

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الحاج لخضر

كلية العلوم

قسم علوم المادة



مذكرة

مقدمة لنيل شهادة الماجستير في الفيزياء

شعبة : الفيزياء الفلكية

بعضوان:

تفكك الثقوب السوداء المجهرية في الغلاف الجوي

Mini Black Holes Decay in the Atmosphere

من طرف

العمرى صابرة

أمام اللجنة :

الرئيس: عبد الحميد بولجذري أستاذ التعليم العالي جامعة الحاج لخضر - باتنة.

المشرف: جمال ميموني أستاذ التعليم العالي جامعة منتوري - قسنطينة.

الأعضاء: رضا عطا الله أستاذ التعليم العالي جامعة باجي مختار - عنابة.

عبد العزيز صيد أستاذ محاضر جامعة الحاج لخضر - باتنة.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تشكرات

إن الشكر والحمد لله نحمده حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه.

أتقدم بالشكر الجزيل والعرفان إلى كل من ساهم من قريب أو من بعيد في انجاز هذه الرسالة و
أخص بالذكر الأستاذ جمال ميموني الذي اشرف على عملي واشكره على كل نصائحه و
إرشاداته القيمة و تشجيعه لنا طيلة مسيرة البحث كما أتقدم بشكري الجزيل إلى الأستاذة كالي
سهام على تتبعها المستمر طيلة انجاز هذا البحث و اشكر فيها حبها للعمل المتفاني وإخلاصها كما
أتقدم باسمي بكل عبارات الشكر والتقدير إلى الأستاذ رضا عطا الله على تعاونه و راحة صدره
الذي ساعدني و قدم لي يد العون ، نفعنا الله بعلمه و جزاه عنا خير الجزاء.

دون أن أنسى تقديم الشكر إلى كلا من Marco Cavalia ، Claudio Coriano و Maximo
Ave

على التواصل و المساعدة.

أتقدم بالشكر و التقدير إلى الأستاذ عبد الحميد بولجذري على تفضله برئاسة لجنة المناقشة كما
أتوجه بشكري إلى الأساتذة رضا عطا الله و عبد العزيز صيد، أعضاء لجنة المناقشة، و اشكرهما
جزيل الشكر على موافقتهم المشاركة في لجنة المناقشة .

كما أتوجه بالشكر أيضاً لكل الطاقم الذي أطر الدفعة الأولى لمدرسة الدكتوراء في الفيزياء الفلكية
لسنة الدراسية 2007-2008.

في الأخير لا يفوتني أن أتقدم بالشكر الجزيل و إن كان هذا لا يكفي إلى الصديقة و الشقيقة فائزة
قسي بلخير على وقفها معي في كل مراحل انجاز هذا العمل المتواضع كما أتوجه بالشكر الجزيل
إلى أصدقائي على إرشاداتهم و نصائحهم .

كما لا أنسى كل من جعلني بالكلمة الطيبة و الابتسامه و بالدعاء إلى كل هؤلاء أقول

شكراً

* * *

إهداء

اهدي هذا الجهد المتواضع لوالدي الكريمان و أخواتي و أخي نسيم

و جميع أهل بيتي خاصة إنصاف، عبد الرحمان و مهدي

و جميع جيرانني و أصحابي

والى كل من كان له فضل علي.

الفهرس

[01]	المقدمة العامة.....
	الفصل الأول: الأشعة الكونية العالية الطاقة
[04]	1.I. مقدمة.....
[06]	2.I. الخصائص العامة.....
[06]	1.2. I. التركيب الكيميائي وطيف الطاقة.....
[09]	2.2. I. مصادر الأشعة الكونية
[10]	12.2.I. آليات التسريع
[10]	1.1.2.2.I. آلية التسريع بالحقول الكهربائية.....
[12]	2.1.2.2.I. آلية التسريع.Fermi.....
[15]	2.2.2.I. مواقع التسريع.....
[15]	1.2.2.2.I. المستعرات العظمى. (Supernova).....
[16]	2.2.2.2.I. النجم النابض(Pulsar)
[16]	3.2.2.1.I. الأنوية المجرية النشطة (Active Galactic Nucleis)
[17]	4.2.2.2.I. انفجارات الأشعة غاما (Gamma Ray Bursts).....
[18]	3. I. القطع GZK.....
[20]	4. I. الشلالات الهوائية.....
[22]	1.4. I. الشلالات الكهرومغناطيسية.....
[23]	2.4. I. الشلالات الهادر ونية.....
[26]	5. I. خصائص الشلالات الهوائية.....
[26]	1.5. I. التوزيع الجانبي.....
[28]	2.5. I. التطور الطولي.....
[29]	6.I. رصد الأشعة الكونية العالية الطاقة.....
[30]	1.6. I. صفوف الرصد الأرضية.....
[32]	2.6. I. تلسكوبات الفلورة.....
[32]	3.6. I. الكواشف الهجينة
	الفصل الثاني: الثقوب السوداء في فيزياء الأبعاد الإضافية
[35]	1.II. مقدمة.....

- II. 2. فيزياء الأبعاد الإضافية.....[36]
- II. 1.2. مشكلة تدرج سلم القوى[36]
- II. 2.2. نماذج الأبعاد الإضافية.....[37]
- II. 1.2.2. نموذج البعد الإضافي الكبير. ADD[38]
- II. 2.2.2. نموذج البعد الإضافي المشوه RS[40]
- II. 3. الثقوب السوداء لمجهريّة.....[42]
- II. 1.3. تشكل الثقوب السوداء في اصطدام الجسيمات.....[42]
- II. 1.1.3. المقطع الفعال.....[42]
- II. 2.1.3. خصائص الثقوب السوداء.....[42]
- II. 2.3. تفكك الثقوب السوداء المجهريّة.....[46]
- II. 1.2.3. إشعاع هوكينغ في البراين (Brane).....[49]
- II. 2.2.3. إشعاع هوكينغ في البولك (Bulk).....[53]
- II. 4. إنتاج الثقوب السوداء في مسرع الجسيمات (LHC).....[56]
- II. 5. إنتاج الثقوب السوداء في الأشعة الكونية.....[58]

الفصل الثالث: تقنيات المحاكاة

- III. 1. المولد Grok[63]
- III. 1.1. المولد PYTHIA[64]
- III. 2.1. المولد AIRES[64]
- III. 3.1. ملف المعطيات.....[66]

الفصل الرابع: النتائج ومناقشتها

- IV. 1. محاكاة شلالات النموذج القياسي و مقارنة النتائج.....[76]
- IV. 2. محاكاة شلالات الثقوب السوداء المجهريّة ومقارنة النتائج.....[79]
- IV. 3. ظاهرة Centauros (CLEs)[87]
- IV. 3.1. النسبة بين المركبة الكهرومغناطيسية و المركبة الهادرونية.....[89]
- IV. 3.2. متوسط طاقة الميونات على مستوى سطح الكاشف.....[92]

الفصل الخامس: الخاتمة

- الخاتمة.....[95]
- الملحق A[100]
- المراجع[107]
- الملخص.....[110]

قائمة الوثائق

- 01-I :** نسبة تواجد العناصر الكيميائية في الأشعة الكونية المجرية مقارنة بنسبة تواجدها في النظام الشمسي بالنسبة إلى عنصر Si 100%.....[07]
- 02-I :** طيف الطاقة الكلي للأشعة الكونية ممثلاً بالتدفق التفاضلي للأشعة بدلالة الطاقة.....[08]
- 03-I :** طيف الطاقة لأبرز المنحدرات [الركبتان و الكاحل] بالاستناد إلى كل النتائج التجريبية.....[09]
- 04-I :** مخطط Hillas للمواقع الفعالة القادرة على تسريع الأشعة الكونية إلى طاقات متطرفة.....[11]
- 05-I :** رسم تخطيطي يوضح اصطدام جسيمة بسحابة مغناطيسية في حركة إنسحابية.....[12]
- 06-I :** مخطط لآلية التسريع بالموجات التصادمية.....[15]
- 07-I :** على اليمين رسم تخطيطي لنموذج الأنوية المجرية النشطة موضحة مختلف أنواع الأنوية حسب زاوية النظر وعلى اليسار نواة راديو مجرية نشطة 192-0313.....[17]
- 08-I :** الطاقة المتوسطة للبروتونات طبقاً لبعدها عن المصادر عن الأرض من أجل طاقات مختلفة.....[20]
- 09-I :** التدفق العمودي للأشعة الكونية الثانوية للمنطقة الأكثر تركزاً للجسيمات في الغلاف الجوي في المجال الطاقوي ($E > 1 \text{ GeV}$) ، و النقاط تمثل القيم المقاسة للميونات السالبة.....[21]
- 10-I :** مخطط لتطور الشلالات الهادرونية يوضح المكونات الثلاثة الأساسية: الكهرومغناطيسية، الهادرونية، الميونية وجسيمات النوترينو.....[25]
- 11-I :** رسم تخطيطي يوضح مبدأ إشعاع شيرينكوف.....[26]
- 12-I :** متوسط التوزيع الجانبي لمختلف مكونات شلال هوائي طاقته الابتدائية 10^{15} eV ... [28]
- 13-I :** التطور الطولي لشلال هوائي سجل من قبل مرصد الفلورة Fly's Eye [29]
- 14-I :** مخطط نموذجي للغرف الحساسة في تجربة Chacaltaya [31]
- 15-I :** مقارنة نتائج الكاشفين HiRes و AGASA لتدفق الأشعة الكونية العالية الطاقة : نتائج HiRes تبدو موافقة مع قطع GZK على عكس بيانات مرصد AGASA [32]

I-16: المخطط العام لمرصد Pierre Auger في الأرجنتين [33]

II-17: (أ) رسم تخطيطي للأبعاد الإضافية n أين R يمثل حجم الأبعاد الإضافية، (ب) رسم تخطيطي يوضح انحصار جسيمات النموذج القياسي في 4-أبعاد بينما الغرافيتونات تنتشر في $(n+4)$ - بعد.....[34]

II-18: رسم تخطيطي يوضح نموذج البعد الإضافي المشوه و أن البعد الخامس يؤدي إلى ضعف الجاذبية في بلانك البراين..... [39]

II-19: رسم تخطيطي يمثل نموذج القرص الأسود في اصطدام البارتونات لإنتاج ثقب الأسود المجهرى...[41]

II-20: رسم تخطيطي يمثل مراحل تفكك الثقب الأسود المجهرى... [43]

II-21: مرحلة Schwarzschild من تفكك الثقوب الأسود المجهرى. اشعاع هوكينغ للحقول النموذج القياسي في البراين بينما الغرافيتونات تبعث في كل الفضاء بمعنى آخر في البراين والبولك.....[50]

II-22: النتائج التحليلية لنسبة الطاقة المنبعثة من قبل الثقب الأسود المجهرى لـ (أ) الحقل السلمي، (ب) الفرميونات و (ج) البوزونات..... [52]

II-23: النتائج العددية لنسبة الطاقة المنبعثة من قبل الثقب الأسود المجهرى لكل من (أ) الحقل السلمي و (ب) الفارميونات، (ج) البوزونات وذلك في البراين..... [53]

II-24: النتائج التحليلية لعامل Greybody (أ) و النسبة المنبعثة لطاقة (ب) في البولك [55]

II-25: على اليمين مخطط للمسرّع LHC، على اليسار المقطع الفعال لتشكيل الثقب الأسود المجهرى (بروتون - بروتون) في LHC بدلالة كتلة الثقب الدنيا وذلك من أجل مختلف قيم n ($n = 2, \dots, 7$) من الأسفل إلى الأعلى مع $M_* = 1\text{TeV}$ [57]

II-26: المقطع الفعال لتشكيل الثقب الأسود $\sigma(\nu N \rightarrow BH)$ أين $(M_* = M_{BH}^{\min} = 1\text{ TeV})$ وذلك من اجل مختلف قيم n في حين المنحنى المتقطع يمثل المقطع الفعال في إطار النموذج القياسي..... [60]

II-27: يمثل تدفق نوترينو cosmogenic $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu + \nu_e)$ أين المنحنى الخطي تقدير Protheroe و Johnson (PJ) مع طاقة القطع $E_{cutoff} = 3 \times 10^{21} \text{ eV}$ والمنحنى المتقطع تقدير Hill و Schramm أما في ما يخص المنحنى النقطي فيمثل تقدير Stecker [61]

III-28: (أ) نظام الإحداثيات المعتمد، (ب) تمثل تغير العمق العمودي للغلاف الجوي، X ، بدلالة الارتفاع العمودي على سطح البحر وفقا للنموذج linsley..... [66]

III-29: التوزيع الجانبي لمختلف الجسيمات الثانوية الناتجة عن اصطدام بروتون عموديا بالغلاف الجوي طاقته $5 \times 10^{18} \text{ eV}$ حيث نسبة التخفيف 10^{-6} (النتائج المحصل عليها هي معدل 100 شلال هوائي)..... [68]

- III-30:** التوزيع الطاقوي لمختلف الجسيمات الثانوية على سطح الأرض بنفس الشروط الابتدائية السابقة..... [69]
- III-31:** التطور الطولي لجسيمات (e^-e^+) في شلال الثقب الأسود المجهرى الناتج عن اصطدام نوترينو بالغلاف الجوي على ارتفاع 10 km عن سطح البحر طاقته 10^{19} eV حيث الزاوية الرأسية $\Theta = 70^\circ$ ومعدل التخفيف 10^{-6} (النتائج هي معدل 100 شلال هوائي)..... [74]
- IV-32:** التعدد الجزئي لشلال النموذج القياسي (Benchmark) بدلالة ارتفاع التفاعل الابتدائي على سطح جبل Pamir (4500 m) حيث الطاقة الابتدائية 10^{15} eV : (أ) نتائج محاكاة برنامج AIRES، (ب) نتائج محاكاة برنامج CORSIKA..... [77]
- IV-33:** التعدد الجزئي لشلال النموذج القياسي (Benchmark) بدلالة ارتفاع التفاعل الابتدائي للبروتون على سطح جبل Chacaltaya (5000 m) حيث الطاقة الابتدائية 10^{15} eV : (أ) نتائج محاكاة برنامج AIRES، (ب) نتائج محاكاة برنامج CORSIKA..... [78]
- IV-34:** التعدد الجزئي لجسيمات الشلال على مستوى سطح جبل Chacaltaya (5000 m) بدلالة ارتفاع الإصطدام الابتدائي حيث الطاقة الابتدائية 10^{17} eV : (أ) نتائج محاكاة شلالات النموذج القياسي (benchmark)، (ب) نتائج محاكاة شلالات الثقب الأسود (BH)..... [80]
- IV-35:** تغير التعدد الكلي لجسيمات الشلال على مستوى سطح جبل Chacaltaya (5000 m) بدلالة ارتفاع اصطدام الابتدائي حيث الطاقة الابتدائية 10^{17} eV : المنحنى المتقطع (الأسود) نتائج محاكاة شلالات النموذج القياسي بينما المنحنى الخطي (الأحمر) نتائج محاكاة شلالات الثقب الأسود..... [80]
- IV-36:** تغير التعدد الكلي لجسيمات الشلال الهوائي بدلالة الطاقة الابتدائية E_1 حيث الاصطدام الأول على ارتفاع 500 m من مستوى سطح الكاشف: (أ) نتائج محاكاة برنامج Groke، (ب) نتائج محاكاة برنامج CORSIKA..... [82]
- IV-37:** تغير التعدد الكلي لجسيمات الشلال الهوائي على مستوى سطح جبل Chacaltaya (5200 m) بدلالة الطاقة الابتدائية E_1 حيث الاصطدام الأول على ارتفاع 300 m من مستوى سطح الكاشف..... [82]
- IV-38:** تغير التعدد الكلي لجسيمات الشلال الهوائي بدلالة الطاقة الابتدائية E_1 حيث الاصطدام الأول على ارتفاع 15000 m من مستوى سطح الكاشف: (أ) نتائج محاكاة برنامج Groke، (ب) نتائج محاكاة برنامج CORSIKA..... [83]
- IV-39:** تمثل الميل m و الإعتراض q للتعدد الكلي. الأعداد على كل نقطة في الوثيقة تشير إلى قيمة الأبعاد الإضافية: (أ) نتائج تعدد الجسيمات في حالة اصطدام الابتدائي على ارتفاع 500 m عن مستوى الكاشف، (ب) نتائج تعدد الجسيمات في حالة اصطدام الابتدائي على ارتفاع 300 m عن مستوى الكاشف، (ج) نتائج تعدد الجسيمات في حالة اصطدام الابتدائي على ارتفاع 10000 m عن مستوى الكاشف..... [86]

40-IV: النسبة بين N_{em} (تعدد الفوتونات و $e^\pm$) و N_h (تعدد الهادرونات أي كلا من البيرونات و الكاونات المشحونة، النيترونات، البروتونات و ضد البروتونات) بدلالة الطاقة الابتدائية E_1 : (أ) في حالة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $500m$ عن مستوى الكاشف، (ب) في حالة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $300m$ عن مستوى الكاشف، (ج) في حالة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $10km$ عن مستوى الكاشف.....[90]

41-IV: النسبة بين E_{em} (الطاقة الكلية للفوتونات و $e^\pm$) و E_h (الطاقة الكلية للهادرينات أي كلا من البيرونات و الكاونات المشحونة، النيترونات، البروتونات و ضد البروتونات) بدلالة الطاقة الابتدائية E_1 : (أ) في حالة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $500m$ عن مستوى الكاشف، (ب) في حالة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $300m$ عن مستوى الكاشف.....[91]

42-IV: تمثل تعدد جسيمات $\mu^\pm$ وطاقتها الكلية على مستوى سطح الكاشف ($5000m$) أين الاصطدام الأول على ارتفاع $5500m$: (أ) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{17} eV$ ، (ب) طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{18} eV$ ، (ج) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{19} eV$[92]

43-IV: تمثل تعدد جسيمات $\mu^\pm$ وطاقتها الكلية على مستوى سطح الكاشف ($5200m$) أين الاصطدام الأول على ارتفاع $5500m$: (أ) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{17} eV$ ، (ب) طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{18} eV$ ، (ج) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{19} eV$[93]

44-IV: تمثل تعدد جسيمات $\mu^\pm$ وطاقتها الكلية على مستوى سطح الكاشف ($5000m$) أين الاصطدام الأول على ارتفاع $15000m$: (أ) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{17} eV$ ، (ب) طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{18} eV$ ، (ج) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{19} eV$[94]

قائمة الجداول

- 01-II :** قيم أفق الحدث للثقب الأسود المجهرى كتلته $M_{BH} = 5TeV$ من أجل مختلف قيم n [47]
- 02-II :** يمثل مختلف قيم درجة حرارة ثقب اسود مجهرى كتلته $M_{BH} = 5TeV$ من أجل قيم n متباينة [48]
- 03-II :** معدل الطاقة المنبعثة من أجل مختلف قيم n [55]
- 04-IV :** قيم متوسط الطاقة للجسيمات $\mu^{\pm}$ على سطح الكاشف من أجل تفاعل ابتدائي على ارتفاع $500m$ فوق الكاشف [96]
- 05-IV :** قيم متوسط الطاقة للجسيمات $\mu^{\pm}$ على سطح الكاشف من أجل تفاعل ابتدائي على ارتفاع $300m$ فوق الكاشف [97]
- 06-IV :** قيم متوسط الطاقة للجسيمات $\mu^{\pm}$ على سطح الكاشف من أجل تفاعل ابتدائي على ارتفاع $10000m$ فوق الكاشف [101]
- 07-A :** نموذج عن ملف Pyjet الناتج من تشكل وتفكك ثقب اسود مجهرى [103]
- 08-A :** التطور الطولي لفوتونات شلال ناتج عن اصطدام بروتون طاقته $10^{18} eV$ بالغلاف الجوي على ارتفاع $17km$ عن مستوى سطح البحر. حيث العمود الأول يعطي عدد المستويات الملاحظة [101]
- 09-A :** التوزيع الجانبي للميونات المشحونة شلال عمودي ناتج عن اصطدام بروتون طاقته $10^{18} eV$ بالغلاف الجوي على ارتفاع $17km$ عن مستوى سطح البحر على امتداد $7km$ من محور الشلال [106]

قائمة المختصرات (Acronyms)

LHC	Large Hadron Collider
AIRES	AIR-shower Extended Simulations
GZK	Geisen - Zatspin- Kuzmin
SN	SuperNova
AGNs	Active Galactic Nucleis
GRBs	Gamma Ray Bursts
UHECRs	Ultra High Energy Cosmic Rays
HETE	High Energy Transient Explorer
BATSE	Burst And Transient Source Experiment
CMB	Cosmic Microwave Background
LDF	Lateral Distributions Function
NKG	Nishimura-Kamata-Greisen function
GHF	Gaisser- Hillas Function
GLAST	Gamma-Ray Large Area Space Telescope
AMS	Alpha Magnetic Spectrometer
CREAM	Cosmic Ray Energetic And Mass
EGRET	Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope
KASCADE	Karlsruhe Shower Core and Array Detector
AGASA	Akeno Giant Air Shower Array
EUSO	Extreme Universe Space Observatory
ADD	Arkani-Hamed - Dimopoulos -Dvali
RS	Randall-Sundrum
BH	Black Hole

PDFs	Parton Distribution Functions
CERN	Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire
CMS	Compact Muon Solenoid
ISS	Intrenational Space Station
BHR	Black Hole Remnant
CATFISH	Collider gravitational Field Simulator for black Holes
QCD	Quantum Chromodynamics
YN	Yoshino-Nambu model
YR	Yoshino-Rychkov model
CORSIKA	Cosmic Rays Simulations For KASCADE
QGEJET	Quark Gluon String model with jets
EHSA	Extended Hillas Splitting Algorithm
CLEs	Centauros –Like Events

المقدمة العامة

إن الأشعة الكونية لها مكانة خاصة في الفيزياء بسبب الدور الكبير الذي لعبته - مازالت تلعبه - في دراسة الجسيمات الأولية و تفاعلاتها، إذ أن الحديث عن الجسيمات الأولية يرتبط بالحديث عن الأشعة الكونية لسببين: أولهما اكتشاف بعض الجسيمات أثناء دراسات أجريت على الأشعة الكونية ، وثانيها أن بعض الجسيمات الأساسية لا يمكن توليدها إلا بحصول تفاعلات نووية تكون فيها القذيفة ذات الطاقة العالية جدا غير ممكن توفيرها في المسرعات الصناعية و لا توجد إلا في الأشعة الكونية .

قبل سنة 1950 كانت الأشعة الكونية المصدر الوحيد المتوفر للجسيمات العالية الطاقة (فوق 1GeV) والوسيلة الوحيدة لدراسة الاصطدام القوي وعمليات التفكك. فمن خلال نتائج الأشعة الكونية تم اكتشاف ضد الجسيمات وبشكل خاص e^+ و إنتاج الزوج e^+e^- في عام 1932 و كذا الميونات (Muons) ، البيونات (Pions) في أواخر الأربعينات ، و قد مهد اكتشاف البيون لاكتشاف العديد من الجسيمات الأساسية الأخرى و التي كانت للأشعة الدور الكبير في اكتشافها ، إن دراسة الأشعة الكونية في الحقيقة مازالت مفتوحة جدا حيث تظهر ألغازا و حقائق جديدة بشكل يومي.

لا شك أن أغلب العلوم الحديثة تدين بالفضل إلى ألبرت اينشتاين (Albert Einstein) - نابغة القرن العشرين- الذي أدى ولعه بالعلوم الرياضية البحتة إلى اكتشاف أخطر الآراء العلمية التي ظهرت حتى الوقت الراهن، فبدلت صورة الكون المحدود التي ارتسمت في أذهان القدامى وعدلت أسرار الجاذبية التي كشف أسسها نيوتن، كما أوضحت للناس مدلول الطاقة والحركة والسرعة.

إن فكر أينشتاين قد تحرر بفعل معادلاته الرياضية من قيود المكان وأبعاده الثلاثة إلى بعد رابع غفل الناس عنه وهو الزمن. وقد نشر اينشتاين أولى نظريتيه عن النسبية عام 1905 وهي النظرية النسبية الخاصة ثم النظرية النسبية العامة بعد ذلك في عام 1912، لقد خلقت نظريتنا النسبية العامة والخاصة بعدا جديدا للكون وربطتاه بالمادة والحركة والطاقة والكتلة والمكان والزمن، فكان لهما التأثير الأكبر على المفهوم الحديث للكون، ولعل جوهر النظرية النسبية العامة هو أن وجود المادة يغير شكل الفضاء ويجعله يتقوس، ففي البدء نشأ مفهوم

تقوس الفضاء (Curvature) من الهندسة المتعددة الأبعاد التي لا تأخذ بفكرة الخط المستقيم بل الخط المنحني. وكان على أينشتاين في النسبية العامة تجاوز ذلك إلى ما هو أبعد؛ فقد لاحظ أن وجود المادة في الفضاء يخلق دائما مجالا مقوسا للجاذبية وقد عبر عن نظام الكون الرائع بمعادلات رياضية ترشدهم إلى بعض أسرار الكون المثيرة التي قد لا تتقبلها عقولنا في بعض الأحيان مثل وجود ما يسمى بالثقوب السوداء (Black Holes)، ومن ناحية أخرى تنبأ العالم الفلكي الشهير "ستيفن هوكينغ" (Steven Hawking) بإمكان وجود ثقب أسود صغير جدا وأوضح أيضا بأن كلا من الكثافة والتيارات الجاذبية تزداد مع صغر حجم الثقب الأسود.

إن إحدى أكثر سمات الفيزياء الحديثة هي الصلة بين النسبية العامة و فيزياء الجسيمات مما ينمي منطقة الدراسة العلمية اليوم تحت اسم فيزياء "ما بعد النموذج القياسي" الذي يعالج فيزياء الجسيمات الفلكية و أيضا الأشعة الكونية.

إن عجز النموذج القياسي في وصف جميع القوى فتح الباب نحو اقتراح عدد من النماذج تصب فيما يعرف بفيزياء ما بعد النموذج القياسي وعلى رأسها اقتراح وجود أبعاد إضافية في الكون مما أدى إلى إحداث تعديلات مهمة في الكوزمولوجيا و فيزياء الجسيمات و كذا فيزياء الثقب الأسود، وعلى ضوء هذه الفكرة أصبح اصطدام الجسيمات بمراكز طاقة أكبر من سلم الجاذبية المنخفض أي برتبة TeV يمكن أن يولد ثقوب سوداء مجهرية، ضمن نفس السيناريو من المتوقع تشكل الثقوب بكتلة تتراوح بضع TeV تنتج عن تصادم الأشعة الكونية العالية الطاقة (جسيمات النوترينو) مع بروتونات نيكليونات الغلاف الجوي أو حتى على الأرض وذلك في المسرعات مثل LHC.

مثل هذه الثقوب يتوقع تفككها فوراً من خلال إشعاع هوكينغ إلى جسيمات أولية والتي بدورها تتفاعل مع جزيئات الغلاف الجوي مشكلة بذلك شلالات هوائية. فإن كان من الصعب ملاحظة الثقوب السوداء المجهرية لسرعة تفككها فإنه يمكن الكشف عنها من خلال أثارها (شلالاتها الهوائية). في هذه المذكرة إن شاء الله سنتطرق لدراسة شلالات الثقوب السوداء المجهرية بالاعتماد على طريقة مونت كارلو في محاكاة الشلالات و البداية بتحري خصائصها و مقارنتها بشلالات النموذج القياسي، كما يضم العمل التحقق من إمكانية أن تكون ظاهرة Centauros لها علاقة بشلالات الثقوب السوداء المجهرية و اقتراح تواقع حديثة تساعد في مهمة التمييز بين شلالات الثقوب السوداء و النموذج المعياري.

بطبيعة الحال قبل الدخول في الدراسة مباشرة ، سوف نستهل الموضوع بمدخلين أو مقدمتين أساسيتين أولهما الأشعة الكونية العالية الطاقة (الفصل الأول) و الثانية فيزياء تشكل وتفكك الثقوب السوداء المجهرية (الفصل الثاني). الفصل الأول خصص لتعريف بالأشعة الكونية بشكل عمومي من خلال عرض خصائصها (التركيب الكيميائي، طيف الطاقة، مصادرها) كما تناولنا فيه دراسة الشلالات الهوائية محاولة منا إدراج أهم ما يميزها لنختم الفصل بالإشارة إلى بعض المراسد والتجارب التي تبحث في هذا المجال .

أما في الفصل الثاني ركزنا على تقديم الإطار النظري الذي يصف نماذج الأبعاد الإضافية وفلسفتها خصوصاً نموذج الأبعاد الإضافية الكبيرة (و الذي له علاقة وطيدة ببحثنا) وذلك طبعاً للدخول في موضوع فيزياء تشكل وتفكك الثقوب السوداء المجهرية حيث تطرقنا بشيء من التفصيل إلى شرح إشعاع هوكينغ ثم

تعمدنا الإشارة إلى الثقوب السوداء في السرعات الصناعية كما تناولنا دراسة الثقوب السوداء الناتجة في الغلاف الجوي نتاج اصطدام الأشعة الكونية العالية الطاقة التي نسعى إلى تحليلها في الفصول اللاحقة .

كما اشتملت هذه الدراسة على الفصل الثالث الذي يتناول باختصار على تقنيات المحاكاة حيث حاولنا أن نقدم ما يجب التحكم فيه في المحاكاة من خلال الإحاطة بأهم خصائص كلا من المولد Groke ومولد الشلالات الهوائية AIRES للاستفادة لمن كان في حاجته ومن جهة أخرى ليسهل استيعاب واستدراك النتائج فيما بعد .

ليتبعه الفصل الرابع والذي يضم العمل الأصلي لهذه الأطروحة أين تطرقنا إلى شرح الجوانب التي تم التركيز عليها في المحاكاة و كذا عرض النتائج المتحصل عليها مع مقارنتها بنتائج أعمال منشورة وكذا مناقشتها .

لتختتم المذكرة (الفصل الخامس) بملخص عامة نقدم فيها أهم النتائج المتحصل عليها مع فتح الباب للبحث في الموضوع وتحسين النتائج .

الفصل الأول

الأشعة الكونية العالية الطاقة

1.1. مقدمة

الأشعة الكونية هي عبارة عن جسيمات طاقوية تأتي من الفضاء إلى الأرض من مختلف المناحي و بصورة مستمرة، تتكون بشكل أساسي من 90 % من البروتونات، نحو 9 % جسيمات ألفا، 1% الكثرونات وبنسب ضئيلة جدا انوية باقي عناصر الجدول الدوري إضافة إلى الفوتونات وجسيمات النوترينو، ثم إن طاقة هذه الأشعة الكونية موزعة على طيف طاقي عريض يصل إلى 10^{20} eV.

وتعتبر الأشعة الكونية من المصادر الغنية بالجسيمات الأولية، إذ بدأ البحث فيها سنة 1900 أين كان تشالرز ويلسون (C.T.R Wilson) ، ألستر (Elester) و جيتلر (Geitel) يجرون تجارب حول مقدرة الهواء على توصيل الكهرباء، فاكشفوا أن هذه المقدرة قد ترجع إلى فاعل خارجي عن نطاق الأرض.

وفي عام 1912 قام الفيزيائي النمساوي فيكتور هيس (Victor Hess) بإجراء تجارب على هذه الظاهرة مستخدما منطادا هوانيا على ارتفاعات عالية، فوجد زيادة ملحوظة في الإشعاعات المتأينة مع زيادة الارتفاع، واستنتج بذلك أن مصدر التأين هو وجود أشعة آتية من الفضاء الخارجي [01]. وفي عام 1922 قام العالم الأمريكي ميليكان (Millikan) بدراسة هذه الجسيمات وقد وصل إلى ارتفاع يقارب 16 ألف متر ليثبت بذلك وجودها بحيث لا يدع مكانا للشك وقد أطلق على هذه الأشعة اسم الأشعة الكونية .

في سنة 1938 و بعد سلسلة تجارب أجراها بيير فيكتور أوجي (Pierre Victor Auger)، خلص إلى أن الأشعة الكونية التي تصل سطح الأرض لا تكون في الغالب هي الساقطة على الغلاف الجوي المحيط بالأرض،

بل هي أشعة ثانوية ناتجة عن تفاعل الأشعة الابتدائية (تفوق طاقتها حوالي 10^{15} eV) مع ذرات الغلاف الجوي مشكلة حزما عريضة من الجسيمات سميت بالشلالات الهوائية (Air Shower).

وفي عام 1962- ولأول مرة- تم اكتشاف شعاع كوني تصل طاقته 10^{20} eV و ذلك من قبل العالم جون ليسلي (John Lesly)، إذ أحدث هذا التسجيل ضوضاء كبيرة آنذاك لأنه لم يخیل لأحد أنه يمكن أن توجد جسيمات تحمل هذه الطاقة، أو بالأحرى وجود آلية تسرعها إلى 10^{20} eV ليتجه بعد ذلك اهتمام العديد من الفيزيائيين لهذا المجال الجديد من البحث.

ونحن بدورنا سنحاول التركيز في هذا الفصل على الأشعة الكونية ذات الطاقات العالية بطيف طاقي يفوق 10^{15} eV، ونتيجة للصعوبات التي تواجه دراسة الأشعة الكونية وبشكل خاص الجسيمات المشحونة بسبب الحقول المغناطيسية القوية للمجرة وبين المجرات والتي تؤدي إلى تحريف مسارها ماعدا ذات الطاقات العالية جدا، لذلك فهي الجديرة بالملاحظة حيث تزودنا ببعض الخصائص الهامة للأشعة كالتوزيع الطاقوي والتركيب الكيميائي، هذا الأخير يعتبر مؤشرا مهما لتحديد مصدر الإشعاع.

إذن سنحاول في هذا الفصل استعراض مجمل خصائصها من حيث التركيب الكيميائي، المصدر وطيف الطاقة، ثم نتطرق إلى ظاهرة قطع GZK التي اشتملت على عدد كبير من التفسيرات و البحوث، لنذكر بعدها أهم خصائص الشلالات الهوائية من خلال الإشارة إلى أهم التفاعلات الحادثة والجسيمات الناتجة، لنشير في الأخير إلى أهم الكواشف التي سجلت قياسات و نتائج هامة في هذا الحقل.

I.2. الخصائص العامة

إن الأشعة الكونية ذات الطاقات العالية أصبح لها صدی كبير في البحث العلمي لما أحدثته من معطيات فاقت العادة، ولهذا سعى الكثير من العلماء للبحث عن طبيعتها وطاقاتها بالإضافة إلى وضع نظريات عديدة تهدف لتفسير أصل هذه الأشعة وخاصة أنه لم يتم الوصول إلى هذه الطاقات على مستوى المخبر.

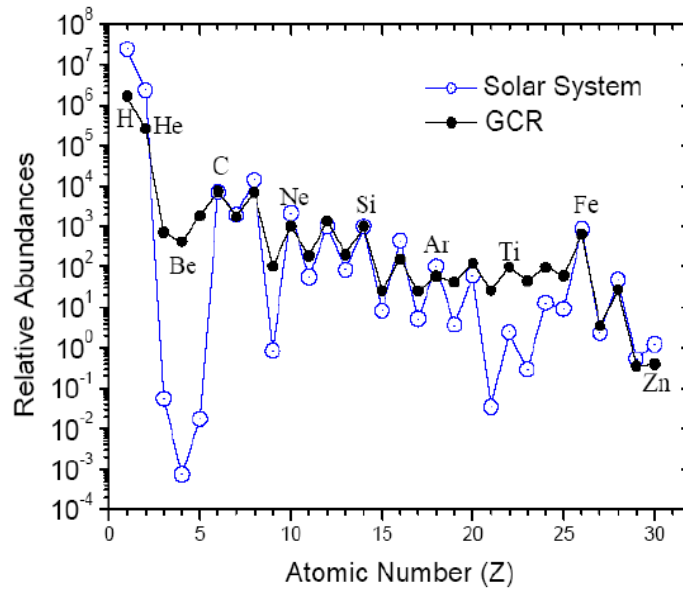
فيما يلي سنتعرض بشكل عام للتركيب الكيميائي و الطيف الطاقوي لهذه الجسيمات، كما سنشير إلى أهم المصادر التي يتوقع أن تكون منبعها لها.

I.2.1. التركيب الكيميائي و طيف الطاقة

إن كل العناصر الموجودة في الأشعة الكونية (ذات الطاقة الأقل من 10^{15} eV) هي ذاتها الموجودة في النظام الشمسي إلا باختلاف طفيف في نسبة تواجد بعض العناصر كالليثيوم (Lithium)، البيريليوم (Beryllium)، البورون (Boron) وكذا بعض العناصر الأخف من الحديد (Iron) حيث تتواجد بنسبة أكبر في الأشعة الكونية [02] (انظر إلى الوثيقة I-01)، ويمكن تفسير ذلك بإنتاجها أثناء تفاعل الجسيمات الابتدائية مع الوسط البينجمي .

أما التركيب الكيميائي للأشعة الكونية ذات الطاقات العالية فهو مجهول- إلى حد ما- نتيجة لضعف تدفقها وكذا عجز الكواشف على التقاطها و تحديد طبيعتها مباشرة وكذا الاعتماد على نماذج التفاعل المستنبطة في مجال ما بعد 10^{19} eV؛ في حين أن معظم التوقعات تتفق على أنه لا يمكن أن يكون جد مختلف عن التركيب الكيميائي للأشعة الكونية (10^{15} eV<) بمعنى هيمنة البروتونات، الالكترونات، أشعة غاما وجسيمات النوترينو.

إن طاقة الأشعة الكونية تعرف امتدادا واسعا عبر طيف طاقي من أقل من 10^9 eV إلى حوالي 10^{21} eV كما توضح الوثيقة 02-I؛ حيث يعبر عن طاقة الأشعة الكونية أو بالأحرى عن الطاقة الحركية لها بواسطة التدفق التفاضلي المعروف بأنه عدد الجسيمات التي تملك طاقة محصورة بين E و $E + dE$ أو بمقدار التدفق التكاملي الذي هو عدد الجسيمات التي تملك طاقة مقدارها E .



الوثيقة 01-I: نسبة تواجد العناصر الكيميائية في الأشعة الكونية المجرية مقارنة بنسبة تواجدها في النظام الشمسي بالنسبة إلى عنصر Si 100% [02].

في الحقيقة التدفق التفاضلي يتغير مع الطاقة وفق الصيغة التالية :

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma} \quad (01-I)$$

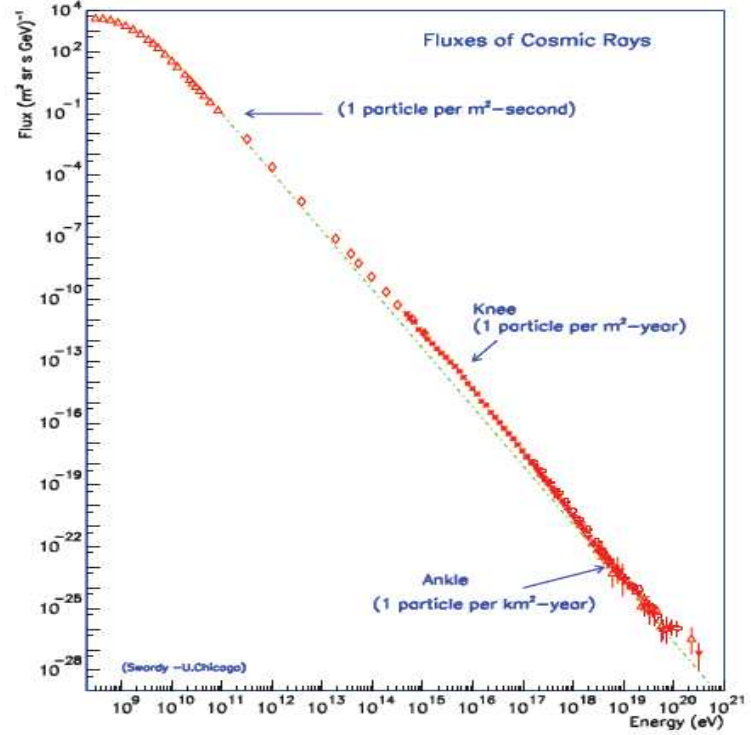
حيث يمثل:

N : عدد الجسيمات

E : الطاقة الحركية

γ : الدليل الطيفي

ولكون الطيف يمتد تقريبا على 13 عقدا في الطاقة و كذا 32 عقدا في التدفق أي بين بضعة آلاف جسيمة لكل متر مربع في الثانية من اجل الطاقات الدنيا إلى جسيمة لكل كيلومتر مربع في القرن من اجل الطاقات العليا، إن الطيف الطاقوي للأشعة الكونية يتميز بعدة أنماط يمكن تقسيمها



إلى

الوثيقة-I-02: طيف الطاقة الكلي للأشعة الكونية ممثلا بالتدفق التفاضلي للأشعة بدلالة الطاقة [03].

