

PROGETTO

“LA SCIENZA NELLE SCUOLE”

EEE – EXTREME ENERGY EVENTS

Antonino ZICHICHI

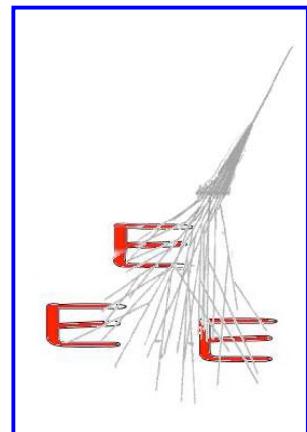
Università di Bologna, INFN (Bologna)
CERN (Ginevra), Centro Fermi (Roma), FEMCCS (Erice)
WFS (Pechino, Ginevra, Mosca, New York)

1 — PORTARE LA SCIENZA NEL CUORE DEI GIOVANI

L’obiettivo principale del Progetto è quello di capire dove, quando e come nascono i “raggi cosmici” primari (protoni o nuclei), che costituiscono la “cenere” del Big Bang e viaggiano per milioni e milioni di anni a partire dalle zone più remote dello spazio, ben oltre la Luna, il Sole e le Stelle visibili a occhio nudo.

Quando un protone cosmico incontra uno strato di materia, in particolare l’atmosfera terrestre, interagisce con i nuclei di cui è fatta la stessa materia. Nella interazione vengono prodotte particelle dell’Universo Subnucleare che vivono pochissimo (frazioni di miliardesimi di secondo). Nella loro breve vita si trasformano in altre particelle il cui ultimo stadio sono i cosiddetti muoni. A livello del mare la massima parte della componente elettricamente carica dei raggi cosmici è fatta di muoni. I protoni cosmici primari di altissima energia generano “sciami” estesi, composti da numerosissimi muoni (tanto più numerosi quanto maggiore è l’energia del protone iniziale). L’impronta di uno sciame di altissima energia al suolo copre un’area che può arrivare a decine di chilometri quadrati. Questo Progetto vuole affidare allo studio degli eventi cosmici di altissima energia (*Extreme Energy Events*), EEE, il compito di portare la Scienza nel cuore dei giovani.

E infatti i raggi cosmici hanno un ruolo unico nella storia del mondo. Anzitutto la loro scoperta è giunta in modo totalmente inatteso. Osservando come si “scaricava” uno strumento inventato da Galvani¹, i fisici di quei tempi – si era agli inizi del XX secolo – pensarono che fossero i “raggi” provenienti dalla Terra (era da poco stato scoperto il



¹ Luigi Galvani (1737-1798).

fenomeno della radioattività) a scaricare quello strumento. Decisero di fare misure ad altezze diverse e rimasero a bocca aperta quando scoprirono che più si andava in alto e più velocemente lo strumento si scaricava. I raggi che scaricavano lo strumento non venivano dalla Terra ma dal cielo. Anzi dal Cosmo.

Ci sono voluti diversi anni per arrivare a questa conclusione e il suo autore – Victor Franz Hess (1883-1964) – venne premiato col Nobel nel 1936. Il Nobel venne attribuito a Hess e a Carl David Anderson (1904-1984) che, proprio studiando i raggi cosmici con uno speciale strumento [la “camera a nebbia” inventata da Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959)] immerso in un campo magnetico, era riuscito a scoprire l’antielettrone, il primo esempio di antiparticella, la cui esistenza era stata teoricamente prevista da Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984). Antiparticella cui avrebbe fatto seguito la scoperta trent’anni dopo dell’antimateria nucleare. La scoperta dell’antielettrone rappresenta la prima tappa dell’avventura scientifica che vogliamo portare nelle Scuole in quanto i raggi cosmici legano la loro esistenza – non solo alle grandi conquiste della Fisica del XX secolo – ma a tante discipline che sono di straordinario interesse, sia per la Scienza pura, sia per la vita di tutti i giorni. E per l’origine stessa di quel fenomeno che permette il passaggio dalla materia inerte alla materia vivente. Appunto la vita, la quale per esistere ha bisogno delle “mutazioni” e delle “evoluzioni”. Le radici fisiche delle mutazioni potrebbero essere nella radiazione cosmica la quale è anche legata ai fenomeni climatologici a lunga e breve scala, come vedremo nel corso di questa esposizione.

I raggi cosmici ci hanno fatto capire com’è fatta la materia a noi familiare portandoci dalla struttura di un granellino di sabbia a ciò che era il mondo pochi istanti dopo il Big Bang e a quello che in effetti potrebbe essere l’origine di tutto: il Supermondo, con 43 dimensioni di cui le quattro a noi note (3 di spazio e 1 di tempo), non sarebbe che il risultato finale della nostra avventura cosmica iniziata venti miliardi di anni fa.

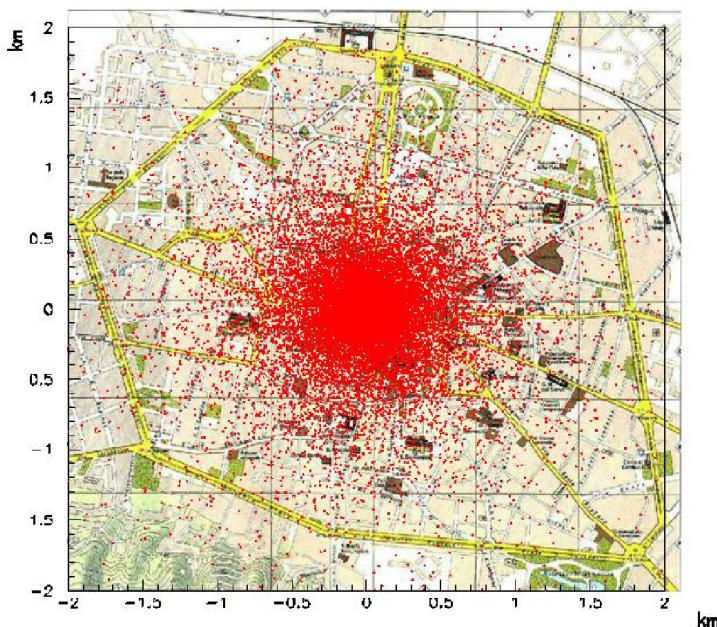
I raggi cosmici portano con sé tanti messaggi. Uno di questi è la loro distribuzione in energia. Più si va in alto, meno ce ne sono, esattamente come accade agli oggetti cosmici tipo asteroidi e comete al cui intenso bombardamento sono stati sottoposti sia la nostra Terra sia la nostra Luna in tempi lontani. Tra i due bombardamenti – dei raggi cosmici (fatti con protoni e nuclei di elementi diversi) e degli oggetti cosmici – non dovrebbe esserci alcun legame, nonostante la somiglianza esponenziale della loro legge di frequenza all’aumentare dell’energia. I raggi cosmici infatti vengono dalle profondità estreme dell’Universo mentre gli oggetti cosmici (asteroidi e comete) vengono dal Sistema Solare: gli asteroidi essenzialmente dalla “fascia” che si trova tra Marte e Giove e le comete dalle periferie del Sistema Solare.

Anche se non c’è alcun legame tra i due bombardamenti, i raggi cosmici portano a discutere e a mettere a confronto i due fenomeni. E portano anche a riflettere su cosa avrebbero pensato i nostri antenati se qualcuno avesse loro detto che un giorno, standosene nel cuore di una montagna, come sono i Laboratori del Gran Sasso²², l’uomo sarebbe riuscito a “vedere” le “ombre” del Sole e della Luna grazie a raggi speciali che provenivano dalle più lontane sfere celesti. Sfere che noi sappiamo non esistere ma la cui non esistenza è legata all’aver capito – grazie ai raggi cosmici – cos’è veramente una Stella: candela che brucia di fuoco nucleare di fusione; candela che brilla più di neutrini che di luce; candela che viaggia a milioni di chilometri l’ora; candela che non ha alcun legame con le altre candele eccetto la forza di attrazione gravitazionale; candela che, se particolarmente potente, può essere l’origine di quei raggi la cui altissima energia noi cercheremo di

²² Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) dell’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Assergi, L’Aquila.

misurare con precisione, ma la cui esistenza ci ha aperto gli occhi anche sulle più remote ere geologiche grazie allo studio della composizione “isotopica” degli elementi giacenti nei fondali marini.

Quanto precede è una sintesi dell’impatto che hanno i raggi cosmici nella cultura del terzo millennio e conseguentemente dei motivi che ci inducono a considerare i raggi cosmici lo strumento ideale per portare la Scienza nel cuore dei giovani. Il Progetto EEE è strutturato su base modulare e prevede che in numerose Scuole d’Italia (Licei o Istituti Tecnici) venga costruito un modulo di apparato sperimentale, ossia un “telescopio” di rivelatori denominati MRPC (*Multigap Resistive Plate Chambers*), dedicato all’osservazione e alla misura dei muoni cosmici. In ogni Scuola i ragazzi partecipano alla realizzazione e alla messa in funzione del telescopio. Possono così rendersi conto di come si passa da materiali di base apparentemente buoni a nulla, a uno strumento di altissima precisione. I dati che vengono raccolti in ciascuna Scuola sono un contributo originale per lo studio dei raggi cosmici appartenenti alla classe EEE. Avendo a che fare con i raggi cosmici, nasce nei ragazzi un interesse diretto per le problematiche i cui legami con i raggi cosmici sono parte integrante della componente di Cultura Scientifica da trattare in relazione alla realizzazione del Progetto. Nella Figura 1 c’è un esempio di sciame cosmico i cui prodotti (muoni) arrivano a coprire un’intera città com’è Bologna.



Simulazione al calcolatore di uno sciame cosmico generato in alta atmosfera (a 15 Km di quota) da un protone primario con un’energia di 100 milioni di miliardi di elettron-Volt. Al suolo arrivano 1 milione di muoni (puntini rossi) che si distribuiscono su un’area di oltre 10 milioni di metri quadrati.

Figura 1

Il Progetto EEE può dunque portare la Scienza nel cuore dei giovani attraverso un’azione di incentivazione culturale diretta, che nasce quando i ragazzi sentono di essere diventati protagonisti nella costruzione di uno strumento e nella elaborazione di dati che sono alle frontiere del pensiero scientifico.

2 — MOTIVAZIONE SCIENTIFICO-CULTURALE PER LO STUDIO DEI RAGGI COSMICI

2.1 — Considerazioni generali: flusso di raggi cosmici e loro legame con caratteristiche fondamentali dello spazio cosmico in cui ci troviamo e della nostra Stella

I raggi cosmici sono stati scoperti all’inizio del secolo scorso e hanno dato vita alla scoperta dell’Universo Subnucleare. Dopo cent’anni di ricerche teoriche e sperimentali, la nuova frontiera nello studio di questa radiazione, che arriva sulla Terra da ogni parte del Cosmo, è rappresentata dai valori estremi dell’energia che essi trasportano.

In questi ultimi anni il flusso dei raggi cosmici è stato associato alle variazioni climatiche che, nel corso degli ultimi cinquecento milioni di anni, hanno visto per ben quattro volte sciogliersi le calotte polari e per altre quattro volte riformarsi. Queste variazioni che avvengono su scale temporali di milioni e milioni di anni sono legate al percorso che noi ci troviamo a compiere attraverso lo spazio cosmico lungo le spirali della nostra Galassia.

C’è un’altra scala di tempi ben diversa e che si articola su decine di secoli, più esattamente sui mille anni. Accade che, anche in questo caso, il flusso dei raggi cosmici ha un ruolo primario. Esso determina la produzione di un isotopo³ che si deposita poi nelle calotte polari. E stavolta ad avere un effetto sul clima è l’attività del Sole con le sue macchie. Ancora una volta entra in gioco il flusso dei raggi cosmici in quanto, se aumenta il numero di macchie solari, aumenta lo schermo protettivo del campo magnetico solare e si riduce quindi il flusso dei raggi cosmici.

C’è infine il flusso dei corpi celesti che ha determinato le cosiddette grandi estinzioni sulla Terra. Il flusso dei corpi celesti non dovrebbe avere alcun legame con il flusso dei raggi cosmici, purtuttavia l’andamento dei flussi è un problema di grande attualità e va quindi studiato.

Portare nelle Scuole questi temi è un motivo nuovo ed efficace per attrarre l’attenzione delle migliori energie intellettuali delle nuove generazioni di potenziali futuri scienziati.

Il Progetto EEE si basa sul coinvolgimento diretto dei giovani in questa grande avventura scientifica. Infatti sono gli stessi giovani a partecipare alla costruzione, installazione e messa in funzione nelle loro Scuole dei rivelatori in grado di osservare i segnali cosmici. Partendo da questi segnali, i giovani possono partecipare in prima persona all’elaborazione dei dati fino all’analisi e alla loro interpretazione.

Il Progetto si articola nelle seguenti tre fasi:

- 1 – costruzione dei rivelatori MRPC,
- 2 – realizzazione del telescopio con MRPC e messa a punto della strumentazione,
- 3 – presa dati e analisi.

³ Per la definizione di isotopo, si veda il Paragrafo 3.2.4.

Il Progetto ha avuto inizio con la partecipazione di un primo gruppo di Scuole Secondarie Superiori che vanno dall'estremo Nord al limite Sud della nostra Italia (si veda il successivo Capitolo 7). Il Progetto sarà via via esteso in modo da permettere a tutte le Scuole interessate (Capitolo 7) di partecipare a questa impresa di diffusione della Cultura Scientifica attraverso la realizzazione di un esperimento di grande attualità.

2.2 — L'idea che ha portato alla invenzione del rivelatore MRPC

Lo strumento che sarà installato nelle Scuole è denominato MRPC (*Multigap Resistive Plate Chamber*) ed è stato inventato [Ref. 1] allo scopo di misurare con grande precisione il tempo di volo delle particelle subnucleari (esempio: pioni, muoni, elettroni). L'obiettivo era di riuscire a ottenere una precisione di cento picosecondi. Un picosecondo (simbolo ps) corrisponde a un millesimo di miliardesimo di secondo e si esprime (in secondi) con dodici potenze negative di dieci; pertanto: un picosecondo $\equiv 1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s} = 0,000\,000\,000\,001 \text{ s}$.

L'idea base del rivelatore MRPC è quella di evitare l'uso di un gran numero di connessioni elettriche che dovrebbero essere necessarie per dare a ciascun piano intermedio un livello diverso di potenziale elettrico. Per evitare questa enorme complicazione è necessario far uso della proprietà che ha un campo elettrostatico di assumere, nello spazio che separa i due piani estremi dello strumento, automaticamente i valori desiderati.

Ottenuto il livello di precisione di 100 ps, ci sono voluti molti anni di studi e ricerche per arrivare a migliorare la precisione temporale.

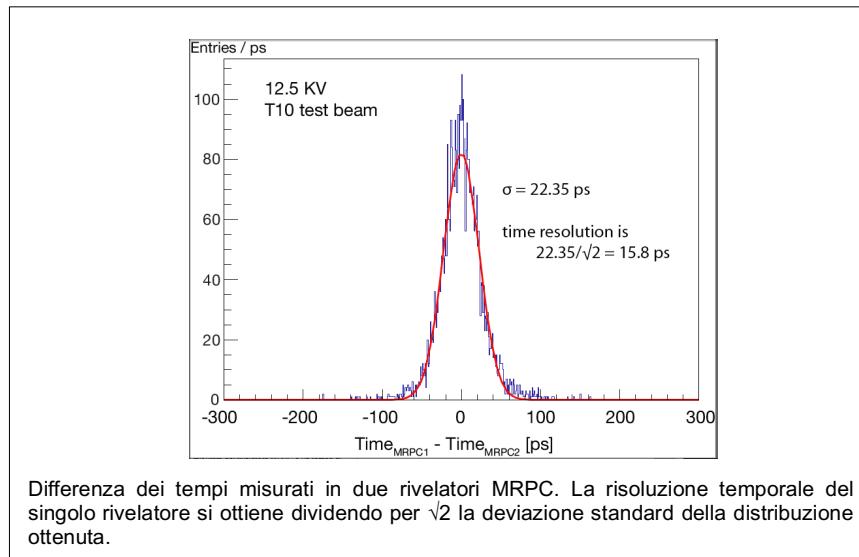


Figura 2

Con un rivelatore MRPC suddiviso in 10 sottili intercapedini di gas (si vedano le successive Sezioni 2.3 e 2.12), oggi siamo addirittura ai 40 ps [Ref. 2]. Rivelatori MRPC di

questo tipo sono stati da noi costruiti in grande quantità e usati per studiare al CERN⁴ il cosiddetto “plasma di quark e gluoni” (Sezioni 2.3 e 2.4).

In seguito a ulteriori e intense attività di R&S (ricerca e sviluppo) e realizzando un rivelatore MRPC con addirittura 24 intercapedini di gas ancora più sottili, il nuovo record nella precisione temporale da noi ottenuto è di poco più di 15 ps [Ref. 2], come mostrato nella precedente Figura 2.

2.3 — Dettagli sul rivelatore MRPC

Il rivelatore MRPC è un rivelatore estremamente sofisticato. Il suo principio di funzionamento è però quello di un semplice condensatore piano nella cui intercapedine è presente un gas.

Una particella dotata di carica elettrica, nell’attraversare il gas, vi lascia una scia di cariche elettriche in virtù del fenomeno detto “ionizzazione”. Infatti vi è una certa probabilità che la particella, che chiameremo “particella incidente”, urti un atomo (o molecola) del gas e che da quest’ultimo salvi fuori un elettrone con carica negativa. L’atomo (o molecola) è inizialmente neutro, ossia con carica elettrica totale nulla, per effetto della compensazione di tutte le cariche elettriche presenti al suo interno: le cariche elettriche positive nel nucleo (i protoni) e quelle negative della nuvola di elettroni che si trova intorno al nucleo. Avendo perso un elettrone in seguito all’urto, l’atomo (o molecola) diventa uno ione con carica positiva. La particella incidente ionizza vari atomi (o molecole) lungo il suo percorso e genera così una scia di cariche. Il fenomeno è di natura elettromagnetica e non avviene se la particella incidente è priva di carica elettrica.

Le cariche elettriche generate nel gas all’interno del condensatore si muovono verso le armature del condensatore: gli elettroni verso l’armatura positivamente carica (detta anodo), gli ioni positivi verso l’armatura negativamente carica (detta catodo). Il movimento di queste cariche verso le armature è all’origine del segnale elettrico indotto sulle armature. È questo segnale elettrico che viene usato per rivelare il passaggio della particella.

Per essere sicuri di rivelare ogni particella carica che attraversa il gas, è necessario che il segnale prodotto sulle armature sia sufficientemente grande. Ciò è possibile se lo spessore di gas nell’intercapedine è adeguato e se il campo elettrico nel condensatore è molto elevato, ossia se la differenza di potenziale tra le armature è molto grande (in tal caso si dice che il sistema è operato ad alta tensione). Infatti gli elettroni prodotti nel gas per ionizzazione, essendo circa duemila volte più leggeri degli ioni, vengono fortemente accelerati dal campo elettrico e sono in grado, a loro volta, di ionizzare altri atomi (o molecole) del gas. Si creano così, per moltiplicazione del numero iniziale di cariche di ionizzazione, delle piccole valanghe elettromagnetiche lungo il percorso della particella incidente. Il moto collettivo delle valanghe verso le armature assicura che il segnale sia ben evidente e dunque che il dispositivo abbia un’elevata efficienza di rivelazione delle particelle incidenti.

La proprietà fondamentale del rivelatore MRPC (Figura 3) è quella di rivelare con grande precisione la posizione (il punto) e l’istante di tempo in cui avviene il passaggio della particella incidente.

A tale scopo:

- 1 – le facce delle armature metalliche (quindi conduttrici) del condensatore a contatto con il gas sono rivestite di materiale dielettrico, detto anche resistivo: per esempio, vetro o plastica;

⁴ European Organization for Nuclear Research (CERN), Ginevra, Svizzera.

- 2 – le armature metalliche, dette elettrodi di raccolta dei segnali, sono segmentate in striscioline (*strips*) o rettangolini (*pads*);
- 3 – l’intercapedine contenente il gas tra le armature è suddivisa in tante sotto-intercapedini (*gas gaps*) di piccolissimo spessore tramite sottili piani intermedi di materiale resistivo.

Il punto 1 garantisce che il segnale indotto dal movimento delle valanghe, prodotte lungo il percorso della particella incidente, non si sparpagli su tutta l’area dell’elettrodo ma rimanga confinato in una piccola zona. Grazie alla segmentazione dell’elettrodo stesso (punto 2), il segnale sarà così “visto” da una sola strisciolina. In questo modo il punto di passaggio della particella incidente potrà essere determinato con la precisione che deriva dalle dimensioni della strisciolina stessa.

Il punto 3 garantisce la precisione temporale. Infatti, a seconda della posizione in cui è prodotta una valanga nello spessore di gas tra gli elettrodi, lungo il percorso della particella incidente, vi sarà una variazione del tempo di comparsa del segnale sugli elettrodi. Diminuendo lo spessore dell’intercapedine di gas, questa variazione viene ridotta al minimo. La precisione temporale dipende in realtà dal tempo che impiega la luce a percorrere quel determinato spessore ed è quindi determinata dallo spessore stesso delle sotto-intercapedini: tanto più sono sottili, tanto più aumenta la precisione.

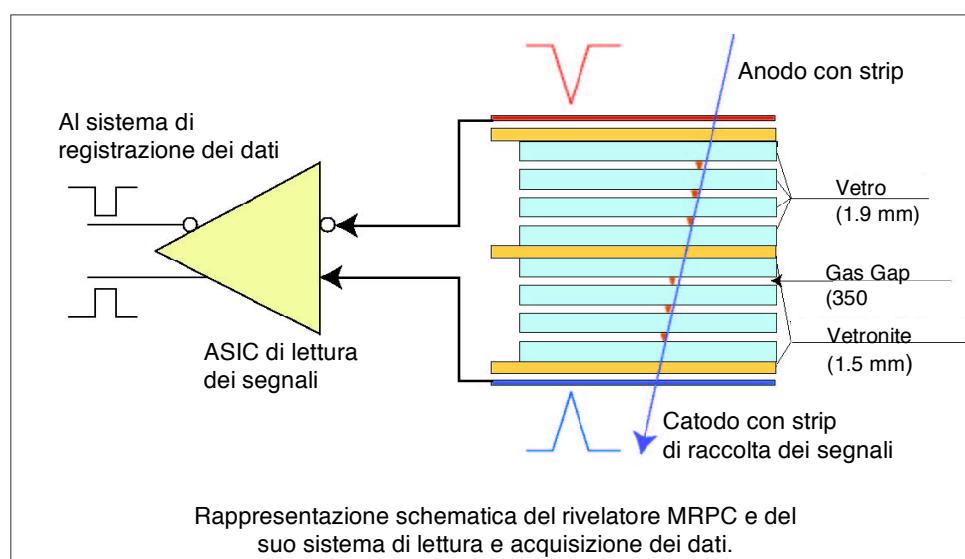


Figura 3

Ai livelli di spessore minimo da noi usati per le sotto-intercapedini (un quarto di millimetro) nessuno era finora riuscito a ottenere risultati riproducibili sulla precisione temporale. Va inoltre sottolineato che, poiché lo spessore totale di gas rimane lo stesso (viene soltanto suddiviso tra le varie sotto-intercapedini), l’efficienza di rivelazione risulta inalterata.

Il modello di MRPC fin qui descritto è stato ottimizzato per costruire un grande sistema di rivelazione e di identificazione delle particelle cariche nell'ambito dell'esperimento ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) che consente di studiare il cosiddetto plasma di quark e gluoni (come anticipato nella Sezione 2.2) nelle collisioni tra nuclei di piombo accelerati ad energie di miliardi di elettron-Volt presso il supercollisore LHC (*Large Hadron Collider*) del CERN.

2.4 — Qual era lo stato della materia qualche decimo di miliardesimo di secondo dopo il Big Bang

Il plasma è lo stato che precede quello della materia a noi familiare. L'Universo con Stelle e Galassie viene dal plasma di quark e gluoni che esisteva qualche decimo di miliardesimo di secondo dopo il Big Bang. La materia di cui è fatto questo foglio di carta, noi stessi, gli oceani, le montagne, la Luna, il Sole e la stragrande maggioranza delle Stelle (eccezion fatta per qualcuna di quelle più recentemente scoperte e dette Stelle di quark) consta di un tipo di materia ben diverso dal plasma di quark e gluoni.

2.5 — Così è fatta la materia a noi familiare

La Scienza ha impiegato quattro secoli per scoprire che tutto – pietre, rondini, fiori, alberi, oceani, Sole, Luna e Stelle, inclusi noi stessi – è fatto con appena tre tipi diversi di particelle: protoni, neutroni ed elettroni. Protoni e neutroni appartengono alla classe di particelle dette “barioni” (che vuol dire “pesanti”). Gli elettroni a quella detta dei “leptoni” (che vuol dire “leggeri”). I barioni appaiono come dotati di una speciale forza che è la famosa forza nucleare; i leptoni non sono portatori di questa forza. Barioni e leptoni sono particelle “tipo-mattone” e hanno quindi bisogno di due tipi diversi di “colla” per essere tenuti insieme. Alla colla nucleare appartengono le particelle dette “mesoni”. Per tenere insieme gli elettroni e le altre particelle cariche ci vuole la colla elettromagnetica di cui la luce è un esempio. Ci sono poi i leptoni privi di carica elettrica e detti per questo motivo neutrini il cui ruolo è quello di “raffreddare” quel potente fuoco di fusione nucleare che agisce nel cuore di ogni Stella e che permette al nostro Sole di brillare – senza esplodere né spegnersi – per ben dieci miliardi di anni.

