Al-Mustansiriyah Journal of Science

Vol. 27, No 04, 2016

(ISSN: 1814-635X)

Journal homepage: mjs.uomustansiriyah.edu.iq

تخمين دالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف بدلالة نوع الجسيم

احمد عزيز الربيعي ، مروة مظهر عبد الستار، حسن عبدالله مهدي

قسم علوم الفيزياء ، كلية العلوم ، الجامعة المستنصرية
dr.rubaiee@uomustansiriyah.edu.iq

A r t i c l e I n f o

Received
11/04/2017

Revised
17/06/2017

Accepted
11/07/2017

الملخص

تعتبر دراسة طيف الطاقة والتركيب الكيميائي للأشعة الكونية أحدى أكثر المواضيع تحديا وأهمية في مجالي الفيزياء الذرية والفيزياء الفلكية. إذ إن تفاعل الجسيمات الأولية مع نوى ذرات الهواء للغلاف الجوي ينتج عنه وابل هائل من الجسيمات المشحونة ومنها إنبعاث فوتونات جيرينكوف التي تكون منتشرة على سطح الأرض. لذا توجهنا في دراستنا الحالية لدراسة طيف الطاقة والتكوين الكتلي للأشعة الكونية من خلال دراسة منطقة الركبة لمنحني طيف طاقة الأشعة الكونية عند الطاقة 3 PeV والزاوية السمتية 0^o حيث تم إجراء محاكاة دالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف لثمانية عناصر والتي أنجزت بإستخدام البرنامج العالمي كورسيكا تبعا لشروط وترتيب منظومة ياكوتسك. وبإجراء المعايرة وتقريب نتائج المحاكاة لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف تم تطوير الدالة المقترحة لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف لأول مرة بجعلها تعتمد على نوع الجسيم وقد أظهرت نتائج المقارنة تطابق جيد بين نتائج المحاكاة والحسابات النظرية التخمينية وبنسبة خطأ ضئيلة جدا. كذلك تم إجراء مقارنة بين النتئج النظرية والنتائج العملية المقاسة لمنظومة ياكوتسك وقد تم الحصول على توافق جيد وبنسبة خطأ ضئيلة. ان لهذا العمل اهمية كبيرة حيث يسمح لنا بإعادة تكوين الأحداث لوابل الجسيمات المشحونة لتحديد نوع الجسيمات الأولية ويعطينا القدرة على التعرف على طبيعة الجسيمات الأولية في منطقة الركبة لطيف طاقة الأشعة الكونية.

الكلمات المفتاحية: الاشعاعات الكونية, اشعاع جيرينكوف, دالة التوزيع الجانبية ,كورسيكا.

Abstract

The study of the energy spectrum and chemical composition of cosmic rays is one of the most challenging and important topics in the fields of atomic physics and astrophysics. The interaction of elementary particles with air shower nuclei in the atmosphere produces a huge extensive air shower (EAS) of charged particles, including the emission of Cherenkov photons that are scattered on the Earth's surface. Therefore, in present study, it was studied the energy spectrum and the mass composition of cosmic rays through the study of the knee region of the cosmic rays in the energy of 3 PeV with 0^o zenith angle. The lateral distribution function of the Cherenkov radiation was performed for 8 elements, which was performed using the CORSIKA program according to the conditions and arrangements of the Yakutsk EAS array. By approximating the simulation results of the lateral distribution function of the Cherenkov radiation, the proposed function of Cherenkov's light of the lateral distribution function was developed for the first time as a function of the particle's type. The comparison between the simulated and approximated Cherenkov light lateral distribution function gave a good agreement with a small errors. A comparison between the

parameterized Cherenkov light lateral distribution function and that measured with Yakutsk EAS array gave a good agreement. The present work is of a great importance to allow us to reconstruct the events of the charged particles to determine the type of elementary particles and gives us the ability to recognize the nature of the primary particles in the knee region of the cosmic energy spectrum.