1- المجال الطاقوي $[10^{10} \text{ eV} - 10^{15} \text{ eV}]$: أين يتغير الطيف وفق الصيغة (01-I) وذلك من اجل الدليل الطيفي $\gamma = 2.7$. في هذا المجال تكون الأشعة الكونية عبارة عن جسيمات مجرية تخضع لآليات تسريع تقليدية سنتطرق لها في الفقرة اللاحقة، ونظرا لكون التدفق ذو قيمة معتبرة فإن الرصد يتم بواسطة الأقمار الصناعية و البالونات (المناطيد).

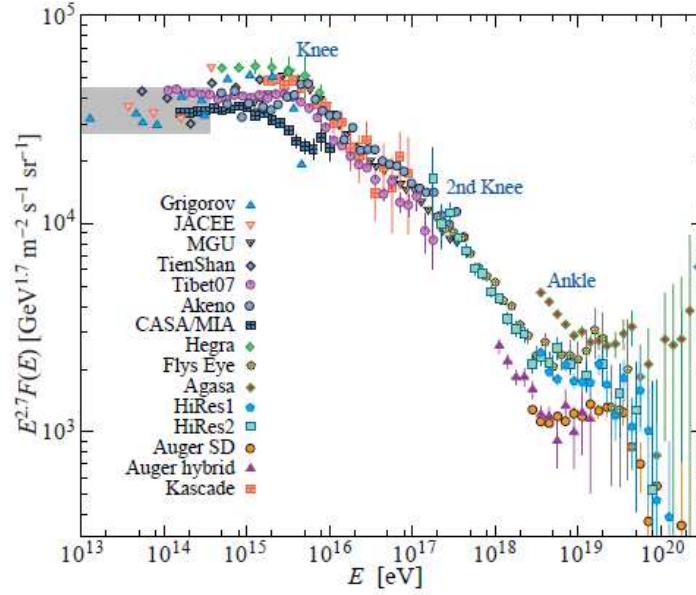
2- المجال الطاقوي $[10^{15} \text{ eV} - 10^{18} \text{ eV}]$: يقدر دليله الطيفي بحوالي $\gamma = 3.2$ ، في هذا المجال يكون التدفق ضعيفا جدا أي ما يقارب جسيمة لكل متر سنويا؛ في حين يتناقص التدفق بشكل أسرع في الانحدار الحاصل من اجل الطاقة $5 \times 10^{15} \text{ eV}$ (3-5) و الذي يدعى بـ الركبة «knee» وفق العلاقة:

$$\left(\text{I-02} \right) \quad \frac{dN}{dE} \propto E^{-3}$$

يفسر هذا التغير بوجود مصادر مختلفة للجسيمات تحمل طاقة من رتبة PeV؛ ليظهر منحدر آخر من أجل طاقة $6 \times 10^{17} \text{ eV}$ يدعى بالركبة الثانية «second knee» (انظر الوثيقة I-03). المجال الأخير: ويشمل الطاقات الأعلى من $5 \times 10^{18} \text{ eV}$ إذ يتغير التدفق وفق العبارة (01-I) مع $\gamma = 2.75$ ، حيث أن عدد الجسيمات الواردة قليلة جدا أي ما يقارب الجسيمة في الكيلومتر مربع سنويا، أما من اجل طاقة $5 \times 10^{19} \text{ eV}$

يصحح الطيف بدليل طيفي آخر يساوي 2.2 أين يدعى هذا الجزء بالكاحل «Ankle»، هذا الأخير يمثل بوابة للدخول في حقل الطاقات العالية جدا ($10^{20} \text{ eV} <$) حيث تمتاز بالندرة إذ يكون تدفقها ضعيفا جدا (حوالي جسيمة لكل كيلومتر مربع في القرن).

في الوقت الحاضر يسعى الباحثون لحل لغز مصدر مثل هذه الجسيمات و خاصة وأنها تبدو غير واقعية إذا ما انتسبت إلى آليات التسريع التقليدية.



الوثيقة 03-I : طيف الطاقة لأبرز المنحدرات [الركبتان و الكاحل] بالاستناد إلى كل النتائج التجريبية [04].

2.2.I. مصادر الأشعة الكونية

إن مصادر الأشعة الكونية ذات الطاقات العالية ليست معروفة بدقة للفيزيائيين الفلكيين لضعف تدفقها، ولا تزال تشكل أحد المسائل الفلكية العالقة والتي تستقطب الكثير من الباحثين مما أدى إلى صياغة العديد من النماذج و النظريات، لذلك قد تكون هذه الجسيمات ذات الطاقات المتطرفة بوابة لاكتشاف فيزياء جديدة . ولعل أهم الصعوبات التي تواجه تحديد مصادر الأشعة الكونية وبشكل خاص المشحونة منها هي الحقول المغناطيسية المجرية و البين مجرية، إذ تعتبر قوية بما فيه الكفاية لتحريف مسارها ماعدا الأشعة الكونية ذات الطاقات المتطرفة، و بذلك تعتبر الجسيمات الجديرة بالملاحظة لتحديد مواقع مصادر الأشعة الكونية.

فبملاحظة الطيف الطاقوي قد يكون أول سؤال يتبادر إلى أذهاننا هو: "هل هذه الأشعة تأتي بهذه الطاقة العالية جدا؟ وأي آلية تسمح بتوليدها بهذه الطاقة ؟ وللإجابة عن هذا التساؤل يمكن أن نلجأ إلى نوعين من السيناريوهات:

- سيناريو **Bottom-up** : يركز على أن الجسيمات تخضع لتسريع وبذلك تكسب طاقات إضافية عالية جدا بغض النظر إذا ما كانت المواقع التي يتم فيها التسريع مصدر إنتاجها أم لا.

• سيناريو *Top-down*: يركز على فرضية وجود جسيمات (X) تمتاز بكتلة هائلة من رتبة 10^{15} GeV ، إذ يعطي تفكك هذه الجسيمات الأشعة الكونية العالية الطاقة ، وقد تم إنتاج جسيمات (X) في المرحلة الأولى من تطور الكون أي قبل حوالي 15 مليار سنة من خلال الانفجار العظيم (*bing bang*)، كما أن هذه النظرية تفترض أن يكون مدة حياة الجسيمات عالية الكتلة من نفس رتبة عمر الكون [05-01].

لكل من سيناريو *Bottom-up* و *Top-down* نجاحات و إخفاقات، فكلاهما يستطيع شرح مصدر جزء من الطيف الطاقوي؛ فالأول صالح بالنسبة لطاقات أقل من 1 TeV أما السيناريو *Top-down* فهو صالح بالنسبة لطاقات أعلى من 1 EeV .

فيما يأتي سنحاول تلخيص آليات التسريع ومواقعها دون الدخول في التفاصيل وذلك من أجل فهم المبادئ الأساسية.

1.2.2.I. آليات التسريع

باعتبار الأشعة الكونية جسيمات عادية (أي طاقتها منخفضة) خضعت لعملية تسريع قوية، نجد عدة آليات مقترحة ومن أهمها آلية التسريع بالحقول الكهربائية و آلية *Fermi*.

1.1.2.2.I. آلية التسريع بالحقول الكهربائية

بما أن الأشعة الكونية معظمها جسيمات مشحونة فإن أبسط طريقة لتسريعها هي خضوعها لتأثير حقل كهربائي، إلا أن التسريع بالحقل الكهربائي الكهروستاتيكي أمر مستبعد لأن بلوغ طاقتين رتبة 10^{20} eV يتطلب فرق الكمون كبير جدا ولا يوجد أي جرم له القدرة على توفير مثل هذا الكمون. على عكس من ذلك تبدو آلية التسريع بالحقول الكهربائية المحرصة – أي التي تنشأ من الحقول المغناطيسية الغير المستقرة – أكثر واقعية، فالحقول المغناطيسية موجودة في كل أنحاء الكون و تمتد على مسافات كبيرة حيث يمكن لجسيمة شحنتها Ze أن تتحرك داخل حقل شدته B فتكتسب طاقة قيمتها القصوى [06]:

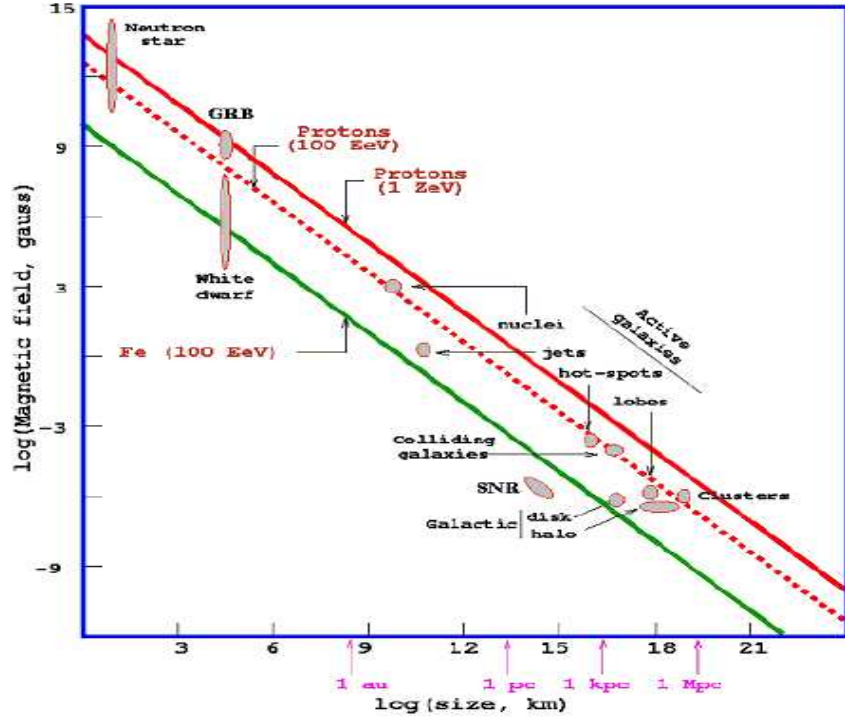
$$E_{Max} \propto Z\gamma BR_s \quad (03 - I)$$

حيث γ : معامل لورنتز للوسط المسرع.

R_s : نصف قطر المصدر

توضع الأجرام السماوية المختلفة التي من المحتمل أن تكون مصدرا للأشعة الكونية بدلالة شدة الحقل المغناطيسي طبقا لحجم المصدر في مخطط يدعى بمخطط *Hillas* الموضح في الوثيقة I-04.

في الوقت الراهن لا يعتمد على هذه الآلية -على نحو كبير- كآلية تسريع للأشعة الكونية، ذلك لأن تسريع هذه الجسيمات يظهر فقط إذا تحركت في اتجاه شعاع الحقل الكهربائي، بالإضافة إلى أنه من الصعب ملاحظة الطيف الطاقوي.

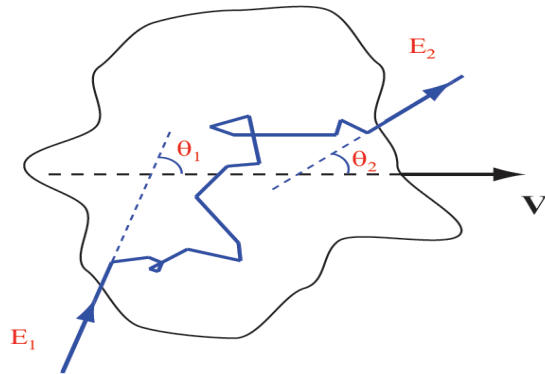


الوثيقة I-04 : مخطط Hillas للمواقع الفعالة القادرة على تسريع الأشعة الكونية إلى طاقات متطرفة [06].

2.1.2.2.I آلية التسريع Fermi

اقترحت هذه الآلية من قبل الفيزيائي *Fermi* سنة 1949، وتستند هذه الفكرة إلى أن الجسيمات تتسارع عندما تكتسب طاقة نتيجة تصادمها مع جسيمات أخرى. يسمى النموذج الأول الذي اقترحه *Fermi* بالتسريع من الرتبة الثانية، وتعتبر الآلية الأكثر ترشحا بأن تكون هي المسؤولة عن التسريع حيث تكتسب الجسيمات- في هذا النموذج - طاقة عند اختراقها السحب المغناطيسية أين تأخذ هذه الأخيرة سلوك مضرب على كرة وبالتالي تزويد الجسيمات بطاقة حركية، ونتيجة الصدمات المتعاقبة يمكن أن تصل طاقة الأشعة الكونية إلى ما يفوق 10^{20} eV [05].

نعتبر جسيمة نسبية طاقتها E_1 بالنسبة لمعلم الملاحظ، تخترق سحابة مغناطيسية سرعتها V كما توضح الوثيقة التالية:



الوثيقة I - 05 : رسم تخطيطي يوضح اصطدام جسيمة بسحابة مغناطيسية في حركة انسحابية.

استنادا على تحويلات لورنتز نحصل على:

$$E_1' = \gamma E_1 (1 - \beta \cos \theta_1) \quad (04 - I)$$

$$\beta = \frac{V}{c} \quad , \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

β : السرعة النسبية.

θ_1 : الزاوية بين شعاع سرعة الجسيمة و شعاع سرعة السحابة.

و بخروج الجسيمة من السحابة بالزاوية θ_2' تكون قد اكتسبت طاقة E_2' بالنسبة لمعلم السحابة المغناطيسية، فيصبح مقدار الطاقة في معلم الملاحظ:

$$E_2 = \gamma E_2' (1 + \beta \cos \theta_2') \quad (05 - I)$$

باعتبار الاصطدام مرنا أي: $E_2' = E_1'$

من خلال المعادلات السابقة، يمكن كتابة عبارة تغير الطاقة $\Delta E = E_2 - E_1$ كما يلي:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{(1 - \beta \cos \theta_1)(1 + \beta \cos \theta_2')}{1 - \beta^2} - 1 \quad (06 - I)$$

بما أن حركة الجسيمة عشوائية في السحابة فإن: $\langle \cos \theta_2' \rangle = 0$

نظرا لكون حركة السحابة بطيئة مقارنة مع حركة الجسيمة ($V \ll c$) فإن احتمال دخولها السحابة

$$\text{بالزاوية } \theta_1 \text{ تتناسب مع } \frac{c - V \cos^2 \theta_1'}{2c} \text{ ومنه } \langle \cos \theta_1 \rangle = -\frac{1}{3} \beta$$

أما متوسط نسبة الطاقة المكتسبة فيكتب بالشكل:

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{1 + \frac{\beta^2}{3}}{1 - \beta^2} - 1 \approx \frac{4}{3} \beta^2 \quad (07 - I)$$

وبما أن الطاقة المتوسطة المكتسبة من كل اصطدام تتغير بدلالة مربع سرعة السحابة المغناطيسية فإن هذا النموذج عرف بالتسريع من الرتبة الثانية .

وبما أن سرعة السحابة صغيرة فإن الطاقة المكتسبة من كل اصطدام صغيرة أيضا، لذلك فإن آلية التسريع من الرتبة الثانية ليست كفوا لأنها تتطلب مدة زمنية كبيرة تفوق العمر النموذجي للأشعة الكونية، كما أن المسافات بين السحب المغناطيسية كبيرة مما يؤدي إلى فقدان هذه الجسيمات جزءا من طاقتها خلال عبورها الغبار المنتشر في الفضاء.

ونتيجة للنقائص و الصعوبات التي واجهت النموذج الأول تم تحسينه ليعرف باسم آلية التسريع من الرتبة الأولى. هذه الآلية تعتمد على فكرة التصادم بين الجسيمات وجبهة الموجة حيث تحدث موجة الصدمة عندما تتحرك المادة في وسط ما بسرعة تفوق سرعة الصوت في ذلك الوسط إذ تبلغ سرعة السحب التي تقذفها المستعرات في البينجمي حوالي 10^4 km/s و تبلغ سرعة الصوت في الوسط البينجمي 10 km/s .

و للمزيد من التوضيحات نعتبر انتقال جبهة الصدمة بسرعة U_1 وما وراء الجبهة المستوية ينحصر غاز سرعته U_2 ، هذا يعني أن سرعة الغاز بالنسبة لمعلم الملاحظ هي $V = U_1 - U_2$ (أنظر الوثيقة I-08)، وبما أن جبهة الصدمة مستوية فإن احتمال اصطدام الجسيمة بالزاوية θ_1 يتناسب مع $2 \cos^2 \theta_1$ حيث $-1 < \cos \theta_1 < 0$.

$$\langle \cos \theta_1 \rangle = -\frac{2}{3} \quad \text{لنحصل:}$$

$$\langle \cos \theta'_2 \rangle = \frac{2}{3} \quad \text{وبنفس الطريقة نجد:}$$

يعطى الربح في الطاقة الحاصل من موجات الصدم بالعلاقة :

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{1 + \frac{4}{3} \beta + \frac{4}{9} \beta^2}{1 - \beta^2} - 1 \approx \frac{4}{3} \beta \quad (08-I)$$

ومن العبارة (08-I) يتضح أن: $\langle \Delta E \rangle > 0$

إذا ما افترضنا أنه في كل اصطدام جسيمة بجبهة الموجة تكتسب مقدار εE_0 من الطاقة، فانه بعد سلسلة من الصدمات عددها n نحصل على الطاقة $E = E_n$ حيث:

$$E_n = E_0 (1 + \varepsilon)^n \quad (09-I)$$

في كل مرحلة تسريع، تملك الجسيمات احتمال هروب p ، إذن احتمال البقاء في آلية التسريع هو

$$(1-p)^n \quad \text{ومنه يمكن تقدير عدد الجسيمات التي طاقتها تفوق } E \text{ بما يلي:}$$

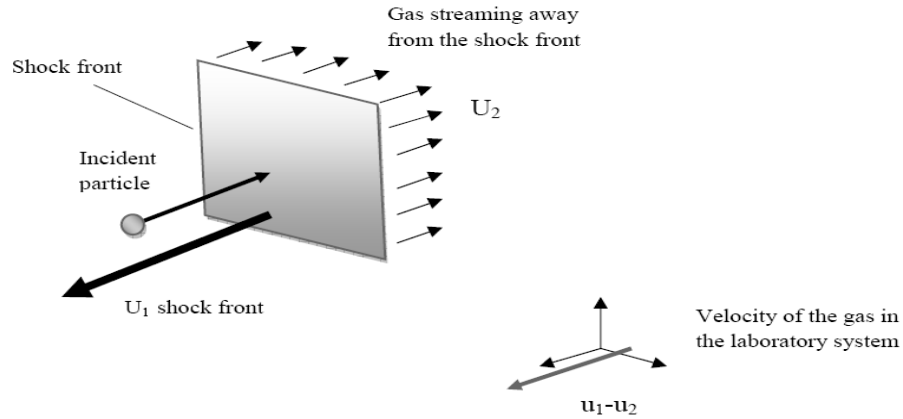
$$N(> E) \approx \sum_{m=n}^{\infty} (1-p)^n \quad (10-I)$$

وبما أن $\sum_{m=0}^{\infty} x^m = \frac{1}{1-x}$ من أجل $(x < 1)$ فإن:

$$N(> E) \approx \frac{(1-p)^n}{p} \approx \frac{1}{p} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} \approx E^{-\gamma} \quad (11-I)$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{E}{E_0}\right)}{\ln(1+\varepsilon)} \quad , \quad \gamma = -\frac{\ln(1-p)}{\ln(1+\varepsilon)} \quad \text{حيث:}$$

إذن هذا النموذج يفسر الطابع الأسّي للطيف الطاقي التفاضلي، كما أن التسريع بهذه الآلية يمكن الجسيمات من بلوغ طاقة تفوق 10^{15} eV.



الوثيقة I-06: مخطط لآلية التسريع بموجات الصدمة [07].

2.2.2.1. مواقع التسريع

سنحاول الآن تقديم أبرز المواقع المتوقع حدوث التسريع فيها و الإشارة إلى أهم مصادر الأشعة الكونية العالية الطاقة المعتمدة حالياً على الأقل، لأنه حتى اللحظة لا يوجد هناك إثبات يقيني.

1.2.2.2.1. المستعرات العظمى (Supernova)

إن نهاية حياة النجوم الثقيلة التي تزيد كتلتها عن ثمانية أضعاف كتلة شمسنا هي من الظواهر الأكثر إثارة وعنفاً في كوننا، والتي يطلق عليها اسم المستعرات العظمى أو كما هو معروف باللغة الانجليزية Supernova (SN)، يكون انفجار هذه النجوم بعد أن يستنزف مركبها الأساسي الهيدروجين ليتشكل في مركزها أنويه ثقيلة

وبشكل رئيسي أنويه الحديد عن طريق الانشطار النووي ، وعندما تتوقف عملية الانشطار ينهار النجم الهائل بفعل الجاذبية مما يؤدي إلى زيادة الحرارة و الضغط في المركز فينفجر هذا النجم ويقذف مادته بسرعة كبيرة مشكلة موجة اهتزاز قوية في الوسط البينجمي ويمكن للجسيمات المشحونة أن تسرع في هذه الصدمة طبقا لآلية Fermi.

2.2.2.2.I. النجم النابض (Pulsar)

النجم النابض هو نجم نيوتروني ذو كثافة هائلة $10^{14} g/cm^3$ ، كروي الشكل نصف قطره يقارب 10km وهو عبارة عن خلاصة انفجار المستعرات، كما يمتاز بحقل مغناطيسي كبير جدا مما يؤدي إلى دورانه حول نفسه بسرعة كبيرة، وبذلك يعتبر النجم النابض من المواقع المناسبة لتسريع الجسيمات نتيجة الدوران السريع للحقل المغناطيسي بسرعة زاوية Ω مما يؤدي إلى إنتاج حقل كهربائي قوي الشدة [01]:

$$\vec{E} = -(\vec{\Omega} \wedge \vec{r}) \wedge \vec{B} \quad (12 - I)$$

هذا الأخير يسرع الجسيمات المشحونة إلى غاية طاقة تقدر ب:

$$E_{Max} = 6 \times 10^{13} Ze \left(\frac{B}{10^{13} G} \right) \left(\frac{P}{10^{-3}} \right)^{-2} \quad (13 - I)$$

Ze : شحنة الجسيمة. P : الدور.

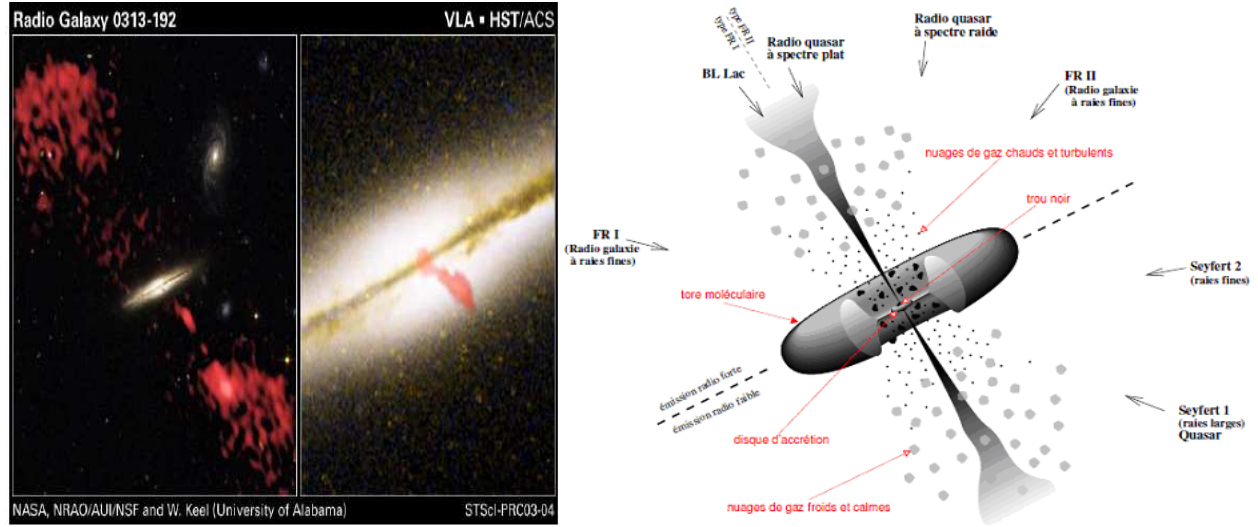
من خلال الصيغة يتضح أن النجوم التي تملك سرعة دوران كبيرة (أي دورها من رتبة ميلي ثانية) وحقل مغناطيسي $B \geq 10^{13} G$ بإمكانها تسريع الجسيمات إلى طاقة تقارب $10^{19} eV$ ، ولقد لوحظ إلى حد الآن أن أقرب نجم نابض يتواجد على بعد $8 kpc$ حيث تعتبر النجوم النابضة من مصادر الأشعة الكونية المجرية العالية الطاقة.

3.2.2.1.I. الأنوية المجرية النشطة (Active Galactic Nucleis)

أنوية المجرات النشطة هي أكثر الأجرام السماوية إضاءة، تتكون أساسا من ثقب اسود مركزي هائل الكتلة تزيد عن 10^8 كتلة الشمس، يحيط به قرص تراكم سريع الدوران مما يؤدي إلى تشكل زوج من المقذوفات على طول محور الدوران كما توضح الوثيقة 07-I.

وقد صنفت الأنوية المجرية النشطة كمصدر للأشعة الكونية من خارج المجرة بالأخص البروتونات التي تملك طاقة في حدود $10^{21} eV$. ومن الخصائص الرئيسية للأنوية المجرية النشطة أنها تبعث إشعاعات على مدى الطيف الضوئي (من الأشعة تحت الحمراء إلى الأشعة السينية) بالإضافة إلى أشعة غاما .

إن الأنواع المختلفة للظواهر الملاحظة المتعلقة بالأنوية المجرية دمجت في نموذج موحد لتصنف على أساس زاوية النظر نذكر منها المجرات الإذاعية، الكوزارات، البلازرات وكذا مجرات seyfert.



الوثيقة I- 07: على اليمين رسم تخطيطي لنموذج الأنوية المجرية النشطة موضحا مختلف أنواع الأنوية حسب زاوية النظر، وعلى اليسار نواة راديو مجرية نشطة 0313-192 [08].

يمكن أن تكون الأصناف المتباينة للأنوية هي المسؤولة عن تدفق الأشعة الكونية حتى القطع GZK بمعنى أنها تعتبر من مواقع تسريع البروتونات إلى طاقات تفوق 10^{19} eV.

يعتبر M87 في عنقود العذراء التي تبعد عنا بحوالي 10Mpc من الأنوية المجرية النشطة الأقرب المعروفة و يليها NGC315 هذه الأخيرة تقع على بعد 80Mpc، ولكن نتيجة للمسافات الكبيرة فان مقذوفاتها تخسر طاقة معتبرة أثناء انتشارها [07].

4.2.2.2.I انفجارات الأشعة غاما (Gamma Ray Bursts)

تعتبر انفجارات الأشعة غاما (GRBS) من الأحداث العنيفة و النادرة، تمتاز ببعث إشعاع حاد جدا في فترة زمنية قصيرة من رتبة ألف جزء من الثانية إلى بضعة ثواني، تتموقع هذه الانفجارات على مسافات كونية كبيرة حيث يتوقع أن تصل طاقتها حوالي 10^{44} joule إلى 10^{47} joule [08]. من أهم المراصد التي تبحث في هذا المجال و تحاول رصدها BATSE، HETE، HETE 2، أما نظريا فهناك نموذج « الكرة النارية» (fire ball model)، وهو يهدف إلى ترجمة إشعاعات انفجارات الأشعة غاما و تفسير آليتها [09].

سيناريو الكرة النارية يستند إلى أن انفجارات الأشعة غاما مشابهة لانفجار سوبرنوفات حيث يحدث انفجار الكرة النارية المتكونة أساسا من بلازما الفوتونات و الإلكترونات و البوزيترونات بسبب الكثافة الهائلة الناتجة عن الحجم الصغير للجرم و الضغط العالي، كما أن توسع انفجار البلازما النسبية يسمح بتسريع الجسيمات

المشحونة في الموجات الاهتزازية مما يسبب انبعاث إشعاع synchrotron نتيجة للحقل المغناطيسي [11-10] و هكذا يفسر ملاحظة تدفق فوتونات بطاقات عالية جدا (أشعة غاما).

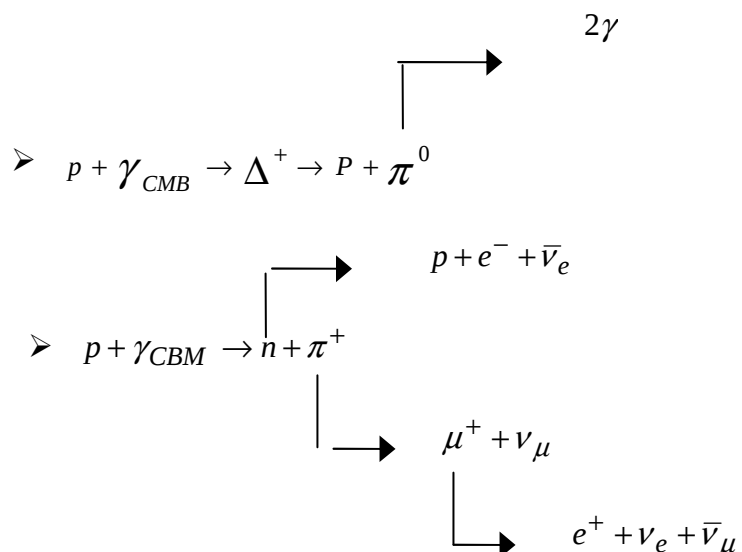
كما يتوقع أن الأشعة الكونية ذات الطاقة الأقل من 1 EeV مصدرها هو انفجار الإشعاعات غاما المجرية ، أين نسبة GRBs في المجرة من الممكن أن تقدر ب الواحد لكل مليون سنة أما طيف الأشعة ما بعد 1EeV فمصدره GRBs خارج المجرة، هذا ما يتوقعه النموذج حيث يبقى النقاش مفتوحا على إمكانية اعتبار انفجارات إشعاعات غاما مصدرا للأشعة الكونية ذات الطاقة 10^{20} eV .

I. 3. القطع GZK

تحدث الأشعة الكونية ذات الطاقة العالية جدا والتي تفوق 10^{19} eV تساؤلا آخر وهو حول كيفية الحفاظ على طاقتها أثناء انتشارها في الفضاء و الوصول إلى الأرض بعد إنتاجها أو تسريعها في مواقع مختلفة من الكون ، وخاصة أن مصادرها تتواجد على مسافات كوزمولوجية ($100 \text{ Mpc} <$).

في عام 1965 تم اكتشاف فوتونات *CMB* من قبل *Wilson* و *Penzios* وقد قدرت كثافتها حوالي 400 photon/cm^3 [07]. و في عام 1966 تنبأ كل من *V.A Kuzmin* ، *Zatspin* و *Geisen* أن الإخماد أو الانحدار الحاصل في تدفق الأشعة الكونية على الكاحل ($5 \times 10^{19} \text{ eV}$) راجع إلى تفاعل الأشعة الكونية مع فوتونات *CMB*، و أطلق على هذه الظاهرة اسم القطع *GZK* نسبة للفيزيائيين الثلاثة المذكورين آنفا [01].

وبما أن الأشعة الكونية في الغالبية العظمى هي بروتونات أو أنوية فان السلوك العام للأشعة الكونية تحددها هي بالدرجة الأولى. ونستطيع حصر أهم تفاعلات البروتون مع فوتون CMB فيما يلي [10]:



$$\triangleright p + \gamma_{CBM} \rightarrow p + e^- + e^+$$

نظرية GZK تتوقع أن تفاعل البروتونات (أنوية) ذات طاقات تفوق 10^{19} eV مع CMB تفقد تقريبا 15% من طاقتها من أجل كل تفاعل .

كل تفاعل من هذه التفاعلات -على الترتيب- تزيد من طاقة البروتون، فمن أجل فوتون طاقته 10^{-3} eV يمكننا حساب الطاقة الحركية للبروتون وذلك لإعطاء فكرة مبسطة حول عتبة طاقة التفاعلات :

$$(E_T + E_{CMB})^2 - (\vec{P}_T + \vec{P}_{CMB})^2 = (E_p + E_\pi)^2 - (\vec{P}_p + \vec{P}_\pi)^2 \quad (14 - I)$$

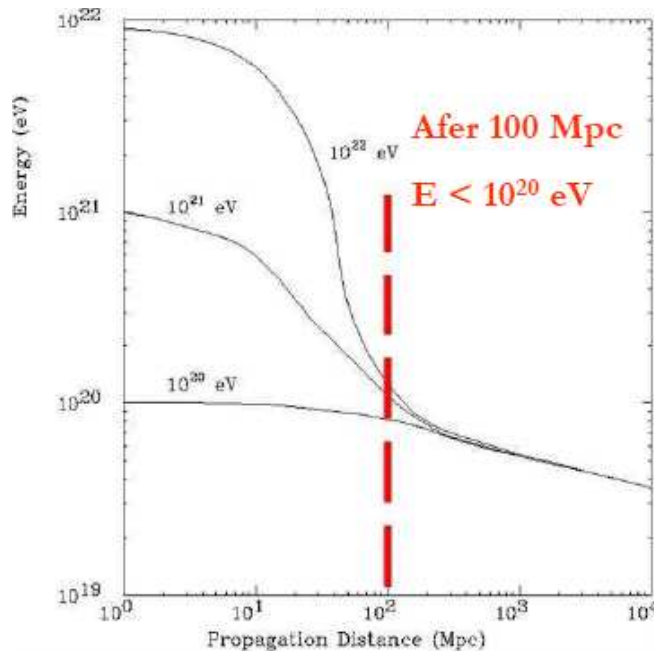
$$E_T = \frac{m_\pi^2 + 2 m_\pi m_p}{4 E_{CMB}} \quad (15 - I)$$

$$E_T = 7 \times 10^{19} \text{ eV} \quad (16 - I)$$

إذن من الممكن تحديد الخسارة الأسية لطاقة البروتونات ذات المصادر البعيدة، و كذا تخامدها (كما توضح الوثيقة 08-I) من خلال العلاقة :

(17 - I)

$$\ell = 6 \times \exp \left(\frac{3 \times 10^{20}}{E(\text{eV})} \right) \text{Mpc}$$



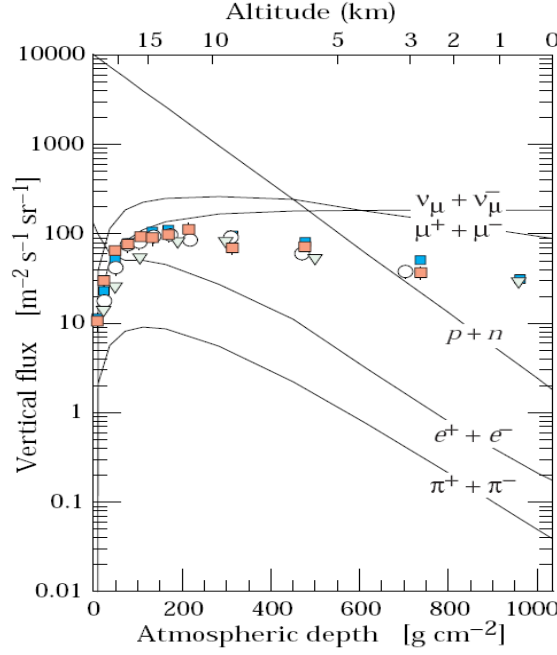
الوثيقة 08-I: الطاقة المتوسطة للبروتونات طبقا لبعدها عن المصادر من أجل طاقات مختلفة.

طبقا للوثيقة 08-I يتضح جليا أن البروتونات يمكن أن تنتشر لمسافات كبيرة لكن بخسارة فائقة لطاقتها ليحدد بذلك المسافة المحتملة لمصدر البروتونات ذات طاقة تعادل 10^{20} eV إلى 100Mpc .

4.I. الشلالات الهوائية

عند اختراق الأشعة الكونية ذات الطاقة العالية للغلاف الجوي تتفاعل مع مركباته لتعطي أشعة كونية ثانوية مشكلة ما يعرف بالشلالات الهوائية، هذه الأخيرة عبارة عن عدد من الجسيمات الناتجة عن تسلسل تفاعلات في الغلاف الجوي عددها يزداد ويتضاعف حتى تصل الطاقة المتوسطة (طاقة الحرجة) للجسيمات غير كافية لإنتاج جسيمات أكثر. هذه النقطة من تطور الشلال الهوائي تدعى الحد الأعظم للشلال (*shower maximum*) حيث يعطى عدد الجسيمات الأعظم بـ N_{max} ، ثم يتناقص عدد الجسيمات تدريجيا ما بعد الحد الأعظم، وفي الأخير تصل الأشعة الكونية الثانوية إلى سطح الأرض لتتوزع على مساحة تصل إلى عشرات من الكيلومترات المربعة [12]. جسيمات الشلالات الهوائية تتضمن من ثلاثة مركبات رئيسية: الكهرومغناطيسية، الهادرونات و الميونات بالإضافة إلى جسيمات النوترينو، وتعتبر هذه الأخيرة و الميونات المركب الأكثر تواجد بالقرب من سطح البحر و تحت سطح الأرض [14] (انظر إلى الوثيقة I-09)، إذ أن الميونات تفقد حوالي 2 GeV من طاقتها خلال عبورها الغلاف الجوي ، كما تعتبر المركب المغذي للمركب الكهرومغناطيسي حيث يقدر التدفق التكاملي العمودي للميونات عند الطاقات الأعلى من 1 GeV على مستوى البحر بحوالي $70\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{ sr}^{-1}$ ، في حين يقدر تدفق جسيمات النوترينو من أجل الطاقات الأكبر من 1 GeV بحوالي $2 \times 10^6\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{ sr}^{-1}$ [13].

إن المركبة الكهرومغناطيسية (الالكترونات ، البوزيترونات و الفوتونات) تنشأ ضمن الشلالات الهوائية نتيجة تفكك الميزونات حيث يقدر التدفق التكاملي العمودي للالكترونات و البوزيترونات معا عند مستوى سطح البحر بحوالي $(0.2 - 6 - 30)\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{ sr}^{-1}$ من أجل الطاقات $(10 - 100 - 1000)\text{ MeV}$ على التوالي؛ أما نسبة الفوتونات إلى الالكترونات و البوزيترونات معا فهي تقريبا 1.3 من أجل الطاقات الأعلى من 1 GeV لتقدر بـ 1.7 عند الطاقات الأقل من الطاقة الحرجة [13-04] .



الوثيقة I - 09: التدفق العمودي للأشعة الكونية الثانوية للمنطقة الأكثر تمركزاً للجسيمات في الغلاف الجوي في المجال الطاقي ($E > 1 \text{ GeV}$)، و النقاط تمثل القيم المقاسة للميونات السالبة [04].

يتم إنتاج الهادرونات ($\pi^0, \pi^\pm, K^\pm, \dots$) خلال التفاعلات النووية الهادرونية بين الأشعة الكونية وأنوية الغلاف الجوي، إلا أنها تتناقص في العدد أثناء انتشارها في الغلاف الجوي نتيجة لتفاعلاتها القوية وفق العلاقة التالية :

$$N_h(x) = N_0 \exp\left(-\frac{X}{\Lambda}\right) \quad (18 - I)$$

N_0 : عدد الهادرونات الابتدائية X : عمق الغلاف الجوي

بحيث يعرف عمق الغلاف الجوي على أنه كمية المادة المخترقة من قبل الشلال في نقطة معطاة ، يرمز له بالرمز X وتكون قيمتها محسوبة بمكاملة كثافة الهواء من نقطة دخول الشلال إلى قمة الغلاف الجوي، وتعطى وحدته بـ: (g/cm^2) [07].