Una zanzara e un pezzettino di carta – a parità di peso – sono fatti con lo stesso numero di protoni, neutroni ed elettroni. Però nessuno sa trasformare il pezzettino di carta in zanzara. Se la Scienza avesse capito l'origine della vita sapremmo farlo. È stato dato un nome al settore più avanzato della ricerca scientifica intesa a capire le origini della vita: *minimal life* (vita minima).

Nel dicembre 2004 si è tenuto a Erice un Simposio nel quale sono stati passati in rassegna i risultati ottenuti lungo le diverse strade finora seguite.

Una è detta di tipo *top-down* e consiste nel cercare di trovare qual è la quantità minima di materia “inerte” in grado di trasformarsi in una “cellula vivente”. La materia inerte usata è però la stessa di quella necessaria ad altre cellule viventi per esistere come organismi in grado di avere un metabolismo, di riprodursi e di trasmettere proprietà distinte, anche se al livello minimo.

L'altra strada, detta di tipo *bottom-up*, è molto più difficile. Essa parte infatti da atomi e molecole totalmente privi di qualsiasi legame con strutture viventi, per arrivare all'aggregato minimo di materia capace di avere le proprietà che noi associamo alla materia vivente. Questa strada ha una intensa componente di tipo teorico che fa uso di modelli matematici in cui si fanno interagire numeri enormi di atomi e molecole nella speranza che vengano fuori sistemi dotati di proprietà diverse da quelle che si potrebbero derivare dalla semplice sovrapposizione di atomi e molecole. Un settore in questo sentiero molto intricato

è quello che cerca di capire come nascono le proprietà funzionali che danno luogo alla vita.

È bene precisare che non c'è unanimità nel definire con rigore le condizioni necessarie per identificare ciò che è vivo e ciò che non lo è. Oltre alle attività funzionali del metabolismo e della replica, è necessaria una equilibrata indipendenza dalle condizioni ambientali per evitare errori sulla definizione della vita. L'indipendenza però non può essere spinta oltre un certo limite. Tra le condizioni necessarie all'origine della vita c'è l'evoluzione che ha due strutture. Una che si sviluppa nell'ambito della stessa forma di materia vivente. L'altra che determina invece il passaggio da una specie vivente a un'altra che si separa poi nettamente dalla prima. Questo passaggio avviene tramite un processo fisico non capito, cui si dà il nome di “mutazione genetica”. Vi è una scuola di pensiero che identifica nei raggi cosmici le origini di tale mutazione. Ecco un legame che queste particelle provenienti dalle più remote zone dell'Universo hanno con la nostra vita. Una volta occorsa la mutazione, quella struttura di materia vivente ha bisogno di evolvere per potere continuare a vivere.

Il successo più noto in questo settore lo ottenne quindici anni fa Tom Ray dell'Università di Delaware con un programma (chiamato Tierra) nel quale cercò di imitare in un *computer* l'evoluzione darwiniana. Gli “organismi” del suo sistema erano “programmi” non embrioni né cellule. I programmi competono con altri programmi per accaparrarsi spazio di memoria nel *computer*. Ray nel suo sistema non ha imposto alcun criterio a priori per stabilire le caratteristiche che un organismo deve avere per adattarsi all'ambiente. Gli organismi del “brodo primordiale” di Ray si modificano, si combinano ed evolvono in modo da lasciare quante più copie di se stessi nella memoria del *computer*. Il potere dell'evoluzione è stato studiato facendo uso esclusivo di un programma da far girare a lungo in un *computer* senza usare né pezzi di materia inerte né pezzi di materia vivente, né raggi cosmici. Sembra quindi che l'evoluzione di una determinata specie vivente non abbia bisogno di fattori esterni fondamentali – com'è la radiazione cosmica – per evolvere, anche se la parola fine è lungi dal potere essere detta in questo settore di frontiera che dovrebbe permetterci di capire il passaggio dalla materia inerte alla materia vivente. Ecco un altro esempio di legame tra i raggi cosmici e le frontiere delle nostre conoscenze concernenti l'origine della vita che in ultima analisi porta a noi, esseri fatti con barioni e mesoni.

I barioni – come detto prima – sono particelle tipo-mattone mentre i mesoni sono particelle tipo-colla. La materia di cui siamo fatti ha bisogno di mattoni e di colla per riuscire a stare insieme. I barioni e i mesoni servono per fare la materia che si trova nel cuore di ogni atomo. Cuore detto nucleo; e nasce da questo nome la Fisica detta Nucleare.

Ci sono voluti più di cinquant'anni per capire che la materia nucleare nasce dal plasma di quark e gluoni. I mattoni fondamentali della nostra esistenza nucleare sono quindi i quark. E la colla fondamentale della nostra esistenza nucleare sono i gluoni. È a partire da questi mattoni e da questa colla che vengono fuori i barioni e i mesoni di cui è fatta ogni cosa, inclusi noi stessi. La struttura della nostra esistenza materiale non finisce qui. Noi siamo fatti di atomi e di gruppi di atomi (detti molecole). Un atomo, oltre alla sua parte centrale, detta nucleo, ha una nuvola enormemente più grande e leggera. Essa è fatta con elettroni. Queste particelle non hanno alcun legame con i quark né con i gluoni. Gli elettroni sono mattoni di tipo totalmente diverso e la loro colla è fatta di “pezzettini di campo elettromagnetico” cui si dà il nome di fotoni. La luce è fatta di fotoni. Ecco perché si dice che per fare un atomo ci vogliono anche i mattoni leggeri (gli elettroni, che appartengono alla classe di mattoni detti leptoni, proprio in quanto leggeri) oltre alla colla elettromagnetica.

Il sapore del sale nasce dalle proprietà elettromagnetiche della materia. Queste proprietà si manifestano in un volume che è un milione di miliardi di volte più grande del volume in cui si trova il nucleo dello stesso atomo. Infatti, mentre il raggio di un atomo è dell'ordine di 10^{-8} cm (un centesimo di milionesimo di centimetro), il raggio di un nucleo è centomila volte più piccolo; quindi dell'ordine di 10^{-13} cm (un decimo di millesimo di miliardesimo di centimetro).

Questa quantità di lunghezza si chiama “un Fermi”, in onore al grande fisico italiano che aprì alla Scienza le porte dell’Universo Subnucleare, scoprendo il primo esempio di barione diverso da quelli di cui siamo fatti noi (protoni e neutroni) e di cui è fatta qualsiasi altra cosa a noi familiare. A questa particella barionica scoperta da Fermi⁵ si dà il nome di “risonanza $3/2, 3/2$ ” e la si indica col simbolo Δ^{++} (il doppio segno positivo, +, serve a specificare che questa particella ha carica elettrica positiva doppia rispetto a quella elementare del protone).

2.6 – È stato Enrico Fermi ad aprirci gli occhi sull’Universo Subnucleare che possiede una nuova inaspettata proprietà: il confinamento

È stata proprio questa particella barionica Δ^{++} ad aprirci gli occhi sulla necessità dell’esistenza di un nuovo tipo di carica, diversa dalla carica elettrica, cui è stato dato il nome di “carica di colore” subnucleare. Questa carica di colore genera le forze subnucleari forti, così definite in quanto – alle energie tipiche della nostra vita – sono le più forti che possano esistere. Queste forze subnucleari forti agiscono tra quark e gluoni solo a piccolissime distanze. Quando si arriva a qualche Fermi di distanza l’intensità delle forze subnucleari forti raggiunge il limite estremo.

In gergo noi fisici diciamo che l’intensità diverge, diventando infinita. Quanto grande possa essere questa intensità nessuno sa calcolarlo ed è un problema teorico aperto. Ad esso si dà il nome di “confinamento”. Con esso si specifica la proprietà di quark e gluoni di restare eternamente confinati entro lo spazio di qualche Fermi.

C’è un modello teorico dovuto a Gerardus ‘t Hooft che spiega il fenomeno del confinamento. E c’è la prova sperimentale che dimostra l’impossibilità di mandare in frantumi un protone, anche usando le più alte energie che siamo finora riusciti a realizzare nei nostri laboratori [Ref. 3].

Resta il problema del passaggio dalle forze subnucleari a quelle nucleari. Fino agli anni settanta si pensava che dovessero essere le forze nucleari da mettere a confronto con quelle elettromagnetiche grazie alle quali esistono gli atomi e le molecole. Oggi sappiamo invece che le forze nucleari sono effetti secondari che nascono dalle forze subnucleari e che sono queste forze da mettere a confronto con le forze elettromagnetiche.

2.7 – Il vecchio sogno durato un secolo

Il vecchio sogno, durato un secolo, ed elaborato in una struttura matematica detta Teoria Quantistica e Relativistica dei Campi (*Relativistic Quantum Field Theory*, RQFT) avrebbe voluto che tutte le forze fondamentali – eccezione fatta per la gravitazione universale – dovessero essere descritte usando lo stesso formalismo matematico che era stato costruito per descrivere le forze elettromagnetiche.

Queste forze hanno bisogno di una sorgente semplicissima, cui i nostri nonni hanno dato il nome di carica elettrica. Questa struttura matematica è semplice in quanto di carica elettrica ne basta una e una sola. Purtroppo c’è qualcuno che scrive su qualche libro di

⁵ Enrico Fermi (1901-1954).

Scuola che le cariche elettriche sono tre: una positiva, l'altra negativa e la terza neutra. Questo non è esatto.

2.8 — Per generare le forze elettromagnetiche basta una sola carica, detta elettrica

Per generare le forze elettromagnetiche basta una e una sola carica elettrica. Se la sceglio positiva, si ottiene quella negativa usando l'operazione detta “coniugazione di carica”, matematicamente descritta dal cosiddetto Operatore-C, come scoprirono Weyl⁶ e Dirac⁷. Ottenuta la carica di segno opposto a quella di partenza, basta sommarle per ottenere carica zero: le forze elettromagnetiche nascono quindi da una e una sola carica fondamentale.

Nessuno, nel corso di ben sette decenni, dello scorso secolo, era riuscito a immaginare che potessero esistere forze fondamentali la cui origine dovesse essere non una, bensì tre cariche. Queste forze sono le già citate subnucleari forti che agiscono tra quark e gluoni.

2.9 — Un fenomeno che ricorda i colori ma è tutt'altra cosa

Alle tre cariche subnucleari si dà il nome di cariche di colore subnucleare forte o, più semplicemente, cariche di colore. Motivo: queste tre cariche possono combinarsi opportunamente in modo da dar luogo a una carica totale nulla.

Questo fenomeno ricorda i colori: mettendoli insieme si ottiene il bianco, detto anche colore neutro. Il bianco per esistere ha bisogno di tanti colori diversi. Ecco l'analogia. L'importanza del bianco con i colori subnucleari sta nel fatto che tutta la realtà a noi facilmente accessibile è fatta di colore subnucleare neutro. Questo vuol dire che, se vogliamo scoprire i colori subnucleari, dobbiamo entrare nel cuore dei barioni e dei mesoni. Il plasma di quark e gluoni prima citato ci permetterà di studiare direttamente l'Universo Subnucleare con i suoi tre colori fondamentali.

È bene precisare che il colore subnucleare è un fenomeno totalmente diverso dal colore a noi familiare. I colori cui è sensibile la nostra retina sono fenomeni di natura elettromagnetica e nascono dall'esistenza di quella semplicissima quantità fisica cui è stato dato il nome di carica elettrica. Se provassimo a spegnerla (nessuno riuscirebbe a farlo in quanto la Logica del Creato non è alterabile in alcun, pur minimo, dettaglio), addio colori, saperi, tatto, udito, olfatto e gusto.

2.10 – Come mai riusciamo a stare in piedi

I nostri sensi sono esempi di cosa riesce a fare la carica elettrica, nonostante la sua straordinaria semplicità. E dobbiamo sempre alla carica elettrica la capacità di stare in piedi. Muscoli e ossa sono strutture elettromagnetiche. Sono queste strutture che riescono a vincere l'attrazione gravitazionale che ci tiene legati alla Terra. Se, al posto della carica elettrica, con un esperimento “*gedanken*”, immaginassimo di mettere la cosiddetta carica gravitazionale, il nostro corpo si sgretolerebbe, schiacciandosi, e noi non potremmo esistere. Né potrebbero esistere i grattacieli e le montagne.

Le strutture a noi familiari, incluse le cattedrali e la Pietà di Michelangelo⁸, possono esistere in quanto la carica elettrica (alle energie tipiche del nostro mondo) è molto più

⁶ Hermann Weyl (1855-1955).

⁷ Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984). Si veda anche il Capitolo 1.

⁸ Michelangelo Buonarroti (1475-1564).

potente della cosiddetta carica gravitazionale. Noi siamo strutture elettromagnetiche ed è studiando queste strutture che siamo riusciti a scoprire realtà totalmente diverse, come ad esempio l’Universo Subnucleare, in cui si manifestano le forze che nascono non da una bensì da un triplo di cariche di colore.

Il rivelatore MRPC è uno strumento esclusivamente di tipo elettromagnetico. Ed è con un telescopio fatto di MRPC che studieremo i raggi cosmici.

2.11 – Il telescopio con MRPC

Il sistema di rivelazione modulare del Progetto EEE, installato in ogni Scuola, è un telescopio costituito da tre piani di rivelatori MRPC (Figura 4). Ogni piano è capace di misurare con grande precisione il punto d’impatto della particella cosmica incidente e il suo tempo di attraversamento.

L’area sensibile di ogni piano è di $(1,6 \times 0,82) \text{ m}^2$. Il sistema di lettura (*readout*) dei segnali avviene tramite elettrodi metallici suddivisi in strisce (*strips*) longitudinali, ciascuna lunga 1,6 m e larga 34 mm. La precisione nella determinazione della coordinata trasversale del punto d’impatto sarà dunque di 34 mm, ma potrà anche risultare migliore nel caso in cui due *strips* vicine diano segnale. Ogni *strip* sarà connessa, a ciascuna delle sue estremità, con un sistema elettronico di lettura e di acquisizione del segnale. La differenza in tempo tra i segnali ai due estremi di ogni *strip* produrrà la coordinata longitudinale del punto d’impatto, con una precisione di circa 1 cm. Gli elettrodi a *strips* saranno posizionati in corrispondenza alle due superfici esterne del rivelatore.

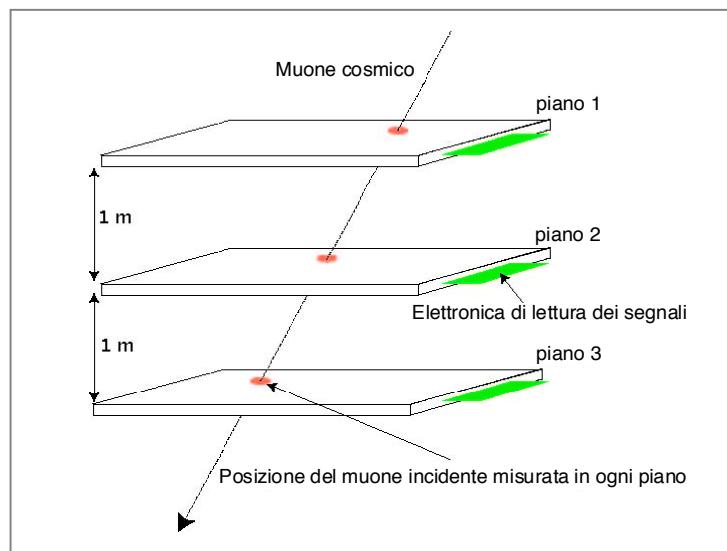


Figura 4

Tramite la misura della posizione dei tre punti d’impatto (uno per piano) sarà quindi possibile ricostruire la traiettoria rettilinea della particella che ha attraversato il telescopio. Sarà inoltre possibile conoscere il verso di attraversamento della particella (alto → basso oppure basso → alto) grazie alla misura del suo tempo di volo tra un piano e l’altro.

Ogni rivelatore consiste in una pila (*stack*) di lastre di vetro intervallate da sei strati di gas (*gas gaps*). Un elettrodo centrale suddivide lo *stack* in due sotto-*stacks* da tre *gaps* ciascuno in maniera tale da poter applicare l’alta tensione separatamente a ogni sotto-*stack*. Ciò consente di utilizzare una tensione di lavoro inferiore ai 5 000 Volt. Il sistema di alimentazione in tensione dei rivelatori MRPC è gestito tramite calcolatore.

Il gas che flussa attraverso il rivelatore MRPC può essere del freon ($C_2F_4H_2$) puro, non infiammabile e facilmente reperibile poiché comunemente utilizzato nei dispositivi di refrigerazione (frigoriferi, condizionatori d’aria). Il telescopio è quindi dotato di un opportuno sistema di gas comandato e controllato tramite calcolatore. Altri tipi di gas e altre soluzioni, per esempio con rivelatori sigillati (senza circolazione di gas) che verrebbero periodicamente riforniti di gas dal personale tecnico *in situ*, sono anche in esame.

Per la lettura e l’acquisizione dei dati, a ogni telescopio è associata una catena elettronica costituita da:

- 1 – un sistema detto di *front end*, per l’amplificazione e la discriminazione dei segnali forniti dagli elettrodi di *readout* dei rivelatori MRPC;
- 2 – un sistema detto di conversione, per la digitalizzazione delle informazioni acquisite;
- 3 – un sistema detto di *trigger*, per la selezione delle particelle.

La catena elettronica è connessa con un calcolatore tramite un’opportuna interfaccia. Il calcolatore è posto in rete (Internet). Il telescopio di ogni Scuola, collocato all’interno dell’edificio scolastico, è dunque in grado di acquisire dati e di trasmetterli via rete a un opportuno “centro di raccolta”. Ogni telescopio è inoltre geograficamente localizzato e temporalmente sincronizzato via satellite tramite un sistema GPS (*Global Positioning System*). È dunque realizzata anche l’installazione di un’apposita antenna GPS.

Così facendo i telescopi delle varie Scuole possono essere messi in coincidenza in fase di analisi dei dati, allo scopo di rivelare eventi cosmici di energie estreme: sciami cosmici di grande apertura angolare, ognuno dei quali costituito da un notevole numero di muoni simultaneamente rivelati da diversi telescopi situati a grande distanza l’uno dall’altro, provenienti inoltre da un punto comune nell’alta atmosfera terrestre (il cosiddetto vertice d’interazione del raggio cosmico primario che ha dato origine allo sciame).

I dati trasmessi da tutti i telescopi nelle varie Scuole sono raccolti e archiviati presso uno dei maggiori centri di calcolo italiani: il CNAF⁹ dell’INFN di Bologna. L’analisi dei dati potrà anche essere eventualmente effettuata tramite il sistema innovativo di calcolo distribuito GRID, usufruendo dell’esperienza del CERN e dell’INFN in tale settore.



⁹ Centro Nazionale per R&S nelle Tecnologie Informatiche e Telematiche.

2.12 – Il tempo di volo delle particelle subnucleari

Come detto prima, lo strumento MRPC è di natura esclusivamente elettromagnetica e servirà per studiare una realtà esistita (Sezione 2.4) qualche miliardesimo di secondo dopo il Big Bang. Realtà da cui veniamo e le cui proprietà sono appena da pochi anni oggetto delle nostre ricerche rigorosamente di stampogalileiano.

Per venire a capo di queste proprietà c’è bisogno di tante misure. Una di queste è il “tempo di volo” (*Time-Of-Flight*, TOF) delle particelle subnucleari. Più esattamente si misura questa quantità, meglio sarà per capire le proprietà dell’Universo Subnucleare. Ecco perché ci siamo spinti – come detto nella Sezione 2.2 – fino a 40 picosecondi.

Nel caso dell’esperimento che stiamo realizzando con strumenti costruiti e messi a punto nelle Scuole d’Italia, l’obiettivo scientifico sono i raggi cosmici di energie talmente alte che vengono definite estreme. Gli *Extreme Energy Events* (EEE) sono portatori di messaggi cosmici ancora tutti da capire.

Un raggio cosmico di alta energia, prima di arrivare a interagire con un nucleo della materia di cui è fatta la nostra atmosfera, ha viaggiato nello spazio cosmico per decine, migliaia, centinaia di migliaia e forse anche, per milioni di anni. Nonostante il secolo già trascorso in studi e ricerche per venirne a capo, nessuno può oggi dire di conoscere con certezza l’origine dei raggi cosmici.

2.13 – Gli spettri dei raggi cosmici e il loro legame con il clima

Dei raggi cosmici si sono misurati i cosiddetti spettri [Ref. 4 e Ref. 5], tre dei quali riprodotti nelle Figure 5, 6 e 7. Teorie recenti legano i flussi (detti anche intensità) dei raggi cosmici con il clima.

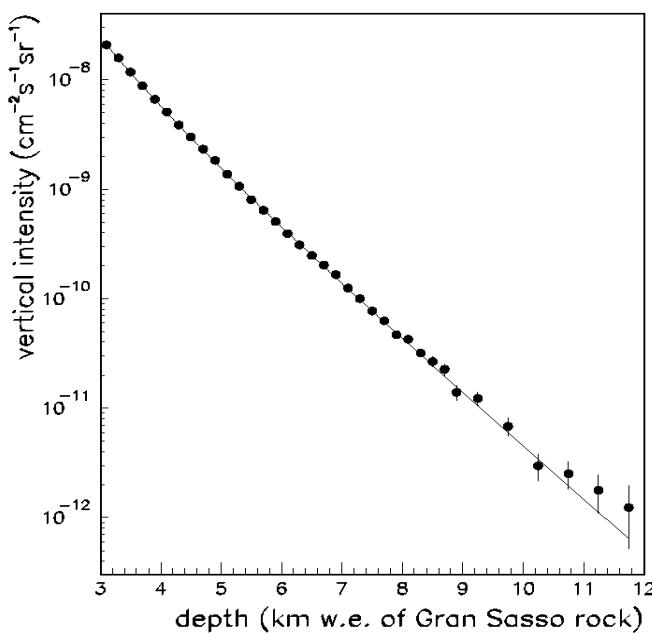


Figura 5

La Figura 5 corrisponde a misure effettuate nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell’INFN e mostra il flusso dei muoni cosmici in funzione della profondità, ossia dello spessore di roccia che i muoni hanno attraversato prima di raggiungere il laboratorio sotterraneo dove vengono rivelati. Tanto maggiore è tale spessore, tanto maggiore è l’energia del muone. La Figura 6 mette insieme analoghe misure ottenute anche in altri laboratori sotterranei. La Figura 7 riassume tutti i dati sperimentali finora ottenuti sul flusso dei raggi cosmici primari in funzione dell’energia.

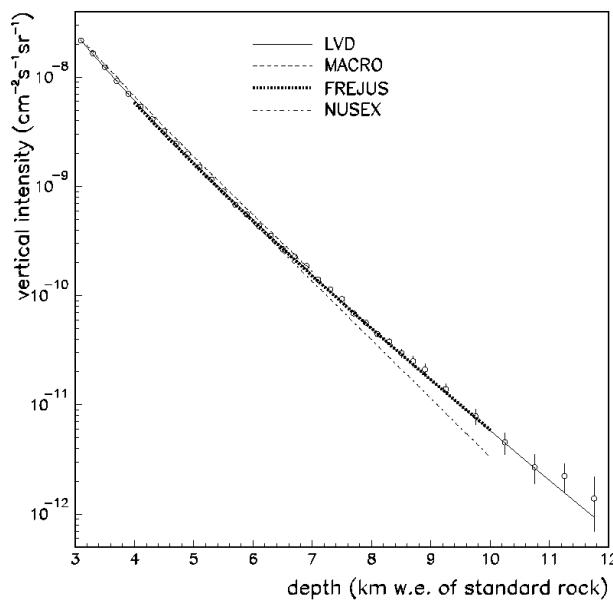


Figura 6

Tutti questi spettri ci dicono in sostanza quante particelle cosmiche incidono qui da noi sulla Terra al variare della loro energia. Più alta essa è meno ce ne sono.

Secondo una serie di studi molto recenti i raggi cosmici dovrebbero variare in funzione del campo magnetico solare che agisce da schermo. Si tratta di variazioni su lunghissimi periodi di tempo (milioni di anni). Sono variazioni che si possono misurare studiando residui fossili nei fondali marini. Sembra che venga fuori una correlazione tra periodi di glaciazione e ingresso della Terra in zone dove aumenta il flusso di raggi cosmici. Più raggi cosmici incidono nell’atmosfera, più nuvole vengono prodotte. Ecco come nasce il legame tra flussi di raggi cosmici e clima.

C’è poi un altro effetto scoperto in tempi recentissimi, studiando un certo tipo di isotopo nucleare prodotto dai raggi cosmici. Questi studi permettono di rifare la storia di come sono variate le frequenze delle macchie solari ben prima del periodo in cui esse cominciarono a essere osservate e contate (XVII secolo, grazie a Galilei¹⁰).

¹⁰ Galileo Galilei (1564-1642).

