

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة محمد بوضياف - المسيلة

ميدان: علوم المادة
فرع: الفيزياء.
تخصص: الفيزياء النظرية



كلية: العلوم.
قسم: الفيزياء.
رقم: Ph/TH/05/2022

مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماستر أكاديمي
إعداد الطالبة : مجناح نوال
تحت عنوان

آفاق البحث عن فيزياء جديدة في المصادم المستقبلي
FCC-ee
إنتاج الهيجز و الكوارك القمي

تمت المناقشة يوم 2022 / 06 / 30 أمام اللجنة المكونة من:

رئيسا	جامعة المسيلة	د. منير بوساهل
مشرفا ومقررا	جامعة المسيلة	د. أسماء رضوان صالح
مناقشا	جامعة المسيلة	د. سمراء نحاوة

السنة الجامعية: 2022/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

كلمة شكر و عرفان

"ربي اوزعني أن أشكر نعمتك التي أنعمت علي و على والدي وأن أعمل صالحا
ترضاه وأدخلني برحمتك في عبادك الصالحين "

الحمد والشكر لله الذي وفقنا لإنجاز هذا العمل المتواضع راجين به الافادة والاستفادة
أتقدم بالشكر الجزيل للأستاذة " أسماء رضوان صالح " كمشرفة لي وأيضا كأستاذة
التي كانت نعم القائدة والموجهة لي طيلة مراحل إنجاز هذا العمل والتي بذلت من
وقتها وجهدها في سبيل إرشادتي بعلمها الفياض رغم كثرة التزاماتها فجزاها الله خير
الجزاء وحفظها لعائلتها

ولا يسعنا في هذا المقام العلمي إلا أن نتقدم بخالص الشكر والعرفان الى الاساتذة

بوساهل منير- نحاوة سمراء قبولهم مناقشة المذكرة

أيضا الى جميع أساتذة الفيزياء النظرية عرفانا لهم الى ما قدموه لنا ببارك الله فيكم

جميعا .

الاهداء

أهدي هذا الجهد إلى من رضا الله من رضاهم

إلى سيدة النساء ، إلى نور الحياة وبهجته ، التي أعطتنا من روحها لتبقى أرواحنا
أمي حفظها الله

إلى خير الآباء ، إلى من كان عظيما في عطائه ، و الذي

أشكره على الثقة أبي حفظه الله

إلى اخوتي كمال وفارس قرتي عيني

واخواتي الغاليات سماح ، ابتسام ، نادية ، قمير

إلى أبناء أخواتي آدم ، ملك ، خالد

إلى كل زملائي وزميلاتي في القسم كل بإسمه

راجية من الله ان يوفقكم في حياتكم العلمية والمهنية

خاصة الى

الزميل شيكوش منصف عرفانا له لما قدمه لنا نحن الطلبة

والى زميلاتي راجعي فوزية ، دربال خرفية وبن شريف سارة

المحتويات :

1..... مقدمة عامة

الفصل الأول: مدخل إلى فيزياء الجسيمات الأولية والمصادمات

4..... I- مقدمة

4..... I-1- فيزياء الجسيمات الأولية.....

6..... I-2- النموذج المعياري (Standard Model)

7..... I-3- مخططات وقواعد Feynman — QED

8..... I-4- تجارب فيزياء الجسيمات الأولية.....

8..... I-4-1- تصنيف تجارب فيزياء الجسيمات الأولية.....

9..... I-4-2- مبدأ التسريع.....

10..... I-5- فيزياء المسرعات والمصادمات.....

10..... I-5-1- المسرعات الخطية (Linear Accelerators)

11..... I-5-1-1- المسرع الخطي LINAC

12..... I-5-1-2- المسرع الخطي SLAC

12..... I-5-2- المسرعات الدورانية.....

12..... I-5-2-1- المسرع الدوراني Cyclotron

14..... I-5-2-2- المسرع الدوراني التزامني Synchrotron

15..... I-1- مصادم تيفاترون (Tevatron)

- 15.....2- المصادم الهادروني الكبير LHC
- 16.....3-5-I المصادم المستقبلي الدائري FCC
- 17.....3-5-I-1 المصادم الكترون_الكترون (FCC -ee)
- 18.....كاشف CLD ل FCC-ee
- 18.....3-5-I-2 المصادم الكترون_هادرون (FCC-eh)
- 19.....كاشف FCC-eh
- 19.....3-5-I-3 المصادم هادرون_هادرون (FCC-hh)
- 20.....كاشف FCC-hh
- 21.....6-I-1 الإنارة (Luminosity)
- 22.....6-I-1-1 الإنارة في المصادم FCC-hh
- 22.....6-I-2-1 الإنارة في المصادم FCC-ee

الفصل الثاني: دراسة نظرية للتفاعل e^+e^- في المصادم FCC-ee

- 24.....II - مقدمة
- 24.....II-1-1 تفاعل إفناء e^+e^- في المصادم FCC-ee
- 24.....II-2-1 إنتاج البوزون Z في المصادم FCC-ee
- 25.....II-2-1-1 حساب المقطع الفعال لإفناء زوج لبتوني
- 25.....II-2-1-1-1 حساب سعة التفاعل
- 28.....II-2-1-2 حساب المقطع الفعال التفاضلي
- 30.....II-2-2-1 حساب المقطع الفعال للتفاعل $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+\mu^-$

- 32.....FCC-ee انتاج بوزون الهيغز في المصادم II-3-
- 33..... أنماط الاضمحلال الاكثر حساسية لبوزون الهيغز. II-4-
- 35.....(tree level) المستوى الشجري عند المستوى الهيغز عند المستوى الشجري (tree level) II-4-1-
- 36.....(one loop) حلقة واحدة عبر حلقة واحدة (one loop) II-4-2-
- 36..... فوتونين إلى الهيغز إلى فوتونين II-4-2-1-
- 37..... غليونين إلى الهيغز إلى غليونين II-4-2-2-
- 38..... فوتون و بوزون Z إلى الهيغز إلى فوتون و بوزون Z II-4-2-3-

الفصل الثالث: دراسة محاكاة للتفاعل e^+e^- في المصادم FCC - ee

- 43..... مقدمة. III-1-
- 43..... دراسة محاكاة للمقطع الفعال للتفاعل e^+e^- في المصادم المستقبلي FCC-ee عند المستوى الأدنى و الأعلى للطاقة LO و NLO. III-1-1-
- 44..... برنامج Madgraph III-1-1-1-
- 45..... طريقة Monte Carlo III-1-2-
- 45..... دراسات تطبيقية: المحاكاة simulation و الحساب الرقمي للمقطع الفعال باستخدام مولد الاحداث Madgraph. III-2-1-
- 46..... تطبيقات عند المستوى الأدنى للطاقة LO III-2-1-1-
- 47..... التطبيق الاول: دراسة التفاعل $e^+e^- \rightarrow z/\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ III-2-1-1-1-
- 49..... التطبيق الثاني: إنتاج الكوارك القمي $e^+e^- \rightarrow z/\gamma \rightarrow t\bar{t}$ III-2-1-2-
- 50..... تطبيقات عند المستوى الأعلى للطاقة NLO III-2-2-

- III-2-2-1- التطبيق الثالث: إنتاج بوزون الهيغز $e^+ + e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+ + \mu^- h$ 50
- III-3- إضمحلال الهيغز عند المستوى الشجري إلى فيرميون ومضاد الفيرميون 52
- خاتمة 56
- قائمة المصادر والمراجع 57
- ملخص 59

قائمة الاشكال

الصفحة	عنوان الشكل
4	الشكل (1-I): تصنيف الجسيمات الأولية حسب أعدادها الكمية
6	الشكل (2-I): التوزيع المتوقع للمادة والطاقة في الكون
6	الشكل (3-I) : تصنيف التفاعلات في النموذج المعياري [1]
8	الشكل(4-I) : مصادم هدف ثابت
9	الشكل (5-I): مصادم حزميين
12	الشكل (6-I): رسم تخطيطي يوضح تركيب المسرع الخطي LINAC
14	الشكل (7-I): رسم تخطيطي يوضح تركيب المسرع الدوراني Cyclotron
14	الشكل(8-I): رسم تخطيطي يوضح تركيب المسرع الدوراني Synchrotron
16	الشكل (9-I): رسم تخطيطي يوضح شكل المصادم FCC بطول 100km [7]
17	الشكل (10-I): التخطيط العام لـ FCC-ee [7]
18	الشكل (11-I) : رسم تخطيطي للكاشف CLD
18	الشكل (12-I): عرض الحدث في كاشف CLD
19	الشكل (13-I): رسم تخطيطي للكاشف FCC-eh
20	الشكل (14-I): التصميم المفاهيمي لـ FCC-hh [10]
20	الشكل (15-I): كاشف FCC-hh
22	الشكل (16-I): دالة الإنارة (\mathcal{L}) للمصادم FCC-ee بدلالة الطاقة [7] (يمين) وإعدادات تشغيل الانارة للمصادم FCC-ee مع السنوات (يسار) [12]
33	الشكل (1-II) : المقطع الفعال لإنتاج بوزون هيغز بدلالة الطاقة [16]
35	الشكل (2-II): تفرعات لاضمحلال بوزون هيغز في النموذج المعياري

35	الشكل (3-II): مخطط فينمان من أجل اضمحلال بوزون الهيغز إلى زوج من البوزونات الضعيفة (يمين) والى فيرميون ومضاد الفيرميون (يسار).
36	الشكل (4-II): مخطط فاينمان من أجل اضمحلال بوزون الهيغز إلى فوتونين عبر حلقة الفرميونات وعبر حلقة بوزونات W.
38	الشكل (5-II): مخطط فينمان من أجل اضمحلال بوزون الهيغز إلى غلوتين.
39	الشكل (6-II): مخطط فاينمان من أجل اضمحلال بوزون الهيغز إلى فوتون و بوزون Z .
47	الشكل (1-III): مخطط فينمان لإفناء e^+e^- عبر وسيط الانتشار Z و γ
49	الشكل (2-III): مخططات فينمان لانتاج كوارك قمى للتفاعل e^+e^- عبر وسيط الانتشار Z و γ
51	الشكل (3-III): مخطط فينمان لانتاج بوزون الهيغز للتفاعل e^+e^-

قائمة الجداول

الصفحة	عنوان الجدول
5	الجدول (1-I) : الأعداد الكمية للجسيمات الأولية
15	الجدول (2-I): خصائص مصادم LHC
18	الجدول (3-I) : إعدادات ومخطط تشغيل المصادم FCC-ee [9]
19	الجدول (4-I) : الخصائص الأساسية المتعلقة بالكاشف FCC-eh ومقارنته بمصادمات مختلفة [10].
40	الجدول (1-II): مقارنة اضمحلالات الهيغز بدلالة التغير في الطاقة وفي الانارة في المصادم LHC [20]
46	الجدول (1-III): إعدادات المصادم FCC-ee لمختلف طاقات الحزم والإعدادات التقنية [7].

48	الجدول (2-III): المقطع الفعال للتفاعل e^+e^- في الالكتروديناميك الكمي
50	الجدول (3-III): المقطع الفعال لإنتاج زوج من الكوارك القمي للتفاعل e^+e^- في الالكتروديناميك الكمي
51	الجدول (4-III): المقطع الفعال لإنتاج بوزون الهيغز للتفاعل e^+e^- في الالكتروديناميك الكمي من خلال استخدام مولد الحدث MadGraph
53	الجدول (5-III): مخططات فينمان للتفاعلين (1) و(2)
53	الجدول (6-III): المقطع الفعال لاضمحلال بوزون الهيغز للتفاعل e^+e^- في الالكتروديناميك الكمي عند المستوى الشجري الى فيرميون ومضاد فيرميون
55	الجدول (7-III): مخططات فينمان لاضمحلال بوزون الهيغز إلى البوزونات الضعيفة عند المستوى الشجري

مقدمة :

مجال فيزياء الطاقة العالية هو أحد فروع الفيزياء الذي يهتم بدراسة الكون من خلال اكتشاف مكوناته الأولية بما فيها المادة والتحقق من التفاعلات بينها ، حيث تدرس فيزياء الطاقة العالية في المسرعات المكونات الأولية للمادة والقوى الأساسية المتعلقة بها ، والتي تم وصفها بدقة في النموذج المعياري ، حيث أثبت هذا الأخير نجاحه الملحوظ في وصف مختلف مكونات المادة، وتفسير التفاعلات الضعيفة والكهرومغناطيسية وحتى التفاعلات القوية باستثناء القوة الجاذبية.

ومع اكتشاف وجود بوزون الهيغز عام 2012 الذي أثبتته التجريبتان ATLAS و CMS،

أثناء التقاط البيانات الأولى له في المصادم الهادروني الكبير LHC ، حيث تم قياس خصائصه الكمية، للتأكد من هويته. ومع ذلك لا تزال العديد من الأسئلة بدون إجابة ، مثل طبيعة المادة المظلمة والطاقة المظلمة ، و كتلة النيترينو ، وعدم التماثل بين المادة والمادة المضادة وغيرها من الظواهر الفيزيائية التي تحتاج الى تفسير ، و تشكل تحديا للفيزيائيين وحافزا لظهور العديد من الأفكار والنظريات ، محاولين بذلك توسيع فهمنا حول الفيزياء ما بعد النموذج المعياري ولذا تم إقتراح المصادم الدائري المستقبلي FCC بإنارة وطاقة تصادم أعلى خلفا للمصادم الهادروني LHC .

هذه التلميحات التجريبية حول اشارة وجود فيزياء جديدة تجعلنا نطرح مجموعة من التساؤلات

- ماهي التجارب التي سيتم تسليط الضوء عليها في المصادم المستقبلي FCC ؟
- ماهي الية انتاج بوزون الهيغز في هذا المصادم FCC والتي يمكن من خلالها الكشف عن خصائص جديدة لبوزون الهيغز التي تنبأت بها نظريات ما بعد النموذج المعياري ؟ .
- في المصادم المستقبلي FCC (بنسخه الثلاث حسب الترتيب الزمني : FCC-ee ، FCC-eh ،

مقدمة عامة

(FCC-hh) يمكننا البحث عن جسيمات جديدة يفترض ان تقترن ببوزون الهيغز والبوزونات الكهروضيفة بطاقة تصادم تصل إلى 100 تيرا بايت. علاوة على ذلك ، فإن قياسات الانحلال لبوزونات الهيغز و Z من شأنها أن توفر إمكانية اكتشاف المادة المظلمة أو النيوتريونات الثقيلة. كما يمكن للمصادم FCC تمكين إجراء دراسات عميقة لكسر التناظر الكهروضيف وفتح بحث غير مباشر واسع عن فيزياء جديدة .

يعد التفاعل e^+e^- في المصادم FCC-ee ، ذو أهمية قصوى في دراسة خصائص بوزونات الـ Higgs و Z و W و الكوارك القمي لاقتربانها الشديد ببوزون الـ Higgs بسبب كتلتها الكبيرة ، ولأهمية ذلك في فهم طبيعة بوزون الهيغز وفهم التفاعلات الأساسية و أصل المادة ، وهو محور دراستنا في هذا البحث .

تم تنظيم المحتوى الرئيسي لهذا العمل في ثلاثة فصول ؛ الفصل الأول عبارة عن مدخل الى فيزياء الجسيمات الاولية في إطار نظرية النموذج المعياري مع تسليط الضوء على الجانب التجريبي للمصادمات وبالخصوص المصادم الدائري المستقبلي FCC .

أما بالنسبة إلى الفصل الثاني سيتمحور اهتمامنا حول التفاعل e^+e^- في المصادم FCC-ee ، حيث سنشير إلى التطبيقات الحديثة للتفاعل ، مع الحساب النظري للمقاطع الفعالة ، كما سنتطرق إلى آليات إنتاج و تحلل بوزون الهيغز .

في الفصل الثالث من هذه المذكرة سنقوم بدراسة محاكاة للمقطع الفعال للتفاعل e^+e^- عند المستوى الأدنى و الأعلى للطاقة و إنتاج بوزون الهيغز و الكوارك القمي باستخدام برنامج توليد الحدث MadGraph5_aMC@NLO ، وفي الختام سنقوم بمناقشة نتائج هذه الدراسة .

الفصل الأول

مدخل إلى الجسيمات الأولية والمصادمات

I- مقدمة:

هذا الفصل عبارة عن مدخل إلى فيزياء الطاقة العالية بجانبها النظري والتجريبي بالاعتماد على نظرية النموذج المعياري كإطار لتصنيف الجسيمات الأولية ، مع التطرق إلى الجانب التجريبي لفيزياء الطاقات العالية وفيزياء المصادمات والمسرات.

I-1- فيزياء الجسيمات الأولية:

يصنف النموذج المعياري الجسيمات الأولية حسب خصائصها الكمية كالتالي :

- **الفرميونات** : عددها اثنا عشر فرميونا تنقسم إلى ستة لبتونات وستة كواركات .
- **البوزونات** : عددها اثنا عشر بوزونا حاملا للقوة الأساسية .

الشكل التالي (I-1) يوضح الخصائص الكمية للجسيمات الأولية حسب تصنيف النموذج المعياري

	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
mass →	~2.3 MeV/c ²	~1.275 GeV/c ²	~173.07 GeV/c ²	0	~126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	~4.8 MeV/c ²	~95 MeV/c ²	~4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino	W W boson	
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
GAUGE BOSONS					

الشكل (I-1) : تصنيف الجسيمات الأولية حسب أعدادها الكمية

- **اللبتونات** : عبارة عن فيرميونات تتأثر بالتفاعلات الكهرومغناطيسية و الضعيفة توجد في ثلاث عائلات كل منها تظهر على شكل زوجين:

$$\begin{pmatrix} \nu_{e^-} \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_{\mu} \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_{\tau} \\ \tau \end{pmatrix}$$

الفصل الاول : مدخل الى فيزياء الجسيمات الاولية و المصادمات

- الكواركات: عبارة عن فيرميونات تتأثر بالتفاعلات القوية و الكهرومغناطيسية و الضعيفة ، من المستحيل أن تكون بشكل حر في الطبيعة بل تتواجد في حالة ترابط على شكل مترابط ، وتصنف إلى ثلاث عائلات على شكل زوجين:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} , \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} , \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

الهادرونات : تنقسم إلى مجموعتين:

الميزونات (MESONS) : التي هي جسيمات سلمية ذات Spin المنعدم ما يرجع بهذا لكونها

تتكون من كوارك q وكوارك مضاد \bar{q} و غليون مثل : البيونات π

الباريونات (BARYONS) : وتتكون من ثلاثي كواركات qqq مما يكسبها الطبيعة الفرميونية

ومثالاً على هذا : البروتون (proton) .

