

IL MISTERO DEI RAGGI COSMICI

CHE COSA SONO I RAGGI COSMICI

I raggi cosmici sono particelle energetiche provenienti dallo spazio esterno e accelerati a velocità prossime a quelle della luce alle quali è esposto qualunque corpo celeste.

L'esistenza dei raggi cosmici venne ipotizzata fin dal 1785 da Charles Coulomb ma solamente dopo gli studi, le teorie e gli esperimenti di numerosissimi fisici e scienziati si giunse a concludere che dovesse trattarsi di particelle cariche elettricamente poiché, immerse in un campo magnetico, esse venivano deflesse. Tuttavia già dai primi esperimenti, compiuti studiandone il variare dell'energia in funzione dell'altitudine, si era intuito che essi si originassero al di fuori dell'atmosfera ed infatti tali raggi possono essere distinti in raggi cosmici primari e raggi cosmici secondari.

I raggi cosmici primari possono essere osservati solo al di fuori dell'atmosfera e sono composti all'87% da protoni, al 10% da particelle alfa e nuclei pesanti (soprattutto He), all'2% da elettroni e al 0.1% da raggi gamma.

I raggi cosmici secondari invece sono composti al 30% da componente molle, composta da elettroni, fotoni, neutroni, pioni, kaoni e neutrini, e al 70% da componente dura, ossia i pioni i quali riescono a giungere fin sulla superficie terrestre e ad essere osservati dall'uomo nonostante l'emivita brevissima a causa degli effetti relativistici. Tali raggi si originano dall'impatto dei raggi cosmici primari con i nuclei dell'atmosfera terrestre, soprattutto azoto, in quanto collidendo essi decadono e danno vita alla formazione a "cascata" di numerosissime particelle secondarie in un fenomeno che prende il nome di "shower" (fig.1). Durante questo impatto vengono espulsi dal nucleo un protone o un neutrone e vengono liberate grandi quantità di raggi gamma ad alta energia e pioni; a loro volta i pioni decadono in mesoni o muoni mentre i raggi gamma si propagano ulteriormente producendo un elettrone e un antielettrone che si annichilano emettendo raggi gamma ad energia inferiore fino a che l'energia dei raggi prodotti non è insufficiente a produrre nuove particelle. L'atmosfera, con la sua massa, assolve quindi l'importante compito di proteggerci da queste radiazioni ionizzanti di energia elevatissime che, se non schermate,

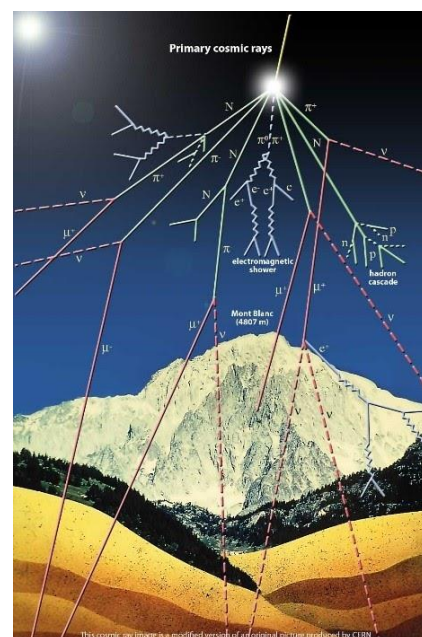


Figura 1: raggi cosmici secondari

attraversando il nostro organismo provocherebbe la rottura di legami chimici a una tale velocità che i meccanismi biologici di riparazione non sarebbe in grado di rimanere al passo con i danni.

