



INFN-TC-09/05

31 Luglio 2009

**IL GINOCCHIO NUDO DEL FERRO,
SUA NECESSITÀ ED EVIDENZA EMPIRICA**

Antonio Codino

INFN-Sezione di Perugia, Dipartimento di Fisica Università, Perugia, Italia

Sommario

Lo spettro in energia della radiazione cosmica ha un piegamento ripido intorno a $(5-7) \times 10^{17}$ eV scoperto dall'esperimento Akeno nel 1992 noto come secondo ginocchio. Avvalendosi di una recente teoria che spiega quantitativamente le proprietà del ginocchio e della caviglia viene identificata la natura del secondo ginocchio e se ne determinano le caratteristiche misurabili.

Si prova che il secondo ginocchio corrisponde alla caduta di flusso del ferro oltre 10^{17} eV. Tale caduta è scolpita nello spettro dei raggi cosmici con il valore massimo dell'indice spettrale di 3.3, marchio distintivo unico del medesimo spettro nel grande intervallo di energia $10^{10}-5 \times 10^{19}$ eV.

Si evidenzia dalla teoria come il secondo ginocchio si relaziona alle maggiori strutture misurate dello spettro dei raggi cosmici in modo peculiare e soprattutto misurabile: (A) il valore massimo dell'indice spettrale di 3.3; (B) la peculiare banda di energia di $(5-7) \times 10^{17}$ eV in cui l'indice assume il valore massimo di 3.3; (C) la sua posizione relativa in energia rispetto al ginocchio nominale del protone a 4×10^{15} eV (D) l'esistenza della caviglia e la sua posizione a 3×10^{18} eV successiva al secondo ginocchio lungo l'asse dell'energia; (E) la composizione chimica dei raggi cosmici dominata dal ferro nella regione $(5-7) \times 10^{17}$ eV del secondo ginocchio. Le proprietà A, B, C e D sono in accordo con i dati sperimentali mentre la proprietà E solo con una parte di essi essendoci discrepanze notevoli nelle misure tra esperimenti diversi.

1 INTRODUZIONE

Dal conteggio del numero di particelle e dalla misura della loro energia si determina lo spettro differenziale in energia della radiazione cosmica primaria esprimibile come a/E^γ dove E è l'energia della particella, γ l'indice spettrale ed a una costante che fissa il flusso. Tale spettro disconosce quali differenti particelle contribuiscono al flusso della radiazione cosmica. Studi pluridecennali hanno stabilito che per energie superiori a 10^{10} eV e sino a 10^{15} eV l'indice γ è pressoché costante valendo circa 2.7. Oltre 10^{15} eV esistono due principali deviazioni dal valore di 2.7 osservate alle energie nominali di 3×10^{15} e 4×10^{18} eV noti, nell'ordine, come ginocchio e caviglia dello spettro della radiazione cosmica denotato qui *spettro completo*.

Una spiegazione logicamente coerente dell'origine del ginocchio e della caviglia è stata proposta nel 2006 [1-4]; essa ha un accordo eccellente con i dati sperimentali [5-7] come, ad esempio, quelli mostrati in Figura 1. In tale teoria le proprietà del ginocchio, della caviglia ed altre, sono spiegate come effetti e processi galattici sullo spettro imperturbato generato dal meccanismo che accelera i raggi cosmici. Tale meccanismo accelera le particelle con indici spettrali costanti di circa 2.65 sino a 5×10^{19} eV. La teoria è indipendente dal meccanismo di accelerazione e la sua struttura portante è ancorata a dati empirici. I dati empirici sulla Galassia incorporati nella teoria sono le sue dimensioni, forma struttura e intensità del campo magnetico, densità media del gas interstellare e la posizione del sistema solare al suo interno. Le sezioni d'urto d'interazione nucleare con gli atomi del mezzo interstellare giocano anch'essi un ruolo primario.

Secondo tale teoria [1-4] solo i raggi cosmici galattici generano il ginocchio e la caviglia e non vi è la necessità di nessuna componente extragalattica cosmologica sino a 6×10^{19} eV. I raggi cosmici galattici hanno sorgenti sia nel disco che nell'alone.

Questa medesima teoria dà conto intrinsecamente, direttamente e semplicemente di una terza notevole struttura dello spettro presente intorno a $(5-7) \times 10^{17}$ eV [8-11] dove l'indice γ dello *spettro completo* assume il valore di 3.3. Si tratta del valore massimo raggiunto da γ dello *spettro completo* nell'intervallo 10^{10} - 5×10^{19} eV e quindi un punto unico caratteristico. Tale struttura a $(5-7) \times 10^{17}$ eV è chiamata, nella letteratura, impropriamente secondo ginocchio.

Questo studio consta di 7 Sezioni dove si tratta dei basamenti del calcolo (2); dell'origine del secondo ginocchio (3); dei dati sperimentali sul secondo ginocchio (4); di alcuni affinamenti quantitativi sulle proprietà del secondo ginocchio causati dalla presenza di una componente di raggi cosmici che penetra nel disco dall'esterno (5); del confronto con altre teorie e schemi di calcolo (6) e infine delle conclusioni (7).

2 LE BASI DEL CALCOLO

Lo studio delle traiettorie dei raggi cosmici nella Via Lattea iniziato nel 1994 [12] permette di calcolare le intensità dei raggi cosmici in un qualunque punto del disco galattico e in particolare, nella zona galattica locale, concentrica e vicina al sistema solare. Le sorgenti dei raggi cosmici sono distribuite in modo uniforme nel volume del disco galattico [13]. La Figura 2 mostra le intensità di protoni, di nuclei di elio, azoto, silicio, calcio e ferro calcolate immaginando che uno stesso numero di ioni sia emesso dalle sorgenti nel disco tra 10^{10} e 5×10^{19} eV, indipendentemente dall'energia. Tali spettri costituiscono il risultato ultimo della simulazione delle traiettorie nella Galassia oggetto di elaborazioni per più di un decennio. La teoria impiegata in questo studio consta di tali spettri, del *Postulato degli Indici Spettrali Costanti* per ogni ione della radiazione cosmica [1] e di nessun altro elemento. La Tavola 1

riporta i parametri del calcolo, basati su dati sperimentali, chiamati in breve *miscela ionica* che specifica le frazioni degli ioni e gli indici spettrali usati per la normalizzazione della intensità della radiazione cosmica all' energia di 10^{12} eV, scelta a piacere. Altre miscele ioniche, leggermente diverse, ma sempre vincolate ai dati sperimentali, sono state usate in altri lavori [14,15]. Combinando gli spettri della Figura 2 con il predetto postulato si ottengono gli spettri della Figura 3 direttamente comparabili alle misure. Tali spettri definiscono tutte le proprietà del secondo ginocchio, scopo della presente indagine, e tutte le argomentazioni e i risultati che seguono, senza eccezione alcuna, derivano da tali spettri.

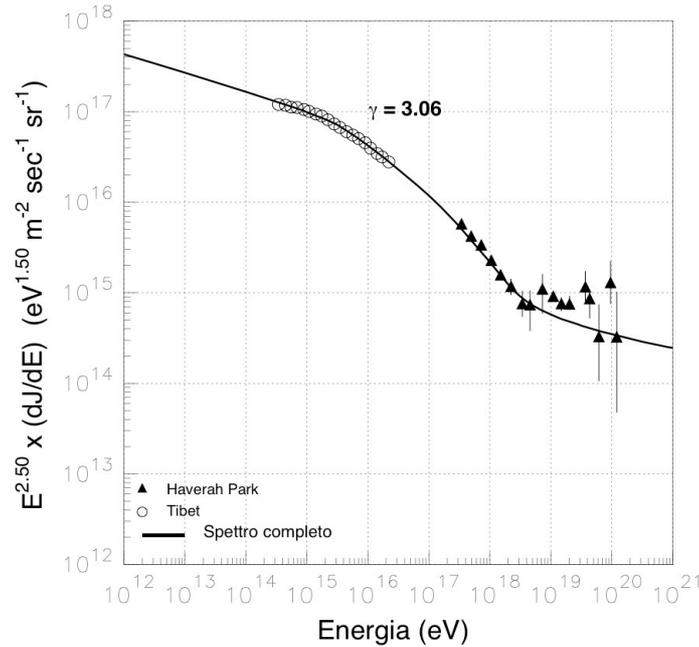


Figura 1 - Confronto tra spettro misurato dagli esperimenti Haverah Park e Tibet e spettro calcolato secondo la Teoria degli Indici Spettrali Costanti.

Gli spettri regolari ed ordinati della Figura 2 convergono alla comprensione dei fenomeni galattici che generano e condizionano le proprietà del ginocchio, della caviglia e di altre peculiarità dello *spettro completo* ma non si addicono al confronto diretto con le misure. Quando s' impongono gli indici e le abbondanze degli ioni della Tabella 1, gli spettri si possono comparare direttamente alle misure benché i flussi dei vari nuclei si sparpagliano come mostra la Figura 3.

Tabella 1 – Parametri del calcolo riguardanti flussi e abbondanze degli ioni a 1 TeV denotati *miscela ionica AE4* .

Ione	Composizione (%)	Indice spettrale	Intensità (ioni/m ² s sr eV ^{1.5})x10 ¹⁶
H	42.4	2.74	16.1
He	26.5	2.72	10.07
CNO	11.9	2.69	4.54
Ne-S	9.2	2.68	3.505
Ca(17-20)	1.2	2.67	0.44
Fe (21-28)	8.7	2.66	3.31

A completamento del *corpus* di questa teoria su cui poggiano i calcoli non sarà inutile tener presente che il processo di accelerazione dei raggi cosmici è considerato a tutt'oggi

(2009) sconosciuto ma ha due vincoli empirici imprescindibili: (1) gli indici degli ioni alle sorgenti sono costanti, tra 10^{10} e 5×10^{19} eV, attestandosi intorno ad un valore comune di circa 2.65; (2) il processo di accelerazione opera in modo pervasivo nella Galassia sia nel disco che nell'alone. La propagazione degli ioni nella Galassia altera in modo insignificante l'indice di 2.65 come descritto altrove (Sez. 3 Ref. [15]).

