכפיל פי 3 את האפשרויות).
- W^\pm יכול להתפרק לשני קוואקים שונים כל עוד המטען נשמר, לדוגמא u ואנטי-d. ולא לקוואק ואנטי קוואק.



הערות:

- הצעה למדידת מאורע מסויים: א. חיפוש חתימה ייחודית בגלאי; ב. גודל שניתן למדוד בקלות.
- חתימות ייחודיות הן למשל מיואונים, לפטונים אנרגטיים, קוודקדים משניים (כמו b בדעיכת ה-t).

	Quarks	Mass [MeV]	cτ	Main decay
W^+		80.425	10^{-17} m	$l^+ \nu$ (10%) Hadrons 68%
Z		91.2	10^{-17} m	$l^+ l^-$ (3.4%) Hadrons 70% Invisible 20%
μ		105.66	658.6m	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ 100%
τ		1777	87.1um	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ 17% $e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$ 17% Had + ν_τ 64%
π^+	$u\bar{d}$	139.6	7.8m	$\mu^+ \nu_\mu$ 99.9%
π^0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$	135	25.1nm	2γ (98%)
ϕ	$c_1(\bar{s}s) + c_2(u\bar{u} + d\bar{d})$	1019		$K^+ K^-$
K^+	$u\bar{s}$	493.7	3.713m	$\mu^+ \nu_\mu$ (63%) $\pi^+ \pi^0$ (21%)
K^*		892		$K \pi$ (100%)
K^0	$d\bar{s}$	497.6	2.7cm _(s)	$\pi^+ \pi^-$ (69%) $\pi^0 \pi^0$ (31%)
D^+	$c\bar{d}$	1869	312um	$\bar{K}^0 K^0 X$ 61%
D^0	$c\bar{u}$	1864	123um	$\bar{K}^0 K^0 X$ 42% $K^- X$ 53%
D_s^+	$c\bar{s}$	1968	147um	
B^+	$u\bar{b}$	5279	501um	$l^+ \nu_l X$ (10%)
B^0	$d\bar{b}$	5279	460um	$K^+ X$ 78% $l^+ \nu_l X$ (10%)
B_s^0	$s\bar{b}$		438um	$D_s^+ X$ (94%)
J/ψ	$c\bar{c}$	3096		Hadrons 87% $\mu^+ \mu^-$ 5.88% $e^+ e^-$ (5.93%)
$\Delta^{++}[uuu]$ $\Delta^+[uud]$ $\Delta^0[udd]$ $\Delta^-[ddd]$				$N \pi$ (99%) $N = p$ or n
Λ^0	uds	1116	7.89cm	$p \pi^-$ (63.9%) $n \pi^0$ (35.8%)
Σ^+	uus	1189	2.4cm	$p \pi^0$ (57.6%) $n \pi^+$ (48.3%)
Σ^-	dds	1189	2.4cm	
Σ^0	uds	1193	22.2pm	$\Lambda \gamma$ 100%
Ξ^0	uss	1315	8.71cm	$\Lambda \pi^0$ 99.5%
Ξ^-	dss	1321	4.91cm	$\Lambda \pi^-$ 99.9%
Ω^-	sss	1672	2.46cm	ΛK^- 67.8% $\Xi^0 \pi^-$ 23.6%