IL MISTERO DELLA LORO ORIGINE

Uno dei principali quesiti irrisolti riguardo ai raggi cosmici consiste nel fatto che ancora non si conosce quali siano le sorgenti astrofisiche in grado di accelerare le particelle di cui essi sono composti a velocità tanto elevate, fornendo quindi loro un'energia anche elevatissima. Inoltre la possibilità di individuare la fonte da cui essi derivano risulta ancora più difficoltoso per via della loro distribuzione nell'universo: i raggi primari non hanno infatti una distribuzione precisa come quelli secondari, che seguono la funzione $\cos^2\alpha$, ma sono isotropi ossia sono uniformemente distribuiti in ciascuna regione e sembrano quindi provenire ugualmente da tutte le direzioni. Ciò è dovuto al fatto che essi sono costituiti da particelle cariche che, soggette alla forza di Lorentz, se immerse in campi magnetici vengono deflesse; pertanto questi raggi vengono deviati dai campi incontrati nell'attraversare l'universo. Nonostante questa difficoltà alcune ipotesi sull'effettiva origine dei raggi cosmici vennero sviluppate già negli anni '40 e '60 da, rispettivamente, Fermi e Cocconi: il primo affermava che essi dovessero derivare dalle esplosioni delle supernove e il secondo ipotizzava invece un'origina extra-galattica. Nonostante le idee riguardanti la loro origine siano ancora varie la scoperta che lo spettro magnetico è in grado di fornire informazioni sui meccanismi di accelerazione e che la loro composizione è in grado di fornirne circa la loro origine a permesso di compiere, grazie ai dati raccolti da AMS e da Pamela, notevoli progressi nell'individuazione di una possibile risposta.

Infatti se si considera la loro composizione (fig.2) e, in particolar modo, si studiano le abbondanze relative dei nuclei pesanti presenti negli RC primari e quelle nel sistema solare si può osservare che, anche se in entrambi i casi si verifica il tipico effetto pari-dispari dovuto al fatto che i nuclei con Z pari hanno un legame più forte e quindi sono più abbondanti, gli elementi Li, Be, B, e Sc, Ti, V, Cr e Mn sono vari ordini di grandezza più abbondanti nei RC che nel sistema solare e che, anzi, questi 12 elementi sono praticamente assenti nei prodotti dei processi di nucleosintesi stellare; pertanto la grande abbondanza di tali elementi nei raggi cosmici si deve al fatto che essi devono essere stati creati dalla spallazione (ossia reazioni nucleari in cui un nucleo bersaglio interagisce con particelle ad alta energia dando luogo a più nuclidi portando alla

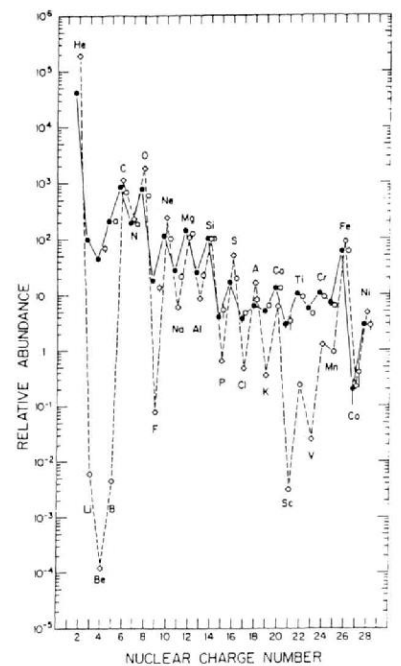


Figura 2: abbondanza relativa dei nuclei He-Ni nei RC

formazione di nuclei leggeri) dei più abbondanti nuclei di C, O e Fe presenti nel mezzo interstellare, suggerendo quindi l'ipotesi di un'origine galattica.

Studiando lo spettro elettromagnetico dei raggi cosmici primari (fig.3), ossia il loro flusso, è possibile innanzi tutto osservare che il loro spettro si estende da energie di 10^9 eV fino a 10^{21} eV ma è anche possibile classificare i raggi cosmici in base alla loro energia in High Energy Cosmic Rays (HECR) se essi hanno un'energia nell'ordine dei GeV, ossia $E \sim 10^9$ eV, Very High Energy Cosmic Rays (VHECR) se essi hanno un'energia nell'ordine dei TeV, ossia $E \sim 10^{12}$ eV, Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR) se essi hanno un'energia nell'ordine dei PeV, ossia $E \sim 10^{15}$ eV, e Extreme High Energy Cosmic Rays (EHECR) se essi hanno un'energia superiore all'ordine dei EeV, ossia $E > 10^{18}$ eV.

