

## مقدمة

لقد اهتم العلماء بدراسة الاشعة الكونية لأنها تمدنا بعينة من مادة انتقلت عبر الفضاء لملايين السنين الضوئية ، مما جعلهم يتوصلون بأن الأشعة الكونية تنشأ من مصادر عديدة في الفضاء ، مثل النجوم المنفجرة المسماة بالسوبر نوبا (supernova) والنجوم عالية الكثافة المسماة المنبضات (pulsars) ، والبعض الاخر تتجه الشمس خاصة خلال التوهجات الشمسية التي تحدث مرة أو مرتين كل 11 سنة ، مولدة جرعة إشعاعية كبيرة إلى الغلاف الغازي للأرض . الأشعة الكونية ذات الطاقة العالية جداً تستطيع احتراق الغلاف الجوي للأرض ، وتؤدي هذه التصادمات إلى تحطيم كلٍّ من الشعاع الكوني والذرة ، مولداً فيضاً من الجسيمات تحت الذرية ذات الطاقة العالية . تصل بعض هذه الجسيمات بالفعل إلى سطح الأرض ، بل إن منها ما يخترق الأرض إلى عمقٍ كبير . و الأشعة الكونية موجودة باستمرار و تصيب كل الأحياء على الأرض ، ولكن قدرها قليل ولا يهدد الحياة على الأرض ، فهي في صحبتنا دائماً منذ الخليقة . و بازدياد الارتفاع في الجو يزداد تأثير الأشعة الكونية علينا خاصة عند الرحلات بالطائرة . لهذا يجب أن لا يبقى رواد الفضاء طويلاً في رحلاتهم الفضائية ، كذلك الطيارون الذين يعملون لأوقات طويلة في الجو معرضون لهذه الأشعة أكثر من الشخص العادي الذي يعيش على الأرض . ولهذا تختبر صحة الطيارين من حين لآخر للإطمئنان على سلامتهم من خلال قياس الجرعة الممتصة . في هذا العمل نقوم بحساب الجرعة الممتصة للأشعة الكونية من عدة ارتفاعات ومن أزمنة مختلفة ، و قد قمنا بتقسيم العمل الى ثلاثة فصول ، الفصل الأول يتحدث عن الأشعة الكونية والفصل الثاني يعنى بتفاعل الاشعاعات مع المادة والفصل الثالث عن قياس الجرعة للاشعة الكونية .

## الفصل الأول

# الأشعة الكونية

الأشعة الكونية (cosmic rays) هي عبارة عن جسيمات ذات طاقة عالية تأتي من الفضاء بأعالي الغلاف الجوي للأرض . 90% من الأشعة الكونية هي عبارة عن بروتونات (protons) و نحو 9% منها عبارة عن جسيمات ألفا ( $\alpha$ ) أي نوى ذرات الهيليوم (He) و نحو 1% أي إلكترونات .

مسار الأشعة الكونية في الفضاء يماثل خطوط القوى المغناطيسية ، و بدراسة أنواع الأشعة الكونية المختلفة يمكن معرفة كيفية تكوين النجوم و نشوء الكون . قد تحمل الأشعة الكونية طاقة عالية جداً تفوق 1000 GeV ، وهذا القدر من الطاقة أكبر بكثير مما استطاع العلماء الحصول عليه في معجلات الجسيمات حتى وقت قريب ، وقد بدأ مصادم الهدرونات الكبير (LHC) المبني تحت الأرض باتساع 27 km قرب مدينة « جينيف » بتسريع البروتونات إلى نحو 7000 GeV .

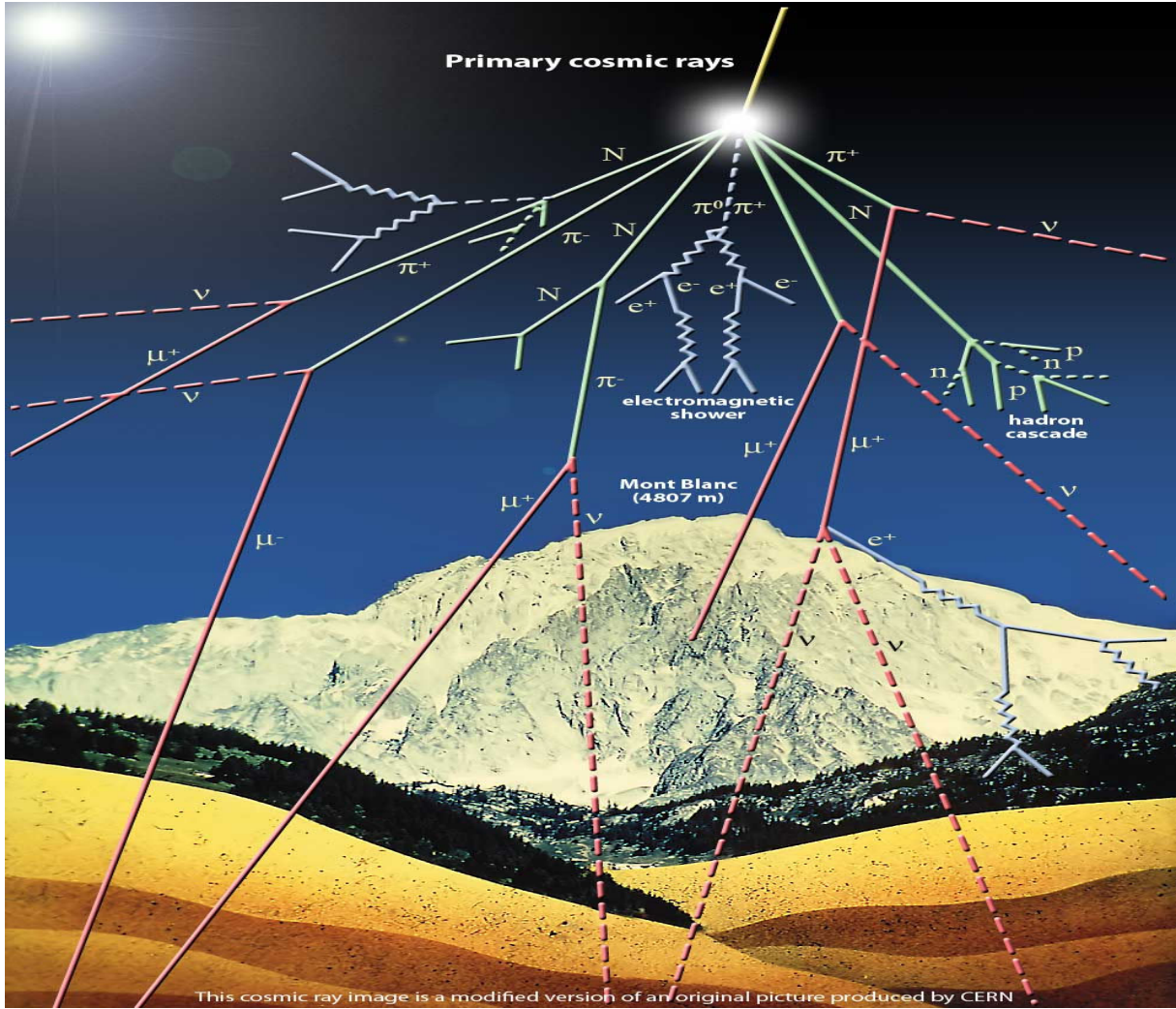
# 1.1 أصل وتشكيل الأشعة الكونية

كانت الفكرة الأكثر جاذبية المتعلقة بأصل الأشعة الكونية قد صدرت عن « زويكي » (Zwicky) في عام 1938 ، وهي تقول إن النجوم المنفجرة المسماة بالسوبرنوفات (supernova) تنتج الأشعة الكونية بتسريعها للمادة التي أنتجتها كنجوم عبر التمدد السريع جداً لغلافها ، وكانت هذه النظرية مرضية تماماً على المستوى الطاقوي ، وظلت مقبولة حتى عام 1985 . أما اليوم ، فنعلم أن الغزارة النسبية لمختلف الأنواع الكيميائية في مصادر الأشعة الكونية (والتي تسمى التركيب الأولي) تختلف بشكل جذري عن التركيب الأولي للمادة التي تم تركيبها بواسطة النجوم المنفجرة والتي انقذت إلى الفضاء بسبب انفجارها . وإن كانت بعض النجوم التي تثور أو تطلق انقذافات هائلة من الطاقة ومنها ما يشبه شمسنا يمكن أن تكون مصدر جزء من الأشعة الكونية ، لكننا لا نزال نجهد اليوم مصدر أو مصادر الجزء الأكبر من هذه الأشعة الكونية عالية الطاقة . ولكن هل نعرف على الأقل كيف تكتسب هذه الأشعة طاقتها العالية ؟

طرح إحدى أكثر الأفكار جاذبية حول هذه النقطة من قبل « شاتزمان » (Schatzman) في عام 1966 ، عندما بين أن « موجة الصدم » الناتجة عن انفجار السوبرنوفات يمكن أن تعطي ، من خلال ضغطها بعنف للحقل المغناطيسي ما بين النجمي أثناء مرورها به ، وبعد عشر سنوات تم الجمع بين هذه النظرية وأخرى كان قد طرحها « فرمي » (Fermi) منذ عام 1948 ، ووفقها يمكن للأشعة الكونية أن تكتسب الطاقة بارتدادها على السحب ما بين النجمية وهي في حركة دائمة . أما اليوم فإن النظرية الحديثة تقول إن الجسيمات التي تصبح أشعة كونية ترتد على تموجات الحقل المغناطيسي ما بين النجمي من على طرفي موجة الصدم . ففي اللحظة التي تغلف فيها موجة الصدم الآتية من سوبرنوفات نجماً ثورانياً يطلق الجسيمات المنخفضة الطاقة إنما تكتسب هذه الجسيمات التسارع بفضل هذه الآلية حتى تصل طاقتها إلى نحو  $10^{14}$  eV على الأقل . فلا بد بالتالي من آلية أكثر فعالية لتفسير الطاقات الأعلى من ذلك ، والتي لوحظت حتى حدود  $10^{20}$  eV .

من خلال هذه النظريات توصل العلماء إلى أن النجوم المنفجرة المسماة بالسوبرنوفات (supernova) ، والنجوم عالية الكثافة المسماة المنبضات (pulsars) ، تنتج كميات كبيرة من الأشعة الكونية كما أن بعض الأشعة الكونية تنتجها الشمس لكن الأشعة الكونية ذات الطاقة العالية جداً هي فقط التي

تستطيع اختراق الغلاف الجوي للأرض ، وأقل من واحد في المليون من الأشعة المُخترقة هو الذي يصل إلى سطح الأرض دون أن يصطدم بذرة في الهواء ، وتؤدي هذه التصادمات إلى تحطيم كلِّ من الشعاع الكونيِّ والذرة ، مولدًا فيضًا من الجسيمات تحت الذرية ذات الطاقة العالية ، تصل بعض هذه الجسيمات بالفعل إلى سطح الأرض ، بل إن منها ما يخترق الأرض إلى عمقٍ كبير كما هو مبين في الشكل 1.1 .



