

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد بوضياف - المسيلة



ميدان: علوم المادة

فرع: الفيزياء.

تخصص: فيزياء نظرية

كلية: العلوم.

قسم: الفيزياء.

رقم: Ph Th 03/2019

مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماستر أكاديمي

إعداد الطالبتين: - بحاش صليحة

- طالب أمينة

تحت عنوان

دراسة إنتاج زوج من الكوارك القمي

في تصادم بروتون-بروتون (PP)

تمت المناقشة يوم 2019/ 07 / 01 أمام اللجنة المكونة من:

رئيسا	أستاذ محاضر جامعة المسيلة	ك. بوفراش
مشرفة و مقررة	أستاذة محاضرة جامعة المسيلة	أ. رضوان- صالح
مناقشة	أستاذة محاضرة جامعة المسيلة	س. نحاوة
مناقشا	أستاذ محاضر جامعة المسيلة	ع. مطاطلة

السنة الجامعية: 2019/2018

الشكر والعرفان

الحمد و الشكر لله لإتمام هذه الذكره، لا يسعنا في هذا المقام العامي إلا أن نتقدم

بمخالص الشكر و العرفان إلى الوالدين الكريمين و العائلة الفاضلة

و إلى الأستاذة المشرفة (أ.رضوان .صالح)

و السادة (بوفراش كريم- نحاوة سمرا- رطاطلة عبود) على قبولهم مناقشة الذكره

و إلى كل من عامنا بدوا بجمعنا

و إلى كل من في ذاكرتنا و لم تسعهم مذكرتنا

الإهداء

نهدي هذا العمل المتواضع إلى الوالدين

الكريمين

حفظهما الله.

الفهرس

الشكر والعرفان

الإهداء

الفهرس

01	.....	مقدمة عامة
		الفصل الأول: مدخل إلى فيزياء الجسيمات الأولية والمسرعات
03	.....	I - مقدمة
03	.....	I-1-الجانب النظري
03	.....	I-1-1-النموذج المعياري و الجسيمات الأولية
04	.....	I-1-2-الكروموديناميك الكمي(QCD)
04	.....	I-1-2-1- لاغرانج
05	.....	I-2-2-1- ظاهرة الحبس
05	.....	I-3-2-1- الحرية المقاربة
06	.....	I-4-2-1- ثابت الاقتران
06	.....	I-3-1- نموذج البارتون
07	.....	I-1-3-1- دوال توزيع البارتون
08	.....	I-2-الجانب التجريبي
08	.....	I-1-2-مقدمة
09	.....	I-2-2-1- حدود تجارب فيزياء الجسيمات الأولية
09	.....	I-3-2-1- تصنيف تجارب فيزياء الجسيمات
10	.....	I-4-2-1- المسرعات والمصادمات
10	.....	I-1-4-2-1- مبدأ التسريع
11	.....	I-2-4-2-1- أنواع المسرعات
11	.....	I-1-2-4-2-1- المسرع الخطي
12	.....	I-2-2-4-2-1- المسرعات الدورانية
13	.....	I-5-2-1- مصادم الهدرونات الكبير LHC
14	.....	I-6-2-1- الكواشف
15	.....	I-1-6-2-1- كاشف ATLAS
16	.....	I-2-6-2-1- كاشف CMS
16	.....	I-3-6-2-1- كاشف LHCb
16	.....	I-4-6-2-1- كاشف ALICE
17	.....	I-7-2-1- الإنارة

الفصل الثاني: فيزياء الكوارك القمي

- 19.....II-المقدمة
- 19.....II-1- اكتشاف الكوارك القمي
- 19.....II-2- إنتاج الكوارك القمي
- 19.....II-2-1- تصادم بروتون _ ضد بروتون Tevatron
- 19.....II-2-2- تصادم بروتون _ بروتون LHC
- 21.....II-3- اضمحلال الكوارك القمي
- 22.....II-4- المقطع الفعال للتفاعل pp و $p\bar{p}$
- 23.....II-5- حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي

الفصل الثالث: الكوارك القمي وعلاقته ببوزون هيغز

- 35.....III-المقدمة
- 35.....III-1- إنتاج بوزون هيغز في مصادم الهادرونات الكبير وعلاقته بالكوارك القمي
- 36.....III-2- اضمحلال بوزون هيغز
- 37.....III-3- إنبعاثات الكروموديناميك الكمي
- 37.....III-1-3- الإنبعاثات الحقيقية
- 38.....III-2-3- الإنبعاثات الافتراضية
- 38.....III-1-2-3- إعادة التقنين Renormalization
- 38.....III-2-2-3- إعادة التسوية Regularization Dimensionnel
- 38.....III-4- حساب المقطع الفعال لإنتاج بوزون هيغز

الفصل الرابع: الحساب الرقمي ومحاكاة المقطع الفعال

- 49.....IV- المقدمة
- 49.....IV-1- برنامج Mad Graph
- 94.....IV-2- طريقة Monte carlo
- 51.....IV-3- دراسات تطبيقية: المحاكاة simulation والحساب الرقمي للمقطع الفعال باستخدام مولد الحدث Mad Graph
- 51.....IV-1-3- تطبيقات عند المستوى الأدنى للطاقة
- 51.....IV-1-1-3- إسهامات الغلوونات والكواركات لإنتاج زوج من الكوارك القمي
- 53.....IV-2-1-3- إسهامات التفاعلات الفرعية للحالتين $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ و $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$
- 53.....IV-3-1-3- مساهمة الكوارك القمي (bottom) في حساب المقطع الفعال
- 54.....IV-4-1-3- حساب المقطع الفعال بدلالة كتلة الكوارك القمي
- 55.....IV-5-1-3- حساب المقطع الفعال لإنتاج الكوارك القمي في حالة التفاعل الكهروديناميكي
- 57.....IV-6-1-3- حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي في حالة التفاعلات القوية والكهروديناميكية
- 59.....IV-7-1-3- قنوات اضمحلال الكوارك القمي

61.....	IV-3-2- تطبيقات عند المستوى الأعلى للطاقة
61.....	IV-3-2-1- إنتاج بوزون الهيغز عن طريق حلقة كوارك القمي عبر انصهار الغلونات
62.....	IV-3-2-2- تطبيقات إنتاج الكوارك القمي لدراسة الكتلة اللاتغايرية للبوزون W و الكوارك القمي
66.....	الخاتمة
68.....	الملحق
69.....	قائمة المصادر والمراجع
	الملخص

قائمة الأشكال :

الصفحة	عنوان الشكل
03	الشكل (1-I): الجسيمات الأولية
06	الشكل (2-I): مختلف القياسات ل α_s بدلالة Q^2
07	الشكل (3-I): مخطط فينمان للانتشار العميق غير المرين إلكترون-بروتون .
08	الشكل (4-I): مخطط فينمان تصادم غلوونين في النموذج البرتوني
09	الشكل (5-I): مسرع هدف ثابت (يسار) ومصادم (يمين)
12	الشكل (6-I): شكل تخطيطي للمسرّع الخطي (LINAC)
12	الشكل (7-I): مسرع السيكلوترون والمسار الحلزوني الذي ترسمه الجسيمات فيه
13	الشكل (8-I): المسرع الدوراني التزامني
13	الشكل (9-I): نظرة عامة حول أجزاء مصادم الهادرون الكبير <i>LHC</i>
14	الشكل (10-I): الحقن داخل سلسلة المسرعات
15	الشكل (11-I): كاشف ATLAS
15	الشكل (12-I): مقطع عرضي لطبقات كاشف اطلس (ATLAS).
16	الشكل (13-I): كاشف CMS
16	الشكل (14-I): كاشف LHCb
16	الشكل (15-I): كاشف ALICE
20	الشكل (1-II): آليات إنتاج الكوارك القمي
22	الشكل (2-II): قنوات إضمحلال الكوارك القمي
23	الشكل (3-II): المقطع الفعال لتصادم pp أو $p\bar{p}$ في النموذج المعياري
35	الشكل (1-III): مخططات فينمان الرئيسية لإنتاج هيغز المفرد
36	الشكل (2-III): مخطط فينمان من أجل إضمحلال بوزون هيغز إلى فرميون وضده (يمين) وإلى زوج من البوزونات الضعيفة (يسار)
36	الشكل (3-III): مخطط فينمان من أجل إضمحلال البوزون هيغز إلى غلوونين
36	الشكل (4-III): مخطط فينمان من أجل إضمحلال بوزون هيغز إلى فوتونين عبر حلقات الفرميونات وحلقة بوزونات
37	الشكل (5-III): مخطط فينمان من أجل إضمحلال بوزون هيغز إلى فوتون وبوزون Z .
37	الشكل (6-III): رسم بياني يوضح تفرعات إضمحلال بوزون هيغز
64	الشكل (1-IV): رسم بياني يوضح الكتلة اللاتغايرية للبوزون W
65	الشكل (2-IV): رسم بياني يوضح الكتلة اللاتغايرية للكورك Top

قائمة الجداول :

الصفحة	عنوان الجدول
52	الجدول (IV - 1) : إسهامات الغلونات والكواركات لإنتاج زوج من الكوارك القمي
53	الجدول (IV - 2) : إسهامات التفاعلات الفرعية لحساب المقطع الفعال لإنتاج زوج من الكوارك القمي
54	الجدول (IV - 3) : مساهمة الكوارك القمي في حساب المقطع الفعال الكلي لإنتاج زوج من الكوارك القمي
55	الجدول (VI - 4) : المقطع الفعال الكلي بدلالة تغيرات في كتلة الكوارك القمي
56	الجدول (IV - 5) : حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج من الكوارك القمي في حالة التفاعل الكهروديناميكي
58	الجدول (VI - 6) : قيم المقطع الفعال في حالة التفاعلات القوية والكهروديناميكية
60	الجدول (IV - 7) : المقطع الفعال لاضمحلال زوج الكوارك القمي للبتوني البحت
61	الجدول (IV - 8) : نتائج المقطع الفعال الكلي لإنتاج بوزون الهيغز من خلال استخدام مولد الحدث <i>Mad Graph</i>
62	الجدول (IV - 9) : المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي في المستوى الأدنى والأعلى للطاقة

مقدمة :

مجال فيزياء الطاقة العالية هو فرع من الفيزياء الذي يعمل على فهم الكون في أكثر مستوياته الأساسية عن طريق استكشاف مكوناته الأولية بما فيها المادة والتحقق من التفاعلات بينها، و اكتشاف الطبيعة الأساسية للفضاء و الزمن.

فهم قوانين الطبيعة ينطلق أساسا من نظريات النموذج المعياري للجسيمات الأولية الذي أثبت أن المادة المرئية تتكون من عدد قليل من اللبانات الأساسية التي تحكمها أربع قوى أساسية (القوية -الكهرومغناطيسية – الضعيفة – الجاذبية).

ظهرت نظرية الكروموديناميك الكمي (QCD) لدراسة التفاعلات النووية القوية، و هي أساسا تهدف لفهم بنية الهادرونات من خلال دراسة نموذج البارتنون و الذي يتم فيه تحطيم البروتون لدراسة مكوناته من الكواركات والغلونات .

من أجل الكشف عن خواص الجسيمات الأولية وضعت العديد من المسرعات و الكواشف و انجزت الكثير من التجارب من أبرزها مصادم الهادرونات الكبير LHC الذي صمم من أجل فحص النموذج المعياري و تدقيق قياساته، والكشف عن كل الجسيمات التي تنبأ بها، من بين ما توصلت إليه الإكتشافات هو الكوارك القمي الذي أكتشف أول مرة في مسرع Tevatron حوالي عام (1995)، وتم التحقق من خواصه لاحقا في المسرع LHC وهو أثقل جسيمات النموذج المعياري، حيث تبلغ كتلته حوالي 173 GeV ، وجدير بالذكر أنه يتم إنتاجه على شكل أزواج عن طريق تصادم (بروتون- بروتون) في LHC أو تصادم (بروتون – ضد بروتون) في Tevatron، قمنا في بحثنا الحالي بدراسة ظواهرية لطرق إنتاج زوج الكوارك القمي وقنوات اضمحلاله و علاقته بالبوزونات الشعاعية و بوزون هيغز وأهمية ذلك في فهم فيزياء التفاعلات الأساسية، عبر أربعة فصول.

في الفصل الأول سنتطرق إلى مدخل لفيزياء الجسيمات الأولية و المسرعات بجانبها النظري و التجريبي في إطار النموذج المعياري مع التركيز على نظرية الكروموديناميك الكمي.

في الفصل الثاني سنقدم نبذة حول الكوارك القمي من خلال اكتشافه و إنتاجه و أنماط اضمحلاله و سنقوم بحساب تحليلي للمقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي عن طريق إفناء زوج من الكوارك و انصهار اثنان من الغلونات .

في الفصل الثالث سندرس فيزياء بوزون هيغز و علاقته بالكوارك القمي و ذلك من خلال دراسة آليات إنتاجه و أنماط اضمحلاله بالإضافة إلى حساب المقطع الفعال لإنتاجه عبر حلقة كوارك قمي.

في الفصل الرابع سنتطرق إلى الجانب التطبيقي عبر الحساب الرقمي باستخدام مولد الحدث Mad Graph حيث سنقوم بحساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي بطريقة Monte carlo عند المستوى الأدنى للطاقة، ثم المستوى الأعلى للطاقة عبر دراسة الإنبعثات الافتراضية والحقيقية وعلاقتها بالبوزون هيغز والبوزون الشعاعي W ، وإجراء دراسة مقارنة بين عدة حالات ممكنة ناتجة عن تغيير بعض المعطيات الفيزيائية و مطابقتها مع الإستنتاجات الفيزيائية و ما توصلنا إليه من خلال دراستنا النظرية.

الفصل الأول:

**مدخل إلى فيزياء الجسيمات
الأولية والمسرعات**

I- مقدمة

في هذا الفصل سنناقش النموذج المعياري كقاعدة نظرية لفيزياء الجسيمات الأولية مع التركيز على نظرية الكروموديناميك الكمي التي تصف التفاعلات القوية، بالإضافة لدراسة نموذج البارتون هذا في الجانب النظري أما بالنسبة للجانب التجريبي فسنتناول من خلاله لمحة عن فيزياء المسرعات والمصادمات بالإضافة إلى تقديم أفكار عامة حول مصادم الهادرونات الكبير LHC وكذا عن أهم كواشفه.

I-1- الجانب النظري

I-1-1- النموذج المعياري و الجسيمات الأولية

يمكن تعريف النموذج المعياري على أنه نظرية الحقل الكمية النسبية، بنيتها الرياضية تعتمد على دالة تسمى بمؤثر كثافة لاغرانج \mathcal{L} الذي يلخص لنا ديناميكيات وحركيات النظرية ويصف لنا حركة الجسيمات بدلالة الاندفاع والطاقة دالة كثافة لاغرانج صامدة محليا تحت زمرة تناظر معرفة ب:

$$SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$$

$SU(3)_c$: تصف تناظر اللون للكواركات و تفاعلاتهم القوية و المؤسسة لنظرية الكروموديناميك QCD

$SU(2)_c \otimes U(1)_Y$: تصف التناظر الكهروضعيف (الإلكترونيك EW)، حيث $U(1)_Y$ هي زمرة التناظر للشحنة التي تصف التفاعلات الكهرومغناطيسية في إطار نظرية الإكترودديناميك (QED) و $SU(2)_L$ تصف تناظر التفاعلات الضعيفة. [1]

الجسيمات الأساسية التي تنبأ بها النموذج المعياري هي اثنا عشر فرميون (سنة لبتونات و ستة كواركات) واثنا عشر بوزون حامل للقوى الأساسية كما هو موضح في الشكل الآتي:

mass	1.6 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 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	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs boson	
	d down	s strange	b bottom	g gluon		
	LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
		ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS	

الشكل (I-1): الجسيمات الأولية

I-1-2- الكروموديناميك الكمي (QCD)

الديناميكية اللونية الكمية هي نظرية التفاعل القوي التي تصف سلوك تفاعلات الكواركات والكواركات المضادة والغلونات، وفقا لنظرية قياس غير تبديلية لزمرة اللون $SU(3)$ للتفاعل القوي ونظريتي الحبس اللوني والحرية المقاربة. [2]
حسب الشروط التالية :

- مضادات الكواركات تختلف عن الكواركات.
- حالة الكواركات qq و $q\bar{q}$ ليست من أعضاء الزمرة (كذلك للحالات $qqqq$).
- الميزونات و الباريونات هم من أعضاء الزمرة.
- عدد درجات الحرية للون هي ثلاثة : يعني أن الكواركات تنتمي إلى التمثيل الثلاثي من الزمرة.

I-1-2-1- لاغرانج:

عبارة دالة كثافة الطاقة في الكروموديناميك الكمي تعطى:

$$\mathcal{L}_{QCD} = \mathcal{L}_{gluon} + \mathcal{L}_{quarks} + \mathcal{L}_{gauge-fixing} + \mathcal{L}_{ghost}$$

$$\mathcal{L}_{gluon} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F_a^{\mu\nu} \quad \checkmark$$

$$\mathcal{L}_{quarks} = \bar{\psi}_j(x)(iD_{ji} - m)\psi_i \quad \checkmark$$

$$\mathcal{L}_{gauge-fixing} = \frac{1}{2\epsilon}(\partial_\mu A_a^\mu)^2 \quad \checkmark$$

$$\mathcal{L}_{ghost} = \partial_\mu \eta^{a+}(D_{ab}^\mu \eta^b) \quad \checkmark$$

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a(x)F_a^{\mu\nu}(x) + \bar{\psi}(x)(iD_{ji} - m)\psi_i - \frac{1}{2\epsilon}(\partial_\mu A_a^\mu(x))^2 + \partial_\mu \eta^{a+}(D_{ab}^\mu \eta^a)$$

حيث :

μ و ν هما مؤشرات لورانتز.

$\bar{\psi}_j$ هو غزل ديراك لحقل كوارك (un spineur de Dirac).

$F_{\mu\nu}^a$ هو موتر قوة الحقل المستمد من حقل غلونات A_a^μ يعطى ب :

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

A_a^μ هو حقل غلوون

المؤشرات (3 ; 2 ; 1) هي تمثيلات ثلاثية الألوان (حمراء، خضراء، زرقاء).

المصفوفات F هي المولدات (generators) في التمثيل المساعد $SU(3)(adjointe)$.

الأرقام (8) f^{abc} هي ثوابت بنية الزمرة $SU(3)$

ثابت الاقتران :

$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$$

η^b حقل عددي مركب يتبع إحصاء Fermi

المشتق التغايري *Dérivé Covariant* :

$$D_{ij}^\mu = \partial^\mu \delta_{ij} + ig (T^c)_{ij} A^{c\mu}$$

$$D_{ab}^\mu = \partial^\mu \delta_{ab} + ig (F^c)_{ab} A^{c\mu}$$

T هي مولدات (generators) في التمثيل الأساسي ($SU(3) \text{ fondamentale}$)

1-2-2-1-I - ظاهرة الحبس *Confinement de Couleur*

و تسمى أيضا بالاحتجاز اللوني و معناها الفيزيائي أنه لا يمكن عزل الجسيمات المكونة للهادرونات، لأن القوة اللونية لا تسمح بذلك والطاقة اللازمة لفصلها تنتج بدورها أزواج كواركات- كواركات مضادة

إحدى الطرق لتخيل إحتجاز الكواركات هو نموذج الحقيبة (Bag Model)، و تمثل الكواركات هنا على أنها محصورة داخل حقيبة مرنة و تسمح للكواركات بالتحرك بحرية داخلها طالما أنها لا تحاول الانفصال عنها.

1-2-1-3-I - الحرية المقاربة *Asymptot freedom*

هي خاصية تتميز بها نظرية الكروموديناميك الكمومي (QCD) التي تصف التفاعلات النووية القوية الأساسية، وهي تعني أن قوة التفاعل تصبح أضعف عندما نذهب إلى الطاقات العليا، حيث يفسر ذلك على أن قوى التفاعل هي القوى التي تقترب من الانعدام باقتراب الكواركات من بعضها و تؤول إلى مالا نهاية إذا ما

ابتعدت عن بعضها البعض، و بالتالي إن محاولة فصل كوارك عن بقية الكواركات الأخرى داخل الهادرون يتطلب قدرا لا نهائيا من الطاقة.

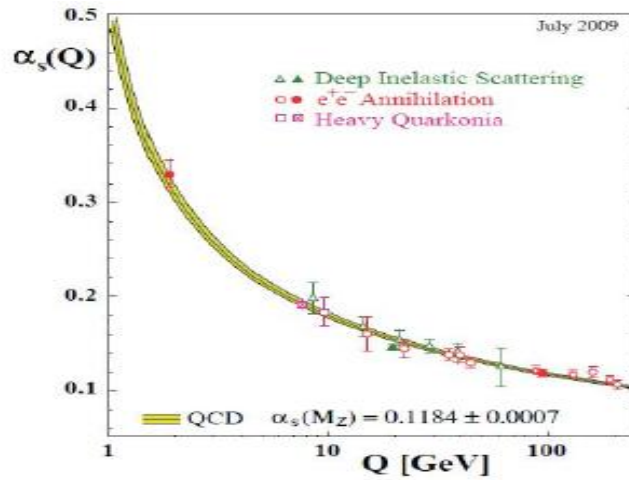
4-2-1-I ثابت الاقتران α_s

يعبر عن شدة التفاعلات القوية و العلاقة بينه و بين الطاقة هي علاقة عكسية حيث أن عند ازدياد الطاقة Q^2 ينخفض ثابت الإقتران α_s (كلما كانت الطاقة عالية يؤول ثابت الإقتران إلى الصفر) وفق للعلاقة :

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{\alpha_s(\mu^2)}{1 + \alpha_s(\mu^2)bt}$$

حيث:

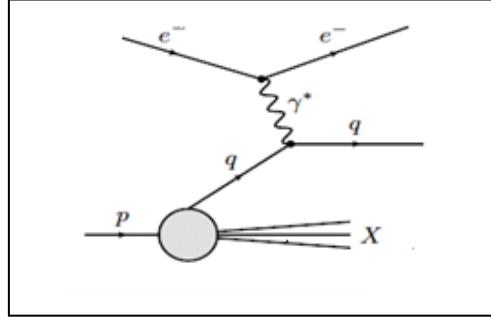
$$t = \ln \frac{Q^2}{\mu^2} \quad b = \frac{1}{12\pi} (33 - 2n_f)$$



الشكل (2-I): مختلف القياسات ل α_s بدلالة Q^2

3-1-I نموذج البارتون *Parton Model*

نموذج البارتون أقتراح من طرف العالم فينمان في عام (1969) لدراسة البروتون كمركب، وهو عبارة عن نموذج يقوم بكشف بنية الهادرونات الداخلية و يصف تفاعلاته في الطاقة العالية [3]. الفكرة الأساسية لهذا النموذج هي الإنتشار الغير المرن بين إلكترون و هادرون، أنجزت هذه التجربة لأول مرة في مسرع SLAC، الذي هو عبارة عن مختبر أبحاث أساسي للبحث التجريبي و النظري.



الشكل (I-3) : مخطط فينمان للانتشار العميق غير المرن إلكترون_ بروتون

✓ وفقا للنتائج المتوصل إليها من خلال حساب المقطع الفعال نستخلص البنية الداخلية للبروتون حيث أن توزع الطاقة و الإندفاع على مكوناته الداخلية من البارتونات يكون بواسطة توزيع دوال البارتون (pdf).

1-3-1-I - دوال توزيع البارتون *The Parton Distribution Functions*

دوال توزيع البارتون (*Parton Distribution Function*) تصف الطريقة التي يتم بها توزيع اندفاع الهادرون عند الطاقة العالية على البارتونات التي تشكله حيث يمكن اعتبار البارتونات جسيمات حرة داخل الهادرون .