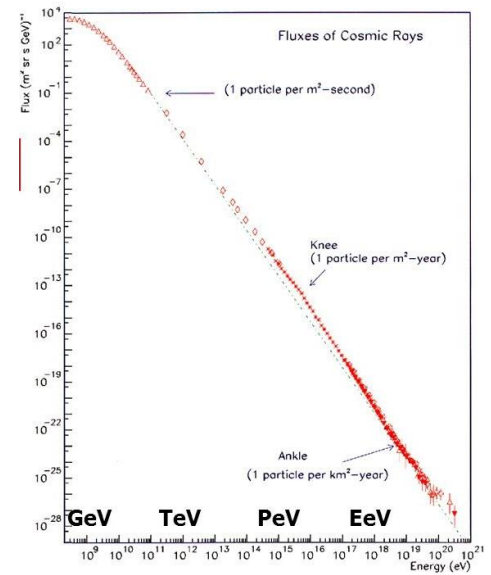


Figura 3: spettro elettromagnetico dei raggi cosmici

Ciò fornisce importanti informazioni riguardanti l'origine dei raggi cosmici in quanto permette di affermare che i raggi cosmici fino all'ordine dei GeV, ossia gli High Energy Cosmic Rays, sono prodotti e accelerati dal Sole, giungendo ai poli dove si incontrano le linee di campo magnetico permettendo così ad alcuni raggi di penetrarvi, e perciò il loro flusso è affetto dalla "modulazione solare", ovvero varia al variare dell'attività solare, mentre i raggi cosmici aventi energie più elevate sono caratterizzati da un flusso che, in funzione dell'energia, può essere descritto da una legge del tipo

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha}$$

dove α , l'indice spettrale è pari a

$$\alpha = \begin{cases} 2.7 & \text{per } E < 3 \cdot 10^{15} \text{ eV} \\ 3 & \text{per } 3 \cdot 10^{15} < E < 10^{18} \text{ eV} \\ 2.7 & \text{per } E > 3 \cdot 10^{18} \text{ eV} \end{cases}$$

In particolar modo, in questo secondo caso, i valori di energia 10^{15} e 10^{18} costituiscono anche i punti in cui si verificano i cambiamenti di pendenza del grafico del flusso e vengono rispettivamente chiamati ginocchio e caviglia: il cambio di pendenza a livello del ginocchio corrisponde all'energia per cui i raggi cosmici non sono più confinati nella galassia e quindi il loro flusso scende; da ciò si deduce quindi che i raggi cosmici fino a energie nell'ordine dei PeV, ossia VHECR e UHECR, sono di origine galattica mentre i raggi con energie superiori all'ordine dei EeV, ossia EHECR, sono di

origine extra-galattica, confermando quindi quanto ipotizzato da Cocconi. Questa diversa origine si spiega, come sopra accennato, con il confinamento dovuto al campo magnetico galattico, il quale vale in media $3 \mu\text{G}$, che costringe i RC a propagarsi per un tempo molto lungo all'interno della galassia prima di essere assorbiti o sfuggire nello spazio intergalattico: infatti se si considera che le particelle cariche, come quelle di cui i RC sono costituiti, immerse in un campo magnetico sono soggette alla forza di Lorentz

$$F = q B v$$

e compiono quindi traiettorie circolari o a forma di spirali aventi un raggio detto raggio di Larmor o giroradio pari a

$$R = \frac{E}{Z B \beta c}$$

calcolando il giroradio per i protoni che compongono i RC si nota che fino al ginocchio essi risultano essere confinati completamente dal campo magnetico galattico, dopo il punto di ginocchio una frazione sempre maggiore dei RC sfugge a tale campo magnetico e infine dopo la caviglia il giroradio è maggiore dello spessore del disco galattico, rendendo quindi necessario ipotizzare un'origine extragalattica.