الهادرونات حساسة للتفاعلات القوية تتكون من كواركات و غليونات حيث أن هذه الأخيرة تعد حاملة

للقوى النووية القوية مع حبسها وحصرها للكواركات داخل الهادرون.

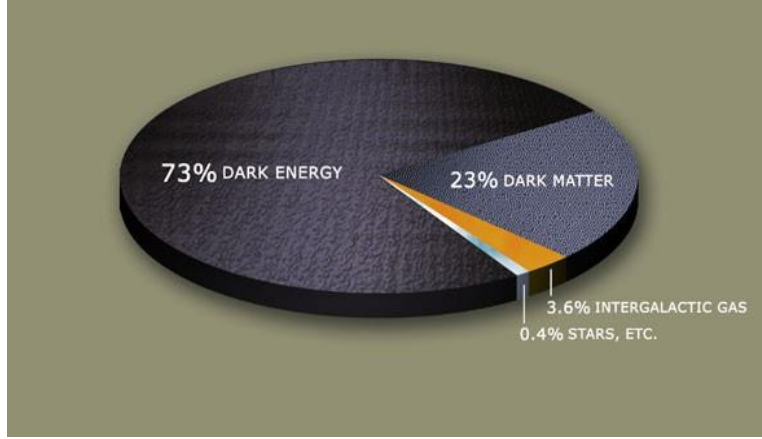
نلخص الاعداد الكمية للجسيمات الأولية في الجدول (1-I) التالي:

	Spin	# bar.	# lept.	Q élec.	T, T_3 faible ¹	C fort
Leptons :						
$\bar{\nu}_L, \bar{\nu}_M, \bar{\nu}_H$	1/2	0	+1	0	+1/2, +1/2	0
e^+, μ^+, τ^+	1/2	0	+1	+1	+1/2, +1/2	0
Quarks :						
$\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$	1/2	+1/3	0	+2/3	+1/2, +1/2	$\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$
$\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$	1/2	+1/3	0	+1/3	+1/2, +1/2	R, G, B
Bosons de jauge :						
γ	1	0	0	0	0	0
Z, W [±]	1	0	0	0, ±1	1, (0, ±1)	0
Gluons	1	0	0	0	0	$\bar{C}\bar{C}$
Vide :						
Higgs	0	0	0	0	0	0

الجدول (1-I) : الاعداد الكمية للجسيمات الأولية .

2-I- النموذج المعياري (Standard Model) :

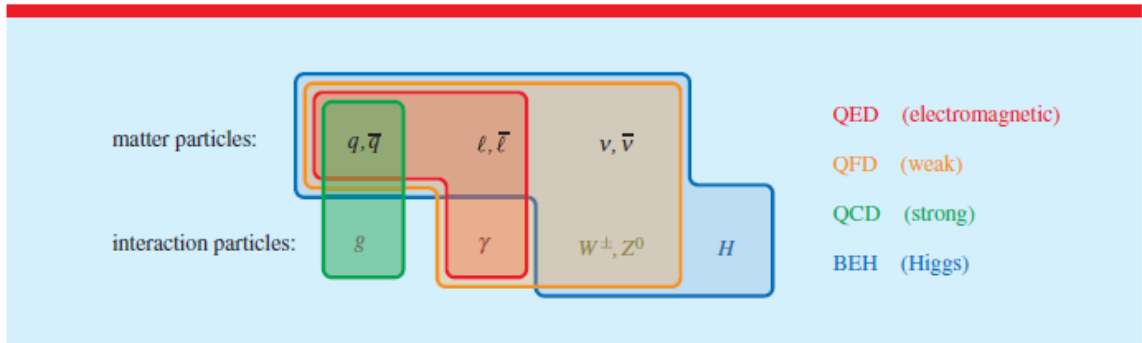
النموذج المعياري يفسر تركيب وبناء المادة الباريونية التي تشكل 5% من مجموع كثافة الطاقة الكلية في الكون (23% مادة مظلمة و 73% من الطاقة المظلمة) كما في الشكل (2-I)



الشكل (2-I) : التوزيع المتوقع للمادة و الطاقة في الكون

ويصف ثلاث تفاعلات أساسية من أصل أربعة فهو يجمع بين الكهرومغناطيسية والتفاعلات الضعيفة

والقوية ، و يصنف مختلف الجسيمات الأولية المكونة لها حسب خصائصها الكمية [1].



الشكل (3-I) : تصنيف التفاعلات في النموذج المعياري [1]

بالاعتماد على نظرية الحقول الكمية تم تطوير النموذج المعياري انطلاقاً من زمرة Gauge التالية :

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y \quad (1-I)$$

C : تمثل الشحنة اللونية (Color Charge).

Y : فرط الشحنة للتفاعل الضعيف (Weak Interaction Hypercharge).

L : تعني أن تحويل عياري (Gauge Transformations) ينطبق فقط على الجسيمات اليسارية

. (Left Handed Chirality)

. SU(2)_L ⊗ U(1)_Y : زمرة تصف التفاعلات الكهروضعيفة (Interactions Electrofaibles)

. SU(3)_c : زمرة تصف التفاعلات القوية (Interactions Fortes)

I-3- مخططات وقواعد Feynman — QED

حيث عبارة كثافة لاغرانج لـ QED تعطى بالشكل التالي [2] :

$$\mathcal{L}_{QED}(x) = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}(x)F^{\mu\nu}(x) + \bar{\psi}(x)(i\partial - m)\psi(x) - \frac{1}{2\xi}(\partial_\mu A^\mu(x))^2 - e\bar{\psi}(x)\not{A}(x)\psi(x) \quad (2-I)$$

يمكن استنتاج قواعد Feynman لـ QED من دالة لاغرانج \mathcal{L}_{QED} [2] [3]:

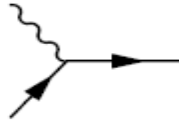
• وسيط التفاعل (Propagator) فيرميون :

$$\begin{array}{c} \longrightarrow \\ \text{p} \end{array} \quad \frac{i}{\not{p} - m + i\lambda} \quad (3-I)$$

• وسيط التفاعل (Propagator) فوتون :

$$\begin{array}{c} \text{~~~~~} \\ \text{k} \end{array} \quad \frac{-i}{k^2 + i\lambda} \left(g^{\mu\nu} - (1 - \xi) \frac{k^\mu k^\nu}{k^2 + i\lambda} \right) \quad (4-I)$$

- قمة تفاعل فيرميون - فيرميون - فوتون :



$$-ie\gamma^\mu$$

(5-I)

4-I- تجارب فيزياء الجسيمات الأولية:

من أجل الكشف عن خواص الجسيمات الاولية وضعت العديد من المسرعات والكواشف ، من ابرزها المصادم الهادروني الكبير LHC ، و مؤخرا تم اقتراح المصادم المستقبلي الدوراني FCC كخلف للمصادم LHC بطاقة أعلى من أجل إكتشاف جسيمات جديدة لفهم الظواهر الفيزيائية غير المفسرة كالمادة المظلمة وكتل النيترينو والطاقة المظلمة وغيرها من المسائل.

1-4-I- تصنيف تجارب فيزياء الجسيمات الأولية:

يمكن تصنيف تجارب فيزياء المصادمات الى نوعين وهما :

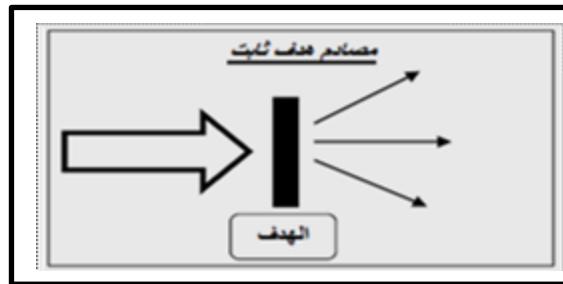
- مصادم الهدف الثابت: يتم قذف حزمة من الجسيمات المشحونة مثل البروتونات p او الالكترونات e⁻

على هدف ثابت حيث ينتج عنه طاقة كلية في معلم مركز الكتلة وتعطى كالاتي:

$$E_{CM} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 m_2} \approx \sqrt{2E_1 m_2} \quad (6-I)$$

- m₂ هي الكتلة الكبيرة المستهدفة وعادة ما يكون الهدف نواة ، لذلك فان E_{CM} يزيد فقط مع الجذر

التربيعي لـ E₁ .



الشكل (4-I) : مصادم هدف ثابت

- مصادم الحزمتين: تصطم حزمتين من الجسيمات بنفس الكتلة مسرعتين بنفس الطاقة في اتجاهين

متعاكسين رأسياً ، مما يولد طاقة هائلة تنتج عنها جسيمات جديدة تستغل في دراسة فيزياء جديدة

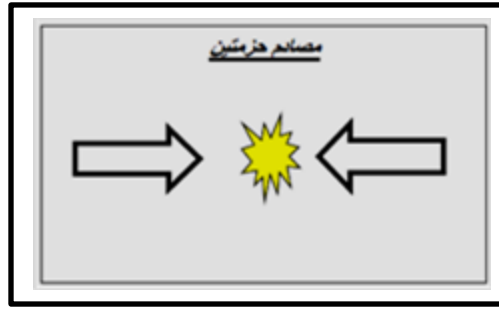
بحيث تكون طاقة مركز التصادم :

$$E_{CM} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 + 2p_1p_2} \approx \sqrt{4E_1E_2} \quad (7-I)$$

E_1 ، E_2 ، p_1 ، p_2 تمثل طاقتي واندفاعي الحزمتين على التوالي.

ولأن E_{CM} تزيد خطياً مع طاقات الحزمة لكونهما يزدادان معا يعد هذا النوع الأفضل من ناحية توفير

مسار اقل تكلفة.



الشكل (5-I) : مصادم حزمتين

I-4-2- مبدأ التسريع:

تقتضي عملية التسريع ضرورة كون الجسيمات مشحونة (موجبة أو سالبة) وقد تكون هذه الجسيمات

الكترونات أو بروتونات أو أي ذرة مؤينة (أي ذرة مجردة أو مكتسبة إلكترون، أو أكثر) تعد قوة

التسريع قوة مؤثرة على شحنة كهربائية تتحرك في حقل كهربائي، أو حقل مغناطيسي وهي ما تسمى بقوة

لورنتز والتي هي عبارة عن جمع اتجاهي بين قوتين و تعطى بالعلاقة التالية:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (8 - I)$$

مع:

الفصل الاول : مدخل الى فيزياء الجسيمات الاولية و المصادمات

v السرعة ، e الشحنة ، E الحقل الكهربائي ، B الحقل المغناطيسي .

تستخدم الحقول الكهربائية لغرض تسريع الجسيمات والزيادة في الاندفاع أما المغناطيسية فإنها تستخدم لتحديد اتجاهها الأصلي ويكون أكبر كلما ارتفعت قيمة الطاقة.

تعتمد السرعات على المبادئ الأساسية التالية :

- مصدر الجسيمات المشحونة .
- أنابيب مفرغة من الهواء متصلة مع بعضها البعض ، حيث يمكن لهذه الجسيمات أن تتحرك بحرية وتنتقل داخلها بحرية .
- المجال الكهربائي .

I-5 - فيزياء السرعات و المصادمات :

تعتمد تجارب فيزياء الطاقة العالية على السرعات أين يتم تسريع و تصادم جسيمات مشحونة أو ايونات

إلى سرعة تقارب سرعة الضوء وينتج عن التصادم جسيمات جديدة من المرجح تساعد على فهم بنية

المادة أين يتم دراسة طبيعة النواتج على مستوى الكواشف (Detectors) [4] .

يوجد ثلاث أنواع من السرعات والمتمثلة في السرعات الخطية (Linear accelerators)

و السرعات الدورانية : السيكلوترونات (Cyclotron accelerators) والسنكروترونات

(Synchrotron accelerators) . كما هو موضح في التصنيف الآتي :

I-5-1- السرعات الخطية (Linear Accelerators) :

الفصل الاول : مدخل الى فيزياء الجسيمات الاولية و المصادمات

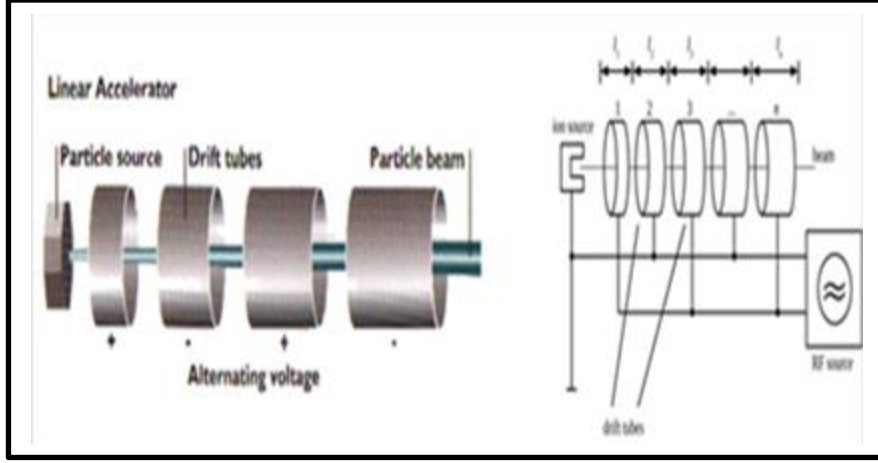
يتم فيها تسريع الجسيمات في خط مستقيم يختص هذا النوع من المسرعات بالجسيمات المشحونة الخفيفة فقط كالإلكترونات e^- أو e^+ ، وما جعل التفكير في هذه الأخيرة من حيث العمل احتفاظ الجسيمات بطاقتها والتكلفة أيضا لأنها مركبة من سلسلة أنابيب اسطوانية مفرغة من الهواء ومزودة بالكترودات اسطوانية الشكل وخضوع هذه الأخيرة لمصدر جهد متناوب ، و يتم بذلك تسريع الجسيمات المشحونة.

I-1-1-5-1- المسرع الخطي (Linear Accelerator CERN) :

ويرتكز مبدأ عمله على التزامن بين السرعة التي يكتسبها الجسيم المشحون بين الأسطوانات مع المجال الكهربائي المتناوب المسلط عليها ، ويظهر على شكل أنبوب اسطواني مفرغ من الهواء يتركب من سلسلة الكترودات ترتبط ببعضها بواسطة مصدر جهد متناوب ، و هذا يساهم في اكتساب الجسيمات المسرعة طاقة وبالتالي اندفاعها داخل الأسطوانة تحت تأثير قوة الجذب الاكتروستاتيكي خلال فترة من الزمن تساوي نصف الزمن الدوري لفرق الجهد المتناوب ، إلى حين أن تتغير قطبية الأسطوانة التي تليها. يزداد طول الاكترود كلما زادت سرعة الجسيمة ويتناقص كلما تناقصت سرعتها ويعبر على هذا التناسب بالعلاقة التالية:

$$l = \frac{v}{2f} \quad (9-I)$$

حيث: v تمثل سرعة الجسيمات ، f التواتر



الشكل (6-I): رسم تخطيطي يوضح تركيب المسرع الخطي LINAC

I-5-1-2- المسرع الخطي SLAC :

يعد Stanford Linear Accelerator Center مسرعا خطيا للجسيمات الأولية يعمل على تسريع

الالكترونات و البوزيترونات بهدف إحداث عملية تصادمها ، وتم على مستواه تجربة الانتشار غير المرن بين إلكترون و هادرون لأول مرة والتي تعتبر الفكرة الأساسية لنموذج البارتنون.

I-5-2- المسرعات الدورانية:

المسرعات الدورانية تستخدم المجال الكهربائي لتسريع الجسيمات الى سرعات عالية والمجال

المغناطيسي للمحافظة على المسار الدائري للجسيمات .