يمكن أن نعبر عن إندفاع البارتون k_i ب $k_i = x_i p$ حيث p إندفاع الهادرون و x_i هو كسر الإندفاع و يحقق :

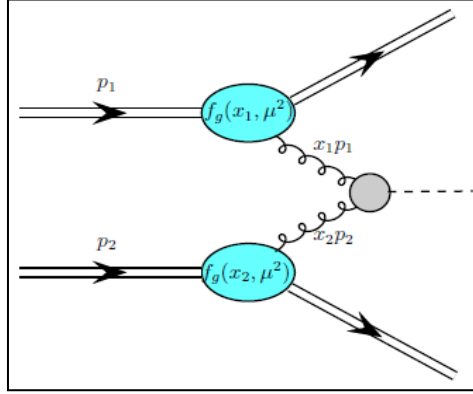
$$\sum_i x_i = 1 \quad 0 \leq x_i \leq 1$$

حيث i تعبر عن جميع أنواع البارتونات التي تشكل الهادرون .

نعتبر $f_a^A(x, \mu^2)$ هي دالة توزيع البارتون من نوع a في الهادرون A .

إذن $f_a^A(x, \mu^2) dx$ هي القيمة المتوقعة من أجل عدد البارتونات من النوع a مع كسر الإندفاع في المجال x إلى $x + dx$.

الغلونات نادرا ما تحمل كسر إندفاع كبير في الإجمال فهي تحمل تقريبا نصف اندفاع البروتون.



الشكل (4-I) : مخطط فينمان لتصادم غلوونين في النموذج البارتنوني.

المقطع الفعال الكلي من أجل تصادم بارتونين في نظام تصادم بروتونين يمكن أن يكتب على

الشكل [4] :

$$\sigma(p_1, p_2) = \int dx_1 \int dx_2 f_g^{(1)}(x_1, \mu^2) f_g^{(2)}(x_2, \mu^2) \sigma_{gg}(k_1, k_2, \alpha_s(\mu^2), \frac{Q^2}{\mu^2})$$

حيث :

σ_{gg} المقطع الفعال لتصادم غلوونين مع إندفاعيهما في معلم مركز الثقل $k_1 = x_1 p_1$ و $k_2 = x_2 p_2$

Q طاقة التصادم.

- يمكن الحصول على دوال التوزيع من خلال القياسات والبيانات التجريبية للعديد من التفاعلات الفيزيائية مثل الإنتشار العميق الغير مرن و تصادم الهادرونات.

I-2 - الجانب التجريبي:

I-2-1 - مقدمة :

من خلال مراقبة توسع الكون حاول العلماء والفلكيون أن يتصوروا بداية لأصل المادة والطاقة إنطلاقاً من الانفجار العظيم منذ مليارات السنوات والذي نتج عنه تشكل المادة الباريونية المتكونة من البروتونات والنيوترونات، بالإضافة إلى المادة المظلمة والطاقة المظلمة .

لدراسة المادة الباريونية وطبيعة الجسيمات الأولية التي تتكون منها، يستخدم العلماء اليوم أكثر الآلات تطوراً لتحطيم هذه الجسيمات بسرعة هائلة تقترب من سرعة الضوء وذلك لمحاكاة الظروف التي تلت الانفجار العظيم والتي ساهمت في خلق المادة الباريونية.

1-2-2 - حدود تجارب فيزياء الجسيمات الأولية

في تجارب فيزياء الجسيمات الأولية لدينا ثلاث حدود لاستكشاف الطبيعة [5] :

حد الطاقة: الذي يستخدم المصادمات عالية الطاقة لإكتشاف جسيمات جديدة والتحقق مباشرة من القوى الأساسية لفهم أعمق لبنية المادة العادية واستكشاف المادة المظلمة و التحقق من الفرضيات و النظريات الفيزيائية ما بعد النموذج المعياري، هذه الفيزياء الحديثة يمكن أن تتجلى من خلال إكتشاف سلسلة من الجسيمات الثقيلة الجديدة عادة من رتبة TeV .

حد الكثافة : الذي يستخدم حزم جسيمات مكثفة و كواشف كبيرة الحجم لإكتشاف خصائص الجسيمات نادرة التفاعل كالنيوترينوات ν وجسيمات المادة المظلمة الغير باريونية، و من ثم مراقبة التفاعلات النادرة التي قد تنطوي على جسيمات أولية أخرى مثل تجربة *super_kamiokande* في اليابان.

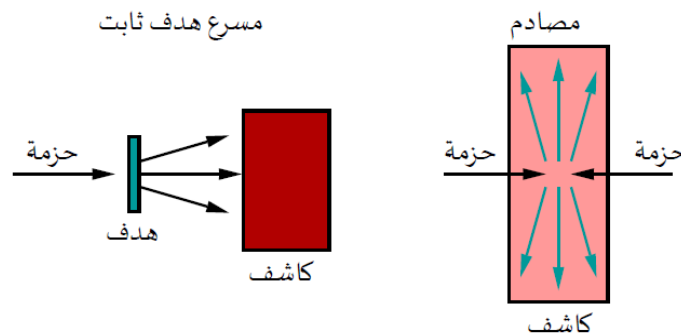
الحدود الكونية: التي تستخدم التجارب تحت الأرض و تلسكوبات الرصد و جمع البيانات لدراسة المادة المظلمة والطاقة المظلمة، وإستخدام الجسيمات الكونية عالية الطاقة للبحث عن ظواهر فيزيائية جديدة ومثال على ذلك:

DUNE في الولايات المتحدة الأمريكية.

ICECUB في القطب الجنوبي، تلسكوبات الرصد *Plank – WMAP*.

1-2-3 - تصنيف تجارب فيزياء الجسيمات الأولية [5]

يمكن تصنيف تجارب فيزياء المسرعات إلى نوعين: كما هو موضح في الشكل:



الشكل (5-1) : مسرّع هدف ثابت (يسار) ومصادم (يمين)

• **مسرع هدف ثابت:** يتم قذف حزمة مسرعة من الجسيمات المشحونة مثل البروتونات p أو الإلكترونات e^- على هدف ثابت و الذي قد يكون صلبا (مثل الرصاص)، سائلا (مثل سائل الهيدروجين H_2)، أو غازا، يتم الكشف عن الجسيمات الناتجة عن طريق كاشف .

• **المصادمات:** تصطدم حزمتان من الجسيمات مسرعتان في إتجاهين متعاكسين رأسيا، عادة ما يكون الإندفاع الخطي الإجمالي للجسيمات محفوظ و يساوي الصفر، و يكون في مثل هذه المصادمات لكلا الحزمتين نفس الطاقة إذا كانت الجسيمات الابتدائية لها نفس الكتلة (مثل مصادمات LEP و LHC). هذا النوع من المصادمات يولدا طاقة هائلة تنتج عنها جسيمات جديدة تستغل في دراسة فيزياء جديدة .

مثلا إذا كان لدينا حزمتين ذواتا طاقة $E = 60 \text{ GeV}$ ، فإن طاقة مركز الكتلة تكون

$$E_{cm} = 120 \text{ GeV} ، \text{ و يمكن في هذه الحالة اكتشاف جسيم كتلته تصل إلى}$$

$$m = E/C^2 = 120 \text{ GeV}/c^2$$

I-2-4 - المسرات والمصادمات

إن عملية تصادم الجسيمات الأولية فيما بينها تقنية معقدة من أجل التعرف على خواص المادة والطاقة بشكل أعمق حيث تعتمد معظم التجارب في الميدان على المسرات (*Accelerators*) التي تخلق وتسرع الجسيمات حسب الحاجة، وهي تعد اليوم أكبر الأجهزة المستخدمة من قبل الفيزيائيين [6].

I-2-4-1 - مبدأ التسريع

تقوم المسرات بتسريع الجسيمات المشحونة والمستقرة بالاعتماد على المبادئ الأساسية التالية :

- مصدر للجسيمات المشحونة.
- أنابيب مفرغة من الهواء متصلة مع بعضها البعض حيث يمكن لهذه الجسيمات أن تتحرك وتنتقل داخلها بحرية .
- فرق الجهد (المجال الكهربائي).

تستخدم الحقول الكهربائية لتسريع الجسيمات ولزيادة الإندفاع أما الحقول المغناطيسية فإنها تستخدم لتحديد اتجاهها الأصلي إما لتخزينها في حزمة أو لتركيزها .

القوة المطبقة على جسيم ذو شحنة e داخل الحقل الكهربائي E والحقل المغناطيسي B

تسمى قوة لورانتز أو قوة التسريع:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = e (\vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B})$$

وتوضع الكواشف الجسيمية حول نقاط التصادم للكشف والتعرف على الجسيمات التي نتجت عن التصادم .

الجسيمات المستخدمة في التسريع يمكن أن تكون :

✓ البروتونات ، ضد البروتونات.

✓ الإلكترونات ، البوزيترونات.

✓ أيونات Ions .

2-4-2-1 - أنواع المسرعات

هناك نوعان من المسرعات: المسرعات الدائرية والمسرعات الخطية.

1-2-4-2-1 - المسرع الخطي (linear accelerator)

المسرّع الخطي عبارة عن التصميم الأنسب عندما يتعلق الأمر بالجسيمات المستقرة و الخفيفة، حيث يتكون من سلسلة إلكترونات أسطوانية ترتبط ببعضها البعض بواسطة مصدر جهد متناوب وفيه يتم تسريع الجسيمات المشحونة بمسارات مستقيمة لتحافظ على طاقتها المكتسبة.

و يزداد طول المسرع بازدياد الطاقة المراد الوصول إليها وكتلة الجسيمات المسرعة ومن أبرز الأمثلة على ذلك:

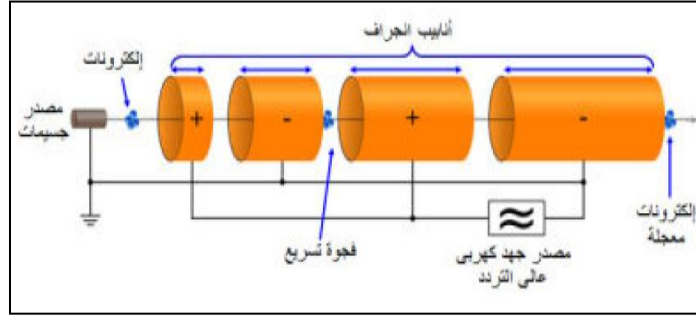
LINAC : Linear Accelerator CERN

DESY : Deutches Electron Synchrotron (خارج الخدمة)

SLAC : Stanford Linear Accelerator Center

LEP : Large Electron Positron Collider مصادم إلكترون_ بوزيترون في CERN (خارج

الخدمة)



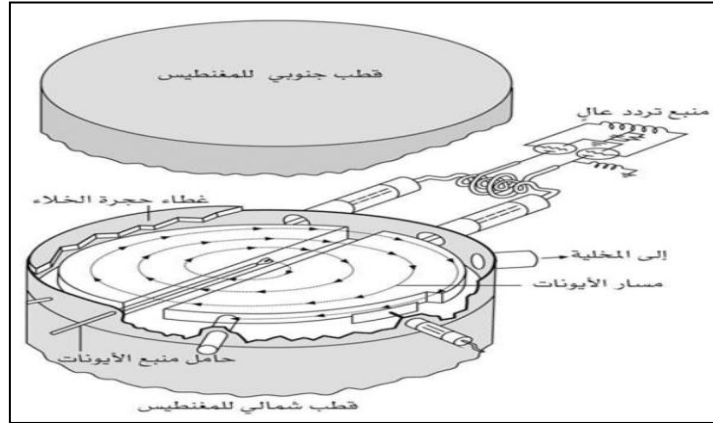
الشكل (I-6) : شكل تخطيطي للمسرّع الخطي (LINAC)

I-2-4-2-2 - المسرعات الدورانية

المسرعات الدورانية تستخدم المجال الكهربائي لتسريع الجسيمات إلى سرعات عالية والمجال المغناطيسي للمحافظة على المسار الدائري للجسيمات.

• المسرّع الدوراني سيكلوترون (cyclotron)

صمم المسرّع سيكلوترون لتسريع الجسيمات عبر مسار حلزوني.



الشكل (I-7) : مسرّع السيكلوترون والمسار الحلزوني الذي ترسمه الجسيمات فيه.

• المسرّع الدوراني التزامني سينكر وترون synchrotron

يسرّع الجسيمات عبر مسار دائري ذو نصف قطر ثابت، ومن الأمثلة التطبيقية الحديثة عن المسرعات

الدائرية :

▪ **تيفاترون (Tevatron)**: تصادم البروتونات ضد البروتونات تم بناءه في مختبر فيرمي الوطني

بالقرب من شيكاغو ويعد أكبر مسرّع جزيئات في العالم بعد مصادم الهدرونات الكبير *LHC*.

- **LHC** : مصادم الجسيمات الكبير الذي قامت ببنائه المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية *CERN* بالقرب من مدينة جنيف يسرع البروتونات إلى طاقة أقصاها 7 TeV و يصدمها في أربع نقاط تصادم.

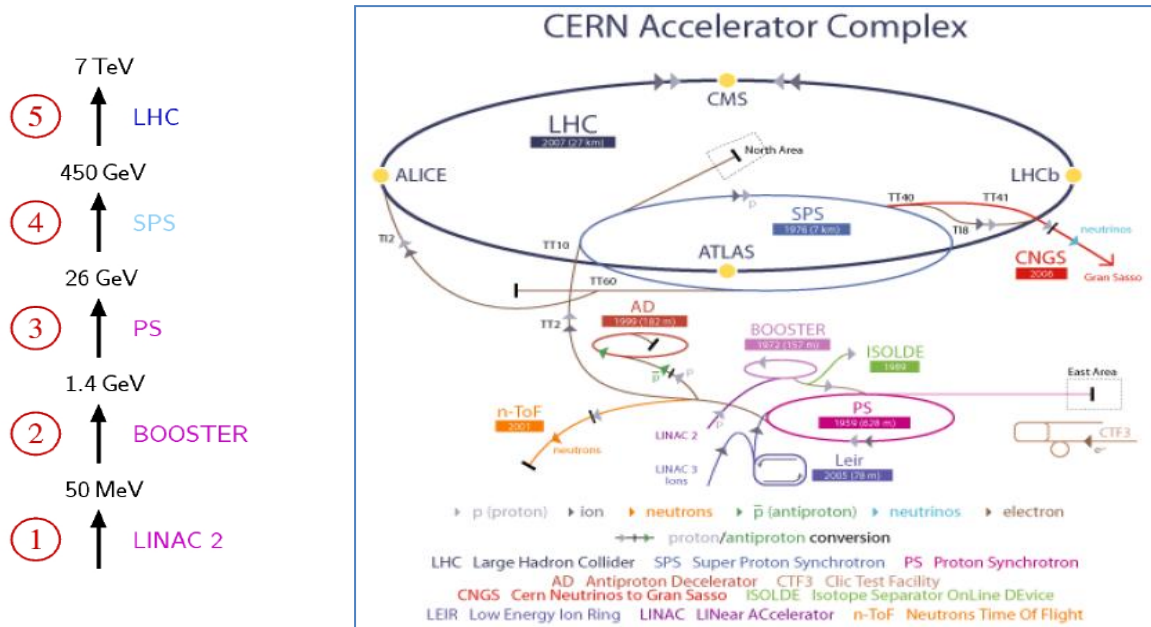


الشكل (I-8) : المسرع الدوراني التزامني

I-2-5- مصادم الهدرونات الكبير LHC [5]

يعد مصادم الهادرونات الكبير الموجود على الحدود الفرنسية السويسرية أكبر المسرات للجسيمات.

تتألف بنيته الرئيسية من أنبوب مفرغ من الهواء بطول 27 كم مغمور في نفق على عمق 100 متر تحت سطح الأرض لحمايته من الأشعة الكونية والتداخلات الخارجية الأخرى .



الشكل (I-9) : نظرة عامة حول أجزاء مصادم الهادرونات الكبير (LHC)

في البداية تضخ ذرات الهيدروجين في حجيرة ضمن مسرع خطي حيث تزال إلكتروناتها سالبة الشحنة لتبقى البروتونات موجبة الشحنة ويسمح ذلك بتسريعها عن طريق حقل كهربائي، و تستخدم مغناط قوية لإبقائها ضمن مسار دائري، إلى أن تصل سرعة البروتونات 91.6% من سرعة الضوء ليتم دمجها في حزمة واحدة و تسرع إلى أن تصل 99.9% من سرعة الضوء، عندئذ يتم تقسيم الحزمة إلى قسمين يسرعان عبر أنبوبين منفصلين في اتجاهين متعاكسين لحين أن تصبح كتلتهما أثقل ب 7000 مرة منها في حالة السكون، حينها فقط يحدث التصادم داخل كواشف ضخمة (*detectors*) مبنية حول نقطة الإصطدام.

طاقة التسريع القصوى التي تم التوصل إليها:

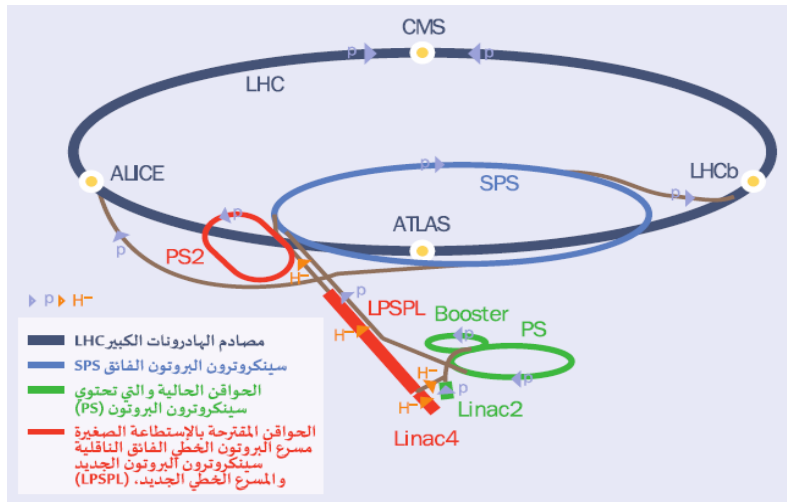
1989 LEP (CERN) إلكترون بوزيترون 100 GeV .

1987 Tevatron (FNAL) بروتون - ضد البروتون 900 GeV .

2013 LHC (CERN) بروتون - بروتون 7 TeV .

2018 LHC (CERN) بروتون - بروتون 13 TeV .

2019 (CERN) بروتون - بروتون (خارج الخدمة).



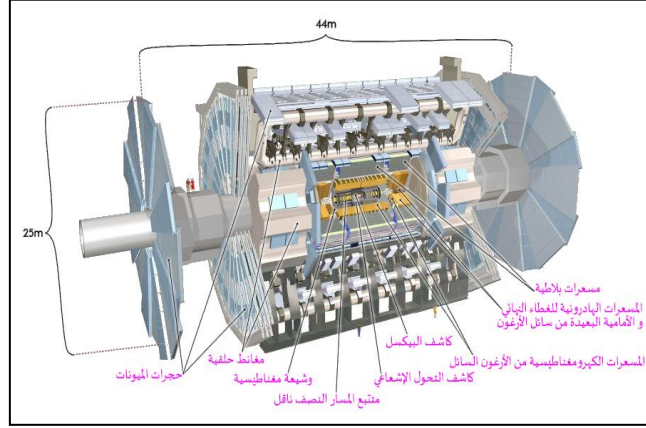
الشكل (I-10) : الحقن داخل سلسلة المسرعات

I-2-6- الكواشف

توجد عند المواقع الأربعة الرئيسية (*ATLAS, CMS, ALICE, LHCb*) على طول مصادم الهادرونات الكبير LHC التي تحدث فيها التصادمات وظيفتها رصد خواص الجسيمات الأولية لتحديد هويتها عن طريق قياس الاندفاع وزوايا انتشار الجسيمات و الشحنة الكهربائية .

1-6-2-I - كاشف أتلوس ATLAS [6]

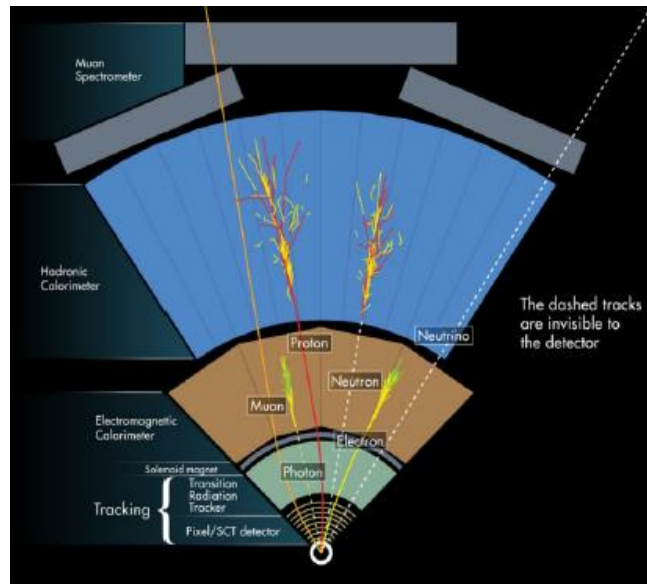
اختصاراً للتسمية *A Toroidal Lhc Apparatus* وهو كاشف هجين ومن أكبر كواشف *LHC*. يتم فيه الكشف عن البوزون هيغز و دراسة الكوارك القمي و البحث عن أبعاد إضافية و المادة المظلمة .



الشكل (11-I) : كاشف ATLAS [6].

يتكون *ATLAS* من أربع طبقات من الكواشف:

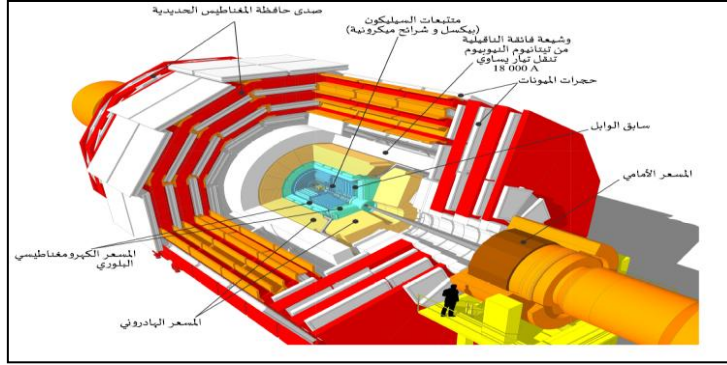
- ✓ كاشف تتبع المسار (*Trajectory*)
- ✓ المسعر الكهرومغناطيسي (*Electromagnetic Calorimeter*)
- ✓ المسعر الهادروني (*Hadronic Calorimeter*)
- ✓ كاشف الميونات (*Muon Spectrometer*)



الشكل (12-I) : مقطع عرضي لطبقات كاشف أتلوس (*ATLAS*). [5]

Compact Muon Slenoid كاشف CMS - 2-6-2-I

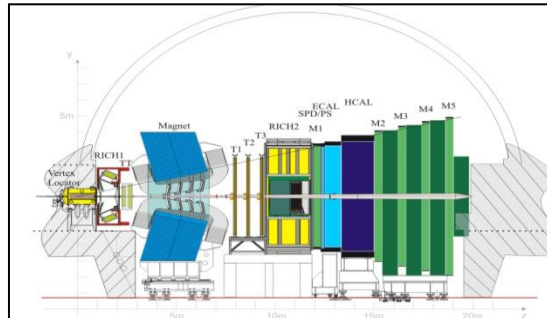
هو ثاني أكبر كاشف هجين في LHC للدراسة خواص الميونات و الهيجز و المادة المظلمة ويتكون من نفس طبقات الكواشف التي يتكون منها ATLAS .