حيث يأخذ معامل التخماد الخطي Λ للغلاف الجوي القيمة 155 gcm^{-2} ، و عليه يصبح التدفق التكاملي العمودي للهادرونات عند مستوى سطح البحر ضعيفا بالمقارنة بالمركبين الآخرين. كما يتميز مكون الهادرونات بالطاقات العالية وتمركزه في قلب الشلال، في حين تكون الكهرومغناطيسية إلى الخارج من الشلال الهوائي.

إن التفاعل الابتدائي من الأساسيات التي لها علاقة وطيدة بطاقة الجسيمة الابتدائية وطبيعتها؛ و هنا نميز نوعين من الشلالات الهوائية:

1.4.I. الشلالات الكهرومغناطيسية

تمثل السلاسل الناتجة عن تفاعل إلكترون أو فوتون ذو طاقة عالية جدا مع ذرات الغلاف الجوي ليتبع التصادم الأول بسلسلة من التفاعلات، هذا الأخيرة ينتج عنها الملايير من الأشعة الكونية الثانوية والتي تتركب أساسا من الإلكترونات، البوزونات و الفوتونات، ومن التفاعلات المهمة في تطوير الشلالات نجد إنتاج الزوج $(e^- e^+)$ وظاهرة الكبح (Bremsstrahlung) [07].

❖ إنتاج الزوج $(e^- e^+)$

ينتج الزوج نتيجة تفاعل الفوتون مع الحقل الكهربائي لجسيمة مشحونة خلال اختراقه الغلاف الجوي، و ذلك من أجل فوتون يملك طاقة $h\nu$ تفوق $h\nu \geq 2m_e c = 1.022 \text{ MeV}$

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (19 - I)$$

ليتبع هذا التفاعل مباشرة بما يعرف بإخماد (إفناء) الزوج (annihilation)، حيث أن البوزيترون الناتج يتفاعل مع إلكترون الوسط (الغلاف الجوي) لينتج زوج من الفوتونات بحيث تكون الزاوية بينهما 180° أي أنهما ينبعثان في اتجاهين متعاكسين و طاقة كل منهما تفوق 511 KeV:

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma \quad (20 - I)$$

❖ ظاهرة الكبح (Bremsstrahlung)

هي ظاهرة إنتاج الفوتونات عند تغير سرعة الجسيمة لحظة دخولها وسطا ما، فالجسيمات المشحونة تتسارع أو تتباطأ حسب الحقل الكولومبي لذرات الغلاف الجوي، وهذا ما يؤدي إلى بعث فوتونات أي حدوث ظاهرة Bremsstrahlung.

تعتبر الإلكترونات و البوزيترونات أكثر الجسيمات تأثرا بظاهرة الكبح حيث:

$$e^\pm + N \rightarrow e^\pm + N + \gamma \quad (21 - I)$$

إن تطور الشلال الكهرومغناطيسي يمكن وصفه ضمن نموذج Heitler الذي يستند إلى افتراض وجود فوتون طاقته E_0 ينتج الزوج $(e^- e^+)$ ، حيث يملك كل لبون نصف الطاقة $\left(\frac{E_0}{2}\right)$ ، وينتج كل

إلكترون فوتون Bremsstrahlung طاقته $\left(\frac{E_0}{4}\right)$ ؛ ثم على مسافة ما من الشلال سينتج 2^n جسيمة، كل منها

تحمل طاقة متوسطة $\left(\frac{E_0}{2^n}\right)$ و تستمر هذه العملية حتى تبلغ الطاقة المتوسطة الطاقة الحرجة E_c .

2.4.I . الشلالات الهادرونية

تمثل السلاسل الناتجة عن التصادم النووي للبروتونات أو الأنوية (الهادرونات) مع أنوية الغلاف الجوي، بحيث ينتج عن التصادم الأول بشكل رئيسي بيونات ($pions$) و الكاونات ($kaons$) المشحونة منها و المتعادلة كهربائيا (انظر الوثيقة I - 10) [08] .

تتفكك البيونات المشحونة معطية الميونات و النوترينو:

$$\left. \begin{array}{l} \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \underline{\nu}_\mu \\ \pi^- \rightarrow \mu^- + \underline{\nu}_\mu \end{array} \right\} 99.99 \% \quad (22-I)$$

$$\left. \begin{array}{l} \pi^+ \rightarrow e^+ + \underline{\nu}_e \\ \pi^- \rightarrow e^- + \underline{\nu}_e \end{array} \right\} 0.01\% \quad (23-I)$$

أما بالنسبة للبيونات المتعادلة كهربائيا فتتفكك إلى زوج من الفوتونات قبل أي تفاعل نتيجة لمدة حياتها القصير والذي لا يتجاوز 8.4×10^{-17} ثانية :

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad 99.98\% \quad (24-I)$$

ليتبع هذه العملية مباشرة تفاعل الفوتونات مع الحقل الكهربائي معطية الزوج ($e^- e^+$) ويتكون بذلك سلاسل كهرومغناطيسية ثانوية .

كما أن الكاونات تساهم بمختلف أشكال تفككها في إنتاج الميونات والكهرومغناطيسية، بشكل مباشر أو غير مباشر من خلال إنتاج البيونات:

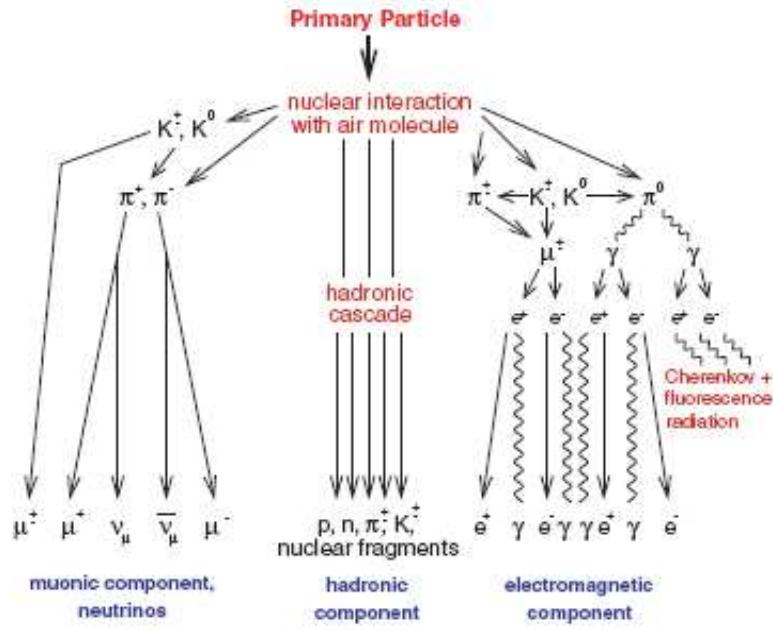
$$\left. \begin{array}{l} K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \end{array} \right\} 63.43 \% \quad \left. \begin{array}{l} K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0 \\ K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \end{array} \right\} 31.13 \% \quad (25- I)$$

$$K_L \rightarrow \pi^\pm + e^\pm + \nu_e \quad (38.97\%) \quad K_L \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp + \nu_\mu \quad (27.18\%) \quad (26- I)$$

$$K_L \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0 \quad (21.08\%) \quad K_L \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 \quad (12.58\%) \quad (27- I)$$

$$K_S \rightarrow \pi^0 + \pi^0 \quad (31.40\%) \quad K_S \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad (68.60\%) \quad (28-I)$$

إن من أهم الظواهر التي يمكن أن تلاحظ خلال مرور هذه الجسيمات المنتجة انبعاث إشعاع



شيرينكوف.

الوثيقة I-10: مخطط لتطور الشلالات الهادر ونية يوضح المكونات الثلاثة الأساسية: الكهرومغناطيسية، الهادرونية، الميونية وجسيمات النوترينو.

❖ إشعاع شيرينكوف (Cherenkov)

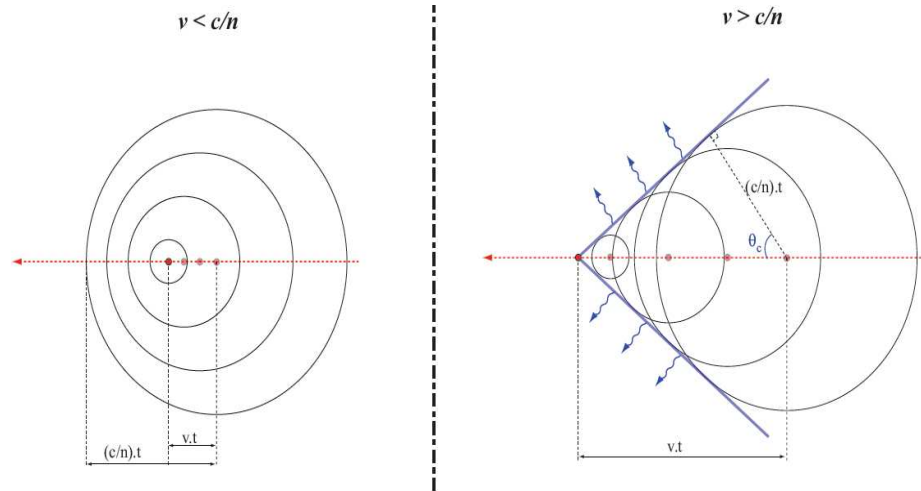
عندما تعبر جسيمات نسبية وسطا ما (مثل الغلاف الجوي) تخسر جزء صغيرا من طاقتها على شكل فوتون في الطيف ما فوق البنفسجي أو الأزرق على الأغلب، أين يطلق عليه اسم إشعاع شيرينكوف والذي هو عبارة عن إشعاع كهرومغناطيسي يبعث عندما تكون سرعة الجسيمة المشحونة في وسط دليل انكساره n اكبر من سرعة الضوء في الفراغ:

$$v > \frac{c}{n} \quad (29-I)$$

إن إشعاع شيرينكوف يشكل مخروطا حول محور الشلال الهوائي (الوثيقة I-10) حيث تقدر الزاوية الرأسية للمخروط θ_c بـ:

$$\cos \theta_c = \frac{(ct/n)}{\beta ct} = \frac{1}{\beta n}, \quad \beta > \frac{v}{c} \quad (30-I)$$

يزداد دليل انكسار الوسط بعض الشيء خلال تطور الشلالات في الغلاف الجوي مما يؤدي إلى زيادة قيمة الزاوية θ_c ، إذ أن زاوية رأس مخروط شيرينكوف الناتج عن جسيمة مشحونة سرعتها $V=C$ تقدر بـ: 1.06° على ارتفاع 5 km ؛ في حين تساوي 1.36° عند مستوى البحر. الجسيمات الثانوية للشلالات الهوائية تنتج عددا هائلا من إشعاعات شيرينكوف حيث تبعث أكثر من 10^6 فوتون من أجل جسيمة طاقتها 10^{12} eV .



الوثيقة I-11: رسم تخطيطي يوضح مبدأ إشعاع شيرينكوف.

يمكن أن نعتبر أن جسيمات السلاسل الهادر ونية يتوقف تضاعفها حينما تصبح طاقة البيونات من رتبة 10 GeV ، أما النيوكليونات فعندما تكون طاقتها اقل من 200 MeV بحيث تصبح غير قادرة على إنتاج البيونات ($m_\pi = 140 \text{ MeV}$) من خلال ما سبق يتضح جليا أن حجم السلاسل الهادر ونية أكبر من حجم السلاسل الكهرومغناطيسية.

5.I. خصائص الشلالات الهوائية

هناك بعض الميزات الأساسية والمهمة للشلالات الهوائية والتي سنحاول تلخيصها فيما يلي لكي نفهم تركيبها:

1.5.I. التوزيع الجانبي (lateral distribution)

إن تحديد التركيب الكيميائي وطاقة الشعاع الكوني الابتدائي من خلال الشلالات الهوائية مستندة إلى تقنيات متعددة تعمل على ملاحظة الخصائص المختلفة للشلالات الهوائية. ويعتبر التوزيع الجانبي للجسيمات، أو بمعنى آخر كثافة الجسيمات بدلالة المسافة عن محور الشلال ، إحدى مفاتيح الشلالات الضرورية لإعادة البناء [12]. تعرف دالة التوزيع الجانبي (LDF) للجسيمات المشحونة المختلفة (بهيمنة الإلكترونات و البوزيترونات) في الشلالات الهوائية بشكل رئيسي بدالة NKG

(The Nishimura-Kamata-Greisen Function) [14]:

$$\rho_{ch}(r) = \frac{N_{ch}}{2\pi r_0^2} C \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{s-2} \cdot \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{s-4.5} \quad (31-I)$$

حيث :

N_{ch} : العدد الكلي للجسيمات المشحونة.

s : وسيط العمر الذي يصف شكل توزيع الجسيمات وهو يتعلق نظريا بمنزلة التطوير الطولي.

r_0 : نصف قطر Moliere وهي المسافة التي تضم 90% من الطاقة الكلية للشلال الهوائي يقدر بحوالي

m 79 على مستوى سطح البحر.

C : ثابت يكتب بدلالة دالة غاما، $C = \Gamma(4.5 - s) / \Gamma(s)\Gamma(4.5 - 2s)$

هذا التقريب كثير الاستعمال في تجارب الأشعة الكونية لوصف توزيعات الجسيمات المشحونة ، ومن ثم استنتاج الطاقة الابتدائية للجسيمات الكونية.

ولقد عدل Greisen صيغة NKG لكي تأخذ في الحسبان التوزيع الجانبي للميونات من أجل مسافات كبيرة عن محور الشلال ، بالإضافة إلى ذلك هناك بعض المحاولات لتعديل صيغة NKG للحصول على وصف أفضل من التوزيع الجانبي المتوسط للجسيمات المشحونة في الشلالات الملاحظة على ارتفاعات الجبال العالية وكمثال على ذلك قمة Chacaltaya (5200 m فوق سطح البحر) :

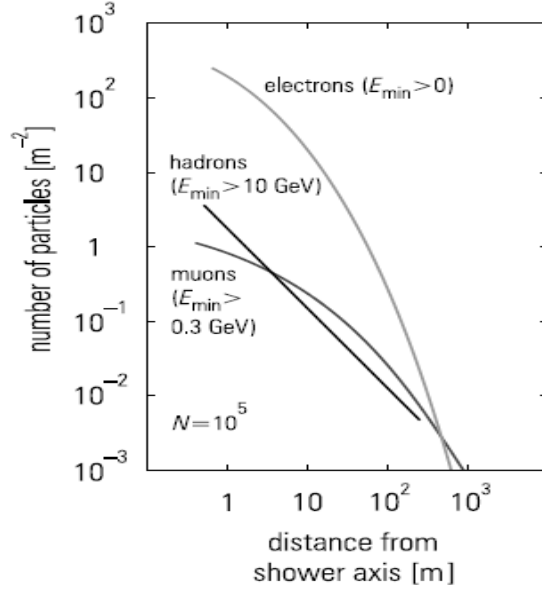
(32-I)

$$\rho_{ch}(r) = \frac{1.03N_{ch}}{2\pi r_0^2} C_1 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{s-4.5} \times \left(1 + C_2 \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right) \left(1 - 0.2 \exp \frac{-(\ln(r/r_0) + 0.3)^2}{0.5}\right)$$

حيث : C_1 ، C_2 تمثل ثوابت قيمها مستندة إلى بيانات تجريبية. إن القياسات التجريبية

للتوزيعات الجانبية لجسيمات الشلالات الهوائية تعطي فقط نسبة صغيرة من المنطقة الكلية، لهذا فان هذه العينات تسمح باستنباط التوزيع الجانبي الكلي (أي مسافات كبيرة).

إن عدد الجسيمات و توزيعاتها الجانبية لمكونات الشلال مختلفة جدا (انظر الوثيقة I-12) ؛ على سبيل المثال نجد الميونات تمتد إلى بضعة كيلومترات .



الوثيقة I-12: متوسط التوزيع الجانبي لمختلف مكونات شلال هوائي طاقته الابتدائية 10^{15} eV [15].

I. 2.5. التطور الطولي (longitudinal developpement)

هناك تقنيات عديدة في دراسة التطوير الطولي للشلالات في مختلف مستويات الغلاف الجوي منها مرصد الفلورة (الكاشف HiRes و المرصد Auger) يعرف التطوير الطولي لشلال الهوائي على أنه عدد الجسيمات المشحونة بدلالة عمق الغلاف الجوي ، إلا أنه في أغلب الأحيان يستخدم جزء من الشلال الملاحظ فقط ، لأن الكاشف قد لا يغطي كامل السماء الليلية.

و بشكل عام من الصعب جدا إعادة بناء الشلال الذي يكون الحد الأعظمي لعمقه $X_{\max}$ خارج حقل الكاشف ، لذا نحتاج إلى دالة تصف التطوير الطولي للجسيمات ، و تعتبر دالة

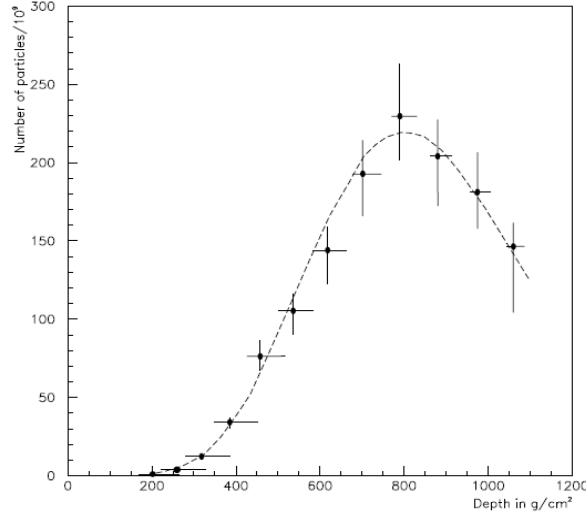
Gaisser -Hillas (GHF) الأكثر شيوعا و استعمالا [16] :

$$N(X) = N_{\max} \left(\frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X_0}{\lambda}} e^{-\frac{X_{\max} - X}{\lambda}} \quad (33- I)$$

أين X_0 : عمق الغلاف الجوي

الابتدائي و λ تقدر بحوالي 70 g/cm^2 .

يمكن تحديد التطوير الطولي على نحو غير مباشر وذلك من خلال دراسة التوزيع الجانبي و توزيع زمن الجسيمات التي تصل إلى سطح الأرض ، أما الطريقة المباشرة الوحيدة لدراسة التطوير فهي ملاحظة الفلورة الجوية ، هذه الأخيرة مرتبطة بمرور جسيمات الغلاف الجوي.



الوثيقة I-13: التطور الطولي لشلال هوائي سجل من قبل مرصد الفلورة Fly's Eye [13].

6.1. رصد الأشعة الكونية العالية الطاقة

نتيجة لاختلاف و توسع مجال طاقات الأشعة الكونية فقد تنوعت طرق رصدها و تحديد قيمة تدفقها ، فمنها المباشرة و غير المباشرة حيث أن الكشف المباشر عن الأشعة الكونية يتم بوضع كواشف على متن أقمار صناعية (كمثال على ذلك EGRET ، FERMI و AMS) أو على مناطيد هوائية (CREAM) وكلا منها تستطيع رصد جسيمات تصل طاقتها الى 100TeV .

وبما أن تدفق الاشعة الكونية العالية الطاقة (UHECRS) جد ضعيف اذ يتراوح بين جزيئة لكل متر مربع في السنة الى جزيئة لكل متر مربع في القرن ، وعليه فان رصد هاته الجسيمات يتطلب أجهزة ذات مساحة كبيرة ، كما تحتاج فترة مراقبة طويلة و هي شروط لا تتحقق الا في المحطات الأرضية .

تتفاعل الجسيمات العالية الطاقة مع مكونات الغلاف الجوي و تعطي ما يسمى بالشلالات الهوائية، وعليه فهي لا يمكنها أبدا الوصول الى سطح الارض و لذلك فانه يتم رصدها من خلال أثارها، أي برصد الأشعة الكونية الثانوية التي أنتجت ولهذا تدعى بعملية الرصد غير المباشرة .

هناك العديد من التجارب التي ترصد هاته الاثارو تحدد طاقة الجسيمة الابتدائية و اتجاهها بشكل مباشر، ومن ثم نجد أن معرفة طبيعة الجسيمة معتمدة على طرق كشف مختلفة أهمها صفوف الرصد الأرضية و تلسكوبات الفلورة التي سنوردها في الفقرة التالية.

1.6.1. صفوف الرصد الأرضية

الشلالات الهوائية للجزيئات الثانوية المنتجة في تفاعلات الأشعة الكونية العالية الطاقة ممتدة بما فيه الكفاية لكي يتم الكشف عنها من سطح الأرض ، حيث تعتمد هذه الألية في الرصد على استعمال شبكة من الكاشفات الصغيرة تتوزع على مساحة تصل الى مئات الكيلومترات المربعة بدلا من كاشف واحد، لتضمن بذلك النقاط عينات من الجزيئات في وقت واحد من تطورها ، أما العينات المأخوذة بشكل رئيسي فهي الميونات ، الالكترونات و الهادرونات المشحونة المسجلة على سطح الأرض .

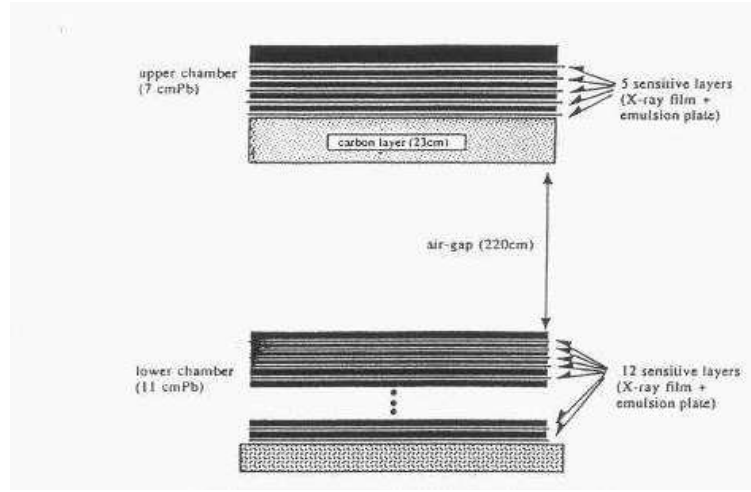
و للحصول على احصائيات دقيقة نحتاج الى اليات قياسية متنوعة نذكر منها تقنية شيرينكوف المائي المستعملة في مزرعة البركان القديمة ومرصد (Haverah Park) ، بالإضافة الى استعمال تقنية التآلق (Scintillation) في تجربة Yakutsk (روسيا) وتجربة KASCADE (ألمانيا)، هذه الاخيرة متكونة من أكثر من 1500 كاشفا تغطي مساحة 0.05 كلم^2 ترصد المكونات الثلاثة للشلالات الهوائية في طاقة مداها $10^{14} \text{ eV} - 10^{17} \text{ eV}$ ، بالإضافة الى الصفوف الأرضية AGASA باليابان التي تعتبر من أكبر الوحدات، اذ تغطي مساحة 100 km^2 و هي عبارة عن شبكة من الكواشف عددها 111 كاشفا لإلكترونات و 27 كاشفا للميونات؛ يفصل الواحد عن الآخر حوالي 1 km^2 ، وقد استطاعت لحد الان من رصد 7 جسيمات فائقة الطاقة (طاقتها 10^{20} eV) .

كما يستعمل لملاحظة الأشعة الكونية الثانوية العالية الطاقة على سطوح الجبال تقنية الغرفة الحساسة (Emulsion Chamber) حيث يمكن ملاحظة الشلالات في مراحل مبكرة وبذلك تحري التفاعلات الهادرونية العالية الطاقة [17] ، غرف المستحلب جد حساسة للاكترونات العالية الطاقة، لأشعة غاما و للهادرونات، وهي قادرة على تحديد طاقة و مواقع هذه الجسيمات بدقة عالية .

لقد استعملت هذه التقنية في تجارب الجبال كجبل Chacaltaya (بوليفيا) على ارتفاع 5200 m من سطح البحر، وجبل Pamir (بنغلاديش) على ارتفاع 4300 m من سطح البحر . إن الكاشفات المستعملة في هذه التجارب متماثلة من حيث المبدأ، فمثلا في جبل Chacaltaya تمت تجربة هجينة بدمج تقنية غرف المستحلب مع 35 وحدة تآلق.

تتركب غرف المستحلب عمليا (الوثيقة I-14) من ثلاثة أجزاء: الجزء العلوي ، السفلي، طبقة الكربون والفجوة الهوائية بينهما، حيث يدعى الجزء العلوي Gamma Block يرصد بشكل رئيسي المكون الكهرومغناطيسي؛ أما الجزء السفلي Hadron Block فيسجل بشكل رئيسي الهادرونات. وكلا من الجزء العلوي و السفلي عبارة عن طبقات من Pb مغطاة بشريط من الأشعة السينية (X-Rays Films) هذه الغرف لها مساحات كبيرة من رتبة العشرات متر المربع معروضة لفترات طويلة (حوالي سنة). والجدير بالملاحظة في تجارب الغرف الحساسة هو ما يسمى بالكثافة البصرية للبقع بعد معالجة أفلام الأشعة السينية مما

سبح لها من رصد عدد من الأحداث الغريبة حيرت الباحثين في تفسيرها أطلق عليها اسم Centauros (في بند لاحق سيتم شرحها بالتفصيل).

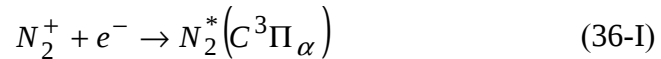
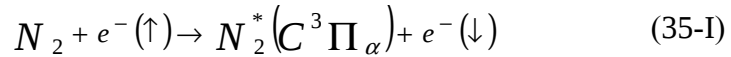
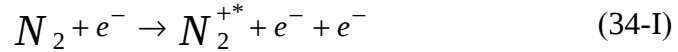


الوثيقة I-14: مخطط نموذجي للغرف الحساسة في تجربة Chacaltaya [17].

2.6.1. تلسكوبات الفلورة

تولت العديد من التجارب رصد فوتونات الشلالات الهوائية من مصدرها الأكثر أهمية "فلورة النيتروجين الجوي" المعرض من قبل الجسيمات الثانوية المشحونة، مما يتسبب في بعث فوتونات في طيف ما فوق البنفسجي (300nm - 400nm) بطريقة متجانسة.

تم تمييز ثلاثة نماذج لتحريض جزيئة الازوت :



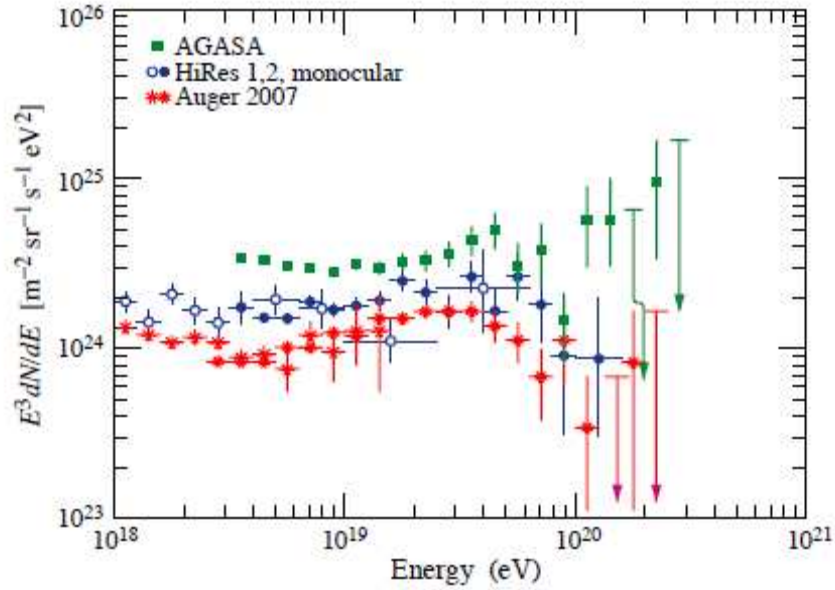
يتكون أول مستعمل لتقنية الفلورة كاشف عين الذبابة Fly's Eye (1981-1992) المتواجد في الولايات المتحدة الأمريكية من وحدتين : الوحدة الاولى FEI تتكون من 67 مرآة بقطر يفوق 1.6m، أما الوحدة الثانية فهي على بعد 3.4 كلم من EF1. ومن أهم التجارب المستعملة لهذه التقنية تجربة HiRes (1998) وهي بدورها تتركب من وحدتين الا أنها أكثر تطوراً ودقة من Fly's Eye .

3.6.1 الكواشف الهجينة

تولت هذه الكواشف دراسة الأشعة الكونية متطرفة الطاقة ماعدا تقنيتان هما HiRes و AGASA والمتواجدتان في النصف الشمالي للكرة الأرضية، إلا أنه - لسوء الحظ- لوحظ هناك اختلاف في نتائجهما؛ حيث لوحظ في الطيف الطاقوي انحدار قوي على مستوى $4 \times 10^{19} \text{ eV}$ (قطع GZK) من قبل HiRes (كما هو موضح في الوثيقة I-15) بينما AGASA لم يلاحظ هذا الانحدار الذي يشكل نقطة نقاش ، مما استدعى اقتراح كاشف هجين من أجل غلق المناقشة بينهما.

في عام 2003 تم تركيب مرصد Pierre Auger [13] في النصف الجنوبي من الكرة الأرضية (الأرجنتين)، و هو عبارة عن مرصد يعتمد على التقنيتين معا. يتشكل أساسا من صفوف رصد أرضية تغطي حوالي 3000 km^2 به 1600 وحدة يفصل الواحدة عن الأخرى حوالي 1.5 كلم، بالإضافة الى 04 تلسكوبات الفلورة حيث نقدم التخطيط العام للمرصد في الوثيقة I-16.

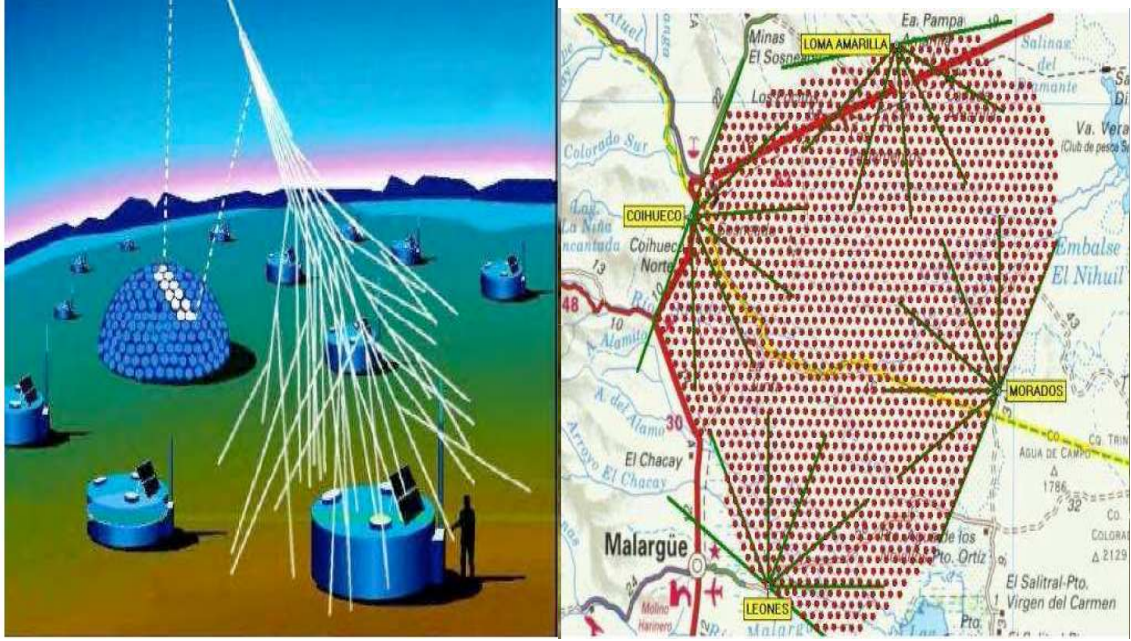
يهدف مرصد Auger الى معايرة نتائج HiRes و AGASA و كذلك تقدير الأخطاء النظامية لكل طريقة ، كما يسمح بدراسة انتشار الأشعة الكونية العالية الطاقة . بفضل طريقة التهجين نجد أنه حوالي 10% من نتائج Auger ذات نوعية جديدة ويمكن لأخطاء النظام أن تكون منخفضة الى حد كبير خصوصا من أجل الطاقات المتطرفة كما سيقلل الاعتماد على نماذج التفاعل النووي .



الوثيقة I-15: مقارنة نتائج الكاشفين HiRes و AGASA لتدفق الأشعة الكونية العالية الطاقة : نتائج HiRes تبدو موافقة مع قطع GZK على عكس بيانات مرصد AGASA.

ومن المشاريع المستقبلية تركيب نظام مماثل في النصف الشمالي من الكرة الأرضية (الولايات المتحدة الأمريكية) باسم مرصد Auger، وبهذا ستغطي الكواشف الهجينة السماء كاملة، كما اقترح عام 2000 طريقة مختلفة كلياً للمتابعة و المتمثلة في كاشف EUSO، أين يتم تركيبه على المحطة الفضائية الدولية (ISS) حيث سيعمل على ملاحظة إشعاعات الفلورة و شيرينكوف لجزيئات

الشلالات الهوائية في الجزء المظلم من الغلاف الجوي و ذلك على ارتفاع 400 كلم . كما أن كاشف الفضاء يقدم في الواقع فائدة مضاعفة إذ من الممكن تغطية حجم الغلاف الجوي أكثر بكثير من كل التجارب على الأرض و بهذا يمكن التخمين أن مستقبل فيزياء الأشعة الكونية ذات الطاقة تفوق قطع GZK في الفضاء[06-05].



الوثيقة I-16: المخطط العام لمرصد Pierre Auger في الأرجنتين [01].

الفصل الثاني

الثقوب السوداء في فيزياء الأبعاد الإضافية

1.II. مقدمة

في عام 1915 استحدث العالم اينشتاين فكرة الثقوب السوداء بنظرية النسبية العامة ، و وفقا لهذه النظرية فان الثقوب السوداء هي منطقة في فضاء الزمكان ذو كثافة عظيمة و تأثير جاذبي هائل .
لقد كان اينشتاين بنفسه ليس مقتنع بالكامل بفكرة الثقوب السوداء لكن في عام 1916 طبق كارل شوارزتشايلد النظرية النسبية العامة على جسم هائل الكتلة ليتحصل على قيمة تعرف بنصف قطر شوارزتشايلد (Schwarzschild Radius) تعطى بالعلاقة [18] :

$$r_H = r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad (37-II)$$

ليعطي بذلك مفهوم رياضي لثقب الأسود وهو انه جسم كتلته M نصف قطره أو ما يعرف بأفق الحدث (Event Horizon) اصغر أو يساوي r_H . أفق الحدث هو عبارة عن حيز من فضاء الزمكان لا يمكن لضوء الإفلات منه، ولهذا الأفق دور هام و رئيسي في الكشف عن الثقب الأسود كما يمتاز هذا الأخير بالمنفرد (Singularity) والفريدة في خصائصها الفيزيائية و المختلفة عما هو مألوف في عالم الفيزياء.

و مؤخرا توقع الفلكي ابن العالم كارل شوارزتشايلد بان الثقوب السوداء تتواجد حتى في نظام فيزياء الجسيمات في حضور الأبعاد الإضافية، حيث أن اصطدام الجسيمات بمراكز طاقة عالية يولد ثقوب سوداء بكتل

تتراوح بضع TeV ويمكن أن تنتج عن تصادم أشعة الكونية العالية الطاقة مع أنوية الغلاف الجوي أو في مسرعات من صنع الإنسان .

سنحاول في هذا الفصل تقديم دراسة شاملة لتشكيل الثقوب السوداء المجهرية و من ثم تفككها و ذلك في إطار فيزياء الأبعاد الإضافية لكن قبل التعرض لذلك نمهد إلى استعراض و شرح فيزياء الأبعاد الإضافية بعيدا عن التعقيد إذ أن هذه الأخيرة تعتبر بوابة فيزياء جديدة أو ما يصطلح عليه بفيزياء ما بعد النموذج القياسي .

لهذا الغرض نستعين بالوحدات التالية: $\hbar = c = k_B = 1$ حيث $\hbar$ ثابت بلانك ، c سرعة الضوء في الفراغ و k ثابت بولتزمان، هذا الاختيار يسمح لنا بقياس كل من الطاقة و الحرارة بـ GeV ($GeV = 10^9 eV$) بينما المسافات والزمن بـ GeV^{-1} حيث تعطى العلاقة بين الوحدات كما يلي:

$$1GeV = 6.58 \times 10^{-25} s = 1.97 \times 10^{-16} m$$

2.II. فيزياء الأبعاد الإضافية

إن أحدث النظريات العلمية تنتهي إلى نتيجة مذهلة و هي أنه لا بد من وجود أكثر من أربعة أبعاد للفضاء كما أنها ليست فكرة مجردة بل لها تطبيقاتها العلمية، فبحضور الأبعاد الإضافية يتغير فهمنا لفيزياء الطاقات العالية جدا و كذا فيزياء الجاذبية، إذ أن هذه الفكرة تلقى دعما كبير من النظرية الخيطية وتعتبر الاقتراح الأكثر كمالا للنظرية الجاذبية الكمية.

في العقد الأخير اقترحت عدة نماذج للأبعاد الإضافية حيث أن الميزة الأساسية لها هو اقتراح حل إلى ما يسمى بمشكلة تدرج سلم القوى.

1.2.I. مشكلة تدرج سلم القوى

إن النموذج القياسي وصف جميع الجسيمات الأولية ماعدا الجاذبية فبرغم تمكنه بشكل فريد من نوعه على وصف التفاعلات الكهروضعيفة والتفاعلات القوية بين الجسيمات إلا أنه عجز على وصف التفاعلات الجاذبية بشكل دقيق ، ما يستدعي القول أن النموذج القياسي غير كامل ولا بد من نظرية ما بعد النموذج القياسي .

القوة الجاذبية في الوحدات الطبيعية محددة بكتلة بلانك (Plank) التي تقدر بـ: $M_P = 10^{16} TeV$ بينما القوة

الكهرو ضعيفة محددة بكتلة $M_{EW} = 1TeV$ ، من خلال ما سبق نجد أن النسبة بين الكتلتين $\frac{M_P}{M_{EW}}$ تفوق

حوالي 10^{16} وهي بذلك تعبر على مدى اختلاف مقاييس القوتين وهنا يطرح التساؤل: لماذا القوة الجاذبية تبدو ضعيفة جدا على مستوى الجسيمات بالمقارنة ببقية القوى الثلاثة الأخرى و الإجابة عليه تستدعي حتمية التدرج في معالجة ووصف مختلف التفاعلات من خلال نموذج وحيد [19].

في إطار اقتراح حل لهذا التفاوت أو ما يطلق عليه اسم مشكلة تدرج سلم القوى استند إلى مسلمة يمكن حصرها في الصيغة التالية: «يمكن تعريف كتلة بلانك الأساسية بحيث يصبح التفاعل الجاذبي قوي على المدى المجعري بالمقارنة مع التفاعلات الأخرى وذلك بأخذ قيمتها تقارب سلم الكهروضعيفة» [18]. وبذلك

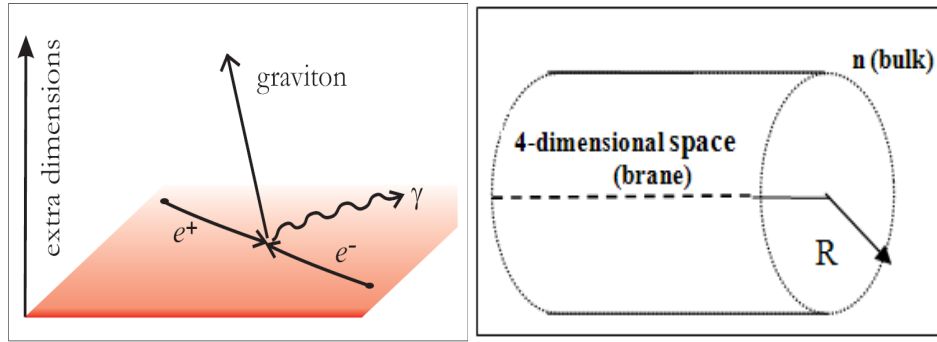
فالحل يكمن في إيجاد علاقة بين كتلة بلانك الكلاسيكية M_P وكتلة بلانك الأساسية التي يرمز لها بالرمز M_* .