I-5-2-1- المسرع الدوراني Cyclotron :

يتكون من تجويفان معدنيان نصف دائريين متقابلين يأخذان شكل الحرف D بغية تكوينهما دائرة

تتمركزها فجوة صغيرة و يتوضع هذا التركيب بين قطبين شمالي وجنوبي لمغناطيس كهربائي وذلك بغية

جعل الجسيمات تدور حول الجزء المنحني بينما يعمل المجال الكهربائي الموضوع في الفجوة على

الفصل الاول : مدخل الى فيزياء الجسيمات الاولية و المصادمات

تسريعها ، وبعد تسريع الجسيمات تندفع على نحو حلزوني وتترايد سرعتها [5] بما أن الحقل الكهربائي داخل التجويف يكون معدوما تكتب معادلة الحركة على النحو التالي [6] :

$$\frac{dp}{dt} = \gamma m \frac{dv}{dt} = qv \times B \quad (10-I)$$

السرعة v ثابتة ، ومن أجل حقل منتظم وثابت ، إذا السرعة الابتدائية تكون عمودية على اتجاه B فإن المسار سيكون دائري بينما يبقى في المستوى العمودي على B لان :

$$B \frac{dp}{dt} = (B \cdot P) = B(qv \times B) = 0 \quad (11-I)$$

نصف قطر المسار بين التجويفان اللذان على شكل D هو :

$$\rho = \frac{\gamma m |v|}{|B| |q|} \quad (12-I)$$

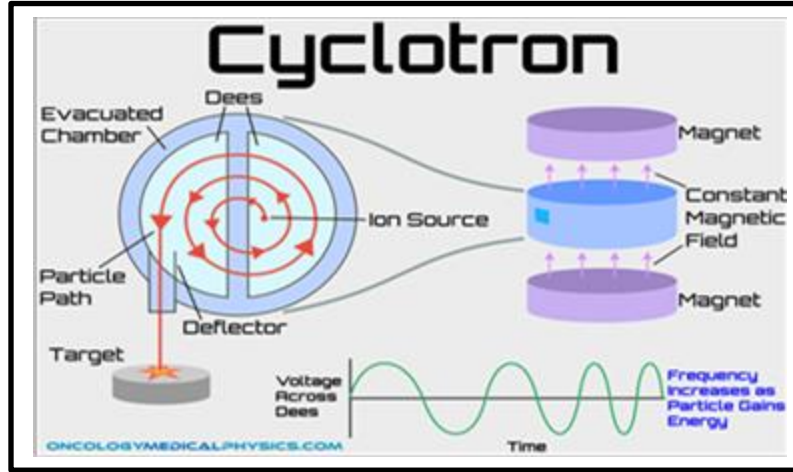
حيث يكون التردد ω :

$$\omega = \frac{|B| |q|}{\gamma m} \quad (13-I)$$

بسبب أبعاد الجهاز ومقدار الحقل المغناطيسي المطلوب نادرا ما يصل Cyclotron لسرعات نسبية .

أما في حالة السرعة غير نسبية $\gamma=1$ لا تتعلق ب ω ، و v

$$\omega = \frac{|B| |q|}{m} \quad (14-I)$$



الشكل (7-I) : رسم تخطيطي يوضح تركيب المسرع الدوراني Cyclotron

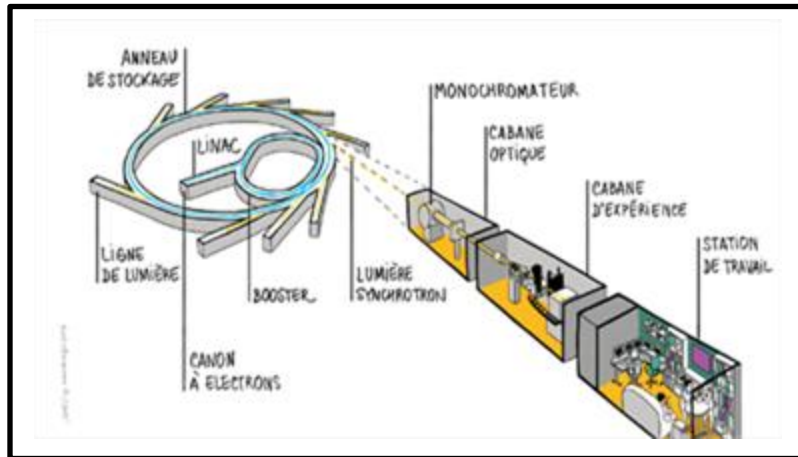
2-2-5-I - المسرع الدوراني التزامني Synchrotron :

تتركب من مسرعات خطية مصغرة رفقة مغناط متعددة الأقطاب ثنائية منها ورباعية كما أن احتواءها على المغناط يتسبب في جعل الجسيمات تتحرك بشكل دائري كمثل على هذا النوع من

المسرعات Tevatron ، LHC ، FCC

تكمن فكرة عملها في تزامن تطبيق الحقلين المغناطيسي والكهربائي مع حزمة الجسيمات المنتقلة

وتعمل على تسريع الجسيمات في مسار دائري إلى أن تصل لسرعة تقارب سرعة الضوء .



الشكل (8-I) : رسم تخطيطي يوضح تركيب المسرع الدوراني Synchrotron

ومن أهم المسرعات الدورانية :

1- مصادم تيفاترون (Tevatron) :

مختص في تصادم بروتونات_ ضد البروتونات تم بناؤه في مختبر فيرمي الوطني

(Fermi National Accelerator Laboratory) قرب شيكاغو من الوصول إلى طاقة 1000Gev

أي ما يعادل 1 Tev ولذا سمي بتيفاترون .

2- المصادم الهادروني الكبير LHC :

و تكمن فكرة عمله أساسا على تصادم الملايين من البروتونات عند نقطة معينة ومراقبة كمية الطاقة الناتجة عن هذا التصادم، تعتمد عملية التصادم على حزمتي بروتونات متضادة في اتجاه الدوران ،لكل منها طاقة مقدارها 7 Tev . تتحرك هذه الحزم حول حلقة LHC داخل فراغ مستمر موجه بمغانط فائقة التوصيل ، تنتقل الحزم في أنبوبين مفرغين منفصلين ، و تصادم في أربع نقاط رئيسية تمثل كواشف التجارب ، تراقب هذه الكواشف طاقة البروتونات المتصادمة تتحول بشكل سريع إلى مجموعة كبيرة من الجسيمات

إن الحاجة لإنتاج الكثير من الطاقة والتعرف على العديد من الجسيمات كبوزون هيغز كانت سببا

في ظهور مصادم الهادرونات الكبير LHC .

Circumference C	26659	m
Energy E	7	TeV
Dipole field B	8.4	T
Bunch spacing s	25	ns
Bunch population N	10^{11}	
Bunch radius $\sigma_x = \sigma_y$	16	μm
Bunch length σ_z	75	mm
Beam-beam parameter ξ	0.0034	
Luminosity L	10	$\text{nb}^{-1}\text{s}^{-1}$
Full crossing angle ϕ	200	μr
Distance to nearest quadrupole ℓ_Q	± 23	m
Events/crossing n_c	19	

الجدول (2-I) : خصائص مصادم LHC

I-5-3- المصادم المستقبلي الدائري FCC :

بعد 10 سنوات من الفيزياء في مصادم الهدرونات الكبير (LHC) ، تطور مشهد فيزياء الجسيمات بشكل كبير. اليوم، مصادم دائري مستقبلي (FCC) ، يتكون من مصادم إلكترون بوزيترون عالي طاقة (FCC-ee)، يتبعه مصادم هادرون حدودي للطاقة (FCC-hh)، يعد ببرنامج الفيزياء بعيد المدى لعصر ما بعد LHC [7]

تتمثل مهمة هذا المصادم في التصدي لحدود الطاقة وشدة مصادمات الجسيمات بشكل كبير والهدف هو تحقيق طاقات تصادم تبلغ 100 Tev من منظور البحث عن فيزياء جديدة حيث سيسلط هذا المصادم على أسئلة المادة المظلمة وعدم التناظر بين المادة والمادة المضادة والطاقة المظلمة و كتلة النيوتريانو غير المعدومة ، والذي يتطلب نفقا بطول 100 km يمتد على الحدود الفرنسية والسويسرية في منطقة جنيف.



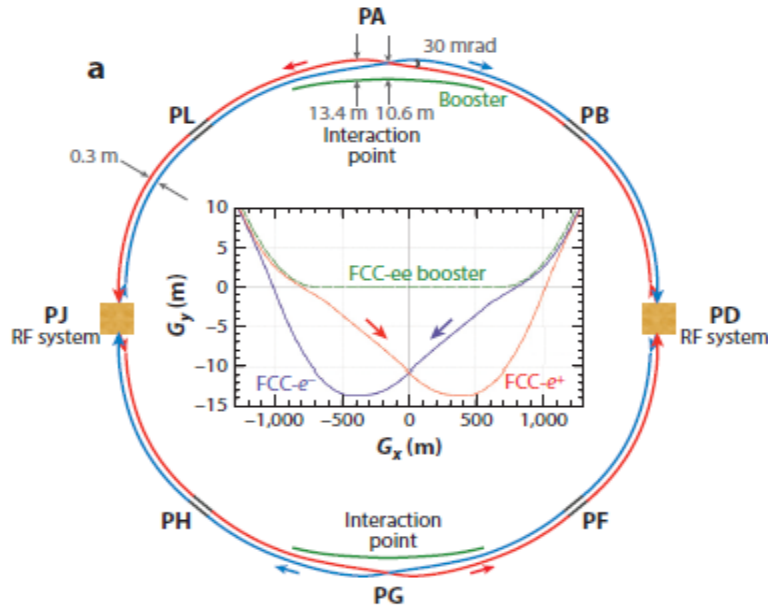
الشكل (I-9):رسم تخطيطي يوضح شكل المصادم FCC بطول 100km [7] .

حيث توجد ثلاث نسخ للمصادم FCC :

1-3-5-I- المصادم الكترون-الكرون (FCC-ee) :

يوفر تصميم مسرع (THE LEPTON COLLIDER) إنارة عالية في تجربتين (أو أكثر) لعدة طاقات تصادم مختلفة بين 90 GeV و 365 GeV ، مع تلبية العديد من القيود البصرية الصارمة [8] . بصرف النظر عن قسم طوله ± 1.2 km حول كل نقطة تفاعل (IP) ، فإن الآلة يتبع تخطيط مصادم الهادرون الذي يبلغ محيطه 97.75 km ، FCC-hh ، تقتصر قوة إشعاع السنكروترون 50 MW في جميع الطاقات.

تستنتج سرعات FCC-ee بوزونات Z و W و Higgs والكواركات القمية بالمعدلات المستحقة. تم تحسين نظام الترددات الراديوية فائقة التوصيل في FCC-ee لكل نقطة تشغيل، مما يضمن الذروة طوال الوقت والسماح بالبناء التدريجي كما هو موضح في الشكل (10-I)



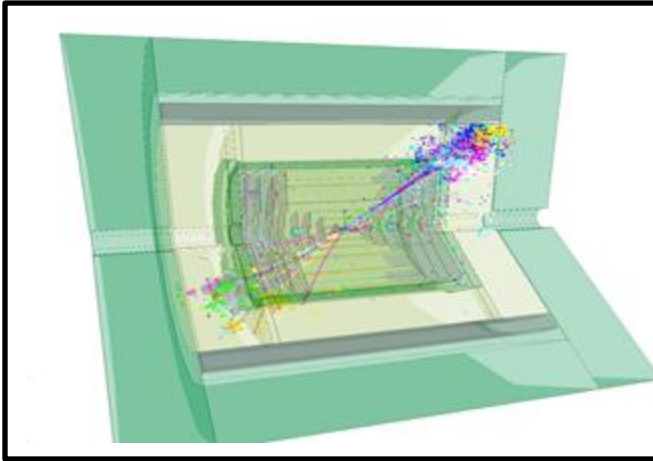
الشكل (10-I) : التخطيط العام لـ FCC-ee مع رؤية مكبرة للمسارات عبر نقطة التفاعل G [7] .

FCC-ee phase	Run duration (yr)	\sqrt{s} (GeV)	L_{int} (ab^{-1})	Event statistics
Z^0	4	88-95	150	3×10^{12} hadronic Z^0 decays
W^+W^-	2	158-192	12	3×10^8 W^+W^- pairs
Z^0H	3	240	5	10^6 Z^0H events
$t\bar{t}$	5	345-365	1.5	10^6 $t\bar{t}$ and 6×10^4 $H\nu\bar{\nu}$ events
H (optional)	3	125	21	Optional run on H resonance

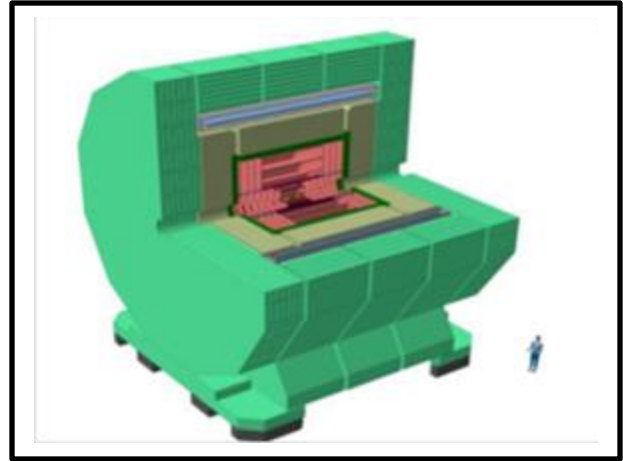
الجدول (3-I) : اعدادات ومخطط تشغيل المصادم FCC-ee [9]

- كاشف CLD لـ FCC-ee :

CLD إختصاراً للتسمية CLIC-like detector هو أحد كواشف المسرع FCC-ee



الشكل (12-I) : عرض الحدث في كاشف CLD



الشكل (11-I) : رسم تخطيطي للكاشف CLD

I-5-3-2- المصادم الكترون-هادرون (FCC-eh) :

يضيف المصادم FCC-eh تنوع برنامج البحث بالإضافة إلى الطاقة التي يوفرها شعاع البروتون والتي تصل إلى 50 Tev ، و توفير محتمل لحزمة إلكترونية بطاقة 60 Gev وهذا ما يؤدي لفتح آفاق جديدة لفيزياء الانتشار العميق غير المرن (diffusion) وسيكون هذا المصادم عبارة عن مصنع

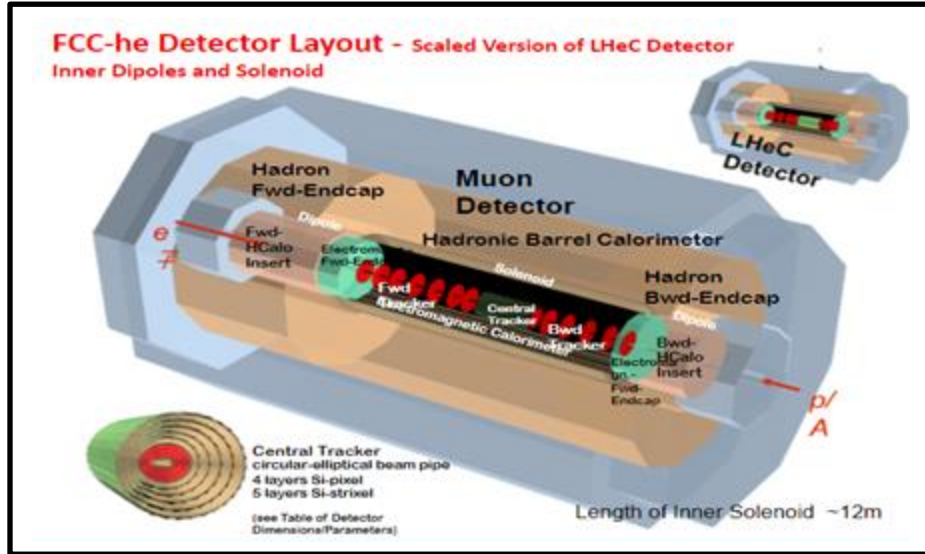
الفصل الاول : مدخل الى فيزياء الجسيمات الاولية و المصادمات

للـHiggs عالي الدقة مما يمكنه لإكتشاف جسيمات جديدة . وأيضاً دراسة تفاعلات الكواركات والغليونات.

Parameter (unit)	LHeC CDR	ep at HL-LHC	ep at HE-LHC	FCC-eh
E_p (TeV)	7	7	12.5	50
E_e (GeV)	60	60	60	60
\sqrt{s} (TeV)	1.3	1.3	1.7	3.5
Bunch spacing (ns)	25	25	25	25
Protons per bunch (10^{11})	1.7	2.2	2.5	1
$\gamma\epsilon_p$ (μm)	3.7	2	2.5	2.2
Electrons per bunch (10^9)	1	2.3	3.0	3.0
Electron current (mA)	6.4	15	20	20
IP beta function β_p^* (cm)	10	7	10	15
Hourglass factor $H_{g\text{com}}$	0.9	0.9	0.9	0.9
Pinch factor H_{b-b}	1.3	1.3	1.3	1.3
Proton filling H_{coll}	0.8	0.8	0.8	0.8
Luminosity ($10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1	8	12	15

الجدول (I-4) : الخصائص الأساسية المتعلقة بالكاشف FCC-eh ومقارنته بمصادمات مختلفة [10].

- كاشف FCC-eh :



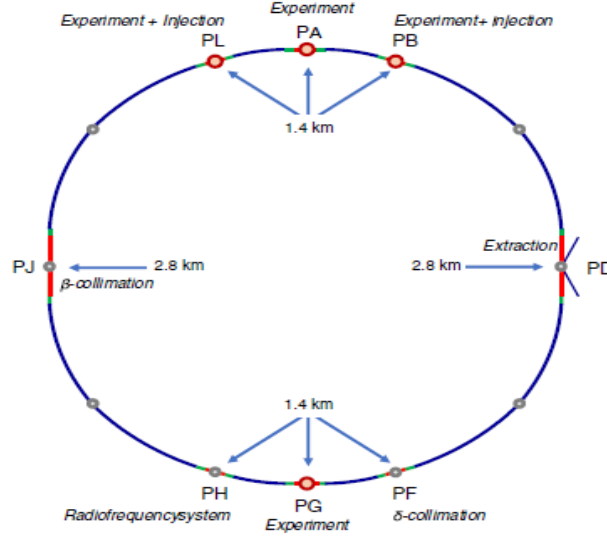
الشكل (I-13) : رسم تخطيطي للكاشف FCC-eh

I-3-3-5-3- المصادم هادرون-هادرون (FCC-hh) :

تم تصميم Future Circular Collider لرفع قيمة طاقة مركز الكتلة في تصادمات البروتون-بروتون الى غاية 100TeV مع إنارة تقارب $\sim 20 \text{ ab}^{-1}$ في كل من التجربتين الرئيسيتين (الكاشفين

الفصل الاول : مدخل الى فيزياء الجسيمات الاولية و المصادمات

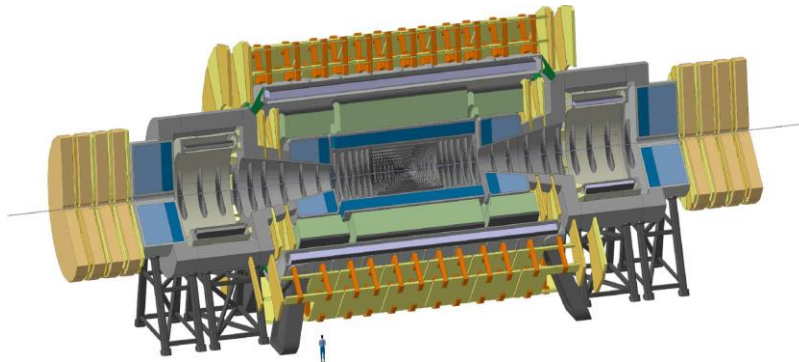
الرئيسيين) لمدة 25 عامًا من التشغيل. كما يوفر FCC-hh إمكانية اصطدام الأيونات بالبروتونات والأيونات بالأيونات [7].