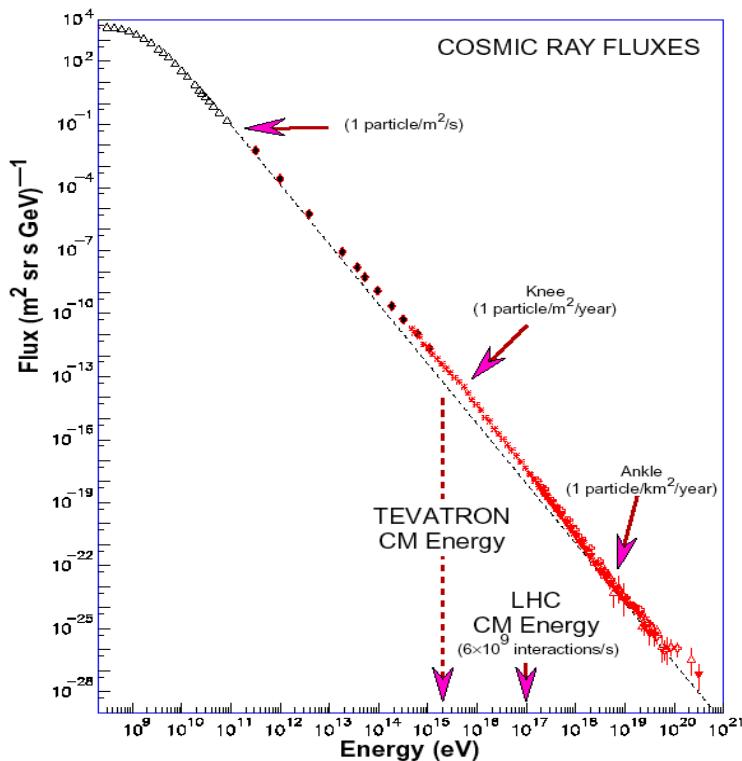


Figura 7

L'aumento delle macchie solari corrisponde a un aumento dell'energia emessa dalla nostra Stella incluse le sue attività magnetiche. Queste attività intensificano il campo magnetico protettivo che il Sole esercita sulla Terra; conseguentemente diminuiscono i raggi cosmici. E diminuisce così anche il tipo di isotopo nucleare prodotto nell'atmosfera dagli stessi raggi cosmici. La conclusione è che negli ultimi cinquant'anni l'attività delle macchie solari ha toccato valori record che non erano mai esistiti nel corso dei precedenti mille anni.

Come detto più volte prima (anche nella Sezione 2.1), le macchie solari dovrebbero avere effetti sul clima. Se ce ne sono mediamente meno di settantacinque, sulla Terra fa freddo. Se il loro numero è vicino a duecento si avrà un clima tendente al caldo.

2.14 – Quale posto occupano i raggi cosmici nella storia del mondo dal Big Bang, alle Galassie, alle Stelle, al Supermondo

2.14.1 – Si parte dal “punto”

È nel quadro inteso a conoscere le origini di ciò che accade nello spazio che rientra il Progetto EEE. Come detto già, l'obiettivo è lo studio degli eventi cosmici di energia estrema. Lo strumento MRPC che sarà costruito in ciascuna Scuola deve quindi avere le proprietà giuste per garantire la precisione con la quale misurare i tempi di volo delle particelle cosmiche e le loro traiettorie. I tempi di volo permetteranno di distinguere i raggi

cosmici che verranno dall'alto verso il basso dai raggi cosmici che verranno dall'altro lato della sfera terrestre (Figura 8).

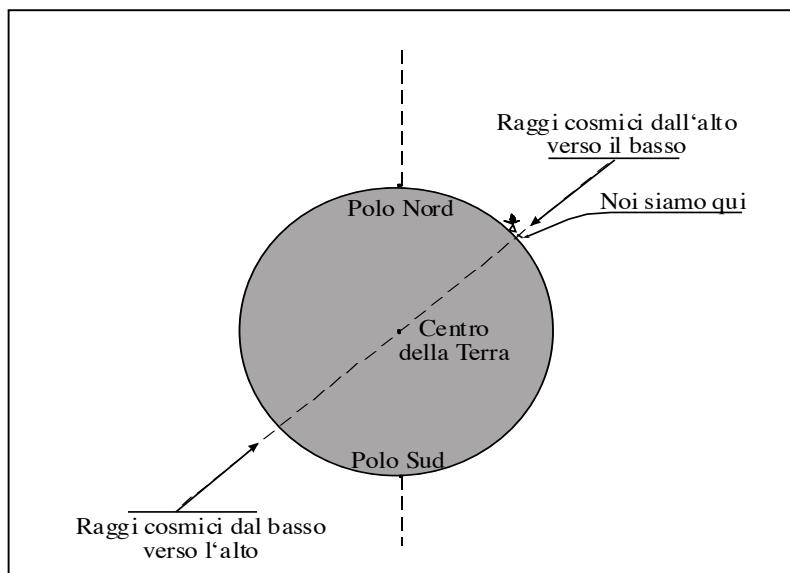


Figura 8

Le traiettorie serviranno per stabilire il “punto” in cui si è verificata nell’atmosfera l’interazione che ha prodotto la serie di eventi registrati nei rivelatori delle nostre Scuole. Questo punto costituisce l’ultima impronta spazio-temporale lasciata da quella particella cosmica della quale vorremmo scoprire le origini.

L’origine dei raggi cosmici non ha alcun legame con i movimenti della Terra che sono tre e che non vanno confusi tra di loro. Il terzo movimento ha un ruolo essenziale nel disaccoppiare le date del calendario dalle posizioni delle costellazioni (inesistenti) e dei segni zodiacali (anch’essi inesistenti). È forse bene mettere a fuoco i tre movimenti della Terra al fine di porre nel giusto contesto cosmico questa navicella spaziale di cui abbiamo il privilegio di essere passeggeri.

2.14.2 – I tre movimenti della Terra

Il primo movimento della Terra è quello che produce il giorno e la notte.

È una rotazione a trottola che dura 24 ore circa producendo luce (giorno) e buio (notte) in quantità diverse eccetto che nell’equinozio di primavera (21 marzo) e nell’equinozio di autunno (23 settembre).

Il giorno più lungo è nel solstizio d'estate (21 giugno); la notte più lunga è nel solstizio d'inverno (22 dicembre). Il motivo per cui ci sono quantità diverse di luce (giorno) e di buio (notte) nel corso dell'anno è dovuto al fatto che la Terra, oltre a girare a trottola, si muove lungo un'orbita che nel suo interno ha la sorgente di luce che produce il giorno. Se questa sorgente di luce non fosse all'interno dell'orbita il discorso fatto prima sui solstizi e sugli equinozi non sarebbe più valido.

Il legame tra il primo movimento della Terra (a trottola) e il secondo movimento attorno al Sole nasce dal fatto che i due movimenti appartengono allo stesso oggetto che si muove e che è la nostra Terra.

Il primo movimento, essendo a trottola, fa nascere l'esigenza di un'asse: quello della trottola. La Terra è di forma sferica e questa sfera è dotata di un movimento rotatorio attorno a un asse che passa per il centro della stessa sfera, come illustrato nella Figura 9.

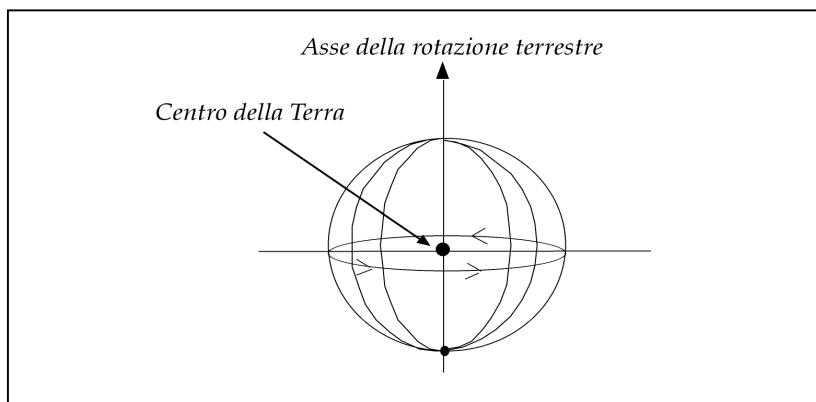


Figura 9

Se questo asse fosse immobile non esisterebbe il terzo movimento della Terra, che è lentissimo ma non nullo: l'asse impiega 25 620 anni per fare un giro completo, vedremo fra poco come. La rotazione dovuta al terzo movimento della Terra è 6778 volte più lenta dell'oscillazione (di natura non fisica ma geometrica) che l'asse terrestre ha rispetto alla sorgente di luce che ci illumina e riscalda, il Sole.

Più esattamente questa oscillazione (geometrica, non fisica) avviene rispetto alla direzione della linea retta che congiunge il centro del Sole con il centro della Terra, come illustrato nella Figura 10. È l'oscillazione geometrica a produrre le stagioni. Essa nasce in quanto la Terra è dotata di un movimento orbitale attorno a un punto che si trova nell'interno della stessa orbita. Il movimento orbitale costituisce un moto fisico effettivo.

Questo è pertanto il secondo movimento che possiede la Terra.

Il secondo movimento della Terra è quello che la fa girare attorno al Sole ed è associato all'esistenza delle stagioni.

È però bene precisare che questo stesso movimento non produrrebbe le quattro stagioni se l'asse terrestre (quello della trottola del primo movimento) fosse perpendicolare al piano dell'orbita. Al piano cioè sul quale si trova la traiettoria orbitale che la Terra percorre nel girare attorno al Sole. Se questo angolo coincidesse con la perpendicolare al piano dell'orbita, non potrebbero esistere le stagioni. È la deviazione dalla perpendicolare che determina le differenze tra le stagioni. Più l'asse terrestre si scosta dalla perpendicolare, più forti saranno le differenze tra estate e inverno.

Attualmente questa deviazione è di 23 gradi e mezzo. Fu Euclide¹¹ a capire cosa accade quando una trottola di forma sferica si muove lungo un'orbita che può essere un

¹¹ Euclide (ca. 325-265 a.C.).

cerchio perfetto o deformato com’è un’ellisse, ma che ha nel suo interno un punto che illumina la stessa sfera.

Se l’asse della trottola non è perpendicolare al piano dell’orbita e il punto si trova nella parte interna del percorso – com’è il caso del cerchio o dell’ellisse – allora entra in gioco l’angolo di inclinazione tra l’asse della trottola e la retta che congiunge il punto e il centro della trottola sferica.

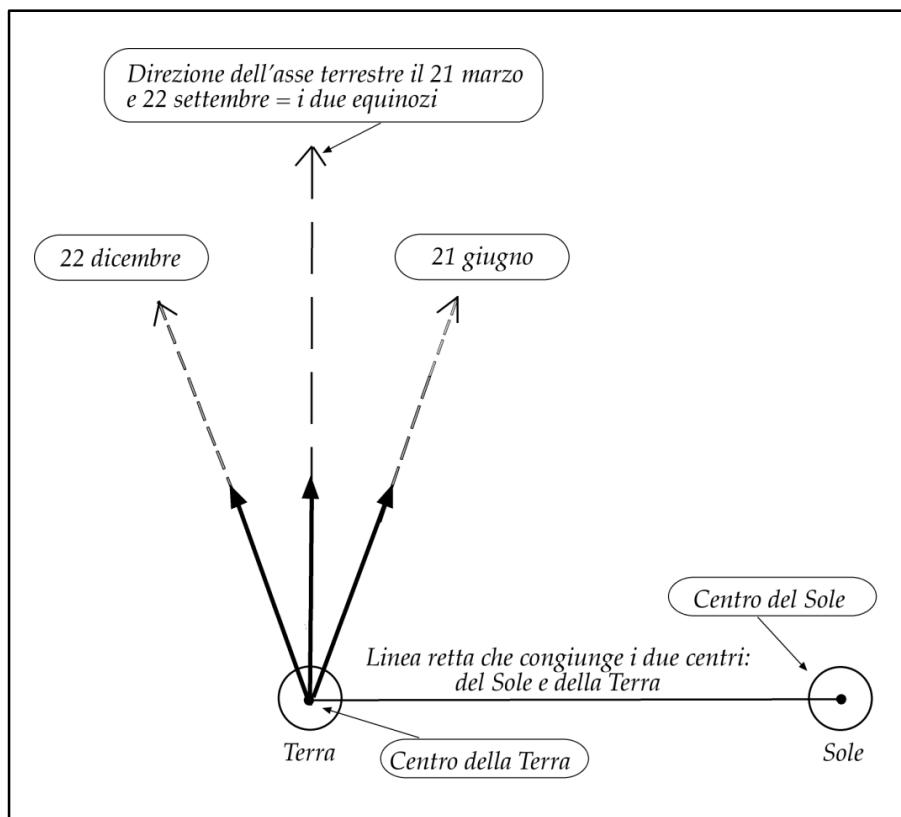


Figura 10

Questo angolo è di grande importanza per la trottola se quel punto è sorgente di luce, come accade nel caso del Sole.

Euclide capì che l’angolo di inclinazione cambia continuamente, mentre la trottola si muove lungo il percorso circolare o ellittico.

Nel caso della Terra il 21 giugno l’asse risulta al massimo della sua inclinazione verso il Sole. Il 22 dicembre l’inclinazione è nella direzione opposta al Sole. Come insegnava Euclide queste due inclinazioni estreme non sono prodotte da un movimento fisico dell’asse terrestre. L’asse resta “quasi” completamente fisso nello spazio cosmico. Le due inclinazioni estreme sono dovute alle posizioni geometriche diverse che la trottola sferica si trova ad avere nel suo girare attorno al Sole.

Nella Figura 11 il piano dell’orbita terrestre è perpendicolare al piano del foglio. Per semplicità possiamo immaginare l’asse terrestre perfettamente fisso, immobile, nello spazio cosmico come se la sua deviazione dalla perpendicolare al piano dell’orbita non cambiasse mai.

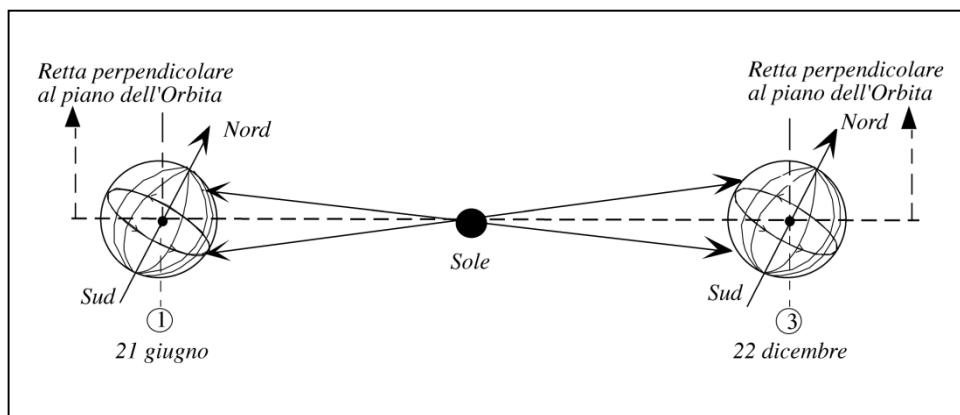


Figura 11

Pur essendo (per ipotesi) fissa nello spazio cosmico, la direzione dell’asse terrestre, rispetto alla retta che congiunge i due centri (del Sole e della Terra), cambia per via del movimento orbitale attorno al Sole. Nascono così le due inclinazioni mostrate nella Figura 11, nei due punti corrispondenti al 21 giugno e al 22 dicembre.

Adesso introduciamo il terzo movimento.

Questo terzo movimento della Terra si riferisce all’asse terrestre ed è talmente lento da giustificare il “quasi” immobile prima citato.

Abbiamo visto nel discutere il secondo movimento della Terra quanto fosse importante la deviazione dell’asse terrestre dalla direzione della perpendicolare al piano dell’orbita. Se non fosse per questa deviazione (che è di 23 gradi e mezzo) non potrebbero esistere le stagioni in quanto non potrebbero esserci né l’inclinazione massima (21 giugno) verso il Sole, né l’inclinazione (22 dicembre) in direzione opposta al Sole illustrate nella Figura 11.

Ed ecco cosa accade a causa del terzo movimento. Queste due inclinazioni avvengono in posizioni diverse dell’orbita; anno dopo anno cambiano i punti dell’orbita nei quali le due inclinazioni sono massime e minime. Il terzo movimento fa infatti ruotare l’asse terrestre attorno alla perpendicolare al piano dell’orbita in modo estremamente lento. L’asse terrestre impiega venticinquemila seicentoventi anni per fare un giro attorno alla perpendicolare citata.

Attenzione: la deviazione resta esattamente la stessa: 23,5 gradi. L’asse gira descrivendo la superficie di un cono che ha il vertice nel centro della Terra con una apertura di ventitré gradi e mezzo, come illustrato nella Figura 12.

Mettendo a confronto la rotazione di 360 gradi che l’asse terrestre compie in 25 620 anni, illustrata nella Figura 12, con l’oscillazione geometrica scoperta da Euclide, che corrisponde a $2 \times (23,5)^\circ = 47$ gradi in 6 mesi (dal 21 giugno al 22 dicembre), viene fuori il fattore 6 778 prima citato.

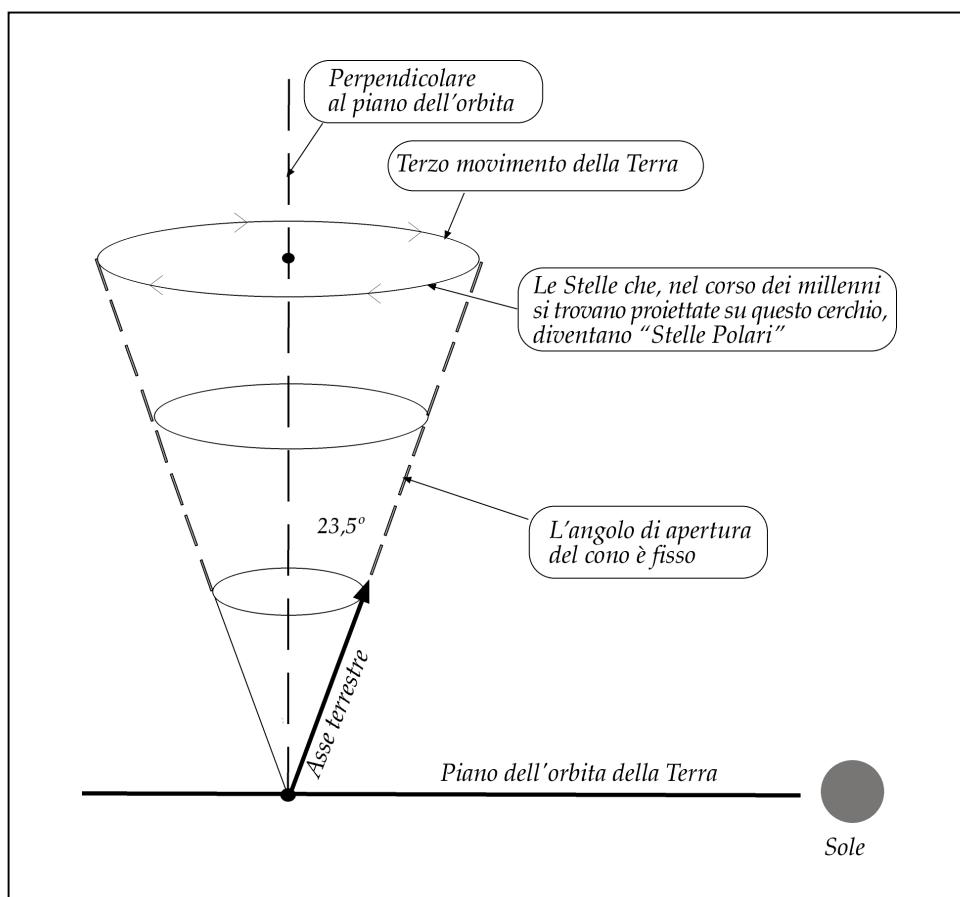


Figura 12

Nonostante sia piccolissimo, questo terzo movimento della Terra disaccoppia le date del calendario dai segni zodiacali con i risultati illustrati nella Tavola 1.

Come vedremo nel Paragrafo seguente (2.14.3), i segni zodiacali non corrispondono ad alcun tipo di realtà cosmica: non esistono.

Chi volesse insistere nel prestare fede a coloro che dicono di conoscere meglio i segreti dei cieli (i cosiddetti CDO: compilatori di oroscopi [Ref. 6]) dovrebbe fare almeno lo sforzo di aprire le finestre all'alba del suo giorno di compleanno, per dare uno sguardo alle Stelle che determinano il suo cosiddetto “segno zodiacale”. Scoprirebbe così che il suo segno è sbagliato. E se ripetesse queste osservazioni lungo tutti i giorni dell'anno scoprirebbe quanto riportato nella Tavola 1.

Anzitutto che i segni zodiacali sono 13 e non c'è motivo di ignorare l'esistenza del tredicesimo (Ophiuco). Eppoi che le date di attraversamento del Sole sui vari segni sono quelle della colonna “Il Vero” mentre i CDO lavorano con la colonna “Il Falso”.

Il terzo movimento della Terra nel giro di 2 200 anni fa cambiare segno a chi nasce nello stesso giorno di calendario.

Costellazione	Data effettiva dell'attraversamento del Sole	Durata (giorni)	Data fittizia dei CDO
Pesci	dal 12 marzo al 17 aprile	37	20.II → 20.III
Ariete	dal 18 aprile al 13 maggio	26	21.II → 20.IV
Toro	dal 14 maggio al 20 giugno	38	21.IV → 21.V
Gemelli	dal 21 giugno al 19 luglio	29	22.V → 21.VI
Cancro	dal 20 luglio al 9 agosto	21	22.VI → 22.VII
Leone	dal 10 agosto al 15 settembre	37	23.VII → 22.VIII
Vergine	dal 16 settembre al 30 ottobre	45	23.VIII → 22.IX
Bilancia	dal 31 ottobre al 22 novembre	23	23.XI → 22.X
Scorpione	dal 23 novembre al 28 novembre	6	23.X → 21.XI
<i>Ophiuco</i>	<i>dal 29 novembre al 17 dicembre</i>	<i>19</i>	
Sagittario	dal 18 dicembre al 18 gennaio	32	22.XI → 21.XII
Capricorno	dal 19 gennaio al 15 febbraio	28	22.XII → 21.I
Acquario	dal 16 febbraio all'11 marzo	24	22.I → 19.II

*Segno zodiacale
ignorato dai CDO*

Il Vero

Il Falso

Tavola 1

2.14.3 – Tutto nel Cosmo si muove: non esistono né costellazioni né segni zodiacali

I tre movimenti della Terra sono tutti di rotazione: uno a trottola, l'altro attorno al Sole e il terzo attorno alla perpendicolare del piano orbitale.

Ci sono però ben altri movimenti molto più importanti. Quando volgiamo lo sguardo verso il Cosmo è come se noi fossimo appiccicati al Sole che ci trascina nel suo viaggio attorno al centro della Galassia alla velocità di un milione centocinquantaduemila chilometri orari. La Galassia trascina il Sole (quindi anche noi) attraverso il Cosmo alla velocità di tre milioni e settantaduemila chilometri orari. Nulla sta fermo nel Cosmo. Senza accorgercene noi siamo dotati di tutte queste velocità.

Velocità che i nostri antenati non conoscevano quando inventarono le costellazioni, i segni zodiacali e gli oroscopi, pensando anche che di anno in anno ci si trovasse sempre allo stesso posto. E invece no. Le velocità sopra citate portano alla conclusione che non esistono gruppi di Stelle dotate di particolari caratteristiche.

Non esistono quindi né le costellazioni né i segni zodiacali né tutte quelle proprietà che i nostri antenati attribuivano ai cieli e alle Stelle quando nessuno aveva ancora capito che questi oggetti celesti, che ci affascinano con la loro luce, brillano più di neutrini che di fotoni (quanti di luce). Le velocità descritte ci dicono che, dopo un anno, siamo a venti miliardi di chilometri di distanza dalla zona di spazio cosmico in cui ci si trovava l'anno precedente [Ref. 7].

L'idea che nella volta celeste dovessero esistere gruppi di Stelle legate insieme per formare le costellazioni e che alcune di esse – quelle nella “fascia zodiacale” – avessero influssi particolari su ciò che accade sulla Terra, quest'idea dell'esistenza dei segni zodiacali è nata e si è sviluppata quando i nostri antenati non conoscevano alcuno dei

movimenti di cui noi siamo dotati. L’idea della volta celeste con le Stelle fisse che gira attorno a noi è basata sulla Terra ferma al centro del mondo e noi bloccati con essa.

La verità è ben diversa. Come abbiamo visto ci muoviamo girando sulla trottola-Terra a velocità supersoniche. Velocità queste che diminuiscono man mano che ci si avvicina ai Poli (Nord e Sud). All’equatore la velocità di rotazione è di 1 670 chilometri l’ora. Alla latitudine di Roma è leggermente inferiore: 1 340 chilometri orari. Solo se ci trovassimo esattamente su uno dei due Poli, Nord o Sud, questa velocità sarebbe zero. In quanto alla Terra, essa viaggia attorno al Sole, come abbiamo visto, alla velocità di centottomila chilometri orari.

Questi movimenti fanno parte della nostra esistenza dinamica nel Cosmo di cui i raggi di energia estrema sono una componente di straordinario valore.

2.14.4 – L’evoluzione del Cosmo dal Big Bang al Supermondo

È bene passare in breve rassegna il posto che occupa il fenomeno cosmico – oggetto degli studi del Progetto EEE – nella sintesi che illustra l’evoluzione del mondo dal Big Bang a oggi.

Questa sintesi è riportata nella Figura 13. Sull’asse orizzontale c’è la quantità fisica detta energia. Perché l’energia? Risposta: è la quantità fisica più semplice e importante per descrivere i fenomeni fondamentali.