Per quanto riguarda l'origine dei raggi cosmici di provenienza galattica nel 1949 Fermi pubblicò un articolo nel quale ipotizzava l'accelerazione dei RC attraverso la diffusione delle particelle in nubi di plasma in moto nella galassia; tuttavia anche se questa ipotesi si rivelò non del tutto corretta, infatti poiché le nubi di plasma hanno velocità piuttosto basse questo meccanismo non è in grado di spiegare le alte energie in gioco nei RC in quanto darebbe luogo ad uno spettro in energia con un indice spettrale troppo elevato, essa è alla base dei meccanismi di accelerazione tuttora teorizzati: applicando l'idea dell'accelerazione di Fermi alle onde d'urto, ossia perturbazioni che si propagano radialmente ad una velocità maggiore di quella del suono nel mezzo considerato, essa prevede che le particelle che vengono diffuse dalle irregolarità dei campi magnetici delle nubi di plasma attraversando il fronte d'onda di shock guadagnino energia. Tale meccanismo, che prende il nome di accelerazione da shock può essere ad esempio essere applicato alle esplosioni delle supernovae; tale ipotesi venne poi confermata nel 2013 grazie all'osservazione, ad opera del Large Area Telescope a bordo di Fermi, di una quantità significativa di fotoni provenienti dai resti di supernovae aventi la distribuzione di energia tipica del decadimento del pione neutro, considerato la "firma" delle collisioni protone-protone ad alta energia e quindi dell'acceleratore celeste; la teoria sviluppata a partire dalle ipotesi di Fermi prevedono infatti che durante tali meccanismi i protoni non vengano solo accelerati ad altissima velocità ed energia ma anche che collidendo fra di loro diano origine ad

una cascata di particelle secondarie e, in particolare, producano fra le altre una particella senza carica elettrica chiamata pione neutro, il quale decade immediatamente emettendo coppie di fotoni con una distribuzione di energia caratteristica. Tuttavia esistono anche altre ipotesi circa la sorgente dei RC le cui particelle, poiché elettricamente cariche, per essere accelerate necessitano la presenza di un campo elettrico dinamico, in quanto in astrofisica non esistono campi elettrici statici, i quali vengono generati da campi magnetici dinamici; confrontando, come evidenziato nel diagramma di Hillas (fig.4), le diverse sorgenti astrofisiche in base alla relazione tra il raggio di Larmor della particella in

esame e la dimensione della regione accelerante, in quanto se il giroradio della particella è molto maggiore delle dimensioni tipiche della sorgente la particella non si accorge del campo magnetico e il meccanismo descritto precedentemente non può avvenire, si nota che non tutte le sorgenti astrofisiche sono in grado di produrre tali accelerazioni, le stelle a neutroni ad esempio possiedono tutti i requisiti necessari e proprio per questo vengono annoverate fra le possibili sorgenti, e in particolare che gli oggetti al di sotto della corrispondente riga diagonale non possono accelerare rispettivamente protoni o nuclei di ferro a energie pari a 10^{20} eV. Tuttavia il mistero dell'origine dei raggi cosmici resta ancora irrisolto in quanto, confrontando il raggio di Larmor della particella carica considerata e le dimensioni della regione in cui è presente il campo magnetico è possibile fornire un limite superiore all'energia raggiungibile in tali processi di accelerazione pari a 10^{17} eV, energia sopra la quale non esistono sorgenti galattiche in grado di accelerare le particelle a tali energie.

Considerando i raggi di energia superiore e di origine extra-galattica la situazione, inoltre, si complica ulteriormente non solo per via dell'isotropia dei raggi cosmici ma anche perché per energie maggiori a 10^{14} eV il flusso si riduce così tanto da rendere impossibile la misura diretta e inoltre nel tragitto dalla sorgente all'atmosfera terrestre le particelle dei RC risentono delle diverse interazioni con i fotoni della radiazione cosmica di fondo, che causa una soppressione del flusso nel cosiddetto effetto Greisen-Zatsepin-Kuz'min, e con altri fondi astrofisici a cui, in più, si deve aggiungere l'interazione con i campi magnetici extra-galattici e con il campo magnetico galattico. L'ipotesi attualmente più accreditata e sondata nell'indagine relativa alle sorgenti di questi raggi altamente energetici prevede che le sorgenti siano in realtà relativamente vicine e non sono