الشكل (14-I): التصميم المفاهيمي لـ FCC-hh توجد التجريبتان الرئيسيتان في الموضعين PA و PG والتجارب الإضافية في الموضعين PL و PB، أنظمة تصادم موجودة في الموضعين PJ و PF على التوالي. يتم استخراج الحزمة في الموضع PD. نظام الترددات الراديوية والتغذية الرئيسية مدمجة في الموضع PH [10].

- كاشف FCC-hh :

يبلغ طول كاشف FCC-hh إجمالياً 50 m وقطره 20 m ، وملف لولبي بقطر 10 m وملفان لولبيان أماميان بقطر 5m .



الشكل (15-I): كاشف FCC-hh

6-I- الإنارة (Luminosity) :

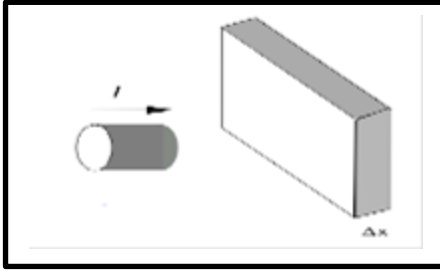
الإنارة هي خاصية تميز المسرعات وتصف الشدة اللحظية للحزمة ، حيث أن معدل الحوادث

$\frac{dR}{dt}$ يتناسب طرذا مع الإنارة \mathcal{L} ومع المقطع الفعال σ ، ويتم الحصول على الأحداث في

الثانية من خلال العلاقة التالية [11]:

$$\frac{dR}{dt} = \sigma \cdot \mathcal{L} \quad (15-I)$$

حيث كلما زادت قيمة الإنارة \mathcal{L} زاد عدد التصادمات ، ويتم التحكم في الإنارة من طرف المسرع أما المقطع الفعال فهو قياس لاحتمال حدوث التفاعل ويمكن إعتباره على أنه المساحة الفعالة المتوفرة لحدوث التفاعل من طرف هدف معين .



• في معلم المختبر:

تعرف الإنارة بالعلاقة التالية [11]:

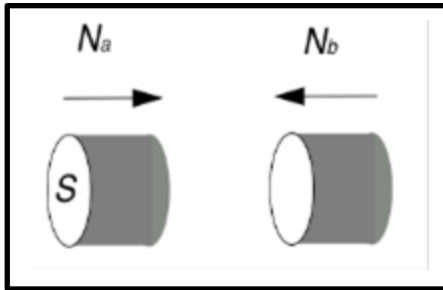
$$\mathcal{L} = nI = \rho \Delta x I \quad (16-I)$$

ρ : الكثافة السطحية ، n : الكثافة الحجمية

I : كثافة الحزمة ، Δx : السمك

• في معلم مركز الكتلة :

تعطى عبارة الإنارة في هذا المعلم ومن أجل حزمتين متصادمتين كآلاتي [11] :



$$\mathcal{L} = \frac{N_a N_b}{f S} \quad (17-I)$$

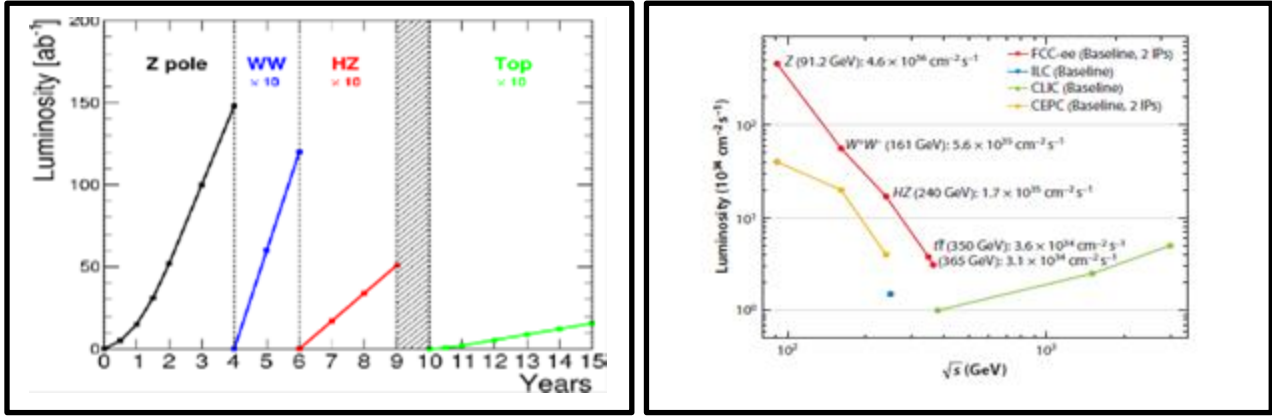
N_a و N_b : عدد جسيمات الحزمتين f : تردد الحزم

S : مساحة المقطع العرضي للحزمة

1-6-I- الانارة في المصادم FCC-hh :

سيوفر المصادم FCC-hh إنارة عالية قدرها $\mathcal{L} = 3 \times 10^{35} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ في المرحلة الأخيرة .

2-6-I- الانارة في المصادم FCC-ee :



الشكل (16-I) : دالة الإنارة (\mathcal{L}) للمصادم FCC-ee بدلالة الطاقة [7] (يمين) واعدادات تشغيل الإنارة للمصادم FCC-ee مع السنوات (يسار) [12].

حيث النقاط الحمراء في الشكل على اليمين تمثل الإنارة التي سيوفرها المصادم FCC-ee بدلالة طاقة مركز الكتل \sqrt{S} مقارنة مع مختلف المصادمات الأخرى .

الفصل الثاني

دراسة نظرية للتفاعل

$$e^+e^-$$

في المصادم FCC-ee

II - مقدمة:

نتيجة للاهتمام العالمي المتجدد بفيزياء e^+e^- وما يتعلق بها من إمكانات الاكتشاف منذ مراقبة بوزون هيغز في مصادم الهادرونات الكبير LHC ، للميزة الكبيرة التي يتميز بها هذا التفاعل لكونه - تفاعل نظيف إن صح التعبير - لأنه لا يتطلب الحسابات المعقدة التي يفرضها الكروموديناميك الكمي في التفاعل بروتون_بروتون ، وقد تطورت دراسة المحاكاة في هذا المجال بشكل كبير منذ عام 2013 ، لدراسة خصائص بوزون هيغز وجسيمات النموذج المعياري الأخرى (SM) بدقة غير مسبوقة [12].

II-1- تفاعل إفناء e^+e^- في المصادم FCC-ee:

ان النواتج الممكنة لإفناء e^+e^- هي فيرميون و فيرميون مضاد قد تكون عبارة عن زوج لبثوني او

كوارك وكوارك مضاد عبر وسيط الانتشار Z ، تعطى معادلات التفاعل عموما كالتالي:

$$e^+ + e^- \rightarrow Z \rightarrow f + \bar{f}$$

$$e^+ + e^- \rightarrow Z \rightarrow l + \bar{l}$$

$$e^+ + e^- \rightarrow Z \rightarrow q + \bar{q}$$

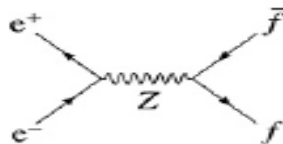
II-2- إنتاج البوزون Z في المصادم FCC-ee :

يعتبر البوزون Z المحايد كوسيط للقوة الضعيفة ، و بدونه سيكون تفاعل النوترينوات فيما بينها

مستحيلا . ومن ناحية أخرى ، فإن البوزون Z جسيم ثقيل وله عمر قصير ، ولذلك فان مدى تفاعله

قصير جدا . يمكن انتاج البوزون Z في الطاقات العالية ، اين يتحلل إلى زوج من الفيرميونات المشحونة

وفق التفاعل التالي :



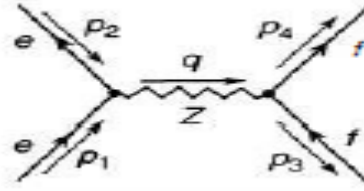
II-2-1- حساب المقطع الفعال لإفناء زوج لبتوني :

لكي نفهم بوضوح خصائص البوزون الشعاعي Z سنقوم بحساب المقطع الفعال لإفناء زوج لبتوني عن طريق البوزون Z كوسيط انتشار للتفاعل

$$e^+ + e^- \rightarrow Z \rightarrow f + \bar{f} \quad (1-II)$$

II-2-1-1- حساب سعة التفاعل :

لحساب السعة نستخدم قوانين فاينمان التي تسمح بكتابتها للتفاعل [13]:



حيث يمكن الاختلاف في قمة التفاعل للبوزون Z $\frac{-ig_Z}{2} \gamma^\mu (C_V^e - C_A^e \gamma^5)$ مع الجسيمات الأخرى ، ولأن في المجال الطاقوي يكون وسيط الانتشار Z ، السعة هي :

$$M = \bar{v}(p_2) \frac{-ig_Z}{2} \gamma^\mu (C_V^e - C_A^e \gamma^5) u(p_1) \frac{-i}{(q^2 - (M_Z C)^2)} \times (g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{(M_Z C)^2}) \bar{u}(p_4) \frac{-ig_Z}{2} \gamma^\nu (C_V^f - C_A^f \gamma^5) v(p_3) \quad (2-II)$$

- $u(p_1)$ سبينور لبتون وارد.
- $\bar{v}(p_2)$ سبينور مضاد لبتون وارد.
- $\bar{u}(p_4)$ سبينور مضاد لبتون صادر.
- $v(p_3)$ سبينور لبتون صادر.
- $\frac{-ig_Z}{2} \gamma^\nu (C_V^f - C_A^f \gamma^5)$ و $\frac{-ig_Z}{2} \gamma^\mu (C_V^e - C_A^e \gamma^5)$ قمتي التفاعل .

$$\bullet \frac{-i}{(q^2 - (M_Z c)^2)} \times (g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{(M_Z c)^2}) \text{ وسيط انتشار } Z.$$

ومنه :

$$M = -\frac{g_Z^2}{4[q^2 - (M_Z c)^2]} [\bar{v}(p_2)\gamma^\mu (c_V^e - c_A^e \gamma^5)u(p_1)] \times (g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{(M_Z c)^2}) [\bar{u}(p_4)\gamma^\nu (c_V^f - c_A^f \gamma^5)v(p_3)] \quad (3-II)$$

$$\text{حيث : } q = p_1 + p_2 = p_3 + p_4$$

بما أننا نعمل بالقرب من 90 GeV ، يمكننا أن نهمل كتل الفيرميونات المشاركة في التفاعل . في هذه

الحالة نهمل الحد $\frac{q_\mu q_\nu}{(M_Z c)^2}$ لأن الكتلة M_Z كبيرة مقارنة مع $q_\mu q_\nu$

ولدينا الحد :

$$\bar{u}(4)q(c_V - c_A \gamma^5)v(3)$$

مع

$$q = \not{p}_3 + \not{p}_4$$

$$\bar{u}(4)\not{p}_4 = 0$$

$$\not{p}_3 (c_V - c_A \gamma^5)v(3) = (c_V + c_A \gamma^5)\not{p}_3 v(3)$$

ومنه تصبح عبارة السعة :

$$M = -\frac{g_Z^2}{4[q^2 - (M_Z c)^2]} [\bar{v}(p_2)\gamma^\mu (c_V^e - c_A^e \gamma^5)u(p_1)] [\bar{u}(p_4)\gamma_\mu (c_V^f - c_A^f \gamma^5)v(p_3)] \quad (4-II)$$

$v(p), u(p)$ ثنائيات المغزل لديراك ، رمزه الأصلي $v(p), u(p)$

نحسب مربع السعة:

$$|M|^2 = MM^+ \quad (5-II)$$

إذن مرافق السعة:

$$M^+ = \left[-\frac{g_Z^2}{4[q^2 - (M_Z c)^2]} [\bar{v}(p_2)\gamma^\mu(c_V^e - c_A^e\gamma^5)u(p_1)][\bar{u}(p_4)\gamma_\mu(c_V^f - c_A^f\gamma^5)v(p_3)] \right]^+ \quad (6-II)$$

باستعمال خواص جبر *Clifford* التالية :

$$\bar{v}^+(p_2)\gamma^0 = v(p_2)$$

$$\gamma^0\gamma^{\mu+}\gamma^0 = \gamma^\mu$$

$$u^+(p_1)\gamma^0 = \bar{u}(p_1)$$

$$[\bar{v}(p_2)\gamma^\mu(c_V^e - c_A^e\gamma^5)u(p_1)]^+ = \bar{u}(p_1)\gamma^\mu(c_V^e - c_A^e\gamma^5)v(p_2) \quad (7-II)$$

$$v^+(p_3)\gamma^0 = \bar{v}(p_3)$$

$$\gamma^0\gamma^{v+}\gamma^0 = \gamma^v$$

$$\bar{u}^+(p_4)\gamma^0 = u(p_4)$$

$$[\bar{u}(p_4)\gamma^v(c_V^f - c_A^f\gamma^5)v(p_3)]^+ = \bar{v}(p_3)\gamma^v(c_V^f - c_A^f\gamma^5)u(p_4) \quad (8-II)$$

ومنه تصبح عبارة مرافق السعة كالآتي:

$$M^+ = -\frac{g_Z^2}{4[q^2 - (M_Z c)^2]} [\bar{u}(p_1)\gamma^v(c_V^e - c_A^e\gamma^5)v(p_2)][\bar{v}(p_3)\gamma_v(c_V^f - c_A^f\gamma^5)u(p_4)] \quad (9-II)$$

للتبسيط نقوم بإدخال الاثر تصبح عبارة مربع السعة :

$$|M|^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{g_Z^2}{q^2 - (M_Z c)^2} \right]^2 \text{Tr}[\gamma^\mu (C_V^e - C_A^e \gamma^5) \not{p}_1 \gamma^\nu (C_V^e - C_A^e \gamma^5) \not{p}_2] \quad (10-II)$$

$$\times \text{Tr}[\gamma_\mu (C_V^f - C_A^f \gamma^5) \not{p}_3 \gamma_\nu (C_V^f - C_A^f \gamma^5) \not{p}_4]$$

ولدينا عبارة الاثر الاول هي :

$$\text{Tr}[\gamma^\mu (C_V^e - C_A^e \gamma^5) \not{p}_1 \gamma^\nu (C_V^e - C_A^e \gamma^5) \not{p}_2] = (C_V^{e2} + C_A^{e2}) [p_1^\mu p_2^\nu + p_1^\nu p_2^\mu - g^{\mu\nu} p_1 p_2]$$

$$- 2i C_V^e C_A^e \varepsilon^{\mu\nu\lambda\sigma} p_{1\lambda} p_{2\sigma} \quad (11-II)$$

نعوض قيمة الاثر الاول والثاني في عبارة مربع السعة نجد :

$$|M|^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{g_Z^2}{q^2 - (M_Z c)^2} \right]^2 \left\{ [(C_V^e)^2 + (C_A^e)^2] [(C_V^f)^2 + (C_A^f)^2] \times [(p_1 p_3)(p_2 p_4) + (p_1 p_4)(p_2 p_3)] \right\}$$

$$+ 4 C_V^e C_A^e C_V^f C_A^f [(p_1 p_3)(p_2 p_4) - (p_1 p_4)(p_2 p_3)] \quad (12-II)$$

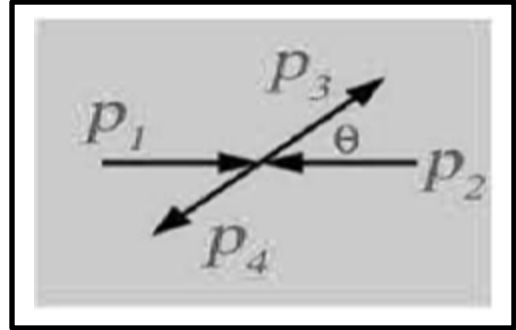
في نظام مركز الكتلة لدينا :

$$p_1 = (E, 0, 0, E) \quad (13-II)$$

$$p_2 = (E, 0, 0, -E) \quad (14-II)$$

$$p_3 = (E, E \sin \theta, 0, E \cos \theta) \quad (15-II)$$

$$p_4 = (E, -E \sin \theta, 0, -E \cos \theta) \quad (16-II)$$



نقوم بتعويض هذه القيم في عبارة مربع السعة (13-II) تصبح على الشكل التالي :

$$|M|^2 = \left[\frac{g_Z^2 E^2}{(2E)^2 - (M_Z c^2)^2} \right]^2 \left\{ [(C_V^e)^2 + (C_A^e)^2] [(C_V^f)^2 + (C_A^f)^2] (1 + \cos^2 \theta) \right\}$$

$$- 8 C_V^e C_A^e C_V^f C_A^f \cos \theta \quad (17-II)$$

II-2-1-2- حساب المقطع الفعال التفاضلي:

الفصل الثاني: دراسة نظرية للتفاعل e^+e^- في المصادم FCC-ee

من أجل حساب المقطع الفعال نستند لقاعدة فيرمي الذهبية والتي تعتبر جداء مربع السعة وفضاء الأطوار وتعطى عبارتها من الشكل التالي :

$$d\sigma = \frac{|M|^2}{F} d\varphi \quad (18-II)$$

مع

$$F = |v_1 - v_2| 2E_1^2 E_2^2 = 4\sqrt{(p_1 p_2)^2 + m_1^2 m_2^2} \quad (19-II)$$

$$E_1^2 E_2^2 = p_1^2 p_2^2 - m_1^4 m_2^4 \rightarrow E_1 E_2 = p_1 p_2 = \frac{\hat{s}}{2} \quad (20-II)$$

بالإضافة إلى فضاء الطور لجسيمين $d\varphi$ المعطى كالآتي:

$$d\varphi = (2\pi)^4 \delta^{(4)}(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) \frac{d^3 p_3}{(2\pi)^3 2E_3} \frac{d^3 p_4}{(2\pi)^3 2E_4} = \frac{d\cos\theta}{16\pi} \quad (21-II)$$

بذلك يمكن تعميم عبارة $d\sigma$ كما يلي:

$$d\sigma = (2\pi)^4 \delta^{(4)}(p_f - p_i) |v_1 - v_2| \frac{1}{2E_1 2E_2} \left(\prod_f \frac{d^3 p_f}{(2\pi)^3 2E_f} |M|^2 \right) \quad (22-II)$$

$$d\hat{\sigma} = \frac{1}{4E_1 E_2} |M|^2 d\varphi = \frac{1}{2\hat{s}} |M|^2 d\varphi \quad (23-II)$$

نقوم بحساب المقطع الفعال لتفاعلنا المدروس:

يمكننا تعويض قيمة مربع السعة وفضاء الطور للمعادلة فنجد عبارة المقطع الفعال التفاضلي :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2\hat{s}} \left[\frac{g_Z^2 E^2}{(2E)^2 - (M_Z c^2)^2} \right]^2 \left\{ \begin{aligned} & [(C_V^e)^2 + (C_A^e)^2] [(C_V^f)^2 + (C_A^f)^2] (1 + \cos^2\theta) \\ & - 8C_V^e C_A^e C_V^f C_A^f \cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (24-II)$$

ومنه :

$$d\hat{\sigma} = \left(\frac{\hbar c g_Z^2 E}{16\pi[(2E)^2 - (M_Z c^2)^2]} \right)^2 \left\{ [(c_V^e)^2 + (c_A^e)^2] [(c_V^f)^2 + (c_A^f)^2] (1 + \cos^2 \theta) - 8c_V^e c_A^e c_V^f c_A^f \cos \theta \right\} \times \frac{d\cos\theta}{16\pi} \quad (25-II)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\hbar c g_Z^2 E}{4[(2E)^2 - (M_Z c^2)^2]} \right)^2 \times \left\{ [(c_V^e)^2 + (c_A^e)^2] + [(c_V^f)^2 + (c_A^f)^2] \int_{-1}^{+1} (1 + \cos^2 \theta) d\cos\theta - 8c_V^e c_A^e c_V^f c_A^f \int_{-1}^{+1} \cos \theta d\cos\theta \right\} \quad (26-II)$$

ولدينا :

$$\int_{-1}^{+1} (1 + \cos^2 \theta) d\cos\theta = \frac{8}{3} \quad (27-II)$$

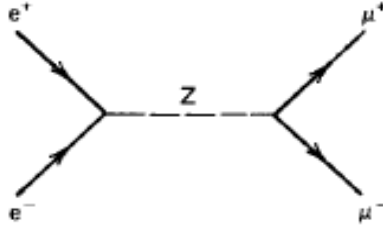
ومنه نتحصل على العبارة النهائية للمقطع الفعال:

$$\sigma = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\hbar c g_Z^2 E}{4[(2E)^2 - (M_Z c^2)^2]} \right)^2 [(c_V^e)^2 + (c_A^e)^2] [(c_V^f)^2 + (c_A^f)^2] \quad (28-II)$$

II-2-2- حساب المقطع الفعال للتفاعل $e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$:

يختلف الحساب في هذا التفاعل عن الحساب السابق في كون النواتج عبارة عن لبثونات وبالتالي سنأخذ بعين الاعتبار الاحتمال الخاص بالسبين ونهمل الاحتمال الخاص بالشحنة اللونية.

مخطط فينمان لهذا التفاعل هو :



لحساب السعة نستخدم قوانين فاينمان التي تسمح بكتابتها لهذا التفاعل [14] :

$$M = -\frac{g^2}{4\cos^2 W_\theta} [\bar{e}\gamma^\sigma (c_V^e - c_A^e \gamma^5) e] \times \left(g_{\sigma\nu} - \frac{q_\sigma q_\nu}{(M_Z c)^2} \right) [\bar{\mu} \gamma^\nu (c_V^f - c_A^f \gamma^5) \mu] \quad (29-II)$$

بإهمال كتل اللبتون ، و بوضع :

$$\frac{G}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_Z^2} \quad (30-II)$$

$$c_R \equiv c_V - c_A \quad (31-II)$$

$$c_L \equiv c_V + c_A \quad (32-II)$$

ايضا لدينا :

$$c_V - c_A \gamma^5 = (c_V - c_A) \frac{1}{2} (1 + \gamma^5) + (c_V + c_A) \frac{1}{2} (1 - \gamma^5) \quad (33-II)$$

تصبح عبارة السعة نكتب بالشكل :

$$M = \frac{-\sqrt{2}GM_Z^2}{s-M_Z^2} [c_R^e (\bar{e}_R \gamma^\nu e_R) + c_L^e (\bar{e}_L \gamma^\nu e_L)] [c_R^\mu (\bar{\mu}_R \gamma_\nu \mu_R) + c_L^\mu (\bar{\mu}_L \gamma_\nu \mu_L)] \quad (34-II)$$

ومنه يمكننا كتابة عبارة المقطع الفعال التفاضلي بالشكل :

$$\frac{d\sigma(e_L^- e_R^+ \rightarrow \mu_L^- \mu_R^+)}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s} (1 + \cos \theta)^2 |1 + r c_L^\mu c_L^e|^2, \quad (35-II)$$

$$\frac{d\sigma(e_L^- e_R^+ \rightarrow \mu_R^- \mu_L^+)}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s} (1 - \cos \theta)^2 |1 + r c_R^\mu c_L^e|^2$$

مع :

$$r = \frac{\sqrt{2}GM_Z^2}{s-M_Z^2+iM_Z\Gamma_Z} \left(\frac{s}{e^2} \right) \quad (36-II)$$

لحساب المقطع الفعال غير المستقطب لهذا التفاعل، يمكننا كتابة المقطع الفعال التفاضلي بالشكل :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s} [A_0(1 + \cos^2 \theta) + A_1 \cos \theta] \quad (37-II)$$

حيث :

$$\begin{aligned} A_0 &\equiv 1 + \frac{1}{2} \text{Re}(r)(c_L + c_R)^2 + \frac{1}{4} |r|^2 (c_L^2 + c_R^2)^2 \\ &= 1 + 2\text{Re}(r)c_V^2 + |r|^2 (c_V^2 + c_A^2)^2 \\ A_1 &\equiv \text{Re}(r)(c_L - c_R)^2 + \frac{1}{2} |r|^2 (c_L^2 - c_R^2)^2 \\ &= 4\text{Re}(r)c_A^2 + 8|r|^2 c_V^2 c_A^2 \end{aligned} \quad (38-II)$$

باستخدام نماذج الاقتران العيارية ($c_A = -\frac{1}{2}, c_V = -\frac{1}{2} + \sin^2 \theta_W \simeq 0$) وبمكاملة العبارة

نجد :

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{\alpha^2}{4s} \left(2\pi \frac{8}{3} A_0 \right) = \left(\frac{4\pi\alpha^2}{3s} \right) A_0 \equiv \sigma_0 A_0 \quad (39-II)$$

حيث :

$$\sigma_0 = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \quad (40-II)$$

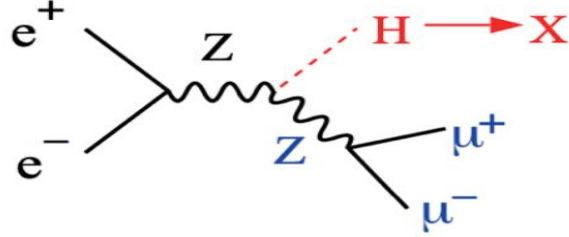
II -3- إنتاج بوزون هيغز في المصادم FCC-ee :

تم تصميم مصادم FCC-ee لإنتاج عدد كبير من بوزونات هيغز ومقارنتها بمجموعة بيانات

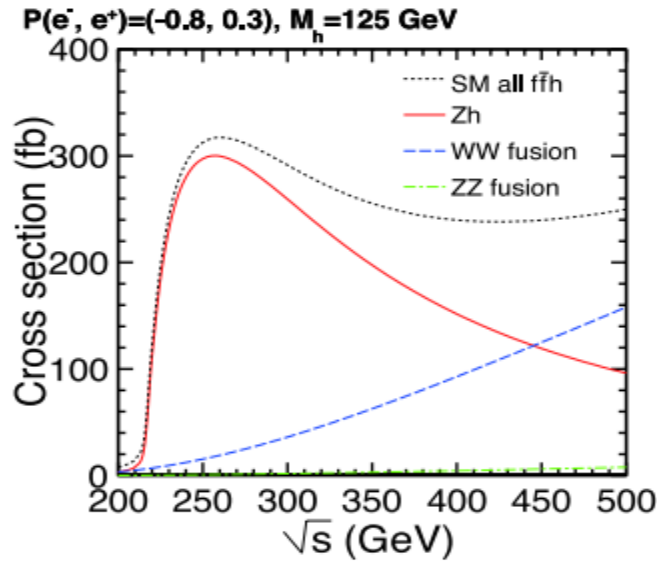
HL-LHC (High Luminosity HL) من اجل الحصول على دراسات تكميلية لمختلف أزواج

بوزون هيغز.

يمكن إنتاج هيغز في التفاعل e^+e^- بطاقة في حدود 250GeV فان ZH هي آلية الإنتاج المهيمنة والتفاعل الرئيسي لتحديد اقترانات الـ Higgs [15] كما هو موضح في الشكل :



يمكن التعرف على بوزون الهيغز بشكل مستقل في وضع الاضمحلال. وهذا يتيح قياس المقطع الفعال الشامل لـ Zh بنسبة 0.5-1% .



الشكل (II-1) : المقطع الفعال لإنتاج بوزون الهيغز بدلالة الطاقة [16].

II-4- أنماط الاضمحلال الأكثر حساسية لبوزون الهيغز:

بما أن بوزون الهيغز يتفاعل ويقترن بشدة مع الجسيمات الثقيلة فإن جميع قنوات إضمحلال بوزون الهيغز تتم عبر الجسيمات الثقيلة كما هو موضح في الشكل (II-2) ، يضمحل بوزون الهيغز إلى جسيمتين و بالمقارنة مع كتلة الهيغز وقانون انحفاظ الطاقة فان الاضمحلال الممكن سيكون عبارة عن زوج من

الكوارك القعري b ومضاده ، إلا أنه من الصعب جدا البحث عن الهيغز في التفاعلات التي تنتج أزواج الكوارك القعري b بسبب شيوع إنتاجه في المصادم ، لذلك يتم البحث عن الهيغز في الاحداث التي يتم فيها انتاج أزواج من البوزونات الضعيفة Z و W أو زوج من الكوارك القمي t يتم إفناؤه إلى زوج من الفوتونات عالي الطاقة دون ضرورة إلى ان تكون لهذه الجسيمات كتلتها المتوقعة ، بهذه الطريقة تم الكشف عن بوزون الهيغز عام 2012 .

لكن حساسية الكاشف إلى التفاعل تختلف من قناة إضمحلال الى أخرى ، علما أن الحساسية هي مقدار وضوح اشارة التفاعل الرئيسي مقارنة بالتفاعلات الثانوية التي تمثل الخلفية في التصادم ، من أجل اضمحلال بوزون الهيغز للنموذج المعياري والانماط الخمسة الاكثر حساسية في المجال ذو الكتل الصغيرة هي:

$$H \rightarrow \gamma\gamma \bullet$$

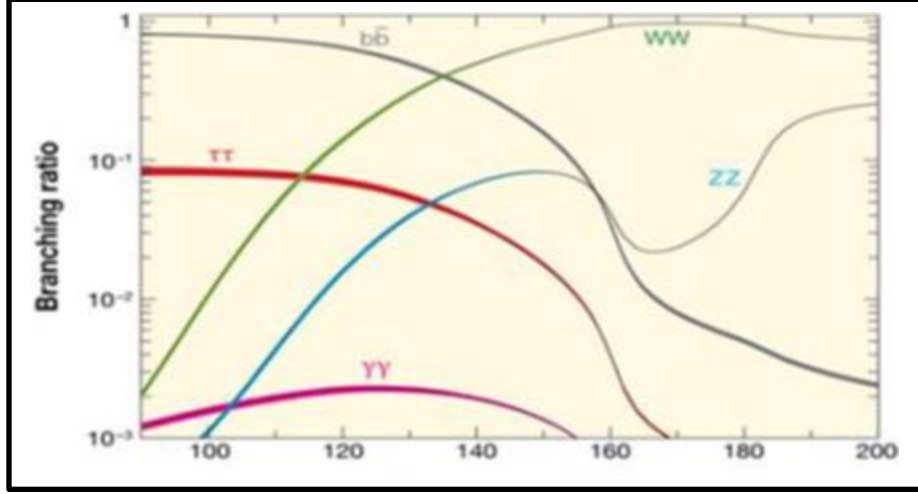
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell \bullet$$

$$H \rightarrow WW \rightarrow 2\ell 2\nu \bullet$$

$$H \rightarrow \tau\tau \bullet$$

$$H \rightarrow bb \bullet$$

حيث تتعلق الحساسية بالمقطع الفعال للإنتاج ، ومعدل التفرع للاضمحلال إلى الحالة النهائية المختارة ، وكفاءة اختيار الاشارة (the signal selection efficiency) ، ومقدار الكتلة (the mass resolution) ومستوى الخلفية النهائية . نلاحظ حسب الشكل (II-2) ان الانماط الاكثر حساسية هي ZZ و $\gamma\gamma$ ثم WW على الترتيب .



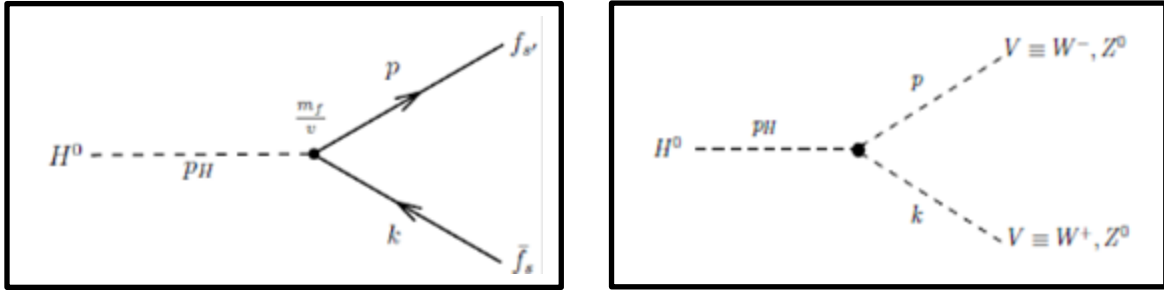
الشكل (II-2): تفرعات اضمحلال بوزون هيغز في النموذج المعياري

II-4-1 إضمحلال بوزون هيغز عند المستوى الشجري (tree level):

بوزون هيغز جسيم معياري يمكن ان يضمحل الى جسيمات ثانوية حسب الطاقة ، حيث قد يتحلل الى

زوج من البوزونات الضعيفة مباشرة و الى زوج من الفيرميونات ، وذلك عند المستوى الشجري

(tree level) [17].



الشكل (II-3): مخطط فينمان من اجل اضمحلال بوزون هيغز الى زوج من البوزونات الضعيفة (يمين) و الى فيرميون ومضاد الفيرميون (يسار) .

ويعطى معدل الاضمحلال الى البوزونات الضعيفة بـ [18] [19]:

$$\Gamma(H \rightarrow VV) = \frac{m_H^3}{32\pi v^2} \delta_V \sqrt{1 - 4 \frac{m_V^2}{m_H^2}} \left(1 - 4 \frac{m_V^2}{m_H^2} + 12 \frac{m_V^4}{m_H^4} \right) \quad (41-II)$$

حيث المعامل δ_V يساوي 1 من اجل Z ويساوي 2 من اجل W ويعطى معدل الاضمحلال الى الفيرميونات بـ [18] [19]:

$$\Gamma(H \rightarrow f\bar{f}) = N_C \frac{m_H m_f^2}{8\pi v^2} \left(\sqrt{1 - \frac{4m_f^2}{m_H^2}} \right)^3 \quad (42-II)$$

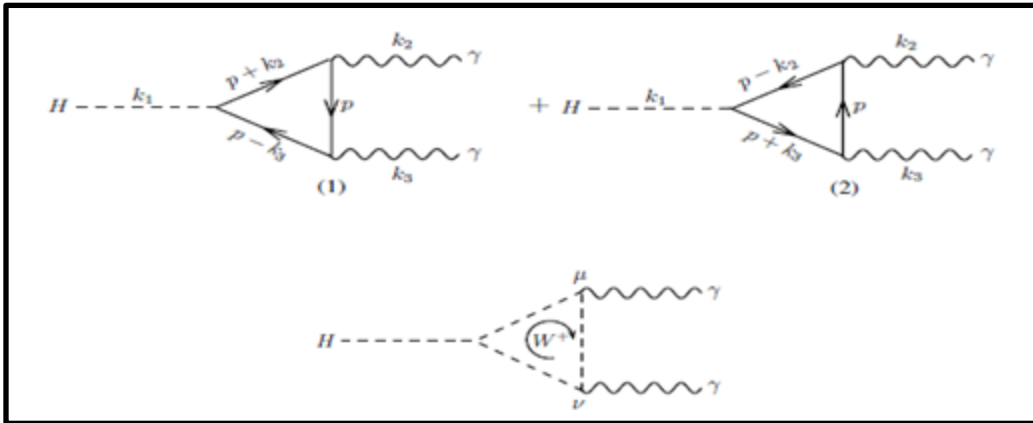
حيث N_C عدد الشحن اللونية يساوي 1 من أجل اللبتونات و 3 من أجل الكواركات .