قبل عشرات السنوات تم صياغة العديد من نظريات ونماذج الأبعاد الإضافية لتسهيل استيعاب مفهوم النظرية و الاعتماد عليها في تفسير عدد من الظواهر الفيزيائية، و لهذا ارتأيت إلى شرح بعض النماذج بهدف ترسيخ فكرة الأبعاد الإضافية أين تصب نتائجها في أن تقدير سلم الجاذبية الكمية يقدر بأقل بكثير من كتلة بلانك .

II.2.2. نماذج الأبعاد الإضافية

فيما يلي سنستعرض بإيجاز عن نماذج نظرية الأبعاد الإضافية مسترسلا بأول فكرة للأبعاد الإضافية اقترحت من قبل Theodor Kaluza و Oscar Klein في سنة 1920 [20]، وذلك في محاولة لتوحيد قوى الجاذبية والكهر ومغناطيسية ولقد لخص فكرته في تمثيل الأبعاد الإضافية على أسطوانة نصف قطرها R كما توضح الوثيقة

II-17:



(ب)

(أ)

الوثيقة II-17: (أ) رسم تخطيطي يمثل الأبعاد الإضافية n أين R يمثل حجم الأبعاد الإضافية، (ب) رسم تخطيطي يوضح انحصار جسيمات النموذج القياسي في 4-أبعاد بينما الغرافيتونات تنتشر في $(4 + n)$ بعد.

أن نظرية الأبعاد الإضافية تستند إلى مسلمة مهمة وهي أن جميع الجسيمات الأولية (جسيمات النموذج المعياري) تنحصر في فضاءنا الرباعي الأبعاد (3 أبعاد مكانية و بعد زمان) أو ما يعرف بالبرايين (Brane) في حين الجاذبية هي الوحيدة التي يمكن أن تنتشر في أبعاد الفضاء الإضافية $((3 + n))$ - بعد مكاني و بعد زماني) ما يصطلح عليه اسم البولك (Bulk) لهذا تبدو لنا ضعيفة بالمقارنة لبقية القوى بينما هي في الحقيقة بالقوة ذاتها وتعطي لنا الوثيقة II-17 (ب) الفكرة المبسطة لذلك .

ولقد تم تبني نظرية الأبعاد الإضافية من قبل عدة اتجاهات ووجهات نظر مما أدى إلى صياغة نماذج عديدة تسعى إلى تسهيل استيعاب هذا المفهوم الجديد وكذا في تفسير مختلف الظواهر الفيزيائية نذكر منها نموذج البعد الإضافي الكبير (Large Extra Dimension Model) و نموذج البعد الإضافي المشوه (Warped Extra Dimensions Model) وغيرها [20]، و بهدف ترسيخ فكرة الأبعاد الإضافية سنستعرض شرح بإيجاز نموذج البعد الإضافي الكبير وهذا نظرا لسهولة استيعابه كما يعتبر النموذج الأقرب إلى أفكار Kaluza و Klein .

II.1.2.2. نموذج البعد الإضافي الكبير (ADD) :

سيناريو البعد الإضافي الكبير اقترح من قبل G. Dvali و S. Dimopoulos و Arkani-Hamed (ADD) في سنة 1960 يستند إلى مبدأ إضافة n - بعد إضافي بدون تحذب إلى بعد الزمكان النسبي في إطار حجم نصف قطره R [21]. على ضوء أساسيات النموذج نسعى إلى إيجاد العلاقة بين كتلة بلانك M_P وكتلة بلانك الأساسية M_* .

لدينا عبارة الكمون التجاذبي :

$$\nabla^2 V_g^2 = 4\pi G_4 \rho_m \quad (38-II)$$

$G = G_4$: ثابت الجاذبية (ثابت نيوتن).

ρ_m : كثافة المادة

إلا أن هذه العلاقة صالحة وصحيحة من أجل بعد الزمكان النسبي فقط ومن أجل تعميمها لأكثر من 4- أبعاد أي لأجل $(4+n)$ - بعد نحتاج إلى تعديل بسيط ، فالملاحظ أن الطرف الأيسر له نفس الوحدة من أجل أي عدد من الأبعاد بمعنى أن وحدة كمون التجاذبي دائما نفسها وأما في ما يخص لابلانك فإنها تقسم دائما على مربع البعد¹.

أما الطرف الأيمن فنجد كثافة المادة ρ_m وحدتها تختلف باختلاف عدد الأبعاد وكننتيجة لذلك فإنه يجب أن تغير متى عدد الأبعاد تغير، وبالأخذ بعين الاعتبار ما سبق نعيد صياغة المعادلة أعلاه بأكثر ضبط ودقة كما يلي :

$$\nabla^2 V_g^D = 4\pi G_D \rho_m \quad (39-II)$$

حيث : $D = 4 + n$: العدد الإجمالي للأبعاد الزمكان

G_D : ثابت الجاذبية من أجل D - بعد.

وبهذا يمكن القول أن المعادلة (39-II) تصف كمون الجاذبية بصفة عامة أي مهما تغير عدد الأبعاد، وباستعمال المعادلة (38-II) و (39-II) نحصل:

$$G_D \frac{M}{R^{n+3}} = G_4 \frac{M}{R^3} \quad (40-II)$$

أين M تمثل الكتلة

و بهذا نجد: $G_D = G_4 R^n$

مع العلم أن كتلة بلانك تعطى بـ $M_P = \sqrt{\frac{1}{G_4}}$

$$\nabla^2 = \sum_i \frac{d^2}{dx_i^2}$$

$$G_D = M_P^{-2} R^n \quad \text{ومنه}$$

من خلال المعادلة يتضح أن R وحدته هي مقلوب الكتلة ومنه فإن G_D وحدته $(Mass)^{2-D}$ و عليه يمكن كتابة:

$$M_P = G_D^{\frac{1}{2-D}} \quad (41-II)$$

لنحصل في الأخير على علاقة تربط بين كتلة بلانك M_P و كتلة بلانك الأساسية من اجل $(n+4)$ بعد:

$$M_P^2 = R^n M_*^{2+n} \quad (42-II)$$

إن القيمة الحدية لحجم الأبعاد الإضافية من منظور سيناريو البعد الإضافي الكبير تعطى بالعلاقة:

$$R = 10^{\frac{30}{n}-17} cm \left(\frac{1TeV}{M_*} \right)^{1+\frac{1}{n}} \quad (43- II)$$

فمن اجل $n=1$ نحصل على $R \approx 10^{13} cm$ و هي وحدة النظام الشمسي تستثني هذه الحالة ($n \neq 1$) أما من اجل $n=2$ ، $n=3$ و $n=7$ فإننا نحصل على $R=1m$ ، $R=1nm$ ، $R=10^{-4} fm$ على الترتيب لنستنتج من ذلك انه كلما كانت قيمة n كبيرة فإن R يأخذ قيمة صغيرة لا تتجاوز $10^{-4} fm$ ، ليصبح واضحا لنا أن من اجل ℓ_P^3 فإن $R \gg M_P \ll M_*$.

و بمراعاة لهذه المعطيات تم اختيار قيمة $M_* = 1TeV$ و التي تمثل بدورها قيمة M_{EW} أي $M_* = M_{EW} = 1TeV$ لنكون بذلك قد وجدنا حلقة وصل بين القوى الجاذبية و القوى الكهروضعيفة، وبذلك يكون نموذج ADD قد اقترح حل لمشكلة تدرج سلم القوى (فيزياء الطاقة العالية).

إحدى أكثر النتائج المثيرة لنموذج البعد الإضافي الكبير و نظرية الجاذبية الكمية لسلم TeV هي غزارة إنتاج و تشكل الثقوب السوداء المجهرية في تصادم الجسيمات .

$$\ell_P^3 = \frac{1}{M_P} = 10^{-33} cm$$

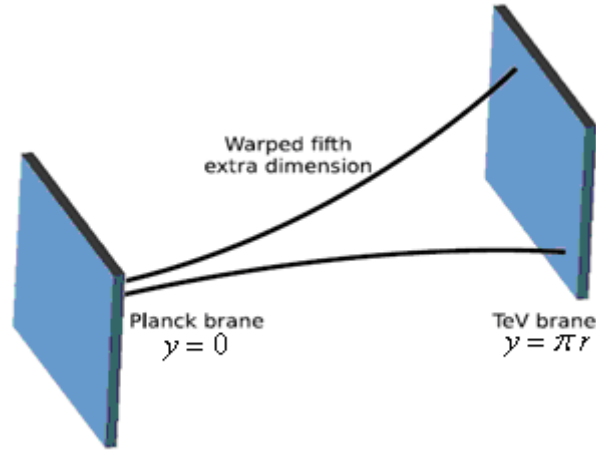
II.2.2.2. نموذج البعد الإضافي المشوه (RS)

سيناريو البعد الإضافي المشوه اقترح من قبل Randall و Sundrum، يفترض وجود بعد إضافي وحيد مقوس متراس y و اثنين براين الأول يأخذ قيمة معدومة ($y = 0$) ويدعى ببلانك براين (Planck Brane) بينما الآخر ($y = \pi r$) و يسمى بـ TeV براين (TeV Brane) أو براين المرئي كما توضحه الوثيقة II-18، أما فيما يتعلق بعنصر الخط لنموذج RS يعطى بالشكل [22]:

$$ds^2 = e^{-kry} \eta_{\nu\mu} dx^\nu dx^\mu - dy^2 \quad (44-II)$$

x^μ : تمثل إحداثيات الفضاء النسبي (1+3) - بعد، $0 \leq y \leq \pi r$ يمثل البعد الإضافي الخامس لأجل حجم r ، حيث $y = -y$ وأما k وسيط التقوس من رتبة سلم بلانك.

إن نموذج RS يفترض - كما هو الحال في نموذج ADD - أن حقول النموذج القياسي تنحصر في أحد البراين بينما الجاذبية - الغرافيتونات - تنتشر في كل الفضاء بمعنى آخر يمكن أن تنتشر كذلك في البولك.



الوثيقة II-18: رسم تخطيطي يوضح نموذج البعد الإضافي المشوه و أن البعد الخامس يؤدي إلى ضعف الجاذبية في بلانك براين [23].

في سيناريو البعد الإضافي المشوه مشكلة تدرج سلم القوى كان حلها بافتراض أن سلم الجاذبية في بلانك

براين يساوي كتلة بلانك $M_p = \sqrt{\frac{1}{G_4}}$ وأما في براين TeV فان سلم الجاذبية يقدر بـ:

$$M_* = w M_p \quad (45-II)$$

أين $w = e^{-\pi k r}$ يعرف بمعامل التشوه.

بما أن k نموذجيا من رتبة M_p فمن العلاقة (II-45) يمكن أن نستنتج أن $w=10^{-16}$ ومنه $M_* \approx 1\text{TeV}$ ليكون بذلك حل للمشكلة ويصبح سلم الجاذبية في TeV براين من نفس رتبة سلم القوة الكهروضعيفة. أما عبارة كتلة بلانك تعطى بالشكل:

$$M_p^2 = \frac{M_*^3}{k} (1 - e^{-2\pi k r}) \quad (\text{II-46})$$

إن تفسير النموذج للضعف المحسوس بالنسبة للجاذبية كان ليس بوجود أبعاد إضافية مستوية كبيرة كما هو الحال في نموذج ADD لكن راجع إلى تقوس البعد الإضافي.

3.II. الثقوب السوداء المجهرية

ضمن سياق نموذج براين العالمي للجاذبية بمقياس TeV ونموذج البعد الإضافي الكبير من المعقول توقع تشكل ثقوب سوداء مجهرية بكتلة تتراوح بضع TeV ، وهي ناتجة عن تصادم جسيمات ذات طاقات جد عالية، لذلك سنقدم بإيجاز في البند الموالي دراسة شاملة لتشكل هذه الثقوب.

1.3.II. تشكل الثقوب السوداء المجهرية في اصطدام الجسيمات

إن من ابرز ما أتقنت وصفه النظرية نصف الكلاسيكي هو تشكل الثقوب السوداء المجهرية المحتمل في تصادم الجسيمات بعدما نجحت النظرية النسبية العامة إلى حد ما في وصف الثقوب السوداء ذات الكتل الأكبر بكثير من M_* .

II. 1.1.3. المقطع الفعال

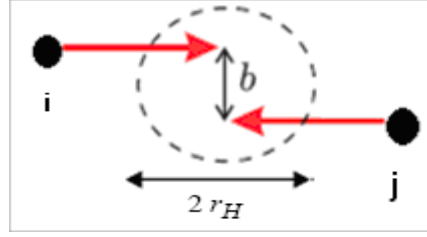
على المستوى النووي يمكن أن يحدث تصادم بين زوج من بارتون (Parton) z و i حيث وسيط التأثير b (Impact Parameter) يكون أقل بكثير من r_H ($b \ll r_H$) ليتوقع بذلك سيطرة قوة جاذبية عظمى تسمح وترجح تشكل ثقب أسود مجهري إذ يمكن أن نلخص العملية بـ :

$$ij \rightarrow BH + E(X) \quad (\text{II-47})$$

BH : الثقب الأسود المجهري و $E(X)$ تمثل الطاقة الضائعة بمعنى التي لم تساهم في تشكل كتلة الثقب وان الحساب الدقيق لهذه الطاقة ضروري لفهم أمثل لآلية تشكل الثقوب السوداء المجهرية. كما أن تشكل هذه الثقوب بمفهوم نظرية النصف الكلاسيكي يستدعي إلى وجوب مركز طاقة اصطدام كبير بما فيه الكفاية إلا أن وجود نظرية الأبعاد الإضافية قد سهلت من إمكانية تشكيلها وذلك بمراكز الطاقة اقل وعليه يمكن حساب القطاع الفعال وذلك باعتماد على تقريب القرص الأسود الهندسي (Black Disk) [28] (انظر الوثيقة II-18):

$$\sigma_{ij \rightarrow BH}(\hat{s}, n) = \pi b^2 \approx \pi r_H^2 \quad (\text{II-48})$$

حيث $\sqrt{\hat{s}}$: يمثل مركز الطاقة للزوج z و i .



الوثيقة II-19: رسم تخطيطي يمثل نموذج القرص الأسود في اصطدام البارتونات لانتاج ثقب الأسود المجهري .

في الحقيقة جسيمات الاصطدام (B,A) تشمل أكثر من بارتون واحد لذا لابد من اعتبار كل الأزواج التي تحمل بدورها الطاقة الكافية لتشكيل الثقب الأسود كتلته الأدنى : $M_{\min}$.
ونتيجة لذلك فإن مركز الطاقة يحسب عن طريق استعمال دالة توزيعية للبارتونات (PDFs) التي تعطي لنا احتمال تواجد البارتون بمعدل x بالنسبة لعزم الجسيمتين A و B وبمراعاة ما سبق فإن المقطع الفعال الإجمالي يمكن كتابته بالشكل الآتي:

(49-II)

$$\sigma_{AB \rightarrow BH}(s, n) = \sum_{ij} \int_{\frac{1}{s}}^1 dx \int_{\frac{1}{x}}^1 \frac{dx'}{x'} f_i(x', Q) f_j\left(\frac{x}{x'}, Q\right) \sigma_{ij \rightarrow BH}(\hat{s}, n)$$

$\sqrt{s}$: مركز الطاقة للجسيمتين A و B

f_i : يمثل الدالة التوزيعية⁴ (PDFs)

كما تمثل $\sqrt{s}x$ قيمة مركز الطاقة الأدنى اللازمة لتشكيل ثقب أسود مجهري بكتلة $M_{\min}$.

Q : عزم الرباعي ويعبر عنه إما بكتلة الثقب الأسود أو بمقلوب نصف قطر شوارزشايلد

II. 2.1.3 خصائص الثقوب السوداء

إن النظرية النسبية العامة سعت إلى وصف الثقوب السوداء ذات الكتل الكبيرة أي $M_{BH} \gg M_*$ إلا أن كلما اقتربت كتلة الثقب إلى M_* كلما أصبحت خصائصه أكثر تعقيدا وأصبح عجز النسبية العامة واضحا في وصفه وهذا ما استدعي إلى تزاوج النظرية النسبية العامة ونظرية الكم للمجيء بالنظرية النصف الكلاسيكية بهدف وصف شامل و الدقيقة للثقوب السوداء، فتأثير الأبعاد الإضافية للفضاء لم ينحصر على إمكانية إنتاج الثقوب السوداء المجهرية بل حتى في خواصها إذ قد وجد أن أفق الحدث لثقب الأسود المتعدد الأبعاد أكبر من أفق ثقب أسود كلاسيكي رغم أنه بنفس الكتلة. سنحاول في هذا البند إعطاء بإيجاز بعض خصائص وميزات الثقوب السوداء الدقيقة التي هي عبارة عن خلاصة وصف النظرية النصف الكلاسيكية لها.
باعتبار الثقوب السوداء متماثلة كرويا غير دوار يمكن وصف الخلفية بحل شوارزشايلد من أجل $(4+n)$ - بعد- [23] بـ:

⁴ معرفة فقط من أجل $Q \leq 10\text{TeV}$

$$ds^2 = -h(r)dt^2 + h(r)^{-1}dr^2 + r^2 d\Omega_{2+n}^2 \quad (50-II)$$

أين:

$$d\Omega_{2+n}^2 = d\theta_{n+1}^2 + \sin^2 \theta_{n+1} \left(d\theta_n^2 + \sin^2 \theta_n \left(\dots + \sin^2 \theta_2 \left(d\theta_1^2 + \sin^2 \theta_1 d\varphi^2 \right) \dots \right) \right)$$

حيث $0 < \varphi < 2\pi$ و $0 < \theta_i < \pi$ من أجل $i = 1, \dots, n+1$

وبتطبيق قانون قوس من أجل $(4+n)$ - بعد نحصل على العلاقة بين أفق الحدث للثقب الأسود المجهري و كتلته M_{BH} :

$$r_H = \frac{1}{\sqrt{\pi M_*}} \left(\frac{M_{BH}}{M_*} \right)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{8\Gamma\left(\frac{n+3}{2}\right)}{n+2} \right)^{\frac{1}{n+2}} \quad (51-II)$$

المعادلة أعلاه توضح أن العلاقة بين r_H و M_{BH} ليست خطية كما تبين أن كتلة بلانك الأساسية تظهر في عبارة r_H بدل من كتلة بلانك M_p .

ومن أجل التوصل إلى فهم و استيعاب منطقي لما سبق نحاول في كل مرة ترجمة المعطيات بمقادير عددية لترسيخ المفاهيم. وكما هو مذكور سلفاً أن الدراسة تعتمد على نتائج نظرية نصف الكلاسيكية هذه الأخيرة مفادها أن كتلة الثقب الأسود المجهري من رتبة M_* أي بضعة TeV و $M_{BH} > M_*$ ، فإذا ما افترضنا أن $M_{BH} = 5\text{TeV}$ و $M_* = 1\text{TeV}$ يمكن تقدير نصف قطر الأفق بدلالة تغير n (أنظر الجدول II-1) [24].

الجدول II-01: قيم أفق الحدث للثقب الأسود المجهري كتلته $M_{BH} = 5\text{TeV}$ من أجل مختلف قيم n .

n	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$
$r_H (10^{-4} \text{ fm})$	4.06	2.63	2.22	2.07	2.00	1.99	1.99

أن الثقب الأسود -كما هو معروف -لا يصدر أية أشعة أو أية جسيمات بل يمتصها بداخله ولكن أفق الحدث هو الذي يصدر إشعاعات حرارية والتي بدورها تدل على وجود الثقب الأسود، ففي عام 1974 أثبت العالم ستيفن هوكينغ بأن الثقوب السوداء تمتاز بدرجة حرارة موضحاً أن الثقوب السوداء الدقيقة أشد حرارة ، يمكن تقديرها باستعمال ديناميكا الحرارة بالعلاقة التالية:

$$T_H = \frac{K}{2\pi} \quad (52-II)$$

⁵ هذا بالضبط سلم الطاقة في المسرعات الحالية والمستقبلية التي يمكن أن تتقصى مثل هذه الثقوب المجهرية.

$$K = \frac{1}{2} \partial_r h(r) \Big|_{r=r_H} = \frac{1+n}{2} \frac{1}{r_H} \quad \text{حيث:}$$

أين K : الجاذبية السطحية للثقب الأسود ومنه:

$$T_H = \frac{(n+1)}{4\pi r_H} \quad (53-II)$$

من العبارة (51-II) و (53-II) نجد أن درجة حرارة الثقب تتناسب عكسيا مع الكتلة أي كلما كانت كتلته كبيرة كانت درجة الحرارة اصغر و العكس صحيح ، وبتثبيت قيمة كلا من M_{BH} و M_* بـ 1 TeV و 5TeV على الترتيب يمكن حساب درجة حرارة الثقب بدلالة n (النتائج معروضة في الجدول II - 02).

الجدول II-02: يمثل مختلف قيم درجة حرارة ثقب اسود مجهري كتلته $M_{BH} = 5TeV$ من اجل قيم n متباينة.

n	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$
$T_H (GeV)$	77	179	282	379	470	553	629

و كما هو معروف فان كل جسم يتميز بدرجة الحرارة يبعث إشعاع حراريا يطلق عليه في هذه الحالة بإشعاع هوكينغ وهذا ما يؤدي إلى تفكك و تلاشي الثقوب السوداء ، و بهذا يمكن القول أن الثقوب السوداء يتغير عمرها بتغير كتلتها بمعنى ان الثقوب السوداء ذات الكتل الكبيرة يمكن ان نحدد عمرها من خلال العلاقة:

$$\tau \approx \frac{1}{M_p} \left(\frac{M_{BH}}{M_p} \right)^3 \quad (54-II)$$

فالعلاقة أعلاه توضح أن عمر هذه الثقوب من عمر الكون ولهذا لا يظهر بوضوح تلاشيها أما فيما يخص الثقوب السوداء المجهرية يتم تعديل العبارة لتصبح بالشكل التالي:

$$\tau \approx \frac{1}{M_*} \left(\frac{M_{BH}}{M_*} \right)^{(n+3)/(n+1)} \quad (55-II)$$

بالمعطيات السابقة فان عمر الثقوب الدقيقة يقدر بحوالي $\tau = (1.7 - 0.15)10^{-26} s$ من اجل $n=1$ و $n=7$ على الترتيب.

بالرغم من قصر عمر هذه الثقوب السوداء المجهرية إلا انه إمكانية تشكلها أثناء اصطدام الجسيمات ذات الطاقات العالية جدا ممكنة و ملاحظتها من خلال تتبع أثرها هي فرصة أكثر واقعية.

كما تتميز الثقوب السوداء المجهرية خاصية أخرى يمكن أن نلمس مدى تأثير الأبعاد الإضافية في تغييرها وهي الفوضى أو ما يعرف بالانتروبي S وتعطى بالعلاقة التالية :

$$\frac{\partial S}{\partial M_{BH}} = \frac{1}{T_H} \quad (56 - II)$$

بعد المكاملة نحصل:

$$S = \left(\frac{n+1}{n+2} \right) \frac{M_{BH}}{T_H} \quad (57 - II)$$

II.3.2. تفكك الثقوب السوداء المجهرية

على ضوء التخمينات الأخيرة لإنتاج المحتمل لثقوب السوداء في إطار نماذج الأبعاد الإضافية أثناء الاصطدام الجسيمات العالية الطاقة وكذا ما جاءت به أعمال ستيفن هوكينغ لتكشف الستار عن الثقوب السوداء أنها عندما تتشكل يتوقع تفككها بشكل لحظي (عمرها المثالي حوالي 10^{-26} s) من خلال إصدارها إشعاعاً حراري يدعى إشعاع هوكينغ وهذا ما يؤدي إلى تلاشيها بمعنى آخر يحدث تفكك للثقوب السوداء. وفقاً للمراجع [24-25] فإن تشكل الثقوب السوداء الدقيقة سيمر بعدد من المراحل قبل التفكك الكامل (انظر إلى الوثيقة II-19):

أ. **مرحلة Balding** : في هذه المرحلة ينبعث إشعاع بطريقة لا تناظرية من الإشعاع التجاذبي و هذا بسبب الاصطدام العنيف مما يؤدي إلى خسارة جزء من الطاقة .

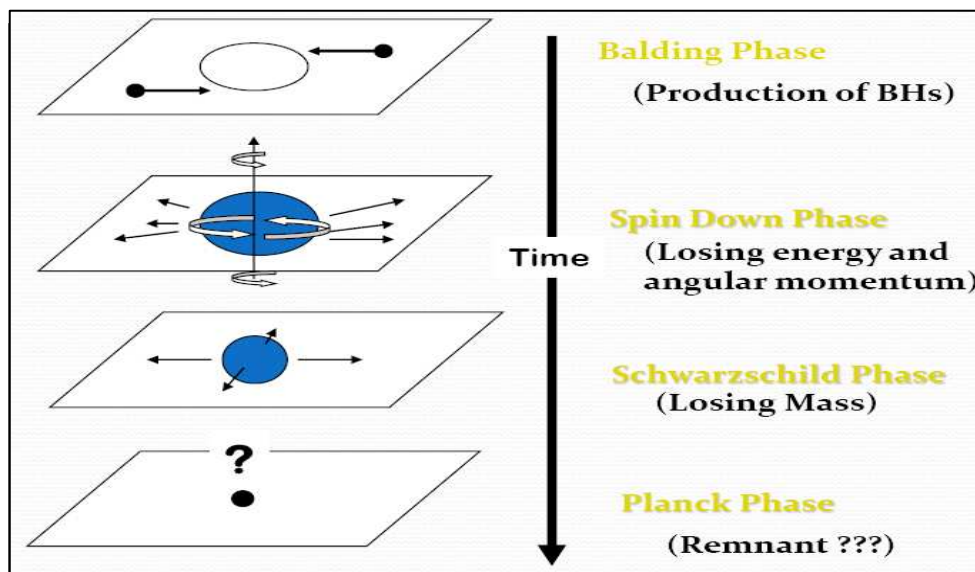
ب. **مرحلة Spin-down** : نموذجاً باراً متر التأثير لاصطدام بارتون partons لا يساوي الصفر ($b \neq 0$) ما يقود إلى ثقب اسود ببعض من العزم الزاوي حول محور عمودي على المستوي و أثناء هذا الطور يفقد الثقب عزمه من خلال إشعاع هوكينغ .

ج. **مرحلة Schwarzschild**: في هذا الطور الثقب الأسود الكروي المتمثل يفقد طاقته بسبب إشعاع هوكينغ وهذا ما يؤدي إلى النقصان التدريجي من كتلته ليقابله زيادة في الحرارة حتى تصل كتلة الثقب إلى كتلة بلانك الأساسية M_* .

إن طيف إشعاع هوكينغ يحتوي على كل جسيمات النموذج القياسي بالإضافة إلى غرافيتون (Graviton) ومن المتوقع أن أغلب الطاقة المفقودة منبعثة خلال هذه المرحلة كما هو الحال من أجل الثقوب السوداء الكلاسيكية.

د. **مرحلة Planck**: عندما تصل كتلة الثقب الأسود إلى كتلة بلانك الأساسية فإنه يسقط في نظام الجاذبية الكمية و التنبؤ الكمي يصبح صعب ليصبح من الضروري نظرية الجاذبية الكمية لدراسة هذه المرحلة بالتفصيل هذه الأخير

تقترح بأن الثقب الأسود يتفكك إلى بعض من جسيمات النموذج القياسي أو ينتهي على شكل كتلة مستقرة. ويمكن تمثيل هذه الأطوار في مخطط كما توضحه الوثيقة II - 20.



الوثيقة II- 20 : رسم تخطيطي يمثل مراحل تفكك الثقب الأسود المجهرى.

السؤال المهم المتعلق بالمرحلة المذكورة أعلاه هو كم نسبة الطاقة المنبعثة أثناء كل طور من أطوار تفكك الثقب الأسود المجهرى، فكانت التخمينات في إطار الفضاء الرباعي الأبعاد ، ما يقارب 16 % منها يفقد أو يبعث على شكل إشعاع تجاذبي أثناء المرحلة الأولى و يمكن أن يصل إلى 55 % حسب قيمة بارامتر التأثير [26]، و عدد أبعاد الفضاء كما يتوقع فقدان حوالي 25% و 60 % خلال كلا من المرحلة Spin-Down و Schwarzschild على التوالي بالرغم من أننا نعرف بأن هذه النسب تتغير بإضافة أبعاد إضافية يعتقد بأن مرحلة Schwarzschild ستبقى الأطول و ستفسر النسبة الأعلى لطاقة المنبعثة من قبل الثقب الأسود. و قد كانت عدة دراسات لإشعاع هوكينغ أثناء هذه المرحلة بالشكل التحليلي و العددي.

إن إشعاع هوكينغ في الحقيقة متوافق مع نتائج النظرية النسبية أي أن لا شيء يمكن أن يصدر من أفق الثقب الأسود وأما إشعاع هوكينغ فيمكن أن يتصور كخلق زوج افتراضي من الجسيمات في حدود الأفق حيث الجسيمة بالطاقة الموجبة تهرب إلى مالا نهاية بينما ضد الجسيمة بالطاقة السالبة تنهار إلى داخل الثقب الأسود.

وكما سابق الذكر أن إشعاع هوكينغ طيفا حراريا لدرجة حرارة T_H وأنه تقريبا يوافق طيف الجسم الأسود أي طيف التدفق⁶ حيث يمكن بسهولة التعبير عنه بالتعميم إلى عدد أعلى من الأبعاد :

⁶ عدد الجسيمات المنبعثة في كل وحدة زمن.

$$\frac{dN^{(s)}(\omega)}{dt} = \sum_j \sigma_{j,n}^{(s)}(\omega) \frac{1}{\exp(\omega/T_H) \pm 1} \frac{d^{n+3}k}{(2\pi)^{n+3}} \quad (58- II)$$

j : العدد الكوانتي s : السبين (العزم الذاتي)، ولدينا -1 من اجل البوزونات و $+1$ للفرميونات واما

$|k| = \omega$ من أجل الجسيمات عديمة الكتلة أما لغير ذلك فان: $|k|^2 = \omega^2 - m^2$ حيث m تمثل الكتلة السكونية للجسيمة. من العبارة أعلاه نجد أن من الضروري أن تكون $T_H > m$ لإمكانية انبعاث جسيمة بكتلة m وكذا توضح أن بينما التفكك يتقدم أي تناقص كتلة الثقب الأسود يوافقها تزايد في درجة الحرارة أين الثقب يكون في حالة توازن من اجل كل درجة حرارة.

إن مقدار الطيف الطاقوي أو الطاقة المنبعثة في كل وحدة زمن من قبل الثقب الأسود يمكن أن يعبر عنه بدمج تدفق الجسيمات المنبعثة بطاقتها لنحصل على:

$$\frac{dE^{(s)}(\omega)}{dt} = \sum_j \sigma_{j,n}^{(s)}(\omega) \frac{\omega}{\exp(\omega/T_H) \pm 1} \frac{d^{n+3}k}{(2\pi)^{n+3}} \quad (59- II)$$

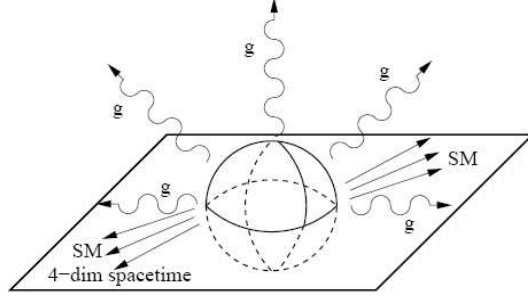
كلا من العبارة (58-II) و (59-II) تضم عاملا اضافيا ، $\sigma_{j,n}^{(s)}(\omega)$ لا يتواجد عادة في طيف الجسم الأسود المثالي ، يتغير بدلالة ω, n, s, j يمكن القول انه يعدل الطيف يدعى بـ عامل Greybody، إن هذا العامل يتغير بتغير عدد الأبعاد الإضافية n بمعنى انه يشفر معلومات عن الفضاء من حول الثقب الأسود (أفق الحدث) و حضور عامل Greybody في طيف الإشعاع يمكن أن ينسب إلى تأثير الجسيمة المنبعثة من قبل الثقب الأسود عندما تخترق الخلفية الجاذبية له قبل الوصول إلى المراقب في مالا نهاية على غير ذلك بالنسبة إلى الجسم الأسود المثالي و بذلك يمكن تعريف عامل Greybody انه المقطع الفعال للجسيمات المنتشرة في الخلفية الجاذبية حيث يمكن تحديد مقداره من خلال حل معادلة الحركة أو ما يعرف بمعادلة ماستر بحساب معامل الامتصاص $|A_j^{(s)}|$ لنحصل في الأخير على العبارة :

$$\sigma_{j,n}^{(s)}(\omega) = \frac{2^n \pi^{(n+1)/2} \Gamma[(n+1)/2] (2j+n+1)(j+n)!}{n! \omega^{n+2} j!} |A_j^{(s)}|^2 \quad (60- II)$$

من العبارة (60-II) يتضح أن الطيف الطاقوي يتناسب مع معامل الامتصاص لنستنتج بذلك أن إشعاع هوكينغ مرتبط بالقيم ω, s, j, n و هنا يمكن أن نصنف إشعاع هوكينغ إلى إشعاع هوكينغ في البراين (في فضاء الزمكان النسبي) و إلى إشعاع هوكينغ في بولك (الامتداد الفضائي) .

1.2.2.II. إشعاع هوكينغ في البراين (Brane)

كما سبق الذكر أن إشعاع هوكينغ لثقب الأسود المجهري أثناء المرحلة Schwarzschild هي التي أخذت بعين الاعتبار وذلك لأن أغلب الطاقة المفقودة منبعثة خلال هذه المرحلة ولكي يدرس هذا الإشعاع نحتاج لكتابة المعادلات المطابقة لحركة مختلف الحقول .



الوثيقة II - 21: مرحلة Schwarzschild من تفكك الثقوب السوداء المجهرية. إشعاع هوكينغ للحقول النموذج القياسي في البراين بينما الغرافيتونات تبعث في كل الفضاء بمعنى آخر في البراين والبولك .

نحن سنهتم بإشعاع هوكينغ في البراين لذا نحتاج لتحديد عنصر الخط الذي تنتشر فيه أنماط بران (II) - (50) وهذا يمكن أن يحدد بتثبيت قيم الإحداثيات الزاوية الإضافية التي توصف بـ n بعد واعتبار الثقب الأسود Schwarzschild متمثل كرويا غير دوار في هذه المرحلة وبذلك عنصر الخط (الخلفية الجاذبية) يعطى بالشكل [24]:

$$ds^2 = -h(r)dt^2 + h(r)^{-1}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \quad (61- II)$$

ابن معادلة ماستر تأخذ شكل مبسط أكثر:

$$\Delta^s \frac{d}{dr} \left(\Delta^{1-s} \frac{dP_s}{dr} \right) + \left(\frac{\omega^2 r^2}{h} + 2i\omega sr - \frac{is\omega r^2 h'}{h} - \Lambda \right) P_s(r) = 0 \quad (62- II)$$

لتحديد عبارة معامل Greybody يكفي حساب معامل الامتصاص $|A_j^{(s)}|^2$ وذلك من خلال حل معادلة ماستر.

ان إشعاع هوكينغ في البراين يتعلق بطاقة الجسيمة المنبعثة و سبينها و عدد الأبعاد الإضافية و هذا يعني بان حضور عامل Greybody في طيف الإشعاع يسبب تعديلات في نسبة الطاقة المنبعثة المنخفضة و العالية مما يؤدي إلى بعث مختلف الجسيمات ذات عزوم ذاتية مختلفة علاوة على ذلك فان كلا من عدد و نوع الجسيمات المنبعثة تتعلق بعدد الأبعاد الإضافية التي توجد في الطبيعة هذه الميزة قد تؤدي إلى تحديد أبعاد الفضاء فإشعاع هوكينغ لثقوب السوداء المجهرية الموصوف بمعامل Greybody هذا الأخير يمكن أن يحسب بشكل كلاسيكي في

النسبية العامة ولقد مددت مؤخرا هذه الحسابات إلى حالة الثقوب السوداء المجهرية في نموذج البعد الإضافي الكبير إذ يمكن حسابه بشكل تحليلي في حالات خاصة لكن أكثر الحسابات التي حتى الآن مؤدية هي بشكل عددي.

حل المعادلة (62-II) تحليليا كان عن طريق إيجاد حل من أجل $r = r_H$ و الحل من أجل $r \gg r_H$ وبعد تحديد الحل الكامل لمعادلة ماستر $P_s(r)$ [24] ليتم بذلك تحديد معامل الانعكاس $|R_j|^2$ الذي يعرف بنسبة تدفق الحقول الخارجة و القادمة في اللانهاية فكانت العبارة التحليلية لمعامل الامتصاص $|A_j|^2$ من أجل الطاقات المنخفضة $\omega r_H \ll 1$ تعطى بالشكل :

$$|A_j|^2 = 1 - |R_j|^2 \quad (63- II)$$

$$|A_j^{(s)}|^2 = \frac{(2\omega R_H)^{2j+2-2s}}{|\Gamma(1-s+2\alpha)|^2 |C(\omega r_H)^{2j+1} + D|^2} \quad (64- II)$$

$$C = \frac{2^{2j+1} e^{i\pi(s-1/2)} \Gamma\left(2\beta - \frac{1-2s}{n+1}\right) \Gamma(j-s+1)}{\Gamma(\alpha+\beta) \Gamma\left(\alpha+\beta + \frac{s+n(1-s)}{n+1}\right) \Gamma(2j+1)} \quad \text{حيث :}$$

$$D = \frac{\Gamma(2j+1) \Gamma\left(-2\beta + \frac{1-2s}{n+1}\right)}{\Gamma(\alpha-\beta+1-s) \Gamma\left(\alpha-\beta + \frac{1-2s}{n+1}\right) \Gamma(j+s+1)}$$

فمن أجل جسيمات النموذج القياسي المنتشرة في البراين أي في الفضاء الزمكان النسبي عامل Greybody يأخذ الشكل المبسط :

$$\sigma_{j,n}^{(s)}(\omega) = \frac{\pi}{\omega^2} (2j+1) |A_j^{(s)}|^2 = \frac{A_H}{(2\omega r_H)^2} (2j+1) |A_j^{(s)}|^2 \quad (65- II)$$

$$A_H = 4\pi r_H^2 \quad \text{أين}$$

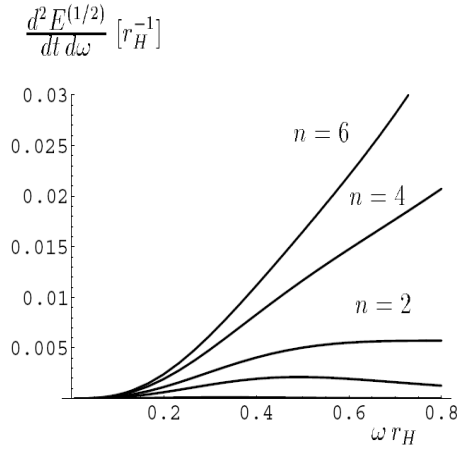
ومنه النتيجة التحليلية لعامل Greybody يتم تعويضها في عبارة الطاقة المنبعثة من الثقب الاسود المجهرى:

$$\frac{dE^{(s)}(\omega)}{dt} = \sum_j \sigma_{j,n}^{(s)}(\omega) \frac{\omega^3}{\exp(\omega/T_H) \pm 1} \frac{d\omega}{2\pi^2} \quad (66- II)$$

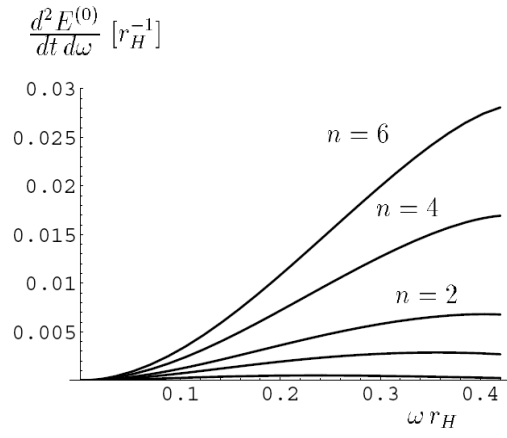
وكما هو مبين في الوثيقة (II - 21) ان نسبة الجسيمات المنبعثة لأجل مختلف قيم $s \left(s = 0, \frac{1}{2}, 1 \right)$ متعلق بـ n

حيث أن الحقول السلمية الأكثر بعثا من قبل الثقب الأسود من أجل قيم المتوسطة و الدنيا لعدد الأبعاد الإضافية أما بالنسبة إلى القيم الكبيرة فان البوزونات أكثر انبعاث.