الشكل 1.1 : اختراق الاشعة الكونية للغلاف الارضي الجوي .

يطلق على الأشعة الكونية التي تتولد في الفضاء الخارجي اسم الأشعة الكونية الأولية (primary) ، و تسمى أيضاً الأوليات ، وهناك نوعان من الأوليات هما الجرية (galactic) والشمسية (solar) ، بينما يُطلق على الفيض المتولّد في الغلاف الجويِّ اسم الأشعة الكونية الثانوية (secondary) أو الثانويّات .

## 2.1 الأشعة الكونية الأولية

### 1.2.1 الأشعة الكونية المجرية

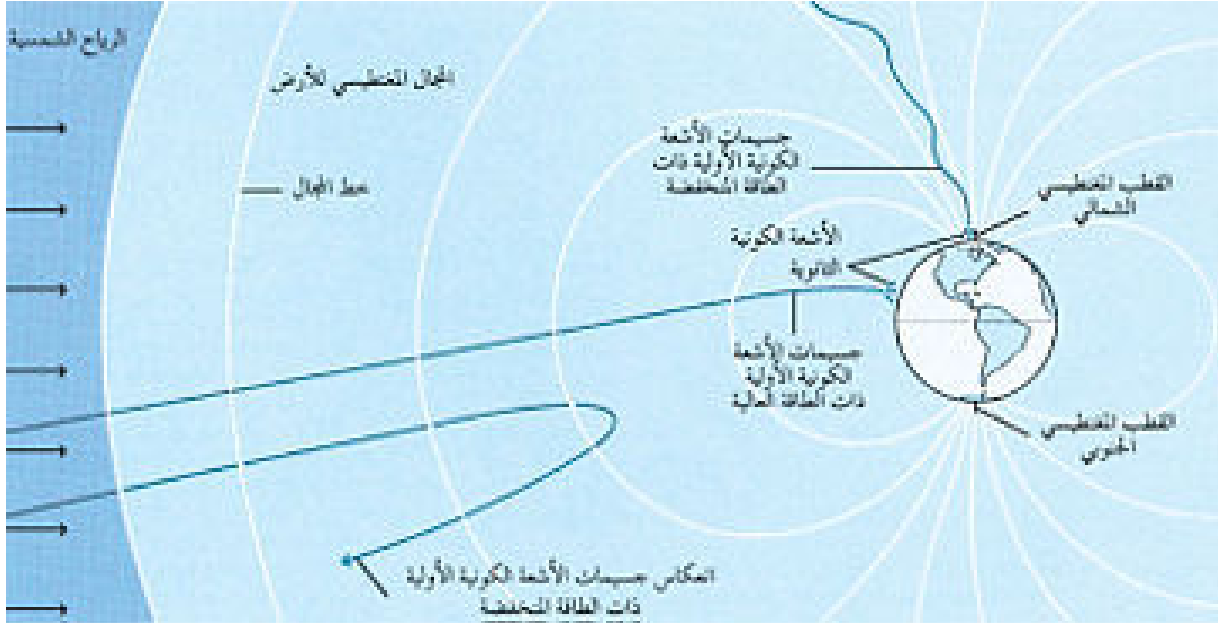
وتأتي هذه الأشعة من خارج المجموعة الشمسية ، وهي تُشكّل معظم الأوليات في أثناء فترات دخول الشمس ، يسقط في المتوسط شعاعٌ كونيٌّ مجرّيٌّ واحد على كل سنتيمتر مربع من السطح الخارجي للغلاف الجويّ في الثانية . و تتكوّن الأشعة الكونية المجرية من نوى الذرات بنسبة 98% ، والنسبة الباقية وهي 2% مكونة من إلكترونات (electrons) و بوزيترونات (positrons) ، وهي إلكترونات تحمل شحنة موجبة . أما النوى ، فمنها البروتونات (نوى الهيدروجين) بنسبة 87% تقريباً، ومنها نوى الهيليوم (He) بنسبة 12% ، والباقي هي نوى كل العناصر الأثقل من الهيليوم .

يعتقد الفيزيائيون أنّ معظم الأشعة الكونية اكتسبت طاقتها العالية نتيجة لتسارعها بسبب موجات صدمية صادرة عن السوبرنوفات (supernova) أو بسبب وجود مجالات مغناطيسية قوية حول النابضات (pulsars) ، ويمكن أيضاً للأشعة الكونية المجرية أن تكتسب طاقةً نتيجةً لتصادماتها مع تصدعاتٍ متحركة في المجالات المغناطيسية الواقعة في الفضاء البيني للنجوم ، ويمكن تصوير المجال المغناطيسي على أنه مجموعة خطوط تخيلية للقوة المغناطيسية تمتد في الفراغ حيث تستطيع الجسيمات أن تتحرك بيسر على خطوط المجال مثلما تتحرك حبيبات مسبحة على خيطها ، إلا أنّ الجسيمات تقابل صعوبةً في الانتقال عبر الخطوط وعندما يتحرك أحد خطوط المجال ، تتحول بعض الطاقة الناشئة عن حركته إلى الجسيمات المتحركة عليه .

ومتى تسارعت الأشعة الكونية المجرية في مجرتنا ، فإنها تظلُّ في المتوسط لمدة عشرة ملايين سنة تنتقل عشوائياً في المجالات المغناطيسية للمجرة ، ومصيرها في النهاية إمّا الهروب من المجرة ، أو فقدان سرعتها نتيجةً لتصادمها مع مادة الفراغ البيني للنجوم .

تعمل الرياح الشمسية على منع بعض الأشعة الكونية المجرية من دخول المجموعة الشمسية ، وتتكون هذه الرياح من ذرات مشحونة كهربائياً تنطلق خارجة من الشمس إلى المجموعة الشمسية ، يُصاحب الرياح الشمسية مجالٌ مغناطيسيٌّ يمنع كثيراً من الأشعة الكونية المجرية من

دخول المجموعة الشمسية ، ويصدق هذا على وجه الخصوص في فترات النشاط المتزايد على سطح الشمس ، ومن ثم يقل تركيز الأشعة الكونية المحرمة بالقرب من الأرض كلما زاد النشاط الشمسي ، وهذا ما يحدث دوريًا كل إحدى عشرة سنة فيما يُسمّى دورة الكلف الشمسي كما هو ملاحظ في الشكل 2.1 .



الشكل 2.1 : تأثير الرياح الشمسية على شدة الأشعة الكونية .

## 2.2.1 الأشعة الكونية الشمسية

و هي تصدر عن الشمس أثناء التوهج الشمسي ، والتوهج الشمسي هو فوران على سطح الشمس له مظهر خلّاب ، ويحدث على وجه الخصوص أثناء فترات النشاط العالي في دورة الكلف الشمسي . وتكون طاقة الجسيمات المطلقة في هذه التوهجات في حدود بضع MeV إلا أنّ طاقة الجسيمات المطلقة في توهجات كبيرة قد تصل إلى بضع GeV وأكثر الأشعة الشمسية هي البروتونات ذلك أنّ بعضها يتكون من النوى الثقيلة ويتكوّن بعضها من الإلكترونات .

وجسيمات أخرى ذرية ذات طاقة عالية في الفضاء تصل طاقة بعض الجسيمات المسرّعة في الغلاف المغناطيسي للأرض إلى بضع MeV و الغلاف المغناطيسي هو منطقة الفضاء التي يشغلها المجال المغناطيسي للكوكب . ولكلّ من كواكب المشتري (Jupiter) و زحل (Saturne) و أورانوس

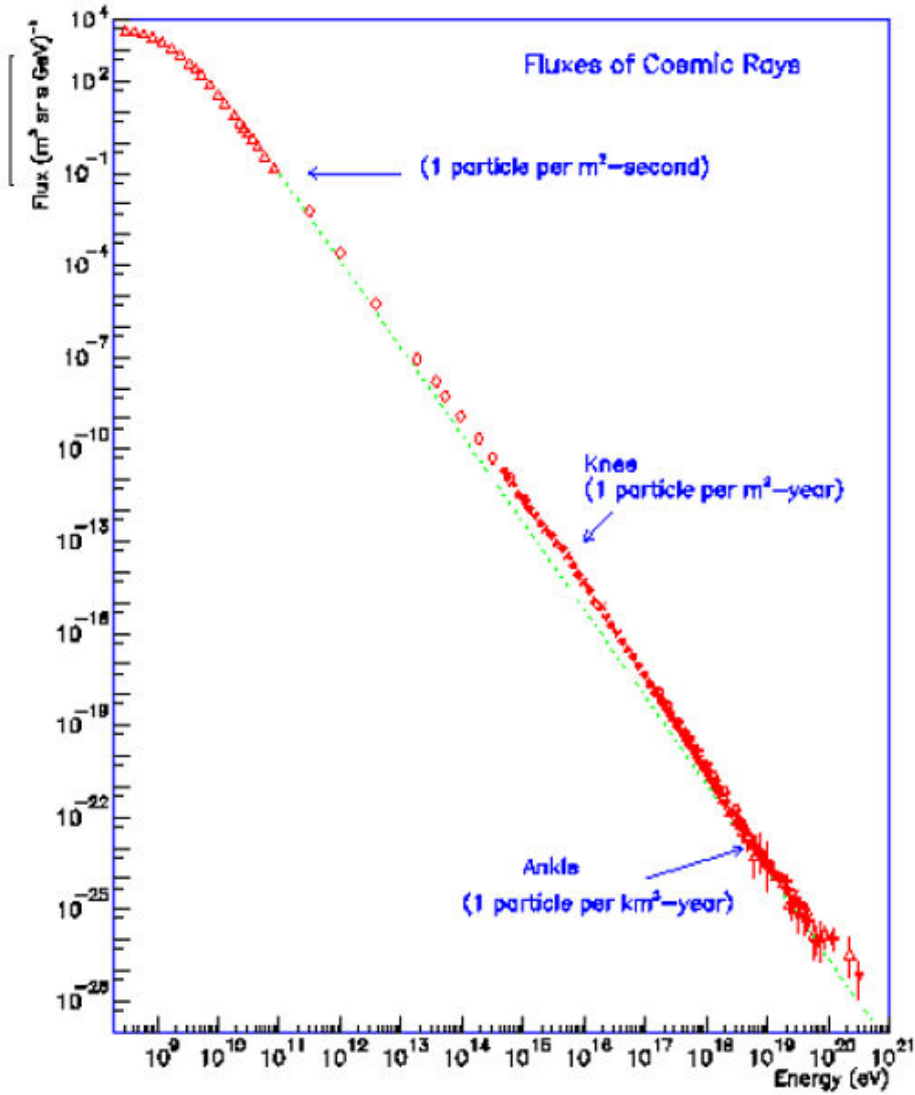
(Uranus) و نبتون (Neptune) غلافٌ مغناطيسي تتسارع فيه الجسيمات لطاقة تبلغ عدة MeV ، لكن معظم الجسيمات تظل أسيرة الغلاف المغناطيسي للكوكب مكونةً أحزمة من الإشعاع حوله . كذلك تعمل الموجات الصدمية من الرياح الشمسية على تسارع الجسيمات إلى بضعة MeV ، تتولد هذه الموجات الصدمية من التوهج الشمسيّ أو من التيارات السريعة في الرياح الشمسية التي تسلك سلوك العاصفات والنفاثات .