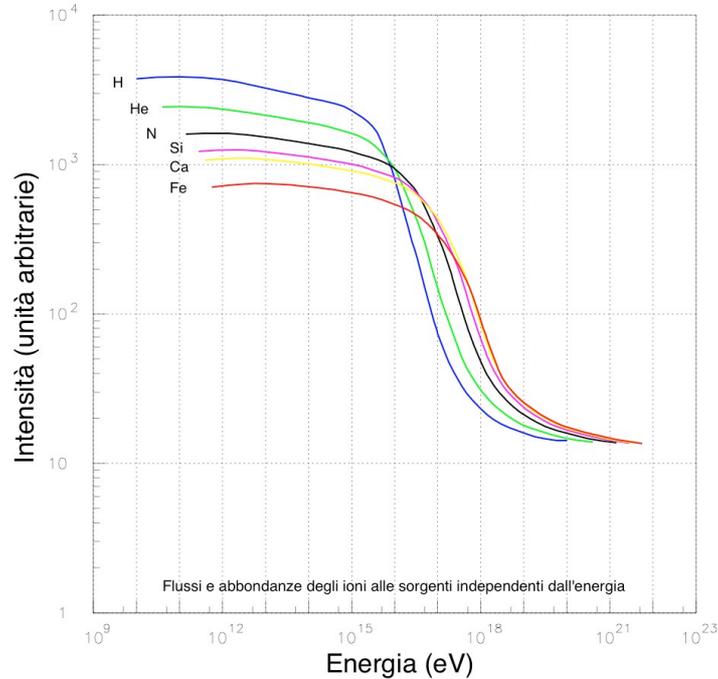


Figura 2 - Spettri degli ioni cosmici ottenuti con sorgenti del disco che emettono particelle con flussi indipendenti dall' energia. Tutti gli ioni emessi dalle sorgenti hanno uguali abbondanze a tutte le energie. Il nucleo di azoto (N) è rappresentativo del gruppo di elementi CNO, il nucleo di silicio (Si) del gruppo (Ne-S), il nucleo di calcio (Ca) del gruppo (Cl-Ca) e lo ione ferro (Fe) del gruppo (Sc-Ni).

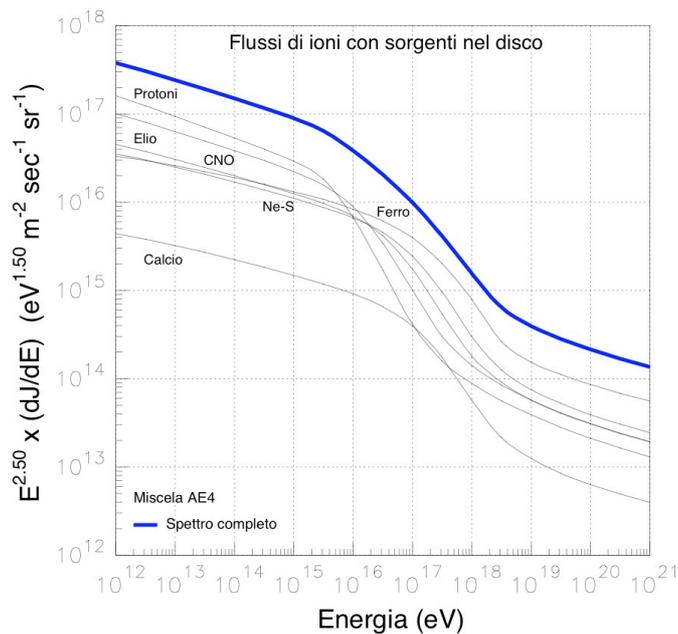


Figura 3 - Spettri parziali di sei ioni e spettro completo risultante (curva blu) con le sorgenti dei raggi cosmici ubicate nel disco.

3 NECESSITA' DEL GINOCCHIO DEL FERRO E SUE CARATTERISTICHE TRATTE DALLA TEORIA

L'origine del secondo ginocchio risulta e risalta dall'esame degli spettri della Figura 3 senza l'aggiunta di nessun altro elemento teorico. Si rimanda a lavori precedenti [1-4] per una comprensione dei fenomeni galattici all'origine di tali spettri.

Il ginocchio dei protoni si trova all'energia più bassa rispetto agli altri ioni, a circa 3.0×10^{15} eV come mostra la Figura 3 mentre quello dell'elio si trova 7.5×10^{15} eV. All'energia di 5.0×10^{15} eV gli spettri s'incrociano e i flussi di H e He assumono il medesimo valore di 1.25×10^{16} part/m² sr s eV^{1.5}. I ginocchi degli altri ioni si trovano ad energie più elevate.

I valori dell'indice γ dello *spettro completo* riportato in Figura 3 sono graficati in Figura 4 (curva spessa nera). L'indice γ è una funzione dell'energia e non è costante. Concretamente il profilo γ è stato costruito dagli spettri della Figura 3 prendendo cinque punti equidistanti in energia, imponendo una parabola attraverso i punti e tracciando infine la tangente nel punto centrale. Si constata che a basse energie, tra 10^{14} e 10^{15} eV, γ vale circa 2.65 quindi oltre 3×10^{15} eV cresce costantemente sino al valore massimo di 3.3 a 5×10^{17} eV, quindi decresce livellandosi al valore iniziale di 2.65 nel vasto dominio di energia 10^{18} - 5×10^{19} eV [16-18]. Nella medesima Figura 4 sono mostrati gli indici dei singoli ioni γ_H , γ_{He} , γ_{CNO} , γ_{Ne-S} , γ_{Ca} , γ_{Fe} . È ovvio che tali indici assumono valori più elevati di quello γ dello *spettro completo*.

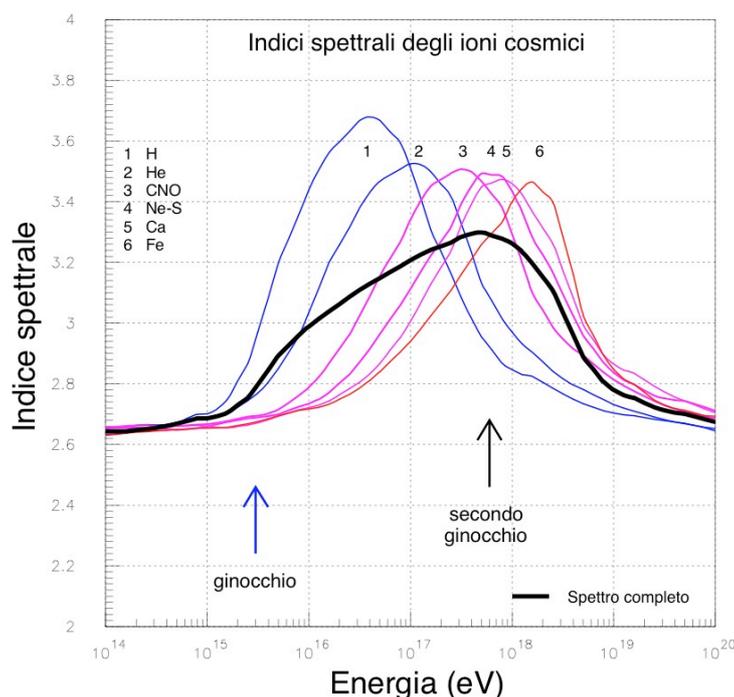


Figura 4 - Indice γ dello *spettro completo* in funzione dell'energia (curva nera). Sono mostrati anche gli indici degli altri ioni.

Il crollo di flusso dei protoni con indice massimo di 3.68 assunto intorno a 4×10^{16} eV non si riflette del tutto sullo *spettro completo*, inarcandolo con una pendenza di 3.68 propria del protone, perché le intensità dei restanti ioni, tra 3×10^{15} e 4×10^{16} eV, non hanno bruschi crolli. Il contenimento della caduta d'intensità si realizza a causa dei flussi regolari degli ioni più pesanti, tra 7×10^{15} e 4×10^{16} eV. Con flussi regolari s'intende quelli regolati e dominati dall'indice spettrale degli ioni emessi alle sorgenti e non quelli scoscesi propri dei ginocchi.

Quindi i flussi regolari si osservano in zone di energia preginocchio che denotiamo qui plateau. Parimenti lo *spettro completo* non si inarca per il ginocchio dell'elio con una pendenza massima di 3.52 (Figura 4) a causa del plateau del gruppo CNO ancora presente a 5×10^{16} eV.

Vi è il contenimento del crollo di flusso dell'elio non solo per i plateau più lunghi sottostanti gli ioni CNO, Ne-S e Fe ma anche perchè questi gruppi di ioni hanno percentuali cospicue, circa il 10 per cento comparabili a quella dell'elio. Infatti il ginocchio del calcio riportato in Figura 3, di forma simile a quello degli altri ioni, nonostante abbia un plateau più esteso rispetto a quello del gruppo Ne-S, è ininfluente a contenere i crolli d'intensità dei nuclei Ne-S, essendo la frazione di Ca solo 0.014.

In generale questo meccanismo di contenimento continua sino all'ultimo ione abbondante, cioè sino al ferro. Il ferro è l'ultimo nucleo relativamente abbondante della radiazione cosmica primaria, in una scala di A, come risulta da misure dirette le quali hanno stabilito che il numero di nuclei con $A > 60$ è inferiore ad alcune parti su diecimila del numero di ioni ferro [19,20]. Tale frazione modesta di ioni ultrapesanti permette allo spettro del ferro d'intaccare e foggiare lo *spettro completo* con il marchio della sua pendenza ripida di 3.47. Ciò è possibile, a differenza di tutti gli altri ioni con $Z < 26$, solamente perchè i plateau degli ioni con $A > 60$ non compensano la caduta di flusso propria del ginocchio del ferro rendendolo visibile (come fosse nudo) anche senza la sua identificazione sperimentale, come ione singolo.

Il dislivello tra plateau alto e plateau basso del ferro visibile in Figura 2, di circa un fattore 52.4, è minore, ad esempio, di quello dell'elio dove il fattore è di circa 136. Tali fattori sono determinati all'energia di 10^{14} eV (plateau alto) e oltre 10^{19} eV (plateau basso) dove tutti gli spettri assumono il valore asintotico di 13.9 (si veda la Figura 2) nella scala verticale arbitraria della medesima figura. Tali dislivelli nonché le loro posizioni lungo l'asse dell'energia determinano le pendenze massime $\gamma_H, \gamma_{He}, \gamma_{CNO}, \gamma_{Ne-S}, \gamma_{Ca}, \gamma_{Fe}$ mostrate in Figura 4.