المقدمة

على الرغم من أن الأرض محمية بمجالها المغناطيسي ومنطقة الأوزون ومناطق التأين المتعددة وأحزمة الإشعاع إلا أنه يتم إختراق الغلاف الجوي بإستمرارمن قبل جسيمات ذات طاقات عالية قادمة من الفضاء الخارجي [1, 2]. وقد تم إكتشاف هذه الجسيمات أول مرة عام 1912م من قبل العالم الفيزيائي الأمريكي فيكتور هيس خلال رحلة البالون في بوهيميا حيث وضع هيس جهاز قياس التأين في بالون وجعله يرتفع الى أكثر من خمسة كيلومترات عن سطح الأرض، فوجد أن نسبة التأين عند هذا الإرتفاع قد إزدادت الى أربعة أضعاف النسبة الإعتيادية [3]. إفترض هيس أن سبب هذه الزيادة مصدرا إشعاعيا خارج الأرض ذا قدرة قوية جدا على إختراق غلافنا الجوي وبعدها أجريت تجارب أخرى أكدت نظرية هيس. وهذا الإكتشاف أهل هيس لإستلام جائزة نوبل للفيزياء عام 1936م. وفي سنة 1925م وضع العالم الفيزيائي الأمريكي روبرت مليكان مصطلح الأشعة الكونية بعد أن ثبت أن مصدرها خارج الأرض. ان الأشعة الكونية هي عبارة عن جسيماتٌ عالية الطاقة، منشؤها الفضاء الخارجي. ويعتقد العلماء أن هذه الأشعة تملأ درب التبانة (اسم المجرة التي ننتمي إليها وتسمى أيضًا درب اللبانة)، وكذا المَجَرات الأخرى. وتتكون الأشعة الكونية من جسيمات تحمل شحنة كهربائية، تمامًا مثل البروتونات والإلكترونات ونوى الذرات. وتتحرك هذه الجسيمات في الفضاء الخارجيّ بما يقارب سرعة الضوء ومقدارها ٢٩٩,٧٩٢ Km/Sec. وهي جسيمات نووية ترد إلى الأرض من الفضاء الخارجي بطاقة هائلة تمكِّنها من اختراق ثخانات كبيرة من المادة. وتسمى أوليةً عند دخولها جو الأرض، وثانويةً بعد أن تقوم بالتفاعل معه. يقيس الفيزيائيون طاقة الأشعة الكونية بوحدات تُسمَّى إلكترون فولت (eV). وتتراوح طاقة معظم الأشعة الكونية بين بضعة ملايين إلكترون فولت (MeV) وبضعة بلايين إلكترون فولت (GeV) [4]. وعندما يمر جسيم مشحون مثل الإلكترون في وسط عازل بسرعة تفوق سرعة الضوء في ذات الوسط فانه ستقوم بتأيين جزيئات ذلك الوسط بعدها تفقد سرعتها بسرعة و ترجع إلى طبيعتها باعثة اشعاعات تسمى اشعاعات جيرينكوف [5]. أما عن الوهج الأزرق في المفاعلات النووية فهو نتيجة هذه الإشعاعات، و سميت بهذا الإسم نسبة إلى العالم الروسي بافيل جيرينكوف الذي إكتشفها عام ١٩٣٤م وحازعلى جائزة نوبل عام ١٩٥٨ م كأول مكتشف لهذه الإشعاعات بالتجربة العملية. ويمكن وصف إشعاع جيرينكوف من تراكب الموجات الكروية حسب مبدأ هايكنز ويلاحظ الإشعاع بجبهة موجة على شكل مخروط كما هو الحال عند حركة طائرة بسرعة مساوية لسرعة الصوت في نفس الوسط وإن السطح الذي يضم الموجات الضغطية يسمى " جبهة موجة الرجة أو موجة الصدم shock wave ". لقد تم في هذا البحث اجراء محاكاة دالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف لوابل من الجسيمات المشحونة بأستخدام برنامج كورسيكا (CORSIKA) حسب شروط وترتيب منظومة ياكوتسك (Yakutsk). حيث تم دراسة منطقة الركبة لطيف طاقة الأشعة الكونية عند الطاقة 3 PeV والزاوية السمتية 0^o وإجراء المحاكاة لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف لثمانية عناصر. وقد تمت معايرة هذه الدالة بإستخدام دالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف المقترحة والتي تعتمد على أربع معلمات a و b و σ و r_o وهي بدلالة المسافة R عن محور تفاعل الجسيمات بعد أن قمنا بتطويرها وجعلها تعتمد بدلالة نوع الجسيم.