### 3.2.1 الطيف الطاقوي للأشعة الأولية

تشكل السلسلة الطاقوية لجسيمات الأشعة الكونية الابتدائية طيفا طاقيًا عريضًا جدًا إذ تمتد الطاقات المقيسة لهاته الجسيمات من  $10^8$  eV إلى  $10^{21}$  eV . نعتبر عن الطيف الطاقوي للأشعة الكونية بواسطة التدفق التفاضلي و هو عدد الجسيمات التي تملك طاقة تقع في المجال  $E$  و  $E + dE$  أو بواسطة التدفق التكاملية وهو عدد الجسيمات التي تملك طاقة مقدارها  $E$  وتوجد عدة طرق لقياس أو تعريف التدفق هي كما يلي :

- عدد الجسيمات أو النوى الذرية بدلالة الطاقة الكلية  $E_0$  و نستعمل هذا التعريف في التجارب التي لا تتميز ولا تكشف طبيعة الجسيمات الابتدائية .
- عدد الجسيمات أو النوى الذرية بدلالة الطاقة لكل نوية  $E_0/A$  حيث  $A$  هو عدد كتلي و يستعمل هذا التعريف لدراسة التفاعلات مع الوسط البين-نجمي .
- عدد النويات بدلالة الطاقة لكل نوية  $E_0/A$  و نستعمل هذه الطريقة لنتبع إنتاج الجسيمات الثانوية كالميونات في الغلاف الجوي الأرضي أو النيوتريونات في الغلاف النجمي .
- عدد الجسيمات بدلالة العطالة المغناطيسية (rigidity) يناسب هذا دراسة انجاس و تسريع الأشعة الكونية عندما تتفاعل مع الحقول المغناطيسية .

الشكل 3.1 يوضح مخطط الطيف التفاضلي للطاقة الذي يتميز بالانتظام شبه تام خصوصًا في المجال  $10^{10}$  eV إلى  $10^{12}$  eV ينقسم هذا المجال الى قسمين :



الشكل 3.1 : الطيف الطاقي التفاضلي للاشعة الكونية الابتدائية .

- من  $10^{10}$  eV إلى  $4 \times 10^{15}$  eV يتغير التدفق التفاضلي بالصيغة  $dN/dE \sim 10^{-2.7}$  ، هذا ما يدل على ان مثل هذه الجسيمات توجد خارج مجرتنا .

- من  $10^{16}$  eV إلى  $10^{18}$  eV يتغير التدفق التفاضلي بالصيغة  $dN/dE \sim 10^{-3.2}$  ، مما يدل على ان هذه الجسيمات تتوجد خارج مجرتنا .

نلاحظ هنا أن الطيف الطاقي للاشعة الكونية العالية الطاقة يتميز بانكسار في حوالي  $10^{15}$  eV و هو ما يعرف بالركبة (knee) و انكسار ثاني في حوالي  $10^{16}$  eV يعرف بالعقب (ankle) .



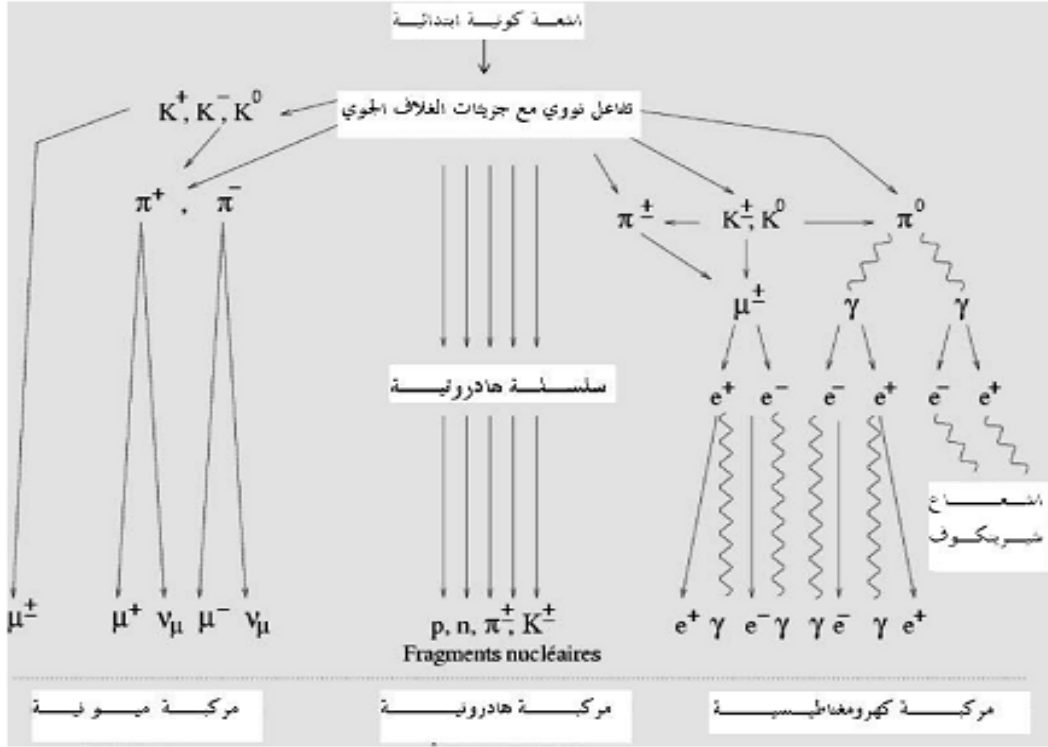
## 3.1 الأشعة الكونية الثانوية

الأشعة الكونية الثانوية أو الثانويات تنتج عن تصادم الأشعة الكونية الأولية بالنوى الذرية الموجودة في الطبقات العليا من الغلاف الجوي للأرض . ينشأ عن هذه التصادمات تفتت الأوليات وتحوّل جزء من طاقتها إلى جسيمات تحت ذرية . يتصادم عددٌ من الجسيمات الجديدة بالنوى الأخرى في الغلاف الجويّ منتجةً المزيد من الجسيمات ، وتنتج مثل هذه التصادمات المتتالية فيضاً من الثانويات التي تحتوي على كافة أنواع الجسيمات تحت الذرية . وهذه الأشعة الكونية الثانوية توجد بدءاً من أعلى طبقات الجو ، وحتى أعماق المناجم في الأرض .

يعمل الغلاف الجويّ على إبطاء الثانويات ، وعلى ذلك فلا يصل إلى الأرض إلا نسبة صغيرة . في المتوسط ، يصل جسيم واحد إلى كل سنتيمتر مربع من سطح الأرض في الدقيقة . ومعظم هذه الجسيمات جسيمات تحت ذرية تُسمّى ميونات (muons) كما هو موضح في الشكل 4.1

يؤثر المجال المغنطيسيّ للأرض على كثافة الثانويات في الغلاف الجويّ . وخطوط هذا المجال منحنيات من القطب المغنطيسيّ الشماليّ إلى القطب المغنطيسيّ الجنوبي ولا يستطيع اختراق المجال المغنطيسيّ بالقرب من خط الاستواء إلا الأوليات ذات الطاقات العالية جداً ؛ وذلك لأنها تُضطر هناك إلى عبور خطوط المجال . أما عند القطبين ، فحتى الأوليات ذات الطاقة المنخفضة تستطيع أن تتحرك على خطوط المجال وتخترق الغلاف الجويّ . وعلى ذلك ، فإنّ كثافة الثانويات تكون أقل ما يمكن عند خط الاستواء ، وتزداد كلما اتجهنا نحو القطبين . مستوى الإشعاع الناتج عن الأشعة الكونية على الأرض أقل بكثير من أن يسبب أضراراً للكائنات الحية .

لقد تعرضت بعض مركبات الفضاء لمشاكل نتيجة لتأثير الأشعة الكونية المجرية على الدوائر الإلكترونية للمركبة . ويستطيع شعاعٌ كونيّ منفردٌ نجح في اختراق قطعة صغيرة من دائرة أن يُغيّر المعلومات المحفوظة على هذه القطعة . ويكاد يكون من المستحيل إيجاد حماية ضد الأشعة الكونية المجرية نظراً لطاقتها العالية ، ولذلك فقد اضطر العلماء والمهندسون إلى تطوير مكونات للدوائر أقل حساسية لتأثيرات الأشعة الكونية .



الشكل 4.1 : اصطدام جسيم اولي من الأشعة الكونية بالطبقات العليا من جو الأرض وتكوين سيل من الجسيمات وأشعة غاما .

يأتي أحد التأثيرات المفيدة للأشعة الكونية من تفاعل النويات مع نوى النيتروجين في الغلاف الجوي للأرض . هذا التفاعل يُنتج نوعاً مشعاً من الكربون يُسمى الكربون الإشعاعي وتقوم الكائنات الحية باستمرار بإدماج الكربون ، بما في ذلك الكربون الإشعاعي ، في خلاياها . ونظراً لأن الكربون الإشعاعي يتحلل بمعدل ثابت ، فإن القدر المتبقي منه في المادة الحية يدل العلماء على عمر هذه المادة .