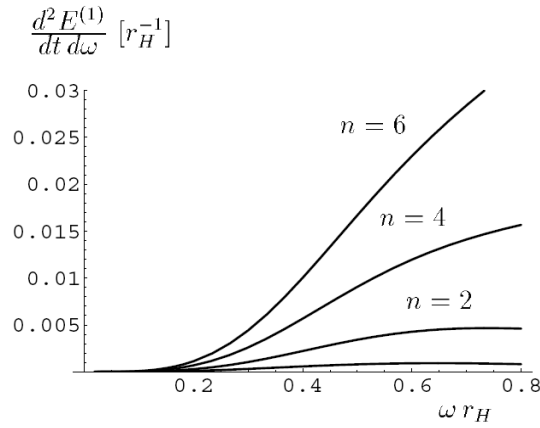
أما فيما يتعلق النتائج العددية فقد شملت مجال الطاقة كاملا على عكس النتائج التحليلية – اقتصرت على الطاقات المنخفضة -كما مبين في الوثيقة (II - 22).



(ب)

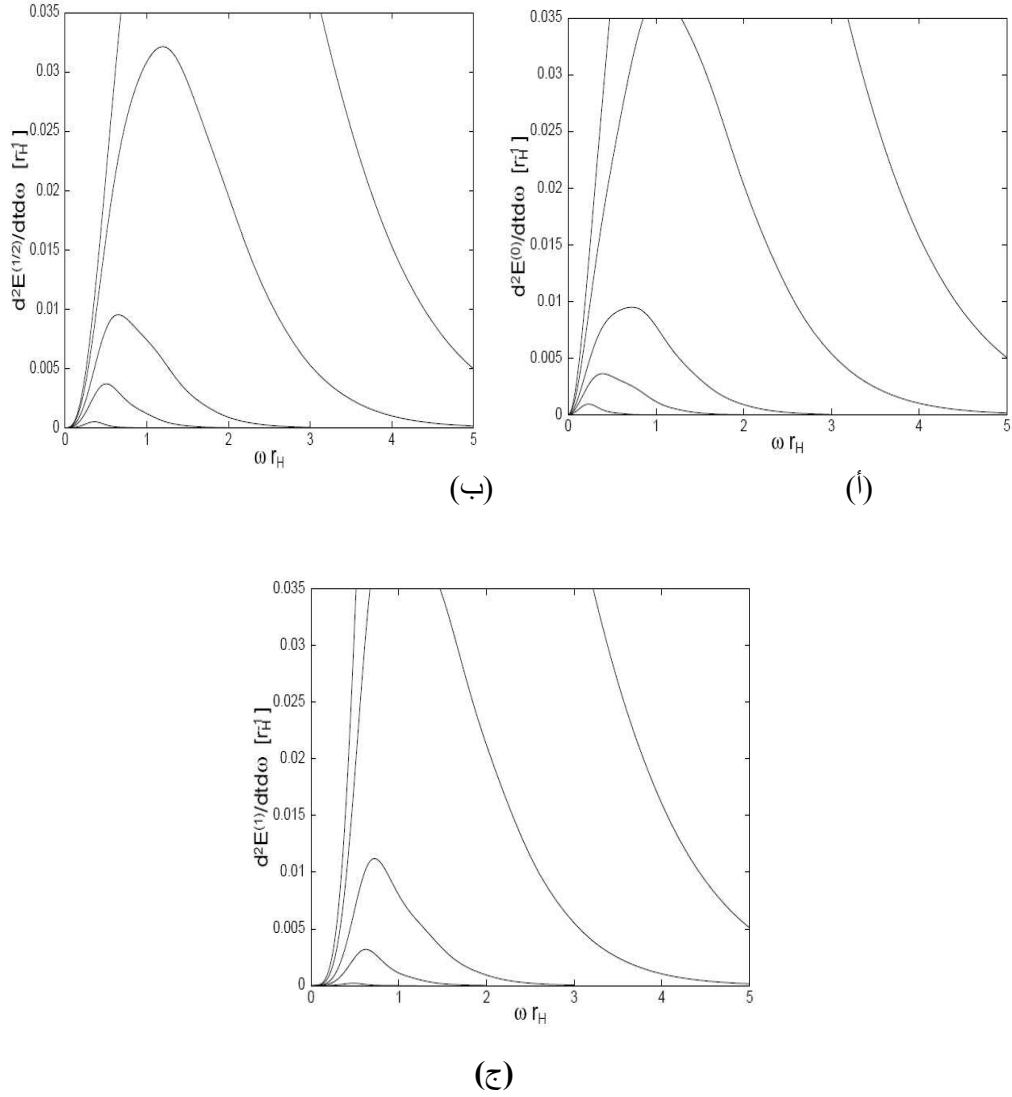


(أ)



(ج)

الوثيقة II - 22: النتائج التحليلية لنسبة الطاقة المنبعثة من قبل الثقب الأسود المجهري لـ (أ) الحقل السلمي، (ب) الفرميونات و(ج) البوزونات [24].



الوثيقة II - 23: النتائج العددية لنسبة الطاقة المنبعثة من قبل الثقب الأسود المجري لكل من (أ) الحقل السلمي و (ب) الفارميونات ، (ج) البوزونات وذلك في البراين [24].

II. 1.2 إشعاع هوكينغ في البولك (Bulk)

إن دراسة إشعاع هوكينغ لثقب الأسود المجري في بولك يستند إلى فرضيات النموذج ADD حيث أن الأنماط الوحيدة التي تنتشر في بولك أو بمعنى آخر المنتشرة في بولك هي الغرافيتونات و الحقول السلمية ($j = \ell$ لأن $s = 0$) لذا هذه الأخيرة فقط التي أخذت بعين الاعتبار في إشعاع هوكينغ في بولك رغم أن هذا النوع من الإشعاع من غير الممكن أن يلاحظ ، إلا إن دراسة إشعاع هوكينغ في بولك جد مهمة إذ انه يحدد كمية الطاقة المنبعثة في الأبعاد الإضافية للفضاء ومن ذلك تقدير كمية الطاقة المنبعثة في فضاء النسبية هذا الأخير الجدير بالملاحظة.

فإشعاع هوكينغ في بولك من قبل الثقب الأسود المجري تم دراسته بكلنا الطريقتين التحليلية و العددية وبعد

تحديد العبارة التحليلية لمعامل الامتصاص $|A_\ell|^2$ دائما من اجل الطاقات المنخفضة $\omega R_H \ll 1$ بالشكل :

(67- II)

$$|A_\ell|^2 = \frac{4\pi^2}{2^{4\ell/(n+1)}} \left(\frac{\omega r_H}{2} \right)^{2\ell+n+2} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{\ell}{n+1}\right)^4}{\Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{\ell}{n+1}\right)^2 \Gamma\left(\ell + \frac{n+3}{2}\right)^2} + \dots$$

ومنه عبارة معامل Greybody :

(68-II)

$$\sigma_{\ell,n}(\omega) = \frac{\pi}{2^{4\ell/(n+1)}} \left(\frac{\omega r_H}{2} \right)^{2\ell} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{\ell}{n+1}\right)^2 \Gamma\left(\frac{n+2}{2}\right)^2}{\Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{\ell}{n+1}\right)^2 \Gamma\left(\ell + \frac{n+3}{2}\right)^2} N_\ell A_H + \dots$$

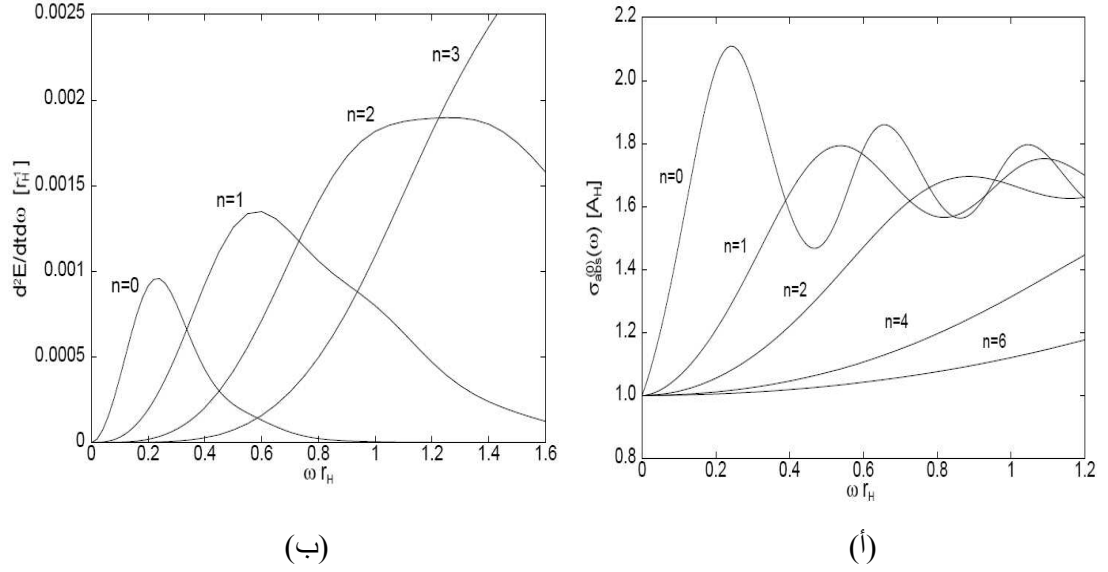
فمعامل Greybody يتناقص كلما كانت قيمة ℓ اكبر لذا فان المساهمة الرئيسية لـ $\sum_\ell \sigma_{\ell,n}$ هي من اجل

قيمة $\ell = 0$ والعبارة أعلاه يمكن أن تعطي لنا السلوك العام للمعامل Greybody من اجل مختلف قيم n وكذا نسبة الطاقة المنبعثة كما هو موضح في الوثيقة II - 23 .

طبقا لنتائج التحليلية و العددية نسب إشعاع هوكينغ الحقول السلمية في بولك يتزايد بتزايد عدد الأبعاد الإضافية من اجل الطاقات العالية كما هو الحال في إشعاع هوكينغ في براين ويكن أن يرجح ذلك إلى زيادة درجة الحرارة من اجل القيم الأعلى لـ n .

أما فيما يتعلق بنسبة الطاقة المنبعثة في كلا من البولك و البراين يمكن تقديرها بالعبارة:

$$\frac{dE^{(B)} / dt}{dE^{(b)} / dt} = \frac{\sum_\ell N_\ell^{(B)} |A_\ell^{(B)}|^2}{\sum_\ell N_\ell^{(b)} |A_\ell^{(b)}|^2}, \quad \begin{matrix} b : brane \\ B : Bulk \end{matrix} \quad (69-II)$$



الوثيقة II - 24: النتائج التحليلية لعامل Greybody (أ) و النسبة المنبعثة لطاقة (ب) في البولك [24].

فالنتائج العددية الدقيقة المقتبسة من المرجع [31] تسمح مرة أخرى بتقدير الجيد لمعدل الطاقة المنبعثة الكلي من قبل الثقب الأسود المجهري بدلالة عدد الأبعاد الإضافية أين القيم مقننة بالنسبة إلى $n = 0$ والمعطاة في الجدول :

الجدول II-03: معدل الطاقة المنبعثة من أجل مختلف قيم n .

n	$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$
<i>Bulk / brane</i>	1.0	0.40	0.24	0.22	0.24	0.33	0.52	93.0

من الجدول أعلاه يصبح واضحاً أن إشعاع هوكينغ في بولك من أجل القيم المتوسطة لـ n (أقل من إشعاع هوكينغ في براين أما بالنسبة للقيم الدنيا و الأعلى لعدد أبعاد إضافية فإشعاع هوكينغ في بولك يصبح مهم ،نتيجة لذلك اغلب الطاقة المنبعثة من قبل الثقب الأسود المجهري للحقول السلمية تكون في براين أي في فضاء الزمكان النسبي. وبهذا يمكن أن نستنتج إن إشعاع هوكينغ في براين أكثر أهمية حيث يتضمن انبعاث جسيمات نموذج القياسي هذه الأخيرة التي يمكن الكشف عنها بسهولة، على الرغم من هذا فإن كمية الطاقة المنبعثة في بولك مهم بشكل حاسم لتحديد من جهة أخرى كمية الطاقة المنبعثة في البراين .

النتائج المتحصل عليها تشير إلى درجة الحرية الفردية و ليس الجسيمات الأولية فلأجل تحديد عدد الجسيمات الأولية المنبعثة و الطاقة التي يحملونها لا بد من استعمال مولد إنتاج و تفكك الثقب الأسود هذا الأخير يحاكي الحدث في السرعات و الغلاف الجوي و يخمن عدد و أنواع الجسيمات الأولية المنبعثة .

إن إشعاع هوكينغ يمكن أن يكشف عدد الأبعاد الفضاء بدقة و خاصة أن كلا من كمية و نوع الإشعاع المنبعثة يتعلق بصفة كبيرة بعدد أبعاد الفضاء و الذي مثير أيضاً بان الثقب الأسود يمكن أن تبعث كل أنواع الجسيمات

الموجودة في الطبيعة طالما كتلتها السكونية اصغر من درجة الحرارة الثقب و هذا ما هو مرجو حاليا هو اكتشاف جسيمات جديدة مثل حقول Higgs قد تظهر في طيف التفكك.

II. 4. إنتاج الثقوب السوداء في مسرع الجسيمات (Large Hadron Collider)

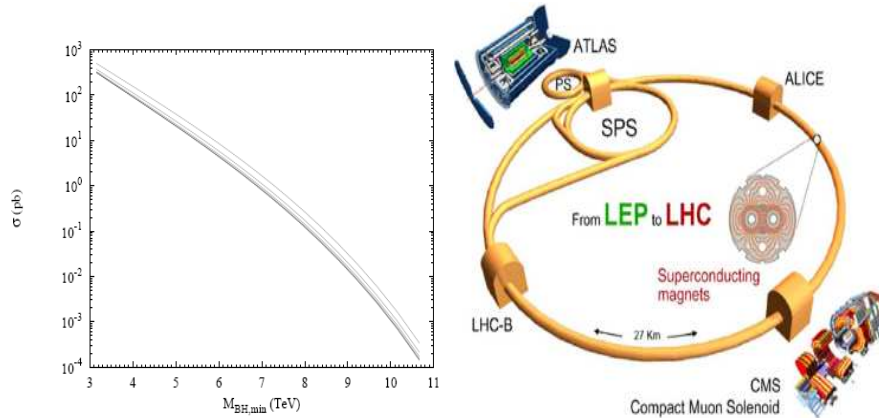
في حضور الأبعاد الإضافية المتراسة من المتوقع إنتاج الثقوب السوداء المجهرية في اصطدامات الجسيمات وعلى وجه الخصوص في المسرعات الجسيمات التجريبية ففي المركز الأوروبي للبحث النووي (CERN) تم انطلاق انجاز LHC في سنة 2002 إذ يعتبر من أهم تجارب الطاقات العالية .

وكما سبق الذكر إن دراسة إنتاج الثقوب السوداء المجهرية في إطار سلم الجاذبية TeV له عدة سنوات ولكن بعد انجاز LHC نكون قد دخلنا مرحلة حاسمة وهامة تحدد من خلال بياناتها مسار كل الدراسات ، تتضمن التجربة عدة مجموعات تجريبية منها ATLAS ، ALICE و CMS (انظر الوثيقة II - 24)، كلا حسب وظيفته فعلى سبيل المثال غرفة ALICE تستعمل للتمييز بين التفكك الكامل لثقب الأسود إلى جسيمات النموذج القياسي أو إلى بقايا مستقرة (BHR).

تجربة LHC هي عبارة عن مسرع يسعى إلى أن يحدث اصطدام بين بروتون -بروتون أين مركز الطاقة يساوي $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ إلا انه يبقى المقطع الفعال لإنتاج الثقب الأسود صغيرا نسبيا (راجع الوثيقة II - 24).

تعتمد التجربة بالدرجة الأولى على تحديد الحرارة من توزيع طاقات نتاج التفكك (بتركيب طيف الطاقة بالشكل المتوقع) أما الكتلة الكلية M_{BH} بجمع كل الطاقات ، من خلال هذه البيانات يسمح إعادة بناء و تحديد سلم بلانك الأساسي M_* و عدد الأبعاد الإضافية n .

فمن المتوقع أن تكون شدة التدفق الجسيمي (Luminosity) به حوالي $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ليقابل بذلك إنتاج ما يقارب 10^9 ثقب اسود مجهري في السنة أي حوالي ثقب في الثانية كتلته تصل إلى 5TeV ودرجة حرارته جد عالية (تفوق 1TeV) [23].



الوثيقة II - 25: على اليمين مخطط للمسرّع LHC، على اليسار المقطع الفعال لتشكيل الثقب الاسود المجهري

(بروتون-بروتون) في LHC بدلالة كتلة الثقب الدنيا وذلك من اجل مختلف قيم n ($n = 2, \dots, 7$) من الأسفل إلى الأعلى مع $M_* = 1\text{TeV}$ [28].

بينما يبدأ LHC بالعمل سيكون هناك مختلف التوقعات المتفائلة منها و المتشائمة حول مدى قدرته من إيجاد شيء و كذا توجيه إليه بعض التخوفات من الجمهور التي تخمن أن إنتاج الثقوب السوداء في الأرض فقد يؤدي إلى تفاعل متسلسل خطر إلا انه قد أكد أنها أفكار جد بعيد عن المنطق لتفاصيل أكثر يمكن مراجعة [29].

للحصول على تنبؤات واضحة في المسرعات التجريبية كان لابد أن تسبق بمحاكاة عددية لإنتاج و تفكك الثقوب المجهرية ،لحد الآن طبقت عدة دراسات عددية لإنتاج الثقوب في LHC بلغة الفورتران مونتني كارلو (MC) أهمها blackmax و CATFISH حيث تتضمن كل النماذج الحديثة مما يسمح إعطاء تنبؤات أكثر واقعية [30].

ما يمكن الإشارة إليه في الأخير هو أن نتائج LHC ستكون أول نافذة على ما بعد النموذج القياسي و الأبعاد الإضافية.

5.II. إنتاج الثقوب السوداء المجهرية في الأشعة الكونية

إن الأشعة الكونية العلية الطاقة جدا تعطي فرصة كبيرة لتقصي إنتاج الثقوب السوداء المجهرية خلال اصطدام الجسيمات في إطار سيناريوهات الأبعاد الإضافية الكبيرة و سلم الجاذبية المنخفض.

و بشكل خاص جسيمات النوترينو الكونية العالية الطاقة جدا يمكن أن تنتج ثقوب سوداء من خلال تفاعلها مع نيكليونات⁷ (البروتونات) الغلاف الجوي و ذلك بمراكز طاقة تتراوح 100TeV هذه الأخيرة بعيدة كل البعد من الوصول إليها في المصادمات الصناعية .

وكما هو معروف أن طول تفاعل النوترينو يقدر حوالي $L = 1.7 \times 10^{17} \text{ kmwe} \left(\frac{pb}{\sigma(E_\nu)} \right)$ إذ انه اكبر

بكثير من عمق الغلاف الجوي أي فقط 0.36kmwe حتى عند الاختراق أفقيا و عليه فتفاعل النوترينو باحتمال مساوي تقريبا في أي نقطة من الغلاف الجوي [30]. على أية حال فمن اجل زاوية قمة مائلة كبيرة ($\theta \leq 70^\circ$) وعمق كبير في الغلاف الجوي ($> 10\text{km}$) إمكانية تفاعل النوترينو تزداد.

في إطار النموذج القياسي، اصطدام نوترينو طاقته E_ν مع بروتون الغلاف الجوي بالتيارات المشحون يعطي [31]:

⁷ معدل تفاعل النوترينو بالكترونات الغلاف الجوي مهمل بالمقارنة مع تفاعلاته مع النيكليونات.

$$(\nu_\ell, \bar{\nu}_\ell) + N \rightarrow (\ell^-, \ell^+) + \text{anything} \quad (70-II)$$

وقدر المقطع الفعال له بـ:

$$\sigma_{\nu N}^{CC} = 5.53 \times \left(\frac{E_\nu}{\text{GeV}} \right)^{0.363} \text{ pb}, 10^7 \text{ GeV} \leq E_\nu \leq 10^{12} \text{ GeV} \quad (71-II)$$

أما بالتيارات المتعادلة :

$$(\nu_\ell, \bar{\nu}_\ell) + N \rightarrow (\nu_\ell, \bar{\nu}_\ell) + \text{anything} \quad (72-II)$$

أين عبارة المقطع الفعال لهذا التفاعل:

$$\sigma_{\nu N}^{NC} = 2.23 \times \left(\frac{E_\nu}{\text{GeV}} \right)^{0.363} \text{ pb}, 10^7 \text{ GeV} \leq E_\nu \leq 10^{12} \text{ GeV} \quad (73-II)$$

أما في إطار مجال الطاقة المعتبر فإن مقطع الفعال لإنتاج الثقوب السوداء بتفاعل النوترينو-البروتون يمكن حسابه من العبارة (25-II) باعتبار A جسيمة أولية (غير مركبة) وهي نوترينو و B عبارة عن نيكلون إذ يمكن تبسيط عبارة المقطع الفعال إلى [24]:

$$\sigma_{\nu N \rightarrow BH}(s, n) = \sum_{ij} \int_{\frac{s}{s}}^1 dx f_i(x', Q) f_j(x, Q) \sigma_{ij \rightarrow BH}(\hat{s}, n) \quad (74-II)$$

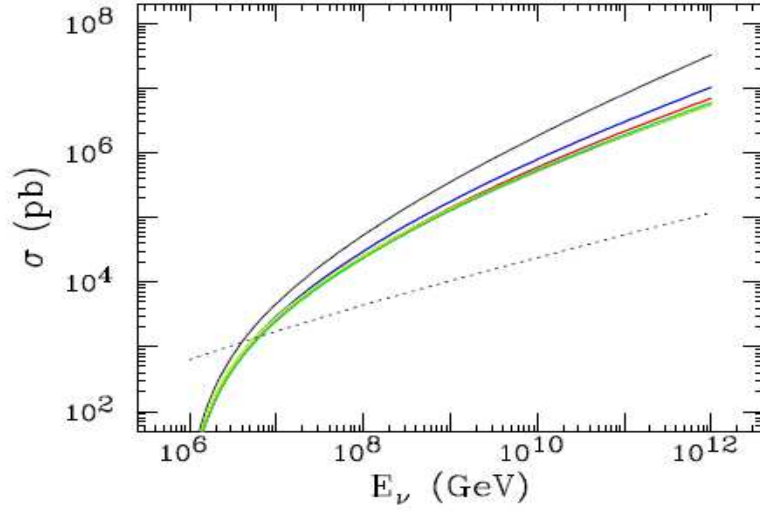
بالمقابل فإن: $s = 2m_N E_\nu$ هذا الأخير موضح في الوثيقة 25-II بالإضافة إلى مقطع الفعال لنموذج المقياسي⁸ كمثال للمقارنة، وكما هو ملاحظ فإن المقطع الفعال لنموذج القياسي يزداد بزيادة E_ν إلا أن مقطع الفعال لإنتاج الثقوب السوداء يزداد بمقدار أكبر بزيادة كلا من الطاقة E_ν و عدد الأبعاد الإضافية n .

إن جسيمات النوترينو الكونية العالية الطاقة من المصادر الجد فعالة لإنتاج الثقوب السوداء المجهرية في الغلاف الجوي وذلك بمقاطع فعالة صغيرة إلا أنها أكبر من مقاطع الفعالة لنموذج القياسي بحوالي الضعف أو أكبر.

هناك العديد من مصادر المحتملة لجسيمات النوترينو العالية الطاقة جدا إلا أن هنا نعتبر بشكل خاص فقط تدفق نوترينو Cosmogenic الأكثر دقة، فكما سبق الذكر في الفصل الأول حيث أن التفاعل المتسلسل الذي ينتج هذا نوترينو هو المسبب لقطع GZK، أين جسيمات النوترينو العالية الطاقة تنتج بوفرة مختلفة النكهات (Flavors) وعلى ضوء ذلك فإن تفكك البيونات يؤدي إلى إنتاج النوترينو بنسب $\nu_e : \nu_\mu = 2:1$ إلا أن بسبب الخاصية التذبذبية (الاهتزازية) لنوترينو فالنسب المتوقعة على الأرض $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:1:1$ [33].

⁸ اخذ بعين الاعتبار $\sigma_{\nu N}^{CC}$ لأن: $\sigma_{\nu N}^{NC} = 2.4 \sigma_{\nu N}^{CC}$

ولقد تم تقدير ذروة تدفق جسيمات النوترينو الناتجة عن تفاعلات قطع GZK في حدود الطاقة $E_\nu = 2 \times 10^{17} \text{ eV}$ كما هو موضح في الوثيقة II - 26.

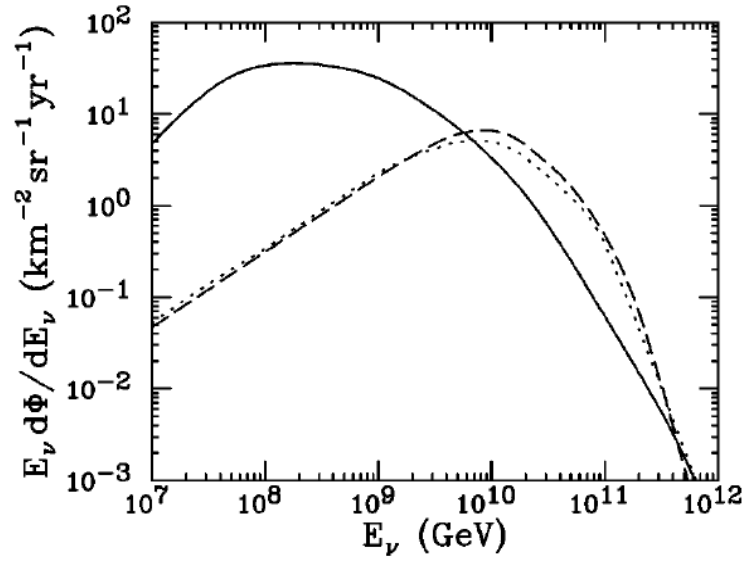


الوثيقة II - 26: مقطع الفعال لتشكيل الثقب الأسود $\sigma(\nu N \rightarrow BH)$ أين $(M_* = M_{BH}^{\min} = 1 \text{ TeV})$ وذلك من أجل مختلف قيم n في حين المنحنى المتقطع يمثل المقطع الفعال القياسي [26].

تفاعلات النموذج القياسي يتوقع حدوث تفاعل نوترينو مع نيكليونات الغلاف الجوي و تشكيل شلالات شبه أفقية عملاقة و على منوال ذلك فان حسب نتائج نظرية نصف كلاسيكية أن الثقوب السوداء سرعان ما تتفكك عن طريق إشعاع هوكينغ و بعث جسيمات النموذج القياسي ، مما يؤدي لتشكيل شلالات شبه أفقية في عمق الغلاف الجوي كنتيجة لذلك فان الإشارة الأكثر دلال على تشكل الثقوب السوداء بالأشعة الكونية ستكون بالشلالات الهوائية شبه أفقية في الغلاف الجوي.

كل أنواع النوترينوهات تتفاعل و تشكل شلالات شبه أفقية إلا أن كلا من $\bar{\nu}_e, \nu_e$ و حسب نموذج القياسي بالتفاعل المشحون فان طاقة النوترينو تصدر بالكامل على شكل جسيمات الشلالات على عكس ذلك فان تفاعل $\bar{\nu}_\mu, \nu_\mu$ بالتيارات المشحونة تستعمل ماعدا YE_ν^9 في تشكل جسيمات الشلالات.

$$^9 Y = 1 - \frac{E_\mu}{E_\nu}$$



الوثيقة II - 27: يمثل تدفق نوترينو Cosmogenic $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu + \nu_e)$ أين المنحنى الخطي تقدير Protheroe و Johnson (PJ) مع طاقة القطع $E_{cutoff} = 3 \times 10^{21} \text{ eV}$ والمنحنى المتقطع تقدير Hill و Schramm أما في ما يخص المنحنى النقطي فيمثل تقدير Stecker [35].

شلالات الهوائية لجسيمات النوترينو في كلتا الحلقتين (النموذج القياسي و الثقوب السوداء) يمكن أن تميز عن غيرها من الشلالات الهادر ونية أو الفوتونات من خلال الشكل العام و مكوناتها. فالشلالات الناتجة عن الهادرونات أو الفوتونات تتفاعل في أعالي الغلاف الجوي (بالنسبة للبروتون $\approx 20 \text{ km}$) و لذلك على مستوى الأرض المكونات الكهرومغناطيسية تختفي كليا و يلاحظ أن جبهة الشلالات مستوية (نصف قطر التقوس $\leq 100 \text{ km}$)، على نقيض ذلك شلالات النوترينو تبدأ في عمق الغلاف الجوي أي بالقرب من الكاشف لذا تتميز بجبهة مقوسة (نصف قطر التقوس بضعة كيلومترات).

على ضوء تخمينات تدفق النوترينو يمكن أن يرصد مئات الثقوب السوداء قبل أن تبدأ LHC في العمل فمن خلال العلاقة (II-73) يمكن تقدير عدد الثقوب التي يمكن رصدها [31].

$$N = \int dE_\nu N_A \frac{d\Phi}{dE_\nu} \sigma(E_\nu) A(E_\nu) T \quad (75 - \text{II})$$

حيث : $A(E_\nu)$: يعطى من مستقبلات المرصد لأجل الشلالات الناتجة في $1 \text{ cm}^3 \text{ sr}$.

N_A : عدد أفوقادرو 6.022×10^{23} .

$\frac{d\Phi}{dE_\nu}$: تدفق النوترينو من المصدر

T : الزمن الجاري للكشف .

للحصول على تنبؤات واضحة على مستوى المراصد كان لابد أن تسبق بمحاكاة عددية لإنتاج و تفكك
الثقوب المجهرية في الغلاف الجوي، ولقد تم استعمال مولد مونتى كارلو بلغة الفورتران Groke لهذا الغرض
وهذا ما سنحاول التركيز عليه في الفصل الموالي.

الفصل الثالث

تقنيات المحاكاة

نقدم في هذا الفصل برامج المحاكاة المستعملة في دراستنا حيث سنطرق إلى الخصائص الرئيسية لبرنامج Groke النسخة 2.0 [34] ، كما سنشير إلى برنامج AIRES النسخة 2.8.0 بصفة خاصة.¹⁰ مولد Groke هو برنامج مونتي كارلو بلغة الفورترن يحاكي تشكل وتفكك الثقوب السوداء المجهرية في الغلاف الجوي و الشلالات الهوائية الناتجة عن ذلك حيث يتركب أساسا من برنامجين هما برنامج PYTHIA نسخة 2.0.0 و برنامج AIRES النسخة 2.8.0. المولد Groke بناء محاكاته تركز على خطوتين أساسيتين هما:

1. محاكاة تشكل وتفكك الثقوب السوداء المجهرية و ينفذ باستعمال برنامج PYTHIA [35].
 2. محاكاة تطور الشلالات الهوائية الناتجة من مخلفات تفكك الثقوب السوداء و ينفذ باستعمال برنامج AIRES [36].
- لكن قبل التعرض لشرح هاتين الخطوتين لا بأس أن نشير إلى أن خلال دراستنا نستعمل مولد Groke الذي يحاكي شلالات الثقوب السوداء المجهرية وكذا مولد AIRES لمحاكاة شلالات النموذج القياسي الهوائية .

¹⁰ كل برامج المحاكاة تم تنفيذها على نظام التشغيل linux (Ubuntu).

III.1.1. مولد Groke

أن مولد Groke قد أخذ في الحسبان اصطدام بروتون-نوترينو المشكل لثقب الأسود فقط دون اصطدام نوترون-نوترينو إلا أنه ليست هناك اختلافات إحصائية هامة، حيث جزء من طاقة مركز ثقل الجملة (بروتون-نوترينو) الذي لم يحصر أو يفقد خلال الإشعاع التجاذبي في التشكيل ينسب إلى بقية البروتون هذا الأخير يتجزأ طبقاً لنظرية QCD إلى الباريونات والميزونات وبعد ذلك تتفكك بمولد PYTHIA سوية مع نواتج مرحلة هوكينغ للثقب الأسود. كما أن المولد أهمل خسارة الطاقة في كلا من المرحلة Building و Spin-Down ذلك لأنها غير معرفة بشكل جيد وقد اكتفى باعتبارها متضمنة في خسارة الطاقة أثناء التشكل [37].

وكما سبق الإشارة أن المولد يتركب من برنامجين :

III.1.1.1. مولد PYTHIA

برنامج PYTHIA هو مولد مونت كارلو بلغة الفوترون يحاكي اصطدام الجسيمات العالية الطاقة نموذجياً ، فالاصطدام العالي الطاقة هو عملية مركبة تنتج الكثير من الجسيمات تدرس من خلال المقطع الفعال الملائم، إذ أن مولد PYTHIA يضم حوالي 300 تفاعل قوي هذه الأخيرة تصنف طبقاً لعدد الجسيمات النهائية ووفقاً لـ 17 سيناريو مختلف ومن العمليات التي يتضمن QCD ، إنتاج جسيمة Higgs و الأبعاد الإضافية.

كل حدث في PYTHIA يخلف جسيمات ناتجة عن الاصطدام تخزن في ملف مشترك Pyjet (أنظر الملحق) لتحقق في برنامج AIRES كجسيمات ابتدائية لشلال الهوائي باستثناء جسيمة τ (أنظر).

III.2.1. مولد AIRES

معرفة التفاصيل عن الجسيمات الابتدائية و استنتاج خواصها تعتبر من المشاكل المعقدة و تقتضى استعمال الحاسوب والإعانة بالمحاكاة و الاستنباط لتحليل مثل هذه الجسيمات بشكل كمي. ولقد أخذت على عاتق ذلك عدة برامج درست بالتفصيل الشلالات الهوائية منها MOCCA و CORSIKA [38]، إلا أن من المهم الإشارة إلى أن مولد AIRES يتضمن العديد من التعديلات يمكن أن تحسن البيانات.

مولد AIRES عبارة عن مجموعة خوارزميات تحاكي الشلالات الهوائية، وقد استعمل بنجاح البيانات التي سجلت في تجارب الشلالات الهوائية المختلفة مثل كاشف HiRes ومرصد Auger و من المفاهيم الأساسية المعتمدة في المولد:

❖ نظام الإحداثيات

اعتمد المولد AIRES على نظام إحداثيات الديكارتيية نقطة المركز على سطح البحر و المستوي xy مماس لسطح البحر أما المحور z موجب نحو الأعلى في حين الزاوية الرأسية θ تمثل الزاوية

بين محور الشلال و المحور z ($0^\circ \leq \Theta \leq 90^\circ$) أما زاوية السم Φ هي الزاوية بين مسقط محور الشلال على المستوي xy و المحور x ($0^\circ \leq \Phi \leq 390^\circ$) كما هو مبين في الوثيقة III - 27، يستعمل لتحديد موضع كل نقطة في نظام الإحداثيات (x, y, z_c, z_v) :

$$(R_e + z_v)^2 = (R_e + z_c)^2 + \rho^2 \quad , \quad \rho^2 = x^2 + y^2 \quad (76 - III)$$

أين R_e : نصف قطر الأرض

$z_c = z$: ارتفاع النقطة عن سطح البحر .

❖ نموذج الغلاف الجوي

إن الغلاف الجوي للأرض هو الوسط الذي تتطور فيه الشلالات و تنتشر فيه الجسيمات الثانوية أين تتعلق بشكل قوي بخصائصه ما يستدعي في محاكاة الشلالات الاستناد على نماذج تصف الغلاف الجوي بدقة من بينهم نموذج Linsley حيث طبق في مولد AIRES، نموذج Linsley للغلاف الجوي مبني على تركيب كيميائي يتضمن N_2 ، O_2 ، Ar بنسب 78.1%، 21%، 0.9% على الترتيب. أما فيما يتعلق بكثافة الغلاف الجوي فهي غير متجانسة حيث تتغير بدلالة الارتفاع العمودي على سطح البحر وتعطى بالشكل:

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-g M h / RT} \quad , \quad 0 < h < 112.8 \text{ Km} \quad (77 - III)$$

حيث: $T = 288 \text{ K}$ ، $M = 28.966^{11}$ ، $\rho_0 = 1.225 \text{ kg / cm}^3$

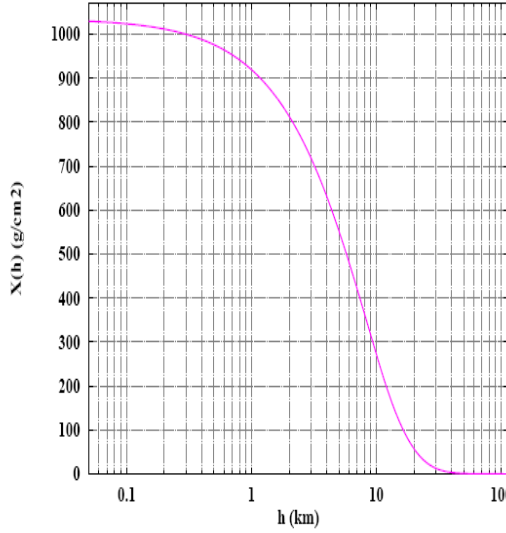
ليقابل كثافة الغلاف الجوي كمية مستعملة في خوارزميات المحاكاة تعرف بالعمق العمودي تعطى بالعلاقة (انظر الوثيقة III - 27 - ب-):

$$X = \int_h^\infty \rho(h') dh' \quad (78 - III)$$

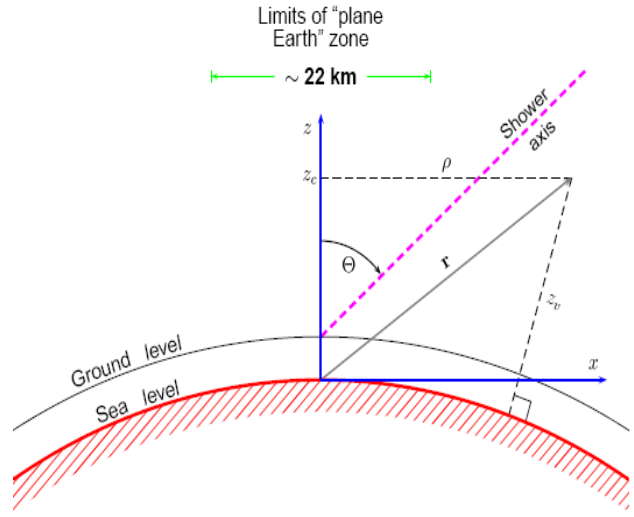
هذا بالنسبة للشلال العمودي أي الزاوية الرأسية معدومة على خلاف ذلك بالنسبة إلى الشلال الشبه أفقي ($\Theta \neq 0^\circ$) العمق المائل (Slant Depth) يعطى بـ:

$$X_s = \frac{X}{\cos \Theta} \quad (79 - III)$$

¹¹ تعرف بالوزن الجزيئي للغلاف الجوي.



(ب)



(أ)

الوثيقة III-28: (أ) نظام الإحداثيات المعتمد، (ب) تمثل تغير العمق العمودي للغلاف الجوي، X ، بدلالة الارتفاع العمودي على سطح البحر وفقا للنموذج linsley [36].

❖ خوارزمية التخفيف (The Thinning Algorithm)

إن الخاصية الرئيسية التي أخذت بعين الاعتبار متى أحدثت تعديلات على المولد هو العدد الكبير للجسيمات فعلى سبيل المثال يحتوي شلال هوائي ما يفوق 10^{11} جسيمة ثانوية من أجل طاقة ابتدائية تقدر 10^{20} eV عمليا مستحيل تتبع كل هذه الجسيمات ولهذا اعتمد على تقنية أخذ عينات مناسبة لغرض التخفيض من عدد الجسيمات في المحاكاة ما يسمى بخوارزمية التخفيف (للتفصيل و التوضيح أكثر راجع المرجع [36]).