II-4-2- إضمحلال بوزون الهيغز عبر حلقة واحدة (one loop):

في حين اضمحلال بوزون الهيغز بواسطة حلقة واحدة (one loop) يمكن ان يكون الى فوتونين او فوتون وبوزون Z او الى غليونين هذا ادى الى التنبؤ بمعدلات التفرع للاضمحلال لكي نختار القنوات الدالة على بوزون الهيغز بوضوح .

II-4-2-1 إضمحلال بوزون الهيغز إلى فوتونين :

في هذه الحالة يتم الاضمحلال عبر حلقتين ، الاولى بواسطة حلقة الفيرميونات ، والثانية بواسطة حلقة بوزونات W على الترتيب .



الشكل (II-4): مخطط فينمان من اجل إضمحلال بوزون الهيغز إلى فوتونين عبر حلقة الفيرميونات وعبر حلقة بوزونات W .

ويعطى معدل الاضمحلال الى فوتونين بالعبارة [18] [19]:

$$\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\alpha^2 m_H^2}{256 \pi^3 v^2} \left| \sum_f N_f Q_f^2 A_{1/2}^{\gamma\gamma}(\tau_f) + A_1^{\gamma\gamma}(\tau_W) \right|^2 \quad (43-II)$$

حيث :

N_f عدد الشحن اللونية للفيرميونات ، Q_f هي الشحنة الكهربائية للفيرميونات

أيضا $A_{1/2}^{\gamma\gamma}(\tau_f)$ و $A_1^{\gamma\gamma}(\tau_W)$ دوال الحلقة للبوزون W^\pm و الفيرميونات الثقيلة على الترتيب

$$A_1^{\gamma\gamma}(\tau_W) = -[2 + 3\tau_W + 3\tau_W(2 - \tau_W)f(\tau_W)] \quad (44-II)$$

$$A_{1/2}^{\gamma\gamma}(\tau_f) = 2\tau_f[1 + (1 - \tau_f)f(\tau_f)] \quad (45-II)$$

$$\tau_{f,W} = \frac{m_H^2}{4m_{f,W}^2} \quad \text{مع :}$$

$$f(\tau_f) = \begin{cases} \arcsin^2 \sqrt{\tau_f} & \tau_f \leq 1 \\ -\frac{1}{4} \left[\ln \frac{1-i\pi + \sqrt{1-\tau_f^{-1}}}{1-\tau_f^{-1}} + i\pi \right]^2 & \tau_f \geq 1 \end{cases} \quad (46-II)$$

تتميز قناة الاضمحلال هذه بكونها الاكثر وضوحا مقارنة بقنوات الاضمحلال

الاخري بسبب قلة الخلفية الناتجة عن اشعاعات كروموديناميك الكمي .

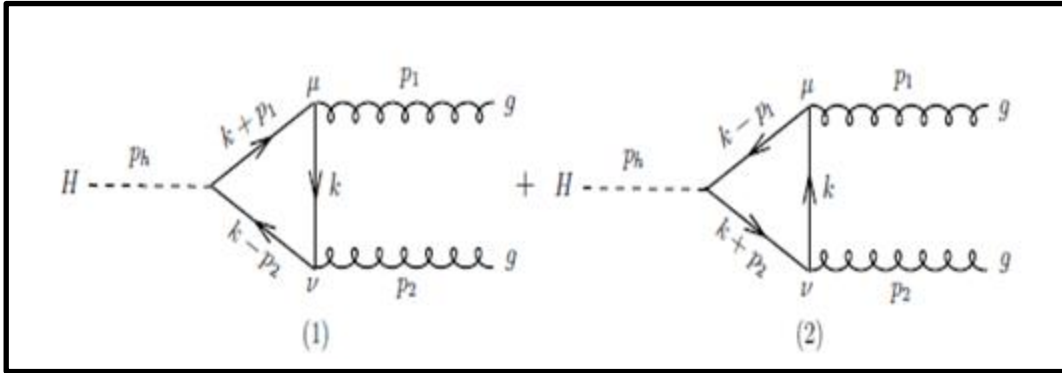
II-2-4-2 إضمحلال بوزون الهيغز إلى غليونين :

يكون هذا الاضمحلال فقط بواسطة حلقة الكواركات لا يمكن أن يتم مباشرة لان الغليونات عديمة

الكتلة ، هذا التفاعل لا يكون على المستوى الشجري ، لكن يجب أن يأخذ بعين الاعتبار بسبب أن كتلة

كوارك الـ top ثقيلة جدا .

أما الاضمحلال بواسطة حلقة اللبتونات لا يوجد لأنها عديمة الشحنة اللونية لكي تزوج مع الغليونات .



الشكل (5-II): مخطط فينمان من اجل اضمحلال بوزون الهيغز إلى غليونين .

ويعطى معدل الاضمحلال الى غلونين بالعبارة [18] [19]:

$$\Gamma(H \rightarrow gg) = \frac{1}{2m_H} |M_{(H \rightarrow gg)}|^2 \frac{1}{8\pi} = \frac{\alpha_s^2 m_H^3}{64\pi^2 v^2} \left| \frac{4}{3} \frac{2}{\tau_t} [\tau_t + (\tau_t - 1)f(\tau_t)] \right|^2 \quad (47-II)$$

حيث

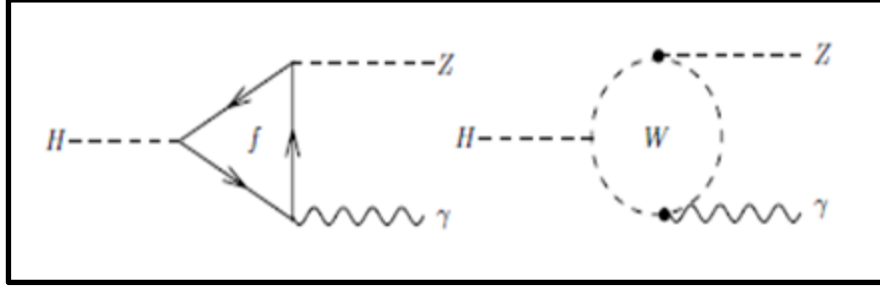
$$\tau_t = \frac{m_H^2}{4m_f^2}$$

$$f(\tau_t) = \begin{cases} \arcsin^2 \sqrt{\tau_t} & \tau_t \leq 1 \\ -\frac{1}{4} \left[\ln \frac{1-i\pi+\sqrt{1-\tau_t^{-1}}}{1-\tau_t^{-1}} - i\pi \right]^2 & \tau_t > 1 \end{cases} \quad (48-II)$$

II-4-2-3 إضمحلال بوزون الهيغز إلى فوتون وبوزون Z :

هذا الاضمحلال لا يمكن الا عبر حلقات ، يمكن توليدهما بواسطة حلقات تتضمن جسيمات ثقيلة

مشحونة كهربائيا ولونيا كي تزوج مع الهيغز



الشكل (II-6) : مخطط فينمان من اجل اضمحلال بوزون الهيغز إلى فوتون و بوزون Z.

و يعطى معدل الاضمحلال الى فوتون و بوزون Z [18] [19]:

$$\Gamma(H \rightarrow Z\gamma) = \frac{G_F^2 m_W^2 \alpha m_H^2}{64\pi} \left(1 - \frac{m_Z^2}{m_H^2}\right)^3 \left| \sum_f N_f \frac{Q_f \hat{v}_f}{c_W} A_{\frac{1}{2}}^H(\tau, \lambda) + A_1^H(\tau, \lambda) \right|^2 \quad (49-II)$$

حيث:

$$\tau_{f,W} = \frac{4m_{f,W}^2}{m_H^2} \quad \lambda_{f,W} = \frac{4m_{f,W}^2}{m_Z^2}$$

مع دوال الحلقات هي :

$$A_{1/2}^H(\tau, \lambda) = [I_1(\tau, \lambda) - I_2(\tau, \lambda)] \quad (50-II)$$

$$A_1^H(\tau, \lambda) = c_W \left\{ 4 \left(3 - \frac{s_W^2}{c_W^2} \right) I_2(\tau, \lambda) + \left[\left(1 + \frac{2}{\tau} \right) \frac{s_W^2}{c_W^2} - \left(5 + \frac{2}{\tau} \right) \right] I_1(\tau, \lambda) \right\} \quad (51-II)$$

$$I_1(\tau, \lambda) = \frac{\tau\lambda}{2(\tau-\lambda)} + \frac{\tau^2\lambda^2}{2(\tau-\lambda)} [f(\tau^{-1}) - f(\lambda^{-1})] + \frac{\tau^2\lambda}{2(\tau-\lambda)} [g(\tau^{-1}) - g(\lambda^{-1})] \quad (52-II)$$

$$I_2(\tau, \lambda) = -\frac{\lambda\lambda}{2(\tau-\lambda)} [f(\tau^{-1}) - f(\lambda^{-1})] \quad (53-II)$$

يمكن تلخيص انماط اضمحلال بوزون الهيغز في الجدول (II-1) التالي :

الفصل الثاني: دراسة نظرية للتفاعل e^+e^- في المصادم FCC-ee

Higgs boson Decay	Subsequent Decay	Sub-Channels	$\int L dt$ [fb ⁻¹]
2011 $\sqrt{s}=7$ TeV			
$H \rightarrow \gamma\gamma$	-	10 categories { $p_{Tl} \otimes \eta_\gamma \otimes \text{conversion}$ } \oplus {2-jet VBF}	4.8
$H \rightarrow ZZ^*$	4ℓ	{ $4e, 2e2\mu, 2\mu2e, 4\mu, 2\text{-jet VBF}, \ell\text{-tag}$ }	4.6
$H \rightarrow WW^*$	$\ell\nu\ell\nu$	{ $ee, e\mu, \mu e, \mu\mu$ } \otimes {0-jet, 1-jet, 2-jet VBF}	4.6
$VH \rightarrow Vbb$	$Z \rightarrow \nu\nu$	$E_T^{\text{miss}} \in \{120 - 160, 160 - 200, \geq 200 \text{ GeV}\} \otimes \{2\text{-jet, 3-jet}\}$	4.6
	$W \rightarrow \ell\nu$	$p_T^W \in \{< 50, 50 - 100, 100 - 150, 150 - 200, \geq 200 \text{ GeV}\}$	4.7
	$Z \rightarrow \ell\ell$	$p_T^Z \in \{< 50, 50 - 100, 100 - 150, 150 - 200, \geq 200 \text{ GeV}\}$	4.7
2012 $\sqrt{s}=8$ TeV			
$H \rightarrow \gamma\gamma$	-	14 categories: { $p_{Tl} \otimes \eta_\gamma \otimes \text{conversion}$ } \oplus {loose, tight 2-jet VBF} \oplus { $\ell\text{-tag}, E_T^{\text{miss}}\text{-tag}, 2\text{-jet VH}$ }	20.3
$H \rightarrow ZZ^*$	4ℓ	{ $4e, 2e2\mu, 2\mu2e, 4\mu, 2\text{-jet VBF}, \ell\text{-tag}$ }	20.3
$H \rightarrow WW^*$	$\ell\nu\ell\nu$	{ $ee, e\mu, \mu e, \mu\mu$ } \otimes {0-jet, 1-jet, 2-jet VBF}	20.3
$VH \rightarrow Vbb$	$Z \rightarrow \nu\nu$	$E_T^{\text{miss}} \in \{120 - 160, 160 - 200, \geq 200 \text{ GeV}\} \otimes \{2\text{-jet, 3-jet}\}$	20.3
	$W \rightarrow \ell\nu$	$p_T^W \in \{< 90, 90-120, 120-160, 160-200, \geq 200 \text{ GeV}\} \otimes \{2\text{-jet, 3-jet}\}$	20.3
	$Z \rightarrow \ell\ell$	$p_T^Z \in \{< 90, 90-120, 120-160, 160-200, \geq 200 \text{ GeV}\} \otimes \{2\text{-jet, 3-jet}\}$	20.3
$H \rightarrow \tau\tau$	$\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{lep}}$	{ $ee, e\mu, \mu\mu$ } \otimes {boosted, 2-jet VBF}	20.3
	$\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{had}}$	{ e, μ } \otimes {boosted, 2-jet VBF}	20.3
	$\tau_{\text{had}}\tau_{\text{had}}$	{boosted, 2-jet VBF}	20.3

الجدول (I-II): مقارنة اضمحلالات هيغز بدلالة التغير في الطاقة و في الانارة في المصادم LHC [20].

كان هذا عرضاً شاملاً عن قنوات اضمحلال واكتشاف بوزون هيغز ، إلا أنه بالعودة الى عام 2012 ومع القليل من البيانات ، لم يكن العلماء متأكدين من أن الجسيم المكتشف فعلاً هو بوزون هيغز ، إذ تم فقط التعرف على كتلته وخصائصه الكمية ، لكن من الضروري التأكيد من أن معدلات الاضمحلال هي نفسها التي تنبأ بها النموذج المعياري ، حيث لم يكن من الواضح أصلاً إن كان هناك جسيم هيغز واحد ، ربما هناك العديد منها (h, H, A, H^+, H) كما تنبأت بذلك نظرية التناظر الفائق Supersymetry ، وبذلك إذا تم العثور على أكثر من جسيم هيغز واحد كان دليلاً على صحة نظرية التناظر الفائق . منذ ذلك الوقت تلقى العلماء ما يقرب من عشرين ضعف من البيانات مقارنة بتلك التي تم بها إكتشاف بوزون هيغز ، ساعد هذا في قياس كتلة بوزون هيغز بدقة كبيرة ، القيمة الحالية للكتلة هي $125.25 \pm 0.17 \text{ GeV}$.

الفصل الثاني: دراسة نظرية للتفاعل e^+e^- في المصادم FCC-ee

كما تمت ملاحظة إضمحلال بوزون هيغز إلى جسيمات أخرى بما في ذلك إلى زوج من اللبتونات (μ و τ) وكذلك إلى أزواج من الكواركات القعرية b ، كما تتفق كل من النظرية والقياسات مع نظرية هيغز علاوة على ذلك لم يتم إكتشاف أي بوزونات هيغز إضافية .

تم إعادة تشغيل LHC في أبريل 2022 وسيتم تحليل المزيد من البيانات بعد فترة الايقاف لإجراءات الصيانة والتحديث، قبل أن يتم تشغيله عام 2026 للحصول على المزيد من البيانات ، وستكون فترة ايقاف أخرى تتبعها فترة تشغيل في عام 2038. اين سيتم انتاج زوج من بوزونات هيغز في المصادم ومحاولة فهم كيف يمنح بوزون هيغز الكتلة لبوزونات هيغز ، كما سيتم البحث عن أية إنحرافات عن التنبؤات النظرية وقياسات الدقة ، قبل أن يتم الانتقال فعليا إلى المصادم الدائري المستقبلي FCC .

الفصل الثالث

دراسة محاكاة للتفاعل

$$e^+e^-$$

في المصادم FCC-ee

III - مقدمة:

في هذا الفصل سنقوم بدراسة المقطع الفعال للتفاعل e^+e^- بدلالة الطاقة وطبيعة نواتج التفاعل عند المستوى الأدنى و الأعلى للطاقة باستخدام المحاكاة ببرنامج MadGraph5_aMC@NLO مشيرين بذلك الى البوزونات الشعاعية والهيغز في FCC .

III-1- دراسة محاكاة المقطع الفعال للتفاعل e^+e^- في المصادم المستقبلي FCC-ee عند المستوى الأدنى و الأعلى للطاقة :

سنقوم بمحاكاة التفاعل باستخدام برنامج MadGraph5_aMC@NLO الذي سيوافينا بدوره بالقيم الرقمية للتفاعل استنادا إلى معطيات تجريبية بالإضافة إلى مخططات فاينمان المحتملة مع مخططات بيانية تختص بالتفاعل e^+e^- ونتاج بوزون الهيغز والكوارك القمي .

الخطوات:

- تثبيت نظام Linux .

- تحميل و تثبيت برنامج MadGraph5_aMC@NLO

تم تحميله من صفحة الويب التالية:

[:https://launchpad.net/mg5amcnlo](https://launchpad.net/mg5amcnlo)

Installation

- Requirement: gcc & gfortran \geq 4.6, Python 2.7 or 3.7
- Setup/active suitable Python environment
`python --version`
- Download MG5_aMC at <https://launchpad.net/mg5amcnlo>
- If you use Python 2.6, download MG5_aMC_v2.7.3.tar.gz at <https://launchpad.net/mg5amcnlo/+download>
- Untar and cd MG5_aMC folder



III-1-2- طريقة Monte Carlo :

هي مجموعة من الخوارزميات الحسابية في الاحصاء الرياضي التي تتضمن تكرارا للتجربة بقيم ابتدائية عشوائية ، يتم تطبيق طريقة Monte Carlo في حل مشكلة يتخللها تعدد الاحتمالات عبر استخدام أعداد كبيرة أو وجود مسائل تعتمد على عدد ضخم من المجاهيل مثل حساب فضاء الطور والمقطع الفعال للتفاعل .

في هذا الفصل نستخدم طريقة Monte Carlo في توليد الحدث وذلك من خلال توزيع وتوليد أعداد عشوائية وفق نمط معين يعتمد طبيعة التفاعل والجسيمات المشاركة في التفاعل لحساب المقطع الفعال الكلي .