## الفصل الثاني

# تفاعل الإشعاعات مع المادة

من الضروري دراسة تفاعل الإشعاع مع المادة لانه يعطينا معلومات عن كمية الجرعة الممتصة من قبل الاشعة الكونية ، والمقصود هنا بكلمة الاشعاعات هي جميع أنواع الاشعاعات كالجسيمات المشحونة الثقيلة أي جسيمات الفا ( $\alpha$ ) و البروتونات (p) ، و الجسيمات المشحونة الخفيفة كالإلكترونات ( $e^-$ ) و البوزيترونات ( $e^+$ ) و اشعاعات غاما ( $\gamma$ ) والنيوترونات (n) . كما يختص هذا الفصل في دراسة التأثير الماكروسكوبي المتبادل بين الاشعاعات و المادة مثل امتصاص الاشعاعات في المادة و اختراقها لها و كذلك لمعرفة كميات الإشعاع و لهذا يمكن تقسيم تفاعلات الإشعاع مع المادة إلى الأنواع الثلاثة الآتية :

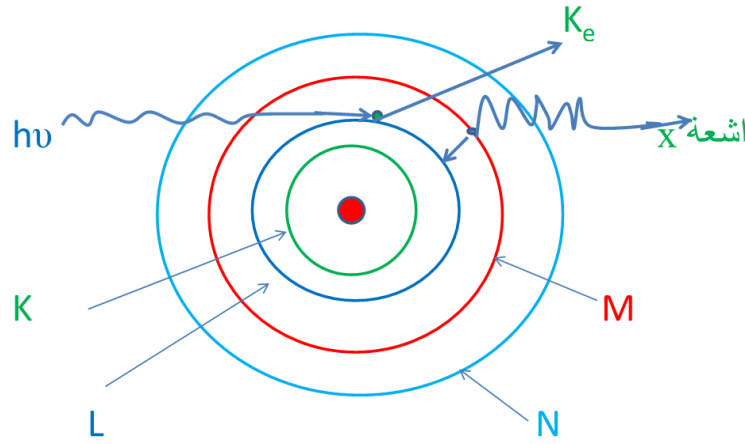
- تفاعل الفوتون مع المادة .
- تفاعل النيوترون مع المادة .
- تفاعل الجسيمات المشحونة الثقيلة مع المادة .

## 1.2 تفاعل الفوتون مع المادة

تختلف أساليب انتقال الطاقة من اشعاعات غاما ( $\gamma$ ) إلى المادة اختلافا جوهريا عن تلك الأساليب التي تنتقل بها الجسيمات المشحونة إلى المادة ، فعندما يسقط فوتون غاما ( $\gamma$ ) على المادة فإنه يمكن أن يفقد طاقته ويمنحها للمادة عن طريق إحدى العمليات الرئيسية الثلاثة التالية :

### 1.1.2 تأثير الكهروضوئي

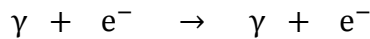
يحدث التأثير الكهروضوئي (photoelectric effect) عندما يسقط الفوتون على إلكترون داخلي ، أي إلكترون مرتبط بالمدار K او L ، حيث يمتص كليا وبعدها يغادر الإلكترون مداره بطاقة معينة ، وبالتالي يفنى هذا الفوتون كما هو موضح في الشكل 1.2 . يتم هذا التفاعل عندما يكون لدينا  $E \leq 0.5 \text{ MeV}$  .

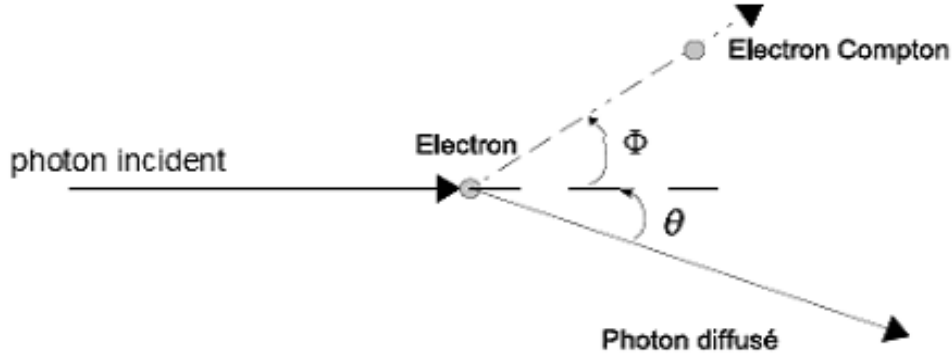


الشكل 1.2 : ظاهرة التأثير الكهروضوئي (photoelectric effect) .

### 2.1.2 تأثير كومبتون

يتم تأثير كومبتون (Compton effect) بتفاعل الفوتون غاما ( $\gamma$ ) مع إلكترون حر او مرتبط ارتباطا ضعيفا مع النواة ، حيث يتصادم الفوتون مع الإلكترون الذي يرتد و خلالها ينتقل جزء من الطاقة إلى الإلكترون كما هو موضح في الشكل 2.2 . و هذا التفاعل خاص بالطاقات العالية و تفاعله معطى كالتالي :

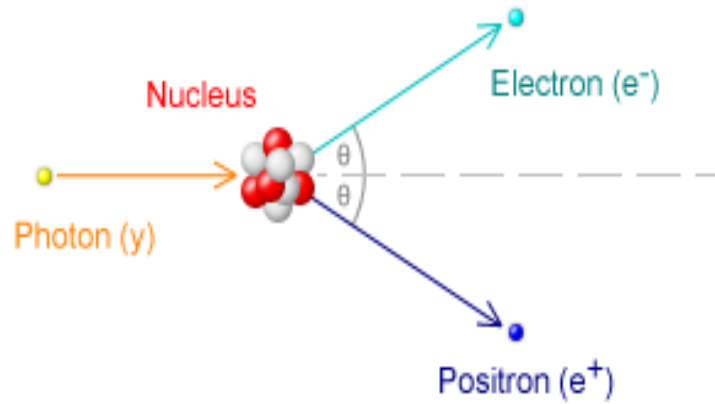
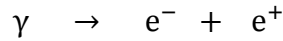




الشكل 2.2 : ظاهرة تأثير كومبتون (Compton effect) .

### 3.1.2 إنتاج الأزواج

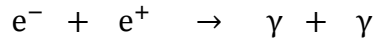
يحدث إنتاج الأزواج (pair creation) عندما يقترب الفوتون اقترابا كبيرا من نواة الذرة ، وذلك لحفظ كمية الحركة والطاقة ويتفاعل مع مجالها الكهربائي ، و خلال هذا التفاعل يفقد الفوتون طاقته بالكامل منتجا زوجا إلكترونيا-بوزيترونيا ( $e^+e^-$ ) ، و بالتالي يفنى هذا الفوتون (الشكل 3.2) ، و لا يمكن أن يحدث هذا النوع من التفاعل إذا كانت طاقة الفوتون أعلى من 1.022 MeV ، و هي الطاقة اللازمة لإنتاج كتلتي السكون لكل من الإلكترون و البوزترون . هذا التفاعل معطى وفق الآتي :



الشكل 3.2 : إنتاج زوجي  $e^+e^-$  ناتج من اصطدام الفوتون مع نواة ذرة .

## 4.1.2 عملية الافناء

الإفناء (annihilation) هي العملية المعاكسة لعملية إنتاج الأزواج وفيها يختفي كلا من الإلكترون و البوزيترون ويظهر فوتونان يتحركان في اتجاهين متعاكسين طاقة كل منهما 0.511 MeV ، كما هو موضح بالتفاعل التالي :



## 2.2 تفاعل النيوترون مع المادة

### 1.2.2 التصادم المرن

في هذه الحالة يسقط النيوترون على النواة بحيث يعطيها جزءا من طاقته ويتشتت هو بطاقة أقل من طاقته الابتدائية بينما ترتد النواة بطاقة تساوي تلك المنتقلة إليها بالتصادم ، ويسمى هذا التصادم بالمرن (elastic collision) لأن كمية وطاقة الحركة محفوظتين قبل وبعد التصادم . قد يتم التصادم المرن بصورتي :

أ) قد يحدث امتصاص أولا للنيوترون بواسطة النواة المقذوفة ويتم تكوين ما يعرف بالنواة المركبة التي تقوم بإطلاق نيوترون آخر بعد ذلك وهو النيوترون المتشتت .

ب) قد يحدث التفاعل مباشرة دون المرور بمرحلة النواة المركبة حيث يتشتت النيوترون مباشرة عن النواة .

### 2.2.2 التصادم اللامر

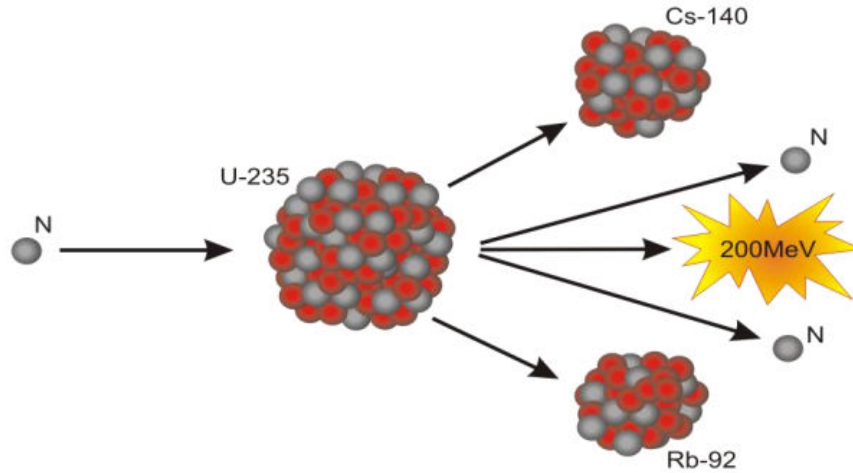
في التصادم اللامر (inelastic collision) لا تكون طاقة الحركة محفوظة حيث أنه عند سقوط النيوترون على النواة فإنه يعطيها جزءا من طاقته تستخدم لإثارتها أولا ثم تمتص جزءا آخر لتنطلق به بطاقة حركة معينة .

## 3.2.2 تفاعل النيوترونات السريعة

تتفاعل النيوترونات السريعة مع المادة حيث تمتص بواسطة وينتج عن ذلك جسيمات مشحونة كالبروتون . أما النيوترونات السريعة جدا ذات الطاقة أكبر من 100 MeV فإنه ينتج عن تفاعلها مع المادة فيضا من الفوتونات او الجسيمات الخفيفة والتي تضم العديد من الاحتمالات .