Si noti il valore massimo di 3.3 di γ e la sua posizione lungo l'asse dell'energia, a 5.5×10^{17} eV. Il valore massimo dell'indice γ tra 10^{15} e 10^{18} eV, deve essere inferiore sia a quello massimo del protone ($\gamma_H = 3.68$) sia a quello massimo del ferro ($\gamma_{Fe} = 3.47$) a causa della sovrapposizione delle code degli altri ioni (Figura 4) che globalmente ammorbidiscono gli indici singoli di ciascuno ione. Le code infatti avendo valori degli indici più piccoli dei valori massimi di ciascuno ione (fig. 4) collocano l'indice γ a valori compresi tra i massimi $\gamma_H, \gamma_{He}, \gamma_{CNO}, \gamma_{Ne-S}, \gamma_{Ca}, \gamma_{Fe}$ e l'indice minimo dello spettro completo di circa 2.65. La preponderanza del ferro su altri ioni nella regione di energia limitrofa a 5.5×10^{17} eV è evidente in Figura 5 che mostra le frazioni di ioni singoli e in gruppi in funzione dell'energia. Tale dominanza è di enorme importanza teorica e sperimentale come verrà chiarito nel seguito.

La composizione chimica media dei raggi cosmici espressa attraverso $\langle \ln(A) \rangle$ della miscela AE4 è in Figura 6 (curva blu) e deriva direttamente dagli spettri della Figura 3. La Figura 6 riesprime in altro modo i risultati della Figura 5. Si noti il profilo caratteristico di $\langle \ln(A) \rangle$ con la salita ripida dopo 3×10^{15} eV, il massimo di 3.36 a 4×10^{17} eV, la discesa sino al minimo di 2.83 a 10^{19} eV e infine, la livellazione. Ad esempio, la frazione di ferro a 5×10^{17} eV ammonta a 0.50 mentre quelle degli altri ioni: Ca, Ne-S, CNO, He e H, sono, nell'ordine, 0.056, 0.22, 0.12, 0.075 e 0.042. Da tali frazioni risulta $\langle \ln(A) \rangle$ di 3.3, valore sulla curva di Figura 6 a 5×10^{17} eV. Si noti che con altre miscele ioniche (si veda refs. [14,15]) il profilo caratteristico di Figura 6 persiste benché vi siano differenze nelle frazioni dei vari ioni.

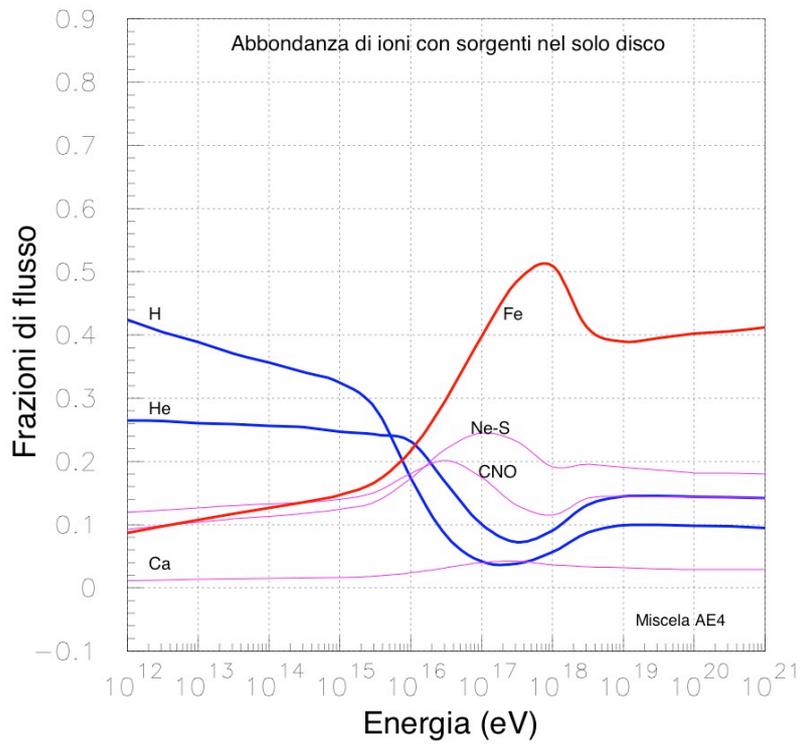


Figura 5 - Frazioni di ioni in funzione dell'energia con i parametri della miscela AE4 con le sorgenti poste nel disco.

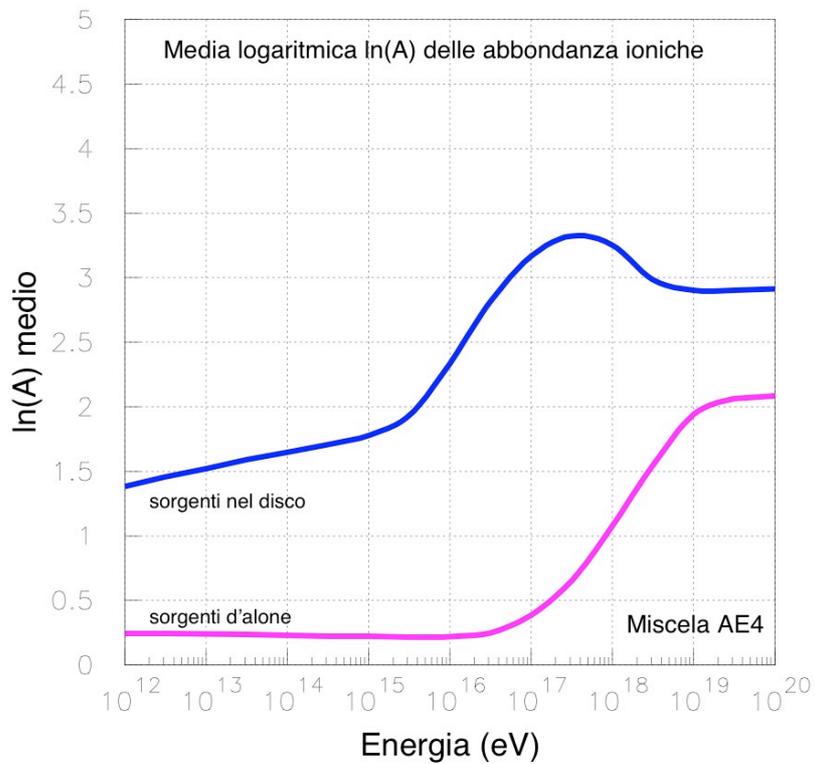


Figura 6 - Composizione chimica media della radiazione cosmica espressa come $\langle \ln(A) \rangle$ in funzione dell'energia per sorgenti poste nel disco (curva blu). La medesima quantità per sorgenti di raggi cosmici ubicate fuori del disco (curva magenta).

Il decremento degli elementi leggeri (H e He) a frazioni del 9 per cento intorno a 3×10^{17} eV e il successivo aumento a frazioni cospicue del 25 per cento a 10^{19} eV è una proprietà degli spettri della Figura 3 (normalizzati a 1 TeV). Il profilo delle frazioni di ioni nell'intervallo 3×10^{17} - 8×10^{18} eV, dove terminano tutti i ginocchi dall'idrogeno al ferro e s'instaura un regime di flussi a indici costanti, occupa la regione di energia della caviglia e la caratterizza in un suo aspetto essenziale (par. 4 ref. [1]).

4 EVIDENZA EMPIRICA DELL'ULTIMO GINOCCHIO INTORNO A 10^{17} eV

L'evidenza empirica del secondo ginocchio proviene dalla Collaborazione Akeno [8]. Graficando lo spettro misurato moltiplicato per E^3 si osserva una piegatura netta oltre $(5-7) \times 10^{17}$ eV che implica un'indice spettrale maggiore di 3, probabilmente tra 3.2 e 3.3. La scoperta fu confermata successivamente da altri esperimenti [9-11].

I dati revisionati di Yakutsk [10] oltre 5×10^{17} mostrano un cambio di indice spettrale da 3 a valori più elevati, a conferma delle misure dell'esperimento Akeno [8].

Il valore assoluto dell'energia dove l'indice dello *spettro completo* assume il valore massimo di 3.3 non è più preciso del 30 per cento tenendo conto dei 4 esperimenti.

A causa del meccanismo di contenimento descritto testè, l'indice γ non è costante nell'intervallo 10^{17} - 10^{18} eV ma varia con l'energia come attesta la Figura 4. Ma poiché le cadute d'intensità degli ioni (ginocchi) al crescere di A sono scaglionate con l'energia e poiché esiste un valore di A (A=56, Fe) oltre il quale le abbondanze degli ioni sono insignificanti, l'indice γ deve raggiungere un massimo, decrescere e quindi stabilizzarsi al valore asintotico di 2.65. Tale circostanza suggerisce di adottare una scala opportuna per evidenziare il secondo ginocchio.

Nella Figura 7 sono mostrati gli spettri in energia dei raggi cosmici degli esperimenti Yakutsk, Akeno e HiRes nell'intervallo massimo 10^{16} - 2×10^{20} eV. Si noti che gli spettri della Figura 7 sono stati moltiplicati per $E^{3.15}$ affinché si formi una cuspidè (montagna) quando è massimo l'indice γ . Questa particolare scelta della scala verticale tiene conto del profilo γ di Figura 4 che ha un'escursione da 3.0 a 3.3 nell'intervallo 10^{16} - 4×10^{18} eV. Come risulta dalla Figura 7 intorno all'energia di 5×10^{17} eV vi è la massima pendenza dello *spettro completo*.

Allo spettro di Haverah Park di Figura 8 manca la costa sinistra della montagna ma è visibile quella destra sulla quale è sovrapposta una retta di pendenza arbitraria 0.15 (adottata solo per guidare l'occhio). In tal modo, anche in questo quarto esperimento, s'intravede la caduta d'intensità propria del ginocchio del ferro.