Se volessimo scoprire chi è il più ricco uomo del mondo, il parametro giusto sarebbe la quantità di soldi che possiede. Volendo capire se è possibile che tutta la realtà che ci circonda e nella quale viviamo nasca da un’origine comune è il livello massimo d’energia (non la quantità di soldi posseduta da un individuo) che ci permetterà di trovare la strada giusta.

Ed ecco il primo risultato.

Lo stato dell’Universo in cui noi ci troviamo è a livello minimo d’energia (rettangolo denominato *UNIVERSE NOW* nella Figura 13); subito sopra viene il livello energetico tipico del fenomeno della vita (rettangolo *LIFE*).

L’unità da noi scelta è il GeV che corrisponde a un miliardo di elettron-Volt. L’elettron-Volt è la quantità di energia che acquista un elettrone se sottoposto alla differenza di potenziale di un Volt.

Dicevamo che l’energia è il parametro fondamentale che permette di classificare tutti i fenomeni oggetto di studio rigoroso. Esempio: il fuoco di una candela è un fenomeno elettromagnetico che è caratterizzato da un livello d’energia pari a un elettron-Volt, quindi nell’unità scelta, il GeV, siamo al miliardesimo di GeV (rettangolo denominato *FIRE EM*).

Il fuoco del Sole e delle Stelle è di natura nucleare e si trova al millesimo di GeV (rettangolo denominato *SUN-NUCLEAR FIRE*), quindi un milione di volte più in alto del fuoco delle nostre candele.

Più su con l’energia nella Figura 13 c’è l’intervallo che, iniziando al livello di 10^{-9} GeV, arriva al centinaio di GeV e rappresenta tutto ciò che da Galilei a oggi si è potuto capire sui fenomeni fondamentali del Creato. Questo livello energetico delle centinaia di GeV è indicato con una linea verticale tratteggiata che termina in basso con la scritta m_Z .

I tre punti nel grafico sulla linea tratteggiata sono i risultati sperimentali ottenuti usando la macchina del CERN denominata *LEP* (*Large Electron-Positron collider*) in cui elettroni e antielettroni di altissima energia interagiscono producendo fenomeni estremamente interessanti per capire le proprietà dell’Universo Subnucleare.

Il livello energetico del Progetto EEE si trova nel rettangolo denominato *COSMIC RAYS* (raggi cosmici) e corrisponde anche all’energia della macchina subnucleare *ELOISATRON-ELN* (*Eurasian LOng Intersecting Storage Accelerator*) la cui circonferenza è

di trecento chilometri e il cui progetto teorico è stato elaborato nell’ambito di una collaborazione internazionale che fa riferimento alla WFS (*World Federation of Scientists*).

Nel limite estremo di osservabilità sperimentale c’è la freccia relativa al *GRAN SASSO*: qui la logica cambia totalmente. Non sono più le nostre macchine ad operare per produrre fenomeni ai livelli d’energia tipici della scala di Planck¹² (10^{19} GeV), ma l’Universo e la materia stessa di cui siamo fatti.

Gli esperimenti sulla stabilità della materia permettono infatti di legare le osservabilità sperimentali alla Logica che regge il mondo quando le energie in gioco sono quelle vicine alla scala energetica detta di Planck.

Fu il grande Planck a scoprire il livello d’energia che porta il suo nome. A questo traguardo Planck arrivò riflettendo sul significato delle tre costanti fondamentali della Natura: la velocità della luce, la costante di Planck e la costante di Newton¹³.

Per le costanti fondamentali della Natura è come se il tempo non esistesse: il loro valore non cambia mai. L’energia di Planck (E_{Planck}) nasce come livello energetico in cui il valore delle tre costanti diventa unitario. Partendo da questa ipotesi Planck derivò le unità di tempo, lunghezza ed energia. Ed è a questi livelli che le forze fondamentali si unificano, come mostrato nella Figura 13 dalle tre rette.

Ciascuna di queste rette è la sintesi di tutti i fenomeni che nascono da una forza fondamentale. Quella più in alto, indicata con $(1/\alpha_1)$, riguarda i fenomeni elettromagnetici (come lo sono radio, TV, sapori, colori, ecc.); quella indicata con $(1/\alpha_2)$ riguarda i fenomeni generati dalle forze di Fermi (che sono la valvola di sicurezza grazie alla quale il Sole e le Stelle possono funzionare come regolarissime candele a fusione nucleare); la retta indicata con $(1/\alpha_3)$ descrive i fenomeni in gioco nel cuore dei nostri protoni e neutroni e, più generalmente, nelle interazioni tra quark e gluoni.

Che le tre rette convergano è una delle più formidabili conquiste della Fisica Galileiana moderna. Le tre rette infatti sono il risultato della soluzione delle cosiddette “Equazioni del Gruppo di Rinormalizzazione”, un modo per dire: la descrizione matematica più rigorosa che si sappia fare di tutti i fenomeni fisici noti e di quelli che noi pensiamo dovrebbero essere scoperti nei prossimi decenni. Infatti nella parte intermedia della Figura 13 c’è un intervallo indicato con la scritta: *What Galilean Science should discover* (ciò che la Scienza Galileiana dovrebbe scoprire). Le tre rette sono il risultato ottenuto includendo nella descrizione teorica di tutti i fenomeni fisici reali e virtuali anche l’esistenza del Supermondo. Senza questa ipotesi le tre rette non convergerebbero verso lo stesso punto [Ref. 8].

Ecco perché noi pensiamo che il Supermondo deve esistere [Ref. 9]. Una sintesi dei motivi per cui dovrebbe corrispondere a realtà l’ipotesi del Supermondo è riportata nella Tavola 2.

C’è un altro punto interessante da mettere in evidenza. Il livello energetico E_{GUT} non coincide con il livello energetico E_{SU} . Questa “non coincidenza” si definisce “gap” [Ref. 10]. Se esiste effettivamente questo gap e quali sono le sue conseguenze saranno i giovani d’oggi a farcelo capire.

Un esempio. Il passaggio da E_{SU} a E_{GUT} potrebbe dar luogo alla formazione di Buchi Neri primordiali che potrebbero agire da “semi” per la formazione delle Galassie. Se potessimo studiare di cos’è fatta la materia dei Buchi Neri che ci sono nel cuore di ogni Galassia la risposta sarebbe immediata. Una cosa è certa. Nessuno ha capito come si formano questi agglomerati di materia cui diamo il nome di Galassie.

¹² Max Planck (1858-1947).

¹³ Isaac Newton (1642-1727).

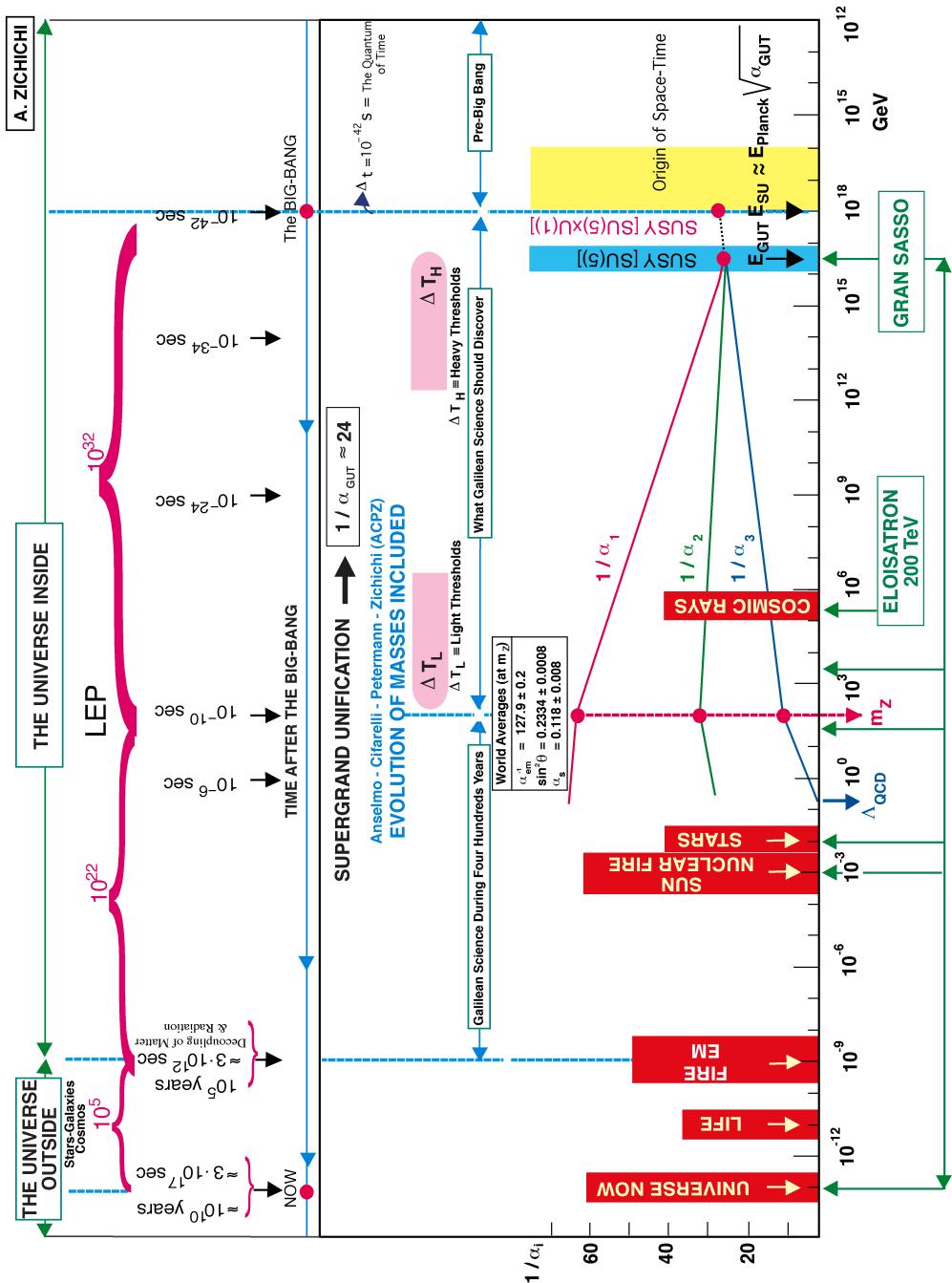


Figura 13

E nessuno aveva saputo prevedere che al centro di ogni Galassia dovesse esserci un Buco Nero la cui massa va dall'uno per mille a qualche per cento della massa totale di una Galassia. Lo studio delle Galassie “senza Stelle” ci permetterà di capire meglio fino a che punto questi fenomeni cosmici sono legati alla Fisica delle Energie Estreme di cui i raggi cosmici che noi vogliamo studiare sono l'indice esistenziale di maggior valore. Noi non sappiamo prevedere il livello della frequenza al quale questi fenomeni dovrebbero manifestarsi.

CI SONO MOTIVI FONDAMENTALI CHE RENDONO NECESSARIO IL SUPERMONDO

- 1) Bisogna tenere separate le due **scale di energia**: 10^{19} GeV (**Planck**) e 10^2 GeV (**Fermi**).
- 2) Bisogna evitare che l'attrazione gravitazionale della luce sia **infinita**. Se così fosse non potremmo vedere la luce delle Stelle. E neanche la nostra luce. Il “gravitino” (Supergravità) permette di rendere **finita** l'attrazione gravitazionale della luce.
- 3) L'attrazione gravitazionale è potente ma non può essere **infinita**. Noi saremmo appiccicati al Sole. Non potrebbe esistere lo Spazio tra le Stelle e tra le Galassie. Non potrebbe esistere l'espansione del Cosmo. Per avere un'attrazione gravitazionale **finita** sono necessarie le teorie in cui si abbandona il concetto euclideo di “punto”. Il “punto” viene sostituito con una “cordicella” (*string*). Niente più Teorie Puntiformi bensì ***Superstring Theories***. Queste teorie devono però essere supersimmetriche: nella loro struttura matematica deve essere valida la Legge di Supersimmetria ($F \equiv B$). Senza questa legge verrebbero fuori i “tachioni”.
- 4) Se vogliamo l'**Unificazione** di tutti i fenomeni fondamentali – la cui sintesi sono i tre “accoppiamenti di Gauge”, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, al variare dell'energia (*Renormalization Group Equations*) – è necessario introdurre la Legge di Supersimmetria ($F \equiv B$).
- 5) Perché TRE COLONNE e TRE FORZE? La risposta a questa domanda dovrebbe venire dal Superspazio con 43 dimensioni.
- 6) Un altro motivo fondamentale: *no-Scale-Supergravity* \equiv *Infrared Solution of Superstring Theory*. Questo permetterebbe di capire il valore estremamente piccolo della Costante Cosmologica.
- 7) La Supersimmetria non vale alla nostra scala d'energia. E qui nasce il problema di calcolare l'energia in cui scatta la legge ($F \equiv B$). Grazie all'effetto EGM (*Evolution of Gaugino Masses*) il livello di questa energia diventa 700 volte più accessibile rispetto a quanto si era finora pensato.

Tavola 2

Le sole certezze sono i due livelli di energia E_{GUT} ed E_{SU} sui quali è bene fare qualche precisazione. Il livello E_{GUT} (GUT significa: *Grand Unification Theory*) è il livello di energia al quale convergono le tre rette nella Figura 13. Rette – come già detto – che corrispondono alla analisi teorica di tutti i fenomeni fisici noti, inclusa l'ipotesi della esistenza del Supermondo, partendo dai tre punti sperimentalmente indicati con cerchi pieni e corrispondenti al livello energetico m_Z . Una cosa è certa: il livello E_{GUT} deriva da una rigorosa estrapolazione dei risultati sperimentali.

Il livello E_{SU} (SU significa: *String Unification*) è invece basato su strumenti teorici nati dalla esigenza di abbandonare la struttura matematica puntiforme a favore della struttura matematica in cui, al posto del “punto”, si mette la “cordicella”. A questa struttura si dà il nome di “teoria delle stringhe” (dal nome inglese *string*, che vuol dire cordicella).

Il livello E_{SU} non è derivato da risultati sperimentali. L’unico dato di partenza è il livello energetico di Planck. Che questi due livelli energetici, E_{GUT} e E_{SU} , siano non perfettamente coincidenti potrebbe essere indice di inaspettate novità. Novità che dovranno emergere dallo studio di stampo galileiano su com’è fatto il mondo. Studio in cui – come abbiamo appena accennato – entrano i raggi cosmici, quindi il Progetto EEE.

L’interesse del Progetto EEE è messo ancora più in risalto se si legge la parte alta della Figura 13. In essa il punto estremo a destra è l’istante del Big Bang. Andando verso sinistra si passa per la zona *COSMIC RAYS* che si trova tra il *Big Bang* e il *LEP* (m_Z).

L’Universo oggi è all’estrema sinistra e ad esso si arriva passando per la zona denominata *STARS-GALAXIES*. La freccia che precede il punto *NOW* (e cioè oggi) si trova a centomila anni dopo il Big Bang. È questo il punto più vicino che sia possibile studiare con strumenti astrofisici in quanto è in questa zona che inizia la separazione tra protoni, elettroni e fotoni, che fino a quel momento erano in uno stato di miscela detto “plasma”; era questo plasma cosmico lo stato dell’Universo qualche centinaio di migliaia di anni dopo il Big Bang; per essere più precisi è bene dire che, stime recenti spingono questa zona sui trecentomila anni dal Big Bang.

Comunque, per avvicinarsi al Big Bang c’è bisogno delle nostre macchine e dei nostri strumenti. Strumenti di cui il nostro rivelatore MRP è l’esempio più avanzato per misurare con alta precisione tempi di volo e traiettorie di particelle cosmiche subnucleari. L’ipotesi del Supermondo è necessaria per spiegare fenomeni noti che non trovano una corretta formulazione nell’ambito delle strutture teoriche elaborate senza introdurre le proprietà del Supermondo.

3 — RAGGI COSMICI E CORPI CELESTI

3.1 — I corpi celesti che arrivano sulla Terra

Un altro interessante risultato da legare al flusso dei raggi cosmici è quello relativo ai corpi celesti che arrivano sulla Terra. La loro frequenza non è facile da ricostruire in quanto un impatto cosmico sulla Terra viene cancellato nel corso dei secoli, sia dalle attività tipiche della nostra atmosfera, sia dai moti tellurici della crosta terrestre, inclusi quelli di natura vulcanica.

3.2 — La luna ci illumina su tante cose

3.2.1 — Scoperta sulla Luna la legge delle “aree uguali”

È la Luna che può illuminarci. Essa infatti non ha atmosfera e non ha attività vulcanica.

Sulla Luna è stato possibile scoprire la famosa legge delle “aree eguali” per i crateri prodotti dal bombardamento cosmico nel corso di millenni e millenni. Questa legge dice ad esempio che, se ci sono cento milioni (10^8) di crateri con diametro di dieci metri, ce ne devono essere un milione (10^6) con diametro da cento metri. E diecimila (10^4) con diametro da mille metri. Infatti:

$$\underbrace{10^8 \times (10)^2}_{10^{10}} = \underbrace{10^6 \times (10^2)^2}_{10^{10}} = \underbrace{10^4 \times (10^3)^2}_{10^{10}} .$$

La legge delle “aree eguali” è una conseguenza immediata del modo in cui un insieme di corpi di grosse dimensioni si trasforma, a furia di collisioni, in un insieme di dimensioni sempre più piccole.

Da quando Galilei iniziò a osservare la Luna nessun nuovo cratere, grande o piccolo, è apparso nella sua superficie, salvo quello che passiamo a illustrare. Il 15 novembre del 1953 un Americano amante delle Stelle e della Luna, Leon Stuart, fotografò un fugace punto brillante sulla superficie del nostro satellite.

L’astronomo non professionista dette di quella fugace luce un’interpretazione destinata a restare controversa: che fosse dovuta cioè all’impatto di un asteroide con la superficie lunare. Nel 1994 la sonda spaziale chiamata Clementine ha ripreso diverse foto della superficie lunare che solo adesso sono state analizzate da due ricercatori americani. Risultato: nel punto fotografato da Stuart nel 1953 c’è un cratere. Le sue dimensioni sono tali che, per produrlo, è stato necessario l’impatto di un asteroide il cui raggio doveva essere di dieci metri. L’energia dell’impatto giustifica perfettamente il fugace punto brillante fotografato da Stuart.

A parte questo “piccolo” colpo nessun altro oggetto cosmico è arrivato sulla Luna. È probabile che nel passato il Sistema Solare sia stato sottoposto a collisioni cosmiche con una intensità molto forte rispetto ai tempi storici (diecimila anni).

È bene ricordare che un proiettile cosmico dal diametro di cento metri produce sulla Terra un cratere da un chilometro, se è di ferro. Questo proiettile non sarebbe facile vederlo con le attuali stazioni di osservazione.

3.2.2 – La luce della Terra riflessa dalla Luna ci aiuta a capire il clima e la sua evoluzione

Noi possiamo goderci il “chiarore lunare”; se fossimo sulla Luna potremmo vedere la luce che la Terra riflette sulla Luna. Un sistema di osservazione montato su diversi satelliti della NASA¹⁴ ha permesso di misurare il “chiarore terrestre” negli ultimi 20 anni.

Dal 1984 al 1995 c’è stato un continuo declino e una caduta repentina dal 1995 al 1996. Il chiarore terrestre ha continuato a indebolirsi fino al 2000. Negli ultimi tre anni le cose stanno cambiando e il chiarore della Terra è cresciuto fino a toccare il valore che aveva alla fine del primo decennio.

L’interesse del chiarore terrestre è dovuto al fatto che quando la sfera terrestre è coperta di nuvole, la quantità di luce riflessa è inferiore. Meno chiarore terrestre corrisponde infatti a copertura nuvolosa più forte. Questi risultati sono molto importanti per il progetto della NASA denominato *Satellite Cloud Climatology Project*. Per chi si trovasse sulla Luna, la Terra brillerebbe di luce come fa la Luna con noi.

La luce riflessa dalla Terra può finire nella superficie della Luna che a noi appare non illuminata dal Sole. Questa superficie lunare diventa quindi leggermente brillante: un fenomeno capito da Leonardo da Vinci¹⁵ e oggi misurato con alta precisione dagli scienziati di due istituti americani, il *New Jersey Institute of Technology* e il *California Institute of Technology*, che partecipano al progetto della NASA per seguire come varia negli anni la copertura nuvolosa globale della Terra. Questa copertura globale ha un

¹⁴ National Aeronautics and Space Administration, USA.

¹⁵ Leonardo da Vinci (1452-1519).

ruolo decisivo per costruire un modello matematico in grado di spiegare il passato e di prevedere il nostro futuro climatologico.

3.2.3 – L’ombra dei raggi cosmici dovuta alla Luna e al Sole visti da sotto il Gran Sasso

Come abbiamo detto più volte, agli inizi del secolo scorso nessuno aveva saputo immaginare l’esistenza di raggi che vengono dalle regioni più lontane dell’Universo e che, per questo, vennero chiamati raggi cosmici. L’origine è ancora tutta da capire. Essi rappresentano la firma di quello che accade un po’ ovunque nell’Universo. Di certo sappiamo che i raggi cosmici “primari” non hanno alcuna direzione privilegiata. Se incontrano la Luna vengono assorbiti dalla sua massa. E anche se incontrano il Sole. Ecco perché è possibile escogitare un modo per “vedere” gli effetti prodotti dalla Luna e dal Sole standosene a migliaia di metri sottoterra. La maggior parte (85%) dei raggi cosmici consiste di protoni: e cioè nuclei dell’elemento più leggero, l’idrogeno. Poi vengono i nuclei dell’elio (14%), cui si dà il nome di particelle “alfa”, ciascuna fatta con due protoni e due neutroni. Il resto è costituito da nuclei di elementi pesanti.

Immaginiamo un protone che incida sulla materia di cui è fatta la nostra atmosfera. Essendo questa materia fatta di nuclei diversi, il protone interagendo con uno di questi nuclei, produrrà le cosiddette particelle “secondarie” e cioè i mesoni, scoperti nel 1947 da Lattes¹⁶, Occhialini¹⁷ e Powell¹⁸. Questi mesoni si trasformano in muoni nel volgere di una piccolissima frazione di secondo. A quei tempi il problema era di trovare la “colla” che mancava all’appello. C’era quella elettromagnetica – la luce – che serve per incollare atomi e molecole; mancava quella nucleare per incollare i pezzettini di nuclei (protoni e neutroni). La scoperta del primo esempio di colla nucleare (il mesone detto pi-greco) fece tirare un sospiro di sollievo ai nostri padri. Fermi infatti commentò la scoperta dicendo «Forse abbiamo capito quasi tutto». Il “forse” e il “quasi” dovevano rivelarsi di straordinaria saggezza: quella colla era il primo passo verso la scoperta di un nuovo mondo cui ci hanno portato i “raggi” che ci permettono di “vedere” la Luna e il Sole nonostante le enormi quantità di materia rocciosa che sta sopra i Laboratori del Gran Sasso.

La montagna ha il ruolo di ridurre per un milione di volte l’enorme quantità di raggi primari e secondari che continuamente arrivano un po’ da ovunque. Sarebbe impossibile ascoltare la nota di un violino quando lo stadio esplode di entusiasmo per il gol vincente della squadra del cuore. Ci vuole silenzio per apprezzare quella nota.

Nei Laboratori Gran Sasso c’è il “silenzio cosmico”. I raggi cosmici vengono ridotti di un milione di volte ma qualcuno di essi riesce a passare attraversando la montagna. Sono quelli che ci servono per “vedere” il Sole e la Luna. Questi raggi sono detti muoni; purtroppo i nostri occhi non riescono a vederli. Per far questo sono necessari speciali e sensibilissimi strumenti. È con essi che è stato realizzato un telescopio – in sigla MACRO (*Monopole, Astrophysics, and Cosmic Ray Observatory*) – capace di misurare con estrema precisione da dove vengono i raggi che attraversano la montagna e cioè – come detto già – i muoni. Questi raggi sono l’ultimo stadio di un processo a catena la cui origine è nelle sconfinate profondità del Cosmo. Quando la Luna si trova lungo la strada non arrivano più i muoni in quanto i raggi primari da cui nascono i muoni sono stati bloccati dalla Luna. Se lungo il percorso dei raggi cosmici primari c’è il Sole

¹⁶ Cesare Lattes (1924-2005).

¹⁷ Giuseppe Occhialini (1907-1993).

¹⁸ Cecil Frank Powell (1903-1969).

essi vengono assorbiti e al Gran Sasso non possono più arrivare quei raggi che sono l'ultimo stadio della loro esistenza.

È bene fare una precisazione: quello che il telescopio MACRO misura è la mancanza di muoni nelle direzioni lungo le quali vengono a trovarsi sia la Luna e sia il Sole. È come se nel telescopio venissero proiettate le “ombre” della Luna e del Sole. MACRO misura la certezza che ci debbono essere corpi celesti in grado di produrre ombre. E che questi corpi celesti sono il nostro satellite (la Luna) e la nostra sorgente di luce e calore (il Sole). Questa serie di studi sono stati realizzati da una squadra di fisici provenienti da molte nazioni, tra cui Brasile, Canada, Gran Bretagna, Russia, Romania, Stati Uniti, Mali, India e Pakistan. Quando vennero scoperti i raggi cosmici, nessuno avrebbe immaginato che un giorno sarebbero serviti per osservare le ombre della Luna e del Sole dal cuore di una montagna.