الشكل (I-13) : كاشف CMS

LHCb كاشف - 3-6-2-I

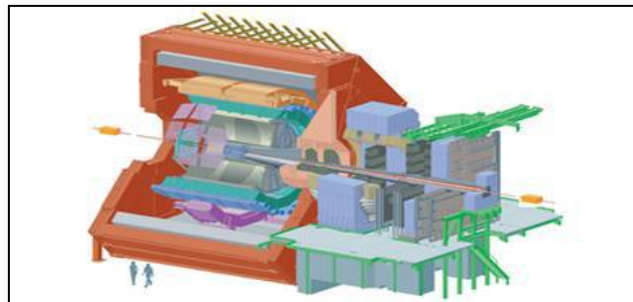
اختصارا لتسمية (Large Hadron Collider beauty) يهدف بشكل رئيسي إلى دراسة الميزون الثقيل وتفككات التفاعل الضعيف و انتهاك التناظر CP .



الشكل (I-14) : كاشف LHCb

ALICE كاشف - 4-6-2-I

اختصارا للتسمية (A Large Ion Collider Expérimente) يعمل على دراسة بلازما كوارك و غلوونات (PQG) من خلال دراسة إصطدام الأيونات الثقيلة (Pb - Pb).



الشكل (I-15) : كاشف ALICE

I-2-7 - الإنارة

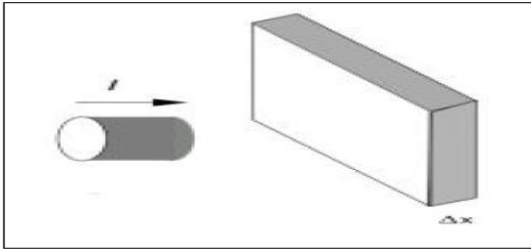
الإنارة هي خاصية تميز السرعات وتصف الشدة اللحظية للحزمة، حيث أن معدل الحوادث يتناسب طرذا مع الإنارة ومع المقطع الفعال

$$l \times \sigma = \text{معدل الحوادث}$$

يتم التحكم في الإنارة من طرف الآلة (المسرّع)، أما المقطع الفعال σ فهو قيس لاحتمال حدوث التفاعل ويمكن اعتباره على أنه المساحة الفعالة المتوفرة لحدوث التفاعل من طرف هدف معين .

• في معلم المخبر: تعرف الإنارة كالتالي

$$l = n I = \rho \Delta x I$$



ρ الكثافة السطحية

Δx السمك

I كثافة الحزمة

n الكثافة الحجمية

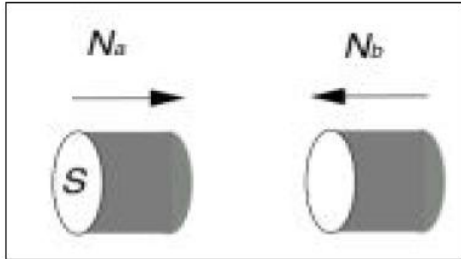
• في نظام مركز الكتلة :

من أجل حزمتين متصادمتين إذا كانت N_a و N_b عدد جسيمات الحزمتين و f

تردد الحزم، S مساحة المقطع العرضي للحزمة

فإن الإنارة معطاة بالعلاقة:

$$l = \frac{N_a N_b f}{S}$$



الإنارة تقاس ب $m^{-2}s^{-1}$ أو مقلوب المساحة في وحدة الزمن وعادة ما نستخدم مقلوب

barn في الثانية .

إنارة مصادم الهادرون الكبير (LHC): $l = 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

الفصل الثاني:

فيزياء الكوارك القمي

II- المقدمة:

الكوارك القمي أثقل الجسيمات الأولية اكتشف في *Tevatron* بواسطة تجربتي $DØ$ و CDF ، كتلته تقترب من رتبة كتلة بوزون هيغز و هي رتبة الطاقة في النموذج المعياري، تعد القياسات الدقيقة لخصائص الكوارك القمي أفضل طريقة لفهم آلية اكتساب الجسيمات الأولية لكتلتها وهي ضرورية ومهمة لفهم فيزياء ما وراء النموذج المعياري (التناظر الفائق).

في هذا الفصل سنتطرق لدراسة فيزياء الكوارك القمي من خلال إعطاء لمحة حول اكتشافه و ذكر أنماط إنتاجه و اضمحلاله، و سنقوم بحساب تحليلي (يدوي) للمقطع الفعال لإنتاج زوج من الكوارك القمي عبر إفناء كوارك و ضد كوارك و إنصهار اثنان من الغلوون .

II-1- اكتشاف الكوارك القمي ~ (1995):

تم اكتشاف لبتون التاون (1975) في مختبر SLAC الذي نتج عنه جيل ثالث من اللبتونات وبالتالي كُسر التناظر الحاصل، ومنه جاءت فكرة البحث عن كواركات الجيل الثالث لاستعادة هذا التناظر.

بعد إكتشاف كوارك القعري (bottom) في Fermilab وبناء على الملاحظات التجريبية إستلزم الأمر وجود مرافق له يجب البحث عنه، سمي بالكوارك القمي (Top).

خلال التشغيل الأول لمصادم $Tevatron$ (CDF) تم وضع قيمة حدية سفلى لكتلة الكوارك القمي : $m_t > 91 GeV$ أما في التشغيل الثاني ل $Tevatron$ تم إعادة تحسين تحليل البيانات من أجل البحث عن قيمة أثقل للكتلة والتي قدرت ب $m_t = 175 GeV$ ، نلاحظ وجود الفرق الكبير مع كتلة مرافقه الكوارك القعري $m_b \sim 5 GeV$. [7]

II-2- إنتاج الكوارك القمي

II-2-1- تصادم بروتون _ ضد بروتون $Tevatron$

يصطدم $(p\bar{p})$ في مصادم $Tevatron$ بطاقة مركز كتلة تصل إلى $(1.96 TeV)$ لكن قبل حدوث التصادم ينبغي أولاً إنتاج البروتونات المضادة كجسيمات ثانوية في تصادمات هدف ثابت لأنها غير متوفرة في الطبيعة، تقدر إنارته اللحظية ب $l = 10^{32} cm^{-2} s^{-1}$ ، إستطاع هذا المسرع لأول مرة إكتشاف أزواج من الكوارك القمي.

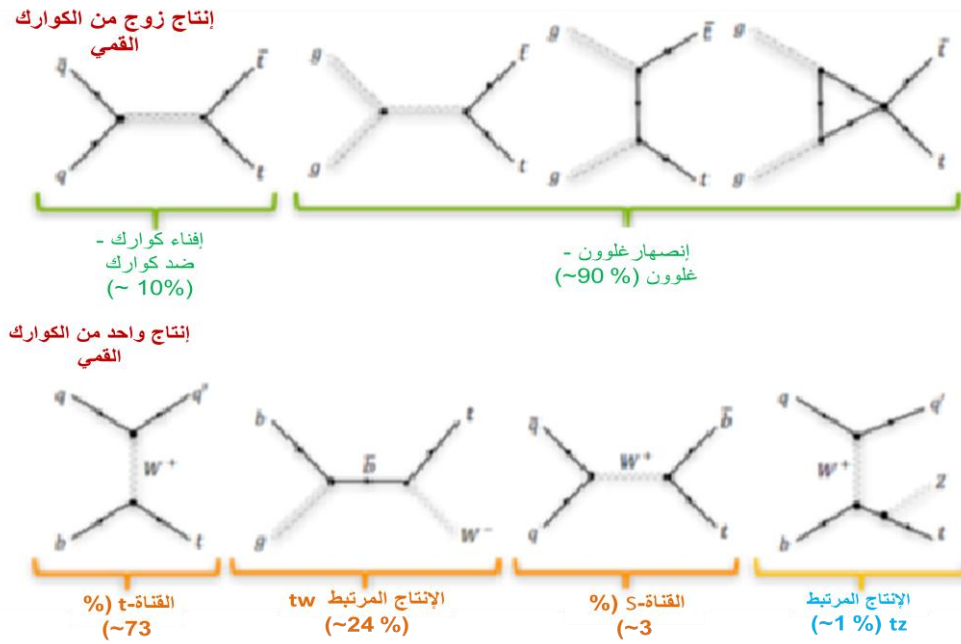
II-2-2- تصادم بروتون _ بروتون LHC

يصطدم بروتونين في مصادم LHC بطاقة إندفاع $6 \cdot 5 TeV$ في نظام مركز الكتلة بروتون_ بروتون هذا التصادم ينتج عنه طاقة تبلغ $13 TeV$ ، في هذا التفاعل يمكن إنتاج زوج من الكوارك القمي عن طريق عدة تفاعلات رئيسية ($hard process$).

تم إعادة تأكيد نتائج الإكتشافات السابقة للكوارك القمي من خلال أحداث LHC الناتجة عن تصادم بروتون_بروتون في تجربتي CMS و ATLAS بالإضافة إلى إستغلال خصائص الكوارك القمي المقترحة من طرف النموذج المعياري.

✓ يتم إنتاج الكوارك القمي عبر واحد من الآليات التالية (*hard process*):

- التفاعل الأكثر مصدرا للكوركات القمية. $pp/p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}X$
- $pp/p\bar{p} \rightarrow w + X$ حيث $(w^+ \rightarrow tb, w^- \rightarrow t\bar{b})$: إنتاج القمي عن طريق اضمحلال w .
- X هي كل المكونات الأخرى الناتجة عن التصادم.



الشكل(II-1) : آليات إنتاج الكوارك القمي. [8]

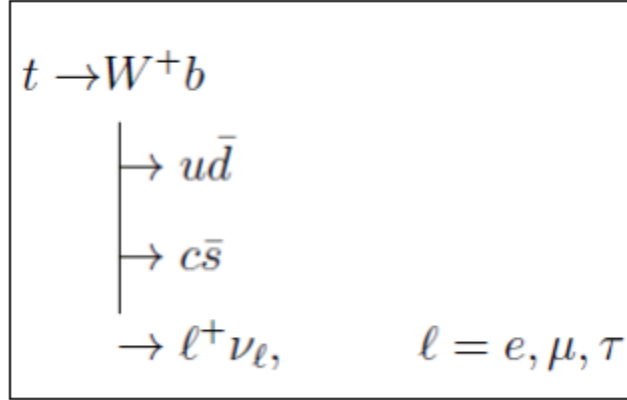
• الفرق بين التصادمين pp و $p\bar{p}$

من أجل تصادم حزمتي $p\bar{p}$ لديهما شحنتين متساويتين ومتعاكستين نستخدم نفس أنبوب الحزمة بينما تصادم بروتون_بروتون نستخدم أنبوبين لحزمتين مختلفتين وهذا متوفر في LHC فقط. بالإضافة إلى ذلك الطاقة الناتجة عن تصادم $p\bar{p}$ تكون أعظمية لأنها طاقة إفاء وبالتالي سيكون احتمال إنتاج جسيم و ضد جسيم ($t\bar{t}$) وارد جدا، بينما في تصادم pp الهدف هو إنتاج أكبر عدد ممكن من الجسيمات بما فيها الكوارك القمي بغرض اكتشاف بوزون الهيغز والمادة المظلمة و كل الجسيمات التي تنبأت بها نظريات ما بعد النموذج المعياري.

II-3- إضمحلال الكوارك القمي

بعد إنتاج الكوارك القمي يضمحل مباشرة لأنه غير مستقر، بسبب عمره القصير جدا لدرجة أنه لا يتهدرن أي أنه لا يوجد هادرون يحتوي على الكوارك القمي.

يضمحل الكوارك القمي عبر التفاعلات الضعيفة إلى بوزون w وكوارك القمري b :

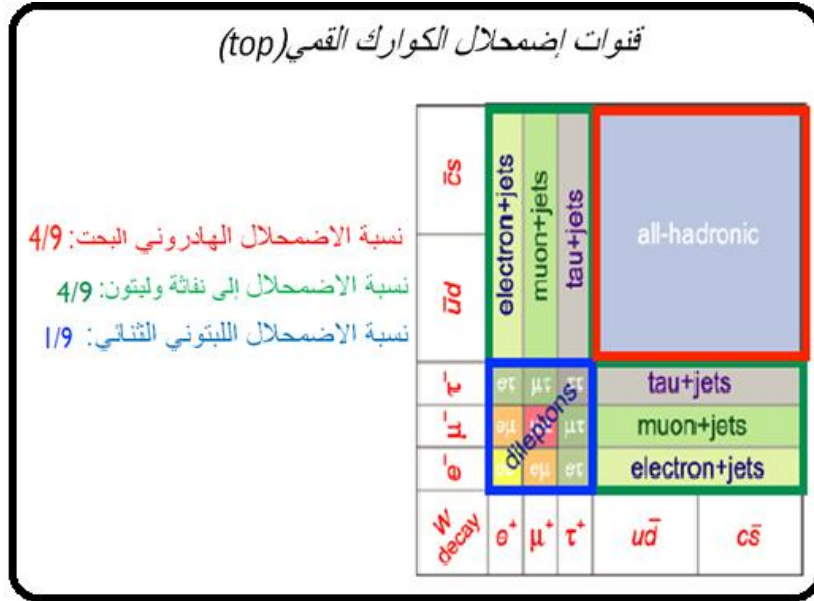


الكوارك b الناتج دائما يتهدرن لتشكيل نفاثات b بينما يضمحل بوزون w عبر مجموع تسع أنماط اضمحلال ممكنة : ثلاثة منها إلى اللبتونات الثلاث وستة منها إلى الكواركات واللبتونات. فيكون بذلك عدد الكواركات القمية التي يتم إنتاجها يساوي جداء الإنارة ضرب المقطع الفعال ضرب الزمن الذي يتم فيه جمع البيانات:

$$\text{عدد الكواركات القمية المنتجة} = \sigma_t \times l \times T$$

ومنه فإن إضمحلال الكوارك القمي يمكن تصنيفه إلى ثلاث حالات:

- **الإضمحلال الهادروني البحت لكل من $t\bar{t}$** : في هذه الحالة فإن كلا البوزونين w^\pm يضمحل إلى كواركات لتتهدرن منتجة نفاثات، و النفاثات الباقية ناتجة عن تهدرن كوارك b و مضاده (\bar{b}) ، نسبة التفرع لهذا الصنف هي 4 من بين 9 تفرعات ممكنة (4/9).
- **الخدات الخلفية لهذا الإضمحلال كبيرة جدا و بالتالي يصعب تصنيفها، إذ أمكننا التمييز بين النفاثات b و النفاثات الناتجة من تحلل w^\pm مع الحصول على إحصائيات كبيرة جدا و بالتالي إنارة مثالية نستطيع إستخدام هذا الإضمحلال للبحث عن كوارك القمي.**
- **اضمحلال $t\bar{t}$ إلى نفاثة و لبتون** : يضمحل أحد البوزونين W إلى نفاثات و الآخر إلى لبتونات نسبة التفرع الكلية لهذا الصنف هي (4/9) بحيث تكون تصفية الحوادث الخلفية سهلة مقارنة مع الإضمحلال الهادروني البحت لوجود لبتون و طاقة مفقودة.
- **الإضمحلال اللبتوني الثنائي ل $t\bar{t}$** : هذا النمط مثالي للبحث عن الكوارك القمي و من السهل تصفية حوادثه الخلفية لكنه نادر جدا و نسبة تفرعه هي (1/9). [9] [10]

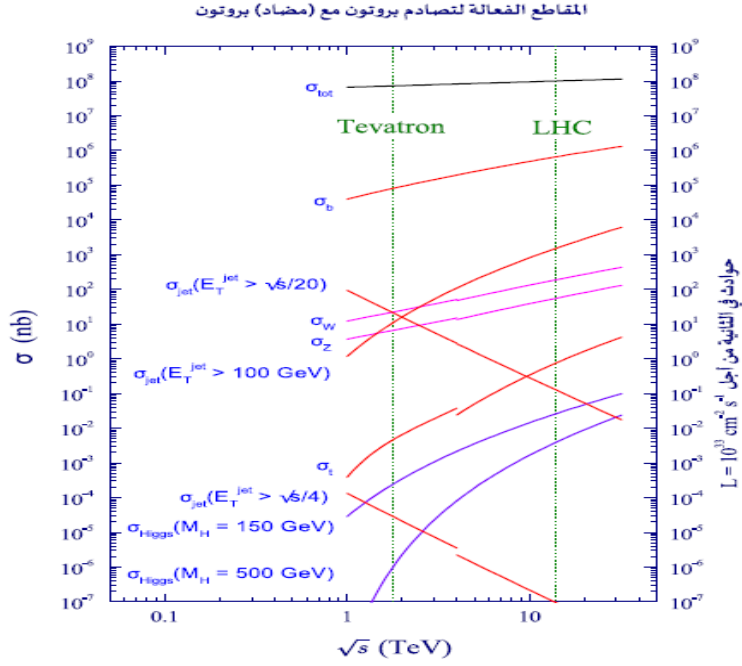


الشكل (2-II): قنوات اضمحلال الكوارك القمي (Top)

■ نفاثة (jet) هي عبارة عن بارتون (غلون، كوارك) ناتجة عن إنبعاثات QCD الحقيقية

4-II- المقطع الفعال للتفاعل pp و $p\bar{p}$

من خلال دراسة المقطع الفعال لتفاعل pp أو $p\bar{p}$ في النموذج المعياري يتضح لنا أن احتمال الحوادث المهمة نادر جدا و بالتالي يجب أن يكون عدد هذه الحوادث أعظمي لتكون لدينا إنارة مثالية، بالإضافة إلى ذلك المقاطع الفعالة للفيزياء (كإنتاج الهيغز) تتضمن خلفيات نواتجها نفاثات و بالتالي يصعب التعرف على الجسيمات المهمة، إذن نقوم بتصفية قنوات الإضمحلال أو نركز مباشرة على قنوات إضمحلال نقية للجسيمات المهمة التي تملك نسب تفرع صغيرة جدا كالأضمحلال إلى اللبتونات أو الفوتونات.

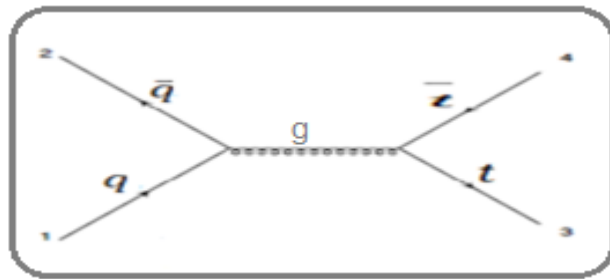


الشكل (3-II): المقطع الفعال لتصادم pp أو $p\bar{p}$ في النموذج المعياري. [10]

4-II- حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي

سنقوم بحساب المقطع الفعال تحليلياً لإنتاج زوج من الكوارك القمي من خلال إفناء كوارك وضد كوارك عبر وسيط انتشار غلوون، وبعدها سنحسب المقطع الفعال لإنتاج زوج $t\bar{t}$ لإنصهار إثنان من الغلوون عبر ثلاث وسائط انتشار : غلوون ، كوارك قمي و ضد كوارك قمي.

1. حساب المقطع الفعال للتفاعل $q\bar{q} \rightarrow g \rightarrow t\bar{t}$



نستخدم قوانين فاينمان التي تسمح بكتابة السعة M للتفاعل :

$$M = \bar{v}(p_2)(-ig(T^a)\gamma^\mu)u(p_1)\frac{i}{q^2}\left[-g_{\mu\nu} + (1 - \xi)\frac{q^\mu q^\nu}{q^2}\right]\delta^{ab} \times \bar{u}(p_3)(-ig(T^b)\gamma^\nu)v(p_4) \quad (1-II)$$

$u(p_1)$ سبينور كوارك وارد

$\bar{v}(p_2)$ سبينور ضد الكوارك وارد

$\bar{u}(p_3)$ سينور كوارك صادر

$v(p_4)$ سينور ضد الكوارك صادر

$(-ig\gamma^\nu(T^a))$ و $(-ig\gamma^\mu(T^b))$ قمتي التفاعل.