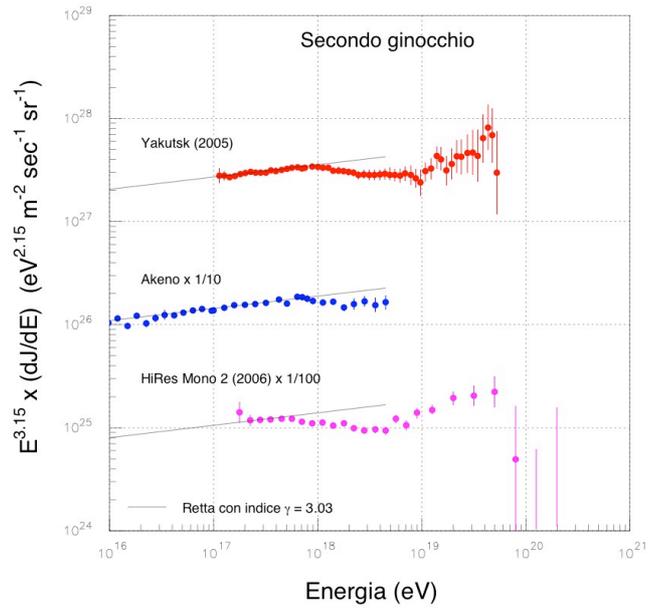


Figura 7 - Evidenza sperimentale del secondo ginocchio degli esperimenti Yakutsk, Akeno e HiRes.

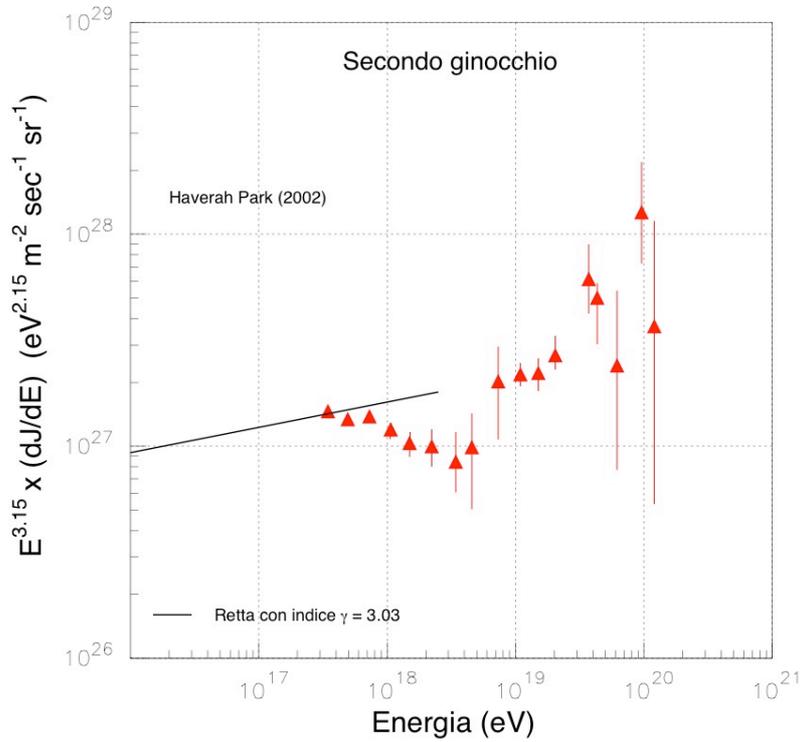


Figura 8: Evidenza del secondo ginocchio dell'esperimento Haverah Park.

5 IL SECONDO GINOCCHIO E LE MISURE DELLA COMPOSIZIONE CHIMICA DELLA RADIAZIONE COSMICA

Benché la natura e l'origine del secondo ginocchio sia descritta nella Sezione 3 alcuni aspetti quantitativi notevoli emergono dall'analisi di recenti misure dell'esperimento Auger [21,22] della profondità atmosferica media della radiazione cosmica denotata X_{\max} . La Figura 9 riporta il profilo di $\langle \ln(A) \rangle$ estratto dai dati di Auger con una procedura usuale discussa altrove [14,15]. A tutt'oggi, oltre 10^{17} eV gli esperimenti, non potendo identificare gli ioni singoli, determinano la composizione chimica media misurando X_{\max} convertibile in $\langle \ln(A) \rangle$. In Figura 9, oltre 4×10^{17} eV, si constata uno scarto notevole tra teoria (curva blu) e misure.

Interpretando tali misure e lo scarto menzionato si è concluso che una frazione della radiazione cosmica osservabile sulla Terra, oltre 10^{16} eV, proviene da regioni esterne al disco galattico e, per gli argomenti presentati altrove [23], dall'alone della Via Lattea. Tale componente verrà chiamata *extradisco* e denotata I_{ed} . Il termine la distingue dalla componente extragalattica che, generalmente, denota raggi cosmici provenienti da grandi distanze, sino a decine di *Mpc* (e non dall'alone della Via Lattea solamente).

Caratteristica notevole di I_{ed} è la leggerezza della sua composizione chimica come mostra la Figura 6 (curva magenta). Si constata, ad esempio, che $\langle \ln(A) \rangle$ della componente I_{ed} da 10^{12} a 2×10^{16} eV vale 0.21 mentre $\langle \ln(A) \rangle$ della componente I_{d} nel medesimo intervallo cresce da 1.4 a 1.75. Introducendo il rapporto $I_{\text{ed}}/I_{\text{d}}$ come parametro libero e denotato r , si ottengono le curve di $\langle \ln(A) \rangle$ di Figura 10 che sono il risultato della somma dei due profili di $\langle \ln(A) \rangle$ mostrati in Figura 6 con valori di r di 0, 1, 2, 3 e 10. Con $r=0$ tutte le sorgenti sono nel disco e si ritrova la curva blu di Figura 6. Già con $r=2$ dalla Figura 10 si nota un profilo molto caratteristico (curva arancione) costituito da una prima salita tra 10^{12} e 2×10^{15} eV, una seconda salita ripida tra 3×10^{15} e 10^{17} eV, un massimo a 1.05×10^{17} eV, una discesa sino a 4×10^{18} eV dove vi è un minimo di 2.20, e infine oltre tale energia, una lenta risalita che tende ad appiattirsi oltre 3×10^{19} eV.

Dall'esame della Figura 10 s'intende che la composizione chimica delle componenti I_{ed} e I_{d} sommate, con le sue caratteristiche sinuosità, è inconfondibile. Dal confronto con i dati sperimentali della Figura 9 si constata che i profili di $\langle \ln(A) \rangle$ all'aumentare di r , per piccoli valori di r , mostrano una sorprendente somiglianza. Da questa si ammette e si giustifica in via empirica la componente *extradisco* [23]. Lo scarto evidente tra dati e curva teorica mostrato in Figura 9, valutato ponendo tutte le sorgenti nel disco ($r=0$ ovvero $I_{\text{ed}}=0$) suggerisce, di per se, tale componente I_{ed} come flusso mancante, ma la predetta somiglianza aggiunge evidenza e solidità all'esistenza di I_{ed} .

La componente *extradisco* origina un profilo di $\ln \langle A \rangle$ molto più leggero rispetto a I_{d} per due cause distinte: al crescere di A degli ioni cosmici aumentano le sezioni d'urto d'interazione cosicché gli ioni pesanti subiscono collisioni nucleari più numerose nel mezzo interstellare diminuendo le proprie abbondanze a vantaggio di quelle degli ioni leggeri (H e He). Gli ioni fuoriescono dal disco con flussi inversamente proporzionali ai ginocchi (cioè forti decrementi di flusso con l'energia) e quindi popolano lo spazio *extradisco* con proporzioni fortemente dipendenti dall'energia. Cosicché gli ioni leggeri abbondano nell'alone già tra 10^{16} e 10^{17} eV mentre i nuclei di ferro solo oltre 8×10^{18} eV. I dettagli quantitativi di questo meccanismo si trovano in altro lavoro [15].

Si rileva che con la miscela ionica AE4 solo piccoli valori di r (ad esempio, $r=1,2$ o al massimo $r=3$) preservano l'accordo con lo *spettro completo*, vincolo imprescindibile della teoria.

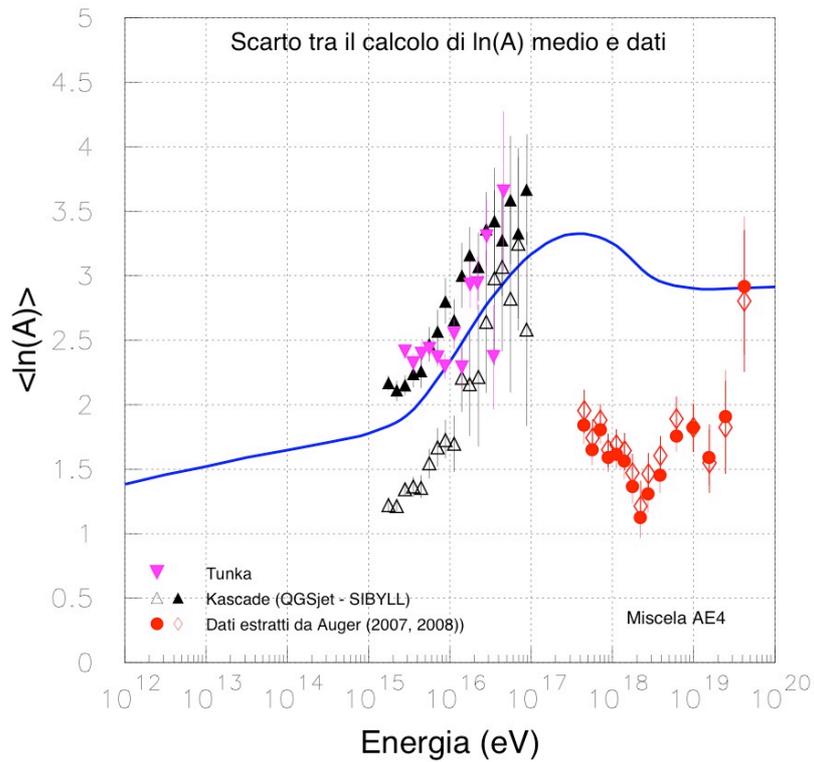


Figura 9 - Confronto tra i dati della composizione chimica della radiazione cosmica degli esperimenti Tunka, Auger e Cascade e il calcolo.