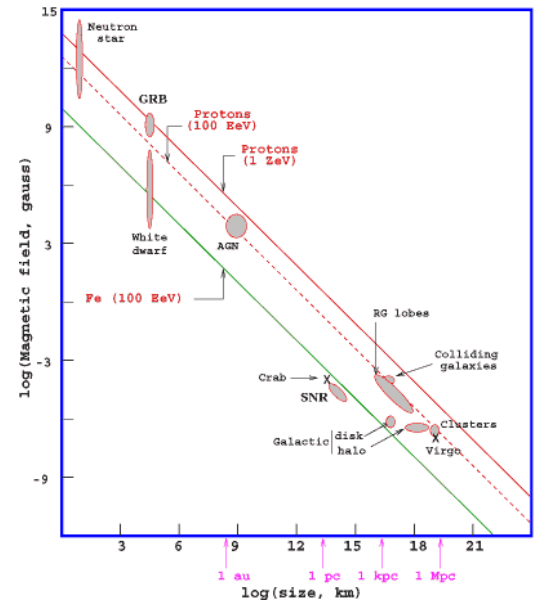


Figura 4: diagramma di Hillas

uniformemente distribuite, come sembrano aver confermato le osservazioni raccolte da Auger, e in particolare si ritiene che essi possano provenire da galassie che ospitano un nucleo attivo, ovvero una struttura alimentata da un buco nero centrale supermassivo circondato da un disco di accrescimento, costituito dalla materia in caduta -gas e polveri- che assume un'orbita circolare attorno ad esso. Proprio la materia in caduta è la responsabile dell'emissione che si osserva provenire dal disco in quanto mentre metà dell'energia potenziale si trasforma in energia termica e il gas viene riscaldato, l'altra metà viene irradiata. L'enorme quantitativo di energia disponibile grazie all'accrescimento della materia attorno al buco nero centrale, nonostante la conoscenza poco approfondita degli AGN dal punto di vista dell'accelerazione, è il motivo per cui i nuclei galattici attivi (AGN) sono da lungo tempo considerati possibili siti per la produzione di particelle energetiche in quanto tali energie permetterebbero di accelerare protoni e nuclei fino alle più alte energie misurate.

I RISVOLTI PRATICI E TEORICI DEI RAGGI COSMICI

I raggi cosmici hanno numerosi risvolti sia sul piano pratico sia sul piano teorico. I raggi cosmici non si limitano infatti a influenzare profondamente l'ambito scientifico e di ricerca ma hanno anche delle applicazioni e un effetto diretto sulla realtà di tutti i giorni. I raggi cosmici infatti permettono di realizzare tomografie, ossia la costruzione di immagine tridimensionali a partire da più immagine bidimensionali del medesimo oggetto riprese da più angolazioni diverse, costituendo inoltre un notevole vantaggio rispetto ai raggi X in quanto riescono ad attraversare grandi spessori prima di fermarsi una volta esaurita tutta la loro energia permettendo così vere e proprie radiografie di strutture di grandi dimensioni che permettono di individuare cavità nascoste -ad esempio nelle piramidi-, monitorare le caldere di coni vulcanici, controllare carichi sospetti -in quanto misurando l'angolo con cui vengono deflessi i raggi cosmici è possibile capire se container e camion trasportato materiale pericoloso in quanto essi sarebbero in grado di assorbirli o deviarli- e monitorare le condizioni dei noccioli dei reattori; tuttavia essi influiscono anche sul clima, in quanto i raggi cosmici urtando le particelle dell'atmosfera contribuiscono ad aumentare il grado di ionizzazione degli strati atmosferici bassi e la quantità di particelle cariche libere, le quali sono le prime responsabili dell'addensarsi delle nubi -che nel bilancio energetico della Terra e del suo clima giocano un ruolo fondamentale- dovuto al fatto che le molecole di acqua nell'aria sono attratte da tali ioni e si raggruppano facendo sì il vapore acqueo si condensi in minuscole gocce formando le nubi, e costituiscono inoltre il principale metodo per datare i sedimenti marini, in quanto in tale valutazione si considerano le mutazioni genetiche indotte dalle interazioni con i raggi cosmici. In più lo studio dei raggi cosmici ha importanti ripercussioni sulle missioni spaziali in quanto i danni