❖ الجسيمات المعتبرة في المحاكاة هي :

الفوتونات، الالكترونات، البوزيترونات، الميونات والبيونات، الكاونات، النيكلونات، ضد النيكلونات و أنوية (إلى غاية $Z = 36$) بالإضافة إلى جسيمات النوترينو الالكتروني و الميوني. الجسيمة الابتدائية يمكن أن تكون أي واحدة من الجسيمات المذكورة أعلاه بطاقة تتراوح بين 1 GeV إلى 1 ZeV ومن الممكن أيضا محاكاة شلالات ناتجة عن جسيمات خاصة (كالنوترينو ..) عن طريق نداء وحدة خارجية (The External Executable Module).

❖ العمليات:

لقد أخذ مولد AIRES بعين الاعتبار كل العمليات الأكثر أهمية (أكثر احتمالية) التي قد تمر بجسيمات الشلال:

- عمليات الإلكتروديناميك : إنتاج وإخماد الزوج ($e-e^+$)، عملية الكبح ($e-e^+$ ، الميونات) بالإضافة إلى عملية كوميتون .

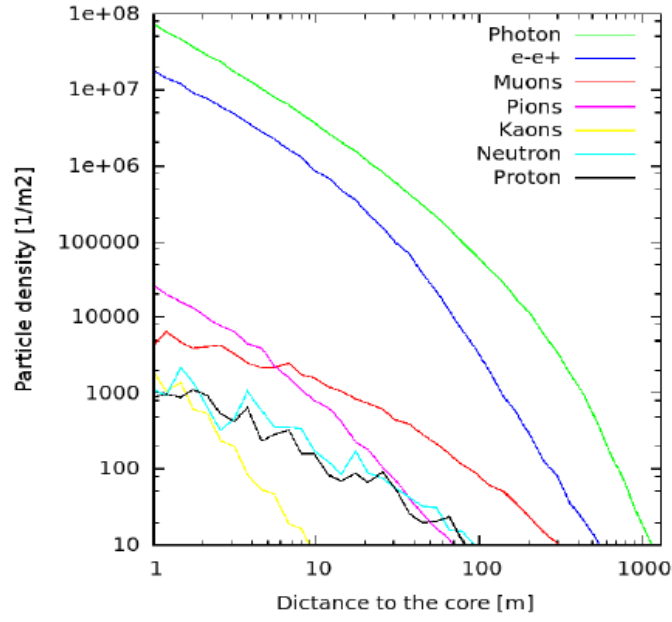
- تفكك الجسيمات الغير المستقرة : على سبيل المثال تفكك الليونات، الميونات

- عمليات الهادر ونية : اصطدام الهادرون-نواة و اصطدام الغير مرن فوتون-نواة، عموما في المحاكاة تطبق وحدة خارجية لنموذج التفاعل الهادروني القوي (SIBYLL، QGEJET)[38]، من اجل الطاقات العالية أو من قبل خوارزمية داخلية (EHSA) لطاقات المنخفضة بالإضافة إلى ذلك عملية التجزؤ النووي المرن و الغير مرن.
- انتشار الجسيمات المشحونة وما تخلفه من ضياع الطاقة في الوسط (التأين)، تبعثر كولون المتضاعف .

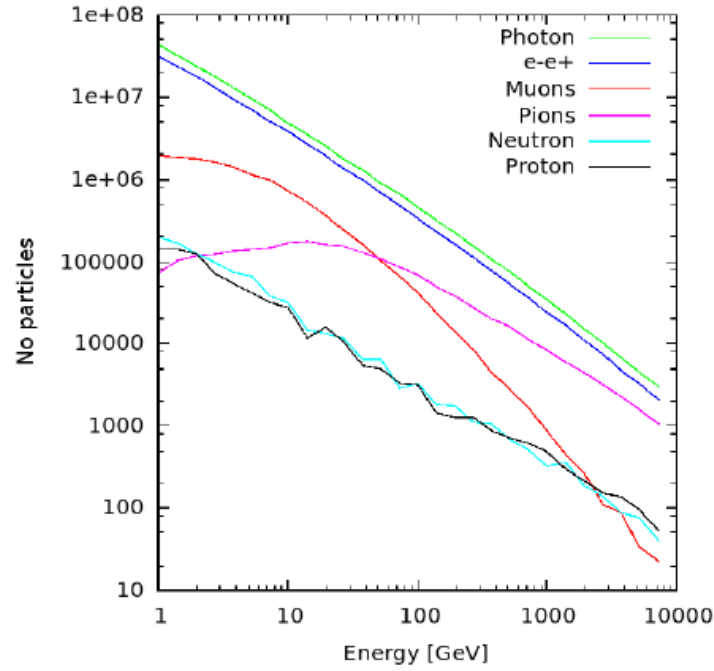
❖ بعض النتائج المتحصل عليها

هناك العديد من الكميات التي تعرف الشروط الأولية أو بيئية الشلال الهوائي على سبيل المثال هوية الجسيمة الابتدائية طاقتها ، موقعها على سطح الأرض، نموذج الغلاف الجوي وكذا الطاقة الدنيا للجسيمات التي يجب أن تأخذ في الحسبان وغيرها ،كما من الممكن لمولد AIRES التعريف الكثير من البيانات والملاحظات نذكر منها التطور الطولي، التوزيع الجانبي وتوزيعات الطاقة. من خلال بعض الأمثلة يمكن تقييم جملة من النتائج الخاصة بالشلال الهوائي فمثلا التوزيعات الجانبية لمختلف الجسيمات تصل تركيزها إلى قيم كبيرة بالقرب من قلب الشلال ثم تتناقص كلما ابتعدنا أكثر عنه فالوثيقة III-29 تصور سلوك التوزيع الجانبي لجسيمات غاما، (e^+e^-) ، البيونات و الكاونات المشحونة، النوترون و البروتون الناتجة عن اصطدام بروتون بالغلاف الجوي على ارتفاع $10km$ طاقته $5 \times 10^{18} eV$. نلاحظ أن مكون الكهرومغناطيسي (فوتون ، e^- ، e^+) الأكثر أهمية في العدد و في نفس الوقت ينتشر على نحو واسع من قلب الشلال أما مكون البروتون و النوترون يتركز في منطقة ضيقة نسبيا حول محور الشلال الهوائي.

أما فيما يخص توزيعات الطاقة لمختلف الجسيمات الثانوية موضحة في الوثيقة III-30 ، حيث تظهر جيدا أن كلما كانت الطاقة اكبر قلت عدد الجسيمات فمثلا نلاحظ ان الجسيمات التي تحمل طاقة من رتبة GeV تتواجد بأعداد على خلاف الجسيمات التي تحمل طاقة من رتبة TeV وهذا المنطقي لأن الجسيمات الثانوية تفقد طاقتها خلال انتشارها في الغلاف الجوي.



الوثيقة III-29: التوزيع الجانبي لمختلف الجسيمات الثانوية الناتجة عن اصطدام بروتون عموديا بالغلاف الجوي طاقته $5 \times 10^{18} \text{ eV}$ حيث نسبة التخفيف 10^{-6} (النتائج المحصل عليها هي معدل 100 شلال هوائي)¹².



الوثيقة III-30: التوزيع الطاقوي لمختلف الجسيمات الثانوية على سطح الأرض بنفس الشروط الابتدائية السابقة.

¹² تم الحصول على هذه الرسومات ببرنامج Gnuplot .

III.3.1. ملف المعطيات (Input File)

إن مولد Groke يضم ملف المعطيات Groke.inp يحتوي هذا الأخير على مجموعة من الوسائط الفيزيائية التي تسيطر على المحاكاة.

Groke.inp

BLACK HOLE PARAMETERS

Fundamental Scale (TeV or GeV)

Mstar 1.0 TeV

Number of extra dimensions

Nextradim 6

Gravitational loss at black hole formation

0{> No

1{> Yes

Gravitonloss 1

Gravitational loss model

0{> Yoshino-Nambu model

1{> Yoshino-Rychkov model

Gravitonlossmodel 1

Minimum black hole mass at formation

Minbhmass 2.0

Quantum black hole mass threshold at evaporation

Minevapmass 1.0

Number of final quanta

Finaldecay 2

Momentum transfer model in parton collision

1{> Black hole mass

2{> Schwarzschild radius

Momtransfer 2

Conservation of EM Charge

0{> No

1{> Yes

Emcharge 1

Minimum length parameter alpha

Minlength 0.

SHOWER PARAMETERS

Primaryparticle blackhole

Primaryenergy 10.0 EeV

Totalshowers 1

Primaryzenangle 70 deg

Primaryazimangle 0 deg

Injection 10 km

Observinglevels 200

Site elnihil

Thinning 1E-5 Rel

Thinningwf 20.

Specialparticlog 2

Propagateprimary Off

Threshold energies. Particles are not followed below these energies.

Gammacutenergy 100 KeV

Electroncutenergy 100 KeV

Muoncutenergy 1.0 MeV

Mesoncutenergy 1.5 MeV

Nuclcutenergy 150 MeV

Some model-dependent parameters.

Electronroughcut 0.1 MeV

Gammaroughcut 0.1 MeV

The seed of the random number generator is set manually.

Randomseed 0.3933112912

Aires tables to be exported

Airestable 1205

Airestable 1207

Airestable 2205

Airestable 2207

كما هو ملاحظ فإن الملف يضم وسائط الثقوب الأسود أي التي تتعلق بتشكيل و تفكك الثقوب الأسود المجري بالإضافة إلى ذلك وسائط الشلالات الهوائية بمعنى آخر الوسائط التي تحدد لنا الشروط الابتدائية والبيانات التي نسعى الحصول عليها من خلال المحاكاة (Data Output)[41].

الخصائص الرئيسية لمولد مونتني كارلو المستعملة في محاكاة فيزياء الثقوب السوداء المجهرية محددة بالمفاتيح التالية :

1. كتلة بلانك الاساسي M_* :

لقيود تجريبية استثنى قيم الأقل من 1 TeV وأما القيم الكبيرة جدا لا تسمح بتشكيل الثقوب في الغلاف الجوي.

2. عدد الأبعاد الإضافية الكبيرة n :

إن معظم النماذج حصرت الأبعاد الإضافية بين $3 \leq n \leq 7$ في حين نموذج RS لم يعتبر في برنامج Groke.

3. نموذج تشكل الثقوب و المقطع الفعال :

يتضمن المولد ثلاثة نماذج: القرص الأسود (نموذج لا خسارة تجاذبية) وكلا من نموذج الخسارة التجاذبية YN و YR.

4. كتلة الثقب الأسود الدنيا للتشكل $M_{\min}$: من رتبة M_* .

5. عتبة كتلة الثقب الأسود الكمية لتفكك $Q_{\min}$: حيث تعرف بكتلة الثقب في نهاية مرحلة هوكينغ تقدر بـ $1TeV$.

6. عدد الجسيمات الكمية np : يسمح المولد باختيارين مختلفين لمرحلة النهائية لثقوب السوداء ، فمن أجل $np = 0$ تنتهي مرحلة هوكينغ ببقية مستقرة كتلتها $Q_{\min}$ وإذا $np = 1, \dots, 18$ فإن الثقب ينتهي إلى عدد np من الجسيمات الكمية حيث مركز ثقل الجملة يساوي $Q_{\min}$.

7. انحفاظ الشحنة الكهربائية في عملية التفكك: الغرض من هذا المفتاح ان يسمح بوجود شحنة للبقية المستقرة حيث إذا كانت الشحنة غير منحنة و $np = 0$ فإن البقية المستقرة تحمل شحنة Q_R^{13} حيث $Q_H + Q_N = 1 - Q_R$ أين Q_H :مجموع شحنة إشعاع هوكينغ ، Q_N :شحنة بقية البروتون

أما إذا كانت الشحنة منحنة و $np = 0$ فإن البقية المستقرة لثقب تفترض أنها متعادلة كهربائيا ($Q_R = 0$) و

$$Q_N = 1 - Q_H \text{ أين } |Q_H| < \frac{2e}{3}.$$

8. نموذج تحول كمية الطاقة في اصطدام Parton لها اختياران : إما M_* أو مقلوب نصف قطر

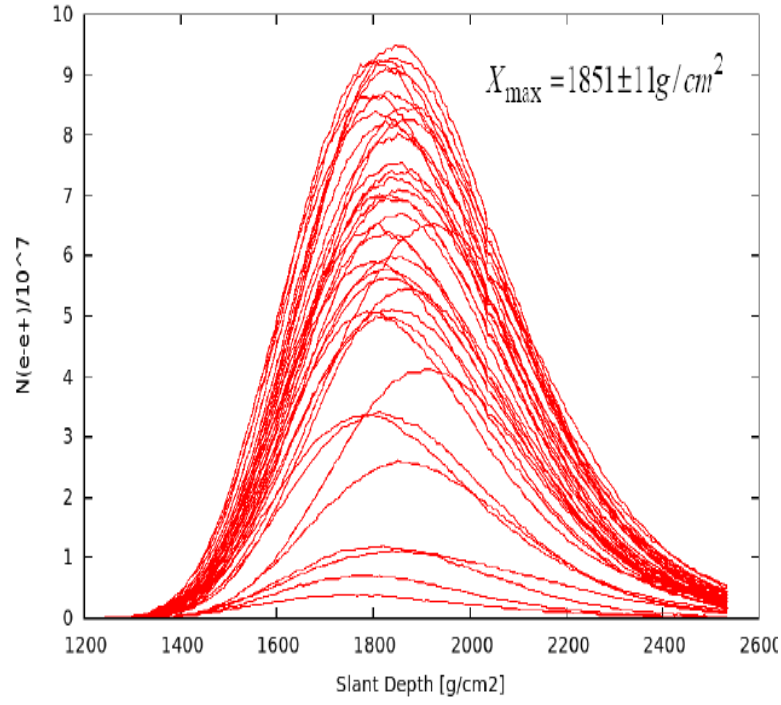
$$Schwarzschild (R_s^{-1}).$$

9. طول الأدنى l_m : حضوره يؤثر على تطور الثقب في مرحلة هوكينغ، حيث إذا ما كان طول الأدنى معدوم يتفكك الثقب الأسود وفق النظرية هوكينغ بدلا عن ذلك يمضي تطوره وفقا لديناميكا الحرارية.

¹³الشلال الهوائي لبقية مستقرة تحمل شحنة لم يعرف و غير واضح كيف سيكون تطوره في الغلاف الجوي.

وكما سبق الذكر أن مخلفات و نواتج تفكك الثقوب السوداء المجهرية (نواتج برنامج PYTHIA) في الغلاف الجوي تحقق في مولد الشلالات الهوائية AIRES ليتحصل في الأخير على شلال هوائي، يضم المولد كذلك على عدة وسائط و المفاتيح الهامة التي تحدد شروط محاكاة الشلال الهوائي منها :

1. طاقة جسيمة النوترينو .
 2. زاوية الرأسية .
 3. زاوية سمت .
 4. العدد الكلي لشلالات .
 5. نقطة بداية الشلال الهوائي .
 6. عدد المستويات الملاحظة .
 7. موقع الملاحظة لتحديد الحقل الجيومغناطيسي وقيمة الارتفاع على سطح البحر .
 8. مقدار التخفيف .
 9. طاقة عتبة الفوتونات ،الالكترونات ،الميونات و الميزونات .
 10. طاقة عتبة (تقريبية) لإنتاج الفوتونات و الالكترونات .
- لقد تنوعت البيانات التي يمكن أن تسجل بمحرك المحاكاة لتشمل مختلف الجوانب فمنها التوزيع الطاقوي على سطح الأرض ،التطور الطولي لشلال وكذا طاقة مختلفة الجسيمات التي تعبر كل مستوي ملاحظ هذه البيانات معطاة في شكل جداول يشار إليها بدليل (راجع الملحق A) ، فمثلا التطور الطولي لجسيمات الثانوية ($e-e^+$) في شلال الثقب الأسود المجهرى الناتج عن اصطدام جسيمة النوترينو بالغلاف الجوي على ارتفاع 7km طاقته 10^{19}eV . الشلال يبدأ في التطور حيث عدد الجسيمات الثانوية تتزايد لتصل إلى الحد الأقصى (N_{max}) ثم تتناقص بعدها كما هو مفصل فيه في الفصل الأول، هذا السلوك المميز موضح في الوثيقة III -31:



الوثيقة 31-III: التطور الطولي لجسيمات (e^-e^+) في شلال الثقب الأسود المجهرى الناتج عن اصطدام نوترينو بالغلاف الجوي على ارتفاع 10 km عن سطح البحر طاقته 10^{19} eV حيث الزاوية الرأسية $\Theta = 70^\circ$ ومعدل التخفيف 10^{-6} (النتائج هي معدل 100 شلال هوائي).

الفصل الرابع

النتائج ومناقشتها

إن الثقوب السوداء المجهرية يتوقع تفككها إلى كل أنواع الجسيمات لتتطور في الغلاف الجوي من خلال تفاعلها مع أنويته لتشكل ما يسمى بالشلال وكما سبق الذكر أن الشلال هو عبارة عن تراكب لمختلف الجسيمات الثانوية تتطور طبقا لتناظر اسطواني حول محور الشلال إلى أن تصل إلى الكواشف على سطح الأرض وهنا السؤال كيف هذه الشلالات ما هي خصائصها وكيف يمكن التفريق بينها وبين الشلالات العادية أي الناتجة عن اصطدام بروتون مع الغلاف الجوي (Benchmark Event).

في هذا الفصل نركز على محاكاة الشلالات الناتجة عن الأشعة الكونية العالية الطاقة وذلك من أجل ارتفاعات مختلفة قريبة من سطح الأرض و للتحقق من تفاصيل طبيعة الشلالات المتشكلة نستعمل برنامج AIRES مع التفاعل الهادروني القوي المطبق SIBYLL وبرنامج GROKE بالنسبة لشلالات الثقوب السوداء حيث نركز اهتمامنا عموما على التعدد الجزئي و الكلي للجسيمات على سطح الأرض والتي من الممكن أن تكون عامل لتفرقة بينهما. كما سيكون جزء من عملنا محاولة التحقق من إمكانية أن تكون ظاهرة Centauros لها علاقة بتفكك الثقوب السوداء المجهرية المتشكل من قبل التفاعل الضعيف لجسيمات النوترينو مع انوي الغلاف الجوي.

و النتائج المتحصل عليها نجعلها في سلسلة من الرسومات و نعلق عليها في الأخير لمناقشتها و من ذلك نقترح بعض التحسينات المحتملة لدراسات مستقبلية .

1.IV. محاكاة شلالات النموذج القياسي و مقارنة النتائج

مؤخرا هنالك أعمال كثيرة أجريت في مجال مقارنة شلالات النموذج القياسي و الثقوب السوداء والتي ساعدت كثيرا في تحسين النتائج [40] وحسب ما له علاقة مباشرة مع الجانب الذي أردنا الغوص فيه و استعراضه نركز على هاتين النقطتين :

❖ الأولى هي انه من المسلم به أن العامل الأساسي و الحاسم لتفريق بين الشلالات الهوائية يستند إلى الاختلاف الحاصل في المرحلة الأخيرة من تطور الشلال أو بمعنى آخر التعدد الجسيمات على سطح الأرض (مستوى الكاشف).

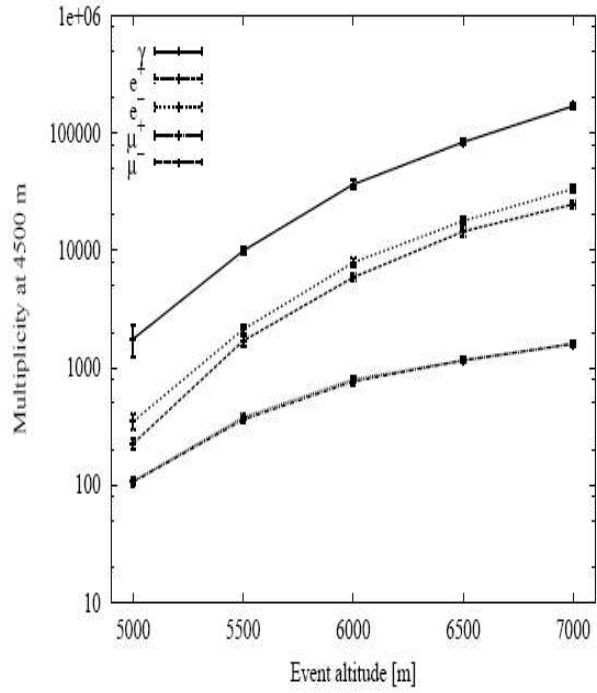
❖ أما الثانية تكمن في المحاكاة التي تصور وتبين لنا جليا ما مدى الفرق الجوهرى في كيفية توزيع تعدد الجسيمات من اجل مختلف قيم الطاقة.

تحليلنا هنا فقط يقدم محاولة أولية لمقارنة نتائج تعدد الجسيمات لشلالات النموذج القياسي على ارتفاعات مختلفة بواسطة تقنية المحاكاة بالبرنامج AIRES مع نتائج محاكاة برنامج CORSIKA بهدف تصفح و معايرة برامج محاكاة الشلالات الهوائية.

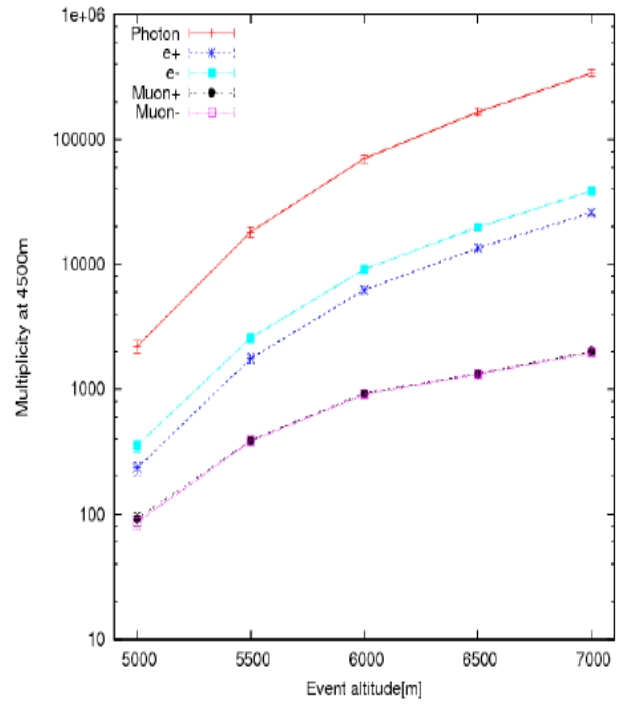
في هذه المحاكاة نعتبر جسيمة ابتدائية (بروتون) طاقتها $10^{15} eV$ حيث الزاوية الرأسية معدومة أي اتجاه الشلال عموديا على سطح الأرض (سطح الكاشف) وهذا للتبسيط، لأن الهدف هو وصف الميزات الرئيسية لشلالات في أبسط حالة ، حيث تم تتبع الجسيمات ذات الطاقة الأكبر أو تساوي $100 KeV$ بالنسبة الفوتونات ، الالكترونات والبوزيترونات ، أما فيما يخص طاقة الميونات، الميزونات و النيكلونات فهي $1 MeV, 1.5 MeV, 150 MeV$ على الترتيب مع معدل التخفيف 10^{-6} وقد حدد الحقل الجيومغناطيسى على جبل Pamir وجبل Chacaltaya.

تم تنفيذ المحاكاة من اجل قيم مختلف من الارتفاعات ($5500 m - 6000 m - 6500 m$ و $7000 m$)¹³ و النتائج موضحة في الوثيقتين IV-32 و IV-33 (النتائج لمعدل 100 شلال هوائي).

¹³الارتفاع معطى دائما بالنسبة إلى مستوى سطح البحر.

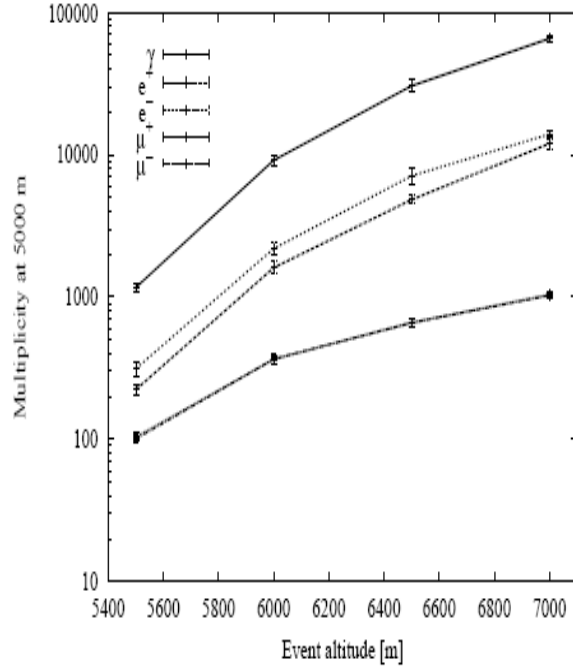


(ب)

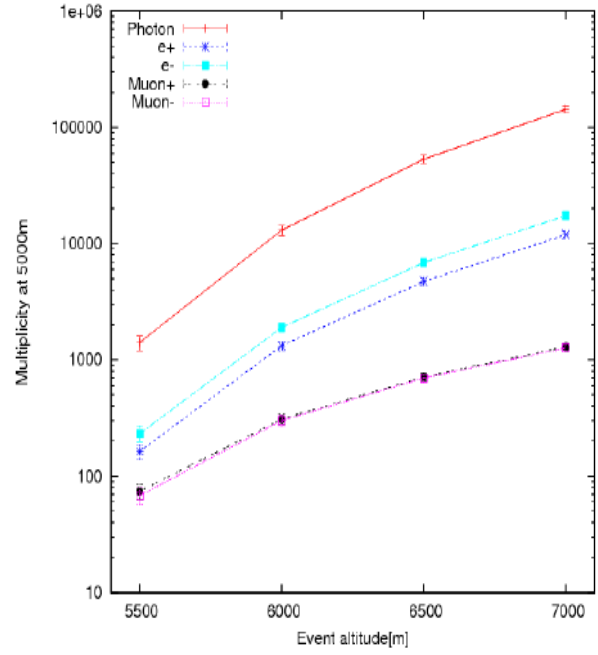


(أ)

الوثيقة IV-32: التعداد الجزئي لشلال النموذج القياسي (Benchmark) بدلالة ارتفاع التفاعل الابتدائي على سطح جبل Pamir أي على ارتفاع 4500 m حيث طاقة الابتدائية 10^{15} eV : (أ) نتائج محاكاة برنامج AIRES (ب) نتائج محاكاة برنامج CORSIKA [40].



(ب)



(أ)

الوثيقة IV-33: التعدد الجزئي لشلال النموذج القياسي (Benchmark) بدلالة ارتفاع التفاعل الابتدائي للبروتون على سطح جبل Chacaltaya أي على ارتفاع 5000 m حيث طاقة الابتدائية $10^{15} eV$: (أ) نتائج محاكاة برنامج AIRES، (ب) نتائج محاكاة برنامج CORSIKA [40].

توضح الوثيقة IV - 32 و IV-33 تغير تعدد الجسيمات الثانوية لشلال (الفوتونات، الالكترونات، البوزونات و الميونات المشحونة) بدلالة ارتفاع التفاعل الابتدائي بواسطة كلا من برنامج AIRES و CORSIKA فيتضح أن الفوتونات أكثر تعدادا على سطح الأرض في الحالتين و من اجل مختلف الارتفاعات إلا أن ما توضحه الرسومات أن هناك اختلاف بسيط في نتائج AIRES عن نتائج CORSIKA يمكن أن يفسر ذلك انه نتيجة الاختلاف الحاصل بين البرنامجين في حد ذاتهما فنجد مثلا أن برنامج AIRES يضمن لجسيمات الشلال بيئة واقعية بمعنى يأخذ في الحسبان خاصية تقوس الأرض و الحقل المغناطيسي على غير ذلك برنامج CORSIKA [39]، بالإضافة أن هذا الأخير يطبق التفاعل الهادروني القوي SIBYLL نسخة 1.6 أما برنامج AIRES فالنسخة 2.1 مما يؤدي بالدرجة الأولى إلى تقصي أخطاء و اختلافات في الشلالات الهوائية زيادة على ذلك وكما اشرنا سابقا أن مثل هذه البرامج ليست ضرورية فقط لتوقع تدفق الجسيمات بدقة لكن يلعب دورا مهم أيضا في تحليل البيانات المأخوذة من التجارب الشلالات الطاقات العالية جدا و العكس صحيح فنجد أن برنامج AIRES يعتمد على نتائج مرصد Auger في حين برنامج المحاكاة CORSIKA يستند على نتائج المرصد KASCADE.

IV. 2. محاكاة شلالات الثقوب السوداء المجهرية ومقارنة النتائج

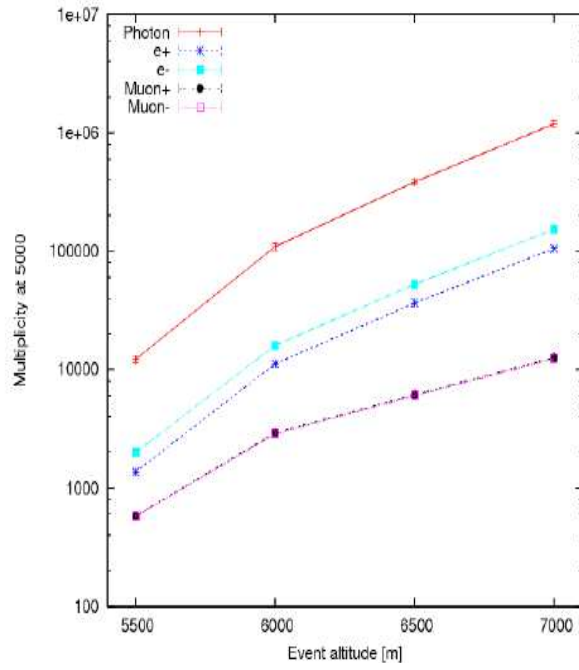
الجزء الثاني من تحليلنا يتركز حول نتائج تأثير مقطع الفعال على نتيجة تعدد الجسيمات الثانوية لشلالات و ذلك من خلال دراسة التعدد الجزئي و الكلي للجسيمات على مستوى سطح الأرض بدلالة الطاقة الابتدائية لنوترينو (المشكل لثقب الأسود المجهرى) و للبروتون. ولتوضيح أكثر فان دراستنا تمت بمحاكاة شلالات النموذج القياسي (Benchmark) كمجموعة أولى أما المجموعة الثانية تتمثل في محاكاة شلالات الثقوب الأسود على نفس الارتفاع و بنفس الطاقة.

وكما سبق الذكر أن شلالات النموذج القياسي شلالات الهادر ونية تحدث في المستويات العالية من الغلاف الجوي و تظهر الشلالات العميقة فقط لشلالات الناتجة عن تفاعل جسيمات النونرينو مع أنوية الغلاف الجوي ولهذا نفترض في المحاكاة أن الثقوب المجهرية تتشكل في الجزء الأسفل للغلاف الجوي الغير بعيد عن مستوى الكاشف في حين المناقشة سوف لن تعتمد على تفاصيل سيناريوهات تشكل و تفكك الثقوب المجهرية لأن الميزات الرئيسية لشلالات مستقلة تماما عن هذه التفاصيل[40].

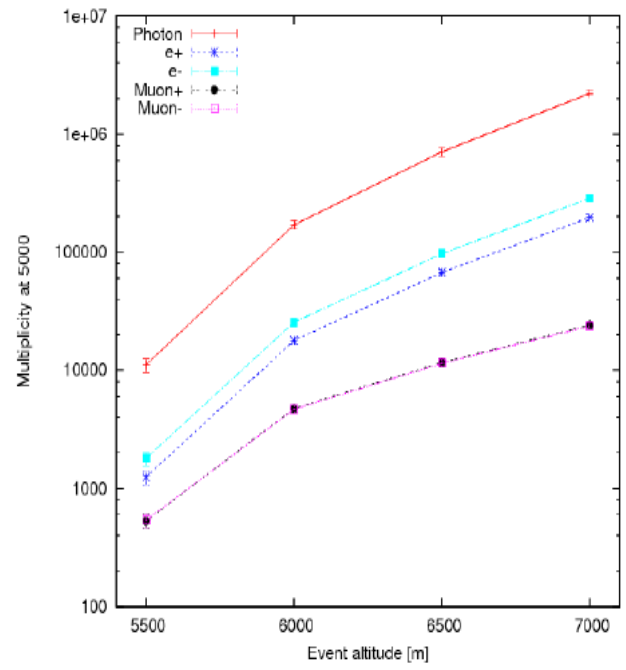
لمقارنة شلالات الثقوب الأسود و شلالات النموذج القياسي تم اختيار وسائط الثقوب الأسود استنادا على نماذج و دراسات سابقة، حيث كتلة بلانك الأساسي $M_* = 1TeV$ ، كتلة الدنيا لثقب $M_{min} = 1TeV$.

و الأبعاد الإضافية الكبيرة ($n = 6$)، عتبة كتلة الثقوب الأسود الكمية $Q_{min} = 1TeV$ وعدد الجسيمات الكمية $np = 2$ مع انخفاض الشحنة الكهربائية أما طول الأدنى $l_m = 0$ ، و بالنسبة لنموذج تشكل الثقوب و المقطع الفعال نعتبر نموذج الخسارة الجاذبي YR، فيما يتعلق بشلالات البروتون فبنفس شروط المحاكاة السابقة و بما أن نتائج المحاكاة على جبل Pamir و Chacaltaya لا تختلف عموما ولهذا نكتفي بإجراء المحاكاة على جبل Chacaltaya .

نستهل الدراسة بالتركيز على التعدد الجزئي و الكلي لجسيمات الشلالات (الثقوب الأسود و النموذج القياسي) بدلالة ارتفاع الاصطدام الابتدائي من أجل طاقة ابتدائية $10^{17} eV$ حيث النتائج موضحة في الوثائق IV-34 و IV-35.

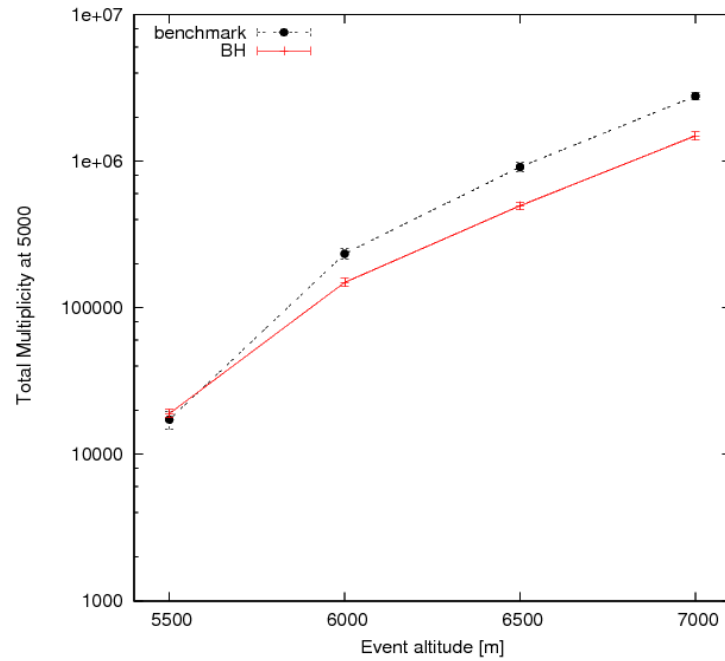


(ب)



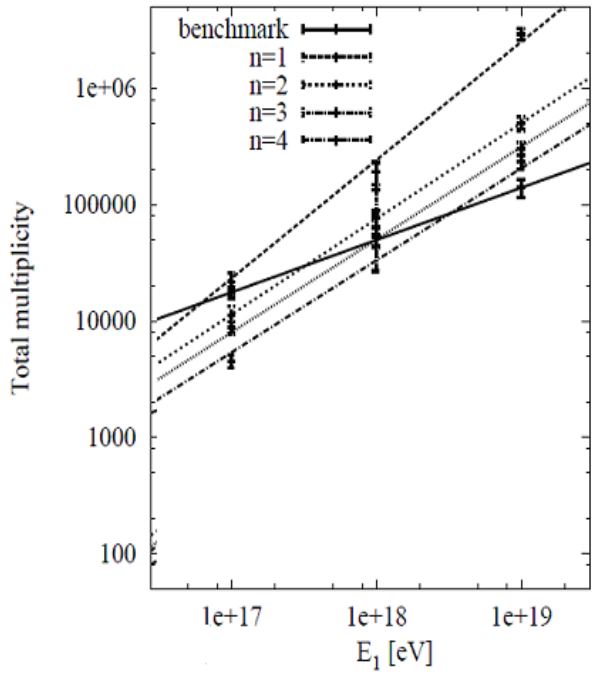
(أ)

الوثيقة IV-34: التعداد الجزئي لجسيمات الشلال على مستوى سطح جبل Chacaltaya (5000 m) بدلالة ارتفاع اصطدام الابتدائي حيث الطاقة الابتدائية 10^{17} eV : (أ) نتائج محاكاة شلالات النموذج القياسي (benchmark)، (ب) نتائج محاكاة شلالات الثقب الأسود (BH).

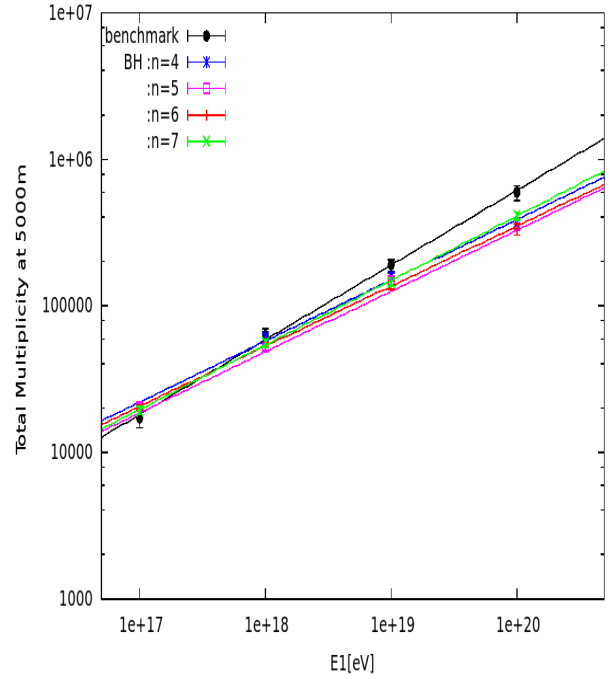


الوثيقة IV - 35: تغير التعداد الكلي لجسيمات الشلال على مستوى سطح جبل Chacaltaya (5000 m) بدلالة ارتفاع اصطدام الابتدائي حيث الطاقة الابتدائية 10^{17} eV : المنحنى المتقطع (الأسود) نتائج محاكاة شلالات النموذج القياسي بينما المنحنى الخطي (الأحمر) نتائج محاكاة شلالات الثقب الأسود.

يتبن من الوثيقة IV-34 أن السلوك العام للتعدد الجسيمات المختلفة (الفوتونات، الالكترونات والبوزيترونات، الميونات المشحونة) في شلالات الثقب الأسود (BH) يماثل شلالات النموذج القياسي، أين نلاحظ تزايد في تعدد الجسيمات كلما كانت نقطة الاصطدام الأول أبعد عن مستوى الكاشف، كما توضح الوثائق أن تعدد جسيمات شلال الثقب الأسود أقل برتبة 100 مقارنة مع تعدد الشلال النموذج القياسي من أجل مختلف قيم الارتفاع الابتدائي (7000 m - 6500 m - 6000 m)، والذي يفسر بالتطور السريع للشلال النموذج المعياري بعكس شلال الثقب الأسود، أما من أجل الارتفاع الأقل أو يساوي 5500 m نلاحظ أن تعدد جسيمات شلال الثقب الأسود أكبر من تعدد جسيمات الشلال النموذج المعياري كحالة غير عادية مقارنة مع مختلف الارتفاعات، ولهذا ارتأينا إلى التركيز على هذه الحالة (أي ارتفاع اصطدام الابتدائي يساوي أو أقل من 500m فوق المستوى الكاشف) ووضعها تحت المجهر من خلال تحليل تغيرها مع مختلف قيم الطاقة وعدد الأبعاد الإضافية دون إهمال الحالة قريبة من الواقع المتعلقة بشلالات النموذج القياسي فمن أجل بروتون طاقته كبيرة تفاعله مع الغلاف الجوي حتما ستحدث على ارتفاع كبير ومن أجل وقتنا ممكننا وتبسيطا نختار 15km متوسط الارتفاع، فكانت النتائج كما هي موضحة في الوثائق IV-36، IV-37 و IV-38.