3.2.4 – Le due scuole di pensiero sulla Luna

Ci sono due scuole di pensiero per la Luna. Una sostiene che si tratta di un grosso asteroide “caduto” nella trappola gravitazionale della Terra. L'altra scuola di pensiero sostiene che fu un asteroide grosso come Marte che colpì la Terra appena 50 milioni di anni dopo la formazione del Sistema Solare.

Ricerche fatte da geologi del Politecnico di Zurigo portano acqua al mulino della collisione gigantesca. Studiando alcuni campioni di rocce lunari, essi infatti hanno scoperto che l'ossigeno presente in queste rocce ha la stessa composizione “isotopica” di quello presente nelle rocce della nostra Terra. Per composizione isotopica si intende quella delle strutture neutroniche.

Il nucleo d'ossigeno normale è fatto con otto protoni e otto neutroni. Ci sono però varietà di ossigeno con numeri diversi di neutroni. Le proprietà chimiche dell'ossigeno dipendono dal numero di protoni. L'ossigeno quindi rimane ossigeno se cambia il numero di neutroni nel nucleo. Alle varietà con numeri diversi di neutroni si dà il nome di varietà isotopiche. Rocce con identiche varietà isotopiche di uno stesso elemento è molto probabile che vengano dallo stesso corpo celeste. La Luna quindi sarebbe un pezzo della Terra staccatosi per colpa di un gigantesco asteroide. Purtuttavia studi e ricerche ulteriori potrebbero portare a sorprese. Bisogna saperne di più.

3.3 – Alcuni esempi del bombardamento cosmico

Grazie agli studi teorici sulle attività di oggetti cosmici nel sistema solare è però possibile elaborare modelli in grado di dirci le eventuali frequenze che questo tipo di bombardamento cosmico possiede.

L'ultimo corpo celeste, di una potenza devastatrice di poco superiore alla bomba che distrusse Hiroshima, ha colpito il Canada nel 1965. Con una potenza di impatto mille volte più grande, un oggetto cosmico colpì la Siberia nel 1908, esplodendo a cinque chilometri di altezza. La sua potenza era pari a tredici Megaton (un Megaton equivale alla potenza esplosiva di un milione di tonnellate – un miliardo di chili – di tritolo).

In Arizona, cinquantamila anni fa, un asteroide di ferro e nichel, scavò un cratere profondo duecento metri con una circonferenza di tre chilometri. Sessantacinque milioni di anni fa, un asteroide di potenza cento milioni di volte quella che devastò la Foresta Siberiana si abbatté sulla Terra.

Fu così che scomparvero i dinosauri e con essi il 70% delle specie animali che vivevano allora. L'impatto di quell'oggetto cosmico produsse un cratere dal diametro di duecento chilometri. Cratere scoperto nel 1992 a Chixuleels, in Messico.

3.4 — E adesso una domanda

E adesso una domanda: esiste una relazione tra la frequenza di questi corpi cosmici (asteroidi e comete) e la frequenza di raggi cosmici? La prima risposta ovvia è che non dovrebbe esserci alcuna relazione, trattandosi di fenomeni totalmente diversi. Metterli a confronto è però interessante. È bene dire subito che, su basi puramente statistiche, la frequenza di una collisione del nostro pianeta con un oggetto cosmico pari a dieci milioni di Megaton, 10^7 Mt, si valuta sui milioni di anni.

Quelli con potenza devastatrice pari alla bomba che distrusse Hiroshima (13 000 tonnellate di tritolo equivalente, quindi 0,013 Mt) hanno una frequenza di circa uno all’anno. C’è da precisare che la superficie della Terra su cui ci sono centri importanti di vita è molto piccola: qualche per cento della superficie totale.

Attenzione, questo valore rappresenta tutti quei luoghi in cui, se avviene qualcosa, la notizia non si perde in testimonianze contraddittorie e confuse. Il caso della cometa che colpì la Siberia nel 1908 è un esempio lampante. Ricordiamone i punti essenziali.

3.5 — Una bomba cosmica superiore a dieci Megaton in Siberia

Il 30 giugno del 1908, nella zona del fiume Tunguska in Siberia, un oggetto cosmico fatto di ghiaccio e argilla devastò un’enorme superficie di Foresta Siberiana. Il diametro di quel proiettile cosmico era di novanta metri. Esso si è disintegrato esplosando a circa cinquemila metri d’altezza. La potenza di quell’esplosione è stata pari a una bomba-H superiore ai dieci Megaton (circa 13). Quelle montate sui missili intercontinentali non superano la potenza del Megaton. Ne basta uno solo – di Megaton – per distruggere una grande metropoli. Per fortuna in quel remoto angolo del mondo non c’era nessuno. L’onda d’urto fu talmente potente che venne registrata da molti osservatori.

Se quello che nel 1908 è successo in Siberia fosse occorso in Europa, nessuno avrebbe potuto ignorarne le conseguenze. E invece è un puro caso se quella bomba da oltre dieci Megaton, che ha devastato un’immensa quantità di alberi della Foresta Siberiana, non sia passata inosservata. Infatti, quello che spinse una spedizione scientifica ad andare in Siberia furono le registrazioni dell’onda d’urto da parte della primordiale catena di strumenti sismici installati in alcuni laboratori attorno al mondo appena pochi anni prima del 1908. Se quella primitiva Rete Meteorologica Sismica fosse stata installata nel 1910, nessuno si sarebbe mosso. Ci vollero ben diciannove anni prima che nella zona della Tunguska arrivasse un gruppo di scienziati. Questi, a parte lo spettacolo desolante di un enorme numero di alberi abbattuti, tornarono indietro scoraggiati per non avere trovato alcun cratere. Ricerche ulteriori non poterono che confermare quanto era già stato osservato: niente segni di impatto a Terra.

Oggi sappiamo il perché: quell’oggetto cosmico aveva un diametro di novanta metri e non poteva arrivare fino a Terra, essendo fatto di ghiaccio e argilla. Per via dell’enorme attrito con l’aria, è esploso prima di toccare il suolo. Ecco perché non c’era il buco cercato.

3.6 — La frequenza del bombardamento cosmico

Come detto già, un asteroide o cometa con potenza pari a quella delle bombe che distrussero Hiroshima e Nagasaki, arriva sulla Terra una volta l’anno.

Passando a una potenza 30 000 (trentamila) $\equiv 3 \times 10^4$ volte maggiore, il calcolo prevede un impatto ogni mille anni (10^3 anni). Un impatto devastatore a livello

planetario accade quando si arriva a una potenza pari a 70 000 000 (settanta milioni) $\equiv 7 \times 10^7$ di volte Hiroshima. La frequenza scende a un colpo ogni milione di anni. Ciò è riassunto nella Tavola 3.

Come detto prima, nel 1965, in Canada, in una zona fortunatamente disabitata, piombò un asteroide (cui è stato dato il nome di Revelstoke) con una potenza devastatrice pari a una volta e mezzo quella che distrusse Hiroshima. Si era in piena Guerra Fredda e quell'evento gli scienziati di Erice lo studiarono per capire entro quali limiti esso avrebbe potuto essere interpretato da un sistema di difesa, come l'inizio di un attacco nucleare: scatenando quindi lo scontro nucleare Est-Ovest per errore.

BOMBARDAMENTO COSMICO: SINTESI DELLE FREQUENZE E DELLE ENERGIE					
i)	E_i Energia	T_i Periodo = 1 / Frequenza	$[R_T]_i =$ T_i / T_{i-1}	$[R_E]_i =$ E_i / E_{i-1}	$[R_T]_i / [R_E]_i$
	Unità: 15 Kt \equiv Hiroshima	Unità: 1 anno			
1)	1	1	–	–	–
2)	3×10^4	10^3	10^3	3×10^4	0,03
3)	7×10^7	10^6	10^3	$2,3 \times 10^3$	0,4

Tavola 3

Adesso che l'incubo di una guerra nucleare USA-URSS è finito, il problema degli asteroidi rimane, non come pericolo di falso allarme nucleare, ma di colpo gravissimo per la vita sul pianeta. Nessuno può dire quando potrebbe verificarsi. Però, sulla base di alcuni modelli teorici, i tempi in gioco sono confrontabili con la nascita di una civiltà (diecimila anni).

3.7 — Effetti sulle caratteristiche vitali della Terra

È bene precisare che l'impatto di un asteroide, con potenza devastatrice tremila volte più grande della bomba che distrusse Hiroshima, incomincia a entrare nella classe di quei fenomeni che possono incidere su alcune caratteristiche vitali del nostro pianeta, come sono la fascia d'Ozono, possibili onde giganti – tsunami – prodotte dall'impatto con il mare, effetti sul clima e sull'agricoltura.

Lo studio rigoroso delle conseguenze di tali fenomeni è difficile, mentre è più sicuro il calcolo delle frequenze d'impatto in funzione della potenza devastatrice. Ad esempio, come detto nella Sezione 3.6, se da quella di Hiroshima si passa a una potenza trentamila volte maggiore, il calcolo prevede un impatto ogni millennio. Siccome la Terra solida è un terzo del totale, si arriva facilmente sui tremila anni, per un impatto su terraferma. E qui siamo ancora al limite per le conseguenze seriamente catastrofiche.

Tenendo sempre come riferimento Hiroshima, quando si arriva a una potenza settantamila volte più grande, la devastazione assume rilievo planetario. L'impatto devastatore a livello planetario è terribile quando si tocca una potenza pari a settanta

milioni di volte Hiroshima. Per nostra fortuna la frequenza scende a un colpo ogni milione di anni. Diciamo subito che le conquiste della Scienza permettono di dare una risposta sicura e positiva alla domanda se ci si può difendere da proiettili cosmici.

3.8 — Osservazioni terrestri su ere geologiche e crateri

Ma vediamo cosa ci dicono le osservazioni fatte qui sulla Terra. Esse si dividono in due classi: studio delle ere geologiche e ricerca dei crateri. È possibile studiare le grandi estinzioni delle forme di vita sul pianeta a partire da cinquecentosettanta milioni di anni fa. Motivo: soltanto a partire da quest’epoca si possono sicuramente datare fossili di vita marina. Viene fuori che di estinzioni se ne possono identificare quattro. L’ultima è occorsa sessantacinque milioni di anni fa. È quella dei dinosauri. Ma ce ne sono ben altre tre. Una, duecentoquindici milioni di anni fa. Un’altra trecentosessanta milioni di anni fa; la più remota quattrocentotrentacinque milioni di anni fa. Molti problemi sono ancora da capire per ricostruire con maggiore rigore la storia del lontano passato in cui qualcosa di terribilmente potente colpì la Terra dal Cosmo. Lo studio di questi eventi lontani nel tempo è appena agli inizi.

3.9 — L’orbita terrestre fino a che punto è stabile?

La causa prima dell’esistenza di questi proiettili cosmici è l’instabilità gravitazionale. I nostri padri ci avevano abituati a pensare che la Terra girerà sempre attorno al Sole, fino a quando il Sole esisterà. E che per nessun motivo la nostra Terra può abbandonare la sua orbita per andare a spasso nel Cosmo. I nostri trisavoli sapevano che i sistemi con tanti corpi gravitazionali in gioco, come è il nostro sistema planetario solare, non possono essere stabili. Però è necessario potere eseguire calcoli per arrivare a precise conclusioni.

Ci sono volute sei ore di calcolo al *supercomputer* per valutare in dettaglio le orbite che i pianeti del Sole (escluso Plutone) faranno nei prossimi duecento milioni di anni. Se questi calcoli avesse dovuto farli un esperto usando carta e matita, sarebbe dovuto restare a tavolino cinquantamila anni. Ed ecco un risultato di grande interesse. La nostra Terra ha una traiettoria la cui stabilità è assicurata solo per i prossimi dieci milioni di anni. Questi calcoli dipendono dalle condizioni iniziali. Un errore, di appena una parte su un miliardo di parti, diventa enorme dopo cento milioni di anni.

La traiettoria della nostra Terra, nel suo ruotare attorno al Sole, dipende dalle condizioni iniziali. I calcoli ci assicurano che continueremo a girare attorno alla nostra Stella sicuramente per i prossimi dieci milioni di anni. Poi non si può escludere che la Terra abbandoni la sua traiettoria. Questo non vuol dire che la abbandonerà sicuramente, ma che, usando tutte le informazioni a nostra disposizione, noi non possiamo essere certi di alcuna conclusione.

Se qualcuno avesse dubbi sulla esistenza dell’instabilità gravitazionale, dia un’occhiata ai crateri sulla Luna (Sezione 3.2). O a quelli sulla Terra, il cui numero continua ad aumentare. Ad esempio, in Arizona, dove fino a poco tempo fa se ne conosceva uno soltanto – il più grande da noi citato – ne sono stati trovati altri dieci.

3.10 — Da dove vengono gli asteroidi?

La sorgente degli asteroidi si trova tra Marte e Giove: nella cosiddetta Fascia degli Asteroidi. Nello spazio tra Marte e Giove, invece di un satellite del Sole, c’è un numero enorme di corpi celesti piccoli e grandi. I due più grandi sono Cerere (raggio: 500

chilometri) e Pallas (raggio: 300 chilometri). Ce ne sono poche centinaia grossi quanto dieci volte il Monte Bianco. Di piccoli ce n’è un numero enorme e ancora più di piccolissimi, fino alle dimensioni di una pietra, per arrivare ai granelli di sabbia. Più sono piccoli e più grande è il loro numero: milioni e milioni.

La massa di Cerere è un terzo della massa totale della Fascia di Asteroidi. Però la massa totale di tutti gli asteroidi non arriva al totale della massa del pianeta mancante che, per secoli e secoli, generazioni di astronomi si aspettavano dovesse esserci tra Marte e Giove. Questa massa mancante si pensa sia dovuta ad asteroidi che, per un effetto scoperto in tempi recenti, l’instabilità gravitazionale (Sezione 3.11), hanno abbandonato la Fascia, finendo alcuni sulla Luna, molti sulla nostra Terra [Ref. 11] e la maggior parte in giro nel Sistema Solare.

Il Sistema Solare consta di quattro satelliti “terrestri” (Mercurio, Venere, Terra e Marte), piccoli e rocciosi, la cui rotazione a trottola va da 24 ore (noi) a 243 giorni (Venere), come riportato nella Tavola 4. I satelliti “non terrestri” (Giove, Saturno, Urano, Nettuno e Plutone), enormi e gassosi (eccetto Plutone che è fatto essenzialmente di ghiaccio ed è più piccolo della Luna), ruotano a trottola in meno di un giorno.

Il vero problema del Sistema Solare è di natura astrofisica: nessuno può dire di averne capito le origini. Non si può escludere che, almeno una parte delle sue strutture, tra cui anche la nostra stessa Terra, venga da lontano: da un’altra Stella. Nella Tavola 4 ci sono i dati più importanti sul Sistema Solare.

Noi distiamo dal Sole centocinquanta milioni di chilometri. Per avere un’idea della posizione in cui si trovano gli altri satelliti del Sole è bene prendere questa distanza (detta Unità Astronomica: simbolo UA) come unità di misura. Una curiosità: la distanza Terra-Luna (384400 km), in Unità Astronomiche, vale 0,0026 UA.

	1	2	3	4	
	Nome	Distanza (in UA)	Raggio equatoriale (in km)	Durata della rotazione a trottola	Durata della rotazione orbitale
1	Mercurio	0,4	2 439	59 giorni	88 giorni
2	Venere	0,7	6 052	243 giorni	224,7 giorni
3	Terra	1,0	6 378,38	23 h 56 min 4 s	365,22 giorni
4	Marte	1,5	3 397,2	24 h 37 min 23 s	687 giorni
Tra Marte e Giove c’è la Fascia degli Asteroidi					
5	Giove	5,2	71 398	9 h 55 min	11,86 anni
6	Saturno	9,5	60 000	10 h 14 min	29,46 anni
7	Urano	19,2	25 600	17 h 14 min	84,01 anni
8	Nettuno	30,1	24 300	15 h 48 min	164,8 anni
9	Plutone	39,4	1 100	6 giorni 9 h 18 min	247,7 anni

Tavola 4

Nella prima colonna della Tavola 4 ci sono le distanze dei nove satelliti del Sole espressi in UA. Nella colonna 2 ci sono i raggi equatoriali in chilometri. Nella colonna 3 c’è la durata della rotazione a trottola espressa in giorni (per Mercurio e Venere) e ore (h) con minuti (min) e secondi (s) per gli altri. Infine nella colonna 4 c’è il tempo

necessario per una rotazione nell’orbita attorno al Sole, espressa in giorni (per Mercurio, Venere, Terra e Marte) e in anni (per gli altri).

Per capire come mai, soltanto adesso, si parla della Fascia degli Asteroidi, quale sorgente dei corpi celesti, le cui traiettorie intersecano sia l’orbita della nostra Terra, sia le orbite degli altri pianeti, bisogna rendersi conto del salto di qualità che i calcoli astronomici hanno fatto, grazie all’avvento dei *supercomputers*. La Fascia degli Asteroidi contiene un numero grandissimo di pianeti. Per ciascuno di questi pianeti non basta conoscere la forma dell’orbita e il suo orientamento. Sono necessari altri dati. In termini specialistici è necessario lavorare nel cosiddetto “spazio dei parametri”. Ogni pianeta-astroide è caratterizzato da un punto in questo spazio. Se esso si trova in posizione “anomala” prima o poi lascerà i suoi compagni di viaggio e finirà, sulla Luna, sulla Terra o su qualsiasi altro oggetto del sistema solare. Oppure si metterà a ruotare attorno al Sole su un’orbita totalmente diversa da quella che aveva nella Fascia degli Asteroidi.

Nessuno può dire quando un certo asteroide lascerà la sua normale traiettoria per diventare un pericoloso proiettile cosmico. È come se, osservando una pentola d’acqua in procinto di bollire, volessimo sapere qual è la molecola che per prima uscirà dalla massa d’acqua. Noi siamo sicuri che, in determinate zone dell’acqua che c’è nella pentola, sono state prodotte condizioni di instabilità. Esse permetteranno all’acqua di bollire e ad alcune molecole (non sappiamo quali) di uscire dalla massa liquida.

3.11 – L’origine dell’instabilità gravitazionale

Le condizioni di instabilità nel sistema solare sono causate dalle interazioni gravitazionali tra tutti i corpi celesti in gioco. Attenzione, se si considera l’attrazione tra due corpi, il sistema è stabile. Ma non esistono due corpi e basta, bensì un enorme numero di corpi celesti.

Lo ripetiamo ancora una volta: le orbite dei corpi celesti, quando si includono nei calcoli tutti gli effetti gravitazionali, con le loro incertezze di misura, escono dal rigore di una esatta prevedibilità. Un asteroide può restare nella sua orbita per centinaia di migliaia di anni. A un certo istante, però, per instabilità gravitazionale, abbandona la sua orbita. E parte verso lo spazio cosmico. È lo stesso fenomeno di instabilità gravitazionale a produrre le comete le cui origini sono alle estreme periferie del Sistema Solare.

Un esempio di sconvolgimento cosmico prodotto da cometa è quanto accadde nel 1908 in Siberia (Sezioni 3.3, 3.5, 3.6 e 3.12). È probabile che sia stata anche una enorme cometa a produrre l’estinzione dei dinosauri (Sezione 3.3).

Comete, Stelle “cadenti”, meteoriti che abbondano nei musei scientifici, crateri della Luna, crateri terrestri, ci dicono che l’instabilità gravitazionale è una proprietà sicura e scontata dei sistemi gravitazionali complessi, come è il sistema planetario solare nel quale siamo nati e viviamo. Per tanti anni l’uomo era stato portato fuori strada anche da alcuni dettagli apparentemente sbagliati. I crateri sono tutti a perpendicolo: invece se li aspettavano con un angolo di incidenza. Non è corretto: debbono essere tutti a perpendicolo. L’angolo di incidenza non c’è più in quanto l’energia è talmente elevata che l’esplosione non può più “ricordare” la direzione di moto del proiettile cosmico. C’era anche la forma dei crateri che non si riusciva a capire, anche se molte cose giuste, dette negli anni Trenta e dimenticate, è stato necessario riscoprirlle negli anni Cinquanta.

Infine, l’osservazione della superficie terrestre dai satelliti, l’uso dei *supercomputers* per i calcoli dell’instabilità gravitazionale e gli studi sulle possibili sorgenti di un falso allarme nucleare, sono le novità determinanti che hanno aperto la

strada nello studio di tutti quei corpi che vagano nello spazio e che vanno messi sotto osservazione rigorosa e non saltuaria. L’instabilità gravitazionale è quindi una proprietà sicura dei sistemi gravitazionali complessi. Con questa instabilità dobbiamo fare i conti per il futuro del pianeta. Si incomincia con piccoli corpi che brucano al contatto con l’atmosfera, e con le Stelle cadenti – spettacolo estivo piacevole e romantico – ma si finisce con effetti tipo scomparsa dei dinosauri, o devastazione della foresta in Siberia, nel 1908.

3.12 – Il Cosmo avrebbe potuto evitare al mondo le due guerre mondiali

Se nel 1908 l’oggetto cosmico di cui abbiamo parlato fosse caduto vicino a qualche capitale europea o nella Foresta Nera, invece che in Siberia? È fuori discussione che sarebbero stati evitati l’olocausto degli Ebrei, le SS, i gulag, il KGB, i milioni di morti e le innumerevoli tragedie della Prima e della Seconda Guerra Mondiale. Dobbiamo arrivare a questo per svegliarci?

Più attentamente si osserva lo spazio, più si scoprono corpi celesti che vagano nel Cosmo. Sarebbe bene realizzare un sistema di difesa in grado di garantire ai posteri un futuro senza questo incubo cosmico. Il pericolo di olocausto nucleare Est-Ovest è superato. Dobbiamo agire in modo che le grandi conquiste della Scienza siano studiate, nelle loro applicazioni tecnologiche, per difendere la vita e la civiltà cercando di capire fino in fondo com’è fatto l’Universo in cui viviamo e le sue origini.

Le impronte di queste origini sono nei raggi cosmici di energia estrema. Impronte legate alla storia del Cosmo di cui riportiamo una sintesi nella prossima Sezione.

3.13 – Le dodici tappe nella breve Storia del Cosmo

- 1) Sappiamo oggi che i confini dell’Universo vanno molto più in là delle più lontane Galassie e quasar. Ce lo dice (punto 12) la Teoria Inflazionistica dell’Universo.
- 2) Questa avventura inizia con la scoperta di Eratostene¹⁹: la circonferenza terrestre è enorme. Qualcosa come 40 mila chilometri: 50 volte la distanza fra due lontanissime città dell’antico Egitto (Alessandria e Assouan).
- 3) Aristarco²⁰ misura i rapporti tra Terra, Luna e Sole. La Terra è tre volte più grande della Luna. Il Sole è qualcosa come 130 volte più grande della Terra ed è molto più in là della Luna.
- 4) Archimede²¹ scopre che la Terra non poggia su alcunché: «Datemi un punto fisso e vi solleverò la Terra».
- 5) Galilei scopre che il cielo non è depositario di alcuna perfezione: è come le pietre. Tutto fa capo a una Logica rigorosa. La perfezione va cercata in questa Logica.
- 6) Galilei cerca disperatamente di misurare la distanza delle Stelle da noi. Non viene fuori alcun “parallasse” quando si osserva la stessa Stella da due punti opposti dell’orbita terrestre. Le Stelle sono molto più lontane di quanto la nostra fantasia fosse riuscita a immaginare fino a Galilei.
- 7) Il Sistema Solare pensato grande fino a Saturno, si arricchisce di altri tre satelliti: Urano, Nettuno e Plutone. Poca cosa in termini di distanze: “ore-luce”.
- 8) Finalmente si riesce a misurare la distanza della Stella più vicina: “anni-luce”.

¹⁹ Eratostene (III secolo a.C.).

²⁰ Aristarco (ca. 310-230 a.C.).

²¹ Archimede (287-212 a.C.).

- 9) Si pensa che la nostra Galassia sia tutto il Cosmo: essa è grande 100 mila anni-luce e spessa 15 mila anni-luce.
- 10) Nel 1929 Hubble²² scopre che di Galassie ce ne sono tante. La più vicina Galassia dista da noi 2 milioni 200 mila anni-luce. Le Galassie si raggruppano e ciascun gruppo si allontana. Non esiste alcun gruppo di Galassie privilegiato. I confini del Cosmo vanno ben oltre i confini della nostra Galassia.
- 11) Misure cosmologiche fanno entrare in gioco miliardi e miliardi di anni-luce.
- 12) L’Universo però ha una proprietà inspiegabile. Guardando in due direzioni opposte, le osservazioni sembrano identiche. Come spiegare questa uniformità? Risposta: l’Universo nasce da un processo inflazionistico. Il che vuol dire che nei primi istanti (decimi di milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo) l’espansione è stata velocissima. Qui finisce l’avventura che ci porta a concludere quanto detto al punto numero 1. Ulteriori approfondimenti di questi temi sono nella [Ref. 6].

Ricordiamo che il “tempo-luce” è la distanza percorsa da un raggio di luce in quell’intervallo di “tempo”. Un “secondo-luce” è 300 mila chilometri: poco meno della distanza Terra-Luna. Un “anno-luce” corrisponde a una distanza pari a poco meno di diecimila miliardi di chilometri.

4 – CONCLUSIONI

I raggi cosmici fanno parte di quelle scoperte che nessuno scienziato aveva saputo prevedere [Ref. 12]. Anzi tra le scoperte di questa che è la classe suprema delle conquiste scientifiche, i raggi cosmici rappresentano l’esempio più ricco di conseguenze. Ecco una sintesi.