## 4.2.2 الانشطار النووي

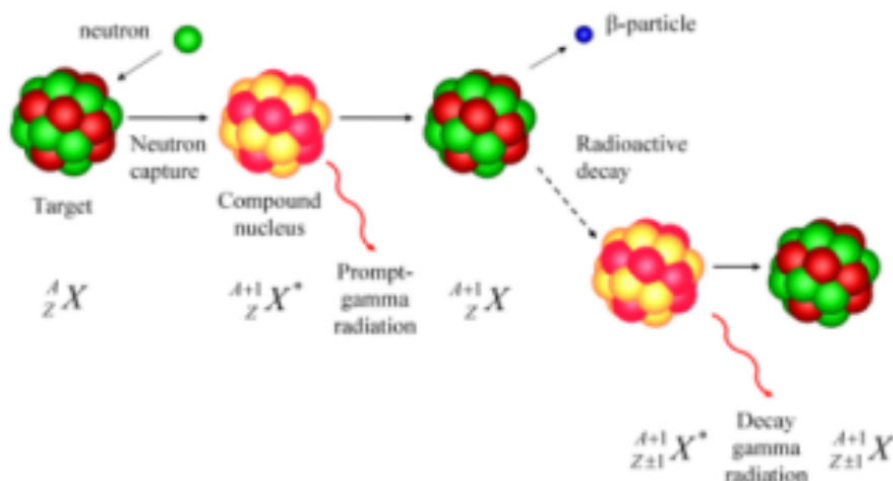
عندما تمتص بعض النوى النيوترونات ، فإن طاقة الإثارة تصبح كافية لإحداث الانشطار النووي (nuclear fission) ، وقد وجد أن ذلك يحدث للنوى الثقيلة وبخاصة اليورانيوم (uranium) وما بعده حيث تنشط النواة عند قذفها بنيوترون إلى نواتين أصغر منها تعرفان بشظيتي الانشطار وتنطلق من هذا التفاعل طاقة هائلة تقدر بحوالي 200 MeV .



الشكل 4.2 : مثال لعملية الانشطار .

## 5.2.2 تفاعلات الأسر النيوتروني

يحدث في العديد من العناصر ان تقوم النواة بأسر النيوترون الساقط عليها وامتصاص كل طاقته ، فتصبح لأجل ذلك في حالة إثارة ، ولهذا يعرف أحيانا هذا النوع من الامتصاص بالاسر الاشعاعي (radiative capture) او بتفاعل نرون-غاما ( $n, \gamma$ ) ، ومثل هذه التفاعلات تتمتع باحتمال تفاعل كبير ومن ثم يمكن استخدامها للكشف عن النيوترونات بكفاءة .



الشكل 5.2 : تفاعل الأسر النيوتروني .

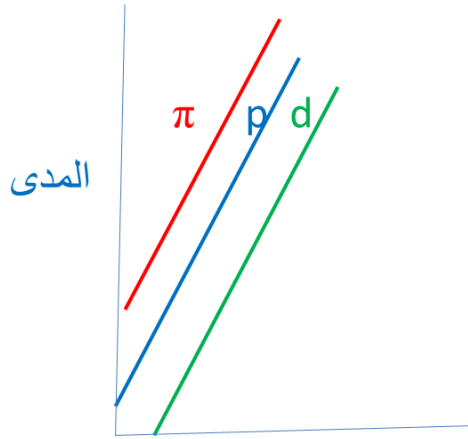
## 3.2 تفاعل الجسيمات المشحونة الثقيلة مع المادة

عند سقوط الجسيمات المشحونة الثقيلة كجسيمات ألفا ( $\alpha$ ) و البروتونات (p) وغيرها على المادة ، تنتقل طاقة هذه الجسيمات الى الوسط الذي تعبره عن طريق التصادمات الغير مرنة مع الكتلونات الذرات ، محدثة اثاره للإلكترونات أي انتقال احد الكتلونات الذرة من مداره إلى مدار اخر ذي طاقة أعلى ، أو عن طريق فصل الالكتران من الذرة وهذا ما يسمى بالتأين الإبتدائي (primary ionisation) و يمثل 30% من اجمالي التأين الناتج عن توقف الجسيم المشحون في المادة ، أما النسبة 70% من باقي إجمالي التأين فتمثل التأين الثانوي (secondary ionisation) وهي ناتجة عن تأين الالكترونات الابتدائية لذرات المادة اثناء انطلاقها بسرعة عالية .

### 1.3.2 المدى

أثر الجسيمات المشحونة الثقيلة في المادة يكون عبارة عن خط مستقيم و هو مايعرف بالمدى (range) . هو اقصى مسافة يتحركها الاشعاع داخل المادة قبل ان يمتص او يتوقف يعتمد المدى على طاقة الجسيم ، ونوعه و يمكن تقدير المدى عمليا لكثير من المواد كما في الشكل 6.2 :





طاقة الجسيم E(MeV)

الشكل 6.2 : تغير المدى بدلالة طاقة الجسيم .

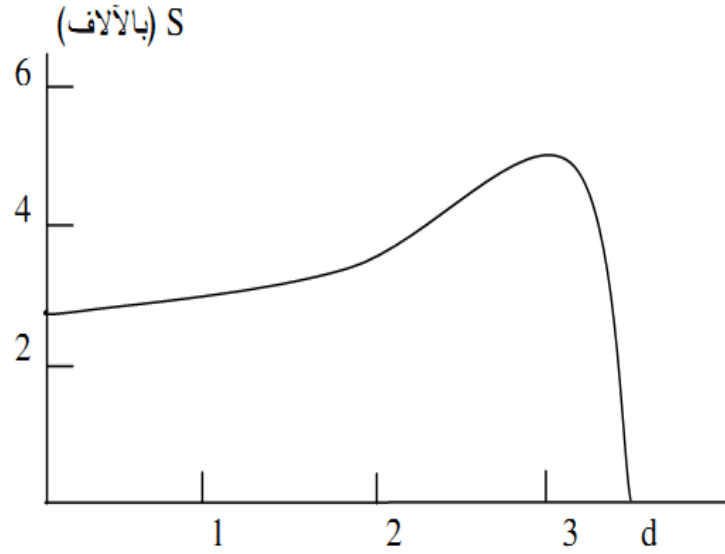
من خلال المنحنى نلاحظ ما يلي :

أ) طول الأثر للجسيمات هو نفسه في البداية تقريبا وذلك لان طاقتها الابتدائية تقريبا هي نفسها .

ب) هناك اختلاف طفيف في مدى الجسيمات من نفس النوع وذات الطاقة الواحدة و هذا راجع الى اختلاف المسافة بين التصادمات .

## 2.3.2 التأين النوعي

يعرف على انه عدد الأزواج الإلكترونية-الأيونية المتكونة خلال مليمتر واحد (1 mm) من الأثر في الهواء الجوي ، فعندما تكون مثلا طاقة الجسيمات ألفا ( $\alpha$ ) في حدود MeV ، تصل قيمة التأين النوعي الى آلاف زوج لكل مليمتر من الأثر . من الشكل 7.2 الذي يوضح العلاقة بين التأين النوعي (S) لجسيم واحد من جسيمات ألفا وبين المسافة من مصدر هذا الجسيم ، نلاحظ انه عندما تكون طاقة الجسيم ألفا ( $\alpha$ ) كبيرة أي ان الجسيم في بداية الأثر يكون التأين النوعي (S) صغيرا ، وبعدها يزداد تدريجيا الى ان يصل الى حد اقصى ، ذلك لان الجسيم في نهاية الأثر تكون صغيرة جدا وهذا كله راجع الى زمن تعرض الكترونات ذرات المادة للمجال الكهربائي للجسيم . إذن الأثر النوعي يعتمد على طاقة الجسيم ونوعه .



الشكل 7.2 : العلاقة بين التأين النوعي للجسيم واحد من جسيمات ألفا وبين المسافة من مصدر الجسيم .

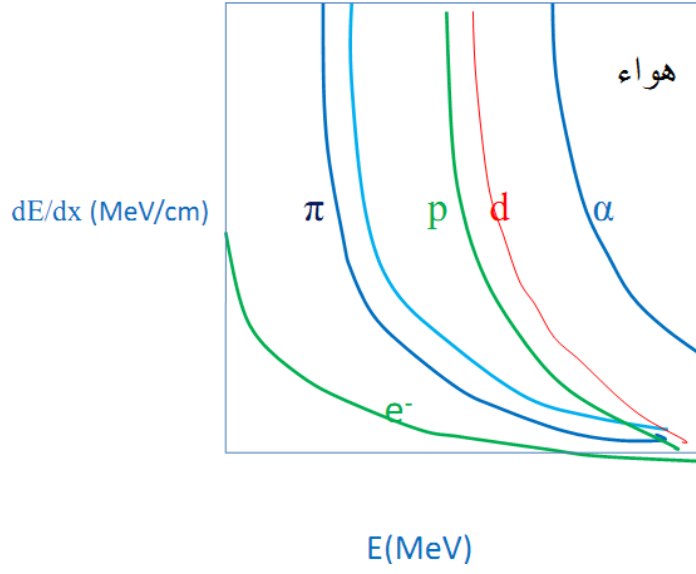
### 3.3.2 قدرة الإيقاف

قدرة الإيقاف (stopping power) هي عبارة عن معدل فقد الجسيم المعين ذي طاقة معينة لطاقته داخل المادة ، وترتبط قدرة الإيقاف بالتأين النوعي بالعلاقة التالية :

$$-\frac{dE}{dX} = \bar{w}S$$

حيث تمثل  $\bar{w}$  القيمة المتوسطة للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكترون-أيون ، والاشارة السالبة تعني فقد الطاقة كلما زادت مسافة التغلغل في المادة ، و  $S$  التأين النوعي . فمن خلال هذه العلاقة يمكن تعريف قدرة الإيقاف على انها كمية الطاقة التي يفقدها الجسيم في مليمتر واحد من الأثر .

من خلال المنحنى (الشكل 8.2) نلاحظ ان في حالة الطاقات المنخفضة يقل فقد الطاقة ويزاد فقدها في حالة الطاقات العالية حيث مثلا نلاحظ ان قدرة الإيقاف للجسيم ألفا ( $\alpha$ ) أكبر من قدرة الإيقاف لدى البروتونات . وبالتالي نستنتج أن قدرة الإيقاف تعتمد على نوع الجسيم وطاقته وكذلك نوع المادة .



الشكل 8.2 : قوة الإيقاف بواسطة الهواء كدالة في طاقة بعض الجسيمات .