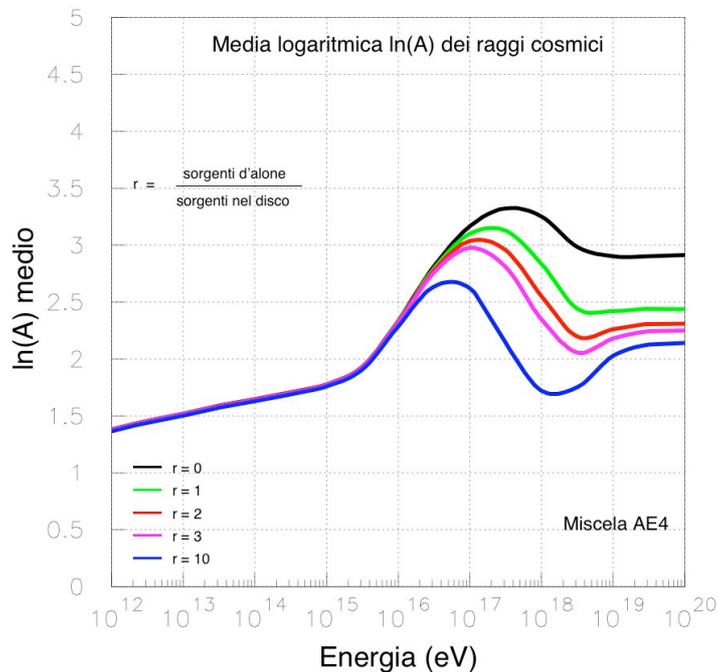


Figura 10 - Composizione chimica della radiazione cosmica espressa attraverso $\langle \ln(A) \rangle$ con le sorgenti dei raggi cosmici poste nell'alone e nel disco con intensità I_{ed}/I_d nel rapporto r di 0, 1, 2, 3 e 10. Si noti il profilo caratteristico con il massimo, il minimo e la risalita finale allorché r acquista valori cospicui.

Si rimanda altrove [14,15] per un' analisi dettagliata dei dati sperimentali. Esistono attualmente discrepanze notevoli tra i vari esperimenti nella misura di $\langle \ln(A) \rangle$ oltre 10^{17} eV. Le discrepanze sussistono indipendentemente dai modelli adronici utilizzati tanto nell' analisi dati quanto nell' estrazione di $\langle \ln(A) \rangle$ da X_{\max} misurato. Anche gli esperimenti che usano la luce di fluorescenza per determinare il profilo longitudinale dello sciame atmosferico (Auger e HiRes), accusano discrepanze nella misura di $\langle \ln(A) \rangle$. Si noti che anche all' interno di uno stesso esperimento che si avvale della luce di fluorescenza (HiRes), a causa di correzioni strumentali applicate in differenti periodi [24,25], si registrano marcate differenze nella misura di $\langle \ln(A) \rangle$. Ciò premesso si ritiene che il profilo di $\langle \ln(A) \rangle$ con $r=2$ mostrato in Figura 10 risulta adeguato a descrivere i dati sperimentali attuali (2009).

La Figura 11 mostra gli spettri degli ioni singoli della sola componente I_{ed} con la miscela AE4. La Figura 12 mostra la somma degli spettri delle due componenti I_d e I_{ed} nonché lo *spettro completo*. La componente extradisco è normalizzata all' energia arbitraria di 10^{19} eV con la condizione $r=2$. Al confronto con gli spettri della sola componente I_d di Figura 3 si nota, oltre l' energia particolare E_{ed} dipendente dallo ione, un flusso sensibilmente maggiore. Sia E_{ed} quell' energia in cui il flusso della componente I_{ed} raggiunge il 50 per cento del flusso di I_d (definizione arbitraria ma utile). Per gli spettri di H, He, CNO, Ne-S, Ca e Fe riportati in Figura 12 i valori di E_{ed} sono nell' ordine: 1.1×10^{17} eV, 3.9×10^{17} eV, 1.8×10^{18} eV, 4.7×10^{18} eV, 8.0×10^{18} eV e 1.4×10^{19} eV. Gli indici spettrali oltre le energie particolari E_{ed} tendono a riassumere i valori dati della Tavola 1, propri dell' acceleratore galattico. Il flusso dello *spettro completo* della componentete I_{ed} raggiunge il 50% di I_d all' energia di 2.5×10^{18} eV.

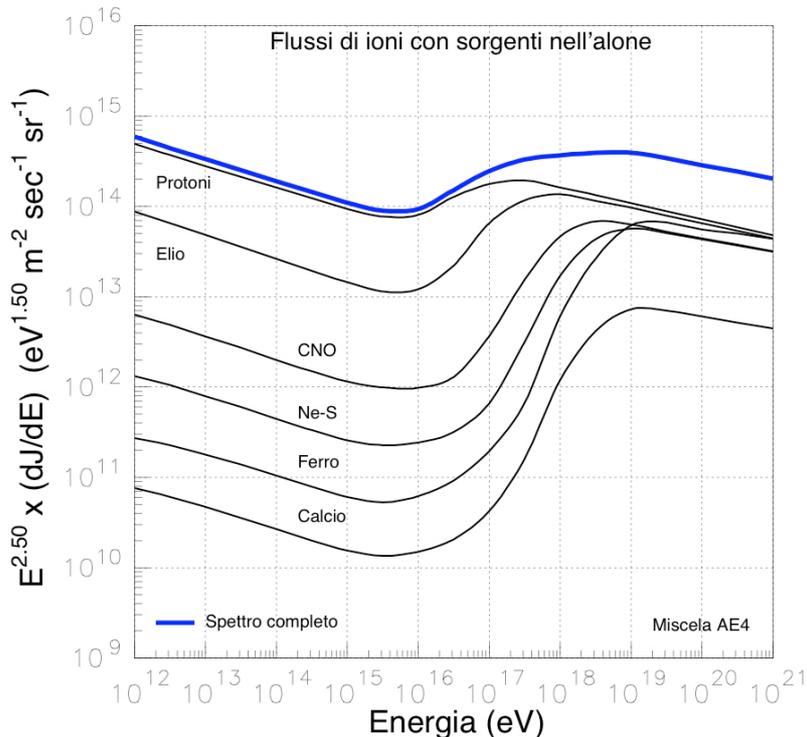


Figura 11 - Spettri degli ioni singoli in funzione dell' energia della componente extradisco e la loro somma (curva blu) ottenuti con la miscela AE4.

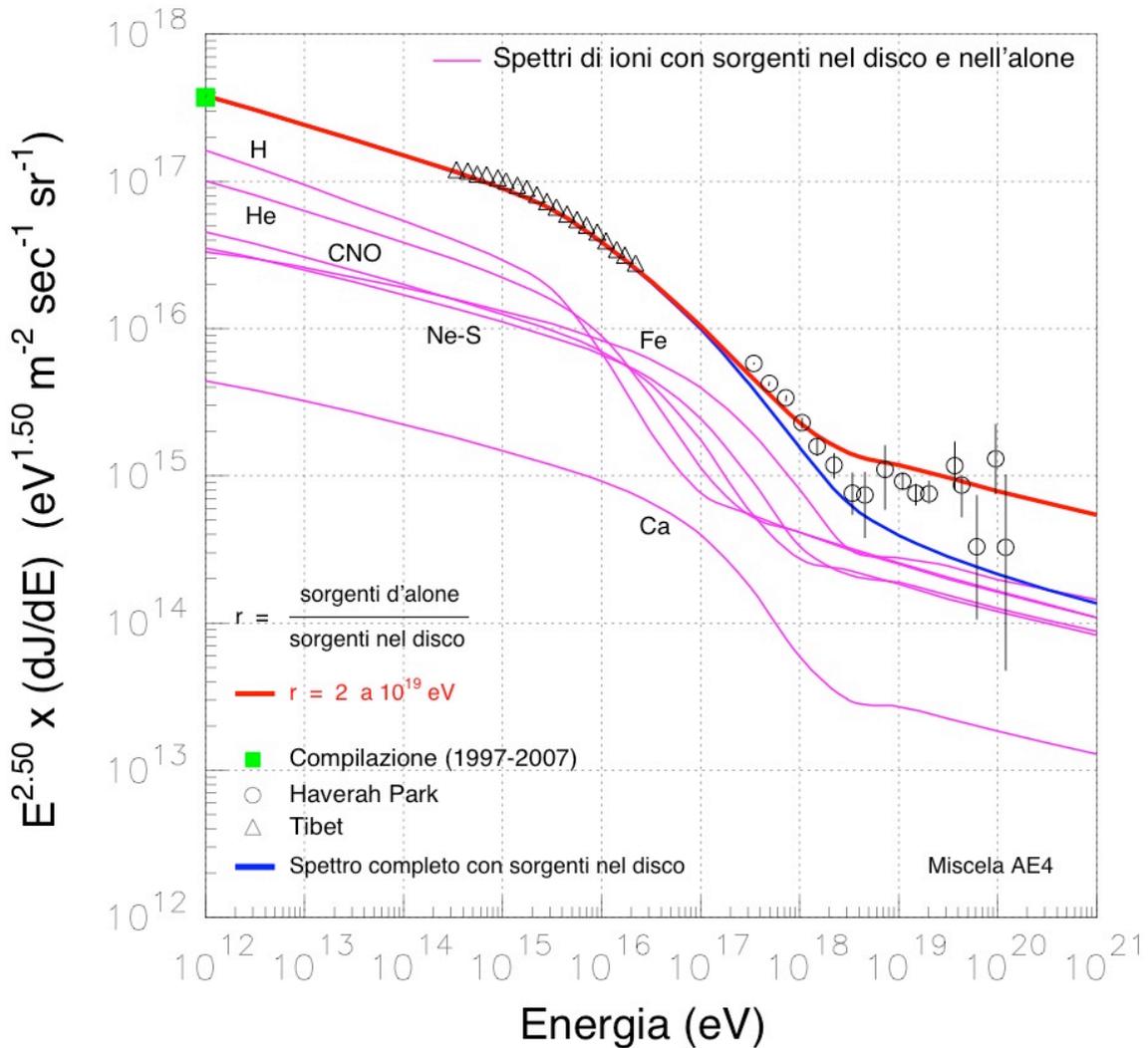


Figura 12 - Spettri degli ioni (spettri parziali) e della loro somma (spettro completo, linea rossa) con sorgenti nel disco e nell'alone con un rapporto di flussi I_{ed}/I_d di 2 a 1 all'energia di 10^{19} eV espressa dal parametro $r=2$. Lo spettro completo è normalizzato all'energia di 10^{12} eV al flusso di 3.79×10^{17} particelle/m² s sr eV^{1.5}.