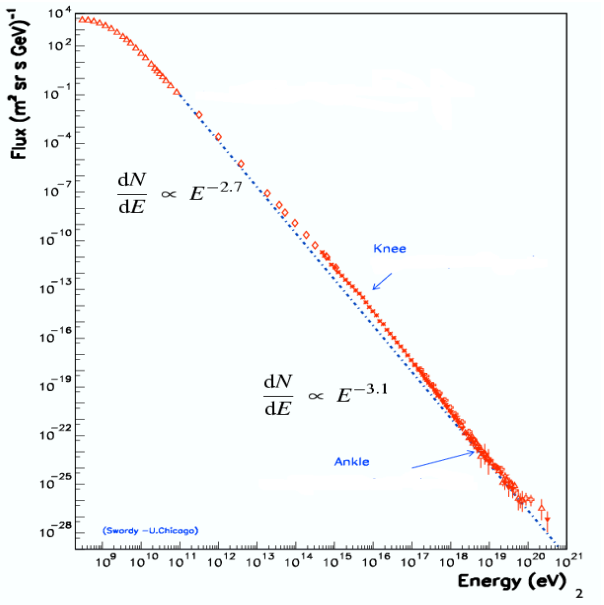
الجانب النظري

طيف الطاقة للأشعة الكونية

إن طيف طاقة الأشعة الكونية يغطي مدى واسع من الطاقات إذ تمتد الطاقات المقاسة لهذه الجسيمات من 10^{10} eV وربما يمتد الى أكثر من 10^{20} eV كما هو مبين في الشكل (١) ويعبر عن طيف الطاقة للأشعة الكونية عادة بواسطة التدفق التفاضلي (Differential flux) وهو عدد الجسيمات التي تملك طاقة تقع في المجال E و $E + dE$ أوبواسطة التدفق التكاملي (Integral flux) وهو عدد الجسيمات التي تملك طاقة مقدارها E [6]:

$$dN/dE \propto E^{-\alpha} \qquad (1)$$

$$\alpha = \begin{cases} 2.7 & when\ E < 10^{16} eV \\ 3.0 & when\ 10^{16} < E < 10^{19} eV \end{cases}$$

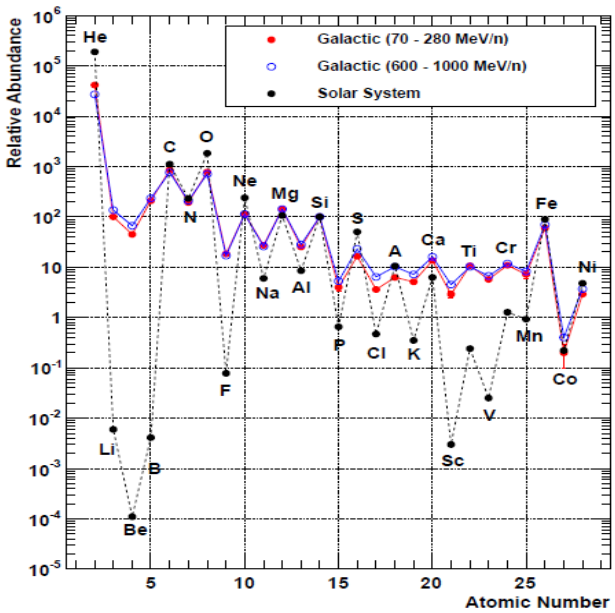


شكل (١) طيف الطاقة للأشعة الكونية لمدى الطاقة 10^{10}-10^{20} الكترون فولت [6].

هناك منطقتين رئيسيتين في طيف الطاقة للأشعة الكونية التي تسمى ب " الركبة "(knee) ، والتي طاقتها حوالي 3.10^{15} eV، حيث أن شدة الانحدار للطيف من $\alpha = 2.7$ الى $\alpha = 3$ و منطقة " الكاحل "(ankle) التي طاقتها حوالي 3.10^{18} eV .

التركيب الكيميائي للاشعة الكونية

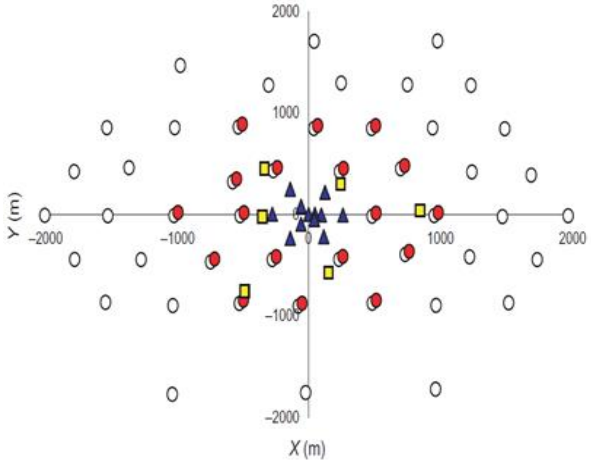
تتضمن الأشعة الكونية الأولية كل الجسيمات المشحونة المستقرة (زمن العمر اكبر من 10^6 سنة) وكذا كل أنوية العناصر الموجودة بالجدول الدوري، ابتداء من انوية الهيدروجين (البروتونات) ووصولا إلى اليورانيوم [7]. كل العناصر الموجودة في الأشعة الكونية هي نفسها الموجودة في النظام الشمسي، هناك اختلاف فقط في نسبة تواجد بعض العناصر كالليثيوم (Lithium) و البيريليوم (Beryllium) و البورون (Boron) وبعض العناصر الأخف من الحديد (Iron) حيث تتواجد بنسبة اكبر في الأشعة الكونية ويمكن تفسير ذلك بأن هذه الأنوية تنتج أثناء تفاعل الجسيمات الأولية مع المادة المنتشرة في الفضاء مابين النجوم بينما الهيدروجين (Hydrogen) والهيليوم (Helium) أي العناصر الخفيفة هي أقل شيوعا في الإشعاع الكوني، مما كانت عليه في النظام الشمسي. هذا ربما يرجع إلى طاقة التأين العالية لهذه العناصر التي تقمع التسارع الأولي لتلك العناصر.لاحظ الشكل (٢) يبين الوفرة النسبية للعناصر الكيميائية المختلفة للأشعة الكونية مقارنة بتكوين النظام الشمسي حيث نجد أن التركيب الكيميائي للنظام الشمسي والاشعاع الكوني يتفق إلى حد كبير.