III-2- دراسات تطبيقية: المحاكاة Simulation و الحساب الرقمي للمقطع الفعال

باستخدام مولد الاحداث MadGraph :

فيما يلي سنقوم بدراسة محاكاة لقناة إنتاج هيغز و لبعض قنوات إضمحلاله و كذا إنتاج البوزون Z و زوج من الكوارك القمي وفقا للطاقات المسموح بها ، تم اختيار الطاقات حسب إعدادات المصادم FCC-ee كما هو موضح في الجدول (III-1) الذي يوضح مختلف طاقات الحزم للتصادم e^+e^- والاعدادات التقنية الاخرى للمصادم [7] .

	Z	WW	ZH	$t\bar{t}$	
Circumference (km)			97.756		
Bending radius (km)			10.76		
Free length to IP l^* (m)			2.2		
Solenoid field at IP (T)			2		
Full crossing angle at IP, θ (mrad)			30		
SR power per beam (MW)			50		
Beam energy (GeV)	45.6	80	120	175	182.5
Beam current (mA)	1,390	147	29	6.4	5.4
Bunches per beam	16,640	2,000	328	59	48
Average bunch spacing (ns)	19.6	163	994	2,763	3,396
Bunch population (10^{11})	1.7	1.5	1.8	2.2	2.3
Horizontal emittance, ϵ_x (nm)	0.27	0.84	0.63	1.34	1.46
Vertical emittance, ϵ_y (pm)	1.0	1.7	1.3	2.7	2.9
Horizontal β_x^* (m)	0.15	0.2	0.3	1.0	
Vertical β_y^* (mm)	0.8	1.0	1.0	1.6	
Energy spread in collision, σ_δ (%)	0.132	0.131	0.165	0.186	0.192
Bunch length in collision, σ_z (mm)	12.1	6.0	5.3	2.62	2.54
Piwiński angle (SR/BS), ϕ	8.2/28.5	3.5/7.0	3.4/5.8	0.8/1.1	0.8/1.0
Energy loss per turn (GeV)	0.036	0.34	1.72	7.8	9.2
RF frequency (MHz)	400			400/800	
RF voltage (GV)	0.1	0.75	2.0	4.0/5.4	4.0/6.9
Longitudinal damping time (turns)	1,273	236	70.3	23.1	20.4
Energy acceptance (DA) (%)	± 1.3	± 1.3	± 1.7	$-2.8, +2.4$	
Polarization time t_p (min)	15,000	900	120	18.0	14.6
Luminosity per IP ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	230	28	8.5	1.8	1.55
Vertical beam-beam parameter, ξ_y	0.133	0.113	0.118	0.128	0.126
Beam lifetime (min)	>200	>200	18	24	18

الجدول (III-1): اعدادات المصادم FCC-ee لمختلف طاقات الحزم والاعدادات التقنية [7]

III-2-1- تطبيقات عند المستوى الأدنى للطاقة :

باستعمال مولد الاحداث (MADGRAPH_5aMC_@LO) سنقوم فيما يلي بإجراء عمليات

حسابية للمقطع الفعال للتفاعل $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ [23]، ونقوم بدراسة مقارنة بين عدة حالات ممكنة ناتجة

عن تغيير بعض المعطيات الفيزيائية وتأثيرها على القياسات والاستنتاجات وفق الشروط :

- طاقة الحزم متغيرة ، عدد الاحداث المولدة هي 10000 حدث .

- نأخذ التفاعلات الاكتروديناميك الكمي عند الحد الأدنى للطاقة $QED=2$ واهمال التفاعلات

القوية $QCD=0$.

($QED=2$) ترمز الى عدد قيم الاقتران في التفاعل عند المستوى الأدنى للطاقة)

علما أنه يمكن تغيير كل المعطيات التجريبية من طاقة الحزم وكتل الجسيمات وعدد الاحداث في

بطاقات التشغيل كما هو موضح في الشكل التالي :

```

nawel.txt
~/Desktop/MGS_aMC_v2_7_3
1 generate e+ e- > z > MU+ MU-
2 output ee_z_mumu
3 display diagrams
4 launch
5 set ebeam1 120
6 set ebeam2 120
    
```

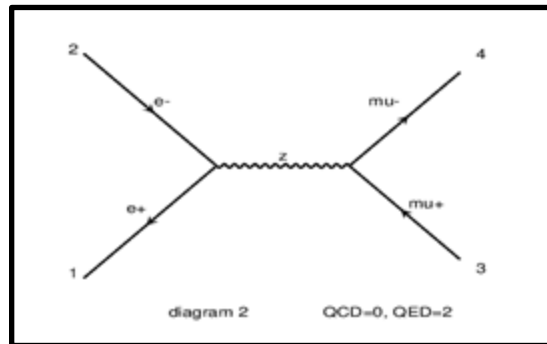
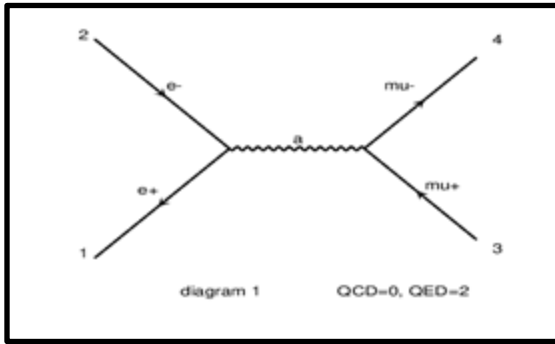
```

store_events
INFO: Storing parton level results
INFO: End Parton
reweight -from_cards
decay_events -from_cards
INFO: storing files of previous run
INFO: Done
quit
INFO:
more information in /home/nawel/Desktop/MGS_aMC_v2_7_3/ee_z_mumu/index.html
quit
nawel@Nawel:~/Desktop/MGS_aMC_v2_7_3$ ./bin/mg5_aMC nawel.txt
    
```

III-1-2-1- التطبيق الاول : دراسة التفاعل $e^+ + e^- \rightarrow Z/\gamma \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

نأخذ قيم الطاقة متغيرة بين 60Gev الى 130Gev ، في هذه الحالة سنقوم بدراسة مقارنة بين تفاعلين

نمثلها بمخططات فينمان كما هو موضح بالشكل (III-1) التالي :



الشكل (III-1): مخططات فينمان لإفناء e^+e^- عبر وسيط الانتشار γ و Z

يلخص الجدولين التاليين قيم المقاطع الفعالة و الخطأ الإحصائي للتفاعل المدروس .

التفاعل	الطاقة (Gev)	المقطع الفعال (Pb)	الخطأ الإحصائي (Pb)
$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$	60×60	6.32	± 0.00824
	70×70	4.64	± 0.00651
	80×80	3.55	± 0.0045
	90×90	2.80	± 0.00377
	100×100	2.27	± 0.00276
	110×110	1.87	± 0.00226
	120×120	1.58	± 0.00205
	130×130	1.34	± 0.00146
$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+\mu^-$	60×60	4.732	± 0.002219
	70×70	1.877	±0.0009521
	80×80	1.045	± 0.000506
	90×90	0.681	±0.0002829
	100×100	0.486	±0.0002191
	110×110	0.367	±0.0001621
	120×120	0.289	±0.0001244
	130×130	0.234	±0.0001066

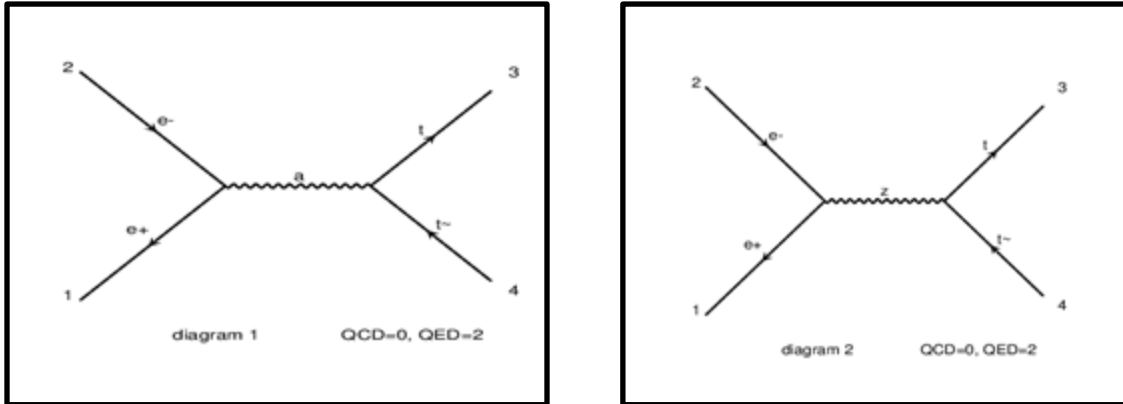
الجدول (III-2) : المقطع الفعال للتفاعل e^+e^- في الالكتروديناميك الكمي .

- الجدول يوضح تفاعل إفناء زوج لبتوني في الالكتروديناميك الكمي عبر وسيطي انتشار (Z, γ)
- من خلال النتائج نلاحظ ان المقطع الفعال لإفناء زوج لبتوني e^+e^- عبر وسيط الانتشار γ اكبر بكثير من المقطع الفعال لنفس التفاعل عبر الوسيط Z وذلك لكون التفاعل الثاني تفاعل ضعيف عبر وسيط تفاعل ذو كتلة كبيرة مما يتطلب طاقة اكبر واحتمال حدوث اقل وهذا ما يفسر اختلاف المقطع الفعال بين التفاعلين وعلاقته العكسية مع الطاقة .
- تناقص الخطأ الاحصائي يدل على تزايد دقة القياس وهو يتعلق عكسيا بتزايد الطاقة .

III-2-1-2- التطبيق الثاني : إنتاج الكوارك القمي $e^+ + e^- \rightarrow Z/\gamma \rightarrow t + \bar{t}$

ناخذ بعين الاعتبار كتلة الكوارك القمي $m_t = 173 \text{ GeV}$ و نأخذ قيم الطاقة متغيرة بين 175Gev الى 182.5 GeV .

في هذه الحالة يكون لدينا تفاعلين نمثلها بمخططات فينمان كما هو موضح بالشكل(III-2) التالي :



الشكل(III-2): مخططات فينمان لإنتاج الكوارك القمي للتفاعل e^+e^- عبر وسيط الانتشار γ و Z

يلخص الجدولين التاليين قيم المقاطع الفعالة و الخطأ الإحصائي للتفاعل المدروس .

التفاعل	الطاقة (Gev)	المقطع الفعال (Pb)	الخطأ الإحصائي (Pb)
$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow t\bar{t}$	175×175	0.0141	$\pm 6.6 \times 10^{-5}$
	182.5×182.5	0.0342	± 0.0001117
$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow t\bar{t}$	175×175	0.227	± 0.00092
	182.5×182.5	0.429	± 0.0008404

الجدول (III-3): المقطع الفعال لإنتاج زوج من الكوارك القمي للتفاعل e^+e^- في الالكتروديناميك الكمي .

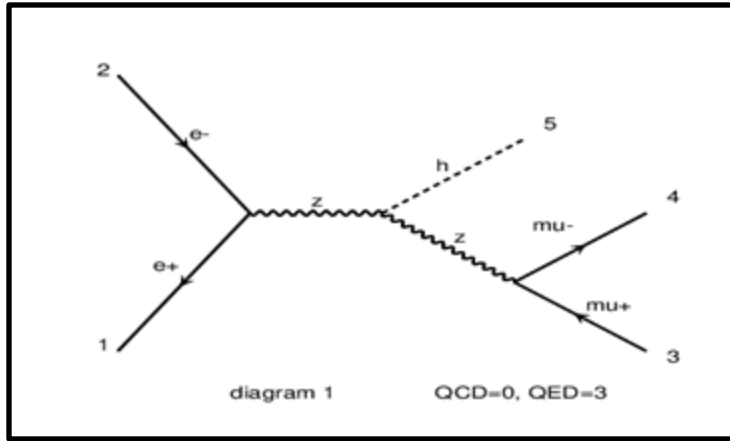
- نلاحظ ان التفاعل يحدث في حدود طاقة الحزم 175 Gev وهذا ما يوافق كتلة الكوارك القمي التي تم أخذها بعين الاعتبار ولا يمكن حدوثه في حدود اقل من هاته الطاقة .
- من خلال نتائج الجدول نلاحظ أن المقطع الفعال للتفاعل e^+e^- لإنتاج زوج من الكوارك القمي ضعيفة جدا ، والسبب في ذلك كتلة الكوارك القمي الثقيلة والتي تتطلب طاقة كبيرة جدا لإنتاجه .
- كما نلاحظ أن احتمال إنتاج زوج من الكوارك القمي عبر الوسيط γ اكبر من احتمال إنتاجه عبر الوسيط Z و يعود هذا اساسا الى كتلة وسيط الانتشار Z الثقيلة .

III-2-2- تطبيقات عند المستوى الاعلى للطاقة NLO:

III-2-2-1- التطبيق الثالث: إنتاج بوزون هيغز h $e^+ + e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+ + \mu^- h$

- عدد الأحداث المولدة ثابت 10000 ، قيم طاقة الحزم متغيرة .

في هذه الحالة يكون لدينا تفاعل واحد نمثله بمخطط فينمان كما هو موضح بالشكل (III-3) التالي :



الشكل (III-3): مخطط فينمان لإنتاج بوزون هيغز في التفاعل e^+e^-

يلخص الجدول التالي قيم المقاطع الفعالة و الخطأ الإحصائي للتفاعل المدروس .

file:///home/nawel/Desktop/MG5_aMC_v2_7_3/eezh_mm/crossx.html

Results in the sm for $e^+ e^- \rightarrow z \rightarrow \mu^+ \mu^- h$

Available Results

Run	Collider	Banner	Cross section (pb)	Events	Data	Output	Action
run_01	$e^+ e^-$ 120.0 x 120.0 GeV	tag_1	$0.007448 \pm 3.5e-05$	10000	parton madevent	LHE	remove run launch detector simulation
run_02	$e^+ e^-$ 130.0 x 130.0 GeV	tag_1	$0.007255 \pm 2.8e-05$	10000	parton madevent	LHE	remove run launch detector simulation
run_03	$e^+ e^-$ 140.0 x 140.0 GeV	tag_1	$0.006559 \pm 2.4e-05$	10000	parton madevent	LHE	remove run launch detector simulation
run_04	$e^+ e^-$ 150.0 x 150.0 GeV	tag_1	$0.005776 \pm 2e-05$	10000	parton madevent	LHE	remove run launch detector simulation
run_05	$e^+ e^-$ 160.0 x 160.0 GeV	tag_1	$0.005077 \pm 1.8e-05$	10000	parton madevent	LHE	remove run launch detector simulation
run_06	$e^+ e^-$ 170.0 x 170.0 GeV	tag_1	$0.004471 \pm 1.4e-05$	10000	parton madevent	LHE	remove run launch detector simulation
run_07	$e^+ e^-$ 180.0 x 180.0 GeV	tag_1	$0.003903 \pm 1e-05$	10000	parton madevent	LHE	remove run launch detector simulation
run_08	$e^+ e^-$ 1000.0 x 1000.0 GeV	tag_1	$7.196e-06 \pm 3.7e-08$	10000	parton madevent	LHE	remove run launch detector simulation

[Main Page](#)

الجدول (III-4): المقطع الفعال لإنتاج بوزون هيغز للتفاعل e^+e^- في الالكتروديناميك الكمي من خلال استخدام مولد

الحدث في MadGraph

- نلاحظ ان التفاعل يحدث في حدود طاقة الحزم 120 GeV وهي تمثل الحد الادنى اللازمة لانتاج بوزون الهيغز ولا يمكن حدوثه في حدود الطاقة اقل .
- نلاحظ أن قيمة المقطع الفعال لإنتاج بوزون الهيغز صغيرة جدا ، لان احتمال انتاج بوزون الهيغز ضعيف جدا .
- LHE (Les Houches accord) هي الملفات التي تخزن فيها بيانات التصادمات بين البوزيترون والالكترون في المصادم .