La Figura 13 riporta le corrispondenti frazioni di ioni in funzione dell'energia. Rispetto alle frazioni di Figura 5 si vede che la quantità di ferro e calcio diminuisce dal 54.0 al 43.3 per cento mentre la componente leggera (H e He) cresce da 11.5 a 28.0 per cento. Cosicché ad esempio, a 5×10^{17} eV le frazioni di Fe, Ca, Ne-S, CNO, He e H, sono, nell'ordine, 0.50, 0.056, 0.22, 0.12, 0.075 e 0.042. Da tali frazioni risulta $\langle \ln(A) \rangle$ di 2.85, valore sulla curva di Figura 10 per $r=2$.

La Figura 14 mostra come cambia l'indice γ con le componenti I_d e I_{ed} sommate, rispetto a quello della sola componente galattica mostrato in Figura 4.

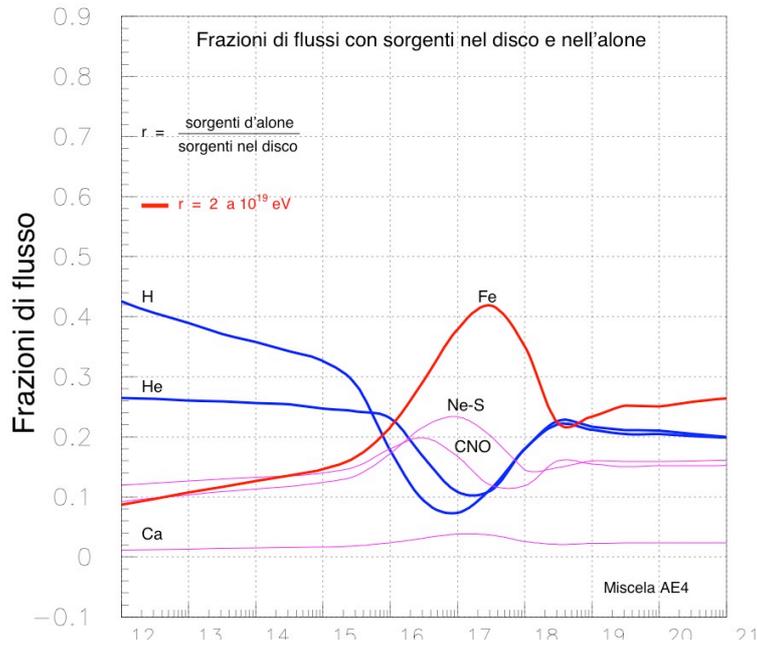


Figura 13 - Frazioni di ioni in funzione dell'energia per sorgenti poste nel disco e nell'alone con rapporti di flussi $I_{ed}/I_d = 2$ all' energia di 10^{19} eV con la miscela AE4.

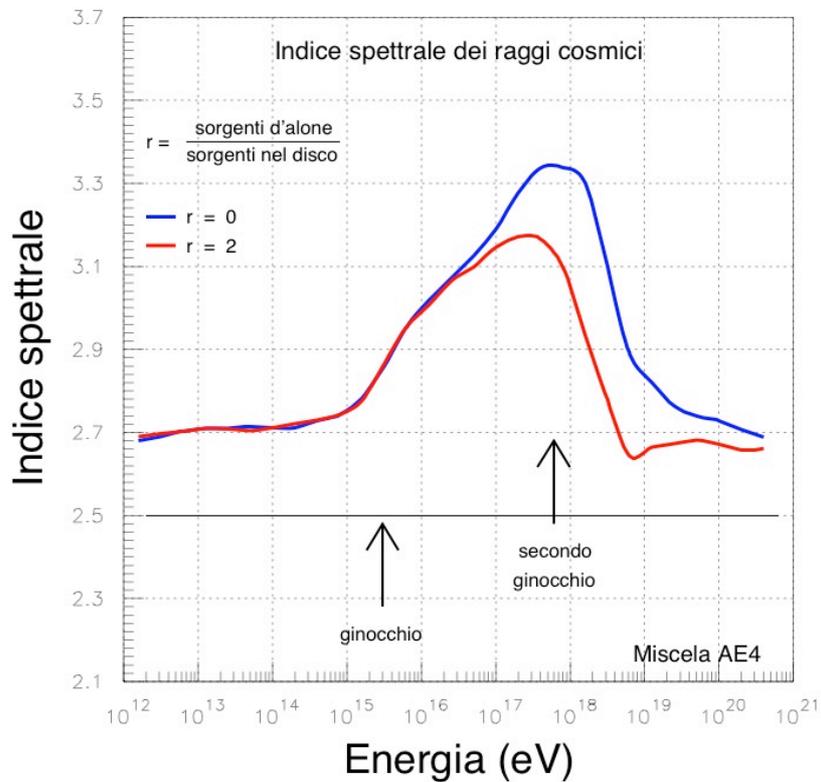


Figura 14 - Indice dello spettro completo γ in funzione dell'energia con sorgenti poste nell'alone (curva rossa) e nel disco (curva blu) con intensità globali nel rapporto di 2 a 1 all' energia di 10^{19} eV.

6 CHE COSA NON È IL SECONDO GINOCCHIO

Nel seguito si descrivono brevemente due tentativi di spiegare il secondo ginocchio: uno legato al meccanismo di accelerazione dei raggi cosmici nella Via Lattea [26,27] e un secondo denominato *Modello a Fossa* [28,29] dove si postula una componente extragalattica cosmologica della radiazione cosmica misurabile sulla Terra, che si manifesterebbe oltre l'energia di 4×10^{17} eV. La componente cosmologica farebbe capolino all'energia menzionata, sommandosi a quella galattica, corrugando così lo spettro misurato dei raggi cosmici in forme marcate, riconoscibili.

Si fa l'ipotesi che i raggi cosmici siano accelerati con il meccanismo diffusivo in un inviluppo d'onde nei resti di supernove. Secondo questa teoria il crollo d'intensità corrispondente al ginocchio dello *spettro completo* è causato dall'inefficienza del predetto meccanismo accelerativo al crescere dell'energia che subentrerebbe oltre una certa energia caratteristica E_{\max} di circa 10^{14} eV per i protoni [30]. Secondo una variante maggiore di tale ipotesi, ponendo il ginocchio nominale del protone a 3×10^{15} eV come attestano le misure [31], quello del ferro si troverebbe a $Z \times (3 \times 10^{15} \text{ eV})$ con $Z=26$, essendo Z il numero atomico del ferro. Si ottiene 7.8×10^{16} eV. Si noti che gli spettri dei protoni misurati da Cascade, indipendentemente dall'algoritmo Sybill, QSGjet o dal metodo deconvolutivo [32], hanno un crollo di flusso (ginocchio), ben definito in energia, nella banda $(6-9) \times 10^{15}$ eV. L'energia di 7.8×10^{16} eV è un ordine di grandezza al di sotto del valore determinato dall'esperimento Akeno di $(5-7) \times 10^{17}$ eV.

Pertanto la spiegazione dell'origine del secondo ginocchio non si concilia con il menzionato meccanismo accelerativo. Dalla posizione del secondo ginocchio lungo l'asse dell'energie $(5-7) \times 10^{17}$ eV il meccanismo di accelerazione diffusivo dei raggi cosmici galattici nei resti di supernova s'incaglia in una ulteriore difficoltà che si aggiunge ad altre incoerenze (si veda Sezione 6 ref. [14]). In una variante del modello ad accelerazione diffusiva si immagina che un sottocampione di supernove in condizioni particolari possa accelerare raggi cosmici ad energie più elevate spostando E_{\max} dal valore di 7.8×10^{16} eV ad energie superiori¹ [33].

Esisterebbe una componente di raggi cosmici costituita essenzialmente da protoni che permea lo spazio extragalattico con origine cosmologica liberata da un ristretto numero di galassie (galassie particolari). Tali protoni perderebbero energia interagendo con la radiazione fossile γ generando coppie e^-e^+ attraverso il processo $p + \gamma \rightarrow p + e^-e^+$ che ha una soglia cinematica a 4×10^{17} eV, molto prossima all'energia del secondo ginocchio. L'ubicazione delle sorgenti, il meccanismo di accelerazione, l'indice spettrale delle particelle emesse dall'acceleratore, la composizione chimica all'iniezione nonché quella rilasciata dall'acceleratore cosmologico sono parametri liberi della teoria. Anche l'intensità in arrivo alla Terra è un parametro libero aggiustabile a seconda dell'intensità dei raggi cosmici galattici. Le perdite di energia dei protoni produrrebbero un avvallamento dello spettro completo misurabile sulla Terra rispetto ad uno spettro imperturbato generato da sorgenti

¹ I fautori del *Sistema Tolemaico* hanno tentato sino al Rinascimento di spiegare le proprietà dei moti dei pianeti ponendo la Terra al centro del mondo conosciuto e immaginato. Sia il numero di ipotesi *ad hoc* evocate sia la precisione sulle traiettorie dei corpi celesti può ancora sbalordire. Rimane chiarissimo che l'ipotesi portante del *Sistema Tolemaico* è errata in forma irrimediabile. La spiegazione dell'origine del ginocchio e dei ginocchi dei singoli ioni attraverso il meccanismo di accelerazione diffusivo in un inviluppo d'onde nei resti di supernove, nonostante confligga con i dati sperimentali, persiste nella letteratura e richiama oggi, su una scala temporale molto più modesta di circa mezzo secolo, le vicende storiche del *Sistema Tolemaico*. A ciascuna incompatibilità con i dati sperimentali si pone rimedio con un'ipotesi *ad hoc* creando un mostro logico che popola le riviste scientifiche, avversato da pochissimi e tollerato da molti.

extragalattiche cosmologiche. L'indice dello spettro imperturbato con indice spettrale costante rilasciato dalle sorgenti non è anch'esso univocamente definito, ma parametro libero.

L'esistenza stessa del *Modello a Fossa* [28,29] come formulazione teorica implica esplicitamente la difficoltà della teoria ad accelerazione diffusiva nei resti di supernova nel tentativo di spiegare il ginocchio dei protoni, quello dello *spettro completo* e quelli degli altri ioni. Infatti, se l'intensità del ferro decresce esponenzialmente oltre il ginocchio teorico a 7.8×10^{16} eV occorre una nuova componente di raggi cosmici che compensi la voragine che si aprirebbe tra il flusso dello *spettro completo* misurato e quello (ipotetico) erogato dall'acceleratore diffusivo nei resti di supernova. Il *Modello a Fossa*, tra l'altro, tenta di evitare tale problema.