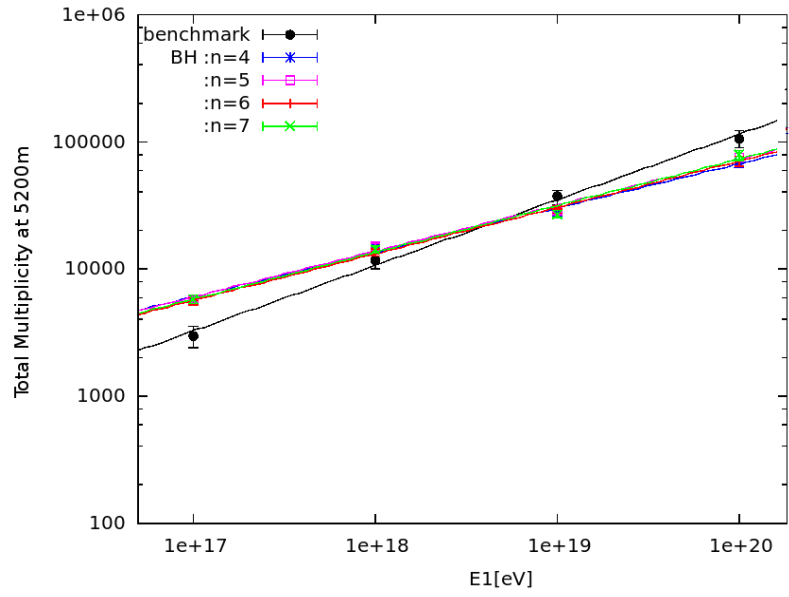


(ب)

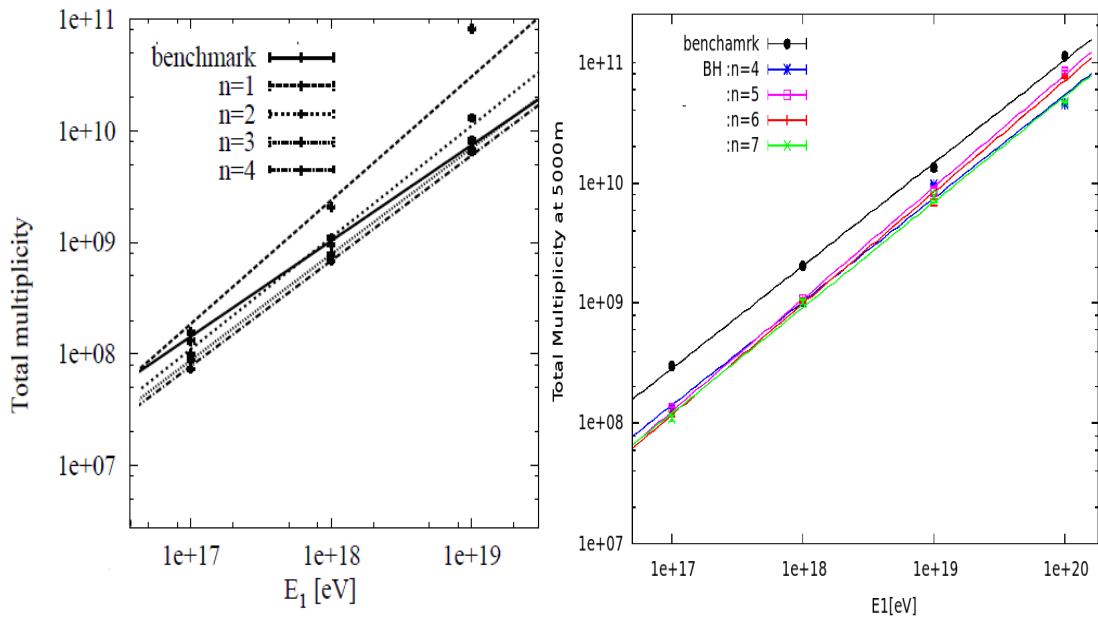


(i)

الوثيقة IV - 36: تمثل تغير التعدد الكلي لجسيمات الشلال الهوائي بدلالة الطاقة الابتدائية E_1 حيث الاصطدام الأول على ارتفاع 500m من سطح الكاشف: (أ) نتائج محاكاة برنامج GROKE، (ب) نتائج محاكاة برنامج CORSIKA [40].



الوثيقة IV-37: تمثل تغير التعدد الكلي لجسيمات الشلال الهوائي على مستوى سطح جبل Chacaltaya (5200 m)¹⁴ بدلالة الطاقة الابتدائية E_1 حيث الاصطدام الأول على ارتفاع 300m من مستوى سطح الكاشف.



الوثيقة IV-38: تمثل تغير التعدد الكلي لجسيمات الشلال الهوائي بدلالة الطاقة الابتدائية E_1 حيث الاصطدام الأول على ارتفاع 15000m من مستوى سطح الكاشف : (أ) نتائج محاكاة برنامج Groke، (ب) نتائج محاكاة برنامج CORSIKA [44].

تبين النتائج المتحصل عليها(بمحرك المحاكاة Groke) أن تعدد جسيمات شلالات الثقب الأسود اكبر من اجل الجزء الأدنى من مجال الطاقة، بينما يصبح أصغر من اجل الطاقات العالية مهما كانت عدد الأبعاد الإضافية

¹⁴ارتفاع مختبر Chacaltaya بشكل أكثر دقة .

هذا بالنسبة إلى حالة التفاعل الابتدائي القريب من مستوى الكاشف، على خلاف ذلك بالنسبة لنتائج برنامج CORSIKA (الوثيقة IV-36(ب)) فإن تعدد جسيمات شلالات الثقب الأسود أكبر من أجل الطاقات العالية، أما في حالة التفاعل الابتدائي البعيد عن مستوى الكاشف فإن تعدد جسيمات شلالات الثقب الأسود أقل من أجل كل قيم الطاقة الابتدائية لأجل كلا من نتائج المحرك Groke و CORSIKA ، هذا التحليل لم يخصص لكل أنواع الجسيمات الثانوية منفصلاً لكن لهم نفس سلوك مع التعدد الكلي .

يمكن إسناد الاختلاف بين النتائج إلى نموذج الأبعاد الإضافية المعتمد حيث أن نموذج المحرك CORSIKA أهمل الأبعاد الإضافية الطولية على عكس ذلك بالنسبة إلى محرك Groke.

إذا بالمقارنة أكثر واقعية نكتشف أن الثقب الأسود والنموذج القياسي يجب أن يختلفا بشكل ملحوظ أكثر و التعدد الكبير لشلالات الثقب الأسود يسيطر عليه تفاعل الهدروني النموذجي وهذا ما يبرر التعدد الكبير المنتج على مستوى سطح الأرض .

الميزة الأخرى لتعدد الجسيمات الثانوية تبين في الوثيقة IV-36، IV-37 و IV-38 حيث تمثل رسم لوغاريتمي مضاعف لتعدد الكلي لجسيمات الشلال بدلالة الطاقة الابتدائية في المجال $[10^{17} \text{ eV} - 10^{20} \text{ eV}]$ التي تبدو خطية و يمكن أن توصف بالعلاقة من الشكل :

$$y = mx + q \quad (80 - IV)$$

$$\text{أين } y = \log(N) \text{ و } x = \log(E_1)$$

$$N(E) = 10^q E_1^m \quad (81 - IV) \quad \text{ليوافق بذلك :}$$

حيث الميل m و الاعتراض q في حالة الاصطدام الابتدائي على ارتفاع $500m$ عن مستوى الكاشف يأخذان القيم (الوثيقة IV-36):

$$\text{Benchmark : } m = 0.510117 \pm 0.01162; \quad q = -4.41512 \pm 0.2154$$

$$\text{BH : } m(n=4) = 0.415251 \pm 0.01589; \quad q = -2.7158 \pm 0.2945$$

$$: m(n=5) = 0.417783 \pm 0.006503; \quad q = -2.79039 \pm 0.1205$$

$$: m(n=6) = 0.409733 \pm 0.01218; \quad q = -2.65164 \pm 0.2258$$

$$: m(n=7) = 0.439838 \pm 0.00638; \quad q = -3.18458 \pm 0.1182$$

وأما الميل m و الاعتراض q في حالة الاصطدام الابتدائي على ارتفاع $300m$ عن مستوى الكاشف يأخذان القيم (الوثيقة IV-37):

$$\text{Benchmark : } m = 0.515516 \pm 0.02284; \quad q = -5.25233 \pm 0.4167$$

$$\text{BH : } m(n=4) = 0.348847 \pm 0.01639; \quad q = -2.15015 \pm 0.3037$$

$$: m(n=5) = 0.361235 \pm 0.02022 ; \quad q = -2.36229 \pm 0.3748$$

$$: m(n=6) = 0.364795 \pm 0.006049 ; \quad q = -2.44917 \pm 0.1129$$

$$: m(n=7) = 0.367515 \pm 0.02505 ; \quad q = -2.48609 \pm 0.4642$$

حيث الميل m و الاعتراض q في حالة الاصطدام الابتدائي على ارتفاع $15000m$ عن مستوى الكاشف يأخذان القيم (الوثيقة IV-38):

$$\text{Benchmark} : m = 0.854355 \pm 0.0176 ; \quad q = -6.0663 \pm 0.3264$$

$$\text{BH} : m(n=4) = 0.860197 \pm 0.04266 ; \quad q = -6.47058 \pm 0.7906$$

$$: m(n=5) = 0.931588 \pm 0.01519 ; \quad q = -7.73354 \pm 0.2815$$

$$: m(n=6) = 0.925456 \pm 0.0231 ; \quad q = -7.66084 \pm 0.4281$$

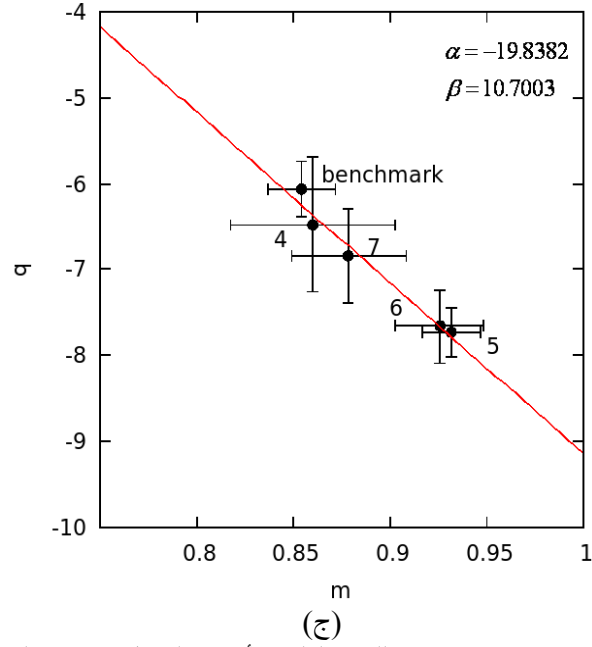
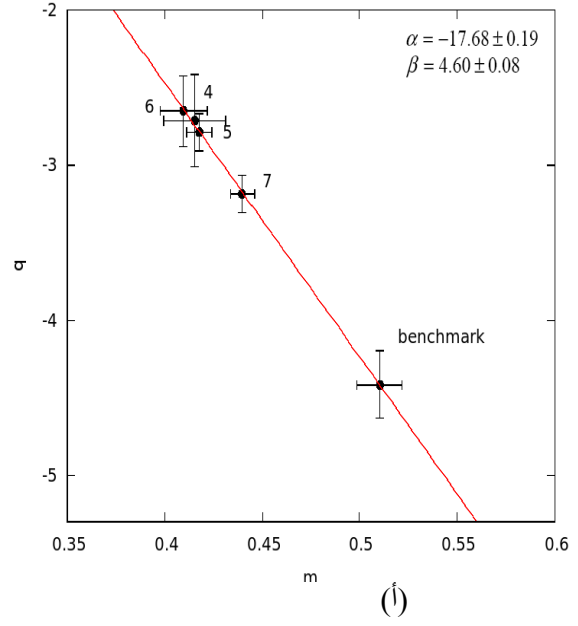
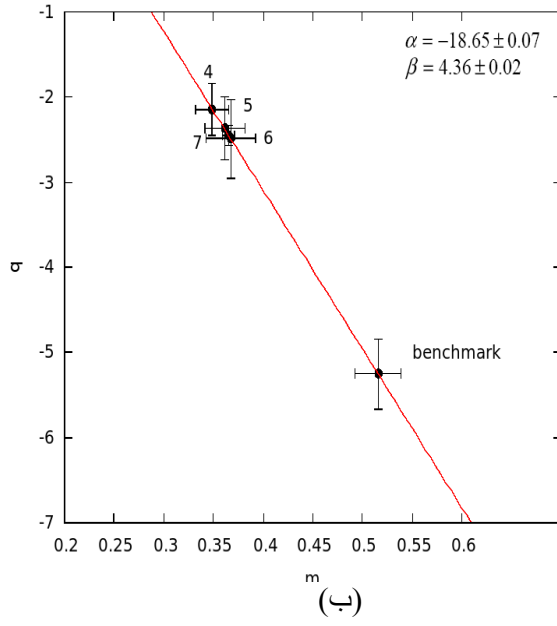
$$: ; m(n=7) = 0.878376 \pm 0.02961 \quad q = -6.84736 \pm 0.5487$$

تبين النتائج أن الميل بالنسبة لشلالات النموذج القياسي أكبر من شلالات الثقب الأسود وأما الاعتراض فاصغر وهذا من أجل مختلف الارتفاعات ($10000m-300m-500m$) كما تشير إلى ميزة أخرى لتعدد الجسيمات من أجل ارتفاع اصطدام الأول معطى هي أن الثنائية (q, m) تتغير بشكل خطي ومستقل عن الأبعاد الإضافية كما هو موضح في الوثيقة IV-39 حيث تبين بشكل واضح العلاقة بين الميل و الاعتراض :

$$q = \alpha m + \beta \quad (82 - IV)$$

مع α و β نموذجيا لا تتعلق بعدد الأبعاد الإضافية فعلى سبيل المثال في حالة الاصطدام الابتدائي على ارتفاع $500m$ عن مستوى الكاشف نحصل على $\alpha = -17.68 \pm 0.19$ و $\beta = 4.60 \pm 0.08$ إذن نستنتج أن تعدد جسيمات شلالات الثقب الأسود بالشكل:

$$N_{ground} = 10^{\alpha m + \beta} E_1^m \quad (83 - IV)$$



الوثيقة IV-39: تمثل الميل m و الاعتراض q للتعدد الكلي. الأعداد على كل نقطة في الوثيقة تشير إلى قيمة الأبعاد الإضافية: (أ) نتائج تعدد الجسيمات في حالة اصطدام الابتدائي على ارتفاع $500m$ عن مستوى الكاشف، (ب) نتائج تعدد الجسيمات في حالة اصطدام الابتدائي على ارتفاع $300m$ عن مستوى الكاشف، (ج) نتائج تعدد الجسيمات في حالة اصطدام الابتدائي على ارتفاع $10000m$ عن مستوى الكاشف.

3.IV. ظاهرة Centauros (CLEs)

في عام 1972 تم رصد ولأول مرة أحداث غريبة في الأشعة الكونية بواسطة تجارب الغرف الحساسة) تتحرى تفاعلات القوية للأشعة الكونية كما اشرنا سلفا في الفصل الأول) وقد سميت بـ Centauros بسبب خصائصها الغريبة و الغير عادية ، طبقا للأساطير الإغريقية فإن Centauros هو مخلوق نصفه الأعلى رجل و نصف الآخر حصان.

ظاهرة Centauros تمثل أحداث غير عادية لوحظت على مستوى تجارب الأشعة الكونية العالية الطاقة على جبال Chacaltaya و Pamir بينما لم تلاحظ حتى الآن في جبال Kanbala و Fuji، هي تجارب مماثلة لتلك بدأت العمل. أما فيما يتعلق بالنتائج التجريبية التي سجلتها كلا من مخابر Chacaltaya و Pamir تشير إلى وجود عدة أنواع¹⁵ من هذه الظاهرة حيث الميزات الرئيسية لها يمكن تلخيصها في نقاط التالية:

1. سمحت عملية إعادة البناء التخمين أن التفاعل الابتدائي يكون على ارتفاع قريبة من الكاشف (من العشرات إلى مئات الأمتار عن مستوى الكاشف) مما يشير إلى أن الجسيمة الكونية استطاعت اختراق الغلاف الجوي بعمق.
 2. هيمنة الهادرونات بشكل شاذ بالنسبة إلى التعدد و المحتوى الطاقوي بمعنى آخر أن نسبة بين المركبة الكهرومغناطيسية والملاحظة والمركبة الهادرونية صغيرة بشكل غير عادي وهذا ما يدل بان هناك عدد قليل من البيونات المحايدة المنتجة في الاصطدام.
 3. متوسط العزم العرضي للجسيمات المنتجة اكبر بكثير من تلك الملاحظة في التفاعلات العادية¹⁶ حيث : بالنسبة لـ Centauros فلقد سجل عزم العرضي يصل $P_T = 1.7 \text{ GeV} / c$ في حين $P_T = 10 - 17 \text{ GeV} / c$ فيساوي Chiron¹⁷.
 4. ظاهرة Centauros ملاحظة في مجال الطاقة العالية جدا أين عتبة الطاقة يفوق حوالي 1000 TeV كما لوحظ معدل الطاقة لـ 5 أحداث في جبل Chacaltaya حوالي 348 TeV .
 5. العدد الكلي للأحداث العالية الطاقة التي سجلت في الغرف الحساسة بجبل Chacaltaya و Pamir يقدر 600 حدث و بشكل خاص حوالي 7 % إلى 10 % هي عبارة عن ظواهر Centauros.
- إن حجم المعلومات المتوفرة بخصوص هذا الموضوع كبيرا جدا إلا انه يبقى السؤال التالي مطروح هل تتعلق ظاهرة Centauros بالظواهر التي لوحظت حقا أو هي نوع من الخطأ في النظام التجريبي.

¹⁵ قد صنف هذه الظاهرة إلى ثلاثة أنواع : Centauros Like Event ، Mini Centauros Event ، Chiron Event.

¹⁶ العزم العرضي للمكون الهادروني في الشلالات العادية بنفس الشروط يقدر $P_T \approx 400 \text{ MeV} / c$.

¹⁷ اسم احد الزعمائهم طبقا للأساطير الإغريقية.

كلا من الخصائص التجريبية و التنبؤات النظرية تشير إلى أن رصد و حدوث مثل هذه الظواهر الشاذة يستدعي دراسات في الفيزياء الجديدة في سياق التجارب الحالية و المستقبلية خاصة أمام عجز كل النماذج المعتمدة في وصف مثل هذه الظواهر لتظهر عدة تنبؤات أو نماذج نظرية لتفسير هذه الظاهرة نذكر منها نموذج الكرة النارية (Fireball Model) وفيزياء المادة الغريبة أو القوية (Strange Matter Physics) بالإضافة إلى نموذج تفكك الثقوب السوداء المجهرية هذا الأخير مرشح بقوة أن يكون أصل هذه الظواهر الكونية الغريبة (CLEs).

في الحقيقة أن لمحة سريعة لميزات ظاهرة CLEs تشير إلى أن اقتراح الثقوب السوداء المجهرية واعد والأكثر من الأفكار الأخرى، على أية حال الدراسة التحليلية [43] تعتبر كخطوة أولى نحو تفسير و تحليل احتمالية انتسابهم إلى الثقوب السوداء ولذا لابد دعمها بتحليل عددي أكثر تفصيلا من خلال محاكاة إنتاج و تفكك الثقوب السوداء في الغلاف الجوي وهذا ما نود أن نركز عليه في دراستنا هذه والتحقق من الخصائص الرئيسية للظاهرة ومدى توافق ذلك بالنسبة للثقب الأسود المجهرية .

3.IV.1. النسبة بين المركبة الكهرومغناطيسية و المركبة الهادرونية

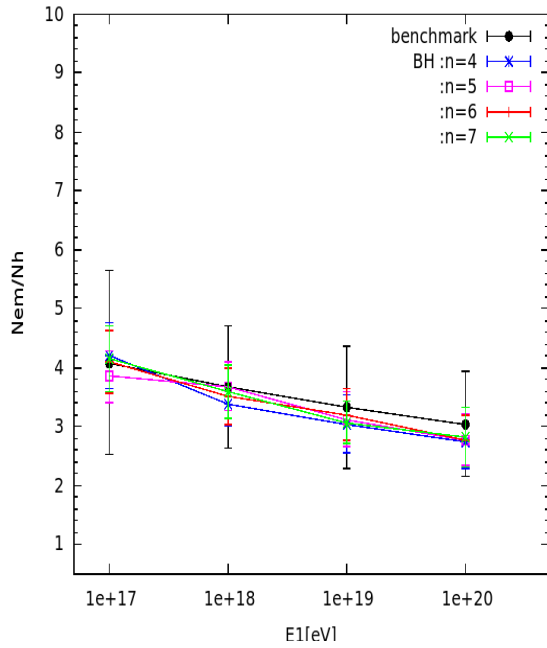
التركيز على نسبة المركبة كهرومغناطيسية إلى المركبة الهادرونية بدلالة طيف الطاقة كوسيلة لتمييز بين شلالات الثقب الأسود وشلالات النموذج المعياري من جهة، و من جهة أخرى لتحليل عددي

ظاهرة Centauros هذه الأخيرة التي تتميز بالنسبة $\frac{N_{em}}{N_h} \ll 1$ و $\frac{E_{em}}{E_h} \ll 1$ أي هيمنة الهادرونات

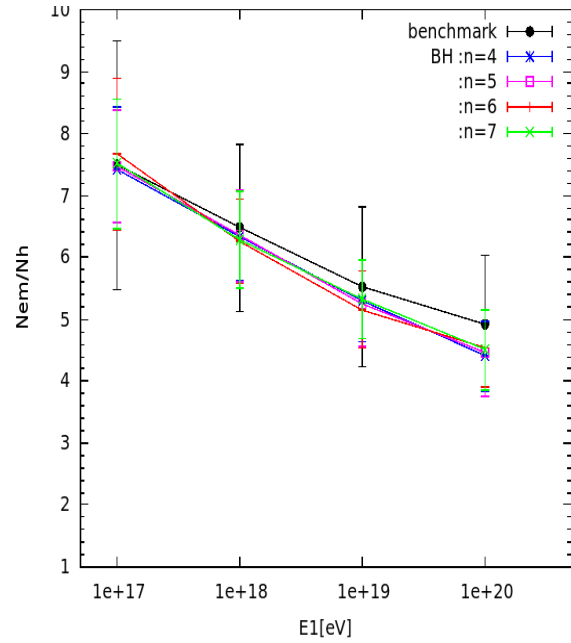
على عكس ذلك بالنسبة إلى الشلالات العادية، فكانت النتائج كما توضحه كلا من الوثيقة 40-IV و 41-IV.

يمكن بسهولة استنتاج من النتائج المقدمة في الوثيقة 40-IV أن نسبة التعدد من أجل النموذجين تأخذ القيم من 2-10 في حالة التفاعل الابتدائي القريب من الكاشف والقيم من 1000 إلى 2400 من أجل التفاعل الابتدائي على ارتفاع 15000m إن القيم الكبيرة في هذه الحالة مقنعة لأن الشلال أكثر تطور في الغلاف الجوي . أما نسبة الطاقة تأخذ قيمة صغيرة، كما يبدو هناك اختلاف هام بشكل إحصائي في نسبة الطاقة بين شلالات الثقب الأسود و النموذج القياسي بالنسبة للارتفاعات الأقل من 500m فوق الكاشف وهذا ما يعطي دفعا لإعطائه أهمية أكبر لما له دلالة على ملامح التفاعل الابتدائي.

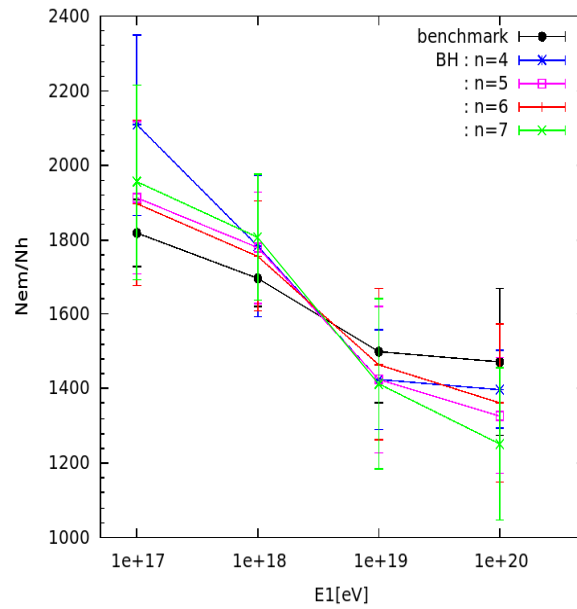
إن هذه النسب تتميز بأخطاء كبيرة لمختلف الطاقات وعدد الأبعاد الإضافية علاوة على ذلك أن هذه النتائج لا تبدو حاسمة في ظاهرة Centauros أو بمعنى آخر انه قد لا يكون مناسب لإعطاء إحصائيات ثابتة لتمييز بين الشلالات.



(ب)

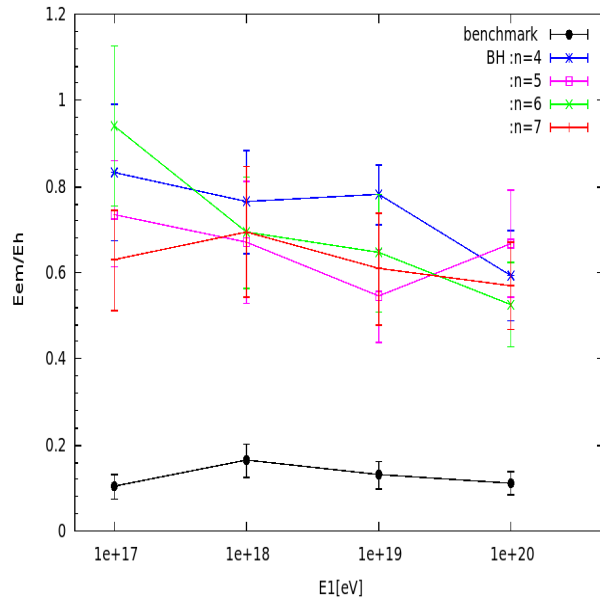


(أ)

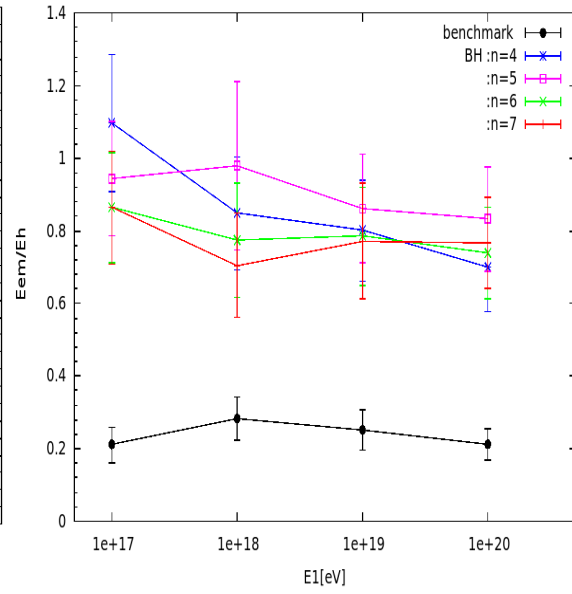


(ج)

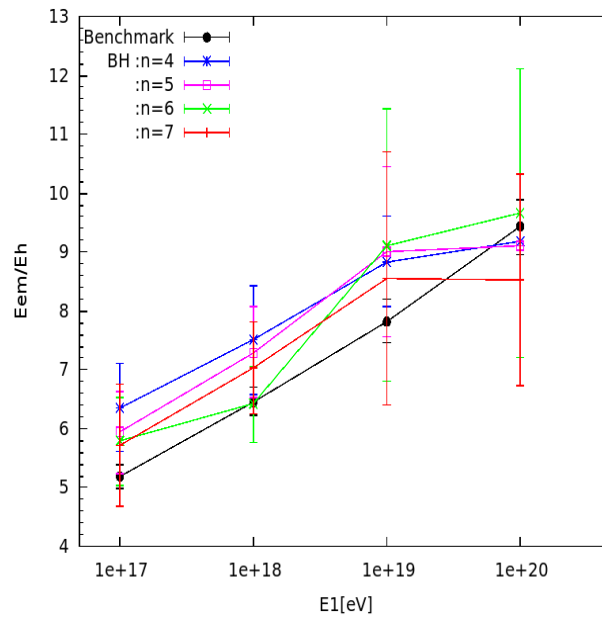
الوثيقة 40-IV : النسبة بين N_{em} (تعدد الفوتونات و $e^\pm$) و N_h (تعدد الهادرونات أي كلا من البيرونات و الكاونات المشحونة، النيترونات، البروتونات و ضد البروتونات) بدلالة الطاقة الابتدائية E_1 : (أ) في حالة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $500m$ عن مستوى الكاشف ، (ب) في حالة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $300m$ عن مستوى الكاشف ، (ج) في حالة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $10km$ عن مستوى الكاشف .



(ب)



(أ)



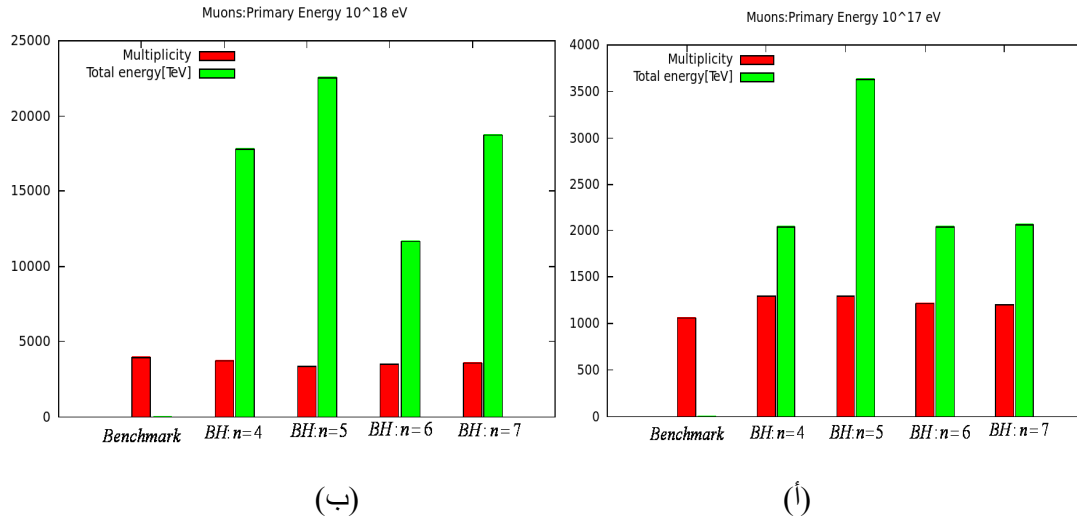
(ج)

الوثيقة 41-IV : النسبة بين E_{em} (الطاقة الكلية للفوتونات و $e^{\pm}$) و E_h (الطاقة الكلية للهادرينات أي كلا من البيرونات و الكاونات المشحونة، النيوترونات، البروتونات و ضد البروتونات) بدلالة الطاقة الابتدائية E_1 : (أ) في حالة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $500m$ عن مستوى الكاشف ، (ج) في حالة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $10 km$ عن مستوى الكاشف .

IV.3.2. متوسط طاقة الميونات على مستوى سطح الكاشف

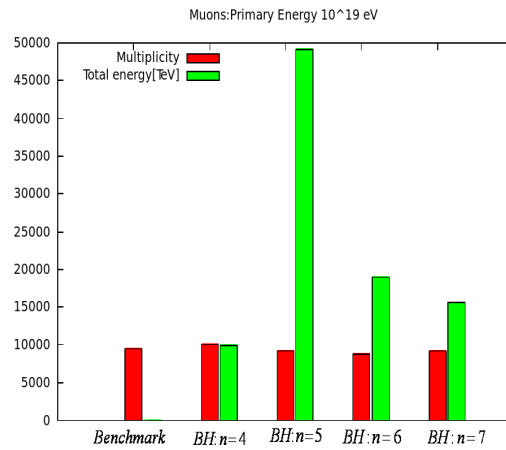
تحليلنا هذا نقدم من خلاله محاولة أولى لرؤية تأثير القطاع الفعال (نموذج الثقب الأسود، النموذج القياسي) على نتيجة طاقة الميونات. بينما يتطور الشلال في الغلاف الجوي نحن يمكن أن نراقب كلا من تعدد الميونات و الطاقة الحاملة لها في مختلف المستويات و على الأخص على مستوى سطح الكاشف .

في الدراسة العددية تم التركيز على تعدد الميونات $\mu^\pm$ وطاقتها الكلية على مستوى سطح الكاشف من أجل مختلف قيم الطاقة الابتدائية ($10^{17} eV - 10^{18} eV - 10^{19} eV$) و من أجل تفاعل ابتدائي على ارتفاع $5500m$ و $15000m$ نحصل على النتائج التالية:



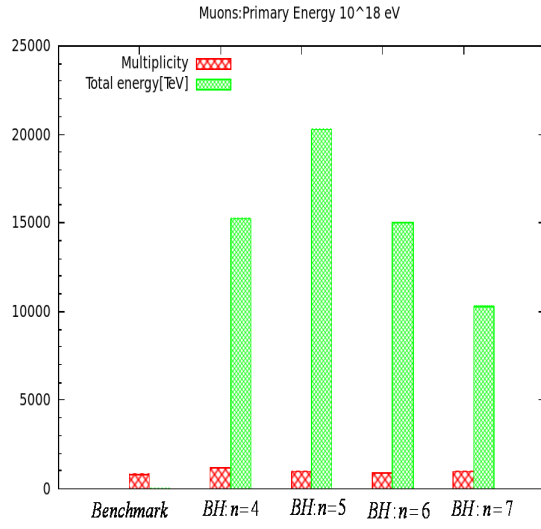
(ب)

(أ)

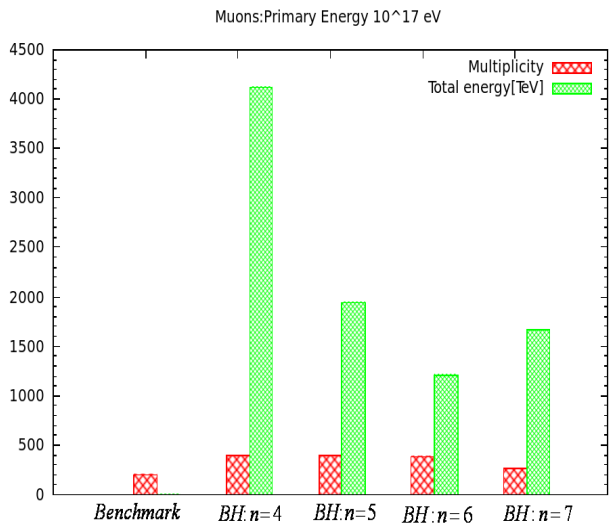


(ج)

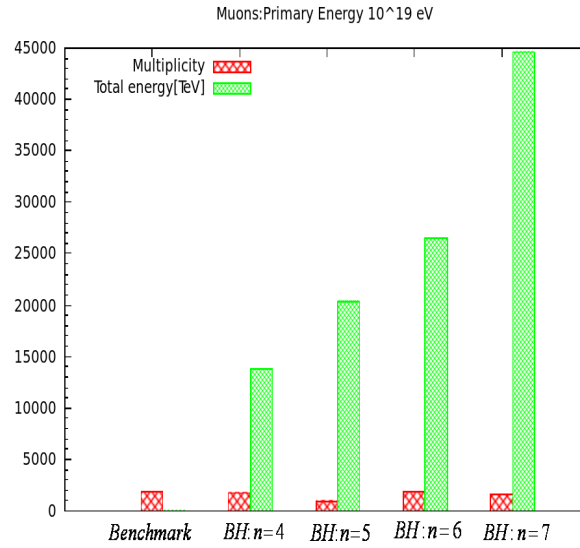
الوثيقة IV-42 : تمثل تعدد جسيمات $\mu^\pm$ و طاقتها الكلية على مستوى سطح الكاشف ($5000m$) أين الاصطدام الأول على ارتفاع $5500m$: (أ) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{17} eV$ ، (ب) طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{18} eV$ ، (ج) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{19} eV$.



(ب)



(أ)

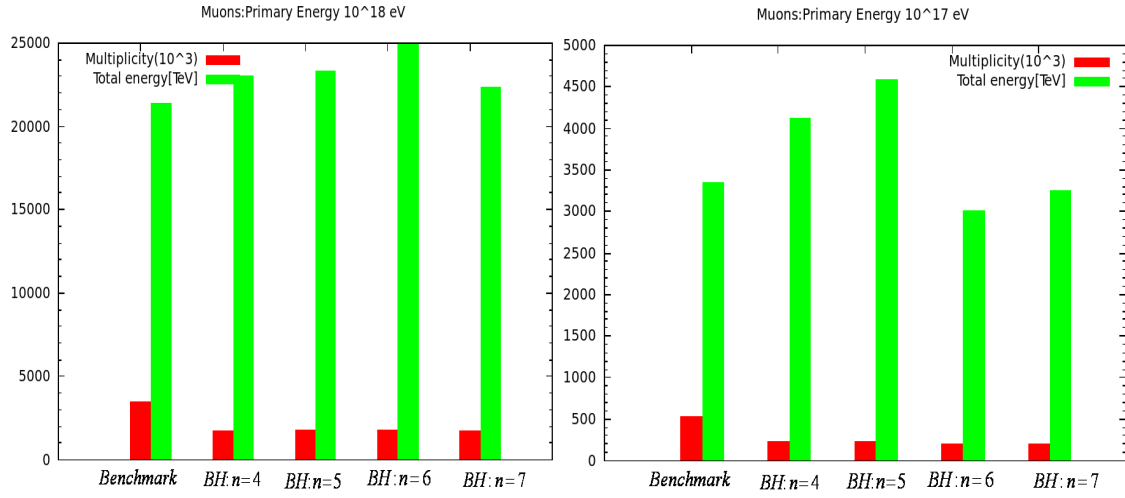


(ب)

الوثيقة 43-IV : تمثل تعدد جسيمات $\mu^\pm$ وطاقتها الكلية على مستوى سطح الكاشف ($5200m$) أين الاصطدام الأول

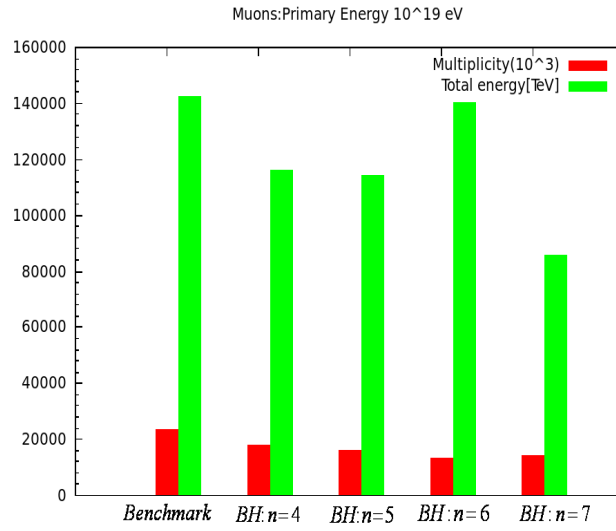
على ارتفاع $5500m$: (أ) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{17} eV$ ، (ب) طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{18} eV$ ،

(ج) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{19} eV$.