شكل (٢) نسبة تواجد العناصر الكيميائية في الأشعة الكونية مقارنة بنسبة تواجدها في النظام الشمسي[7] .

منظومة ياكوتسك

تقع منظومة ياكوتسك في مدينة ياكوتسك في روسيا 61.7^o (N; 129.4^o E) 100 m، فوق مستوى سطح البحر والمدى الموجي لها (300 to 600 nm)[8, 9] (لاحظ الشكل) (١).



شكل (٣) ترتيب كواشف منظومة ياكوتسك [8]

وهي عبارة عن كواشف مصممة لكشف الأشعة الكونية ذات الطاقات العالية جدا في نطاق 10^{15}–10^{19} eV.حاليا منظومة ياكوتسك تتكون من 58 قاعدة أرضية وست مراكز للكشف عن الوميض تحت الأرض للكشف عن الإلكترونات والميونات و48 كاشف photomultiplier tubes (PMTs) للكشف عن مكونات أشعة جيرينكوف. المساحة الكلية التي تغطيها كواشف منظومة ياكوتسك هي 10 km^2 خلال الفترة الزمنية التي عملت فيها المنظومة تم الكشف عن مايقارب 10^6 من وابل الجسيمات المشحونة وبطاقة أولية أعلى من 10^{15} eV وزاوية سقوط $\theta \leq 60^o$ ومستوى طاقة $E > 10^{20}$ eV. الشكل (3) يوضح ترتيب كواشف منظومة

ياكوتسك حيث تمثل الدوائر المفتوحة كواشف الجسيمات المشحونة بينما الدوائر المغلقة (C_1 (~500m spacing والمثلثات المغلقة (C_2 subset (50–200m spacing تمثل كواشف إشعاع جيرينكوف،كواشف PMTs المفتوحة بمساحة 176 cm^2و 530 cm^2 والمربعات تمثل كواشف الميونات.

النتائج والمناقشة

محاكاة دالة التوزيع الجانبية لاشعاع جيرينكوف

لقد تم إجراء المحاكاة لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف بإستخدام البرنامج العالمي المعروف كورسيكا CORSIKA (**CO**smic **R**ay **SI**mulations for **KA**scade) وهو برنامج مفصل لطريقة Monte Carlo لدراسة تطور وخصائص وابل الجسيمات المشحونة في الغلاف الجوي وقد تم تطويره لأداء المحاكاة للتجربة KASCADE في Karlsruhe في ألمانيا [10, 11].

في عملنا الحالي تم محاكاة دالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف لوابل من الجسيمات المشحونة بأستخدام برنامج CORSIKA حسب شروط وترتيب منظومة ياكوتسك باستخدام موديل QGSJET مختصر (Quark Gluon String model with JET's) للتفاعلات الهادرونية القوية ذات الطاقات العالية [12] و GHEISHA مختصر (Gamma Hadron Electron Interaction Shower)للتفاعلات الهادرونية ذات الطاقات الواطئة [13].

ولقد تم استخدام برنامج (Electron Gamma Shower) EGS4 لمحاكاة المركبات الكهرومغناطيسية لوابل من الجسيمات المشحونة واشعاع ضوء جيرينكوف. حيث تم دراسة منطقة الركبة لطيف طاقة الأشعة الكونية عند الطاقة 3 PeV وزاوية السقوط 0^o و إجراء المحاكاة لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف لثمانية عناصر وهي: He, Li, B, N, O, Na, Mg, Cl.