- I - I raggi cosmici ci hanno portato a scoprire un autentico nuovo mondo, non come quello di Cristoforo Colombo²³ che è simile al nostro. Il nuovo mondo cui ci hanno portato i raggi cosmici è l’Universo Subnucleare, con le sue leggi e le sue regolarità che nessun fisico (né matematico, né filosofo, né pensatore, né poeta) aveva saputo immaginare.
- II - I raggi cosmici hanno una forte influenza nel clima e nelle caratteristiche vitali di quello strato d’aria spesso dieci chilometri che circonda la Terra e cui diamo il nome di atmosfera. I raggi cosmici hanno un ruolo importante per agire da centri di formazione dei sistemi nuvolosi. Meteorologia e Climatologia non possono ignorare l’esistenza dei raggi cosmici.
- III - I raggi cosmici ci permettono di conoscere le strutture del campo gravitazionale legato alla nostra Galassia. Dal loro studio è possibile risalire al confronto tra le strutture del campo gravitazionale e quelle dei sistemi stellari galattici.
- IV - I raggi cosmici sono tra i candidati più credibili per capire le mutazioni genetiche.
- V - I raggi cosmici sono i messaggeri degli eventi naturali che caratterizzano la formazione delle Stelle, dei loro collassi e delle fenomenologie che continuano a manifestarsi senza che nessuno ne abbia saputo prevedere l’esistenza, come i γ -ray bursts.

²² Edwin Hubble (1889-1953).

²³ Cristoforo Colombo (1451-1506).

- VI - I raggi cosmici e le loro distribuzioni in energia sono portatori di messaggi che vengono dalle più profonde, lontane e recondite zone del Cosmo, a noi legati nonostante i milioni e milioni di anni che ci separano da quelle realtà. Realtà tanto più a noi vicine quanto più grandi sono le energie ad esse associate.
- VII - I raggi cosmici di energie estreme sono uno dei problemi più interessanti sulla struttura dell’Universo in quanto non esistono Supernovae né Stelle pulsanti né Buchi Neri che possano accelerare particelle a energie tanto elevate. Come detto in molte occasioni ciò che noi possiamo osservare sono gli sciami fatti con muoni: l’ultimo stadio. Sarebbe necessario conoscere qual è la natura dei fenomeni che producono questi enormi sciami. Nasce così una nuova frontiera che è stata già discussa a Erice allo scopo di mettere insieme una effettiva collaborazione tra fisici impegnati in settori diversi della Fisica Subnucleare e astrofisici. È infatti necessario studiare tutte le correlazioni possibili tra i segnali che incidono sulla sfera terrestre, qualunque sia la loro natura.

5 — REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

- [1] — A NEW TYPE OF RESISTIVE PLATE CHAMBER: THE MULTIGAP RPC
E. Cerrón Zeballos, I. Crotty, D. Hatzifotiadou, J. Lamas Valverde, S. Neupane, M.C.S. Williams and A. Zichichi
Nucl. Instr. and Meth. A374, 132 (1996).
- [2] — THE MULTIGAP RESISTIVE PLATE CHAMBER AS TIME-OF-FLIGHT DETECTOR
A. Akindinov, F. Anselmo, M. Basile, E. Cerrón Zeballos, L. Cifarelli, F. Cindolo, J. Choi, B. Cozzoni, A. De Caro, S. De Pasquale, D.W. Kim, N.Y. Kim, W. Klempt, A. Kluge, G. Laurenti, S.C. Lee, V. Golovine, D. Hatzifotiadou, A. Martemyanov, P. Martinengo, A. Pesci, E. Platne, J. Roberts, A. Seganti, A. Semak, A. Smirnitski, M. Spegel, P. Szymanski, G. Valenti, D. Vicinanza, M.C.S. Williams and A. Zichi
Nucl. Instr. and Meth. 456, 16 (2000).
- THE MULTIGAP RPC DETECTOR AND THE ALICE TIME-OF-FLIGHT
A. Zichichi
The LAA Project, University of Bologna, INFN and CERN – Report, 15 April 2003.
- AN ULTRA-FAST AMPLIFIER/DISCRIMINATOR TO BE USED IN THE ALICE-TOF ARRAY
A. Zichichi
University of Bologna – Report, 11 June 2003.
- A 20 PS TIMING DEVICE – A MULTIGAP RESISTIVE PLATE CHAMBER WITH 24 GAS GAPS
S. An, Y.K. Jo, J.S. Kim, D. Hatzifotiadou, M.C.S. Williams, A. Zichichi and R. Zuyeuski
Nucl. Instr. and Meth. 594, 1 (2008).
- [3] — QUARK SEARCH AT THE ISR
T. Massam and A. Zichichi
Presented at the ISR Users' Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, 10-11 June 1968.
- SEARCH FOR FRACTIONALLY CHARGED PARTICLES PRODUCED IN PROTON-PROTON COLLISIONS AT THE HIGHEST ISR ENERGY
M. Basile, G. Cara Romeo, L. Cifarelli, P. Giusti, T. Massam, F. Palmonari,

- G. Valenti and A. Zichichi
Il Nuovo Cimento 40A, 41 (1977).
- SEARCH FOR QUARKS IN PROTON-PROTON INTERACTIONS AT $\sqrt{s} = 52.5$ GEV
 M. Basile, G. Cara Romeo, L. Cifarelli, A. Contin, G. D'Alì, P. Giusti, T. Massam, F. Palmonari, G. Sartorelli, G. Valenti and A. Zichichi
Il Nuovo Cimento 45A, 171 (1978).
 - RESULTS OF THE QUARK SEARCH EXPERIMENT IN HIGH-ENERGY NEUTRINO INTERACTIONS
 M. Basile, J. Berbiers, G. Cara Romeo, L. Cifarelli, A. Contin, G. D'Alì, P. Di Cesare, B. Esposito, L. Favale, P. Giusti, I. Laakso, T. Massam, R. Nania, F. Palmonari, F. Rohrbach, V. Rossi, G. Sartorelli, M. Spinetti, G. Susinno, G. Valenti, L. Votano and A. Zichichi
Lettere al Nuovo Cimento 29, 251 (1980).
- [4] — MUON ‘DEPTH-INTENSITY’ RELATION MEASURED BY LVD UNDERGROUND EXPERIMENT AND COSMIC-RAY MUON SPECTRUM AT SEA LEVEL
 The LVD Collaboration
Phys. Rev. D58, 092005 (1998).
- [5] — THE ALICE PHYSICS PERFORMANCE REPORT
 ALICE Collaboration
CERN/LHCC 2003-049, ALICE PPR Volume I, 7 November 2003.
- [6] — IL VERO E IL FALSO
 A. Zichichi
Il Saggiatore, 2003.
- [7] — L’IRRESISTIBILE FASCINO DEL TEMPO
 A. Zichichi
Il Saggiatore, 2000.
- [8] — THE EVOLUTION OF GAUGINO MASSES AND THE SUSY THRESHOLD
 F. Anselmo, L. Cifarelli, A. Peterman and A. Zichichi
Il Nuovo Cimento 105A, 581 (1992).
- THE EFFECTIVE EXPERIMENTAL CONSTRAINTS ON M_{SUSY} AND M_{GUT}
 F. Anselmo, L. Cifarelli, A. Peterman and A. Zichichi
Il Nuovo Cimento 104A, 1817 (1991).
 - THE CONVERGENCE OF THE GAUGE COUPLINGS AT E_{GUT} AND ABOVE: CONSEQUENCES FOR $\alpha_3(M_Z)$ AND SUSY BREAKING
 F. Anselmo, L. Cifarelli, A. Peterman and A. Zichichi
Il Nuovo Cimento 105A, 1025 (1992).
 - THE SIMULTANEOUS EVOLUTION OF MASSES AND COUPLINGS: CONSEQUENCES ON SUPERSYMMETRY SPECTRA AND THRESHOLDS
 F. Anselmo, L. Cifarelli, A. Peterman and A. Zichichi
Il Nuovo Cimento 105A, 1179 (1992).
 - ANALYTIC STUDY OF THE SUPERSYMMETRY-BREAKING SCALE AT TWO LOOPS
 F. Anselmo, L. Cifarelli, A. Peterman and A. Zichichi
Il Nuovo Cimento 105A, 1201 (1992).
 - A STUDY OF THE VARIOUS APPROACHES TO M_{GUT} AND α_{GUT}
 F. Anselmo, L. Cifarelli and A. Zichichi
Il Nuovo Cimento 105A, 1335 (1992).
 - A χ^2 -TEST TO STUDY THE α_1 , α_2 , α_3 CONVERGENCE FOR HIGH-PRECISION LEP DATA, HAVING IN MIND THE SUSY THRESHOLD
 F. Anselmo, L. Cifarelli and A. Zichichi
Il Nuovo Cimento 105A, 1357 (1992).

- [9] — IL SUPERMONDO
A. Zichichi
Lezione Magistrale per conferimento della “Laurea honoris causa” da parte dell’Università di Torino (21 maggio 2004).
- [10] — A STUDY OF THE VARIOUS APPROACHES TO M_{GUT} AND α_{GUT}
F. Anselmo, L. Cifarelli and A. Zichichi
Il Nuovo Cimento 105A, 1335 (1992).
- [11] — SCIENZA ED EMERGENZE PLANETARIE
A. Zichichi
Rizzoli, 1993.
- [12] — TOTALLY UNEXPECTED DISCOVERIES: A PERSONAL EXPERIENCE
A. Zichichi
Plenary Session of the Pontifical Academy of Sciences, “Paths of Discovery”, Casina Pio IV, Città del Vaticano (5-8 November 2004).

6 — DETTAGLI FONDAMENTALI²⁴

6A — PROTOTIPI DI GRANDI RIVELATORI CON MRPC PER MUONI COSMICI

6A.1 — Progettazione di un telescopio con MRPC

L’apparato utilizzato per la rivelazione dei muoni cosmici deve soddisfare le seguenti condizioni:

- i) deve poter coprire una grande superficie e di conseguenza essere a basso costo;
- ii) deve essere resistente, ossia capace di operare per molti anni con un minimo di interventi di manutenzione;
- iii) deve fornire un’efficienza di rivelazione quanto più prossima al 100%;
- iv) deve consentire la ricostruzione di tracce di muoni cosmici ed essere quindi costituito da (almeno) tre piani di rivelazione;
- v) deve possedere una risoluzione spaziale di qualche centimetro (in entrambe le coordinate orizzontali) per la localizzazione in ogni piano di rivelazione del punto di attraversamento di un muone; ciò consentirà l’estrapolazione della traccia ricostruita del muone a parecchi chilometri di quota nell’atmosfera e quindi l’individuazione, per più tracce ricostruite in diversi rivelatori, di un punto comune di produzione degli eventi di energia estrema costituiti da sciami cosmici;
- vi) deve possedere una risoluzione temporale sufficiente per permettere che muoni cosmici rivelati in diversi apparati situati a grande distanza l’uno dall’altro possano essere messi in correlazione l’uno con l’altro tramite un dispositivo GPS (questo implica una risoluzione temporale di alcune decine di nanosecondi) e per garantire inoltre la discriminazione, tramite coincidenze tra almeno tre piani di rivelazione, del fondo accidentale generato da segnali di rumore (ovviamente una risoluzione dell’ordine del nanosecondo è utile a questo scopo).

Dati questi requisiti la camera multigap a piani resistivi (MRPC) risulta essere la soluzione ideale e il Progetto EEE si basa in effetti sulla realizzazione di telescopi per la rivelazione dei muoni cosmici costituiti da tre piani di MRPC (Sezioni 2.2, 2.3, 2.11).

Va osservato che la risoluzione spaziale dell’apparato è fortemente correlata al

²⁴ Il Capitolo 6 è a cura di:

M. Caporaloni, L. Cifarelli, M.C.S. Williams, G. Sartorelli – Università e INFN, Bologna.

suo costo in quanto una migliore risoluzione spaziale può essere essenzialmente ottenuta grazie a una maggiore segmentazione. Tuttavia con una soluzione basata, per esempio, sulla tecnologia dei rivelatori a scintillatore, una maggiore segmentazione implica un maggior numero di fotomoltiplicatori e del lavoro meccanico aggiuntivo per il taglio e la levigatura dello scintillatore. I rivelatori MRPC possono essere maggiormente segmentati semplicemente diminuendo le dimensioni delle *strips* di lettura dei segnali e aumentando il corrispondente numero di canali di elettronica. Ovviamenete ciò implica un costo aggiuntivo ma, a parità di segmentazione, di gran lunga inferiore a quello necessario nel caso dei rivelatori a scintillatore.

6A.2 – Disegno costruttivo di base

Per il disegno costruttivo del rivelatore MRPC, è necessario individuare in primo luogo la sua struttura di base. Questa è costituita da 6 intercapedini (*gaps*) di 350 µm di spessore, riempite di gas, intervallate da piani di materiale resistivo. Nella Figura A.1 è mostrata una sezione del rivelatore proposto. Tale disegno costruttivo è stato effettivamente adottato per la costruzione dei primi prototipi di camere MRPC.

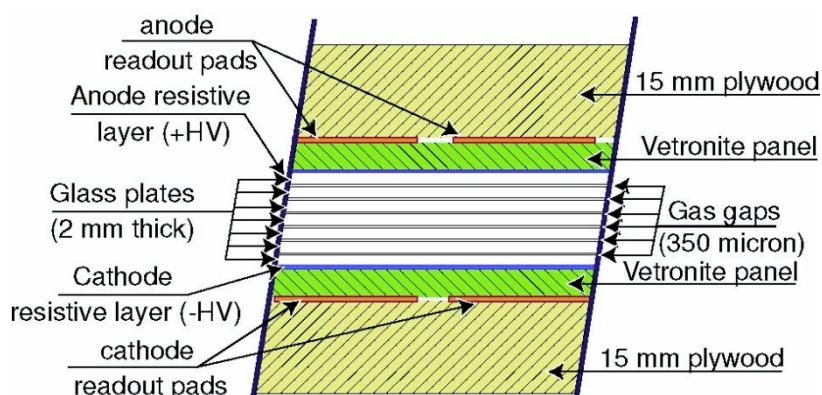


Figura A.1 – Prototipo della camera MRPC per la rivelazione di muoni cosmici.

La dimensione dei *gaps*, 350 µm, è stata scelta per ridurre la possibilità di scariche elettriche nel rivelatore; il numero dei *gaps*, pari a 6, è stato scelto per assicurare un’alta efficienza di rivelazione. Come piani resistivi sono state scelte delle lastre di vetro comunemente usate per le finestre (del tipo *“soda-lime”*). Il loro spessore, 2 mm, è stato scelto per facilitare la costruzione del rivelatore stesso. Piani di vetro troppo sottili sarebbero infatti troppo delicati da maneggiare. Questo aspetto sarà discusso in maggior dettaglio nel seguito. Le dimensioni della scatola che contiene il rivelatore sono di 2 m × 1 m dato che tali dimensioni corrispondono a quelle di pannelli di alluminio facilmente disponibili. Come elemento di supporto è stato utilizzato del legno compensato (*plywood*) dello spessore di 15 mm. In alternativa, si possono utilizzare pannelli di materiale composito a nido d’ape (*honeycomb*). Gli elettrodi di lettura dei segnali, a forma di strisce (*strips*) larghe 25 mm, sono realizzate con un nastro adesivo di rame applicato su un pannello di vetronite dello spessore di 1,5 mm.

La Figura A.2 mostra lo schema delle *strips* di lettura dei segnali e la Figura A.3 mostra una fotografia delle *strips* di lettura di rame applicate al pannello di vetroneite (sullo sfondo sono presenti alcuni membri della squadra di costruzione dei prototipi di MRPC).

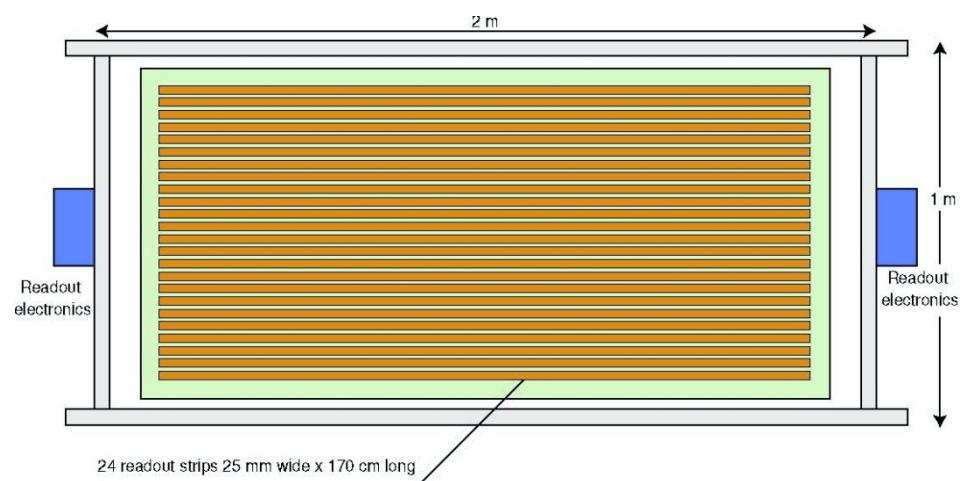


Figura A.2 – Vista dall’alto dello schema del prototipo MRPC.

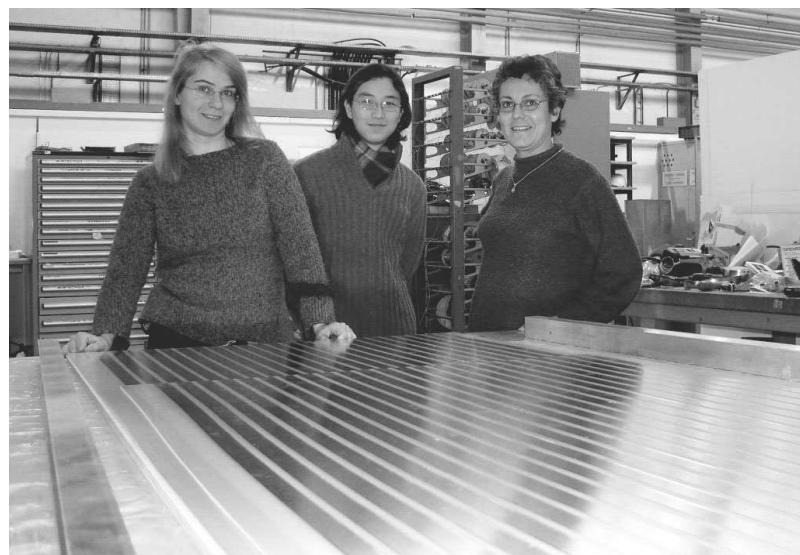


Figura A.3 – Fotografia delle *strips* di lettura del segnale applicate al pannello di vetroneite.

Ognuno dei due pannelli di vetroneite isola le *strips* di lettura dal successivo piano di alta tensione, ossia da un piano di vetro dotato di un apposito rivestimento resistivo al quale è appunto applicata la tensione. Sono presenti *strips* di lettura sia anodiche sia catodiche in maniera tale da creare linee di trasmissione che portano i segnali alle estremità del rivelatore. La differenza temporale tra i segnali che arrivano agli estremi di ogni *strip* determina la coordinata lungo la *strip*.

6A.3 – Alcuni dati costruttivi

Il primo problema riguarda la manipolazione delle lastre di vetro che vengono fornite in opportune scatole di imballaggio (come mostrato nella Figura A.4). Il problema è dunque quello di estrarre dalla scatola per poterle sovrapporre in maniera da realizzare la pila che costituisce la struttura di base del rivelatore MRPC. Tutte le lastre di vetro devono essere inoltre pulite prima del montaggio e alcune di esse rivestite con una speciale pittura resistiva.

Per sollevare le lastre di vetro è stato costruito un semplice sistema ad aspirazione, utilizzando un pannello di *honeycomb* e un aspirapolvere (Figura A.5). Il dispositivo permette di maneggiare con una certa semplicità i piani di vetro e di costruire i rivelatori con minimi rischi di rottura. Grazie alla facilitazione che tale procedura consente, per il futuro potranno essere utilizzate lastre di vetro più sottili, di 1 mm di spessore; ciò permetterà di ridurre il peso del rivelatore di circa 25 kg e di aumentare l'ampiezza del segnale di circa il 50%.

Lo spaziatore tra i piani di vetro utilizzato è del filo da pesca in nylon, di 0,35 mm di diametro, fissato, secondo uno schema a zig-zag con un passo di 5 cm tra un *gap* e l'altro, attorno a viti collocate lungo i bordi longitudinali dei piani di vetro (Figura A.6).



Figura A.4 – Fotografia delle lastre di vetro nella loro scatola d’imballaggio.



Figura A.5 – Fotografia del sistema di sollevamento ad aspirazione per le lastre di vetro.

Uno strato resistivo è applicato alla superficie interna dei piani di vetro estremi della pila (che costituiscono i cosiddetti piani di alta tensione) usando un particolare prodotto noto con il nome di Licron. Questo è essenzialmente una mistura di biossido di stagno e acetato etilico. Il Licron si asciuga sino a divenire duro ma può comunque essere raschiato via dal vetro; quindi, per fissarlo, viene applicato un secondo rivestimento di poliuretano; il risultato è uno strato resistivo, ben aderente al vetro, di resistività superficiale pari a circa $10 \text{ M}\Omega/\text{quadrato}$.



Figura A.6 – Fotografia delle viti poste lungo i bordi della camera: il filo da pesca usato come spaziatore tra un piano di vetro e l'altro è fissato, secondo uno schema a zig-zag con un passo di 5 cm, attorno alle viti.

Come già detto e mostrato nella Figura A.1, vi sono *strips* anodiche e *strips* catodiche. Un cavo *twisted pair* (ossia fatto da un doppietto di cavi intrecciati) è saldato alle *strips*; pertanto un segnale differenziale è trasmesso dal rivelatore MRPC a un circuito stampato (*printed circuit board*, PCB) montato a ogni estremità.

La lettura del segnale è fatta a entrambi gli estremi di ogni *strip* in modo da poter misurare la differenza dei tempi di arrivo del segnale alle due estremità e determinare così la posizione lungo la *strip* della particella che ha attraversato il rivelatore.

Nel primo prototipo costruito sono stati montati dei connettori per i cavi di alimentazione dell’alta tensione. Il fatto di usare cavi di alimentazione a 10 kV potrebbe costituire un problema di sicurezza. Durante i test dei successivi prototipi sono stati provati degli alimentatori/convertitori di tensione DC-DC molto compatti, dunque alloggiabili all’interno del volume del gas. La fotografia di uno di questi convertitori è mostrata nella Figura A.7.

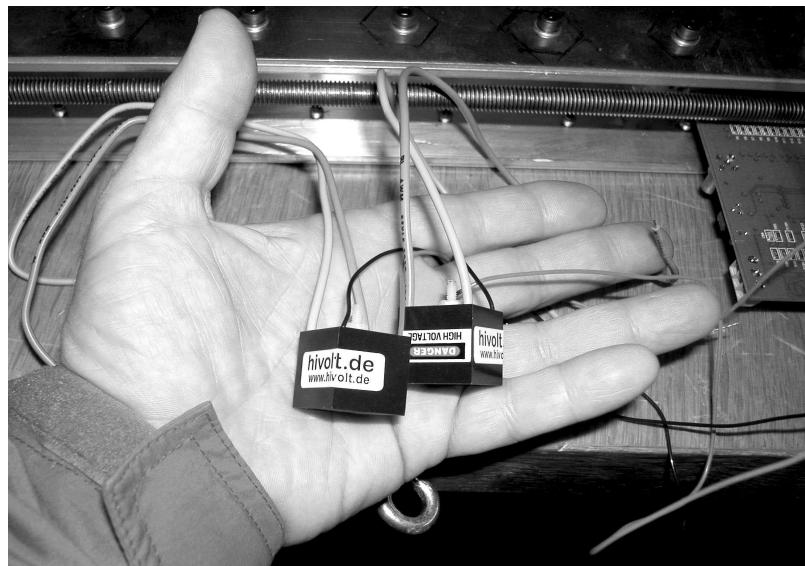


Figura A.7 – Fotografia degli alimentatori/convertitori DC-DC da 10 kV alloggiabili all’interno del volume di gas.

Si noti che il prototipo illustrato è stato costruito senza l’aiuto di ingegneri o tecnici, utilizzando strumenti e utensili comuni. Ovviamente, dopo l’esperienza acquisita nella costruzione del primo prototipo, la procedura di assemblaggio potrà essere ulteriormente migliorata e ottimizzata.

6A.4 – Primi test del rivelatore MRPC

Come primo test, la camera MRPC è stata sistemata su un tavolo. Due contatori a scintillatore sono stati montati, uno sopra e l’altro sotto la camera, per poter definire un segnale (*trigger*) di muoni cosmici attraverso di essa. Una fotografia dell’allestimento

(*set-up*) sperimentale è mostrata nella Figura A.8.

Il gas utilizzato per il riempimento della camera è una miscela di $C_2F_4H_2$ (93%) e SF_6 (7%); questa è la miscela standard utilizzata nei rivelatori MRPC costruiti per il grande apparato di misura dei tempi di volo (*Time-Of-Flight*, TOF) delle particelle per il futuro esperimento ALICE a LHC (Sezioni 2.2 e 2.12).

La scheda elettronica visibile nella Figura A.8 (*electronics*) è la scheda a 24 canali basata sul *chip* NINO ASIC, anch'esso sviluppato per il sistema TOF di ALICE.