## الفصل الثالث

# قياس جرعات الأشعة الكونية في الغلاف الجوي

يتعرض الناس للإشعاع الطبيعي يومياً ، ويأتي الإشعاع الطبيعي من مصادر عديدة ، بما فيها أكثر من 60 مادة مشعة طبيعية المنشأ وموجودة في التربة والماء والهواء ، عن طريق استنشاقه وابتلاعه من الهواء ، كما يتعرض الناس للإشعاع الطبيعي أيضاً عن طريق الأشعة الكونية (cosmic rays) ، وخاصة في الارتفاعات الشاهقة ، وتختلف مستويات التعرض لإشعاع الخلفية نتيجة للاختلافات في التشكيلات الجيولوجية للمنطقة . وهناك أيضاً مصادر بشرية الصنع للإشعاع ، تتراوح في تنوعها من محطات توليد الطاقة النووية إلى الاستخدامات الطبية للإشعاع في تشخيص الأمراض أو علاج المرضى . ونجد أن مصادر الإشعاع المؤين البشرية الصنع الأكثر شيوعاً اليوم هي أجهزة الأشعة السينية وغيرها من الأجهزة الطبية . لهذا للوقاية من هذه الإشعاعات يجب الكشف عن وجودها وتحديد إمكاناتها باستخدام وحدات لقياس كميتها . في عملنا هذا سوف نقوم باستعمال برنامج خاص ، يدعى EXPACS ، نتعرف من خلاله على كمية الجرعة الممتصة التي تسبب فيها الأشعة الكونية في الغلاف الجوي للأرض ، و ذلك بدلالة خط العرض والارتفاع وكذلك الزمن .

## 1.3 تعريف الجرعة

هي مقياس للإشعاع او ما تتلقاه جزيئة ما او تمتصه . و هي عدة أنواع من بينها :

### 1.1.3 الجرعة المكافئة

الجرعة المكافئة (equivalent dose) هي الكمية  $H_{T,R}$  المعرفة على النحو التالي :

$$H_{T,R} = D_{T,R}W_R$$

حيث يرمز  $D_{T,R}$  الى الجرعة الممتصة الناتجة عن الإشعاع من النوع  $R$  موزعة بشكل متجانس على نسيج او عضو  $T$  ، و  $w_R$  الى عامل الترجيح للإشعاع  $R$  . عندما يكون حقل الاشعاع مؤلفا من عدة أنواع من الاشعة لها قيم متباينة ، فإن الجرعة المكافئة تعطى بالعلاقة :

$$H_T = \sum_R D_{T,R}W_R$$

و وحدتها هي J/kg وتسمى أيضا سيفرت (Sv) .

### 2.1.3 الجرعة الفعالة

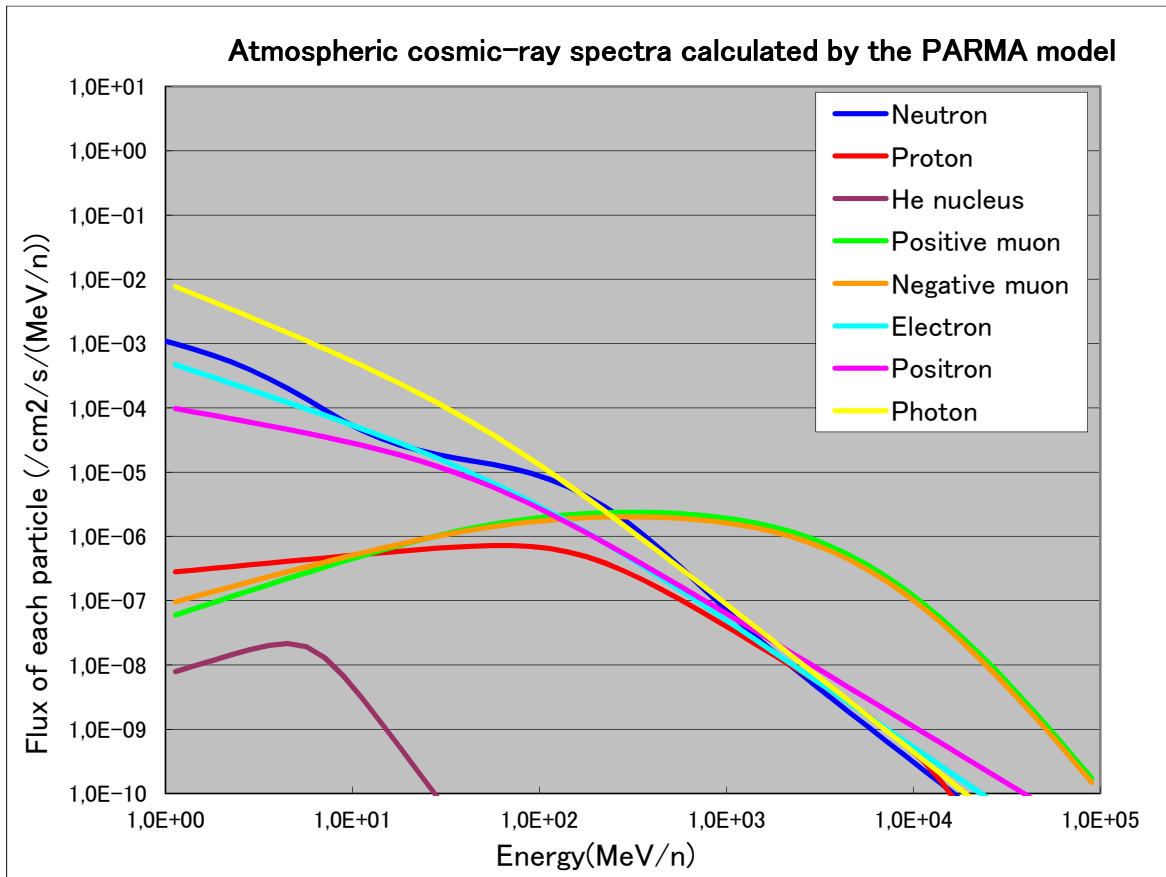
الجرعة الفعالة (effective dose) تربط بالتأثيرات العشوائية على كامل الجسم البشري بعد وزن الجرعات المكافئة للأعضاء طبقا لاسهامها في الضرر العشوائي على كامل الجسم و هي الكمية  $E$  المعرفة بانها مجموع الجرعات المكافئة في الأنسجة بعد ضرب كل منها في عامل النسيج المرجح المناسب وتحسب بالمعادلة التالية :

$$E = \sum_T w_T H_T$$

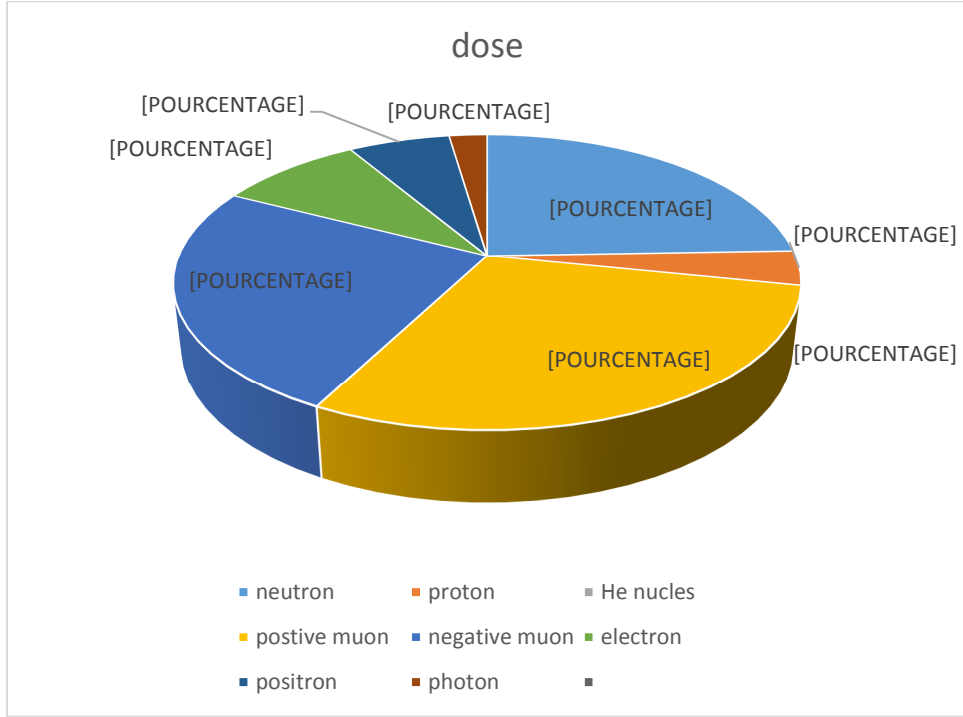
حيث ترمز  $H_T$  إلى الجرعة المكافئة في النسيج و  $w_T$  الى عامل النسيج المرجح للنسيج . وحدة الجرعة الفعالة هي J kg وتسمى سيفرت (Sievert) .

## 2.3 برنامج EXPACS

هو برنامج يعمل على حساب الجسيمات من نوترونات وبروتونات والكترونات وبوزيترونات وفوتونات وميونات الوراثة في أطيف الاشعة الكونية في أي مكان في الغلاف الجوي وعلى ارتفاعات اقل من 20 km ، و بعد هذه الحسابات يعطينا تقدير لقيمة الجرعة . في عملنا هذا سنتطرق الى حساب الجرعة الممتصة بدلالة خط العرض والارتفاع والزمن باستعمال هذا البرنامج . الشكل 1.3 أدناه يوضح الطيف الطاقوي للأشعة الكونية في الغلاف الجوي بالنسبة لمدينة عنابة ، حيث نلاحظ ان منحنى طيف الطاقوي للأشعة الكونية في الغلاف الجوي يختلف باختلاف طاقة كل جسيمة حيث نلاحظ انه يتميز بالتناقص مع عدد الجسيمة الوراثة . و يعطينا الشكل 2.3 الدائرة النسبية التي توضح لنا كمية الجرعة المقاسة بدلالة الجسيمات الكونية .



الشكل 1.3 : منحنى الطيف الطاقوي للأشعة الكونية في الغلاف الجوي .



الشكل 2.3 : الجرعة بدلالة الجسيمات الكونية .