تقريب دالة التوزيع الجانبية لاشعاع جيرينكوف

النتائج التي حصلنا عليها من المحاكاة بإستخدام برنامج كورسيكا تمت معايرتها بإستخدام دالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف المقترحة [14, 15] والتي تعتمد على أربع معلمات a و b و σ و r_o وهي بدلالة المسافة R بعد أن قمنا بتطويرها وجعلها تعتمد على نوع الجسيم الساقط η وكما يلي :

$$Q(\eta,R)=\frac{C\sigma\exp[a-G]}{b\left[(R/b)^2+\frac{(R-r_o)^2}{b^2}+R\sigma^2/b\right]} \quad (3)$$

حيث أن $C=10^3\ m^{-1}$ يمثل ثابت المعايرة [16, 17].

ويمكن تعريف G المذكور في المعادلة أعلاه كالآتي [16]:

$$G=\frac{R}{b}+\frac{R-r_o}{b}+\left(\frac{R}{b}\right)^2+\left(\frac{R-r_o}{b}\right)^2 \quad (4)$$

بينما η يمكن تعريفها كالتالي [10]:

$$\eta=A\times 100+Z \quad (5)$$

حيث أن:

A: الوزن الذري, Z: العدد الذري

تم تطوير دالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف من خلال جعل المعلمات الأربعة للمعادلة (٣) a و b و σ و r_o تعتمد على η مما يسمح لنا إيجاد دالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف لأي جسيم حول منطقة الركبة لطيف طاقة الأشعة الكونية وهي كالآتي:

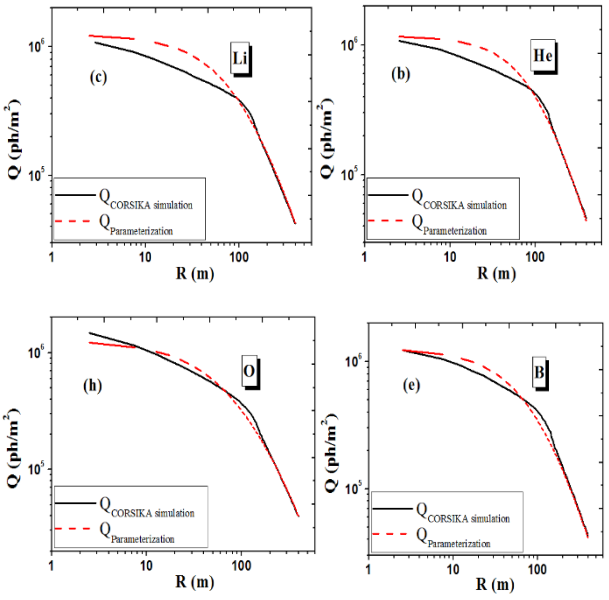
$$K(\eta)=c_o+c_1log_{10}(\eta)+c_2\left(log_{10}(\eta)\right)^2+c_3\left(log_{10}(\eta)\right)^3 \quad (6)$$

قيم المعاملات c_o و c_1 و c_2 و c_3 موضحة في الجدول (١).

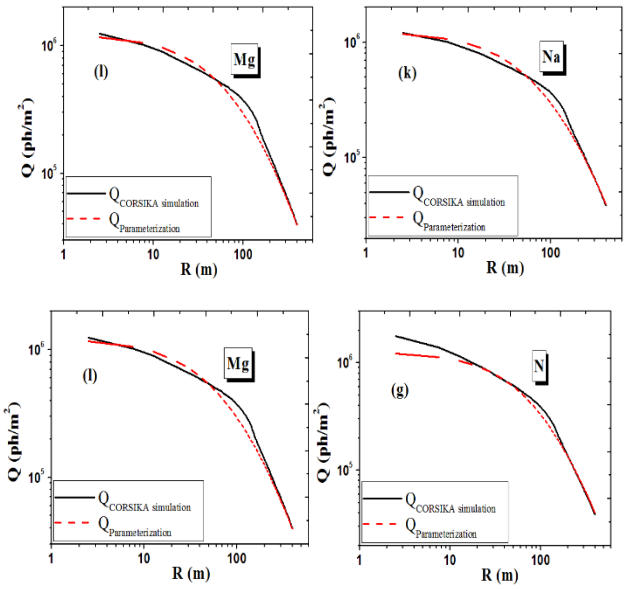
جدول ١: المعاملات الناتجة للمعادلة (6) للمعلمات a و b و σ و r_o المعتمدة على نوع الجسيم η لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف والمتمثلة بالمعادلة (٣).