(ب)

(د)



(ج)

الوثيقة 44-IV: تمثل تعدد جسيمات $\mu^\pm$ وطاقتها الكلية على مستوى سطح الكاشف ($5000m$) أين الاصطدام الأول على ارتفاع $15000m$: (أ) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{17} eV$ ، (ب) طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{18} eV$ ، (ج) في حالة طاقة ابتدائية $E_1 = 10^{19} eV$.

تبيين الوثيقة 42-IV و 43-IV نتائج تعدد الميونات و الطاقة الكلية من اجل النموذج القياسي و الثقب الأسود ($n = 4,5,6,7$)، حيث نقطة التفاعل الابتدائي على ارتفاع $5500m$ كما في المحاكاة السابقة،

نلاحظ أن الطاقة المتوسطة للميونات على مستوى سطح الكاشف ($\langle E_\mu \rangle = \frac{\sum E_\mu}{N_{ground}}$) تتميز بشكل

واضح في شلالات الثقب الأسود حيث الطاقة المتوسطة للميونات أكبر بكثير بحوالي 10^3 مقارنة مع متوسط طاقة الميونات لشلالات النموذج القياسي (بروتون) من أجل مختلف قيم الطاقة الابتدائية ومهما كان عدد الأبعاد الإضافية (لاحظ الجدول 04-IV و 05-IV).

أما الوثيقة 44-IV حيث نقطة التفاعل الأولى على ارتفاع $15000m$ ، يبدو تعدد الميونات و الطاقة الكلية من اجل مختلف نماذج المقطع الفعال مماثلة ليرافق بذلك الطاقة المتوسطة للميونات من نفس الرتبة (أنظر الجدول 06) في الحقيقة أن من اجل الاصطدام على ارتفاعات كبيرة أين الشلالات متطور بالكامل الاختلافات في المرحلة الأخيرة أي على مستوى سطح الكاشف اقل وضوح و حزم .

يمكن أن نستنتج من تحليلنا لشلالات الهوائية الناتجة من تفاعل ابتدائي القريب من مستوى الكاشف (من 0 الى 500) خصوصا أن لطاقة الميونات على مستوى الكاشف إمكانية إعطاء ميزة عن اختلاف المقطع الفعال لتفاعل الابتدائي، كما لهذا الجانب صلة بظاهرة Centauros وحاليا تحت الدراسة، إذ يمكن أن نستنتج أن طاقة الميونات المتوسط كبيرة من رتبة $1TeV$ ليقابل بذلك عزم عرضي معتبر، وهذا ما سجل في كلا من مختبر Chacaltaya و Pamir بالنسبة لظاهرة Centauros، تبدو بذلك النتائج المتحصل عليها متسقة مع ما ميزت به الظاهرة من ناحية العزم العرضي المعتبر ليبقى الثقب الأسود مرشحة بقوة إلى أن تكون أصل الأحداث الكونية الغريبة CLEs.

الجدول 04-IV: قيم متوسط الطاقة لجسيمات $\mu^\pm$ على سطح الكاشف من أجل تفاعل ابتدائي على ارتفاع $500m$ فوق الكاشف.

Injection point 5500m	Primary Energy	Benchmark	BH : n=4	BH : n=5	BH : n=6	BH : n=7
< E_μ >(TeV) At ground 5000 m	$10^{17} eV$	0.0045 ± 0.0006	1.57 ± 0.21	2.80 ± 0.72	1.65 ± 0.78	1.72 ± 0.67
	$10^{18} eV$	0.0053 ± 0.0005	4.74 ± 1.19	4.74 ± 1.19	3.32 ± 1.02	5.30 ± 1.57
	$10^{19} eV$	0.0054 ± 0.0009	0.98 ± 0.07	5.34 ± 1.50	2.16 ± 0.85	1.71 ± 0.09

الجدول 05-IV: قيم متوسط الطاقة لجسيمات $\mu^\pm$ على سطح الكاشف من أجل تفاعل ابتدائي على ارتفاع $300m$ فوق الكاشف.

Injection point 5500m	Primary Energy	Benchmark	BH : n=4	BH : n=5	BH : n=6	BH : n=7
< E_μ > (TeV) At ground 5200 m	$10^{17} eV$	0.0051 ± 0.0019	10.47 ± 2.20	4.98 ± 1.07	3.18 ± 1.02	6.31 ± 2.11
	$10^{18} eV$	0.0054 ± 0.0008	13.30 ± 4.71	20.65 ± 6.79	17.30 ± 5.43	11.15 ± 4.03
	$10^{19} eV$	0.0058 ± 0.0009	8.01 ± 2.38	20.65 ± 5.78	14.82 ± 4.96	27.34 ± 8.60

الجدول IV-06: قيم متوسط الطاقة للجسيمات $\mu^\pm$ على سطح الكاشف من أجل تفاعل ابتدائي على ارتفاع $10000m$ فوق الكاشف.

Injectin point 15000m	Primary Energy	Benchmark	BH : n=4	BH : n=5	BH : n=6	BH : n=7
< E_μ > (TeV) At ground 5000 m	$10^{17} eV$	$.0064 \pm 0.0002$	0.019 ± 0.005	0.206 ± 0.004	0.015 ± 0.003	0.017 ± 0.004
	$10^{18} eV$	$.0062 \pm 0.0003$	0.014 ± 0.004	0.013 ± 0.0031	0.014 ± 0.003	0.013 ± 0.002
	$10^{19} eV$	$.0060 \pm 0.0005$	0.0064 ± 0.0008	$.0072 \pm 0.0011$	0.0106 ± 0.0028	$.0060 \pm 0.0012$

الفصل الخامس

الخاتمة

إن دراسة موضوع الثقوب السوداء المجهرية في الغلاف الجوي من خلال الشلالات الناتج عن تفككها ، يهدف إلى تحديد معايير مميزة تسمح بالتفريق بينها وبين شلالات النموذج القياسي وفق دراسة عددية، بالاعتماد على طريقة مونتي كارلو وخلافا للطريقة التحليلية، فهي تستطيع إعطاء نتائج كمية ونوعية .

بالنسبة إلى النتائج المتحصل عليها نستخلص أن شلالات النموذج القياسي و الثقب الأسود المجري من الممكن التمييز بينهم بمقارنة خصائصهم القابلة للكشف و الأكثر عملية (التعدد على مستوى سطح الكاشف)، إذ أن التطور السريع لشلالات الثقب الأسود مقارنة مع شلالات النموذج القياسي أدى إلى اختلاف هام في التعدد جسيمات على سطح الأرض دون تأثره بعدد الأبعاد الإضافية. إلا انه كان يستوجب إيجاد معايير أخرى واضحة للتمييز بين شلالات النموذج القياسي و شلالات الثقوب السوداء المجهرية لتكون بذلك الطاقة المتوسطة للميونات الميزة الأكثر حزم في التفريق بينهم.

أما فيما يتعلق بالجزء الثاني من عملنا وهو اختبار بشكل عددي إذا ما أصل بعض الأحداث الغريبة النادرة في الأشعة الكونية العالية الطاقة كظاهرة Centauros ، التي قد لوحظ أنها تختلف عن الأحداث الناتجة من التفاعلات القوية العادية ، من تفكك الثقوب السوداء المجهرية، فكانت النتائج المتحصل عليها تبين أن الخصائص الرئيسية لشلالات الثقوب السوداء المجهرية لا تبدو و لا ستنثني التفسير المقترح، بموجب هذا فإنه من المهم جدا الحصول على المزيد من المعلومات و البيانات التجريبية .

كما يمكن إعطاء هذه الدراسة وجها أحسن، وذلك بان تكون المقارنة بين شلالات الثقب الأسود المجري و شلالات النوترينو بدل البروتون، ومن اجل التعميم أكثر لابد من دراسة الحالات أكثر تعقيدا حيث نعتبر الشلالات الهوائية شبه أفقية موافقة لما هو أكثر توقعا بالنسبة لشلالات الهوائية المنتجة من جسيمات النوترينو.

في الأخير إن الحصول على معيار مميز لشلالات الثقب الأسود المجري و التحقيق من ظاهرة Centauros يمكن إعطاء دليل نظري على وجود الأبعاد الإضافية في الطبيعة مما سوف تعطي دعما كبيرا للاستمرار في تحري هذه النماذج من قبل الباحثين والنظرين .

الملحق: A

تفاصيل إضافية تتعلق ببرامج المحاكاة

اشرنا سابقا أن كل حدث في PYTHIA يخلف جسيمات ناتجة عن الاصطدام تخزن في ملف مشترك Pyjet كما هو مبين في الجدول أسفل حيث العمود 2 يبين أسماء الجسيمات النهائية من اصطدام النوترينو-البروتون أما العمود 6، 7، 8 يشير إلى العزم في حين العمود 9، 10 يبين قيمة الطاقة والكتلة على الترتيب أما الخط الأخير يشير إلى الطاقة الكلية و العزم الكلي لتفاعل ، كل كميات يعبر عنها بـ GeV .

الجدول 07-A: نموذج عن ملف Pyjet الناتج من تشكل وتفكك ثقب اسود مجهري.

Event listing (summary)									
I	particle/jet	KS	KF	orig	p_x	p_y	p_z	E	m
1	e+	1	-11	0	542.714	-152.825	450.393	721.628	0.001
2	gamma	1	22	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	nu_mubar	1	-14	0	-49.863	-282.697	688.200	745.669	0.000
4	mu-	1	13	0	-5.974	-4.519	1.247	7.595	0.106
5	gamma	1	22	0	-0.003	0.028	0.050	0.057	0.000
6	n0	1	2112	0	-1.072	-0.105	-5190.003	5190.003	0.940
7	pi+	1	211	0	-51.122	43.025	535.540	539.693	0.140
8	pbar-	1	-2212	0	-51.331	44.445	543.653	547.877	0.938
9	pi-	1	-211	0	-4.497	3.280	43.725	44.079	0.140
10	pi+	1	211	0	-0.447	-0.391	0.311	0.684	0.140
11	gamma	1	22	0	-0.125	0.021	-551.433	551.433	0.000
12	gamma	1	22	0	-0.148	0.011	-252.116	252.116	0.000
13	K-	1	-321	0	0.019	-0.080	0.688	0.851	0.494
14	pi+	1	211	0	-0.588	-0.514	1.287	1.511	0.140
15	gamma	1	22	0	0.092	-0.109	0.527	0.546	0.000
16	gamma	1	22	0	0.011	-0.298	1.119	1.158	0.000
17	pi+	1	211	0	0.145	0.245	0.741	0.806	0.140
18	pi-	1	-211	0	-0.154	0.419	0.535	0.711	0.140
19	pi+	1	211	0	0.236	-0.400	0.637	0.801	0.140
20	pi-	1	-211	0	0.031	0.011	-0.069	0.159	0.140
21	pi+	1	211	0	-0.683	0.527	-0.891	1.249	0.140
22	nbar0	1	-2112	0	0.604	-0.226	-8.900	8.973	0.940
23	pi-	1	-211	0	-0.088	-0.203	-2.920	2.931	0.140
24	p+	1	2212	0	-0.395	0.028	-5.052	5.154	0.938
25	K-	1	-321	0	-0.041	-0.096	-19.103	19.110	0.494
26	gamma	1	22	0	-0.939	-0.129	-22.605	22.625	0.000
27	gamma	1	22	0	-0.163	0.107	-1.670	1.682	0.000
28	pi+	1	211	0	-0.226	-0.307	-82.937	82.938	0.140
29	pi+	1	211	0	-15.086	14.965	175.797	177.077	0.140
30	pi-	1	-211	0	-41.051	41.575	492.104	495.560	0.140
31	K-	1	-321	0	-18.604	18.867	223.108	224.676	0.494
32	pi+	1	211	0	-21.081	20.586	246.102	247.859	0.140
33	pi+	1	211	0	-7.733	6.467	79.750	80.385	0.140
34	pi-	1	-211	0	-0.991	0.890	9.852	9.942	0.140
35	pi-	1	-211	0	-28.981	26.054	320.858	323.215	0.140
36	pi+	1	211	0	-4.663	4.189	54.508	54.867	0.140
37	pi-	1	-211	0	-18.155	14.058	184.701	186.123	0.140
38	p+	1	2212	0	-103.063	89.693	1100.081	1108.533	0.938
39	pi+	1	211	0	-21.137	18.190	222.718	224.457	0.140
40	pi+	1	211	0	-5.645	4.524	59.442	59.881	0.140
41	pi-	1	-211	0	-5.155	4.852	55.906	56.353	0.140
42	K-	1	-321	0	-0.822	1.306	14.217	14.309	0.494
43	pi+	1	211	0	0.062	0.176	3.933	3.940	0.140
44	K+	1	321	0	-1.815	4.346	51.669	51.885	0.494
45	pi-	1	-211	0	-0.085	0.135	2.378	2.388	0.140
46	K-	1	-321	0	-0.904	4.179	53.659	53.832	0.494
47	pi+	1	211	0	-1.998	8.169	103.311	103.653	0.140
48	K+	1	321	0	-0.980	4.114	48.421	48.608	0.494
49	pi-	1	-211	0	0.033	0.199	2.488	2.500	0.140
50	K_L0	1	130	0	-2.169	8.716	105.160	105.544	0.498
51	K+	1	321	0	-0.366	1.879	30.170	30.235	0.494
52	pi-	1	-211	0	0.190	0.290	4.914	4.928	0.140
53	gamma	1	22	0	-0.165	0.340	3.012	3.035	0.000
54	gamma	1	22	0	-0.325	1.303	22.158	22.199	0.000
55	pi-	1	-211	0	0.149	0.284	1.902	1.934	0.140
56	pi+	1	211	0	-0.136	-0.064	0.103	0.230	0.140
57	pi+	1	211	0	-0.638	-0.485	0.940	1.244	0.140
58	pi-	1	-211	0	-0.152	-0.266	0.944	1.003	0.140
59	pi+	1	211	0	-0.488	0.389	0.473	0.795	0.140
60	pi-	1	-211	0	-0.722	-0.291	0.943	1.231	0.140

61	pi-	1	-211	0	-0.364	0.449	0.695	0.914	0.140
62	pi-	1	-211	0	-6.347	-1.990	5.972	8.940	0.140
63	pi+	1	211	0	-0.964	-0.578	1.149	1.613	0.140
64	pi+	1	211	0	-3.162	-0.936	3.069	4.507	0.140
65	pi-	1	-211	0	-0.531	-0.180	0.675	0.889	0.140
66	K_L0	1	130	0	-0.085	0.245	0.866	1.032	0.498
67	gamma	1	22	0	-0.024	-0.016	0.092	0.096	0.000
68	gamma	1	22	0	0.114	0.001	1.358	1.362	0.000
69	gamma	1	22	0	-0.018	0.160	0.089	0.184	0.000
70	gamma	1	22	0	0.126	0.175	0.094	0.235	0.000
71	gamma	1	22	0	0.106	-0.100	-0.282	0.317	0.000
72	gamma	1	22	0	0.188	-0.144	-0.182	0.299	0.000
73	gamma	1	22	0	-0.054	-0.003	-0.002	0.054	0.000
74	gamma	1	22	0	-0.043	0.181	-0.083	0.204	0.000
75	gamma	1	22	0	0.113	-0.169	-1.664	1.677	0.000
76	gamma	1	22	0	0.024	0.026	-0.221	0.224	0.000
77	gamma	1	22	0	0.033	0.171	-10.586	10.587	0.000
78	gamma	1	22	0	-0.005	0.012	-0.078	0.079	0.000
79	gamma	1	22	0	0.034	0.056	-1.092	1.094	0.000
80	gamma	1	22	0	-0.033	-0.015	-3.538	3.538	0.000
81	gamma	1	22	0	0.067	0.057	-2.617	2.619	0.000
82	gamma	1	22	0	0.243	0.024	-3.653	3.661	0.000
83	gamma	1	22	0	-0.028	-0.101	-5.360	5.361	0.000
84	gamma	1	22	0	-0.063	-0.100	-18.593	18.594	0.000
85	gamma	1	22	0	-0.554	0.026	-156.226	156.227	0.000
86	gamma	1	22	0	-0.529	0.117	-127.945	127.946	0.000
87	pi+	1	211	0	-18.014	17.697	214.678	216.158	0.140
88	pi-	1	-211	0	-22.294	21.692	260.767	262.616	0.140
89	gamma	1	22	0	-0.790	0.677	8.283	8.348	0.000
90	gamma	1	22	0	-1.110	0.877	12.503	12.583	0.000
91	gamma	1	22	0	-6.837	5.743	73.716	74.255	0.000
92	gamma	1	22	0	-0.489	0.366	4.966	5.003	0.000
93	K_L0	1	130	0	-0.196	0.865	11.152	11.199	0.498
94	gamma	1	22	0	-0.466	1.030	17.107	17.144	0.000
95	gamma	1	22	0	-0.119	0.206	2.827	2.837	0.000
96	gamma	1	22	0	-0.052	0.063	0.861	0.864	0.000
97	gamma	1	22	0	-0.049	0.615	6.088	6.119	0.000
98	gamma	1	22	0	-0.144	0.685	10.364	10.387	0.000
99	gamma	1	22	0	0.012	0.024	0.194	0.196	0.000
100	gamma	1	22	0	-0.009	0.583	5.103	5.136	0.000
101	gamma	1	22	0	-0.676	1.748	24.143	24.215	0.000
102	gamma	1	22	0	-0.372	0.063	0.812	0.896	0.000
103	gamma	1	22	0	-1.077	0.256	1.904	2.203	0.000
104	gamma	1	22	0	-0.113	0.278	0.491	0.576	0.000
105	gamma	1	22	0	-0.204	0.294	0.865	0.936	0.000
106	gamma	1	22	0	-0.027	-0.021	0.013	0.037	0.000
107	gamma	1	22	0	-0.433	-0.389	0.960	1.123	0.000
108	gamma	1	22	0	-0.005	0.002	0.001	0.005	0.000
109	gamma	1	22	0	-5.686	-1.719	4.159	7.252	0.000
110	gamma	1	22	0	-1.413	-0.496	0.766	1.682	0.000
111	gamma	1	22	0	-1.272	-0.401	0.820	1.566	0.000
112	gamma	1	22	0	0.065	0.002	-1.135	1.137	0.000
113	gamma	1	22	0	-0.041	0.094	-1.801	1.804	0.000
114	gamma	1	22	0	0.034	0.030	-4.876	4.876	0.000
115	gamma	1	22	0	0.018	0.028	-0.256	0.258	0.000
116	gamma	1	22	0	0.201	-0.077	-5.623	5.627	0.000
117	gamma	1	22	0	0.044	-0.020	-0.365	0.368	0.000
118	pi+	1	211	0	0.093	0.090	-154.084	154.084	0.140
119	pi-	1	-211	0	0.068	0.025	-17.192	17.193	0.140
120	gamma	1	22	0	0.036	0.583	6.517	6.544	0.000
121	gamma	1	22	0	-0.107	1.878	22.037	22.118	0.000
122	gamma	1	22	0	-0.132	0.330	3.360	3.378	0.000
123	gamma	1	22	0	-0.003	0.056	1.264	1.265	0.000
sum:		1.00			0.00	0.00	0.00	13698.70	13698.70

بعض جداول البيانات (Output Data Tables)

ندرج هنا دليل بعض جداول البيانات التي يمكن الحصول عليها من خلال برنامج AIRES من أصل 235 جدول :

1001: التطور الطولي: أشعة غاما.

1005: التطور الطولي: الالكترونات.

1022: التطور الطولي: البروتونات.

1205: التطور الطولي: الالكترونات و البوزيترونات.

1207: التطور الطولي: الميونات المشحونة.

1211: التطور الطولي: البيونات المشحونة.

1293: التطور الطولي: كل الجسيمات.

1501 : التطور الطولي : طاقة أشعة غاما .

1506 : التطور الطولي : طاقة البوزيترونات.

1508: التطور الطولي : طاقة الميونات الشحنة السالبة.

1521 : التطور الطولي : طاقة النيترونات.

1713 : التطور الطولي : طاقة الكاونات المشحونة.

1705 : التطور الطولي : طاقة الالكترونات و البوزيترونات.

1792 : التطور الطولي : طاقة كل الجسيمات المتعادلة كهربائيا.

1793 : التطور الطولي : طاقة كل الجسيمات.

2001: التوزيع الجانبي: أشعة غاما.

2005: التوزيع الجانبي: الالكترونات.

2011: التوزيع الجانبي: بيونات الشحنة الموجبة.

2022: التوزيع الجانبي: البروتونات .

2205: التوزيع الجانبي: الالكترونات و البوزيترونات .

- 2211: التوزيع الجانبي:البیونات المشحونة .
- 2291: التوزيع الجانبي: كل الجسيمات المشحونة.
- 2293: التوزيع الجانبي: كل الجسيمات.
- 2501: التوزيع الطاقوي على سطح الأرض : أشعة غاما.
- 2505: التوزيع الطاقوي على سطح الأرض : الالكترونات .
- 2508: التوزيع الطاقوي على سطح الأرض : الميونات الشحنة السالبة.
- 2513: التوزيع الطاقوي على سطح الأرض : الكاونات الشحنة الموجبة.
- 2521: التوزيع الطاقوي على سطح الأرض : النيترونات.
- 2541: التوزيع الطاقوي على سطح الأرض : النيكلیونات.
- 2705: التوزيع الطاقوي على سطح الأرض : الالترونات و البوزیترونات.
- 2711: التوزيع الطاقوي على سطح الأرض : البیونات المشحونة.
- 2792: التوزيع الطاقوي على سطح الأرض : كل الجسيمات المتعادلة كهربائيا.
- 2793: التوزيع الطاقوي على سطح الأرض : كل الجسيمات .
- 3001:توزيع معدل زمن الوصول : أشعة غاما.
- 3005:توزيع معدل زمن الوصول : الالكترونات و البوزیترونات .
- 3007:توزيع معدل زمن الوصول : الميونات .
- 3291:توزيع معدل زمن الوصول : كل الجسيمات المشحونة .
- 3293:توزيع معدل زمن الوصول : كل الجسيمات.
- 5501: $X_{\max}$ و $N_{\max}$ بالنسبة للجسيمات المشحونة بدلالة عدد الشلالات الهوائية .
- و هنا نعطي على سبيل المثال جدول التطور الطولي لجسيمة الفوتون (1001) والتوزيع الجانبي للميونات المشحونة(2207) :

الجدول A-08: التطور الطولي لفوتونات شلال ناتج عن اصطدام بروتون طاقته 10^{18} eV بالغلاف الجوي على ارتفاع 17km عن مستوى سطح البحر. حيث العمود الأول يعطي عدد المستويات الملاحظة.

```
#
# AIRES Export file
# DATE: 29/Apr/2011 17:15:20; AIRES version 2.8.0
# USER: sabra; HOST: sabra-desktop
# Task name      : proton
# Task starting date: 29/Apr/2011 16:56:02
# Number of showers : 100
# TABLE 1001: Longitudinal development: Gamma rays.
# Units used:
#   Depth --- g/cm2
#   Length --- m
#   Time --- ns
#   Angle --- deg
#   Energy --- GeV
# Columns:
#   1 Bin #, 2 Slant depth of obs. level, 3 Mean, 4 RMS Error,
#   5 Std. Dev., 6 Minimum, 7 Maximum.
# >>>>>>>
# GRD  875.500      4.958252E+09  3.173E+07  3.173E+08  3.567E+09  5.502E+09
#
# 1  81.6635      38821.2      1.564E+04  1.564E+05  .00      1.244E+06
# 2  85.6326      279857.      1.848E+05  1.848E+06  .00      1.702E+07
# 3  89.6018      289097.      1.850E+05  1.850E+06  .00      1.702E+07
# 4  93.5710      264756.      1.748E+05  1.748E+06  .00      1.702E+07
# 5  97.5402      251719.      1.746E+05  1.746E+06  .00      1.702E+07
# 6  101.509      144149.      9.893E+04  9.893E+05  .00      9.864E+06
# 7  105.479      144915.      9.857E+04  9.857E+05  .00      9.865E+06
# 8  109.448      76897.7      1.746E+04  1.746E+05  .00      1.366E+06
# 9  113.417      90322.1      1.874E+04  1.874E+05  .00      1.368E+06
# 10 117.386      96532.4      1.933E+04  1.933E+05  .00      1.372E+06
# 11 121.355      256548.      1.345E+05  1.345E+06  .00      1.338E+07
# 12 125.324      216071.      4.310E+04  4.310E+05  .00      2.825E+06
# 13 129.294      278090.      5.663E+04  5.663E+05  .00      3.887E+06
# 14 133.263      387581.      9.420E+04  9.420E+05  .00      7.750E+06
# 15 137.232      494699.      1.347E+05  1.347E+06  .00      9.613E+06
#
# . . . . .
# . . . . .
# . . . . .
#
# 176 776.271      6.701594E+09  5.197E+07  5.197E+08  4.142E+09  7.602E+09
# 177 780.240      6.705874E+09  5.113E+07  5.113E+08  4.123E+09  7.573E+09
# 178 784.209      6.721331E+09  5.079E+07  5.079E+08  4.063E+09  7.690E+09
# 179 788.178      6.744185E+09  5.129E+07  5.129E+08  4.028E+09  7.845E+09
# 180 792.147      6.765145E+09  4.918E+07  4.918E+08  4.166E+09  7.833E+09
# 181 796.117      6.756690E+09  4.861E+07  4.861E+08  4.079E+09  7.738E+09
# 182 800.086      6.759432E+09  4.605E+07  4.605E+08  4.135E+09  7.835E+09
# 183 804.055      6.753680E+09  4.568E+07  4.568E+08  4.175E+09  7.763E+09
# 184 808.024      6.754440E+09  4.496E+07  4.496E+08  4.208E+09  7.660E+09
# 185 811.993      6.762754E+09  4.394E+07  4.394E+08  4.209E+09  7.749E+09
# 186 815.962      6.758333E+09  4.308E+07  4.308E+08  4.448E+09  7.582E+09
# 187 819.932      6.738831E+09  4.351E+07  4.351E+08  4.460E+09  7.649E+09
# 188 823.901      6.735766E+09  4.371E+07  4.371E+08  4.287E+09  7.614E+09
# 189 827.870      6.727972E+09  4.361E+07  4.361E+08  4.334E+09  7.678E+09
# 190 831.839      6.737576E+09  4.322E+07  4.322E+08  4.477E+09  7.567E+09
# 191 835.808      6.721280E+09  4.421E+07  4.421E+08  4.405E+09  7.663E+09
# 192 839.778      6.672485E+09  4.091E+07  4.091E+08  4.550E+09  7.588E+09
# 193 843.747      6.638996E+09  4.144E+07  4.144E+08  4.676E+09  7.456E+09
# 194 847.716      6.592436E+09  4.232E+07  4.232E+08  4.561E+09  7.638E+09
# 195 851.685      6.530208E+09  4.261E+07  4.261E+08  4.356E+09  7.479E+09
# 196 855.654      6.429155E+09  4.075E+07  4.075E+08  4.364E+09  7.356E+09
# 197 859.623      6.306920E+09  3.907E+07  3.907E+08  4.342E+09  7.147E+09
# 198 863.593      6.119766E+09  3.745E+07  3.745E+08  4.417E+09  7.061E+09
# 199 867.562      5.861134E+09  3.624E+07  3.624E+08  4.092E+09  6.609E+09
# 200 871.531      5.500231E+09  3.509E+07  3.509E+08  3.866E+09  6.213E+09
#
```

الجدول A-09: التوزيع الجانبي للميونات المشحونة خلال عمودي ناتج عن اصطدام بروتون طاقته 10^{18} eV بالغلاف الجوي على ارتفاع 17km عن مستوى سطح البحر على امتداد 7km من محور الشلال .

```
#
# AIRES Export file
# DATE: 29/Apr/2011 17:15:20; AIRES version 2.8.0
# USER: sabra; HOST: sabra-desktop
# Task name      : proton
# Task starting date: 29/Apr/2011 16:56:02
# Number of showers :      100
# TABLE 2207: Lateral distribution: mu+ and mu-
# Units used:
#
#      Depth    --- g/cm2
#      Length   --- m
#      Time     --- ns
#      Angle    --- deg
#      Energy   --- GeV
# Columns:
#      1 Bin #, 2 R (distance to the core), 3 Mean, 4 RMS Error,
#      5 Std. Dev., 6 Minimum, 7 Maximum.
# >>>>>>>>
# < 1.00000      3210.70      494.      4.938E+03      20.6      3.214E+04
# > 7000.00      399.797      288.      2.876E+03      .00      2.421E+04
#
# 1 1.00000      792.579      133.      1.333E+03      .00      9.077E+03
# 2 1.24775      1430.78      269.      2.691E+03      .00      1.479E+04
# 3 1.55688      1716.34      245.      2.449E+03      .00      1.436E+04
# 4 1.94260      2870.15      714.      7.141E+03      .00      5.551E+04
# 5 2.42387      7882.37      1.974E+03      1.974E+04      .00      1.666E+05
# 6 3.02439      8180.01      1.535E+03      1.535E+04      .00      1.278E+05
# 7 3.77368      10245.5      1.746E+03      1.746E+04      .00      1.294E+05
# 8 4.70860      17405.4      2.847E+03      2.847E+04      395.      1.688E+05
# 9 5.87516      28313.2      5.035E+03      5.035E+04      229.      3.864E+05
# 10 7.33073      29469.4      4.526E+03      4.526E+04      372.      3.365E+05
# 11 9.14691      36670.0      2.766E+03      2.766E+04      3.129E+03      1.383E+05
# 12 11.4131      43795.5      3.649E+03      3.649E+04      3.093E+03      2.107E+05
# 13 14.2406      61194.2      5.487E+03      5.487E+04      3.756E+03      3.117E+05
# 14 17.7687      79326.0      6.166E+03      6.166E+04      9.010E+03      3.669E+05
# 15 22.1710      108867.      1.076E+04      1.076E+05      2.623E+03      8.431E+05
# 16 27.6638      125417.      9.084E+03      9.084E+04      7.655E+03      5.931E+05
# 17 34.5175      151135.      8.737E+03      8.737E+04      1.265E+04      4.154E+05
# 18 43.0692      191039.      1.258E+04      1.258E+05      4.715E+03      7.744E+05
# 19 53.7396      240664.      2.506E+04      2.506E+05      5.902E+04      2.460E+06
# 20 67.0535      263799.      1.572E+04      1.572E+05      2.463E+04      8.848E+05
# 21 83.6660      282059.      1.275E+04      1.275E+05      5.761E+04      8.096E+05
# 22 104.394      346683.      1.973E+04      1.973E+05      1.074E+05      1.509E+06
# 23 130.258      366060.      1.619E+04      1.619E+05      8.786E+04      7.840E+05
# 24 162.529      378165.      2.046E+04      2.046E+05      3.005E+04      1.467E+06
# 25 202.796      424595.      2.680E+04      2.680E+05      7.452E+04      2.306E+06
# 26 253.038      459388.      2.583E+04      2.583E+05      6.185E+04      1.595E+06
# 27 315.728      410347.      1.988E+04      1.988E+05      3.003E+04      1.066E+06
# 28 393.950      405192.      1.784E+04      1.784E+05      5.439E+04      1.119E+06
# 29 491.551      383298.      1.916E+04      1.916E+05      8.918E+04      1.027E+06
# 30 613.333      330898.      1.678E+04      1.678E+05      3.343E+04      7.879E+05
# 31 765.286      275931.      1.648E+04      1.648E+05      1.856E+04      1.020E+06
# 32 954.885      241356.      1.284E+04      1.284E+05      3.155E+04      6.816E+05
# 33 1191.46      156819.      1.277E+04      1.277E+05      .00      5.543E+05
# 34 1486.64      129471.      1.157E+04      1.157E+05      .00      5.660E+05
# 35 1854.95      76638.4      8.900E+03      8.900E+04      .00      3.830E+05
# 36 2314.52      56054.4      7.253E+03      7.253E+04      .00      3.670E+05
# 37 2887.94      18481.5      3.474E+03      3.474E+04      .00      1.895E+05
# 38 3603.43      8264.77      2.777E+03      2.777E+04      .00      1.551E+05
# 39 4496.17      2993.39      1.227E+03      1.227E+04      .00      9.504E+04
# 40 5610.10      401.984      337.      3.367E+03      .00      3.296E+04
#
```

المراجع:

- [01] G. Maurin, Étude de la nature des rayons cosmiques d’ultra haute énergie à partir des premières données de l’Observatoire Pierre Auger, *Ph.D Thesis*, Université Denis Diderot -Paris VII - (2005).
- [02] C.A.Norman *et al*, *Astrophys. J.*454, 60(1995).
- [03] S.Swordy, private communication.The data represent published results of the LEAP, Proton, Akeno, AGASA, Fly’s Eye, Haverah Park, and Yakutsk experiments.
- [04] C. Amsler. *Et al.*, *Phy.Lett.***B667**, 1 (2008).
- [05] S. Moreggia, Influence de l’Atmosphère sur la Détection Spatiale des Rayons Cosmiques d’Ultra-haute Energie, *Ph.D Thesis*, Université Joseph Fourier, Grenoble I(2007).
- [06] P. Colin, Reconstruction des gerbes atmosphériques et mesure de la fluorescence de l’air pour l’étude des rayons cosmiques ultra énergétiques au sein du projet EUSO, *Ph.D Thesis*, Université Joseph Fourier, Grenoble I(2005).
- [07] C. Grupen, *Astroparticle Physics*, Springer Verlag Berlin, Heidelberg (2005).
- [08] T.Stanev, Proceedings of the 30 th International Cosmic Ray Conference, Merida (Mexico), 2007.
- [09] F. Levin, *Calibrating the Cosmos; How Cosmology Explains Our Big Bang Universe*, Springer (2007).
- [10] P. Bhattacharjee. *Et al.*, *Phys. Rept.*, 327:109-247(2000).
- [11] P. D. SILVA, A la recherche des énergies extrêmes : détection des rayons cosmiques avec l’Observatoire Pierre Auger, *Ph.D Thesis*, Université Paris 6(2004).
- [12] P. K.F. Grieder , *COSMIC RAYS AT EARTH*, Elsevier Science B.V.(2001).
- [13] J. Blümer *et al*. *Nuclear Phys. Proc. Suppl.* 63 (2009) 293–338
- [14] A. Haungs. *Et al.*, *Rep. Prog. Phys.* 66 (2003) 1145–1206.
- [15] D.H. Perkins, *Particle astrophysics, 2nd edition*, Oxford University Press, Oxford (2009).
- [16] C.Song, *Astropart. Phys.* 22 (2004) 151–158.

- [17] Ewa Gładysz-Dziaduś, Rep. No 1879/PH (2001),
www.ifj.edu.pl/reports/2001.html
- [18] P. Hoyer, *Relativistic Astrophysics and Cosmology*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg (2006).
- [19] C. M. Harris, *Physics Beyond the Standard Model: Exotic Leptons and Black Holes at Future Colliders*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge (2003).
- [20] D. Kazakov. *Et al.*, *Particle Physics Beyond the Standard Model* Elsevier B.V.(2006).
- [21] N. Arkani-Hamed. *Et al.*, *Phys. Lett. B* **429**-263 (1998).
- [22] S.S. Gubser. *Et al.*, *Strings, Branes and Extra Dimensions Tasi2001*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd (2004).
- [23] A. Roy, *Particle Phenomenology of Gravitational Events at the TeV Scale*, phd Thesis University of Mississippi (2009).
- [24] P. Kanti, *Int. J. Mod. Phys. A* **19** (2004) 4899.
- [25] B. Koch *.et al.*, *JHEP* 0510 ,053 (2005).
- [26] J.L. Feng *.et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 021303 (2002).
- [27] C. M. Harris and P. Kanti, *JHEP* 0310, 014 (2003).
- [28] M. Cavaglia, *Int. J.Mod.Phys. A*.(2002).
- [29] B. Koch *.et al.*, *Phys. Lett. B* **672** (2009) 71–76.
- [30] D. C. Dai, *Modified Gravity in Cosmology and fundamental Particle Physics* .Ph.D. Thesis, Case Western Reserve University (2008).
- [31] L. A. Anchordoqui *.et al.*, *Phys. Rev. D* **65**, 042002 (2002).
- [32] L. Anchordoqui *.et al.*, *Annals of Physics* 314 (2004) 145–207.
- [33] I. Sarcevic, *J. Phys: Conference Series* **60** (2007) 175–178.
- [34] Precompiled binaries of the MC code can be freely downloaded at the web site
[Http://www.phy.olemiss.edu/GR/groke](http://www.phy.olemiss.edu/GR/groke).
- [35] T. Sjostrand *.et al.*, *PYTHIA 6.4 Physics and Manual*, *JHEP* 0605 (2006) 026.
- [36] <http://www.fisica.unlp.edu.ar/auger/aires/>
- [37] S. J. Sciutto, *AIRES User's Manual and Reference Guide, vers. 2.6.0*, La Plata, Argentina, 2002.

- [38] M. Cavalia, Groke 2.0: Quick Reference Guide vers 2.0, Mississippi, USA, 2007.
- [39] D. Heck *et al.*, Report **FZKA** 6097, Forschungszentrum Karlsruhe, 1998;
[Http://www-ik3.fzk.de/~sim\\$heck/corsika](http://www-ik3.fzk.de/~sim$heck/corsika).
- [40] E. J. Ahn and M. Cavaglia, *Phys. Rev. D* **73**, 042002 (2006).
- [41] A. Cafarella *et al*, *JHEP* **06**, 065 (2005).
- [42] M. Cavaglia, *Int. J.Mod.Phys. A* **18**, 1843-1882, (2003).
- [43] A. Mironov *et al.*, (2004), arxiv:hep-ph/0311318.

ملخص:

في نماذج الأبعاد الإضافية الكبيرة ، تفاعلات الجسيمات العالية الطاقة يمكن أن تشكل ثقوب سوداء مجهرية من ذلك ما يحدث في الغلاف الجوي أين الأشعة الكونية العالية الطاقة (النوترينو) تصطدم مع نيكولونات. هذه الثقوب سرعان ما تتفكك لتشكل ما يعرف بالشلالات الهوائية. بالاعتماد على طريقة مونتني كارلو لمحاكاة لشلالات الهوائية نتحرى خصائصها .

في هذا العمل نقارن بين الشلالات الناتجة عن تفكك الثقوب المجهرية و شلالات العادية أي شلالات النموذج القياسي ، وناقش معايير محتملة تسمح التفرقة بينهم ، في الحقيقة الثقوب تنتج بشكل نادر وباحتمال ضعيف لذا من الممكن أن تكون المفسر لأحداث غريبة نادرة كظاهرة (CLEs) Centauros.

كلمات مفتاحية : الأشعة الكونية ، الشلالات الهوائية، الأبعاد الإضافية ، الثقوب السوداء المجهرية.

Abstract :

In models with large extra dimensions, the interactions of ultra high-energy particles can create mini black holes; this happens when ultra high-energy cosmic rays interact with the nucleons of the Earth's atmosphere. These mini black holes then decay in the atmosphere and produce characteristic air showers. An advanced fortran Monte Carlo code is developed and used to simulate black hole extensive air showers and investigated the characteristics of these events.

In this work, we compare the air showers from black holes decay with those of the standard model and discuss possible criteria allowing the distinction between them. Indeed mini BH's have a weak probability of being produced and could be just what we need to explain the rarity of exotic events as Centauros like events (CLEs).

Key words : Cosmic Rays, Air Showers, Mini Black Holes, Extra Dimensions

Résumé :

Dans les modèles de larges dimensions supplémentaires, les interactions des particules de haute énergie peuvent créer de petits trous noirs ; ceci se produit quand les rayons cosmiques de haute énergie collisions avec les nucléons de l'atmosphère de la terre. Ces petits trous noirs se décomposent dans l'atmosphère alors produit les gerbes. Se basant de méthode Monte Carlo pour simuler les gerbe et étudié caractéristiques de ces événements.

Dans ce travail nous comparons les gerbes des trous noirs avec ceux du modèle standard et discuter les critères possibles en permettant la distinction entre eux. En effet petits trous noirs ont production par une probabilité faible et pourraient être au juste de ce que nous avons besoin pour expliquer la rareté des événements exotiques comme événement centauros (cles).

Mots clés : Rayons Cosmiques, Les Gerbes Atmospheriques, Dimensions Supplémentaires, Petit Trou Noir.