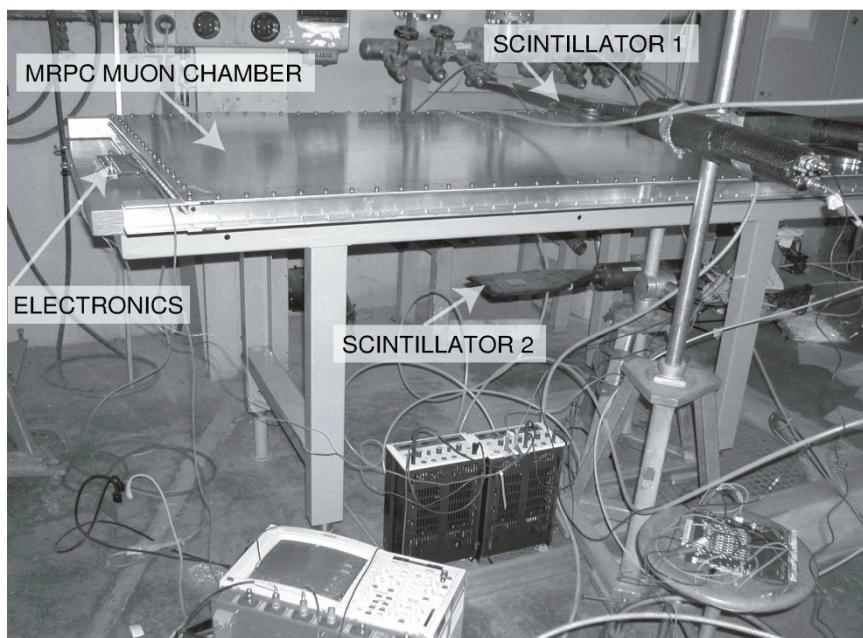


Figura A.8 – Fotografia del *set-up* sperimentale usato per studiare le prestazioni del primo prototipo di camera MRPC tramite muoni cosmici, nella quale sono visibili i contatori a scintillazione (*scintillator 1*, *scintillator 2*) che segnalano il passaggio dei muoni attraverso la camera.

L'efficienza di rivelazione e la corrente oscura (*dark current*) della camera sono mostrate nella Figura A.9, in funzione dell'alta tensione applicata.

Il fatto che la *dark current* (che misura il rumore elettronico di fondo del rivelatore, quando esso non è attraversato da alcuna particella) sia bassa è molto soddisfacente; lo stesso livello di $0,2 \mu\text{A}/\text{m}^2$ (ossia $2 \times 10^{-7} \text{ A}/\text{m}^2$) può essere facilmente mantenuto anche con l'impiego degli alimentatori mostrati nella Figura A.7.

Come appare chiaramente nella Figura A.9, a valori della tensione di $\pm 10,25 \text{ kV}$ la corrente oscura comincia a crescere sensibilmente mentre l'efficienza diminuisce leggermente: questo è l'inizio della produzione di scariche. La diminuzione dell'efficienza è motivo di attenzione e sarà ulteriormente studiata.

Anche il contributo al rumore generato dagli alimentatori di alta tensione (che impedisce di regolare al minimo le soglie per il riconoscimento dei segnali prodotti dalle particelle, a scapito dell'efficienza) sarà soggetto a ulteriori indagini.

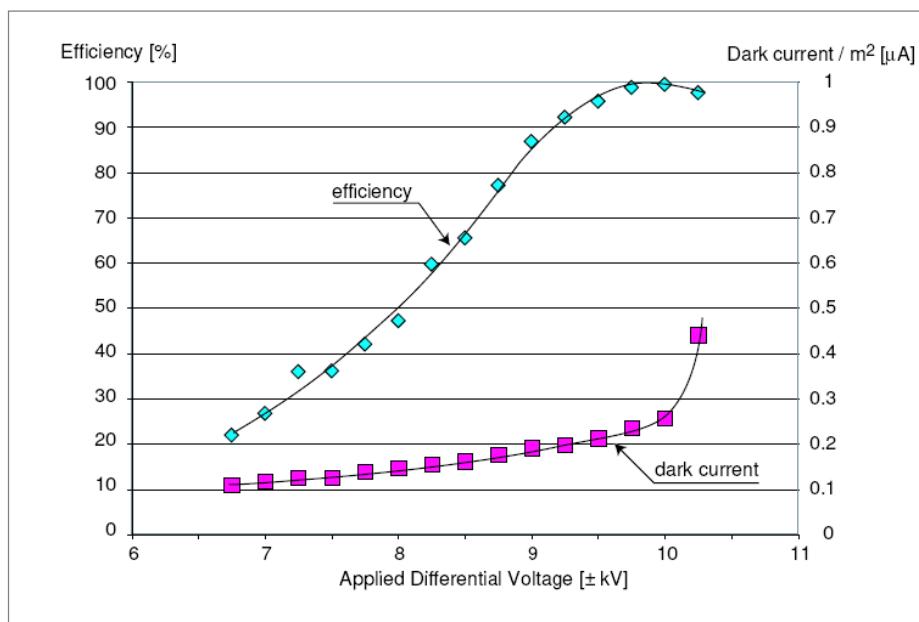


Figura A.9 – Grafico dell’efficienza di rivelazione e della *dark current* in funzione della tensione applicata.

Occorre notare che una camera costruita con vetri più sottili (si veda la precedente Sezione 6A.3) genererà segnali maggiori e quindi il “ginocchio” che segna l’inizio del *plateau* di efficienza di rivelazione (la regione in cui l’efficienza si stabilizza al suo livello massimo) sarà a voltaggi inferiori. Nella miscela di gas utilizzata, per lo più costituita da freon ecologico (denominato Suva), una minore percentuale di SF₆ permetterà inoltre di abbassare il ginocchio di circa 1 kV.

6B — SINCRONIZZAZIONE DI SISTEMI DI MISURA REMOTI ATTRAVERSO IL SISTEMA GPS

6B.1 – Il Sistema di Posizionamento Globale: GPS (*Global Positioning System*)

Il Sistema di Posizionamento Globale (GPS) è un sistema di navigazione adatto a fornire in tempo reale le coordinate geografiche (latitudine, longitudine e altitudine) del ricevitore di un utente. Dalla sequenza temporale di tali misure, il GPS può dare anche informazioni sulla velocità e sul percorso del ricevitore. Infine, se l’utente rimane fermo in una determinata posizione, il GPS può ottenere informazioni molto precise sulla sincronizzazione della scala temporale del ricevitore (tempo locale) rispetto all’UTC (*Universal Coordinated Time*, ossia Tempo Coordinato Universale) che oggi è il sistema di riferimento per la misura del tempo accettato in tutto il mondo.

Il GPS fu introdotto ed è tuttora controllato dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti (DOD, *Department of Defense*): è infatti un sistema militare parzialmente utilizzabile per scopi civili, che oggi comprende molte migliaia di utenti sparsi su tutto il globo.

Il cosiddetto *Space Segment* (segmento spaziale) del GPS è costituito da una costellazione di più di 24 satelliti, disposti su 6 piani orbitali inclinati di 55° rispetto all'equatore. Le loro orbite sono circolari, con un'altezza di 20 183 km e con un periodo di 12 ore. Da quasi ogni punto della Terra e a qualsiasi istante, almeno 5 satelliti sono visibili sopra l'orizzonte. Per gli scopi di posizionamento, ogni satellite trasmette due onde radio portanti (L1 a 1 575,42 MHz e L2 a 1 227,6 MHz), modulate da due codici pseudo-casuali, il codice C/A (*coarse-acquisition*, ossia acquisizione grossolana) e il codice P (preciso), e da un messaggio di navigazione. I satelliti trasportano orologi atomici (al cesio o al rubidio, la cui stabilità è tipicamente di circa 1 o 2 parti su 10^{13} nel periodo di un giorno) che forniscono un riferimento temporale preciso e accurato per i segnali radio, trasmessi verso il ricevitore a terra.

Cinque stazioni di controllo a terra (il cosiddetto *Control Segment*), distribuite in longitudine sul globo terrestre, controllano continuamente lo stato di funzionamento dei satelliti, registrando le loro anomalie orbitali e le derive temporali di ognuno degli orologi atomici in orbita. La principale stazione di controllo (*Master Control Station*), situata a Colorado Springs, raccoglie i dati forniti dalle varie stazioni e, utilizzando sofisticati modelli *software* (ossia realizzati con programmi al calcolatore) predice le future correzioni che ogni satellite trasmetterà nel suo messaggio di navigazione. Tali parametri consentono agli utenti di rimuovere in tempo reale tutte le cause di errore e di mantenere quindi l'orologio del proprio sistema strettamente sincronizzato con l'UTC.

Infine il ricevitore GPS (il cosiddetto *User Segment*, ossia il segmento dell'utente) segue, tramite un solo o entrambi i codici (o anche tramite le fasi elettriche dei segnali portanti, nella sequenza necessaria per ottenere la maggiore precisione), tutti i satelliti visibili contemporaneamente. Per tale ragione l'antenna del ricevitore deve possedere un'ottima sensibilità omni-direzionale, in modo da garantire una risposta uniforme relativamente all'intera volta celeste.

Fondamentalmente, il ricevitore a terra misura il ritardo tra il tempo t_1 in cui un segnale è trasmesso da un satellite e il tempo t_2 in cui è rilevato dall'antenna ricevente. L'*hardware* (ossia l'insieme dei circuiti elettronici) del ricevitore genera una copia locale del codice trasmesso dal satellite, quindi lo trasla temporalmente finché le due sequenze digitali non si sovrappongono esattamente (il *software* cerca il ritardo temporale che massimizza la funzione di correlazione incrociata dei due codici). L'intervallo di tempo ($t_2 - t_1$) moltiplicato per la velocità di propagazione delle onde radio nell'atmosfera, che è prossima alla velocità della luce c , fornisce la distanza tra ogni satellite e l'antenna del ricevitore a terra.

Questa valutazione è corretta solo nel caso in cui l'orologio dell'utente sia sincronizzato con il tempo del GPS. Per ottenere tale risultato l'utente non necessita di un orologio atomico. L'errore di sincronizzazione del suo orologio può, infatti, essere semplicemente incluso come un'ulteriore quantità incognita nella soluzione della navigazione. Se, per esempio, l'utente volesse ottenere una soluzione tridimensionale (quindi latitudine, longitudine e altitudine), dovrebbe misurare i ritardi da almeno quattro satelliti.

Quando il ricevitore GPS è riuscito a seguire un numero sufficiente di satelliti per fornire la soluzione tridimensionale, l'orologio dell'utente è automaticamente sincronizzato con il tempo del GPS. Esistono speciali ricevitori dedicati a tale scopo che possono implementare questa funzione con estrema accuratezza, prendendo in considerazione anche ritardi interni, ecc.

L'accuratezza di localizzazione da parte del GPS può variare da alcuni centimetri fino a decine di metri in relazione a diversi fattori. I più importanti sono: il tipo di codici utilizzati, la reale distribuzione geometrica dei satelliti nel cielo al momento della

misura, le incertezze nelle orbite reali, le eccessive variazioni dei ritardi dovute a effetti della ionosfera e della troposfera, la qualità del sistema di ricezione e il livello di raffinatezza dell’analisi dei dati.

6B.2 – Il GPS e le misure di tempo

L’utilizzo del GPS permette, al giorno d’oggi, a basso costo, ciò che era semplicemente impensabile fino a pochi anni fa: avere accesso, dal proprio laboratorio, alla stabilità di un insieme di orologi atomici. In effetti, attraverso un’opportuna scelta del ricevitore GPS, chiunque, in ogni luogo, può non solo ottenere, in tempo reale, la conoscenza delle proprie coordinate geografiche, come latitudine e longitudine, ma anche ricevere un particolare segnale ogni secondo, il cosiddetto *one peak per second* (1PPS). Se l’antenna ricevente è mantenuta in una posizione fissa, come in un laboratorio, il segnale 1PPS può essere utilizzato come sistema di riferimento per il tempo.

I moderni ricevitori destinati ad applicazioni per la misura del tempo possono prendere in considerazione quasi tutte le cause di ritardo del sistema, in maniera tale che il segnale 1PPS sia sincronizzato entro 100 ns (nanosecondi), o addirittura meno, con il tempo UTC²⁵, e reso disponibile localmente.

Il risultato finale è che tutti gli eventi locali, correttamente riferiti a quell’impulso GPS in ogni sito, possono essere strettamente riferiti al tempo UTC. La scala di tempo locale che può essere derivata da un moderno ricevitore GPS fornisce un’accuratezza in precedenza irraggiungibile. Il segnale 1PPS, fornito dai ricevitori GPS, è in assoluto il migliore standard disponibile per lunghi tempi d’integrazione.

Il livello di accuratezza trasferibile all’orologio interno di un PC (*personal computer*) dipende principalmente dai limiti del suo sistema operativo; per esempio Windows non può rispondere in meno di alcuni millisecondi; utilizzando Linux (e modificando il Kernel standard) si può invece ottenere una migliore connessione all’UTC, con un livello di accuratezza inferiore anche al microsecondo.

6B.3 – L’uso del GPS per la sincronizzazione remota di eventi EEE registrati su PC

In molte applicazioni moderne è importante una buona sincronizzazione degli orologi interni di calcolatori molto distanti l’uno dall’altro. Ad esempio, mentre un utente della rete Internet può essere interessato a sapere l’esatto tempo di invio dei messaggi (*e-mails*) che riceve da varie parti del mondo o l’esattezza dell’orologio interno del proprio PC, al giorno d’oggi molti controlli di processo (si pensi alla distribuzione dell’energia elettrica) devono seguire sequenze temporali molto precise che avvengono in siti molto remoti.

L’accuratezza richiesta nella procedura di sincronizzazione può variare dai secondi, per applicazioni umane, fino ai microsecondi o anche meno, per dispositivi,

²⁵ Così com’è strutturato, il GPS è necessario solo per mantenere la stabilità di frequenza dei suoi standard, ossia delle sue frequenze atomiche di riferimento. D’altra parte, per ragioni pratiche, il tempo UTC deve rimanere prossimo alla scala astronomica dei tempi, la scala UT1. Il tempo interno al GPS ignora i salti di secondo che sono invece inseriti di tanto in tanto nella scala UTC, per seguire la lenta deriva del tempo UT1, ma senza conseguenze sull’uniformità (stabilità di frequenza) del tempo atomico. L’utente può facilmente correggere tale effetto aggiungendo l’opportuno numero intero di salti di secondo, come prescritto nel messaggio di navigazione del GPS.

macchinari o per acquisizioni di dati specifiche nel campo della ricerca scientifica. È in questo ultimo contesto che si colloca l'esperimento EEE, che – come abbiamo visto – consiste nel rivelare eventi di raggi cosmici, di energia estremamente elevata, tramite dei telescopi costituiti da rivelatori MRPC, posti in località diverse.

I dati dei telescopi, una volta raccolti e digitizzati, vengono inviati a dei semplici PC per la registrazione. È di grande importanza poter analizzare i dati di telescopi distanti tra loro centinaia di metri o chilometri per rivelare eventuali coincidenze temporali tra raggi cosmici che apparterrebbero a un unico sciam. Più la coincidenza in tempo è stringente, minore è il numero di coincidenze accidentali e di conseguenza più forte l'evidenza di aver rivelato uno sciam di grande estensione e perciò di grande energia (si veda a tale proposito la Sezione 6C).

Poiché per ogni telescopio la registrazione dei dati avviene su un PC diverso e poiché i vari PC sono distanti e comunicano solo attraverso la rete, la sincronizzazione degli orologi interni dei PC potrebbe essere fatta attraverso la rete stessa. Tuttavia non risulterebbe sufficientemente accurata. Per questa ragione l'esperimento EEE prevede l'uso di una stazione GPS locale per ogni telescopio che assicura due vantaggi fondamentali:

- i) l'accuratezza temporale necessaria per il successo dell'esperimento EEE;
- ii) l'accuratezza spaziale nel posizionamento relativo dei diversi telescopi uno rispetto all'altro e dunque la possibilità di ricostruire con precisione la direzione di provenienza dei raggi cosmici in un sistema di coordinate omogeneo.

Inoltre l'esperimento EEE risulta così dotato dello stesso strumento usato anche in altri esperimenti di Astrofisica e Fisica Cosmica e di conseguenza, grazie alle sue prestazioni in precisione temporale e spaziale, gli eventi di sciami cosmici che è in grado di rivelare potranno essere messi in correlazione con quelli di altri Osservatori sparsi per il mondo, ad esempio in Italia nei laboratori sotterranei del Gran Sasso.

6B.4 – Referenze bibliografiche

Ci sono molti libri di testo e pubblicazioni scientifiche che trattano della tecnica del GPS. Gli insegnanti possono essere interessati ai due siti web indicati nel seguito. Essi sono ricchi di immagini adatti anche per fare presentazioni orali agli studenti:

- 1) http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html
- 2) http://extnasa.usu.edu/on_target/gps_tutorial/gps_one_webpage.html

La pubblicazione che segue contiene un'analisi critica delle diverse sorgenti di errore nelle misure fatte con GPS:

- THE GPS ERROR BUSINESS
R.B. Langley
GPS World, March 1997, p. 51-56.

Le tre pubblicazioni che seguono riportano l'esperienza maturata dagli autori nell'uso del GPS per misure di tempo in laboratori didattici universitari:

- GPS AND TIMING: DIDACTIC APPLICATIONS ON HOW TO CHOOSE THE BEST CLOCK
M. Caporaloni and R. Ambrosini
The European Journal of Physics 20, 243 (1999).
- TIME SYNCHRONIZATION MEASUREMENTS WITH A COMBINATION OF A GPS RECEIVER AND THE INTERNET
M. Caporaloni and R. Ambrosini
The European Journal of Physics 22, 351 (2001).

- HOW CLOSELY CAN A PERSONAL COMPUTER CLOCK TRACK THE UTC TIMESCALE VIA THE INTERNET?

M. Caporaloni and R. Ambrosini

*The European Journal of Physics 23, L17 (2002)
(also available at stacks.iop.org/EJP/23/L17).*

6C – SCIAMI DI RAGGI COSMICI E LORO RIVELAZIONE: RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

In questa Sezione si presentano alcuni calcoli e simulazioni numeriche riguardanti gli sciami estesi indotti da raggi cosmici primari e le prestazioni di base dell'apparato sperimentale previsto per la loro rivelazione. Tale apparato sarà costituito da un insieme di telescopi posti a grande distanza l'uno dall'altro.

La Figura C.1 illustra cosa si intende per sciame cosmico. Uno sciame cosmico esteso è indotto dall'interazione nell'alta atmosfera di un protone (o nucleo) primario di grande energia, proveniente dalle zone più remote dello spazio. Dall'interazione emergono nuove particelle che interagiscono a loro volta o decadono in altre particelle. Si innesca così un processo a catena il cui risultato finale è uno sciame.

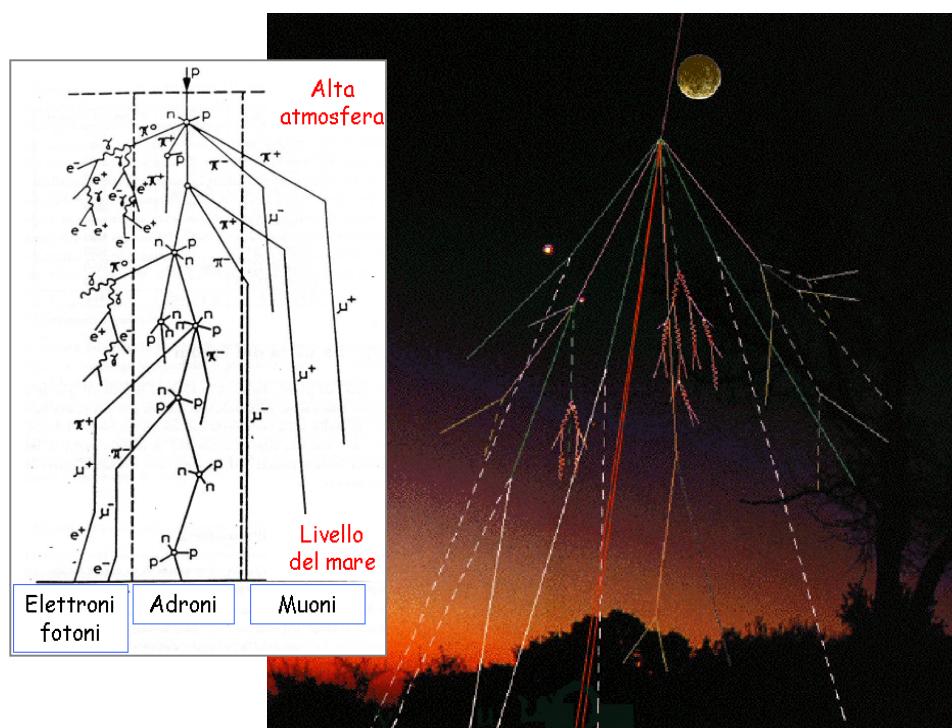


Figura C.1 – Immagini schematica (sinistra) e pittorica (destra) di uno sciame esteso di particelle indotto dalla interazione di un raggio cosmico primario con un nucleo dell'atmosfera terrestre.

Al livello del suolo, lo sciame è sostanzialmente fatto di:

- adroni (che possono dar luogo a interazioni forti, deboli o elettromagnetiche), tra i quali troviamo i nucleoni, ossia i barioni stabili (protoni) o con lunghissima vita media (neutroni), nonché alcune altre particelle non stabili ma non ancora decadute perché prodotte in prossimità del suolo, come i mesoni π e K ;
- elettroni e fotoni, anch'essi stabili (che possono interagire elettromagneticamente o anche, nel caso dei soli elettroni, debolmente);
- muoni, simili agli elettroni ma più massivi e penetranti, non stabili ma con vita media sufficientemente lunga, che derivano per lo più dai decadimenti dei mesoni π e K ;
- neutrini, particelle stabili prive di carica elettrica, capaci di interagire solo debolmente, che sono le particelle più penetranti finora conosciute.

Sono proprio i muoni a costituire la componente più importante tra le particelle dotate di carica elettrica presenti nello sciame al livello del suolo. La rivelazione di questi muoni cosmici, che trasportano un'essenziale informazione sulla configurazione dello sciame (apertura angolare, molteplicità, energia, punto di produzione) costituisce l'obiettivo dell'esperimento EEE.

6C.1 – Caratteristiche dei muoni al livello del mare

Come abbiamo visto, i muoni sono i prodotti del decadimento dei mesoni carichi π e K , generati dall'interazione dei raggi cosmici primari (in grande maggioranza protoni) con i nuclei dell'atmosfera terrestre. Le energie dei primari possono raggiungere valori molto elevati, pari anche a 10^{20} eV e il numero di muoni che raggiungono il livello del mare è, mediamente, tanto maggiore quanto più elevata è l'energia del raggio cosmico che ha indotto lo sciame.

Nella Figura C.2 è definito l'asse dello sciame. Si assume che la direzione di incidenza del protone primario, dunque dell'asse dello sciame prodotto, coincida con la verticale passante per il centro dello sciame. Se tale asse forma invece un angolo con la verticale, l'impronta dello sciame al suolo non sarà più circolare bensì ellittica.

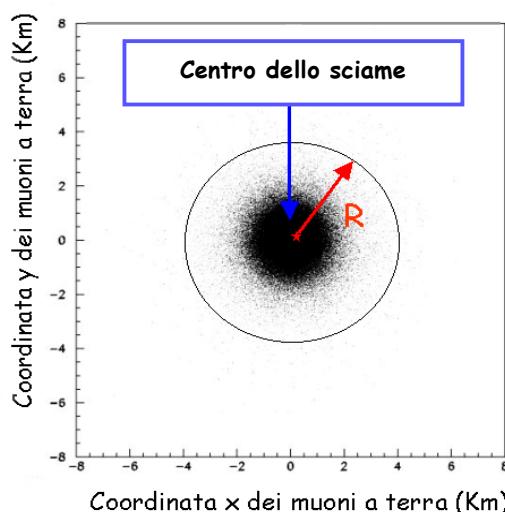


Figura C.2 – “Impronta” di uno sciame sul terreno, con la definizione del centro dello sciame e della distanza (R) dal centro dello sciame.

Nella Figura C.3 troviamo la distribuzione del numero di muoni per metro quadrato al livello del mare, mediata su più sciami, in funzione della distanza dal centro dello sciame stesso, definito nella Figura C.2.

In base alla Figura C.3, si vede che è possibile trovare muoni anche a distanze molto elevate dal centro dello sciame. Le distanze a cui i muoni possono giungere aumentano all'aumentare dell'energia del primario, così come aumenta il numero medio di muoni che compongono lo sciame. Questo numero cresce rapidamente con l'energia del protone primario: vale circa 10^6 a 10^{17} eV, e 10^7 a 10^{18} eV.

I muoni, che sono prodotti a un'altezza media di circa 15 km in atmosfera, sono le particelle cariche più abbondanti al livello del mare. A tale livello l'intensità (detta anche flusso) di muoni con energia maggiore di 200 MeV, ossia il loro numero per unità di tempo, di superficie e di angolo solido, è circa $85 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.