da essi comportati per gli astronauti costituiscono la problematica principale dei voli spaziali; poiché si tratta di radiazioni fortemente ionizzanti essi possono alterare il sistema cardiovascolare, danneggiare il cuore, indurire e restringere le arterie (portando a malattie cardiovascolari), possono ostacolare la neurogenesi (il processo di formazione di nuove cellule) e facilitare la formazione di tumori. Tuttavia, anche se in misura minore, tale problematica risulta essere una realtà molto più comune e quotidiana in quanto si è esposti a tali radiazioni anche durante i voli aerei poiché, seppur trovandosi all'interno dell'atmosfera essi non risultano dannosi quanto i raggi cosmici primari, essi non vengono comunque schermati completamente in quanto entrano in contatto con l'organismo umano prima di aver attraversato uno spessore sufficiente di atmosfera, costringendo così il personale aereo a rispettare un numero ben preciso di ore di servizio in alta quota. Tuttavia i raggi cosmici hanno anche un'enorme importanza dal punto di vista teorico e della ricerca in quanto in virtù della loro energia costituiscono degli acceleratori di particelle naturali formidabili nonché i primi che l'uomo poté utilizzare, permettendo così un notevole sviluppo nella fisica delle particelle elementari: i raggi cosmici hanno infatti permesso la scoperta del muone μ , del positrone, del quark strange, del pione π carico, hanno permesso di scoprire che i neutrini non hanno in realtà una massa nulla e hanno costituito un'importante dimostrazione della relatività dovuta al fatto che solo con essa è spiegabile il fatto che i muoni prodotti durante lo shower giungano fino a terra. Attualmente lo studio dei RC e i relativi esperimenti sono volti tanto a comprenderne meglio l'origine e i meccanismi di accelerazione quanto a studiare la simmetria, la materia oscura e i neutrini.

Infatti se dai dati raccolti dal flusso ininterrotto dei raggi cosmici emergesse un'abbondanza di anti-nuclei (si ricercano soprattutto nuclei anti-elio) ciò fornirebbe una parziale risposta a una delle domande attorno a cui ruota la ricerca scientifica degli ultimi anni, ossia dove sia finita l'antimateria, in quanto permetterebbe di escludere la teoria che, per motivare tale "scomparsa" di antimateria e la predominanza di materia attorno a noi, vi fosse una leggera asimmetria nelle leggi fisiche a favore della materia e di sostenere che l'antimateria non è scomparsa per via di una, attualmente, inspiegabile asimmetria nell'annichilazione delle particelle subito dopo il Big Bang ma esse sarebbero semplicemente confinate in regioni dell'universo lontane dalla Terra. Inoltre tali raggi potrebbero rendere possibili nuove scoperte riguardanti la materia oscura: poiché le particelle di materia oscura interagiscono debolmente con la materia essa risulta invisibile ai telescopi, sensibili alla luce prodotta dalle interazioni elettromagnetiche con la materia, rare collisioni di particelle di materia oscura porterebbe alla formazione di fotoni, particelle e antiparticelle di materia ordinaria che si sovrappongono al flusso dei raggi cosmici e pertanto, se venissero rivelate delle abbondanze di positroni o di elettroni rispetto a quelli normalmente presente nei RC, potrebbero costituire una prova di tale antimateria; in particolare un eccesso di antiprotoni potrebbe

dimostrare che l'universo è in realtà riempito da un nuovo tipo di particelle di materia oscura ossia i neutralini, particelle previste dalla teoria supersimmetrica. I principali esempi di esperimenti destinati a tali misurazioni sono l'Alpha Magnetic Spectrometer (Ams-02) e Pamela, i quali si differenziano solamente per la sensibilità e il campo magnetico, ossia per le energie dei raggi misurati. Inoltre i neutrini sono tra i rappresentanti più evanescenti del mondo delle particelle elementari infatti, essendo privi di carica elettrica e dotati di una massa piccolissima, possono penetrare densi strati di materia senza lasciare traccia e pertanto uno dei principali modi per individuarli è reso possibile dalle rare, ma pur sempre presenti, interazioni con la materia: i neutrini sono infatti prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici con i nuclei dell'atmosfera terrestre; in questo caso invece sono necessari esperimenti a terra e non più in orbita e il principale rilevatore di particelle è IceCube.