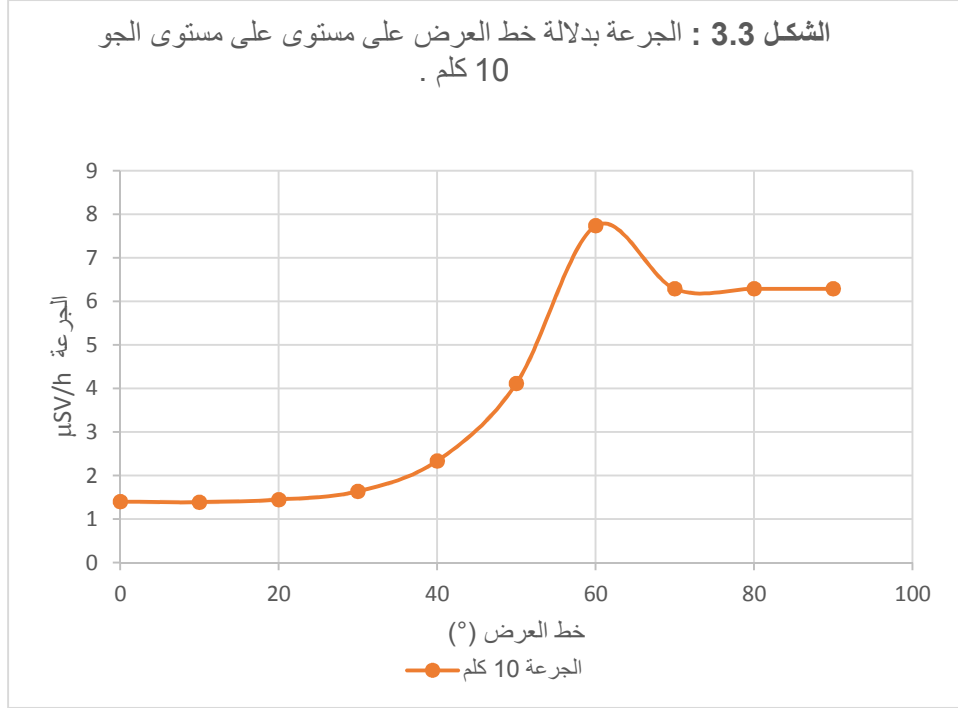
نلاحظ ان نسبة الجرعة تكون كبيرة بالنسبة للميونات الموجبة (29%) ، بعدها تأتي النيوترونات و الميونات السالبة بنسبة 25% ، و بعدها الإلكترونات (9%) ، و تليها البوزترونات (6%) ، بعدها الفتونات (2%) ، و أخير الجسيمات ألفا ( $\alpha$ ) بنسبة منعدمة لأنه عند مرور هذه الإشعاعات المؤينة عبر الغلاف الجوي المغلف للأرض فإنها تتفاعل مع مكوناته فتتغير محتوياتها وتضعف كيميائياً إلى أن تصل إلى الأرض بكميات ضئيلة جداً و بالتالي تتغير الجرعة الإشعاعية التي يتعرض لها الإنسان من هذا المصدر من الإشعاع بتغير موقعه على الكرة الأرضية .

### 3.3 بعض التطبيقات

#### 1.3.3 الجرعة بدلالة خط العرض

نلاحظ من الشكل 3.3 أن الجرعة الممتصة تزداد بزيادة خط العرض وهذا راجع لتأثير المجال المغناطيسي الأرضي على الجسيمات المشحونة القادمة من خارج الأرض لهذا فان منطقة خط الاستواء تعتبر اقل المناطق تركيزاً للإشعاعات الكونية بالتالي تكون الجرعة الممتصة ضئيلة وتزداد مع زيادة خطوط العرض شمالاً وجنوباً لزيادة التعرض الإشعاعي . كما نلاحظ ان المنحنى خط

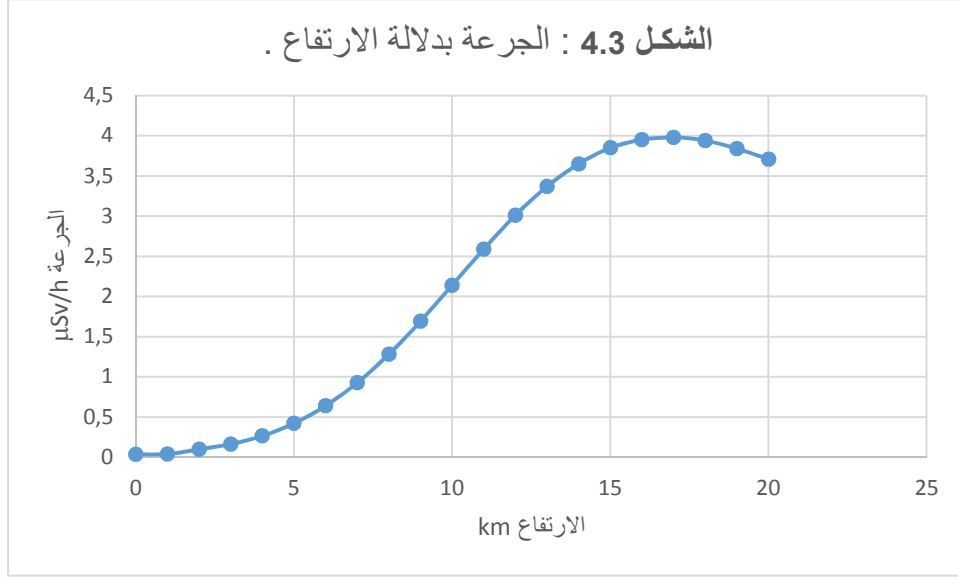
مستقيم بعد حوالي  $70^\circ$  و ذلك لان الجسيمات تفقد حوالي 2 GeV من طاقتها من خلال عملية تأيين الهواء قبل ان تبلغ سطح الأرض .



### 2.3.3 الجرعة بدلالة الإرتفاع

الجرعة الإشعاعية الناجمة عن الأشعة الكونية تتبع للإرتفاع عن سطح الأرض فهي تبلغ عند سطح الأرض ما يقارب أكثر من ربع الحد المسموح لعموم الناس (الجرعة الكلية المسموحة) ، وهي تتزايد مع ازدياد الإرتفاع لتتضاعف عند الإرتفاع 20 km . فمن الواضح ان المسيطر عند سطح البحر هو الإشعاع الأرضي ، وبذلك تنخفض الجرعة اولا مع الإرتفاع عن سطح البحر حتى يبلغ الإرتفاع 10 km ومع الاستمرار بالإرتفاع يضعف اثر اشعاعات غاما الأرضية ويزيد اثر الأشعة الكونية ، وبذلك بعد الإرتفاع المذكور تتزايد الجرعة بدلا من التناقص كما هو موضح في الشكل 4.3 ولهذا فان الذين يسافرون كثيرا بالطائرات يتعرضون الى جرعة اضافية من الأشعة الكونية أثناء وجودهم في الجو . فنستنتج مما ذكر ان الإشعاع الأرضي الطبيعي هو المسيطر عند سطح الأرض وكلما ارتفعنا تبدأ سيطرة الأشعة الكونية الثانوية لنصل على ارتفاع 20 km (وفيها تقع مستويات الطيران) ، ويعد عامل الإرتفاع عن سطح البحر العامل الأكبر في معدل الجرعة للإشعاع الكوني اضافة الى نوعه وطاقته ويعود ذلك لتفاعله مع جزيئات الغلاف والتي تقلل طاقته وتغير نوعه .





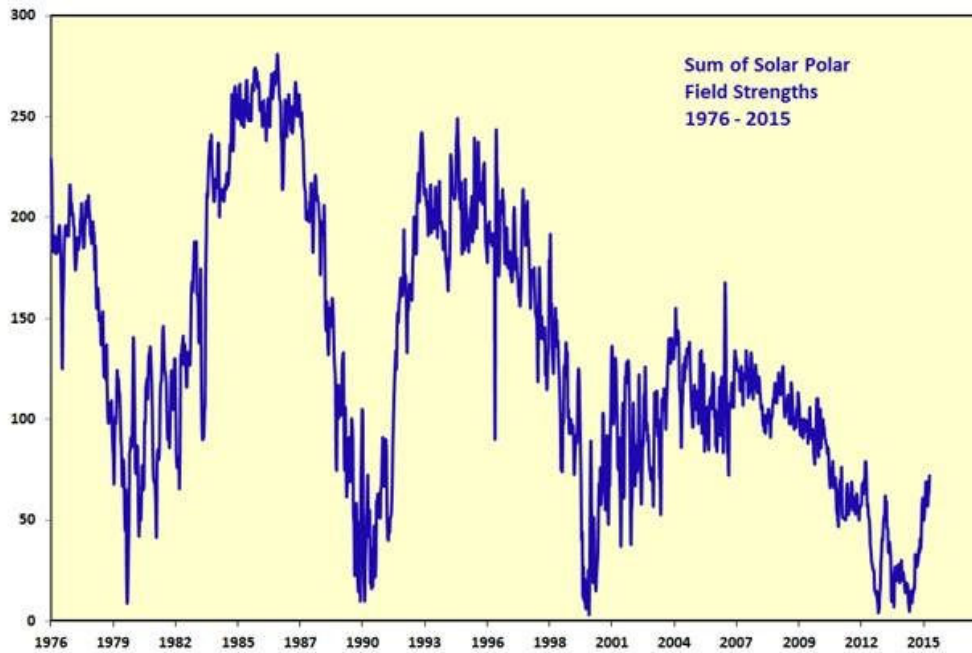
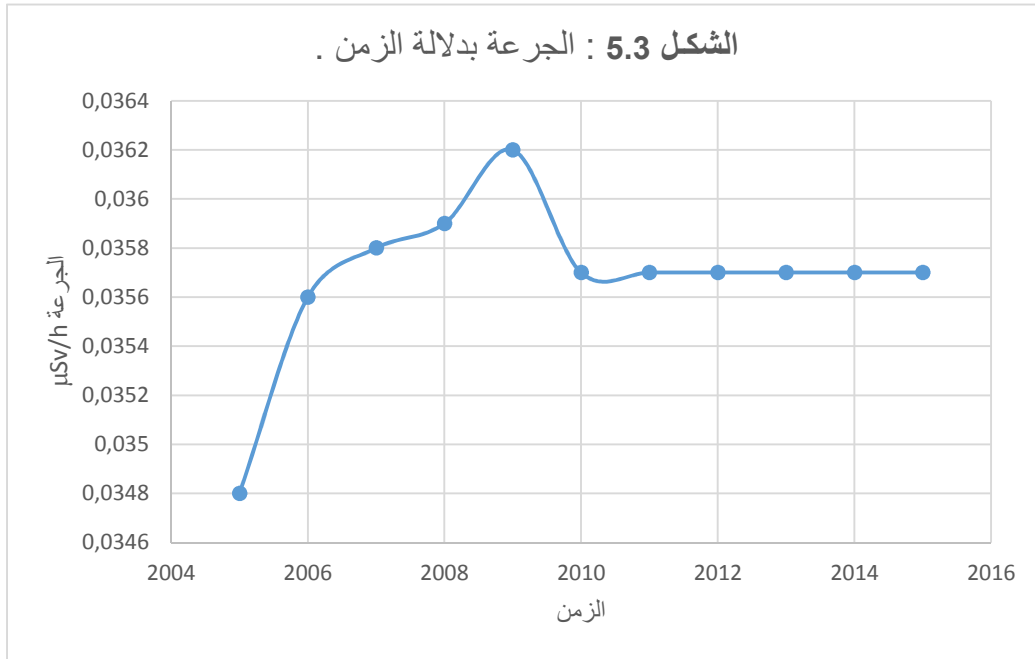
### 3.3.3 الجرعة بدلالة الزمن

نلاحظ من خلال الشكل 5.3 أن الجرعة الممتصة تختلف من سنة الى أخرى حيث من سنة 2005 إلى سنة 2009 تكون كمية الجرعة الممتصة متزايدة وبعدها تبدأ بالتناقص قليلا الى غاية سنة 2010 إلا أن تثبت وهذا راجع إلى :

- حدوث التغير بفيض الأشعة الكونية الهابطة على غلافنا الجوي من خلال عمليتين هما الرياح الشمسية والمجال المغناطيسي الأرضي ، وهذه عبارة عن بلازما المغناطيسية تعمل على كبح الجسيمات المتدفقة تجاه الأرض وتُقصي بعض الجسيمات ذات الطاقة التي تقل طاقتها عن  $10^9$  eV وتغير مسار قسم من الأشعة الكونية ؛
- وكذلك الرياح الشمسية التي هي غير ثابتة إذ تتغير حسب قوة النشاط الشمسي ، ولكن مقدار تغير الأشعة الكونية مرتبط بشكل مباشر بالنشاط الشمسي .