T^a مصفوفة GELL-MEN للتناظر اللوني

وسيط انتشار غلون $\frac{i}{q^2} [-g_{\mu\nu} + (1 - \xi) \frac{q^\mu q^\nu}{q^2}] \delta^{ab}$

نضع $\xi = 1$ (*guage fixsing*)

تصبح العبارة:

$$M = \bar{v}(p_2)(-ig\gamma^\mu(T^a))u(p_1) \frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2} \delta^{ab} \bar{u}(p_3)(-ig\gamma^\nu(T^b))\gamma^\nu v(p_4)$$

$$M = (-ig)^2 \left(\frac{-i}{q^2}\right) \delta^{ab} (T^a)(T^b) \{ \bar{v}(p_2) \gamma^\mu u(p_1) g_{\mu\nu} \bar{u}(p_3) \gamma^\nu v(p_4) \} \quad (2-II)$$

$u(p, s), v(p, s)$ ثنائيات المغزل لدراك و الذي رمزه الاصلي

نحسب مربع السعة:

$$|M|^2 = MM^+ \quad (3-II)$$

إذن مرافق السعة:

$$M^+ = \left[(-ig)^2 \left(\frac{-i}{q^2}\right) \delta^{ab} (T^a)(T^b) \{ \bar{v}(p_2) \gamma^\mu u(p_1) g_{\mu\nu} \bar{u}(p_3) \gamma^\nu v(p_4) \} \right]^+ \quad (4-II)$$

باستعمال خواص جبر *Clifford*:

لدينا

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

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

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

لنحسب المقدار التالي:

$$\begin{aligned}
 [\bar{v}(p_2)\gamma_\nu u(p_1)]^+ &= u^+(p_1)\gamma_\nu^+(\bar{v}(p_2))^+ \\
 &= u^+(p_1)\gamma_\nu^+(v^+(p_2)\gamma^0)^+ \\
 &= u^+(p_1)\gamma_\nu^+\gamma^{0+}v(p_2) \\
 &= u^+(p_1)\gamma^0\gamma_\nu v(p_2) \\
 &= \bar{u}(p_1)\gamma_\nu v(p_2)
 \end{aligned} \tag{5-II}$$

ولدينا

$$\begin{aligned}
 [\bar{u}(p_3)\gamma^\nu v(p_4)]^+ &= \bar{v}(p_4)\gamma^\nu u(p_3) \\
 [T^a]^+ &= T^a
 \end{aligned} \tag{6-II}$$

إذن عبارة مرافق السعة تكتب:

$$M^+ = (-ig)^2 \left(\frac{i}{q^2}\right) \delta^{ab} (T^a)(T^b) \{\bar{u}(p_1)\gamma^\alpha v(p_2)g_{\alpha\beta}\bar{v}(p_4)\gamma^\beta u(p_3)\} \tag{7-II}$$

و منه يصبح لدينا مربع السعة كالتالي:

$$\begin{aligned}
 |M|^2 &= (-ig)^4 \left(\frac{1}{q^4}\right)^2 \delta^{ab} \delta^{ab} (T^a)_{ji} (T^b)_{i'j'} (T^a)_{kl} (T^b)_{l'k'} \\
 &\times \{\bar{v}(p_2)\gamma^\mu u(p_1)g_{\mu\nu}\bar{u}(p_3)\gamma^\nu v(p_4)\} \{\bar{u}(p_1)\gamma^\alpha v(p_2)g_{\alpha\beta}\bar{v}(p_4)\gamma^\beta u(p_3)\}
 \end{aligned} \tag{8-II}$$

بالجمع على السبين واللون لكل مكونات التفاعل

$$|\bar{M}|^2 = \frac{1}{4} \frac{1}{N_C^2} \sum_{spin} \sum_{couleur} |M|^2 \tag{9-II}$$

$$|M|^2 = \frac{1}{4} \frac{1}{N_C^2} \sum_{spin} \sum_{couleur} (-ig)^4 \left(\frac{1}{q^4}\right)^2 \delta^{ab} \delta^{ab} (T^a)_{ji} (T^b)_{i'j'} (T^a)_{kl} (T^b)_{l'k'}$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \bar{v}_a(p_2)[\gamma^\mu]_{ab}u_b(p_1)g_{\mu\nu}\bar{u}_c(p_3)[\gamma^\nu]_{cd}v_d(p_4)\bar{v}_e(p_4)[\gamma^\alpha]_{ef} \\ & \times u_f(p_3)g_{\alpha\beta}\bar{u}_g(p_1)[\gamma^\beta]_{gh}v_h(p_2) \end{aligned} \right\} \quad (10-II)$$

$$|M|^2 = \frac{1}{4} \frac{1}{N_C^2} \sum_{spin} \sum_{couleur} (-ig)^4 \left(\frac{1}{q^4}\right)^2 \delta^{ab} \delta^{ab} (T^a)_{ji} (T^b)_{i'j'} (T^a)_{kl} (T^b)_{l'k'} \\ \times \left\{ \begin{aligned} & v_h(p_2)\bar{v}_a(p_2)[\gamma^\mu]_{ab}u_b(p_1)\bar{u}_g(p_1)g_{\mu\nu}u_f(p_3)\bar{u}_c(p_3) \\ & \times [\gamma^\nu]_{cd}v_d(p_4)\bar{v}_e(p_4)[\gamma^\alpha]_{ef}g_{\alpha\beta}[\gamma^\beta]_{gh} \end{aligned} \right\}$$

باستخدام خصائص ثنائيات المغزل (Dirac spinor) :

$$\sum_{s=1}^2 u(p_1)\bar{u}(p_1) = \not{p}_1 + m \quad (11-II)$$

$$\sum_{s=1}^2 u(p_3)\bar{u}(p_3) = \not{p}_3 + m \quad (12-II)$$

$$\sum_{s=1}^2 v(p_1)\bar{v}(p_1) = \not{p}_1 - m \quad (13-II)$$

$$\sum_{s=1}^2 v(p_3)\bar{v}(p_3) = \not{p}_3 - m \quad (14-II)$$

$$|M|^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{3}\right)^2 (-ig)^4 \left(\frac{1}{q^4}\right)^2 \delta^{ab} \delta^{ab} Tr[T^a T^b] Tr[T^a T^b] g_{\mu\nu} g_{\alpha\beta} \\ \times Tr[\not{p}_2 \gamma^\mu \not{p}_1 \gamma^\beta] Tr[\not{p}_3 \gamma^\nu \not{p}_4 \gamma^\alpha] \quad (15-II)$$

يمثل المقدار $\frac{1}{3}$ متوسط معامل اللون الكوارك - ضد الكوارك الابتدائين

$$\not{p} = p_\alpha \gamma^\alpha \quad \text{لدينا}$$

بتطبيق خواص الاثر

$$Tr[\gamma^\mu \gamma^\nu] = 4g^{\mu\nu}$$

$$Tr[\gamma^\alpha \gamma^\beta \gamma^\mu \gamma^\nu] = 4[g^{\alpha\beta} g^{\mu\nu} + g^{\alpha\nu} g^{\beta\mu} - g^{\alpha\mu} g^{\beta\nu}]$$

نهمل الكتلة m أمام الطاقة و نحصل على العبارة التالية :

$$\begin{aligned}
 & Tr \left(p_2^\alpha \gamma_\alpha \gamma_\mu p_1^\beta \gamma_\beta \gamma_\nu \right) Tr \left(p_3^\alpha \gamma_\alpha \gamma_\nu p_4^\beta \gamma_\beta \gamma_\mu \right) \\
 &= p_2^\alpha p_1^\beta Tr(\gamma_\alpha \gamma_\mu \gamma_\beta \gamma_\nu) p_3^\alpha p_4^\beta Tr(\gamma_\alpha \gamma_\nu \gamma_\beta \gamma_\mu) \\
 &= p_2^\alpha p_1^\beta (g_{\alpha\mu} g_{\beta\nu} - g_{\alpha\beta} g_{\mu\nu} + g_{\alpha\nu} g_{\beta\mu}) p_3^\alpha p_4^\beta (g_{\alpha\nu} g_{\beta\mu} - g_{\alpha\beta} g_{\nu\mu} \\
 &\quad + g_{\alpha\mu} g_{\beta\nu}) \\
 &= (p_{2\mu} p_{1\nu} - p_{2\beta} p_2^\beta g_{\mu\nu} + p_{2\nu} p_{1\mu}) 4 (p_{3\nu} p_{4\mu} - p_{3\beta} p_4^\beta g_{\mu\nu} + p_{3\mu} p_{4\nu}) \\
 &= 16[(p_1 p_3)(p_2 p_4) + (p_2 p_3)(p_1 p_4) + (p_2 p_3)(p_1 p_4) + (p_2 p_4)(p_1 p_3)] \\
 &= 32[(p_1 p_3)(p_2 p_4) + (p_2 p_3)(p_1 p_4)] \tag{16-II}
 \end{aligned}$$

ولدينا ايضا

$$Tr[T^a T^b] = \frac{1}{2} \delta_{ab}$$

$$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot Tr[T^a T^b] \cdot Tr[T^a T^b] = \frac{1}{9} [C(r)]^2 \delta^{ab} \delta^{ab} = \frac{2}{9}$$

$$C_r = \frac{1}{2} \quad \text{حيث } C_r \text{ يمثل معامل الاشعاع}$$

نقوم بالتعويض في علاقة مربع السعة

$$|\bar{M}|^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 (-ig)^4 \left(\frac{1}{q^4}\right)^2 \frac{2}{9} [32(p_1 p_3)(p_2 p_4) + (p_2 p_3)(p_1 p_4)] \tag{17-II}$$

نستخدم متغيرات Mandelstam [12]:

$$\hat{s} = (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2 \cong 2p_1 p_2 \cong 2p_3 p_4 \tag{18-II}$$

$$\hat{t} = (p_1 - p_3)^2 = (p_2 - p_4)^2 \cong -2p_1 p_3 \cong -2p_2 p_4 \tag{19-II}$$

$$\hat{u} = (p_1 - p_4)^2 = (p_2 - p_3)^2 \cong -2p_1 p_4 \cong -2p_2 p_3 \tag{20-II}$$

ومنه

$$32[(p_1 p_3)(p_2 p_4) + (p_2 p_3)(p_1 p_4)] = 8(\hat{t}^2 + \hat{u}^2)$$

نكتب مربع السعة بدلالة المتغيرات:

$$|\bar{M}|^2 = \frac{4g^4}{9q^4} [\hat{t}^2 + \hat{u}^2] \quad (21-II)$$

عبارة ثابت البنية الدقيقة يكتب على الشكل التالي:

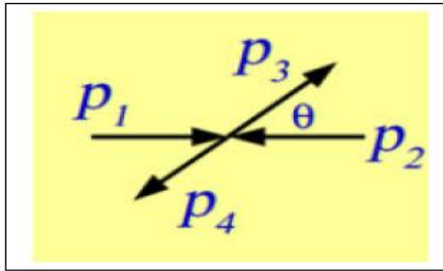
$$\alpha_s = \frac{g^2}{4\pi} \Rightarrow g^4 = (4\pi)^2 \alpha_s^2 = 16\pi^2 \alpha_s^2$$

$$q^2 = (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2 = \hat{s} \Rightarrow q^4 = \hat{s}^2 \quad \text{ولدينا كذلك}$$

ومنه:

$$|\bar{M}|^2 = \frac{64}{9} \pi^2 \alpha_s^2 \left[\frac{\hat{t}^2 + \hat{u}^2}{\hat{s}^2} \right] \quad (22-II)$$

في نظام مركز الكتلة



$$P_1 = \frac{\sqrt{\hat{s}}}{2} (1, 0, 0, 1) \quad (23-II)$$

$$P_2 = \frac{\sqrt{\hat{s}}}{2} (1, 0, 0, -1) \quad (24-II)$$

$$P_3 = \frac{\sqrt{\hat{s}}}{2} (1, \sin\theta, 0, \cos\theta) \quad (25-II)$$

$$P_4 = \frac{\sqrt{\hat{s}}}{2} (1, \sin\theta, 0, -\cos\theta) \quad (26-II)$$

$$\begin{cases} \hat{t} = \frac{-\hat{s}}{2} (1 - \cos\theta) \\ \hat{u} = \frac{-\hat{s}}{2} (1 + \cos\theta) \end{cases} \quad (27-II)$$

نحسب المقدار التالي

$$\begin{aligned} t^2 + u^2 &= \frac{\hat{s}^2}{4} [(1 - \cos\theta)^2 + (1 + \cos\theta)^2] \\ &= \frac{\hat{s}^2}{4} [1 + \cos^2\theta - 2\cos\theta + 1 + \cos^2\theta + 2\cos\theta] \\ &= \frac{\hat{s}^2}{2} [1 + \cos^2\theta] \end{aligned} \quad (28-II)$$

$$|\bar{M}|^2 = \frac{64}{9} \pi^2 \alpha_s^2 \frac{1}{\hat{s}^2} \frac{\hat{s}^2}{2} [1 + \cos^2 \theta] \quad (29-II)$$

ومنه عبارة السعة كالتالي :

$$|\bar{M}|^2 = \frac{32}{9} \pi^2 \alpha_s^2 [1 + \cos^2 \theta] \quad (30-II)$$

المقطع الفعال :

عبارة المقطع الفعال حسب القاعدة الذهبية fermi هي جداء مربع السعة وفضاء الطور اذن تكتب كما يلي :

$$\sigma = \frac{1}{4E_1 E_2} |M^2| d\varphi = \frac{1}{2\hat{s}} |M^2| d\varphi \quad (31-II)$$

بحيث $d\varphi$ تمثل فضاء الطور لجسيمين:

$$d\varphi = (2\pi)^4 \delta^4(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) \frac{d^3 p_3}{(2\pi)^3 2E_3} \frac{d^3 p_4}{(2\pi)^3 2E_4} \quad (32-II)$$

$$d\varphi = \frac{d\cos\theta}{16\pi} \quad (33-II)$$

اذن تصبح عبارة المقطع الفعال :

$$d\hat{\sigma} = \frac{32}{9} \frac{\pi^2 \alpha_s^2}{2\hat{s}} [1 + \cos^2 \theta] \frac{d\cos\theta}{16\pi} \quad (34-II)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{2}{18} \frac{\pi \alpha_s^2}{\hat{s}} \int_{-1}^1 [1 + \cos^2 \theta] d\cos\theta \quad (35-II)$$

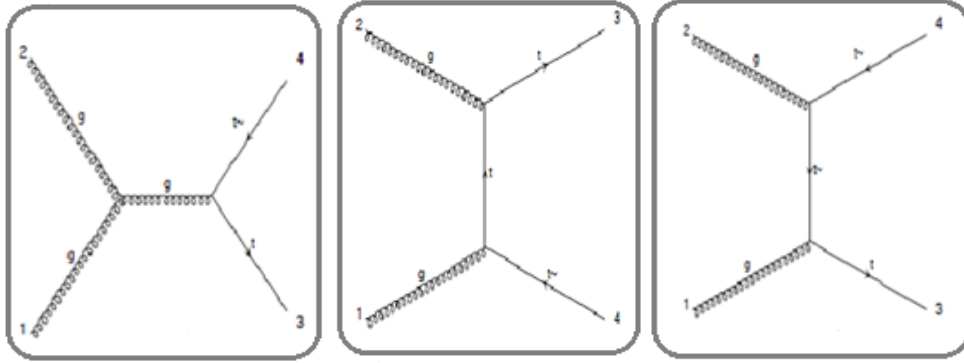
لدينا :

$$\int_{-1}^1 [1 + \cos^2 \theta] d\cos\theta = \frac{8}{3}$$

و منه عبارة المقطع الفعال البارتنوني كالتالي :

$$\hat{\sigma} = \frac{8}{27} \frac{\pi \alpha_s^2}{\hat{s}} \quad (36-II)$$

2. حساب سعة التفاعل $g g \rightarrow (g/t/\bar{t}) \rightarrow t \bar{t}$



السعة الكلية M تتمثل في مجموع احتمال السعات M_1 ، M_2 و M_3 و بالتالي في الانبعثات الحقيقية هناك 9 احتمالات متمثلة في :

$$M = M_1 + M_2 + M_3$$

$$M^2 = MM^+ = |M_1 + M_2 + M_3| |M_1^+ + M_2^+ + M_3^+|$$

$$= M_1 M_1^+ + M_1 M_2^+ + M_1 M_3^+ + M_2 M_1^+ + M_2 M_2^+ + M_2 M_3^+ + M_3 M_1^+ + M_3 M_2^+ + M_3 M_3^+$$

حساب مربع السعات

السعة الأولى: $g g \rightarrow \bar{t} \rightarrow t \bar{t}$

$$M_1 = \{ \bar{u}(p_1) [-ig(T^a)\gamma^\mu] \varepsilon_\mu(k_1) \} \frac{i\delta^{ij}}{p-m+i\lambda} \{ v(p_2) [-ig(T^b)\gamma^\nu] \varepsilon_\nu(k_2) \} \quad (37-II)$$

أشعة استقطاب واردة $\varepsilon_\mu(k_1)$ ، $\varepsilon_\nu(k_2)$

وسيط انتشار فرميون $\frac{i\delta^{ij}}{p-m+i\lambda}$

مرافق السعة الأولى :

$$M_1^+ = \left[\{ \bar{u}(p_1) [-ig(T^a)\gamma^\mu] \varepsilon_\mu(k_1) \} \frac{i\delta^{ij}}{p-m+i\lambda} \{ v(p_2) [-ig(T^b)\gamma^\nu] \varepsilon_\nu(k_2) \} \right]^+ \quad (38-II)$$

باستخدام خواص جبر *Cilfford* :

$$M_1^+ = \{ \varepsilon_\alpha^*(k_1) [-ig(T^a)\gamma^\alpha] u(p_1) \} \frac{i\delta^{ij}}{p-m+i\lambda} \{ \varepsilon_\beta^*(k_2) [-ig(T^b)\gamma^\beta] \bar{v}(p_2) \}$$

$$M_1^+ = (-ig)^2 \frac{-i\delta^{ij}}{p-m+i\lambda} \{T^a T^b\} \{\varepsilon_\alpha^*(k_1)[\gamma^\alpha]u(p_1)\} \{\varepsilon_\beta^*(k_2)[\gamma^\beta]\bar{v}(p_2)\} \quad (39-II)$$

مربع السعة الأولى :

$$M_1 M_1^+ = -(-ig)^4 \frac{\delta^{ij}\delta^{ij}}{(p-m+i\lambda)^2} (T^a)_{ji}(T^b)_{i'j'}(T^a)_{kl}(T^b)_{l'k'}$$

$$\times \left\{ \bar{u}_a(p_1)[\gamma^\mu]_{ab}\varepsilon_{\mu b}(k_1)v_c(p_2)[\gamma^\nu]_{cd}\varepsilon_{\nu d}(k_2) \right\}$$

$$\times \left\{ \varepsilon_{\alpha e}^*(k_1)[\gamma^\alpha]_{ef}u_f(p_1)\varepsilon_{\beta g}^*(k_2)[\gamma^\beta]_{gh}\bar{v}_h(p_2) \right\}$$

بعد التبسيط :

$$M_1 M_1^+ = -(-ig)^4 \frac{\delta^{ij}\delta^{ij}}{(p-m+i\lambda)^2} (T^a)_{ji}(T^b)_{i'j'}(T^a)_{kl}(T^b)_{l'k'}$$

$$\times \left\{ u_f(p_1)\bar{u}_a(p_1)[\gamma^\mu]_{ab}\varepsilon_{\mu b}(k_1)\varepsilon_{\alpha e}^*(k_1)[\gamma^\alpha]_{ef} \right\}$$

$$\times \left\{ \varepsilon_{\nu d}(k_2)\varepsilon_{\nu d}(k_2)\varepsilon_{\beta g}^*(k_2)[\gamma^\beta]_{gh}v_c(p_2)[\gamma^\nu]_{cd} \right\} \quad (40-II)$$

السعة الثانية : $g g \rightarrow t \rightarrow t \bar{t}$

$$M_2 = \{v(p_2)[-ig(T^a)\gamma^\mu]\varepsilon_\mu(k_1)\} \frac{i\delta^{ij}}{p-m+i\lambda} \{\bar{u}(p_2)[-ig(T^a)\gamma^\mu]\varepsilon_\mu(k_1)\}$$

$$M_2 = (-ig)^2 \frac{i\delta^{ij}}{p-m+i\lambda} \{T^a T^b\} \{v(p_1)[\gamma^\mu]\varepsilon_\mu(k_1)\} \{\bar{u}(p_2)[\gamma^\nu]\varepsilon_\nu(k_2)\} \quad (41-II)$$

مرافق السعة الثانية :

$$M_2^+ = \left[(-ig)^2 \frac{i\delta^{ij}}{p-m+i\lambda} \{T^a T^b\} \{v(p_1)[\gamma^\mu]\varepsilon_\mu(k_1)\} \{\bar{u}(p_2)[\gamma^\nu]\varepsilon_\nu(k_2)\} \right]^+ \quad (42-II)$$

$$M_2^+ = (-ig)^2 \frac{-i\delta^{ij}}{p-m+i\lambda} \{T^a T^b\} \{\varepsilon_\alpha^*(k_1)[\gamma^\alpha]\bar{v}(p_2)\} \{\varepsilon_\beta^*(k_2)[\gamma^\beta]u(p_2)\} \quad (43-II)$$

مربع السعة الثانية :

$$M_2 M_2^+ = (-ig)^4 \frac{\delta^{ij} \delta^{ij}}{(\not{p} - m + i\lambda)^2} (T^a)_{ji} (T^b)_{i'j'} (T^a)_{kl} (T^b)_{l'k'}$$

$$\left\{ v_a(p_1) [\gamma^\mu]_{ab} \varepsilon_{\mu b}(k_1) \bar{u}_c(p_2) [\gamma^\nu]_{cd} \varepsilon_{\nu d}(k_2) \varepsilon_{\alpha e}^*(k_1) [\gamma^\alpha]_{ef} \bar{v}_f(p_2) \varepsilon_{\beta g}^*(k_2) [\gamma^\beta]_{gh} u_h(p_2) \right\}$$

بعد التبسيط :

$$M_2 M_2^+ = (-ig)^4 \frac{\delta^{ij} \delta^{ij}}{(\not{p} - m + i\lambda)^2} (T^a)_{ji} (T^b)_{i'j'} (T^a)_{kl} (T^b)_{l'k'}$$

$$\left\{ u_h(p_2) \bar{u}_c(p_2) [\gamma^\nu]_{cd} \varepsilon_{\nu d}(k_2) \varepsilon_{\beta g}^*(k_2) [\gamma^\beta]_{gh} \varepsilon_{\mu b}(k_1) \varepsilon_{\alpha e}^*(k_1) [\gamma^\alpha]_{ef} v_a(p_1) \bar{v}_f(p_2) [\gamma^\mu]_{ab} \right\}$$

(44-II)

السعة الثالثة : $g g \rightarrow g \rightarrow t \bar{t}$

$$M_3 =$$

$$\varepsilon(k_1) \left\{ -g_s f^{\alpha\beta\gamma} [g_{\nu\mu}(-k_2 + k_1)_\lambda + g_{\mu\lambda}(-k_1 - q)_\nu + \right.$$

$$\left. g_{\lambda\nu}(q + k_2)_\mu \right\} \varepsilon(k_2) \left[\frac{-g_{\mu\nu} \delta^{ab}}{q^2} \right] \bar{u}(p_1) [-ig_s (T_a) \gamma_\mu] v(p_2) \quad (45-II)$$

$$[11] \quad [g_{\nu\mu}(-k_2 + k_1)_\lambda + g_{\mu\lambda}(-k_1 - q)_\nu + g_{\lambda\nu}(q + k_2)_\mu]$$

في هذه الحالة نقوم بتبسيط العبارة باستخدام

$$q = k_1 + k_2$$

$$q^2 = k_1^2 + k_2^2 + 2k_1 k_2$$

$$\begin{cases} k_1^2 = 0 \\ k_2^2 = 0 \end{cases}$$

بما أن الغلوون بدون كتلة نكتب :

ومنه

$$M_3 = -ig_s^2 \frac{\delta^{ab}}{2k_1 k_2} f^{\alpha\beta\gamma} (T_a) \varepsilon(k_1) \varepsilon(k_2) [g_{\nu\mu}(-k_2 + k_1)_\lambda + g_{\mu\lambda}(-k_1 - q)_\nu + g_{\lambda\nu}(q + k_2)_\mu] \bar{u}(p_1) \gamma_\mu v(p_2) \quad (46-II)$$

بعد التبسيط:

$$M_3 = ig_s^2 \frac{1}{2k_1k_2} f^{\alpha\beta\gamma} (T_a) \bar{u}(p_1) [\varepsilon(k_1)\varepsilon(k_2)(k_2 - k_1) + 2(k_1 \cdot \varepsilon(k_2))\varepsilon(k_1) + \varepsilon(k_2) \cdot k_2 \varepsilon(k_1) + 2(k_2 \cdot \varepsilon(k_1))\varepsilon(k_2) + \varepsilon(k_1) \cdot k_1 \varepsilon(k_2)] v(p_2) \quad (47-II)$$

باستخدام الشرطين:

$$\varepsilon(k_1) \cdot k_1 = \varepsilon(k_2) \cdot k_2 = 0$$

تصبح عبارة السعة كالتالي:

$$M_3 = \frac{ig_s^2}{2} \frac{1}{k_1k_2} \bar{u}(p_1) \left[\varepsilon(k_1)\varepsilon(k_2)(K_2 - K_1) + 2(k_1 \cdot \varepsilon(k_2))\varepsilon(k_1) + 2(k_2 \cdot \varepsilon(k_1))\varepsilon(k_2) \right] v(p_2) f^{\alpha\beta\gamma} (T_a) \quad (48-II)$$

مرافق السعة الثالثة:

$$M_3^+ = \left\{ \frac{ig_s^2}{2} \frac{1}{k_1k_2} \bar{u}(p_1) [\varepsilon(k_1)\varepsilon(k_2)(K_2 - K_1) + 2(k_1 \cdot \varepsilon(k_2))\varepsilon(k_1) + 2(k_2 \cdot \varepsilon(k_1))\varepsilon(k_2)] v(p_2) f^{\alpha\beta\gamma} (T_a) \right\}^+$$

(49-II)

مربع السعة الثالثة :

$$M_3 M_3^+ = \left\{ \frac{ig_s^2}{2} \frac{1}{k_1k_2} \bar{u}(p_1) [\varepsilon(k_1)\varepsilon(k_2)(K_2 - K_1) + 2(k_1 \cdot \varepsilon(k_2))\varepsilon(k_1) + 2(k_2 \cdot \varepsilon(k_1))\varepsilon(k_2)] v(p_2) f^{\alpha\beta\gamma} (T_a) \right\} \times \left\{ \frac{ig_s^2}{2} \frac{1}{k_1k_2} \bar{u}(p_1) [\varepsilon(k_1)\varepsilon(k_2)(K_2 - K_1) + 2(k_1 \cdot \varepsilon(k_2))\varepsilon(k_1) + 2(k_2 \cdot \varepsilon(k_1))\varepsilon(k_2)] v(p_2) f^{\alpha\beta\gamma} (T_a) \right\}^+$$

(50-II)

باقي خطوات الحساب تتم بنفس الطريقة كما هو موضح في حساب المقطع الفعال السابق لإفناء كوارك

و ضد كوارك.