ESERCIZI ILLUSTRATIVI DELL'ARGOMENTO

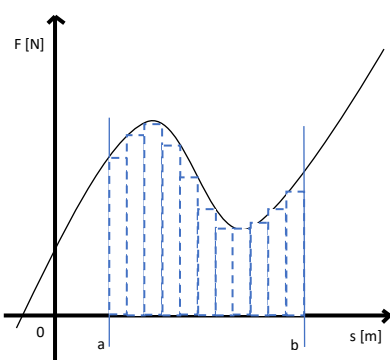
L'acceleratore di particelle del CERN di Ginevra è in grado di accelerare ciascun protone fino a raggiungere velocità pari al 99.9999991 % di quella della luce; sapendo che il Large Hadron Collider (LHC) è in grado di portare tali protoni a un'energia record di 6,5 TeV calcolare, compiendo poi un opportuno confronto, il valore del campo elettrico necessario a produrre tale accelerazione e quello che sarebbe necessario per ottenere le ben più alte energie dei raggi cosmici.

Consideriamo il fatto che accelerare una particella significa aumentarne l'energia e che per produrre un'accelerazione sia necessaria una forza che agisca su tale particella compiendo un lavoro L ; il lavoro L compiuto dalla forza F sarà quindi il lavoro necessario ad aumentare l'energia di tale particella da E_0 a E_1 ossia il lavoro L è pari a

$$L = \Delta E$$

Consideriamo ora la definizione di lavoro, ossia l'energia scambiata tra due sistemi quando avviene uno spostamento attraverso l'azione di una forza -o una risultante di forze- che ha una componente non nulla nella direzione dello spostamento, che può quindi essere scritto, nel caso di una forza costante, come

$$L = F \Delta s$$



Tuttavia tale legge vale solo se F costante pertanto, se consideriamo il lavoro di una forza variabile secondo una certa legge in funzione dello spazio, per poter calcolare la forza nel punto sarà necessario valutarla nell'intervallo di spazio minore possibile. Per fare ciò occorre però compiere un'approssimazione ossia suddividere l'area sottesa dalla

curva, il lavoro, nell'intervallo $I = [a; b]$ in tantissimi spostamenti i quali dovranno essere sufficientemente piccoli da poter considerare la forza costante per ciascuna di essi. Avendo suddiviso lo spostamento in n piccoli intervalli il lavoro complessivo sarà dato dalla somma dei lavori della forza in ogni intervallo ossia

$$L = \sum_{k=1}^n (F_k \Delta s_k)$$

Supponiamo ora di suddividere l'area sottesa alla curva in un numero infinitesimo di intervalli al fine di rendere tale modello quanto più possibile aderente a quello reale

$$L = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n (F_k \Delta s_k)$$

che equivale a scrivere

$$L = \int_a^b F ds$$

che generalizzando è pari a

$$L = \int_{s_0}^{s_1} F ds$$

dove s_0 e s_1 rappresentano rispettivamente la posizione iniziale e finale del corpo.

Consideriamo ora che, poiché nell'LHC esse vengono accelerate da un campo elettrico \mathcal{E} , la forza che agisce sulle particelle è pari a

$$F = q \mathcal{E}$$

Pertanto sostituendo tale formula all'interno della funzione del lavoro si ricava

$$L = \int_{s_0}^{s_1} q \mathcal{E} ds$$

e poiché, come sopra riportato $L = \Delta E$

$$\Delta E = \int_{s_0}^{s_1} q \mathcal{E} ds$$

Inoltre, considerando che q , la carica del protone, e \mathcal{E} , il campo elettrico, sono due costanti si ottiene

$$\Delta E = q \mathcal{E} \int_{s_0}^{s_1} ds$$

Pertanto per calcolare il campo elettrico necessario ad accelerare i protoni nell'LHC è necessario solamente isolare \mathcal{E} e integrare

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta E}{q \int_{s_0}^{s_1} ds} = \frac{\Delta E}{q [s]_{s_0}^{s_1}}$$

Si consideri ora che l'acceleratore di Ginevra ha una lunghezza di 27 km, che un protone ha massa a riposo pari a 0.938 GeV, che LHC è in grado di portare tali particelle fino a un massimo di 6.5 TeV e che i Ultra High Energy Cosmic Rays hanno un'energia di 10^{15} eV.