θ=0°					
k	c_0	c_1	c_2	c_3	χ^2
a	$92.2\cdot10^{-1}$	$55.8\cdot10^{-2}$	$-17.9\cdot10^{-2}$	$17.7\cdot10^{-3}$	$18.0\cdot10^{-5}$
b	$-20.2\cdot10^{-1}$	$28.1\cdot10^{-1}$	$-99.7\cdot10^{-2}$	$11.3\cdot10^{-2}$	$32.1\cdot10^{-3}$
σ	$20.1\cdot10^{-1}$	-2.64	$88.3\cdot10^{-2}$	$-90.1\cdot10^{-3}$	$13.5\cdot10^{-4}$
r_o	$-52.9\cdot10^{-2}$	$-68\cdot10^{-3}$	$-83.2\cdot10^{-3}$	$22.7\cdot10^{-3}$	$14.3\cdot10^{-4}$

الأشكال (٤) و(٥) تمثل المقارنة بين المنحنيات الناتجة من المحاكاة بإستخدام برنامج كورسيكا حسب شروط منظومة ياكوتسك والمنحنيات المعيارية التي تم الحصول عليها من المعادلة (٣) وقد تم كتابة برنامج بلغة فورتران(F90) لاجراء الحسابات النظرية لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف.



شكل (٤) مقارنة بين المنحنيات الناتجة من المحاكاة بإستخدام برنامج كورسيكا والمنحنيات المعيارية من المعادلة(٣) لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف بطاقة 3 PeV وزاوية θ=0° لعناصر مختلفة.



شكل (٥) المقارنة بين المنحنيات الناتجة من المحاكاة بإستخدام برنامج كورسيكا والمنحنيات المعيارية من المعادلة(٣) لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف بطاقة 3 PeV وزاوية θ=0° لعناصر مختلفة.

الفرق بين المنحنيات المعيارية ومنحنيات المحاكاة لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف تم تحديده بإستخدام المعادلة التالية:

$$\Delta = \left[\sum_i \frac{Q_{par}(\eta,R)}{Q_{COR}(R)} - 1\right]^2 \rightarrow \min \qquad (7)$$

حيث نلاحظ أن الفرق بين المنحنيات ضئيل من خلال نتائج $\Delta_{\min}$ المقاسة بإستخدام المعادلة (7) والمسجلة في الجدول (2) والذي يبين أن النتائج ممتازة وذات دقة عالية.

جدول ٢: نتائج $\Delta_{\min}$ المقاسة بإستخدام المعادلة (7) لإيجاد الفرق بين المنحنيات الناتجة من المحاكاة بإستخدام برنامج كورسيكا والمنحنيات المعيارية لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف.

Element	Symb	η	Δ_{min}
Helium	He	402	$10.282.10^{-3}$
Lithium	Li	703	$21.675.10^{-3}$
Boron	B	1105	$14.366.10^{-7}$
Nitrogen	N	1407	$72.781.10^{-4}$
Oxygen	O	1608	$38.931.10^{-5}$
Sodium	Na	2310	$10.750.10^{-4}$
Magnesium	Mg	2412	$40.960.10^{-4}$
Chlorine	Cl	3517	$36.103.10^{-4}$

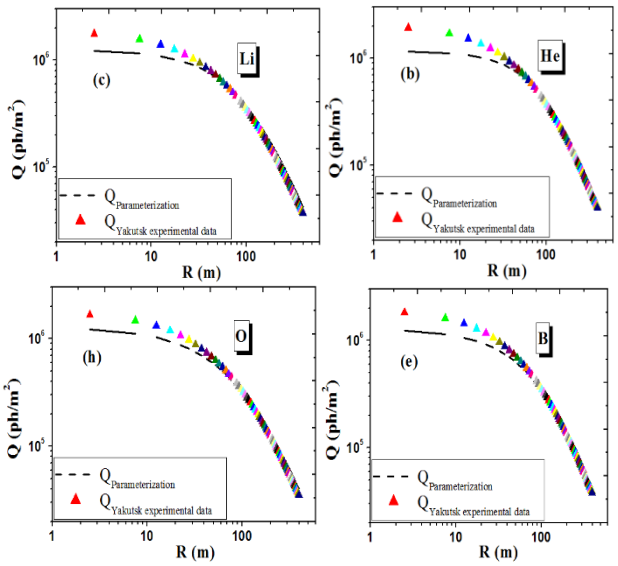
لقد تم مقارنة المنحنيات المعيارية لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف بالنتائج العملية لمنظومة ياكوتسك وحسب المعادلة المعيارية للنتائج العملية التالية [8]:

$$Q(R) = Q_{160}\frac{(R_1+150)(R_2+R)^{1-b}}{(R_1+R)(R_2+150)^{1-b}} \qquad (8)$$