ومنه المقطع الفعال البارونوني لانصهار غلوونين عبر ثلاث وسائط انتشار يكتب على الشكل الآتي [12]:

$$\frac{d\sigma}{d\hat{t}} (gg \rightarrow q\bar{q}) = \frac{\pi\alpha_s^2}{6\hat{s}^2} \left[\frac{\hat{u}}{\hat{t}} + \frac{\hat{t}}{\hat{u}} - \frac{9}{4} \left(\frac{\hat{t}^2 + \hat{u}^2}{\hat{s}^2} \right) \right] \quad (51-II)$$

الفصل الثالث:

الكوارك القمي وعلاقته

ببوزون الهيغز

III - مقدمة:

أعلنت تجارب ATLAS و CMS عن اكتشاف بوزون الهيغز في جويلية 2012 الذي تنبأ به النموذج المعياري (SM)، حيث أن آلية بوزون الهيغز تهدف أساسا لمعرفة أصل اكتساب الجسيمات لكتلتها وهو يعد المحفز الرئيسي لبناء LHC .

دراستنا في هذا الفصل ستبدأ بذكر أنماط إنتاج بوزون الهيغز في (LHC)، هذا الإنتاج يكون من خلال 4 أنماط رئيسية و التي سنذكرها ضمن شرحنا بالإضافة إلى إلقاء نظرة حول اضمحلاله ، سنتطرق كذلك إلى دراسة الإنبعثات الحقيقية و الافتراضية التي تصدر عن الكواركات في المستويات العليا للطاقة (NLO) و سنقوم في الأخير بحساب المقطع الفعال لإنتاج بوزون الهيغز من حلقة كوارك .

III-1 - إنتاج بوزون الهيغز في مصادم الهادرونات الكبير وعلاقته بالكوارك القمي

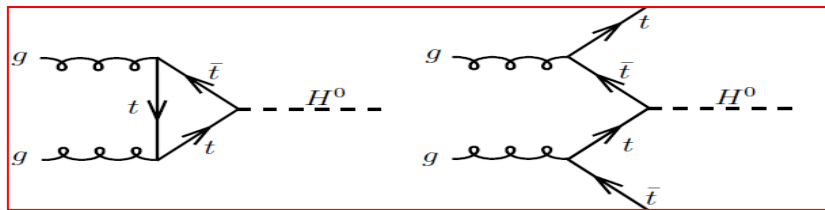
في النموذج المعياري الآليات الرئيسية لإنتاج جسيمات الهيغز في تصادم pp تتطلب اقتران بوزون الهيغز مع الجسيمات الثقيلة مثل البوزونات الشعاعية Z و W وأيضا الكوارك القمي (Top) وبدرجة أقل كوارك القعري ($bottom$)، التفاعلات الرئيسية المبينة في الشكل (III-1) و التي من خلالها يمكن إنتاج الهيغز المفرد هي: [7]

(أ) - اندماج غلوونين : $gg \rightarrow hh$

(ب) - الإنتاج المرتبط مع الكواركات الثقيلة Top : $gg, q\bar{q} \rightarrow q'\bar{q}' + h$

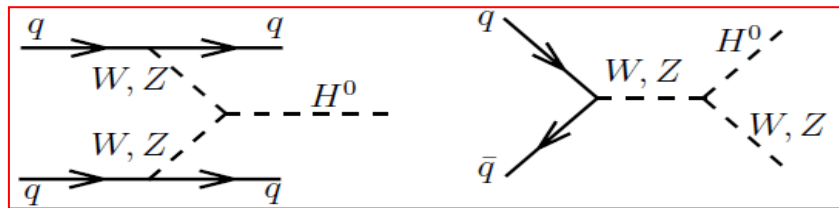
(ج) - الإنتاج المرتبط مع W/Z : $q\bar{q} \rightarrow V + h$

(د) - اندماج بوزونين شعاعيين : $qq \rightarrow V^*V^* \rightarrow qq + h$



(ب)

(أ)



(د)

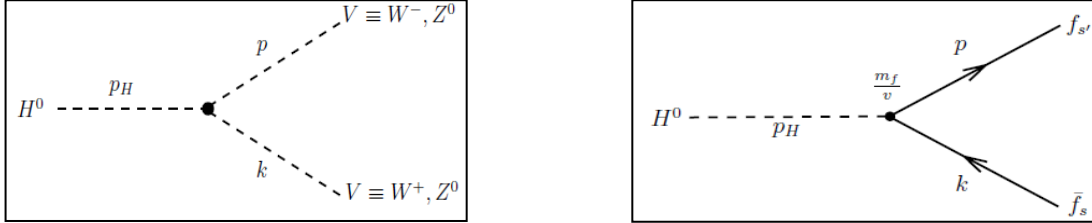
(ج)

الشكل (III-1) : مخططات فينمان الرئيسية لإنتاج الهيغز المفرد.

III - 2 - إضمحلال بوزون الهيغز

يمكن أن يضمحل بوزون الهيغز إلى زوج من الكواركات و اللبتونات و إلى زوج من البوزونات الضعيفة

V مباشرة، و ذلك عند المستوى الشجري (tree level). [7].

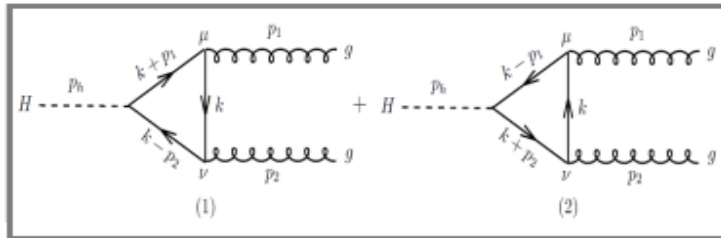


الشكل (III - 2) : مخطط فينمان من أجل إضمحلال بوزون الهيغز إلى فرميون وضده (يمين) وإلى زوج من البوزونات الضعيفة (يسار).

بينما اضمحلاله بواسطة حلقة واحدة (one_loop) يمكن أن يكون إلى فوتونين، أو غلوونين، أو إلى فوتون وبوزون Z هذا ما مكننا بالتنبؤ بمعدلات التفرع للإضمحلال لكي نختار القنوات المناسبة الدالة على بوزون الهيغز بوضوح مع أخذ الخلفيات العامة بعين الاعتبار .

• إضمحلال الهيغز إلى غلوونين

هذا الإضمحلال لا يمكن أن يتم مباشرة لأن الغلوونات عديمة الكتلة، و لكن يكون بواسطة حلقة كواركات، و الإضمحلال بواسطة حلقة اللبتونات لا يوجد لأنها عديمة الشحنة اللونية .

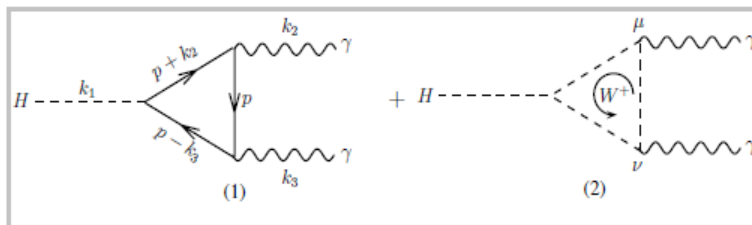


الشكل (III - 3) : مخطط فينمان من أجل إضمحلال البوزون هيغز إلى غلوونين.

• إضمحلال الهيغز إلى فوتونين

هذا الإضمحلال لا يمكن إلا من خلال حلقة loop، في هذه الحالة لدينا حلقتين الأولى بواسطة حلقة

الفرميونات و الثانية حلقة البوزونات W على الترتيب كما هو في الشكل (III - 5) :

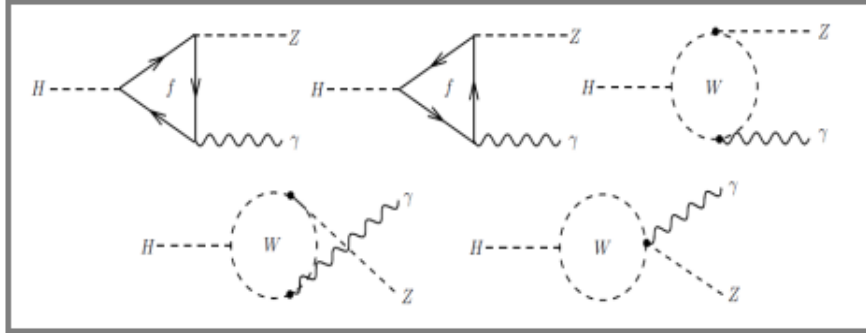


الشكل (III - 4) : مخطط فينمان من أجل إضمحلال بوزون الهيغز إلى فوتونين عبر حلقة الفرميونات وحلقة بوزونات.

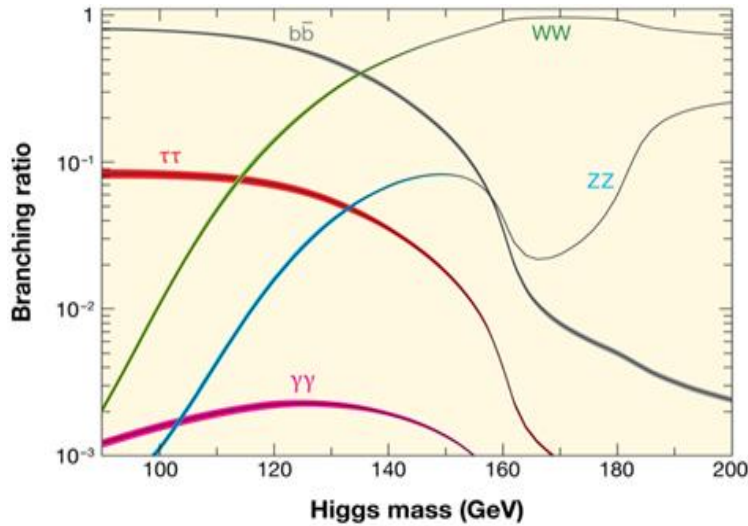
• إضمحلال الهيغز إلى فوتون و بوزون Z

يمكن إنتاجهما بواسطة حلقات تتضمن جسيمات مشحونة كهربائيا ولونيات ثقيلة كي تزوج مع الهيغز كما

يوضح الشكل الموالي :



الشكل (III-5) : مخطط فينمان من أجل إضمحلال بوزون الهيغز إلى فوتون وبوزون Z.

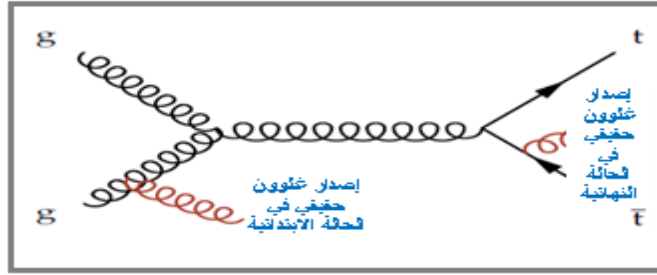


الشكل (III-6) : رسم بياني يوضح تفرعات إضمحلال بوزون الهيغز.

III-3 - إنبعثات الكروموديناميك الكمي

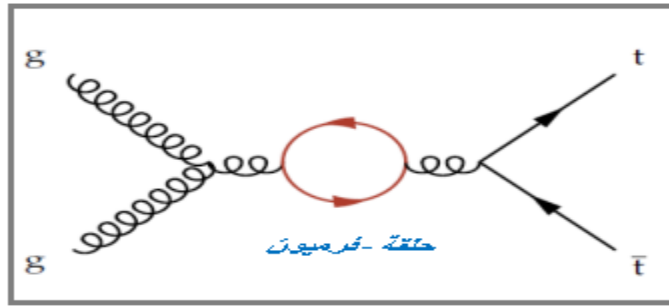
III-3-1 - الإنبعثات الحقيقية

تصدر عن البارتنون ولا تمتص أي تظهر على شكل إنبعثات من الحالة الابتدائية أو النهائية (Final State Radition, Initial State Radition)، بالإضافة إلى أنها تؤثر على عبارة فضاء الطور لأنها تتعلق بمجموع الجسيمات النهائية و الابتدائية المشاركة في التفاعل و بالتالي سعة التفاعل الكلية تتمثل في مجموع الاحتمالات للإنبعثات الحقيقية .



III-3-2 - الإنبعثات الافتراضية

عند الزيادة في الطاقة يصدر البارتون إنبعثات افتراضية (غلون أو كوارك) ثم يمتصها بحيث أنها لا تظهر في الحالة النهائية، لا تؤثر الانبعثات الافتراضية على عبارة فضاء الطور، لكن في حساب السعة تكون المسألة معقدة بسبب التكامل على الحلقات . *Calculation of loop*



III-3-2-1 - إعادة التقنين Renormalization

هي تقنية حسابية تحليلية نستعملها من أجل حل مشكلة الحدود اللامنتهية التي تظهر في حساب التكامل على الحلقات في المقطع الفعال و ذلك بامتصاص التباعدات فوق البنفسجية (UV) أو الحمراء (IR) التي يتم فيها إنتهاك لإنحفاظ الطاقة في مركز التفاعل باستخدام أبعاد لامنتهية.

III-3-2-2 - إعادة التسوية Regularizatio Dimensionnel

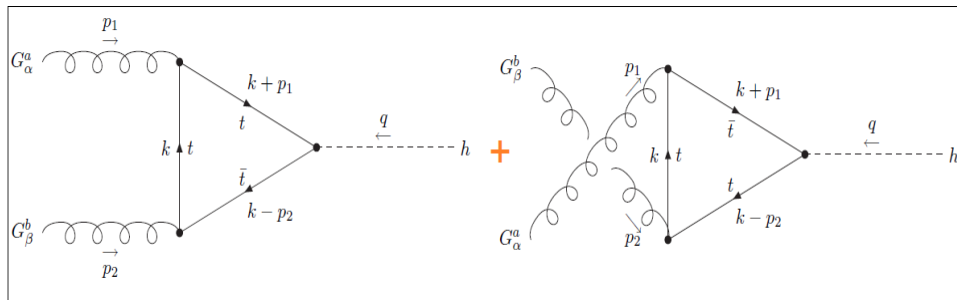
هي الرجوع إلى الفضاء الزمني بعد تبسيط الحدود اللانهائية الناتجة عن استقطاب الفراغ و خلق و تدمير الجسيمات الافتراضية، إلى حدود منتهية .

✓ كل خطوات التقنيتين مفصلة في الحساب الموالي

III-4 - حساب المقطع الفعال لإنتاج بوزون الهيغز

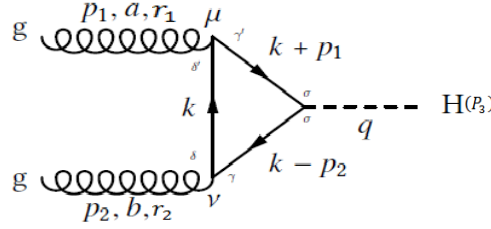
لنحسب سعة التفاعل التالي :

$$gg \rightarrow h$$



السعة الكلية M تتمثل في مجموع إحتمال السعات M_1, M_2 ، لكن في هذه الحالة $M_1 = M_2$ إذن

سنحسب M_1 فقط.



نستخدم قوانين فينمان التي تسمح بكتابة سعة التفاعل

$$M_1 = \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \left[\frac{-iy_t}{\sqrt{2}} \delta_{\sigma\gamma'} \delta_{\delta'\delta} \delta_{\gamma\sigma} \right] \frac{i(\mathbb{K} + p_1 + m)}{(k + p_1)^2 - m^2} [-ig_s(T^a)_{\delta'\gamma'} \gamma^\mu] \frac{i(\mathbb{K} + m)}{[k^2 - m^2]} [-ig_s(T^b)_{\gamma\delta} \gamma^\nu] \times \frac{i(\mathbb{K} - p_2 + m)}{(k - p_2)^2 - m^2} \varepsilon_{\mu, r_1}(p_1) \varepsilon_{\nu, r_2}(p_2) \quad (1-III)$$

• $\frac{-iy_t}{\sqrt{2}} \delta_{\delta\delta'} \delta_{\gamma'\sigma} \delta_{\sigma\gamma}$ قيمة (Couplage de Yukawa) هي نقطة تفاعل هيغز_ فرميون

$$\frac{y_t}{\sqrt{2}} = \frac{m_t}{v} \sim \frac{175}{246}$$

حيث:

m_t كتلة الكوارك القمي

v القيمة المتوقعة للفراغ في حقل هيغز

نقوم بتبسيط العبارة M :

$$M_1 = -i(g_s)^2 \frac{m_t}{v} \varepsilon_{\mu, r_1}(p_1) \varepsilon_{\nu, r_2}(p_2) (T^a)_{\delta'\gamma'} (T^b)_{\gamma\delta} \delta_{\delta\delta'} \delta_{\gamma'\sigma} \delta_{\sigma\gamma} \times \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{Tr\{(\mathbb{K} + p_1 + m_t) \gamma^\mu (\mathbb{K} + m_t) \gamma^\nu (\mathbb{K} - p_2 + m_t)\}}{[(k + p_1)^2 - m_t^2][k^2 - m_t^2][(k - p_2)^2 - m_t^2]}$$

نعلم أن:

$$(T^a)_{\delta'\gamma'} (T^b)_{\gamma\delta} \delta_{\delta\delta'} \delta_{\gamma'\sigma} \delta_{\sigma\gamma} = Tr\{T^a T^b\} = \frac{1}{2} \delta_{ab}$$

و منه تصبح عبارة السعة تكتب على الشكل التالي:

$$M_1 = -i(g_s)^2 \frac{m_t}{2v} \varepsilon_{\mu,r_1}(p_1) \varepsilon_{\nu,r_2}(p_2) \delta_{ab} \times \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{\text{Tr}\{(\mathbb{K} + p_1 + m_t)\gamma^\mu(\mathbb{K} + m_t)\gamma^\nu(\mathbb{K} - p_2 + m_t)\}}{[(k + p_1)^2 - m_t^2][k^2 - m_t^2][(k - p_2)^2 - m_t^2]} \quad (2-III)$$

نضع :

$$I^{\mu\nu} = \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{\text{Tr}\{(\mathbb{K} + p_1 + m_t)\gamma^\mu(\mathbb{K} + m_t)\gamma^\nu(\mathbb{K} - p_2 + m_t)\}}{[(k + p_1)^2 - m_t^2][k^2 - m_t^2][(k - p_2)^2 - m_t^2]} \quad (3-III)$$

لنبسّط العبارة $I^{\mu\nu}$:

نبدأ أولاً بالبسط :

$$\begin{aligned} & \text{Tr}\{(\mathbb{K} + p_1 + m_t)\gamma^\mu(\mathbb{K} + m_t)\gamma^\nu(\mathbb{K} - p_2 + m_t)\} \\ &= \text{Tr}(\mathbb{K}\gamma^\mu + p_1\gamma^\mu + m_t\gamma^\mu)(\mathbb{K}\gamma^\nu + m_t\gamma^\nu)(\mathbb{K} - p_2 + m_t) \\ &= \text{Tr}[\mathfrak{p}_1\gamma^\mu\mathbb{K}\gamma^\nu + \mathfrak{p}_1\gamma^\mu\gamma^\nu\mathbb{K}] - \text{Tr}[\mathfrak{p}_1\gamma^\mu\gamma^\nu\mathfrak{p}_2] + [\mathbb{K}\gamma^\mu\mathbb{K}\gamma^\nu + \gamma^\mu\mathbb{K}\gamma^\nu\mathbb{K}] + \text{Tr}[\mathbb{K}\gamma^\mu\gamma^\nu\mathbb{K}] - \\ & \quad \text{Tr}[\mathbb{K}\gamma^\mu\gamma^\nu\mathfrak{p}_2 + \gamma^\mu\mathbb{K}\gamma^\nu\mathfrak{p}_2] + m_t^2 \cdot \text{Tr}[\gamma^\mu\gamma^\nu] \end{aligned} \quad (4-III)$$

باستعمال خواص المصفوفات و الأثر :

$$\{\gamma^\alpha, \gamma^\beta\} = 2g^{\alpha\beta}$$

$$\text{Tr}[\gamma^\mu\gamma^\nu] = 4g^{\mu\nu}$$

$$\text{Tr}[\gamma^\mu\gamma^\nu\gamma^\rho\gamma^\sigma] = 4(g^{\mu\nu}g^{\rho\sigma} + g^{\mu\sigma}g^{\nu\rho} - g^{\mu\rho}g^{\nu\sigma})$$

نجد أن :

$$\begin{aligned} & \text{Tr}\{(\mathbb{K} + p_1 + m_t)\gamma^\mu(\mathbb{K} + m_t)\gamma^\nu(\mathbb{K} - p_2 + m_t)\} \\ &= 4m_t(p_2^\mu p_1^\nu + 4k^\mu k^\nu - 2k^\mu p_2^\nu + 2p_1^\mu k^\nu \\ & \quad + p_1^\mu p_2^\nu + g^{\mu\nu}(m_t^2 - p_1 p_2) - g^{\mu\nu}k^2 \\ &= 4m_t N^{\mu\nu} \end{aligned} \quad (5-III)$$

ثانيا لنبسط المقام :

باستخدام وسيط فاينمان

$$\frac{1}{ABC} = \int_0^1 dx \int_0^1 dy \int_0^1 dz \delta(x + y + z - 1) \frac{2!}{D^3} \quad (6-III)$$

حيث:

$$D = Ax + By + Cz$$

بالمقارنة مع المقام نضع :

$$A = (k + p_1)^2 - m_t^2, \quad B = k^2 - m_t^2, \quad C = (k - p_2)^2 - m_t^2$$

ومنه

$$D = [(k + p_1)^2 - m_t^2]x + (k^2 - m_t^2)Y + [(k - p_2)^2 - m_t^2]z \quad (7-III)$$

$$P_1^2 = P_2^2 = 0 \quad \text{بما أن الغلونات ليس لها كتلة تطبق :}$$

$$x + y + z = 1 \quad \text{مع أخذ}$$

وبعد التبسيط نجد :

$$D = k^2 - m_t^2 + 2kp_1x - 2kp_2z \quad (8-III)$$

حيث يمكن كتابة D على الشكل:

$$D = (k + p_1x - p_2z)^2 - 2p_1p_2xz - m_t^2 \quad (9-III)$$

نعرف a متغير جديد بدلالة كتلة الهيغز :

$$a = m_t^2 - 2(p_1p_2)xz$$

$$a = m_t^2 - 2M_H^2xz$$

$$2(p_1p_2) = M_H^2 \quad \text{حيث :}$$

و منه تصبح D معرفة كالتالي :

$$D = (k + p_1x - p_2z)^2 - a^2 \quad (10-III)$$

نقوم بتعويض (5-III) و(10-III) في المعادلة (3-III) نجد :

$$I^{\mu\nu} = \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \int_0^1 dx \int_0^{1-x} dz \frac{8m_t N^{\mu\nu}}{[(k+p_1x-p_2z)^2-a^2]^3} \quad (11-III)$$

نقوم بتغيير المتغير في المعادلة (11-III) حيث نضع: $k \rightarrow k - p_1x - p_2z$

و ذلك لكي تصبح تكتب على الشكل التكاملي الآتي:

$$J(D, \alpha, \beta, a) = \int \frac{d^Dk}{(2\pi)^D} \frac{(k^2)^\alpha}{(k^2-a^2)^\beta} \quad (12-III)$$