Il secondo ginocchio nel *Modello a Fossa* sarebbe generato dal flusso dei raggi cosmici galattici e da quello della componente protonica extragalattica che oltre la soglia di 4×10^{17} eV, intorno all'energia di $(7-9) \times 10^{17}$ eV produrrebbe uno *spettro completo* con indice molto ripido di circa 3.2. Tale valore, alquanto sorprendente, si ottiene con un raccordo particolarmente fortunato dei due indici spettrali della componente galattica ed extragalattica intorno alla striscia particolare di energia di $(5-7) \times 10^{17}$ eV. Tale raccordo esige, inoltre, che le due componenti galattica ed extragalattica abbiano all'incirca pari intensità. Con tali vincoli sotto la soglia di 4×10^{17} eV il flusso di protoni extragalattici deve ridursi a quantità insignificanti rispetto al flusso misurato dei raggi cosmici galattici.

Anche il *Modello a Fossa* però non si accorda con i dati sperimentali, in modo irrimediabile. Gli spettri dei protoni misurati dall'esperimento Cascade hanno un flusso di $(1-2) \times 10^{15}$ particelle/(m^2 s sr $eV^{1.5}$) all'energia di 8×10^{16} eV ben al disotto della soglia di 4×10^{17} eV dove il *Modello a Fossa* prevede un flusso di protoni cosmologici molto inferiore.

Come verifica ridondante del disaccordo irrimediabile del *Modello a Fossa* con i dati sperimentali si mostra in Figura 15 la profondità atmosferica media della radiazione cosmica X_{max} misurata dall'esperimento Auger comparata con le previsioni (striscia turchese) del medesimo modello. Occorre osservare che l'ipotesi dell'origine extragalattica cosmologica della radiazione cosmica ad energie inferiori a 5×10^{19} eV non ha fondamento sperimentale né ha alcuna necessità logica derivante da parti empiricamente consolidate della Fisica dei Raggi Cosmici². Si è menzionato il *Modello a Fossa* solo come esempio di teoria alternativa alla presente.

² La tesi di ammettere la componente extragalattica cosmologica ad energie intorno ed oltre la caviglia per giustificare il livello osservato di anisotropia non solo non risolve il problema dell'anisotropia, che permane strutturalmente a tutte le energie inferiori, ma non ha necessità logica nel senso che non è l'unica alternativa possibile. Infatti, ad esempio, come suggerito altrove (V. S. Ptuskin), un qualunque processo di riaccelerazione dei raggi cosmici nella Galassia tenderebbe ad isotropizzare maggiormente le direzioni di arrivo. Più in generale, come argomentato da altri (W. Kundt) una componente extragalattica cosmologica ad energie inferiori a 5×10^{19} eV s'incaglia in un numero di problemi superiore a quelli che tenta di risolvere.

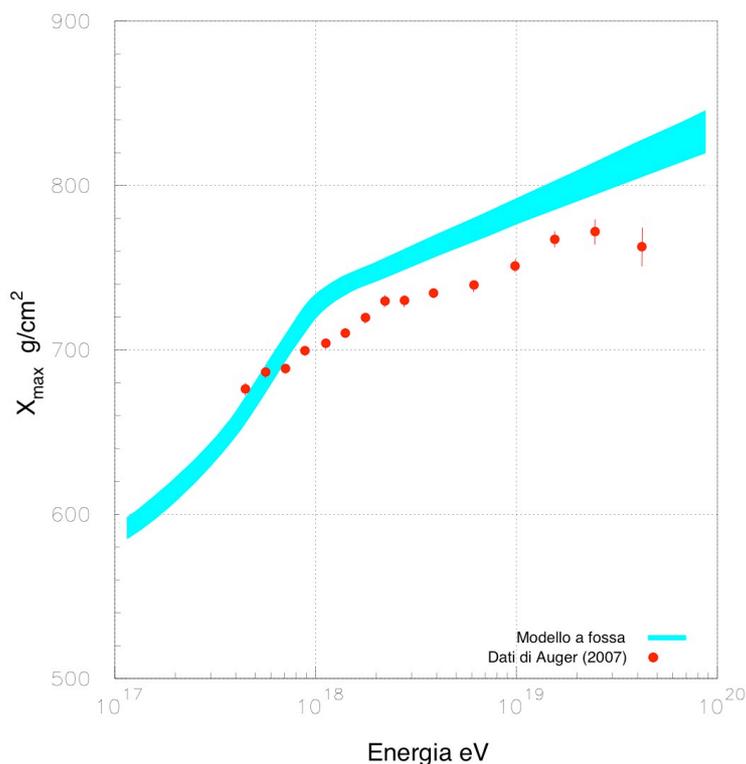


Figura 15 - Confronto tra la composizione chimica della radiazione cosmica misurata dall'esperienza Auger [35] mediante il punto d'impatto medio dei nuclei cosmici nell'atmosfera terrestre e quella prevista dal Modello a Fossa [34] (banda turchese).

7 CONCLUSIONI, IMPLICAZIONI E CHIOSE

L'esistenza del secondo ginocchio è scolpita negli spettri delle figure 2 e 3 ottenuti dalla teoria dei raggi cosmici formulata in precedenza [1-4]. Tale teoria ha un accordo esteso e preciso con numerosi dati sperimentali [14,15]. Gli spettri della Figura 3 si ottengono normalizzando lo *spettro completo* a 10^{12} eV con i parametri della Tavola 1 (*miscela ionica* AE4). Con altre *miscele ioniche* l'accordo con i dati permane come riportato altrove [3,14,15].

Il secondo ginocchio è semplicemente il ginocchio del ferro come mostrato negli spettri della Figura 3 e 12. Esso è generato dai soli raggi cosmici galattici che ne spiegano sia la natura sia gli aspetti quantitativi. Ad altissima energia, sino a 5×10^{19} eV, le sorgenti dei raggi cosmici galattici che alimentano il flusso locale sulla Terra si trovano sia nell'alone che nel disco [23].

Questa spiegazione del secondo ginocchio lega inevitabilmente ciò che appariva fortuito: la relazione tra l'indice massimo di 3.3 dello spettro completo e l'energia 5×10^{17} eV in cui si manifesta empiricamente il secondo ginocchio in un aspetto accessibile all'attuale sperimentazione. Tale relazione è riportata in Figura 4 (curva nera) e in Figura 14 (curva rossa). Si tratta di un nesso che è sfuggito e sfugge ad altre teorie e schemi di calcolo che hanno tentato una spiegazione del secondo ginocchio. Da questa teoria segue necessariamente che $\gamma_{\max} = 3.3$ dello *spettro completo* sia inferiore a $\gamma_{\max} = 3.47$ proprio del ferro come argomentato nella Sezione 3.

Le posizioni lungo l'asse dell'energia del ginocchio del ferro $(5-7) \times 10^{17}$ eV e di quello del protone $(3-4) \times 10^{15}$ eV sono univocamente determinate dagli spettri delle figure 2 e 3 e si trovano in accordo eccellente con i dati sperimentali. Il rapporto tra le posizioni in energia dei

due ginocchi di H e Fe non è una funzione semplice di Z o di A. Questo rapporto di circa 170 scaturisce dagli spettri di Figura 2 basati sulle dimensioni della Galassia, sulla posizione della Terra all'interno del disco, sul campo magnetico e su altri parametri (par. 2 ref. [4]) così come incorporati nella teoria [1-4].

Il profilo a montagna di γ della Figura 14 qualifica (come fosse un'impronta digitale) lo *spettro completo*: la necessità del cambio dell'indice spettrale dal valore di livello ad un valore massimo di 3.3; il raggiungimento graduale del massimo con la concavità rivolta verso il basso; il dato empirico che il valore di livello minimo di 2.65 è il medesimo sia alle basse energie preginocchio che alle alte, oltrecaviglia; la caviglia come punto necessario dello spettro completo, intorno a 4×10^{18} eV, allorché terminano i ginocchi (cadute brusche di flusso dei singoli ioni).

La caviglia dello *spettro completo* all'energia di 4×10^{18} eV segnala che il moto degli ioni non è più influenzato dal campo magnetico galattico, e necessariamente, a causa di questa insensibilità, gli indici degli ioni, assumono il valore di circa 2.65, caratteristico della macchina acceleratrice galattica. A basse energie, secondo la teoria [1-4], gli indici sono pressoché costanti con l'energia e hanno un valore comune di circa 2.65 essendo a regime l'insieme dei processi che regolano il moto degli ioni nella Galassia così come sono osservati dal sistema solare.

Se le misure di $\langle \ln(A) \rangle$ di Auger menzionate nella Sezione 5 e mostrati nella Figura 9 non subiranno modifiche sostanziali, per affinamenti dell'analisi dati o per progressi nelle misure delle sezioni d'urto nucleo-nucleo, lo spettro del ferro tra 10^{17} e 10^{18} eV e in particolare il secondo ginocchio, si trovano immersi in un bagno di protoni ed elio come indica la Figura 12, e più chiaramente la Figura 13 allorché comparate con le abbondanze di ioni di Figura 5 generate dalla sola componente galattica. Tale circostanza facilita la misura diretta del ginocchio del ferro dell'esperimento Cascade-Grande [36], poiché le frazioni di ioni dei gruppi intermedi CNO e Ne-S (che possono contaminare il segnale del ferro) si spopola a vantaggio degli ioni leggeri H e He (che più difficilmente contaminano il segnale del ferro).

Lo spettro del ferro che risulta dalla *Teoria degli Indici Costanti* è confrontato in Figura 16 con gli spettri misurati dagli esperimenti Hess [37], Eas-top [38] e Cascade [39]. Come riferimento in Figura 16 si mostra anche lo *spettro completo*, uguale a quello di Figura 12, comparato a due serie di misure di Cascade [40,41] nonché il flusso a 10^{12} eV di 3.79×10^{17} part/m² s sr eV^{1.5} (quadrato verde) unico punto di normalizzazione della teoria per lo *spettro completo*.