Occorre innanzi tutto operare le trasformazioni necessarie ossia

$$0.938 \text{ GeV} = 0.938 \cdot 10^9 \text{ eV}$$

$$6.5 \text{ TeV} = 6.5 \cdot 10^{12} \text{ eV}$$

Fatto ciò si può calcolare la differenza di energia ΔE delle particelle accelerate dall'LHC e dei raggi cosmici e convertirli in J, unità di misura del lavoro

$$\Delta E_{LHC} = 6.5 \cdot 10^{12} \text{ eV} - 9.38 \cdot 10^8 \text{ eV} = 6.49 \cdot 10^{12} \text{ eV} = 1.039 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

$$\Delta E_{RC} = 10^{15} \text{ eV} - 9.38 \cdot 10^8 \text{ eV} = 9.99^{14} \text{ eV} = 1.59 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

Sostituendo all'interno alla formula ricavata precedentemente si ottiene

$$\epsilon_{LHC} = \frac{\Delta E_{LHC}}{q[S]_{S_0}^{S_1}} = \frac{1.039 \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot 10^{-19} [s]_0^{27000}} = \frac{1.039 \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 27000} = 2.4 \cdot 10^8 \text{ V/m}$$

$$\epsilon_{RC} = \frac{\Delta E_{RC}}{q[S]_{S_0}^{S_1}} = \frac{1.6 \cdot 10^2}{1.6 \cdot 10^{-19} [s]_0^{27000}} = \frac{1.59 \cdot 10^{-4}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 27000} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ V/m}$$

Valutiamo ora il rapporto tra il campo utilizzato nell'LHC e il campo che sarebbe necessario per portare i protoni alle stesse energie che riescono ad imprimergli le sorgenti astrofisiche

$$\frac{\epsilon_{RC}}{\epsilon_{LHC}} = \frac{3.7 \cdot 10^{10}}{2.4 \cdot 10^8} = 1.54 \cdot 10^2$$

Si può quindi concludere che, a parità di condizioni, il campo necessario a portare i protoni a energie tanto elevate è circa di 154 volte superiore a quella attualmente possibile

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA:

Le Scienze(<https://www.lescienze.it/>): “Uno scudo per gli astronauti” (n.455 2006 p.66), “Messaggeri del Cosmo” (n.427 204 p.62);

Asimmetrie (<https://www.asimmetrie.it/>): “Cosmici e nuvole” (10 9.10 p. 32), “l'inafferrabile neutrino” (10 9.10 p. 32), “sospetti di materia oscura?” (10 9.10 p. 32), “Il cielo inquieto” (10 9.10 p. 32), “Notizie dalla stazione spaziale”;

<https://www.asi.it/>: “Pamela”;

INFN LNF: “Raggi cosmici” (<https://www.lngs.infn.it/>); “Gli acceleratori cosmici di Fermi” (<https://home.infn.it/>); <https://youtu.be/CKy9Hg3N7jI>;

“Astroparticelle, cosa sono i Raggi Cosmici” (<https://www.astroparticelle.it/>);

[https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://www.infn.it/thesis/PDF/getfile.php%3Ffilename%3D4369-Boncioli-specialistica.pdf&ved=2ahUKEwjO3-](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://www.infn.it/thesis/PDF/getfile.php%3Ffilename%3D4369-Boncioli-specialistica.pdf&ved=2ahUKEwjO3-PI9eLpAhVTkMMKHR1GBL4QFjACegQIBhAC&usq=AOvVaw2ohZI1gpOIxaLuE4fDps8r)

[PI9eLpAhVTkMMKHR1GBL4QFjACegQIBhAC&usq=AOvVaw2ohZI1gpOIxaLuE4fDps8r](https://www.infn.it/thesis/PDF/getfile.php%3Ffilename%3D4369-Boncioli-specialistica.pdf&ved=2ahUKEwjO3-PI9eLpAhVTkMMKHR1GBL4QFjACegQIBhAC&usq=AOvVaw2ohZI1gpOIxaLuE4fDps8r)

http://www.roma1.infn.it/exp/nemo/AHEN/Thesis/DarioBenvenuti/01_Raggi_Cosmici.pdf

<http://cosmo.fisica.unimi.it/assets/IntroAstro/IntroAstro1213/Corso-13-raggi-cosmici-1.pdf>

http://www.fisica.uniud.it/~cobal/Site/PIF_5_cosmic.pdf; <https://df.units.it/>; <https://aerospacecue.it/>

“Fisica Generale” di Sergio Rosati; <https://www.scienceinschool.org/>; “Salto a velocità della luce”