وهذا ما يدل على ان كميات الإشعاعات الكونية القادمة نحو الأرض تخضع بشكل كبير لتأثير الشمس ، حيث نلاحظ انه عندما تكون الشمس في أوج نشاطها تكون شدة الاشعة الكونية عند ادنى قيمة لها والعكس صحيح ، و إضافة الى ذلك تساهم الشمس بقدر ضئيل في الاشعة الكونية من خلال الرياح الشمسية حيث أن هناك علاقة ارتباط عكسية ما بين الرياح الشمسية والأشعة الكونية فإن ازدياد النشاط في الشمس (الشكل 6.3) سواء بالبقع الشمسية أو الانفجارات

الشمسية ذات الطاقة العالية يؤدي إلى زيادة الرياح الشمسية من ناحية الكثافة والسرعة مما يؤدي إلى طرد الأشعة الكونية بعيداً عن الأرض وبالتالي تؤدي إلى تقليل نسبة الإشعاع الواصل لسطح الأرض .



الشكل 6.3 : تغير النشاط الشمسي مع الزمن .

## خلاصة

نستخلص من خلال هذا العمل ان الأشعاع الأرضي الطبيعي هو المسيطر عند سطح الارض وكلما ارتفعنا تبدأ سيطرة الاشعة الكونية الثانوية حتى نصل ارتفاع 20 km (و فيها تقع مستويات الطيران) ، و بالتالي فإن تعرض الطيارين في قمرة القيادة يكون أكثر بكثير من تعرض الركاب ، و لذلك صنفت الوكالة المختصة بالأشعاع الذري الطيارين على أنهم من الفئة التي تتعرض الى أخطار اشعاعية مهنية ، فالطيران على إرتفاعات عالية فوق القطب الشمالي حيث يتناقص الغلاف الجوي بشكل ملحوظ يؤدي الى زيادة التعرض للجرعة الممتصة ، ولذلك فإن الطيارين الذين يكثرون من مثل هذه الرحلات يتعرضون الى أخطار صحية أكثر من غيرهم لكن شدة التعرض تزداد بمقدار عشرة أضعاف في رحلات الطائرات ، وتعتمد شدة التعرض هذه على الإرتفاع الذي تطير فيه الطائرة ومسارها ، وتكون المسارات فوق القطب هي الأشد ، و الفعالية الشمسية خلال فترة الرحلة أي بعبارة أخرى وجود حالات من الزواج الشمسية ، وذلك لان المجال المغناطيسي الأرضي يقوم بتجميع الأشعة الكونية وتركيزها فوق القطب الشمالي ، ففي يوم يخلو من الزواج الشمسية يتعرض الركاب في رحلة فوق القطب الشمالي الى شدة أشعة كونية تبلغ 2-3 مرات أكثر من رحلة جوية في مناطق أخرى قريبة من خط الأستواء من الكرة الأرضية ، لهذا يعد عامل الارتفاع عن سطح البحر العامل الاكبر في معدل الجرعة للاشعاع الكوني اضافة الى نوعه وطاقته ويعود ذلك لتفاعله مع جزيئات الغلاف والتي تقلل طاقته وتغير نوعه . كما أن هذه الجرعة تتبع لخطوط العرض وهذا ما لاحظته عند قياسنا الجرعة بدلالة خط العرض ، نظرا لتأثير المجال المغناطيسي الارضي على الجسيمات المشحونة القادمة من خارج الارض و لذلك فان منطقة خط الاستواء تعتبر اقل المناطق تركيزا للاشعاعات الكونية . ويزداد التعرض للاشعاع مع ازدياد خطوط العرض شمالا او جنوبا ، كما يعد عامل الزمن مهم في تغير كمية الجرعة الممتصة وهذا ما لاحظته عند تمثيلنا للجرعة بدلالة الزمن ، حيث كانت في سنة 2005 إلى غاية 2009 كمية الجرعة في ازدياد وبعدها تتناقص قليلا الى غاية 2010 إلا انها تبدأ بالثابت في السنوات الأخيرة وهذا راجع الى تغير في فيض الأشعة الكونية ، من خلال عمليتين هما الرياح الشمسية والمجال المغناطيسي الأرضي .

## المراجع

- Bhattacharjee, *La course au sursaut lointain*, La Recherche, février 2010 No **438**.
- L. I. Dorman, *Cosmic Ray Interactions, Propagation, and Acceleration in Space Plasmas*, Springer, Dordrecht, 2006.
- L. I. Dorman, *Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground*, Kluwer, Dordrecht, 2004.
- M. W. Friedlander, *Cosmic Rays*, Harvard Univ. Press, Cambridge (Mass.), 1989 ; *A Thin Cosmic Rain : Particles From Outer Space*, ibid., 2000.
- C. Kouveliotou, *L'Énigme des sursauts gamma enfin résolue*, in La Recherche, no **308**, p. 48, avril 1998.
- J.-P. Luminet, *Le Destin de l'Univers. Trous noirs et énergie sombre*, Fayard, Paris, 2006.
- J.-P. Luminet & M. Lachièze-Rey, *De l'infini... Mystères et limites de l'Univers*, Dunod, Paris, 2005.
- P. Salvaterra *et al.*, Nature, **461**, 1258, 2009.
- T. Sato and K. Niita, *Analytical Functions to Predict Cosmic-Ray Neutron Spectra in the Atmosphere*, Radiat. Res. **166**, 544-555 (2006).
- T. Sato *et al.*, *Development of PARMA: PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere*, Radiat. Res. **170**, 244-259 (2008).
- N.R. Tanvir *et al.*, Nature, **461**, 1254, 2009.
- S. Vauclair, *La Naissance des éléments : du big bang à la Terre*, Odile Jacob, Paris, 2006.

# الفهرس

1.....مقدمة

## الفصل الأول : الأشعة الكونية

1.1 أصل وتشكل الاشعة الكونية.....3

2.1 الأشعة الكونية الأولية.....5

1.2.1 الأشعة الكونية المجرية.....5

2.2.1 الأشعة الكونية الشمسية.....6

3.2.1 الطيف الطاقوي للأشعة الأولية.....7

3.1 الأشعة الكونية الثانوية.....9

## الفصل الثاني : تفاعلات الاشعاعات مع المادة

1.2 تفاعل الفوتون مع المادة.....12

1.1.2 التأثير الكهروضوئي.....12

2.1.2 تأثير كومبتون.....12

3.1.2 إنتاج الأزواج.....13

4.1.2 عملية الإفناء.....14

2.2 تفاعل النيوترون مع المادة.....14

1.2.2 التصادم المرن.....14

2.2.2 التصادم اللامرّن.....14

3.2.2 تفاعل النترونات السريعة.....15

|         |   |
|---------|---|
| 15..... | 4.2.2 الإنشطار النووي                         |
| 15..... | 5.2.2 تفاعلات الأسر النيوتروني                |
| 16..... | 3.2 تفاعل الجسيمات المشحونة الثقيلة مع المادة |
| 16..... | 1.3.2 المدى                                   |
| 17..... | 2.3.2 التأين النوعي                           |
| 18..... | 3.3.2 قدرة الإيقاف                            |

## الفصل الثالث : قياس جرعات الأشعة الكونية

### في الغلاف الجوي

|         |                              |
|---------|------------------------------|
| 21..... | 1.3 تعريف الجرعة             |
| 21..... | 1.1.3 الجرعة المكافئة        |
| 21..... | 2.1.3 الجرعة الفعالة         |
| 22..... | 2.3 برنامج EXPACS            |
| 23..... | 3.3 بعض التطبيقات            |
| 23..... | 1.3.3 الجرعة بدلالة خط العرض |
| 24..... | 2.3.3 الجرعة بدلالة الإرتفاع |
| 25..... | 3.3.3 الجرعة بدلالة الزمن    |
| 27..... | خلاصة                        |
| 28..... | المراجع                      |

## قائمة الأشكال

| الصفحة | العنوان  | الشكل |
|--------|--|-------|
| 4      | اختراق الاشعة الكونية للغلاف الجوي الأرضي  | 1.1   |
| 6      | تأثير الرياح الشمسية على شدة الأشعة الكونية  | 2.1   |
| 8      | الطيف الطاقوي التفاضلي للأشعة الكونية الإبتدائية   | 3.1   |
| 10     | اصطدام جسيم أولي من الأشعة الكونية بالطبقات العليا من جو الأرض وتكوين سيل من الجسيمات وأشعة غاما | 4.1   |
| 12     | ظاهرة التأثير الكهروضوئي   | 1.2   |
| 13     | ظاهرة تأثير كومبتون  | 2.2   |
| 13     | إنتاج زوجي $e^+e^-$ ناتج من اصطدام الفوتون مع نواة ذرة   | 3.2   |
| 15     | مثال لعملية الإنشطار   | 4.2   |
| 16     | تفاعل الأسر النيوتروني   | 5.2   |
| 17     | تغير المدى بدلالة طاقة الجسيم  | 6.2   |
| 18     | العلاقة بين التأين النوعي لجسيم واحد من جسيمات ألفا وبين المسافة من مصدر الجسيم                  | 7.2   |
| 19     | قوة الإيقاف بواسطة الهواء كدالة في طاقة بعض الجسيمات   | 8.2   |
| 22     | منحنى الطيف الطاقوي للأشعة الكونية في الغلاف الجوي   | 1.3   |
| 23     | الجرعة بدلالة الجسيمات الكونية   | 2.3   |
| 24     | الجرعة بدلالة خط العرض على مستوى سطح البحر 0 كلم وعلى مستوى الجو 10 كلم                          | 3.3   |
| 25     | الجرعة بدلالة الإرتفاع   | 4.3   |
| 26     | الجرعة بدلالة الزمن  | 5.3   |