و منه نكتب $\mu\nu$ على الشكل التالي:

$$I^{\mu\nu} = \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \int_0^1 dx \int_0^{1-x} dz \frac{8m_t N'^{\mu\nu}}{[k^2-a^2]^3} \quad (13-III)$$

حيث:

$$\begin{aligned} N'^{\mu\nu} = & p_2^\mu p_1^\nu + 4(k - p_1x + p_2z)^\mu (k - p_1x - p_2z)^\nu - 2(k - p_1x - p_2z)^\mu p_2^\nu \\ & + 2p_1^\mu (k - p_1x + p_2z)^\nu - p_1^\mu p_2^\nu + g^{\mu\nu} (m_t^2 - p_1 p_2) \\ & - g^{\mu\nu} (k - p_1x - p_2z)^2 \end{aligned} \quad (14-III)$$

بعد التبسيط تصبح العبارة كالتالي :

$$\begin{aligned} N'^{\mu\nu} = & 4k^\mu k^\nu - g^{\mu\nu} k^2 + p_1^\mu p_2^\nu [-1 - 4xz + 2x + 2z] + p_2^\mu p_1^\nu [1 - 4xz] + p_2^\mu p_2^\nu (4z^2 - 2z) \\ & + p_1^\mu p_1^\nu (4x^2 - 2x) + g^{\mu\nu} (m_t^2 - p_1 p_2 + 2p_1 p_2 xz) \end{aligned} \quad (15-III)$$

- للتخلص من التباعد (*Divergences*) فوق البنفسجي ($k \rightarrow \infty$) نقوم بإعادة التقنين (*Renormalization*) نطبق:

$$J(D, \alpha, \beta, a^2) = \int \frac{d^Dk}{(2\pi)^D} \frac{(k^2)^\alpha}{(k^2-a^2)^\beta} \quad (16-III)$$

$$= \frac{i}{(4\pi)^{D/2}} (a^2)^{D/2} (-a^2)^{\alpha-\beta} \Gamma(\beta - \alpha - D/2) \frac{\Gamma(\alpha + \frac{D}{2})}{\Gamma(\beta) \Gamma(\frac{D}{2})}$$

حيث $D = 4$ يمثل الزمكان (*space_time*)

بمطابقتها مع العلاقة (13-III) نجد :

$$\begin{aligned} J(D, \alpha, \beta, a^2) &= J(4,0,3, a^2) \\ &= \frac{-i}{32\pi^2} \frac{1}{a^2} \end{aligned} \quad (17-III)$$

بسبب تناظر لورنتز نستخدم الخاصية التالية :

$$\int \frac{d^D k}{(2\pi)^D} \frac{(k^2)^\alpha k^\mu k^\nu}{(k^2 - a^2)^\beta} = \frac{g^{\mu\nu}}{D} J(D, \alpha + 1, \beta, a^2) \quad (18-III)$$

حيث أن: $\alpha \rightarrow \alpha + 1$

نقوم بحساب التكامل التنسوري التالي:

$$\begin{aligned} \int \frac{d^D k}{(2\pi)^D} \frac{4k^\mu k^\nu - g^{\mu\nu} k^2}{(k^2 - a^2)^3} &= \left(\frac{4}{D} - 1\right) g^{\mu\nu} J(D, 1, 3, a^2) \\ &= \left(\frac{4}{D} - 1\right) \frac{D}{4} g^{\mu\nu} \frac{i}{(4\pi)^{D/2}} (a^2)^{D/2} \Gamma(2 - D/2) \end{aligned} \quad (19-III)$$

نأخذ: $D = 4 + 2\epsilon$ $\epsilon \ll 1$

$$\left(\frac{4}{D} - 1\right) \frac{D}{4} = -\frac{\epsilon}{2} \quad \text{ومنه}$$

$$\Gamma(2 - D/2) = \Gamma(-\epsilon) \quad \text{والمقدار}$$

$$\Gamma(-\epsilon) = -\frac{1}{\epsilon} - \gamma E + O(\epsilon^2) \quad (20-III)$$

$$\gamma E = 0.577$$

حيث γE ثابت EULER – Mascheroni

ومنه نعوض هذه المقادير و بأخذ $\epsilon \rightarrow 0$ نجد :

$$\int \frac{d^D k}{(2\pi)^D} \frac{4k^\mu k^\nu - g^{\mu\nu} k^2}{(k^2 - a^2)^3} = \frac{ia^4}{32\pi^2} g^{\mu\nu} \quad (21-III)$$

• نعوض كل هذه التبسيطات في عبارة (13-III) لإعادة التسوية

ومنه تصبح العبارة تكتب على الشكل التالي:

$$\begin{aligned} I^{\mu\nu} &= \frac{8m_t i}{32\pi^2} \int_0^1 \int_0^{1-x} \frac{dx dz}{-a^2} \{p_1^\mu p_2^\nu [-1 - 4xz + 2x + 2z] \\ &+ p_2^\mu p_1^\nu [+ p_2^\mu p_2^\nu (4z^2 - 2z) + p_1^\mu p_1^\nu (4x^2 - 2x) + g^{\mu\nu} (m_t^2 - p_1 p_2 \cdot 1 \\ &- 4xz) \} \end{aligned} \quad (22-III)$$

$$\varepsilon_{\mu r i} P_i^\mu = 0 \quad i = 1, 2 \quad \text{نطبق الخاصية :}$$

نجد :

$$I^{\mu\nu} = \frac{8mi}{32\pi^2} \int_0^1 \int_0^{1-x} \frac{dx dz}{-a^2} [p_2^\mu p_1^\nu (1 - 4xz) + g^{\mu\nu} (4p_1 p_2 \cdot xz - p_1 p_2)]$$

$$(23-III)$$

لنبسب المقدار :

$$[p_2^\mu p_1^\nu (1 - 4xz) + g^{\mu\nu} (4p_1 p_2 - p_1 p_2)] = (1 - 4xz) (p_2^\mu p_1^\nu - g^{\mu\nu} p_1 p_2) \quad (24-III)$$

ومنه :

$$I^{\mu\nu} = \frac{8m_t i}{32\pi^2} \int_0^1 \int_0^{1-x} \frac{dx dz}{-a^2} [(1 - 4xz) (p_2^\mu p_1^\nu - g^{\mu\nu} p_1 p_2)] \quad (25-III)$$

نضع :

$$\int_0^1 \int_0^{1-x} \frac{dx dz}{-a^2} [(1 - 4xz)] = C \quad (26-III)$$

إذن تصبح العبارة :

$$I^{\mu\nu} = \frac{8m_t i}{32\pi^2} C (p_2^\mu p_1^\nu - g^{\mu\nu} p_1 p_2) \quad (27-III)$$

في الأخير نكتب سعة التفاعل M :

$$M_1 = -i(g_s)^2 \frac{m_t}{2v} \varepsilon_{\mu, r_1}(p_1) \varepsilon_{\nu, r_2}(p_2) \delta_{ab} I^{\mu\nu} \quad (28-III)$$

$$|M|^2 = |M_1 + M_2|^2 = 4 |M_1|^2 \quad \text{نحسب مربع السعة}$$

$$M_1 = M_2 \Rightarrow |M_1|^2 = |M_1 M_1^+| \quad \text{نعلم أن}$$

مرافق السعة هو :

$$M_1^+ = \left[-i(g_s)^2 \frac{m_t}{2v} \varepsilon_{\mu, r_1}(p_1) \varepsilon_{\nu, r_2}(p_2) \delta_{ab} I^{\mu\nu} \right]^+ \quad (29-III)$$

$$M_1^+ = i(g_s)^2 \frac{m_t}{2v} \varepsilon_{\rho, r_1}^*(p_1) \varepsilon_{\sigma, r_2}^*(p_2) \delta_{ab} I^{*\rho\sigma} \quad (30-III)$$

ومنه يصبح لدينا مربع السعة كتالي :

$$|M|^2 = (g_s)^4 \frac{m_t^2}{v^2} \varepsilon_{\mu, r_1}^* \varepsilon_{\rho, r_1} \varepsilon_{\nu, r_2}^* \varepsilon_{\sigma, r_2} \delta_{ab} \delta_{ab} I^{\mu\nu} I^{*\rho\sigma} \quad (31-III)$$

وباستخدام:

$$|\overline{M}|^2 = \frac{1}{4} \frac{1}{(N_c^2 - 1)^2} |M|^2$$

$$\sum_a \delta_{ab} \delta_{ab} = \sum \delta_{ab} = 8, \quad \sum \varepsilon_{\rho, r_1}^* \varepsilon_{\mu, r_1} \varepsilon_{\sigma, r_1}^* \varepsilon_{\nu, r_2} = g_{\mu\rho} g_{\sigma\nu}$$

تصبح العبارة كالتالي :

$$|\overline{M}|^2 = (g_s)^4 \frac{8m_t^2}{256v^2} I^{\mu\nu} I^*_{\mu\nu} \quad (32-III)$$

حيث:

$$I^{\mu\nu} I^*_{\mu\nu} = \frac{m_t^2 (p_1 p_2)^2 |c|^2}{16\pi^4} \quad (33-III)$$

إذن في الأخير مربع السعة يكتب كالاتي :

$$|\overline{M}|^2 = (g_s)^4 \frac{m_t^4 (p_1 p_2)^2}{256(2v^2\pi^4)} |c|^2 \quad (34-III)$$

بتعويض عبارة C (أنظر للملحق) نجد:

$$|\overline{M}|^2 = \frac{M_H^8}{128v^2} \left(\frac{\alpha_s}{\pi}\right)^2 n^4 |D(n)|^2 \quad (35-III)$$

حساب المقطع الفعال البارتنوني :

نعلم أن:

$$d\sigma = \frac{(2\pi)^4}{2E_1 2E_2 |V_{rel}|} \delta^4(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) \frac{d^3 p_3}{(2\pi)^3 2E_3} \frac{d^3 p_4}{(2\pi)^3 2E_4} |\overline{M}|^2 \quad (36-III)$$

$$d\sigma = \frac{1}{4\sqrt{(P_1 P_2)^2 - m_1^2 m_2^2}} (2\pi)^4 \delta^4(p_1 + p_2 - q) |\overline{M}|^2 \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} \frac{1}{2q} \quad (37-III)$$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma} &= \frac{1}{2s} \int \frac{d^4 q}{(2\pi)^4} (2\pi) \delta_+(q^2 - M_H^2) (2\pi)^4 \delta^4(p_1 + p_2 - q) |\overline{M}|^2 \\ &= \frac{1}{2s} 2\pi \delta(\hat{s} - M_H^2) |\overline{M}|^2 \end{aligned} \quad (38-III)$$

العزم عند مركز الكتلة:

$$p_1^\mu = (E, \vec{p}) \quad p_2^\mu = (E, -\vec{p}) \quad p_3^\mu = (M_H, 0) \quad (39-III)$$

حسب متغيرات *Mandlestam* :

$$\hat{s} = (p_1 + p_2)^2 = 2p_1 p_2 = M_H^2 \quad (40-III)$$

إذن عبارة المقطع الفعال البارتنوني :

$$\hat{\sigma}(gg \rightarrow H) = \frac{\pi}{M_H^2} \delta(\hat{s} - M_H^2) |\overline{M}|^2 \quad (41-III)$$

ومنه:

$$\hat{\sigma}(gg \rightarrow H) = 2 \frac{M_H^6 (\alpha_s)^2}{v^2 \pi} n^4 |D(n)|^2 \delta(\hat{s} - M_H^2) \quad (42-III)$$

المقطع الفعال الهادروني :

$$\sigma(gg \rightarrow H) = \int dx_1 \int dx_2 f(x_1, \mu^2) f(x_2, \mu^2) \hat{\sigma}_{gg \rightarrow H}(\hat{s} = x_1 x_2 S) \quad (43-III)$$

حيث x_1, x_2 تعبر عن سلم *Bjorken scaling*

من خلال وظائف توزيع البارتنون PDF يصبح المقطع الفعال الهادروني يكتب على الشكل التالي:

$$\sigma_{(gg \rightarrow H)} = \frac{\pi}{M_H^2} |\overline{M}|^2 \int_0^1 f(x_1) f(x_2) \delta(2p_1 p_2 - M_H^2) dx_1 dx_2 \quad (44-III)$$

في نظام مركز الكتلة نضع :

$$\mu = 2p_1p_2 - M_H^2 = 2p_1x_1 \cdot p_2x_2 - M_H^2 \quad (45-III)$$

نقوم بالاشتقاق لكتابة المقطع الفعال بدلالة x_1 فقط.

$$\frac{du}{dx^2} = 2p_1x_1 \cdot p_2 = Sx_1$$

$$(p_2, p_1) \text{ معرفة حسب العلاقة (39-III)}$$

إذن تصبح العبارة كالتالي :

$$\sigma_{(gg \rightarrow H)} = \frac{\pi}{M_H^2} |\overline{M}|^2 \int_0^1 \int_{-M_H}^{Sx_1 - M_H} f(x_1) f\left(\frac{u + M_H^2}{Sx_1}\right) \delta(u) dx_1 du \frac{1}{Sx_1}$$

$$(46-III)$$

باعتبار u مهملة أمام الكتلة تصبح العبارة كالتالي:

$$\sigma_{(gg \rightarrow H)} = \frac{\pi}{M_H^2} |\overline{M}|^2 \int_0^1 \int_{\frac{M_H^2}{S}}^1 f(x_1) f\left(\frac{M_H^2}{Sx_1}\right) \frac{dx_1}{Sx_1} \quad (47-III)$$

الفصل الرابع:

الحساب الرقمي و محاكاة

المقطع الفعال

IV- المقدمة:

يتم إختبار النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات الأولية سواء للتحقق من صحته أو تقدير ما عجز عنه عن طريق البحث في فيزياء ما وراء النموذج المعياري (BSM)، من خلال مقارنة النتائج التجريبية مع الحسابات النظرية (Phenomenology) والتي عادة ماتتحقق من قبل المحاكاة النهائية باستخدام برامج مثل *Mad Graph* بطريقة *Monte Carlo* التي سنتطرق إليها في هذا الفصل.

IV-1- برنامج *Mad Graph* :

هو برنامج رقمي دقيق وذكي يقوم بمحاكاة التصادمات (التفاعلات) وتوليد الحدث وحساب المقطع الفعال عند المستوى الأدنى و المستويات العليا للطاقة ومطابقتها مع مراحل حدث التصادم بروتون_ بروتون (*Collision pp*) :

- *Hard_process*

- *Parton Shower*

- *Underlying events*

- *Hadronization*

عبر استخدام مجموعة متنوعة من الأدوات الرقمية التي يتضمنها *Mad Graph* للتحكم في توليد الحدث والتحليل على سبيل المثال توجد عدة مولدات أخرى:

Pythia , *Herwig* , *Sherpa* , ...

وذلك بإتباع الطريقة الحسابية *Monte Carlo*، حيث يقوم بحساب المقطع الفعال، حسابات

التصحیحات على *QCD* وإنشاء رسوم بيانية للتفاعلات (Histograms). [14].

IV-2- طريقة *Monte Carlo* :

في الإحصاء الرياضي هي مجموعة من الخوارزميات الحسابية التي تتضمن تكرارا للتجربة بقيم ابتدائية عشوائية، يمكن تطبيق طريقة *Monte Carlo* على أي مشكلة يتخللها تعدد للاحتتمالات عبر استخدام أعداد كبيرة أو وجود مسائل تعتمد على عدد ضخم من المجاهيل، حيث أن طريقة *Monte Carlo* مبنية على شروط أساسية يجب أخذها بعين الإعتبار عند الحساب. في دراستنا نستخدم *Monte Carlo* في توليد الحدث وذلك عن طريق توزيع وتوليد أعداد عشوائية وفق نمط معين يعتمد على طبيعة التفاعل والجسيمات المشاركة في التفاعل لحساب المقطع الفعال الكلي.

```

*****
*
*           W E L C O M E to
*       M A D G R A P H 5 _ a M C @ N L O
*
*
*           *           *
*         *   *   *   *
*       * * * * 5 * * * *
*         *   *   *   *
*           *           *
*
*   VERSION 2.6.3.2           2018-06-22
*
*   The MadGraph5_aMC@NLO Development Team - Find us at
*   https://server06.fynu.ucl.ac.be/projects/madgraph
*   and
*   http://amcatnlo.web.cern.ch/amcatnlo/
*
*   Type 'help' for in-line help.
*   Type 'tutorial' to learn how MG5 works
*   Type 'tutorial aMCatNLO' to learn how aMC@NLO works
*   Type 'tutorial MadLoop' to learn how MadLoop works
*
*****
load MG5 configuration from input/mg5_configuration.txt
set collier to /Users/essmaredouane/Documents/MG5_aMC_v2_6_3_2/HEPTools/lib
fastjet-config does not seem to correspond to a valid fastjet-config executable (v3+). We
will use fjcore instead.
Please set the 'fastjet'variable to the full (absolute) /PATH/T0/fastjet-config (includin
g fastjet-config).
MG5_aMC> set fastjet /PATH/T0/fastjet-config

set lhpdf to /Users/essmaredouane/Documents/MG5_aMC_v2_6_3_2/HEPTools/lhpdf6/bin/lhpdf-
config
set ninja to /Users/essmaredouane/Documents/MG5_aMC_v2_6_3_2/HEPTools/lib
Using default text editor "vi". Set another one in ./input/mg5_configuration.txt
Loading default model: sm
INFO: Restrict model sm with file models/sm/restrict_default.dat .
INFO: Run "set stdout_level DEBUG" before import for more information.
INFO: Change particles name to pass to MG5 convention
Defined multiparticle p = g u c d s u~ c~ d~ s~
Defined multiparticle j = g u c d s u~ c~ d~ s~
Defined multiparticle l+ = e+ mu+
Defined multiparticle l- = e- mu-
Defined multiparticle vl = ve vm vt
Defined multiparticle vl~ = ve~ vm~ vt~
Defined multiparticle all = g u c d s u~ c~ d~ s~ a ve vm vt e- mu- ve~ vm~ vt~ e+ mu+ t b
t~ b~ z w+ h w- ta- ta+
MG5_aMC>generate p p > t t~
INFO: Checking for minimal orders which gives processes.
INFO: Please specify coupling orders to bypass this step.
INFO: Trying coupling order WEIGHTED<=2: WEIGTHED IS 2*QED+QCD
INFO: Trying process: g g > t t~ WEIGHTED<=2 @1
INFO: Process has 3 diagrams
INFO: Trying process: u u~ > t t~ WEIGHTED<=2 @1
INFO: Process has 1 diagrams
INFO: Trying process: u c~ > t t~ WEIGHTED<=2 @1
INFO: Trying process: c u~ > t t~ WEIGHTED<=2 @1

```

IV-3 - دراسات تطبيقية: المحاكاة *simulation* والحساب الرقمي للمقطع الفعال

باستخدام مولد الحدث *Mad Graph*

IV-3-1 - تطبيقات عند المستوى الأدنى للطاقة

باستخدام مولد الحدث (*Mad Graph_5 aMC @ LO*) سنقوم فيما يلي بإجراء عمليات حسابية

للمقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي في التفاعل $PP \rightarrow t\bar{t}$ ، ونقوم بدراسة مقارنة بين عدة حالات ممكنة ناتجة عن تغيير بعض المعطيات الفيزيائية وتأثيرها على القياسات و الاستنتاجات الفيزيائية، وفقا للشروط التالية:

✓ طاقة التصادم $E = 13 TeV$

✓ الإنارة $l = 10^{34} Cm^{-2}S^{-1}$

✓ عدد الأحداث المولدة هي 10000 حدث.

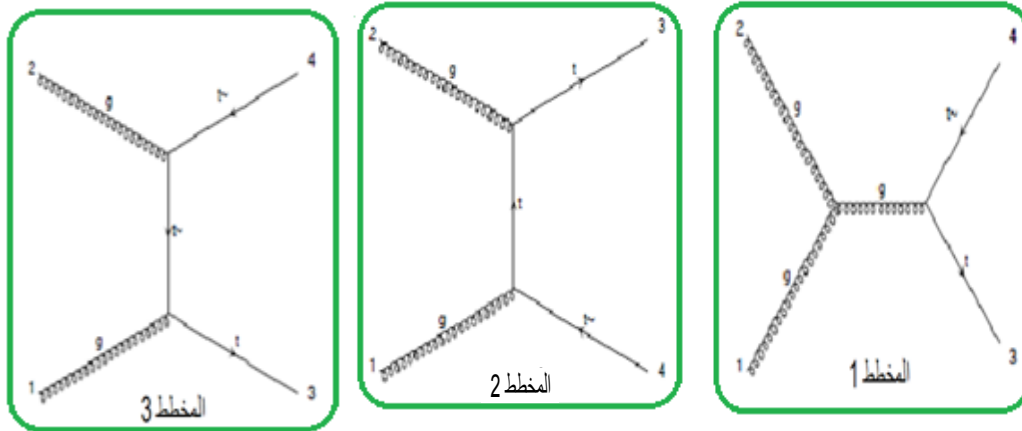
3IV-1-1 - إسهامات الغلونات والكواركات لإنتاج زوج من الكوارك القمي

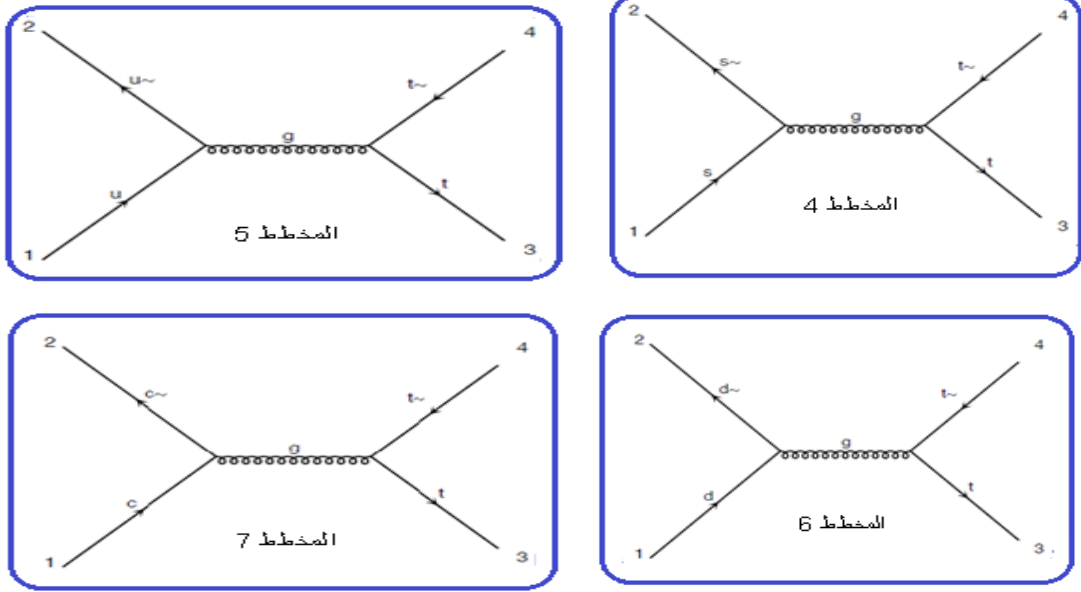
بأخذ كتلة الكوارك القمي $m_t = 173 GeV$ ونأخذ فقط بعين الاعتبار التفاعلات القوية عند الحد

الأدنى للطاقة $QCD = 2$ ، وإهمال التفاعلات الكهرو ديناميكية $QED = 0$ في هذه الحالة سيكون لدينا 5

تفاعلات ونمثلها ب 7 مخططات فينمان كما هو موضح في الشكل التالي:

```
Process: g g > t t~ WEIGHTED=2
Process: u u~ > t t~ WEIGHTED=2
Process: c c~ > t t~ WEIGHTED=2
Process: d d~ > t t~ WEIGHTED=2
Process: s s~ > t t~ WEIGHTED=2
```





التفاعلات الفرعية	نسبة المساهمة في المقطع الفعال %	الخطأ الاحصائي (pb)	المقطع الفعال (pb)	التفاعلات
	100	± 0.7905	505.77	$PP \rightarrow t\bar{t}$
$gg \rightarrow t\bar{t}$	87.33	± 0.624	441.71	$gg \rightarrow t\bar{t}$
$u\bar{u} \rightarrow t\bar{t}$ $\bar{u}u \rightarrow t\bar{t}$ $c\bar{c} \rightarrow t\bar{t}$ $\bar{c}c \rightarrow t\bar{t}$ $d\bar{d} \rightarrow t\bar{t}$ $\bar{d}d \rightarrow t\bar{t}$ $s\bar{s} \rightarrow t\bar{t}$ $\bar{s}s \rightarrow t\bar{t}$	12.66	± 0.485	64.04	$qq \rightarrow t\bar{t}$

الجدول (IV-1): إسهامات الغلوونات والكواركات لإنتاج زوج من الكوارك القمي.