III-3- إضمحلال الهيغز عند المستوى الشجري إلى فيرميون ومضاد الفيرميون :

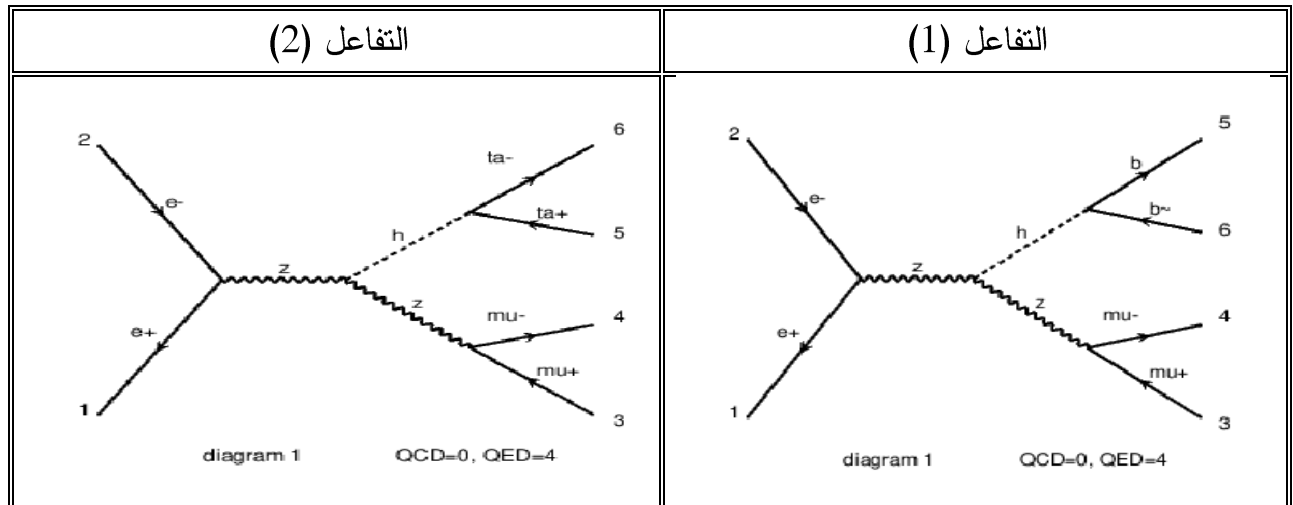
التطبيق الرابع :

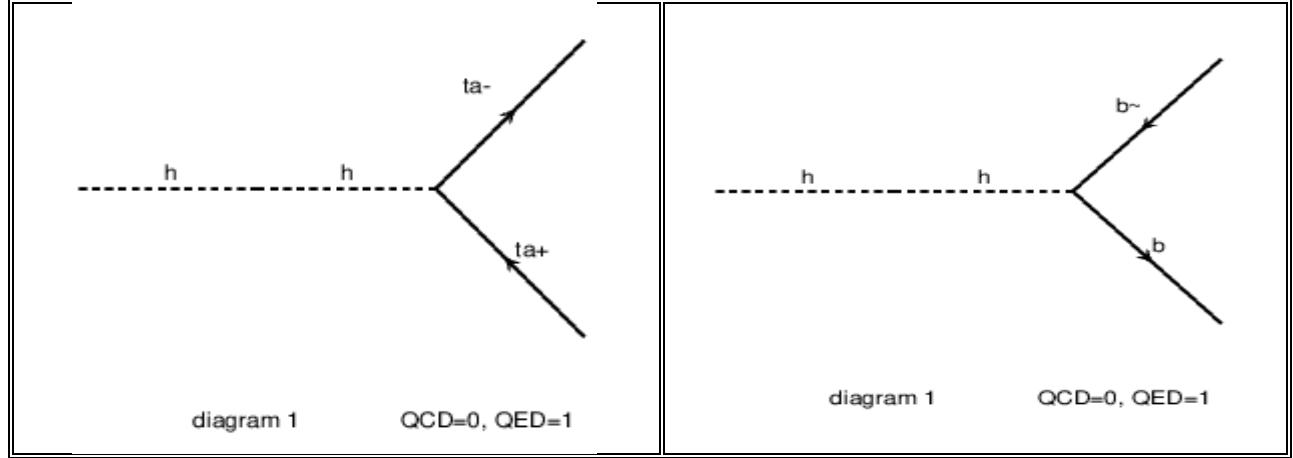
- دراسة التفاعل (1) $e^+e^- \rightarrow Zh$, $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$, $h \rightarrow b\bar{b}$

- دراسة التفاعل (2) $e^+e^- \rightarrow Zh$, $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$, $h \rightarrow \tau^+\tau^-$

- عدد الأحداث المولدة ثابت 10000 ، قيمة الطاقة متغيرة

- يمثل الجدولين التاليين مخططات فينمان لكل تفاعل:





الجدول (5-III): مخططات فينمان للتفاعلين (1) و (2)

يلخص الجدولين التاليين قيم المقاطع الفعالة و الخطأ الإحصائي للتفاعلين المدروسين .

التفاعل	الطاقة (Gev)	المقطع الفعال (Pb)	الخطأ الإحصائي (Pb)
(1) التفاعل $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ $h \rightarrow b \bar{b}$	90×90	1.09×10^{-7}	$\pm 4.9 \times 10^{-10}$
	100×100	5.833×10^{-5}	$\pm 2.4 \times 10^{-7}$
	110×110	0.003671	$\pm 1.5 \times 10^{-5}$
	120×120	0.006573	$\pm 2.7 \times 10^{-5}$
	130×130	0.006425	$\pm 9.6 \times 10^{-6}$
	140×140	0.00576	$\pm 1.4 \times 10^{-5}$
(2) التفاعل $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ $h \rightarrow \tau^+ \tau^-$	90×90	5.253×10^{-9}	$\pm 1.7 \times 10^{-11}$
	100×100	2.807×10^{-6}	$\pm 1.2 \times 10^{-8}$
	110×110	0.0001763	$\pm 6.6 \times 10^{-7}$
	120×120	0.0003155	$\pm 1.4 \times 10^{-6}$
	130×130	0.000308	$\pm 6.3 \times 10^{-7}$
	140×140	0.0002763	$\pm 6.9 \times 10^{-7}$

الجدول (6-III): المقطع الفعال لاضمحلال بوزون الهيغز عند المستوى الشجري إلى فيرميون ومضاد الفيرميون.

يمكن لبوزون الهيغز أن يضمحل في ثلاث مجالات طاقة مختلفة

- المجال ذو الكتل الصغيرة $100Gev \leq m_h \leq 130Gev$
- المجال ذو الكتل المتوسطة $130Gev \leq m_h \leq 180Gev$
- المجال ذو الكتل العالية $180Gev \leq m_h \leq 1Tev$

في هذه المحاكاة قمنا بدراسة إنحلال الهيغز عند المستوى الشجري إلى زوج لبتوني $(\tau^+\tau^-)$ و إلى زوج الكوارك $(b\bar{b})$ للتأكد من مجال الكتلة المسموح بها عند الكتل الصغيرة $80Gev \leq m_h \leq 130Gev$

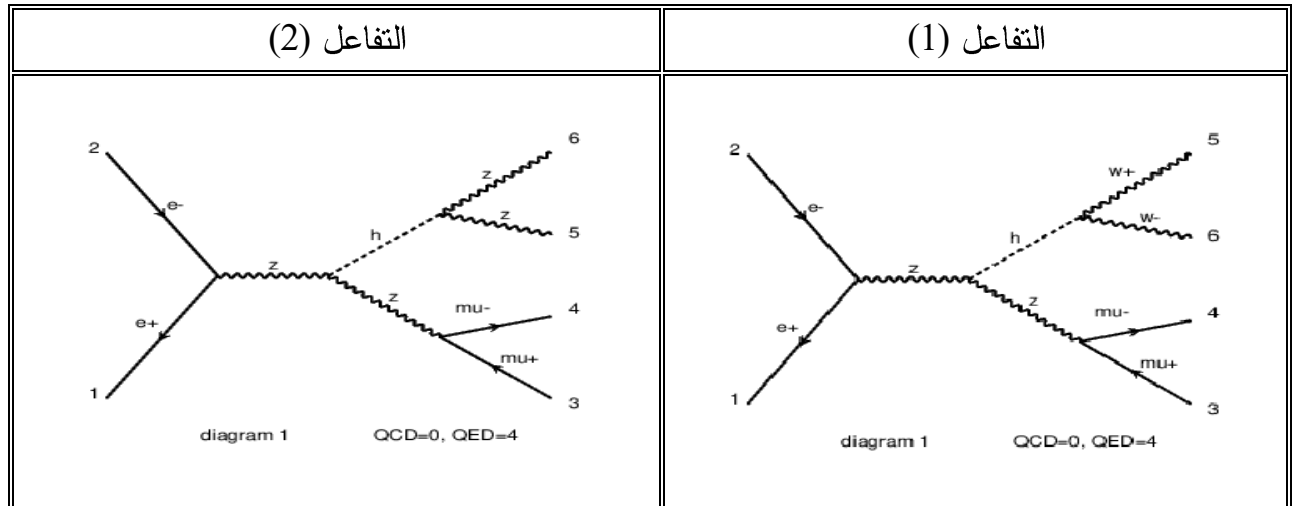
- لاحظنا أن العتبة هي $90Gev$ بالنسبة لطاقة كل حزمة لأنه عند أقل من الطاقة $90Gev$ لا يوجد إضمحلال .

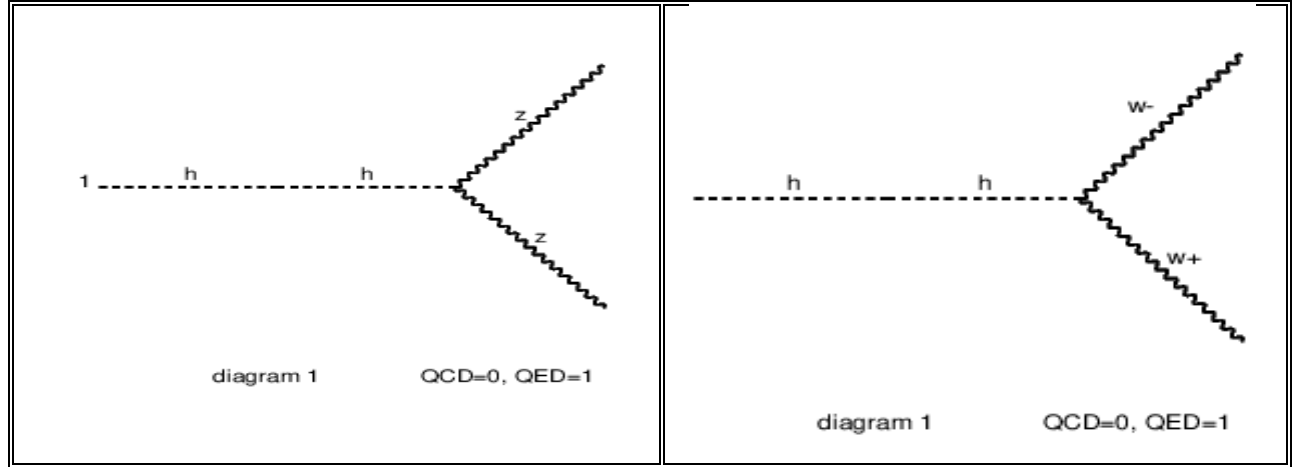
- كما لاحظنا أنه بالنسبة للعتبة العليا لا يوجد إضمحلال .

- كما أن قيمة المقطع الفعال تكون أكثر وضوحا في منتصف المجال $120 Gev$.

نستنتج أنه يوجد توافق تام بخصوص إضمحلال الهيغز عند المستوى الشجري الذي تم التطرق إليه في الفصل الثاني .

- يمثل الجدولين التاليين مخططات فينمان لاضمحلال بوزون الهيغز الى البوزونات الضعيفة:





الجدول (III-7): مخططات فينمان لاضمحلال بوزون هيغز الى البوزونات الضعيفة .

• يمثل الجدولين التاليين مخططات فينمان لاضمحلال بوزون هيغز الى البوزونات الضعيفة عند

المستوى الشجري من خلال استخدام مولد الحدث MadGraph

خاتمة :

في ختام عملنا القائم أساسا على دراسة تصادم إلكترون- بوزيترون وإنتاج بوزون هيغز والكوارك القمي ، حيث تم من خلالها دراسة تفاعل e^+e^- نظريا ثم محاكاته في المستويين الأدنى والأعلى للطاقة باستخدام برنامج MadGraph الذي أبدى فعاليته الكبيرة في إفادتنا بمخططات فينمان والقيم الرقمية للمقاطع الفعالة لمختلف التفاعلات وغيرها من المعلومات المهمة الذي يحويها هذا البرنامج الرقمي ، ثم قمنا بدراستين نظرية ومحاكاة مع التحكم في المعطيات الفيزيائية وفقا لشروط النظرية ، حيث تحصلنا على الاستنتاجات التالية :

الدور الفعال لتفاعل e^+e^- في فيزياء الجسيمات بشكل عام ، حيث سيتم من خلاله إنتاج وقياس خصائص الجسيمات Z و W والـ Higgs والكوارك القمي بدقة متزايدة ، يمكن أن توفر ادلة ملموسة على فيزياء جديدة ما بعد النموذج المعياري . أيضا قمنا بدراسة الكوارك القمي من خلال آلية إنتاجه في التفاعل e^+e^- عبر وسيطي الانتشار γ و Z وحساب المقطع الفعال حسابيا باستخدام مولد الحدث MadGraph .

كما قمنا بدراسة إنتاج بوزون هيغز للتفاعل e^+e^- عبر وسيط التفاعلات المحايد Z . وفي دراستنا لإضمحلال بوزون هيغز عند المستوى الشجري الى فيرميون ومضاد الفيرميون باستخدام مولد الحدث MadGraph وجدنا ان نتائج هذا الإضمحلال يتوافق الى حد كبير مع مجال الكتل المسموح بها . ومن خلال مناقشة نتائج المقطع الفعال لإضمحلال هيغز عند المستوى الشجري الى البوزونات الضعيفة Z و W التي أفادنا بها البرنامج تمكنا من معرفة غياب حساب المقطع الفعال للإضمحلال ، ويعود هذا إلى عدم توفر بيانات حقيقة لهذا التفاعل.

- [1] Julia Woithe, Gerfried J Wiener, Frederik F Van der Veken, *Let's have a coffee with the Standard Model of particle physics!* , OPEN ACCESS. *Phys. Educ.* 52(2017)034001 (9pp).
- [2] P. Aurenche , J.ph. Guillet ,E.Pilon , *QED , QCD en pratique* , HAL , Id : cel-01440544 , [https : // cel . archiver-ouvertes.fr/cel01440544v2](https://cel.archiver-ouvertes.fr/cel01440544v2),28NOV2018
- [3] Michael E. Peskin; Daniel V. Schroeder, *an introduction to Quantum Field Theory*, Westview Press (October 2, 1995).
- [4] Helmut Wiedemann ,*Particle Accelerator Physics, Fourth Edition*, Springer, 2015 corrected publication 2019, pages (3,7) .
- [5] فرانك كلوس ، ترجمة محمد فتحي خضر ، فيزياء الجسيمات ، مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة ، 2014 ، الصفحة 56 .
- [6] L. Marleau, *Introduction à la physique des particules* , Département de physique ,de génie physique et d'optique, Université Laval, Québec, Canada, pages(94,105,824) .
- [7] M. Benedikt, et al , *Annual Review of Nuclear and Particle Science* , *Future Circular Colliders* , *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2019.69:389-415.
www.annualreviews.org , Access provided by 105.108.157.29 on 04/23/21.
- [8] Oide K, et al. *Phys. Rev. Accel. Beams* 19:111005 (2016).
- [9] Michael Benedikt, Alain Blondel , Patrick Janot , Michelangelo Mangano and Frank Zimmermann , *Future Circular Colliders succeeding the LHC* , *PERSPECTIVEFOUCS*, April 2020 , www.nature.com/naturephysics
- [10] A. Abada et al, *FCC-hh: The Hadron Collider Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 3*, *Eur.Phys.J.Special Topics* 288, 755-1107 (2019).
- [11] *Cour Détecteurs et Accélérateurs, Master 2* ,E.Redouane-Salah, Université M'sila.

- [12] A. Abada et al, *FCC-ee: The Lepton Collider Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 2* , *Eur.Phys.J.Special Topics* 288, 755-1107 (2019).
- [13] David Griffiths, *Introduction to elementary particles* , John Wiley and Sons ,1987.
- [14] F. Halzen, A.D. Martin, *Quarks & Leptons*, Wiley, New York, 1984.
- [15] J.Yan , S.Watanuki , K.Fujii , A.Ishikawa , D. Jeans, J. Strube , J. Tian , H.Yamamoto , *Measurement of the Higgs boson mass and $e^+ e^- \rightarrow ZH$ cross section using $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ and $Z \rightarrow e^+ e^-$ at the ILC* , *arXiv :1604.07524v3 [hep-xe]*28 Apr 2021.
- [16] Ties Behnke et al, “*The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary*,” (2013) , *arXiv:1306.6327 [physics.acc-ph]*.
- [17] Le Quilleuc, Eloi. *Etude de la production de boson de Higgs en association avec une paire de quarks top-antitop dans l'expérience ATLAS*. No.2017SACLS205 , 2017.
- [18] Abdelhak DJOUADI, *The Anatomy of Electro–Weak Symmetry Breaking, Tome I: The Higgs boson in the Standard Model*, 2005, [[arXiv:hep-ph/0503172v2](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0503172v2)]
- [19] Victor Ilisie, *S.M. Higgs Decay and Production Channels*, *Trabajo Fin de Master 2010 - 2011*.
- [20] M. David Delgove , *Mesure des propriétés du boson de Higgs avec l'expérience ATLAS au LHC* , *ECOLE DOCTORALE N° 576* , 05 octobre 2016.
- [21] Tor Djarv et al, *LHC, the Higgs particle and physics beyond the Standard. Models*, *Bachelor Thesis, Chalmers University of echnology*,2014.
- [22] Emily Smith, *Guide to Installing and Using MadGraph*, *Undergraduate Researcher Department of Physics and Astronomy The University of Kansas*,2016
- [23] Yi-Ming Zhong (KICP, UChicago), *Hands-on Start to MadGraph* , *1st Workshop on New Light Physics and Photon-beam Experiments*, 03/08/2021.

ملخص :

في هذا العمل قمنا بدراسة ظواهرية للتفاعل e^+e^- في المصادم المستقبلي FCC ، باستخدام طرق حسابية تحليلية و طرق حسابية رقمية Monte Carlo عن طريق مولد الحدث MadGraph ، واكتشاف أهميته في فهم فيزياء النموذج المعياري وتفاعلات الالكتروديناميك الكمي ، قمنا بدراسة امكانيات انتاج الجسيمات الاولية الثقيلة مثل بوزون الهيغز، و بوزون Z ، عند الطاقات التي يوفرها المصادم المستقبلي FCC .

الكلمات المفتاحية : التفاعل e^+e^- ، المصادم FCC ، النموذج المعياري،النمذجة Monte Carlo ، مولد الحدث، MadGraph، الكتروديناميك الكمي ، بوزون الهيغز، بوزون Z .

Abstract:

In this work , we studied the phenomenology of the e^+e^- interaction in the Future Circular Collider FCC, using analytical and computational methods such as Monte Carlo numerical method via the MadGraph event generator, and discover importance in understanding the physics of the Standard Model and Quantum Electrodynamics interactions, we studied the possibilities of producing heavy elementary particles such as The Higgs boson and the Z boson at the energies provided by the FCC.

Key words : e^+e^- interaction, FCC, Standard Model , Monte Carlo modeling , event generator , MadGraph , quantum electrodynamics , Higgs boson , Z boson.