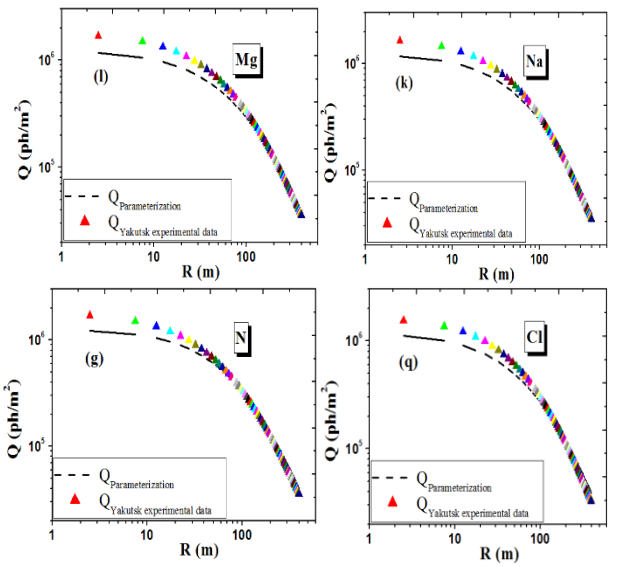
حيث أن Q_{160} هي كثافة إشعاع جيرينكوف عند المسافة 160 m من محور الوابل للجسيمات المشحونة $R_1 = 60\ m$ و $R_2 = 200\ m$ بينما:

$$b = 1.14 + 0.3 \times logQ_{160} \qquad (9)$$

وقد تم إجراء الحسابات بإستخدام برنامج بلغة فورتران (F90)تم بناؤه لهذا الغرض. ان المقارنة بين المنحنيات المعيارية التي تم الحصول عليها من المعادلة (٣) والمنحنيات الناتجة من النتائج العملية الحقيقية لمنظومة ياكوتسك لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف مبينة بالأشكال (٦) و(٧).



شكل (٦) مقارنة بين المنحنيات المعيارية من المعادلة (٣) والمنحنيات الناتجة من النتائج العملية لمنظومة ياكوتسك لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف بطاقة 3 PeV وزاوية θ=0° لعدة عناصر.



شكل (٧) مقارنة بين المنحنيات المعيارية من المعادلة (٣) والمنحنيات الناتجة من النتائج العملية لمنظومة ياكوتسك لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف بطاقة 3 PeV وزاوية θ=0° لعدة عناصر.

References

[1] I. M. Frank and I. E. Tamm, Coherent visible radiation passing through matter, *Dokl. Acad. Nauk, SSSR*, 14, pp.109–114, 1937.

[2] E. Fermi , On the origin of cosmic radiation, Phys. Rev., Vol. 75, No. 8, pp. 1169-1174 ,1949.

[3] V. F. Hess, Observation of penetrating radiation in seven balloon flights, *Phys.Zeitschr*, Vol.13, pp.1084, 1912.

[4] J. V. Jelly, Cherenkov radiation and its applications, London: *Pergamon Press*, 1958.

[5] T.K. Gaisser, Cosmic rays and particle physics, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1990.

[6] Roth M., Ulrich H., Antoni T. et al. Energy spectrum and elemental composition in the PeV region, Proc. 28th ICRC, Tsukuba, July 31-Aug. 7, pp. 139-142, 2003.

[7] Ulrich H., Antoni T., W.D. Apel et al. Composition and energy spectra of elemental groups around the knee: Results from KASCADE, Proc. 29 ICRC, Pune, India (Aug. 03-10, 2005). Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, V.6., pp. 129-132, 2005.

[8] A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, and I. Y. Sleptsov, Measuring Extensive Air Showers with Cherenkov light detectors of the Yakutsk array: The energy spectrum of cosmic rays, New Journal of Physics, Vol. 11, Article ID 065008, 30 pages, 2009.

[9] A. A. Al-Rubaiee, Extension of Cherenkov light LDF parametrization for Tunka and Yakutsk EAS array, J. *Astrophys. Astr*., Vol.35, pp.631-638, 2014.

[10] D. Heck and T. Pierog, Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide, Institut fur Kernphysik, Forschungszentrum Karlsruhe, 2007.

[11] D. Heck and T. Peirog, Extensive Air Shower Simulations at the Highest Energies—A User's Guide, Institut fur Kernphysik, Heidelberg, Germany, 2013.