✓ من خلال النتائج نلاحظ أن نسبة مساهمة الغلوونات في المقطع الفعال لإنتاج زوج من الكوارك القمي تكون أكبر مقارنة مع الكواركات، سبب ذلك أن الغلوونات تأخذ أكبر قيمة من الطاقة حسب دوال توزيع البارتنون

(pdf) لأنها أكثر تواجد داخل البروتون بحيث تأخذ حوالي 50% من توزيع الطاقة الكلي لأنها مكون أساسي لجسيمات التكافؤ و تتواجد بكثرة في بحر Dirac (la mer de Dirac) ناتجة عن طاقة التسريع .

IV-3-1-2 - إسهامات التفاعلات الفرعية للحالتين $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ و $\bar{q}q \rightarrow t\bar{t}$

انطلاقاً من نتيجة الجدول السابق يمكننا دراسة مساهمات التفاعلات الفرعية في المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي عن طريق حساب مساهمة إفناء كوارك وكوارك مضاد فقط بشكل مستقل في الجدول الموالي :

الخطأ الاحصائي (pb)	المقطع الفعال (pb)	التفاعلات الفرعية
± 0.03593	18.18	$u\bar{u} \rightarrow t\bar{t}$
± 0.02901	18.16	$\bar{u}u \rightarrow t\bar{t}$
± 0.02252	11.62	$d\bar{d} \rightarrow t\bar{t}$
± 0.02286	11.62	$\bar{d}d \rightarrow t\bar{t}$
± 0.002871	1.361	$s\bar{s} \rightarrow t\bar{t}$
± 0.002573	1.363	$\bar{s}s \rightarrow t\bar{t}$
± 0.001984	0.9392	$c\bar{c} \rightarrow t\bar{t}$
± 0.001984	0.9392	$\bar{c}c \rightarrow t\bar{t}$

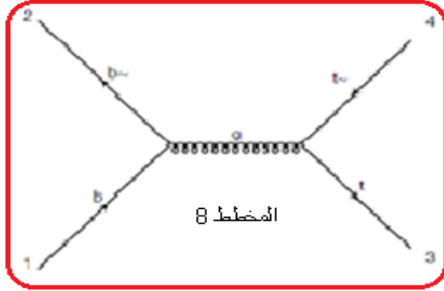
الجدول (IV-2) إسهامات التفاعلات الفرعية لحساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي.

✓ كواركات التكافؤ تملك قيمة مساهمة أكبر في المقطع الفعال لإنتاج زوج كوارك القمي مقارنة مع الكواركات الأخرى ذلك لتواجدها بكثرة في البروتون (uud) (المقطع الفعال للتفاعل الفرعي $\bar{u}u \rightarrow t\bar{t}$ هو (18.16 pb) أكبر من المقطع الفعال للتفاعل الفرعي $\bar{d}d \rightarrow t\bar{t}$ (11.62 pb) بسبب تواجد كواركين u و كوارك d وحيد في الرابطة حسب دوال (PDF) .

IV-3-1-3 - مساهمة الكوارك القعري (bottom) في حساب المقطع الفعال

بسبب الكتلة الثقيلة للكوارك القعري (bottom) مقارنة بالكواركات الخفيفة فإن مولد الحدث لا يأخذ مساهمته بعين الاعتبار عند حساب المقطع الفعال.

لمعرفة مساهمة الكوارك القعري في حساب المقطع الفعال يمكن إضافته يدويا إلى مولد الحدث مع الحفاظ على كل الشروط الحساب السابقة، يؤدي ذلك إلى حدوث 6 تفاعلات تمثلها ب8 مخططات فاينمان (يعني بالإضافة إلى المخططات السابقة التي بالأزرق والأخضر يضاف إليهم تفاعل ومخطط من إسهامات كوارك (bottom) بالأحمر.



Process: g q q̄ > t t̄ WEIGHTED=2
 Process: u ū > t t̄ WEIGHTED=2
 Process: c c̄ > t t̄ WEIGHTED=2
 Process: d d̄ > t t̄ WEIGHTED=2
 Process: s s̄ > t t̄ WEIGHTED=2
 Process: b b̄ > t t̄ WEIGHTED=2

التفاعلات الفرعية	نسبة المساهمة في المقطع الفعال %	الخطأ الإحصائي (pb)	المقطع الفعال (pb)	التفاعلات
	100	± 0.8772	506.8	$PP \rightarrow t\bar{t}$
$gg \rightarrow t\bar{t}$	87.19	±0.737	441.9	$gg \rightarrow t\bar{t}$
$q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ \propto $\bar{q}q \rightarrow t\bar{t}$	12.64	±0.476	64.068	$qq \rightarrow t\bar{t}$
$b\bar{b} \rightarrow t\bar{t}$ \propto $b\bar{b} \rightarrow t\bar{t}$	0.16	±0.00866	0.8353	$b\bar{b} \rightarrow t\bar{t}$

الجدول (3-IV) : مساهمة الكوارك القعري في حساب المقطع الفعال الكلي لإنتاج زوج من الكوارك القمي.

✓ نلاحظ أن مساهمة الكوارك القعري في المقطع الفعال ضئيلة جدا، والسبب في ذلك كتلته الثقيلة التي تتطلب طاقة كبيرة لإنتاجه لأنه غير متواجد أصلا في كواركات الرابطة .

3-IV-1-4 - حساب المقطع الفعال بدلالة كتلة الكوارك القمي

في هذه الحالة نقوم بتغيير كتلة الكوارك القمي ونقوم بدراسة تأثيرها على حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي و باستعمال الخوارزمية التالية:

```
generate p p > t t~
output toproduction
launch
set ebeam1 6500
set ebeam2 6500
set MT 170
launch
set MT 172
launch
set MT 174
launch
set MT 176
launch
set MT 178
launch
set MT 180
```

الخطأ الإحصائي (pb)	المقطع الفعال (pb)	كتلة الكوارك القمي GeV
± 0.95	549	170
± 0.79	517.7	172
± 0.77	491	174
± 0.65	465.6	176
± 0.59	441.1	178
± 0.61	418.9	180

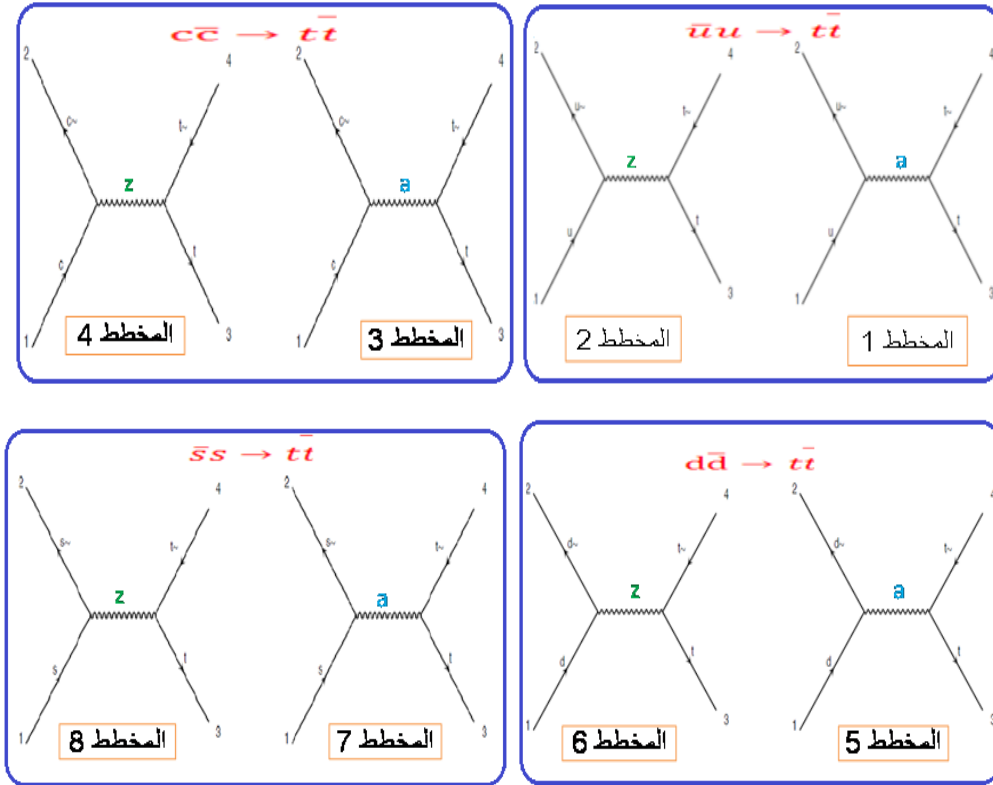
الجدول (4- IV): المقطع الفعال الكلي بدلالة تغيرات قي كتلة الكوارك القمي.

✓ من خلال نتائج الجدول نلاحظ أن العلاقة بين المقطع الفعال وكتلة الكوارك القمي الناتجة هي علاقة عكسية حيث أن كلما زادت كتلة الكوارك القمي تنقص قيمة المقطع الفعال هذا راجع إلى احتمال إنتاج الجسيمات الثقيلة ضئيل مقارنة مع الجسيمات الخفيفة.

IV-3-1-5 - حساب المقطع الفعال لإنتاج الكوارك القمي في حالة التفاعل الكهروديناميكي

نأخذ كتلة الكوارك $m_t = 173 GeV$ ، ونقوم بإهمال التفاعلات القوية مع الأخذ بالحسبان التفاعلات الكهروديناميكية $QED = 2, QCD = 0$ في هذه الحالة ينتج 4 تفاعلات تمثلها ب8 مخططات فاينمان موضحة في الأشكال التالية:

Process: $u u \bar{v} > t t \bar{v}$ QCD=0,QED=2
 Process: $c c \bar{v} > t t \bar{v}$ QCD=0,QED=2
 Process: $d d \bar{v} > t t \bar{v}$ QCD=0,QED=2
 Process: $s s \bar{v} > t t \bar{v}$ QCD=0,QED=2



التفاعلات الفرعية	نسبة المساهمة في المقطع الفعال %	الخطأ الإحصائي (pb)	المقطع الفعال (pb)	التفاعلات
	100	± 0.000606	0.36226	$PP \rightarrow t\bar{t}$
$q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ \propto $\bar{q}q \rightarrow t\bar{t}$		± 0.000606	0.36226	$qq \rightarrow t\bar{t}$

الجدول (5-IV): حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي في حالة التفاعل الكهروديناميكي .

✓ من خلال النتائج في الجدول نلاحظ أن مساهمة المقطع الفعال لإنتاج زوج من الكوارك القمي في هذه الحالة ضعيفة جدا مقارنة مع المقطع الفعال لإنتاجه في التفاعلات القوية وهذا راجع لغياب مساهمة الغلوونات التي تتفاعل تفاعلات قوية فقط والتي تحمل نسبة كبيرة من طاقة دوال توزيع البارتون.

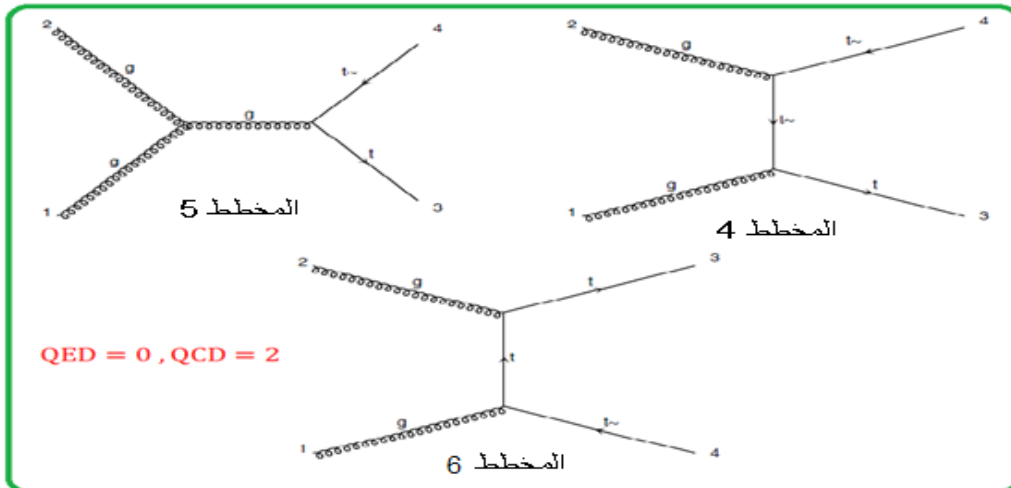
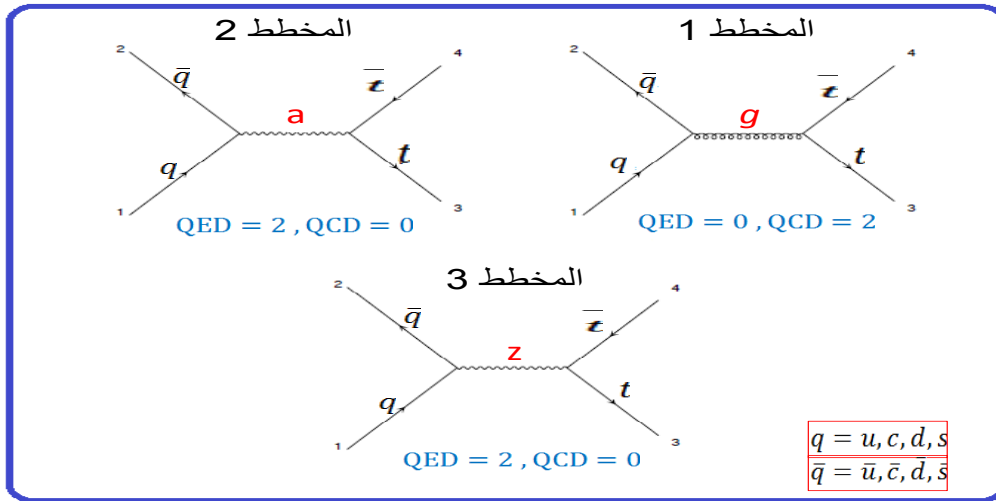
IV-3-1-6 - حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي في حالة التفاعلات القوية والكهروديناميكية

في هذه الحالة نقوم بحساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي وإظهار مساهمات الغلونات

ومختلف الكواركات مع الأخذ بعين الاعتبار التفاعلات القوية والكهروضعيفة $QED = 2, QCD = 2$

في هذه الحالة يوجد 5 تفاعلات تمثلها ب15 مخطط فاينمان الآتية:

Process: $g g \rightarrow t \bar{t}$ WEIGHTED=2
 Process: $u \bar{u} \rightarrow t \bar{t}$ WEIGHTED=2
 Process: $c \bar{c} \rightarrow t \bar{t}$ WEIGHTED=2
 Process: $d \bar{d} \rightarrow t \bar{t}$ WEIGHTED=2
 Process: $s \bar{s} \rightarrow t \bar{t}$ WEIGHTED=2



التفاعلات الفرعية	نسبة المساهمة في المقطع الفعال %	الخطأ الإحصائي (pb)	المقطع الفعال (pb)	التفاعلات
	100	± 0.926	505.77	$PP \rightarrow t\bar{t}$
$gg \rightarrow t\bar{t}$	87.33	± 0.621	441.71	$gg \rightarrow t\bar{t}$
$q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ \propto $\bar{q}q \rightarrow t\bar{t}$	12.66	0.687	64.06	$qq \rightarrow t\bar{t}$

الجدول (6-IV): المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي في حالة التفاعلات القوية والكهروديناميكية.

الجدول التالي يوضح إسهام التفاعلات الفرعية التي تشارك في إنتاج زوج الكوارك القمي عن طريق إفناء زوج من الكواركات عبر ثلاث وسائط انتشار

12.66	0.687	64.06	$qq \rightarrow t\bar{t}$
12.65	0.687	63.99	$qq \rightarrow g \rightarrow t\bar{t}$
0.007	0.000411	0.03967	$qq \rightarrow \gamma \rightarrow t\bar{t}$
0.005	0.000247	0.02679	$qq \rightarrow z \rightarrow t\bar{t}$

✓ من خلال النتائج نلاحظ أن مساهمة الكواركات عبر وسيطي الانتشار (z, γ) في التفاعلات الكهروديناميكية هي مساهمة صغيرة جدا مقارنة مع المساهمة عبر وسيط الانتشار غلوون (g) ، ويكون الترتيب كالتالي:

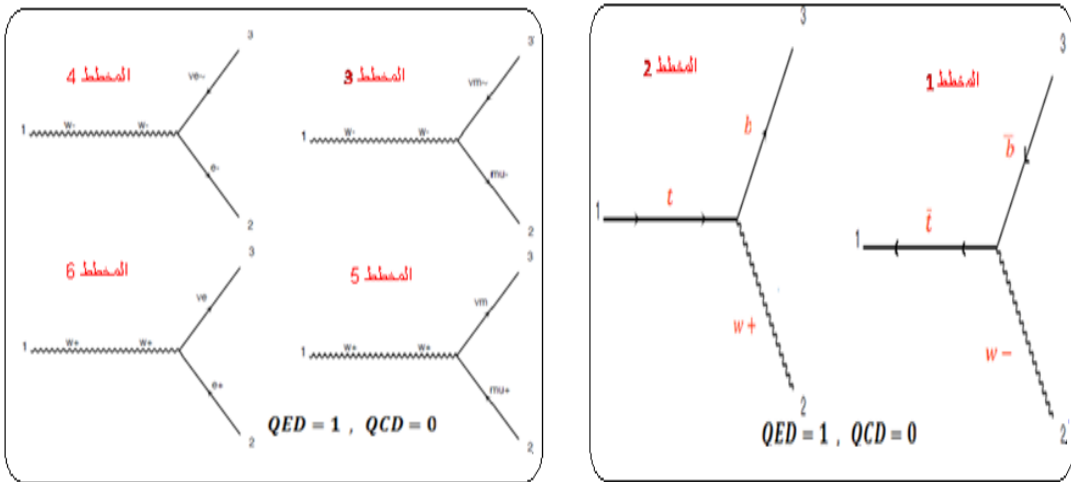
✓ تكون نسبة المساهمة كبيرة للتفاعلات القوية ثم التفاعلات الكهرومغناطيسية تليها التفاعلات الضعيفة، هذا راجع إلى كون ثابت الاقتران في التفاعلات القوية أقوى مقارنة مع ثابت اقتران التفاعلات الكهروضعيفة ومنه فإن الكواركات تميل إلى التفاعلات القوية بكثرة مقارنة مع التفاعلات الأخرى.

IV-3-1-7 - قنوات إضمحلال الكوارك القمي

حسب الدراسة النظرية السابقة في الفصل الثاني نعلم أن الكوارك القمي يضمحل إلى W^{\pm} و كوارك b ولكن البوزون W^{\pm} بدوره يتحلل إلى جسيمات أخرى عبر عدة قنوات : إضمحلال هادروني بحت ،إضمحلال إلى لبنتون ونفاثة و اضمحلال اللبتوني الثنائي قمنا بحساب المقطع الفعال الكلي للتحلل لزوج الكوارك القمي باستعمال الخوارزمية التالية:

```
generate p p > t t~, (t > w+ b, w+ > l+ vl), (t~ > w- b~, w- > l- vl~)
output myttbardecayed
launch
set ebeam1 6500
set ebeam2 6500
set MT 173
```

نلاحظ من هذه الخوارزمية أن الإضمحلال الذي أخذناه بعين الاعتبار هو إضمحلال لبنتوني بحت ينتج عن هذا الإضمحلال 13 مخطط فاينمان من بينها:



✓ من خلال المخططات نلاحظ عدم وجود مخطط الإضمحلال إلى التاو (τ) و ذلك لأن مولد الحدث *Mad Graph* لا يأخذ بعين الاعتبار قناة الإضمحلال إلى التاو (τ) بسبب كتلته الثقيلة .

الخطأ الإحصائي (pb)	المقطع الفعال لاضمحلال الكوارك القمي إلى اللبتوني البحت (pb)	التفاعلات
± 0.0479	22.781	$pp \rightarrow t\bar{t}, (t \rightarrow w + b, w+ \rightarrow l + vl),$ $(\bar{t} \rightarrow w - \bar{b}, w- \rightarrow l - \bar{v}l)$

الجدول (7- IV): المقطع الفعال لاضمحلال زوج الكوارك القمي للبتوني البحت

✓ من خلال الحسابات التي قمنا بها باستخدام *Mad Graph* قيمة المقطع الفعال لاضمحلال الكوارك القمي البحت هي $22.781 pb$ ، و من خلال المعطيات التي لدينا سابقا (الفصل الثاني) و حسب الشكل (2-I) أردنا التأكد من هذه القيمة المحسوبة تجريبيا كالاتي :

$$505,77 \times \frac{1}{9} = 56,19pb$$

$$\neq 22,781pb$$

حيث :

- $505,77pb$ هي المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي .
- $\frac{1}{9}$ نسبة الإضمحلال إلى اللبتوني البحت .

لكن هذه القيمة لا تعبر عن القيمة المحسوبة تجريبيا و السبب راجع لأن *Mad Grahp* لا يأخذ بعين الإعتبار كتلة التاو (τ) كما ذكرنا سابقا، و بالتالي النسبة لم تكن صحيحة.

سنقوم بإعادة الحساب و ذلك للحصول على نسبة الإضمحلال الصحيحة، حيث نقوم بتضييق الاحتمال و

أخذ احتمال ثاني من الاحتمال الأول أي نأخذ $\frac{2}{3}$ من $\frac{1}{3}$ من احتمالي الاضمحلالين $t \rightarrow W^+ b$ و $\bar{t} \rightarrow W^- \bar{b}$

لتصبح النسبة $\frac{4}{81}$ و ليس $\frac{1}{9}$ و منه نقوم بإعادة الحساب

$$505,77 \times \frac{4}{81} = 24.97pb$$

نلاحظ أن القيمة الناتجة قريبة من القيمة المحسوبة تجريبيا لأننا أخذنا أخطاء الحسابات بعين الإعتبار.