I flussi di ferro della Figura 16 dell'esperimento Cascade [39] risultanti dai due algoritmi Sybill e QGSjet differiscono notevolmente. Nella Figura 17 sono mostrati i flussi di ferro risultanti dalla media dei flussi dei due algoritmi QGSjet e Sybill di Cascade ad energie superiori a quelle di Eas-top, oltre 3×10^{16} eV, dove solo i dati di Cascade sono disponibili. Questa operazione di media, tanto semplice quanto arbitraria, riduce il ventaglio tra i valori massimi (Sybill) e minimi (QGSjet) degli esperimenti Cascade e Eas-top. Viene suggerito in altro lavoro [42] che i flussi medi di ferro di Cascade in Fig. 17, piuttosto elevati rispetto a quelli della teoria, sono generati dalla contaminazione dello spettro del ferro da parte dei nuclei attigui (Ne-S).

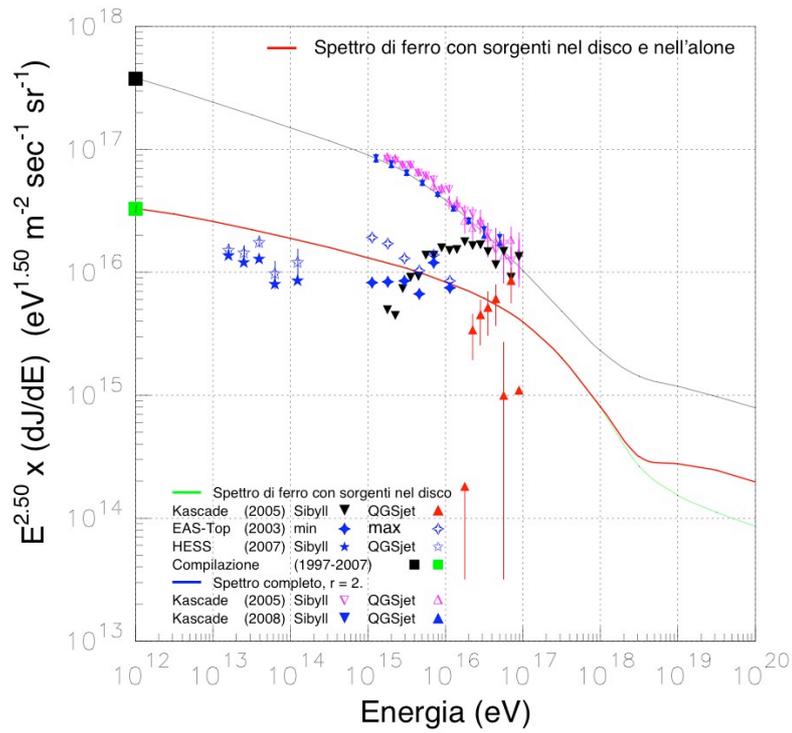


Figura 16 - Spettro del ferro (curva rossa) risultante dalla teoria comparato con le misure degli esperimenti HESS, Eas-top e Cascade. Lo spettro completo è normalizzato sui dati di Cascade che implicano un flusso di $3.79 \times 10^{16} / m^2 s sr eV^{1.5}$ (quadrato nero) a 10^{12} eV.

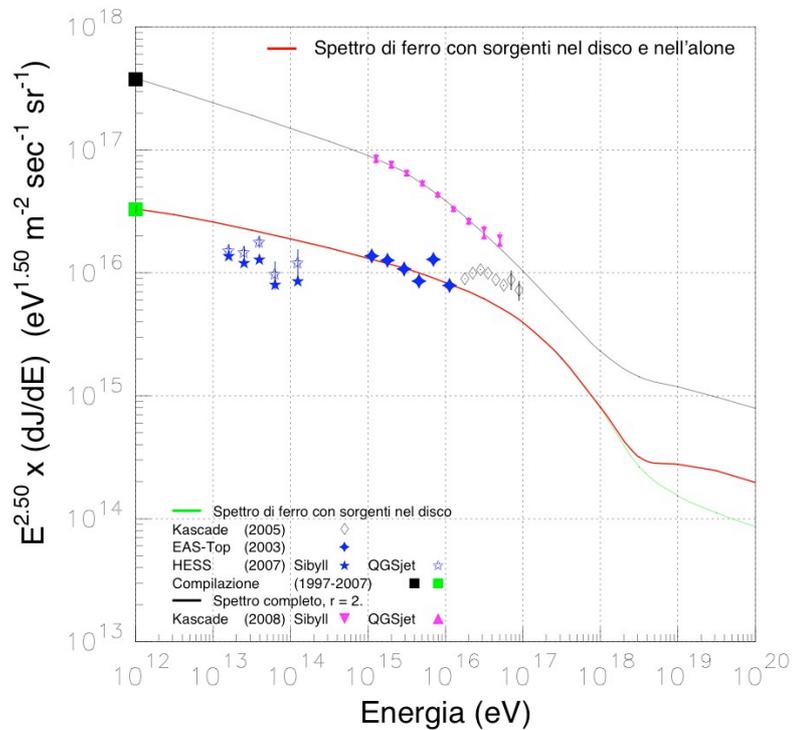


Figura 17 - Spettro del ferro (curva rossa) risultante dalla teoria comparato con la media delle misure degli esperimenti Eas-top e Cascade. E' mostrato altresì lo spettro completo e i relativi dati sperimentali di Cascade. Lo spettro completo è normalizzato sui dati di Cascade che implicano un flusso di $3.79 \times 10^{16} / m^2 s sr eV^{1.5}$ (quadrato nero) a 10^{12} eV.

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Codino and F. Plouin, CRIS 2006, Nucl. Phys. B (Proc. Sup.) **165** (2007) 307.
- [2] A. Codino and F. Plouin, Conf. Int. di Vulcano (2006), 403 and Astro-ph/0701521.
- [3] A. Codino and F. Plouin, Rapporto INFN/TC-06/05; anche Astro-ph/0701498.
- [4] A. Codino and F. Plouin, 30-esima Conf. Int. Raggi Cosmici (CIRC) Merida, Mexico (2007) **576**.
- [5] M.A. Lawrence et al., (Coll. Haverah Park), Proc. 21-esima CIRC, Adelaide, Australia,(1990) 159;
- [6] M. Ave et al., Astro-ph/0112253 (2002, dati ricorretti).
- [7] M. Amenomori et al., (Coll. Tibet) The Astrophys. Jour. 461, 408.
- [8] M. Nagano et al., (Coll. Akeno), Jour. Phys., **G18** (1992) 423.
- [9] D. J. Bird et al. (Coll. Fly 's Eye), Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 3401.
- [10] A. V. Glushkov e M. I. Pravdin (Coll. Yakutsk), **101**, JETP (2005) 88.
- [11] M. A. Lawrence, et al., (Coll. Haverah Park), Jour. Phys. **17** (1991) 773.
- [12] M. T. Brunetti, M. Menichelli e A. Codino, 24-esima. CIRC, Roma, Italia, 1995.
- [13] M. T. Brunetti e A. Codino, The Astrophys. Jour. **528**, 789 (2000).
- [14] A. Codino and F. Plouin, CRIS 2008, Isola di Salina, Italia, settembre 2008.
- [15] A. Codino e F. Plouin in: *Composizione Chimica della Radiazione Cosmica Intorno alla Caviglia e Indici Spettrali*, lavoro in corso di pubblicazione.
- [16] M. Roth et al. (Coll. Auger), 30-esima CIRC, Merida, Mexico (2007) **313** (Rivelatore di superficie) e Astro-ph/0706.2096; anche L. Perrone et al., (Coll. Auger), ibid. **316** (Rivelatore ibrido).
- [17] M. Takeda et al., (Coll. AGASA), Astro-ph/0209422, dati ricorretti (2002).
- [18] S. P. Knurenko et al., Astro-ph/0711.2548v1., 16 Nov. 2007.
- [19] J. A. Simpson, Ann. Rev. of Nucl. and part. Science, **33** (1983) 323.
- [20] M.M. Shapiro and J.P. Wefel, Genesis and propagation of cosmic rays, D. Reidel Publishing Co. Dordrecht (1988).
- [21] A. Watson et al., (Coll. Auger) 30-esima CIRC, Merida, Yukatan, Mexico (2007).
- [22] M. Unger et al., (Coll. Auger) CRIS 2008, Isola di Salina, Italia, settembre 2008.
- [23] A. Codino, Como las medidas de las composición química alrededor del tobillo prueban que las fuentes de los rayos cósmicos energeticos residen en el halo, lavoro in preparazione.
- [24] R. U. Abbasi et al., The Astrophys. Journ. **622** (2005) 910.
- [25] J. Belz et al., (Coll. HiRes) CRIS 2008, Isola di Salina, Italia, settembre 2008.
- [26] E. G. Berezhko e H. J. Voelk , Astro-ph/ 0704.1715v1, 13 aprile 2007.
- [27] M. A. Hillas, Jour. Phys. **G31** (2005) R95.
- [28] V. S. Beretzinsky e S.I. Grigorieva, Astron. e Astrophys. **199** (1988) 1.
- [29] V. S. Beretzinsky, A. Z. Gazizov e S. I. Grigorieva, Phys. Lett. **B 612**, (2005), 147.
- [30] C.J. Cesarsky e P.O. Lagage, (1983) Astron. e Astrophys. **118**, 223 e **125**, 249.
- [31] T. Antoni et al., (Coll. Cascade) The Astrophys. Journ. **604** (2004) 687.
- [32] A. Haungs, H. Rebel, M. Roth, Rep. Prog. Phys. **66** (2003), 1145-1206.
- [33] H.J. Voelk e P.L. Biermann, Astrophys. J. **Letters 333**, (1998) L65-L68.
- [34] R. Aloisio et al., Astro-ph/0706.2834v2 del 19 novembre 2007.
- [35] M. Unger et al., (Coll. Auger) CRIS 2008, Isola di Salina, Italia, settembre 2008.
- [36] F. Di Pierro et al., (Coll. Cascade-Grande), CRIS 2006, Catania, Italia, maggio-giugno 2006.
- [37] F. Aharonian et al., (Coll. HESS) Phys. Rev. D **75**, 042004 (2007).
- [38] G. Navarra (Coll. Eas-top), 28-esima CIRC, Tsukuba, Giappone, (2003).
- [39] H. Ulrich et al., (Coll. Cascade), 29-esima CIRC, Pune, India (2003).
- [40] T. Antoni et al., (Coll. Cascade), Astrop-h/0505413 (2005).
- [41] D. Appel et al., (Coll. Cascade), Astrop-h/0804.4274 (2008).
- [42] A. Codino, *Flussi di Protoni ed Elio e l'Origine del Ginocchio nello Spettro della Radiazione Cosmica*, in preparazione.