الفرق بين المنحنيات المعيارية والنتائج العملية الحقيقية لمنظومة ياكوتسك يمكن تحديده بإستخدام المعادلة التالية:

$$\Delta = \left[\sum_i \frac{Q_{par}(\eta,R)}{Q_{exp}(R)} - 1\right]^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

جدول (٣) يوضح نتائج $\Delta_{\min}$ المقاسة بإستخدام المعادلة (10) والذي يظهر توافق عالي جدا بين النتائج النظرية والنتائج العملية الحقيقية لمنظومة ياكوتسك لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف. إستنادا لهذه الطريقة يمكننا إعادة تكوين الأحداث لوابل الجسيمات المشحونة لتحديد نوع الجسيمات الأولية ويعطينا القدرة على التعرف على طبيعة الجسيمات الأولية في منطقة الركبة لطيف طاقة الأشعة الكونية.

جدول (3) نتائج $\Delta_{\min}$ المقاسة بإستخدام المعادلة (10) لإيجاد الفرق بين المنحنيات المعيارية لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف والنتائج العملية الحقيقية المقاسة بمنظومة ياكوتسك.

Element	**Symb**	η	Δ_{min}
Helium	He	402	$87.891.10^{-4}$
Lithium	Li	703	$22.676.10^{-4}$
Boron	B	1105	$14.210.10^{-3}$
Carbon	C	1206	$16.788.10^{-3}$
Nitrogen	N	1407	$78.593.10^{-4}$
Oxygen	O	1608	$88.102.10^{-4}$
Sodium	Na	2310	$19.234.10^{-3}$
Magnesium	Mg	2412	$27.976.10^{-3}$
Iron	Fe	5626	$50.148.10^{-3}$

الاستنتاجات

١- تم لأول مرة تطوير دالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف المقترحة من قبل علماء بلغار وجعلها تعتمد على نوع الجسيم.

٢- الحسابات التي تم إجراؤها لدالة التوزيع الجانبية المطورة لإشعاع جيرينكوف المعتمدة على نوع الجسيم لم يتم التطرق لها سابقا.

٣- نتائج المقارنة بين المحاكاة بإستخدام برنامج كورسيكا والحسابات النظرية لدالة التوزيع الجانبية المطورة لإشعاع جيرينكوف جيدة وذات دقة عالية.

٤- من خلال التقنية التي تم إعتمادها في الحسابات يمكن الإستغناء عن البرنامج العالمي المعروف كورسيكا والذي يستغرق وقت طويل في الحساب وبذلك يمكن إختصار الوقت وتسهيل عمل الباحثين في هذا المجال من الدراسات.

٥- تم مقارنة المنحنيات المعيارية النظرية لدالة التوزيع الجانبية المطورة لإشعاع جيرينكوف المعتمدة على نوع الجسيم مع النتائج العملية المقاسة في منظومة ياكوتسك.

٦- تم الحصول على توافق جيد بين النتائج النظرية والنتائج العملية الحقيقية لمنظومة ياكوتسك لدالة التوزيع الجانبية لإشعاع جيرينكوف.

٧- من خلال المقارنة مع النتائج العملية يمكننا إعادة تكوين الأحداث لوابل الجسيمات المشحونة لتحديد نوع الجسيمات الأولية وهذا يعطينا القدرة على التعرف على طبيعة الجسيمات الأولية في منطقة الركبة لطيف طاقة الأشعة الكونية.

[12] S. Ostapchenko, QGSJET-II: towards reliable description of very high energy hadronic interactions, Nuclear Physics B: *Proceedings Supplements*, Vol. 151, pp. 143–146, 2006.

[13] Heck D., Engel R. Influence of low-energy hadronic interaction programs on air shower simulations with CORSIKA, Proc. 28th ICRC, Tsukuba, July 31-Aug. 7, pp. 279-282, 2003.

[14] L. Alexandrov, S. Cht. Mavrodiev, A. Mishev, and J. Stamenov, In Proc. 27th International Cosmic Ray Conference (ICRC), Hamburg, 1, pp.257 –260, 2001.

[15] A. Mishev, Analysis of lateral distribution of atmospheric Cherenkov light at high mountain altitude towards event reconstruction, ISRN High Energy Phys. 2012, 12, 2012.

[16] A.A. Al-Rubaiee, O.A. Gress, A.A. Kochanov et al., Proc. 29th International Cosmic Ray Conference (ICRC), Pune , pp. 249–252, 2005.

[17] A.A. Al-Rubaiee, U. Hashim, M. Marwah and Y. Al-Douri, Study of Cherenkov Light Lateral Distribution Function around the Knee Region in Extensive Air Showers, Serb. Astron. J., No. 190, pp. 79 – 85, 2015.