IV-3-2 - تطبيقات عند المستوى الأعلى للطاقة

IV-3-2-1 - إنتاج بوزون الهيغز عن طريق حلقة الكوارك القمي عبر انصهار الغلوونات (تصحيح إفتراضي للطاقة)

$$gg \rightarrow hh$$

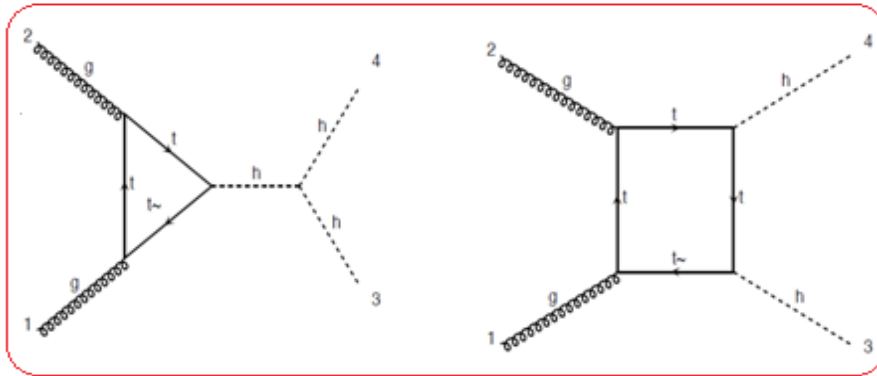
في الفصل الثالث قمنا بحساب المقطع الفعال لإنتاج بوزون الهيغز تحليليا، أما الآن نريد أن نحسب المقطع الفعال لإنتاج بوزون الهيغز عن طريق حلقة كوارك قمي الناتج عن إنصهار غلوونين باستخدام مولد الحدث **Mad Graph** بأخذ

✓ عدد الأحداث المولدة هي 10000 حدث

✓ $eBeam = 6500\text{Gev}$

في هذه الدراسة نأخذ فقط بعين الاعتبار التفاعلات القوية .

ينتج عن ذلك تفاعل واحد ممثل ب 16 مخطط فينمان ، حيث يتم إنتاج بوزون الهيغز عن طريق 8 مخططات فينمان من حلقة كوارك bottom و 8 الباقية عن طريق حلقة الكوارك القمي ومن بينها:

Results in the loop_sm for $g g \rightarrow h h$ [QCD]

Available Results

Run	Collider	Banner	Cross section (pb)	Events	Data	Output	Action
run_01	pp 6500.0 x 6500.0 GeV	tag_1	$0.01449 + 1.9e-05 +$ systematics	10000	parton madevent	LHE	<input type="button" value="remove run"/> <input type="button" value="launch detector simulation"/>

[Main Page](#)

الجدول (IV-8): نتائج المقطع الفعال الكلي لإنتاج بوزون الهيغز من خلال استخدام مولد الحدث

Mad Graph

✓ نلاحظ قيمة المقطع الفعال لإنتاج بوزون هيغز صغيرة لأن احتمال إنتاج بوزون هيغز ضعيف جداً ولأن إنتاجه من حلقة كوارك القمي نادرة الحدوث .

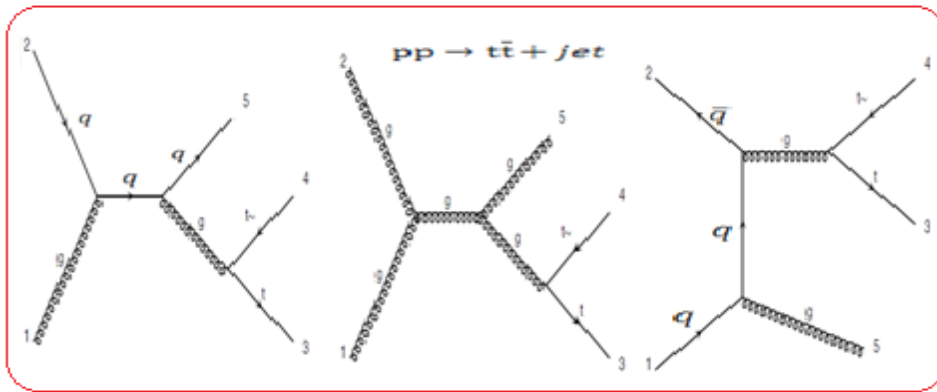
LHE هي ملفات التي تخزن فيها بيانات التصادمات بين البروتونات التي تجرى في *LHC*

IV-3-2-2- تطبيقات إنتاج زوج الكوارك القمي لدراسة الكتلة اللاتغايرية للـ *W* و الكوارك القمي:

دراستنا في هذا الجزء تعتمد على حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي عند المستويين الأدنى والأعلى للطاقة.

من خلال ذلك ستظهر لنا نفائة واحدة التي تم توليدها عبر *Mad Graph* كما هو موضح في المخططات المولية لفيتمان.

عن طريق حساب المقطع الفعال في المستوى الأعلى للطاقة و بتواجد النفائة نستنتج الكتلة اللاتغايرية للـ *W* و الكوارك *Top*.



المستوى الأعلى للطاقة $pp \rightarrow t\bar{t} + jet$		المستوى الأدنى للطاقة $PP \rightarrow t\bar{t}$		طاقة الحزمة (<i>eBeam</i>)
الخطأ الإحصائي (<i>pb</i>)	المقطع الفعال (<i>pb</i>)	الخطأ الإحصائي (<i>pb</i>)	المقطع الفعال (<i>pb</i>)	
± 0.49	152.8	± 1.339043	152.47027	4000 GeV
± 1.7	572	± 5.468925	571.8607	6500 GeV

الجدول (IV-9): المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي في المستوى الأدنى والأعلى للطاقة

✓ من خلال النتائج نلاحظ عند الحد الأدنى (*L*) و في الطاقة $eBeam = 4000\text{GeV}$ قيمة المقطع الفعال أصغر من قيمتها في حال $eBeam = 6500\text{GeV}$ و كذلك بالنسبة للتصحيح الأعلى للطاقة و السبب راجع لتعلق المقطع الفعال بقيم تغيرات الطاقة الابتدائية (كلما زادت الطاقة تزداد قيمة المقطع الفعال).

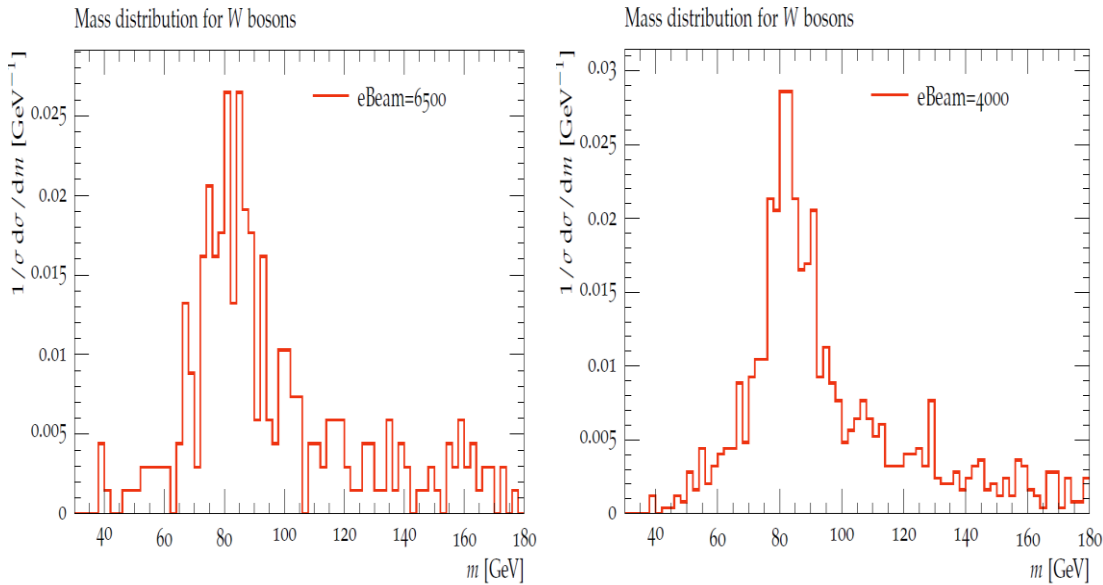
✓ تكون قيمة المقطع الفعال أكبر في المستوى الأعلى للطاقة (NLO) من المستوى الأدنى للطاقة (LO) بسبب مساهمة التصحيحات المطبقة على الطاقة الناتجة عن الإنبعث الحقيقي المتسبب في ظهور النفاثة.

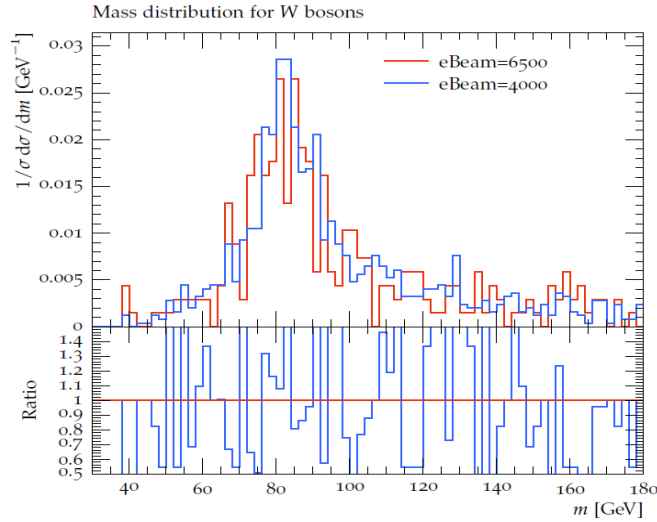
قمنا بأخذ البيانات في ما يخص تحلل الكوارك القمي، و ذلك عن طريق تحميل برنامج Rivet الذي يحتوي على هذه البيانات على شكل ملفات $HepMC$ ، ثم بإدخال تعديلات عليها ($p_t, m_t, eBeam$...) وفقا للدراسة التي نقوم بها ثم معالجتها عن طريق $Mad Graph$.

● ملاحظة : يمكن تحميل كل هذه البرامج لمعالجة و تحليل البيانات من منصة $hepforge$.

■ عبارة $Rivet$ عن نظام يقوم بتثبيت و ترجمة مخرجات مولدات الحدث، و بتعبير أوضح هو وسيلة لرسم البيانات الفيزيائية التي نتحصل عليها من أي مولد حدث الذي يمكن أن يولد أحداثا على شكل ملف $HepMC$.

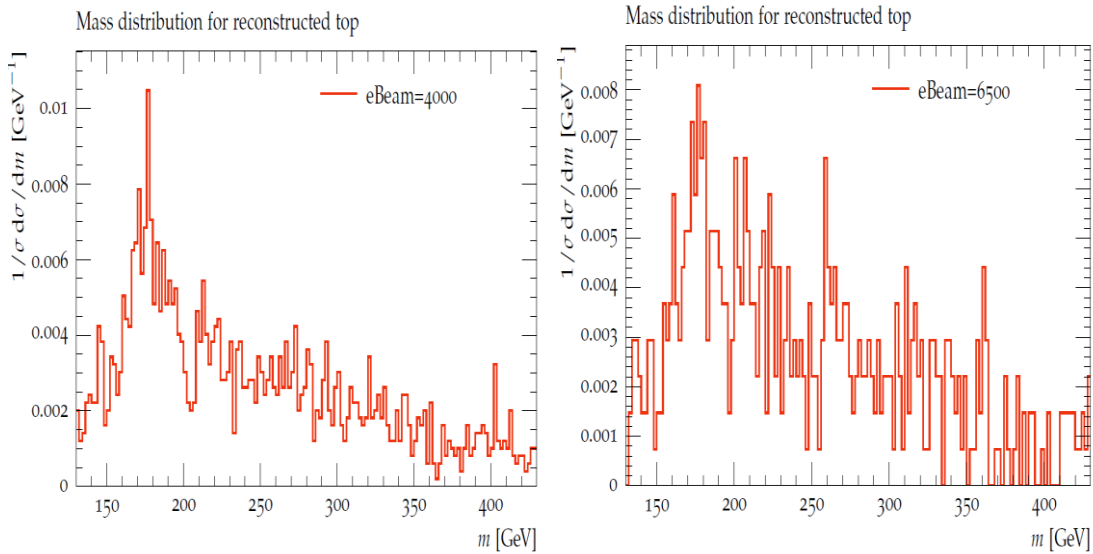
يستخدم Rivet أيضا كأرشيف لملفات البيانات المتحصل عليها من LHC على شكل ملف HepMC حيث يقوم بربط ملفات LHE و $HepMC$ الناتجة عن تحليل البيانات باستخدام $Mad Graph$ ثم تحويلها كلها إلى ملفات $HepMC$ ثم لإضهار الرسومات البيانية النهائية نستخدم $Yoda$.

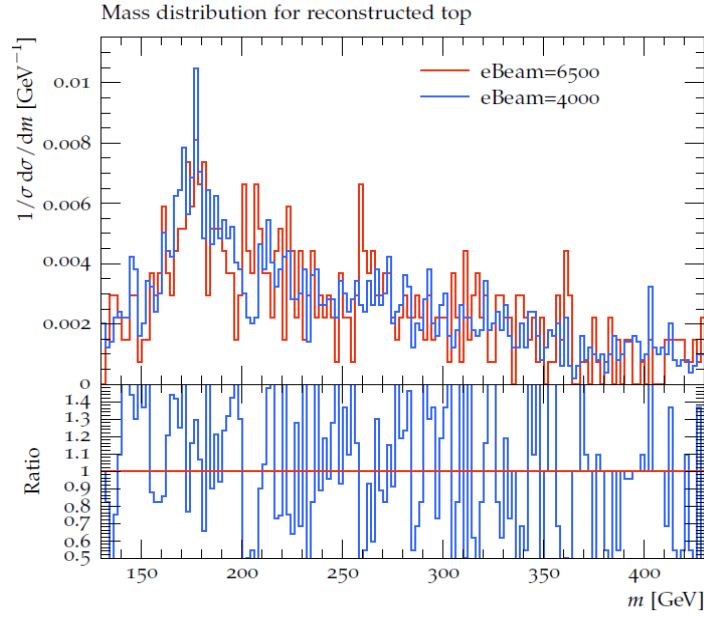




الشكل (1- IV) : رسم بياني يوضح الكتلة اللاتغايرية للبوزون W

✓ من خلال الرسم البياني للكتلة اللاتغايرية للبوزون W نلاحظ أن الإشارة متواجدة في المجال $[80\text{GeV} - 85\text{GeV}]$ وهذا ينطبق تماما مع الدراسات النظرية والتجريبية للبوزون W .





الشكل (2- IV): رسم بياني يوضح الكتلة اللاتغايرية للكورك Top

✓ من خلال الرسم البياني للكتلة اللاتغايرية للبوزون Top نلاحظ أن الإشارة متواجدة في المجال $[170GeV - 180GeV]$ وهذا متناسب مع الدراسات النظرية والتجريبية للكوارك القمي .

الخاتمة :

قمنا في هذا العمل بدراسة ظواهرية للتفاعلات القوية ذات التناظر اللوني التي تحدث بين البارتونات وفقا لنظرية الكروموديناميك الكمي QCD الإضطرابي عند الطاقات العليا.

عند المستوى الأدنى للطاقة (LO)، قمنا بدراسة الكوارك القمي من خلال آليات إنتاجه و أنماط اضمحلاله، بالإضافة إلى حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي تحليليا، ثم حسابيا باستخدام مولد الحدث Mad Graph مع تغيير بعض المعطيات الفيزيائية وفقا لشروط معينة و تأثيرها على القياسات والاستنتاجات للمقارنة، حيث تحصلنا على النتائج التالية :

المساهمة الكبيرة في حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج كوارك القمي كانت من نصيب الغلونات (87.33%) وذلك راجع إلى أخذها لقيمة أكبر من طاقة دوال توزيع البارتون (pdf) لتواجدها بكثرة أثناء التصادم .

تساهم كواركات التكافؤ في حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج الكوارك القمي بنسبة (11.77%) أقل بكثير من مساهمة الغلونات (87.33%) ولكنها أكبر من مساهمة الكواركات الافتراضية (0.909%) الناتجة عن طاقة التصادم.

مساهمة الكوارك القمري في حساب المقطع الفعال لإنتاج زوج كوارك القمي ضئيلة وذلك راجع لثقلها وعدم تواجدها ضمن كواركات الرابطة وبالتالي من الصعب إنتاجها أثناء التفاعل .

وجدنا علاقة عكسية تربط بين كتلة الكوارك القمي الناتج و المقطع الفعال وذلك يعود إلى احتمال إنتاج الجسيمات الثقيلة ضئيل مقارنة مع الجسيمات الخفيفة .

مساهمة التفاعلات الكهروديناميكية في حساب المقطع الفعال لإنتاج الكوارك القمي شبه معدومة مقارنة مع مساهمة التفاعلات القوية وذلك لأن إنتاج الكوارك القمي تفاعل قوي بالأساس، و تكون مساهمة التفاعلات القوية في أعلى الترتيب تليها مساهمة التفاعلات الكهرومغناطيسية و تليها التفاعلات الضعيفة وهذا يعكس بصورة واضحة ترتيب شدة التفاعلات الرئيسية في الطبيعة.

في دراسة قنوات تحلل زوج الكوارك القمي وجدنا أن نسب التفرع للاضمحلال تتوافق إلى حد كبير مع نتائج الاحتمالات النظرية.

عند المستوي الأعلى للطاقة، تطرقنا لدراسة فيزياء بوزون الهيغز من حيث إنتاجه و اضمحلاله ، و قمنا بحساب تحليلي للمقطع الفعال لإنتاج الهيغز عبر حلقة كوارك، بتطبيق التقنيتين الحسابتين، إعادة التقنين ($Renormalization$) و إعادة التسوية ($Regularizatio Dimensionnel$)، ثم قمنا بحساب المقطع الفعال رقميا عند الإنبعاثات الحقيقية بإصدار نفثة أين استنتجنا أن التغيير في طاقة التصادم

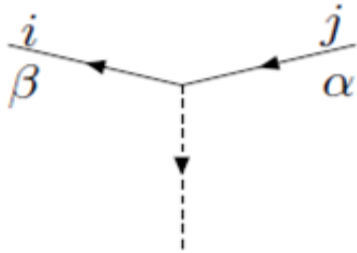
($e_{\text{Beam}} = 4000\text{Gev}$ ، $e_{\text{Beam}} = 6500\text{Gev}$) لا يؤثر على حساب الكتل اللاتغايرية للبوزون الافتراضي (W) و الكوارك القمي (Top).

وعند دراسة إنتاج بوزون الهيغز عبر حلقة كوارك قمي كان المقطع الفعال لإنتاج بوزون الهيغز صغير جدا لأن احتمال إنتاجه عبر حلقة كوارك ضعيف .

في الأخير نستنتج أن المحاكاة و الحساب الرقمي وسيلة فعالة للتعامل مع المسائل المعقدة و كثيرة المتغيرات و تعطي نتائج على عموم متوافقة مع القاعدة النظرية للدراسة.

الملحق :

• قيمة تفاعل هيغز-فرميون (Yukawa)



$$\frac{iy_t \delta_{ij} \delta_{\alpha\beta}}{\sqrt{2}}$$

• حساب العبارة C :

$$\begin{aligned} c &= \int_0^1 \int_0^{1-y} dy dz \frac{1 - yz^4}{-a^2} \\ &= \int_0^1 \int_0^{1-y} dy dz \frac{1 - yz^4}{2p_2 p_3 - m^2} = \frac{1}{2p_2 p_3} \int_0^1 \int_0^{1-y} dy dz \frac{1 - yz^4}{yz - \frac{m^2}{2p_2 p_3}} \\ &= \frac{1}{2p_2 p_3} \left[-2 + (n^4 - 1) \left(\mathcal{L}_{i2} \left(\frac{-2}{\sqrt{1 - n^4}} \right) + \mathcal{L}_{i2} \left(\frac{2}{\sqrt{1 - n^4 + 1}} \right) \right) \right] \\ &= \frac{1}{2p_2 p_3} D(n) = \frac{n}{m} D(n) \end{aligned}$$

$$n = \frac{m^2}{2p_1 \cdot p_2}$$

قائمة المراجع:

- [1] *Measurement of the $\eta_c(1S)$ production cross-section via the decay $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$* Thèse de doctorat 2014
- [2] *P Aurenche, J-Ph Guillet, E Pilon. QED, QCD en pratique. 3ème cycle Beyrouth, Liban 2016.* <cel-01440544>.
- [3] *R. K.Ellis, W. J. Stirling and B. R. Webber, QCD and Collider Physics, Cambridge University Press (December 4, 2003).*
- [4] *Ellis, R. Keith, B. R. Webber, and W. James Stirling. "QCD and collider physics." Camb. Monogr. Part. Phys. Nucl. Phys. Cosmol. 8 (1996): 1-435.*
- [5] *Cour Détecteurs et Accélérateurs, Master 2 ,E.Redouane-Salah, Université M'sila.*
- [6] *Eloi Le Quilleuc. Etude de la production de boson de Higgs en association avec une paire de quarks top-antitop dans l'expérience ATLAS. Physique des Hautes Energies - Expérience [hep-ex]. Université Paris-Saclay, 2017. Français*
- [7] *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.*
- [8] *Gilles, Geoffrey. Top quark production at the LHC. No. ATL-PHYS-SLIDE-2018 – 190. ATL-COM-PHYS-2018 – 145, 2018.*
- [9] *Triplet, Nathan. Observation of t -channel electroweak top quark production. No. FERMILAB-THESIS-2011-12. Fermi National Accelerator Lab.(FNAL), Batavia, IL (United States), 2011.*
- [10] *Tsiakiris, Menelaos. "Top quark pair production cross-section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV." UvA PhD thesis (2012).*
- [11] *Griffiths, David. Introduction to elementary particles. John Wiley & Sons, 2008.*
- [12] *Halzen, Francis, and Alan D. Martin. Quark & Leptons: An Introductory Course In Modern Particle Physics. John Wiley & Sons, 2008.*
- [13] *Stefan Richter, Higgs production via gluon fusion at next to leading Order, 2013.*
- [14] *Ralf Farkas, Comparative studies in event generation at leading and next-to-leading order perturbation theory with the Sherpa+OpenLoops event generator for the ttH analysis at the CMS experiment, IEKP thesis (2015).*

الملخص :

في هذا العمل قمنا بدراسة ظواهرية لإنتاج زوج الكوارك القمي باستخدام طرق حسابية تحليلية و طرق حسابية رقمية Monte Carlo عن طريق مولد الحدث *Mad Graph*، و أثبتنا أهمية دراسة الكوارك القمي في فهم فيزياء النموذج المعياري و الكروموديناميك الكمي ، والعلاقة التي تربط الكوارك القمي بالجسيمات الأولية الثقيلة مثل البوزون هيغز و البوزونات الشعاعية .

الكلمات المفتاحية : الكروموديناميك الكمي الاضطرابي، النموذج المعياري، الكوارك القمي، فضاء الطور، بوزون الهيغز، *Mad Graph*، *Monte Carlo*، مولدات الحدث، *LHC*

Abstract:

In this work, we have achieved phenomenological study of quark pair production, applying analytical calculation methods and **Monte Carlo** numerical computation using MadGraph event generator, we have demonstrated the importance of Top quark in understanding the physics of Standard Model and the relation of Top quarks with heavy particles, such as Higgs boson and vector bosons

Key words: perturbative QCD, Standard Model, Top quarks, phase space, Higgs boson, Mad Graph, Monte Carlo, event generators, LHC

Résumé:

Dans ce travail, nous avons effectué une étude phénoménologique sur la production d'un couple Top quarks, par des méthodes de calcul analytiques et des méthodes numériques **Monte Carlo** en utilisant le générateur d'événements MadGraph, on a démontré l'importance de l'étude du Top quark dans la compréhension de la physique du Modèle standard et la relation qui lie le Top quarks avec les particules massives comme le boson de Higgs et les bosons vectoriels

Mots clés: QCD perturbative, modèle standard, Top quarks, espace de phase, boson de Higgs, Mad Graph, Monte Carlo, générateurs d'événements, LHC