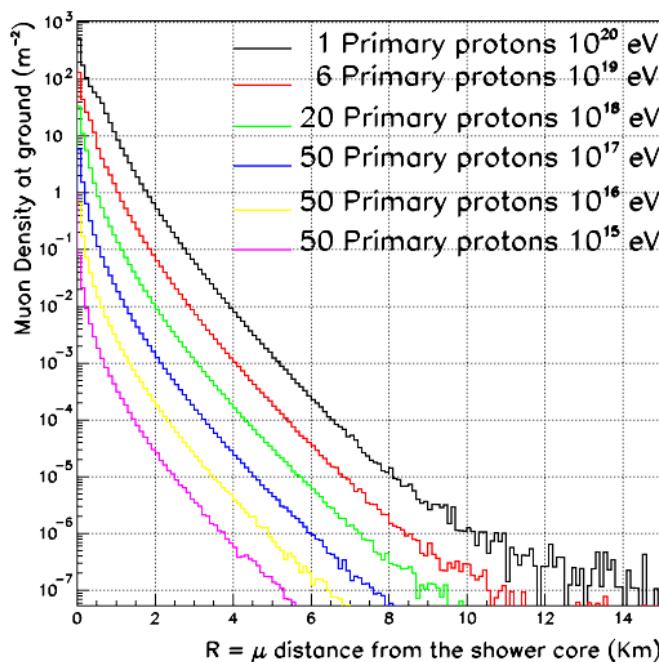


Figura C.3 – Distribuzione laterale del numero di muoni per unità di area al livello del mare, in funzione della distanza dal centro dello sciame, per sciami indotti da protoni primari di diverse energie.

6C.2 – Simulazione del rivelatore e delle sue prestazioni

È stato sviluppato al calcolatore un programma di simulazione che comprende una parte relativa alla generazione dei muoni cosmici e una parte relativa alla descrizione dell'apparato sperimentale e delle sue prestazioni.

L'apparato, illustrato nella Figura C.4, è il telescopio EEE costituito da tre piani sensibili di rivelatori MRPC, di dimensione $160 \times 82 \text{ cm}^2$, distanti (in verticale) un metro l'uno dall'altro. Il sistema di riferimento utilizzato compare nella Figura C.5.

Per valutare l'accettanza geometrica del rivelatore, e quindi la sua possibilità di ricostruire delle tracce, sono stati generati 10^7 muoni con una distribuzione angolare uniforme su tutto l'angolo solido attorno all'apparato, ossia nell'emisfero superiore definito da $0 < \phi < 360^\circ$ e $0 < \cos(\theta) < 1$. Si ricorda che l'elemento di angolo solido è definito da $d\Omega = \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\phi = d(\cos(\theta)) \cdot d\phi$. Pertanto la generazione è stata effettuata a partire da distribuzioni uniformi in ϕ e in $\cos(\theta)$.

Una volta generata la direzione del muone incidente, il suo punto d'impatto sul telescopio è scelto in modo uniforme entro un disco ortogonale a tale direzione, centrato nel baricentro del telescopio, di raggio $R = 135 \text{ cm}$ pari alla dimensione trasversale massima del telescopio a partire dal suo baricentro (con riferimento alla Figura C.4, R corrisponde alla distanza tra il centro del rettangolo mediano e uno qualsiasi dei quattro vertici del rettangolo superiore o inferiore). Per ogni traccia rettilinea di muone, definita da una coppia di angoli (θ e ϕ) e da un punto di impatto sul telescopio, possono quindi essere geometricamente individuati i punti di intersezione con i piani MRPC del telescopio. Sono state considerate come “ricostruite” quelle tracce che attraversano tutti e tre i piani di MRPC.

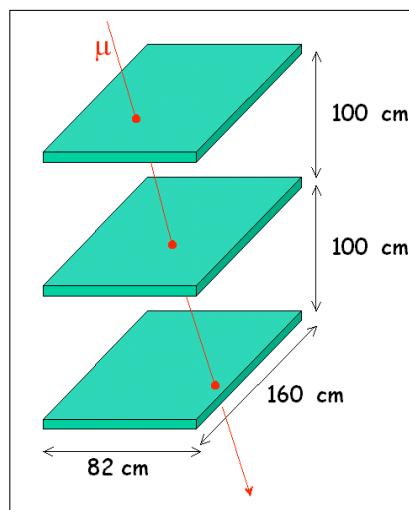


Figura C.4 – Schema del telescopio EEE formato da tre piani di rivelatori MRPC.

L'accettanza è definita, in ogni intervallo (*bin*) angolare, come il rapporto fra il numero di muoni ricostruiti (N_{REC}) e il numero di quelli generati (N_{GEN}) diviso per la superficie del disco ortogonale su cui giacciono i punti d'impatto ($S = 5,68 \text{ m}^2$) e per l'angolo solido corrispondente all'intervallo angolare considerato ($d\Omega$):

$$A = \frac{N_{REC}}{N_{GEN}/(S \cdot d\Omega)}$$

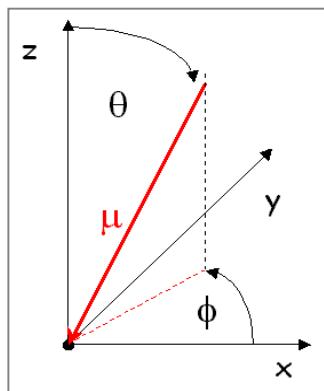


Figura C.5 – Descrizione del sistema di riferimento utilizzato, con la definizione degli angoli zenitale (θ) rispetto all'asse verticale z e azimutale (ϕ) nel piano orizzontale xy per una traccia di muone (μ) incidente.

La distribuzione dell'accettanza del rivelatore al variare della direzione di arrivo dei muoni è mostrata nella Figura C.6, in funzione di $\cos(\theta)$ e di ϕ . Il valore totale dell'accettanza, sommato su tutti i bins angolari, è $A_{tot} = 0,34 \text{ m}^2 \text{ sr}$.

In realtà la distribuzione angolare dei muoni cosmici al livello del mare è uniforme nell'angolo azimutale ϕ ma è proporzionale a $\cos^2(\theta)$, dove θ è l'angolo zenitale, misurato a partire dalla direzione verticale. Quindi, per calcolare il *rate* (numero nell'unità di tempo) atteso di muoni ricostruiti nel telescopio, sono state nuovamente generate 10^7 tracce muoniche con tali distribuzioni angolari ed è stato ottenuto un *rate* integrale di muoni ricostruiti $Rate_\mu \approx 36 \text{ Hz}$. Le distribuzioni nel coseno dell'angolo zenitale delle tracce generate e ricostruite sono mostrate nella Figura C.7.

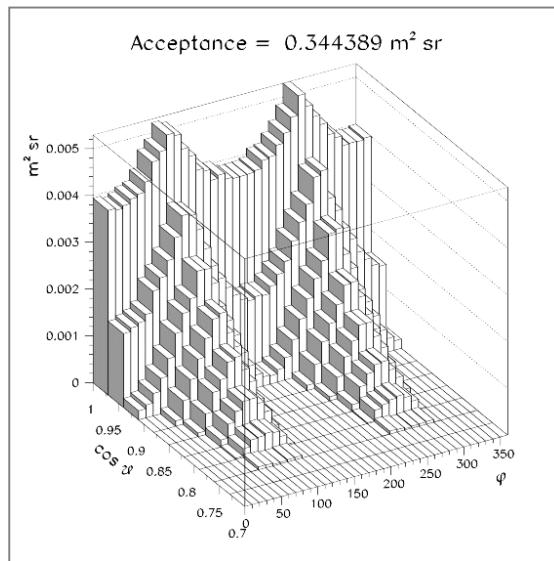


Figura C.6 – Accettanza differenziale del telescopio in funzione della direzione d'arrivo delle tracce.

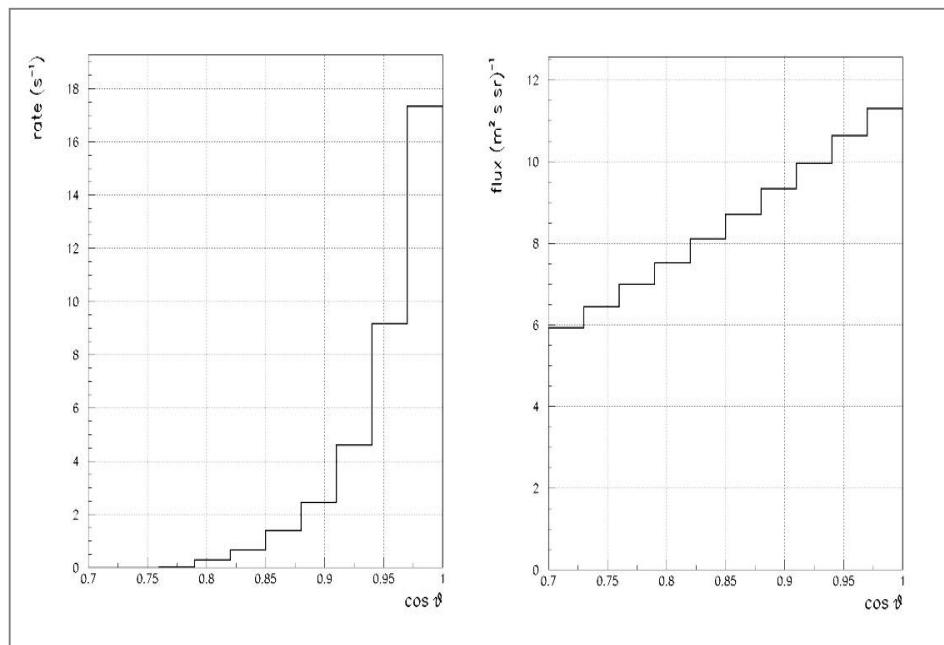


Figura C.7 – Flusso di muoni generati sul telescopio con distribuzione proporzionale a $\cos^2(\theta)$ (sinistra) e rate di muoni ricostruiti nel telescopio (destra), in funzione di $\cos(\theta)$.

6C.3 – Risoluzione angolare nella ricostruzione della direzione del muone

Il passaggio di una particella carica attraverso ogni piano di MRPC è individuato tramite un segnale elettrico indotto sugli elettrodi a strisce (*strips*) di lettura. Le *strips* sono lunghe 160 cm e larghe 25 mm; il loro passo da centro a centro è di 34 mm. Il punto di attraversamento lungo la *strip* è stimato tramite la registrazione dei tempi di arrivo alle due estremità della *strip* su cui si è generato il segnale. Con tale metodo si stima una incertezza nella coordinata longitudinale del punto d’impatto del muone di circa 10 mm. Nella coordinata trasversale l’incertezza è data dal passo delle *strips*. Nel caso in cui due *strips* vicine diano segnale, come può avvenire al passaggio di un muone tra due *strips* o al bordo di una delle due, tale incertezza risulterebbe ridotta di un fattore $\sqrt{2}$ poiché il punto d’impatto sarebbe calcolabile come punto medio tra i centri delle due *strips*.

Per ricavare la risoluzione angolare nella ricostruzione della direzione delle tracce incidenti, sono state registrate le *strips* colpiti sui tre piani MRPC dai muoni cosmici generati attraverso il telescopio. Per la coordinata longitudinale in ogni piano è stata applicato uno sparpagliamento attorno al punto di passaggio della traccia, secondo una distribuzione gaussiana con deviazione standard pari a 10 mm, mentre per la coordinata trasversale è stato assunto uno sparpagliamento uniforme su 34 mm.

Quindi, col metodo della regressione lineare, è stata ricostruita la direzione della traccia nello spazio, descritta dagli angoli zenitale e azimutale.

La differenza fra gli angoli generati e ricostruiti è mostrata nella Figura C.8. Come si vede, le deviazioni standard, ossia i valori RMS (*root mean square*) nella Figura C.8, sono inferiori a 1° in θ e a 2° in ϕ .

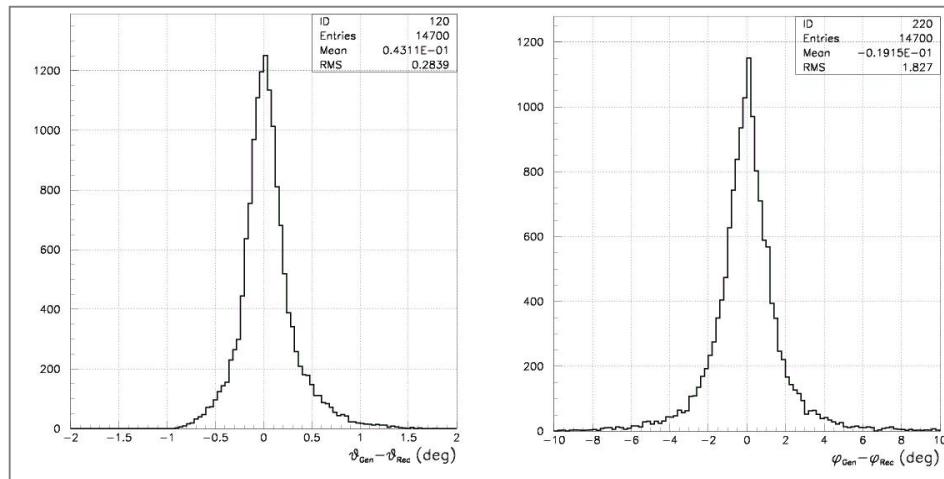


Figura C.8 – Differenza fra le direzioni generate e ricostruite dei muoni, viste nell’angolo zenitale (sinistra) e azimutale (destra).

6C.4 – Stima dei conteggi dovuti al rumore di fondo

Si è stimato che il *rate* di segnali dovuti al rumore di fondo in un rivelatore MRPC è circa pari a 1 Hz/cm^2 ; poiché ogni piano ha un’area sensibile di $13\,120 \text{ cm}^2$ si ottiene un *rate* di fondo $\text{Rate}_{\text{single}} = 13\,120 \text{ Hz}$ per ogni piano MRPC. Assumendo di richiedere la coincidenza fra i piani entro una finestra temporale $\Delta t = 50 \text{ ns}$ (valore tipicamente usato in un sistema elettronico di acquisizione dei segnali, come quello di cui sarà corredata il telescopio), la probabilità di avere la coincidenza fittizia di due piani vale:

$$P_{\text{double}} = \text{Rate}_{\text{single}} \times \Delta t = 6,54 \times 10^{-4}.$$

Il *rate* di coincidenze doppie è quindi:

$$\text{Rate}_{\text{double}} = \text{Rate}_{\text{single}} \times P_{\text{double}} = 8,6 \text{ Hz}$$

e il *rate* di coincidenze triple, dovute al rumore di fondo nei piani, è:

$$\text{Rate}_{\text{triple}} = \text{Rate}_{\text{double}} \times P_{\text{double}} = 5,6 \times 10^{-3} \text{ Hz}.$$

Nella Figura C.9 è rappresentato il valore del *rate* di coincidenze fittizie doppie e triple in funzione della frequenza del fondo per unità di area. Si può notare che il *rate* di

coincidenze fittizie triple è trascurabile rispetto al *rate* atteso di muoni che attraversano i tre piani MRPC ($Rate_\mu = 36 \text{ Hz}$).

Il fondo delle coincidenze accidentali può essere discriminato sulla base dell'allineamento dei singoli segnali nei tre piani: essi sono allineati su una retta nel caso del passaggio di un muone cosmico mentre sono distribuiti casualmente per il fondo. Inoltre la discriminazione può avvenire anche sulla base della correlazione temporale tra i tre piani: infatti le differenze temporali tra i segnali dei piani, nel caso di un muone cosmico, debbono essere compatibili con il tempo di volo di una particella generata nell'atmosfera sovrastante il telescopio e quindi diretta dall'alto verso il basso (si veda la successiva Sezione 6C.8).

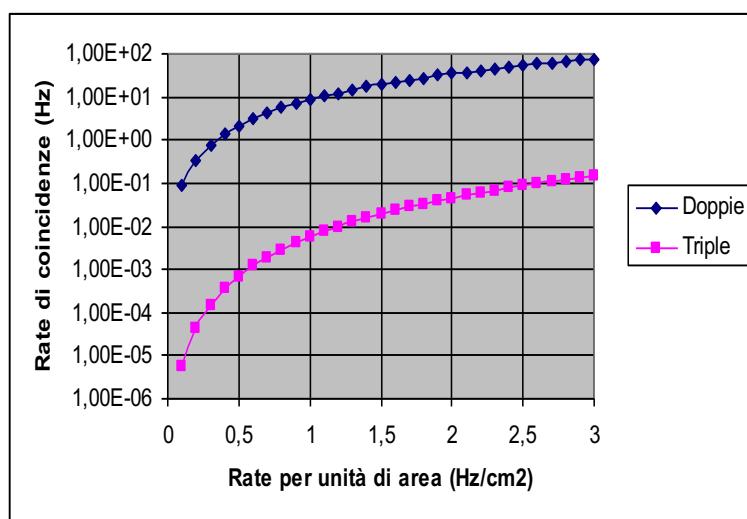


Figura C.9 – Rate di coincidenze fittizie doppie (losanghe) e triple (quadrati) fra i piani MRPC del telescopio in funzione della frequenza di fondo per unità di area.

6C.5 – Coincidenze fra due telescopi

Avendo stimato un *rate* di muoni in ogni rivelatore pari a 36 Hz ($Rate_\mu$), si può valutare il *rate* di coincidenze accidentali fra due telescopi ($Rate_{2\mu}$). Esso dipende linearmente dalla durata della finestra temporale entro cui si richiede la coincidenza dei segnali dei due telescopi (si veda anche la Figura C.10):

$$Rate_{2\mu} (\text{in Hz}) = Rate_\mu \times Rate_\mu \times \Delta t = 1,296 \times 10^{-3} \times \Delta t (\text{in } \mu\text{s}).$$

Da notare che per la coincidenza accidentale di N telescopi si ha, chiaramente:

$$Rate_{N\mu} = (Rate_\mu)^N \times (\Delta t)^{N-1}.$$

Poiché tutti i telescopi saranno sincronizzati in tempo tramite un sistema GPS e tutti i relativi segnali registrati tramite calcolatore e poi trasmessi via Internet a un centro

di raccolta e di archiviazione, la durata della finestra temporale Δt potrà essere opportunamente scelta *offline*, ossia in fase di analisi dei dati raccolti. Le coincidenze temporali potranno coinvolgere ovviamente non solo due ma anche più telescopi. In tal caso il *rate* di coincidenze accidentali risulterà ulteriormente ridotto.

Per gruppi di telescopi molto vicini (tipicamente a una distanza di una decina di metri l'uno dall'altro), la coincidenza temporale entro l'intervallo Δt potrà essere realizzata *online*, ossia in fase di presa dati, tramite un sistema elettronico associato al gruppo di telescopi.

L'interesse nella selezione di coincidenze temporali tra telescopi risiede nel fatto che due o più tracce ricostruite, correlate non solo in tempo ma anche in direzione, provenienti quindi dallo stesso “punto” dell'atmosfera (in realtà, dalla stessa “zona”, più o meno circoscritta a seconda degli errori angolari di ricostruzione delle tracce, come specificato nella Sezione 6C.3), segnalano la rivelazione di uno sciame cosmico. La rivelazione e lo studio di questi sciami cosmici, in particolare di quelli di grandissima energia, è lo scopo principale del Progetto EEE.

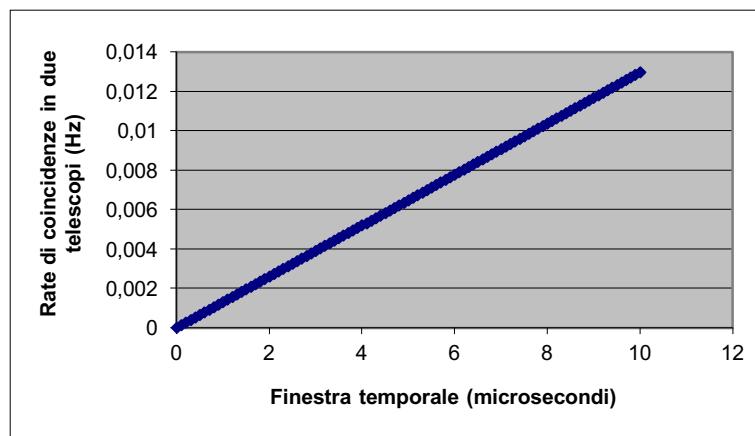


Figura C.10 – Rate di coincidenze, fra due telescopi, di eventi dovuti a muoni cosmici, in funzione della durata della finestra temporale della coincidenza.

6C.6 – Rivelazione di sciami: l'esempio della città di Bologna

Come esempio illustrativo, è stato studiato come potrebbe avvenire la rivelazione di sciami cosmici di altissima energia nella città di Bologna, usufruendo di un sistema di 22 telescopi EEE installati presso tutti i licei e istituti tecnici, professionali o magistrali della città, nonché nei laboratori INFN presso il Dipartimento di Fisica dell'Università. La Figura C.11 mostra la distribuzione geografica dei telescopi.

Sono stati generati circa 2 000 sciami cosmici indotti nell'alta atmosfera da protoni primari di energia pari di 10^{18} eV, incidenti verticalmente su Bologna entro un raggio di 4 km. La distribuzione uniforme dei centri degli sciami generati è illustrata nella Figura C.12.

Definendo come “colpito” un telescopio i cui tre piani MRPC vengono attraversati da un muone dello sciame, si può ricavare la distribuzione del numero di

telescopi colpiti/sciame. Questa è mostrata nella Figura C.13 dalla quale si deduce che nel 70% dei casi nessun telescopio è colpito, mentre nel 9% e nel 5% dei casi sono colpiti rispettivamente almeno 3 e almeno 4 telescopi/sciame.

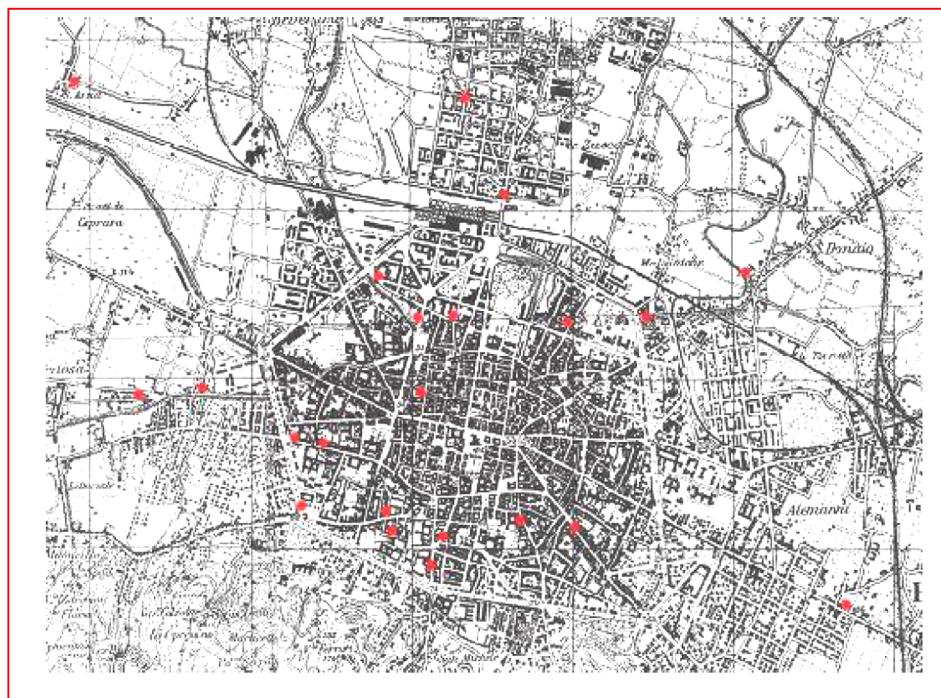


Figura C.11 – Distribuzione geografica dei siti previsti per i telescopi EEE nella città di Bologna.

Il flusso stimato per sciami cosmici di 10^{18} eV è di circa $1,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ e corrisponde a circa 2 100 sciami/anno nell'area mostrata nella Figura C.12. Richiedendo che siano colpiti almeno 3 o almeno 4 telescopi/sciame, il numero di sciami rivelati risulta quindi pari a circa 185 o 105 sciami/anno.

Come visto nella Sezione 6C.5, un parametro importante per la rivelazione degli sciami è la lunghezza della finestra temporale Δt che permette di definire la coincidenza tra i muoni dello stesso sciame rivelati in diversi telescopi, mantenendo sotto controllo il *rate* di coincidenze accidentali. Lo sparpagliamento dei tempi di arrivo al suolo dei circa 10^7 muoni appartenenti ad un medesimo sciame da 10^{18} eV risulta tale che, mediamente, il 95% dei muoni sono contenuti entro un intervallo di 1 μs .

Usando $Rate_\mu = 36 \text{ Hz}$ (Sezione 6C.2) come *rate* atteso di muoni per singolo telescopio e $\Delta t = 1 \mu\text{s}$ come finestra temporale, si possono stimare i *rates* di coincidenze accidentali triple e quadruple tra telescopi:

$$Rate_{3\mu} = (Rate_\mu)^3 \times (\Delta t)^2 = 4,66 \times 10^{-8} \text{ Hz} = 1,47 \text{ coincidenze/anno},$$

$$Rate_{4\mu} = (Rate_\mu)^4 \times (\Delta t)^3 = 1,68 \times 10^{-12} \text{ Hz} = 5,30 \times 10^{-5} \text{ coincidenze/anno}.$$

Tali *rates* debbono ancora essere moltiplicati per il numero di possibili combinazioni di 3 o 4 telescopi, su un totale di 22, che è dell’ordine di 100 in entrambi i casi. Pertanto i numeri di sciami falsi corrispondenti ad almeno 3 e ad almeno 4 coincidenze accidentali tra telescopi sono rispettivamente dell’ordine di 150 coincidenze/anno e di 5×10^{-3} coincidenze/anno. Dal confronto con i corrispondenti numeri di sciami veri (rivelati con coincidenze almeno triple o almeno quadruple), pari a circa 185 sciami/anno e a 105 sciami/anno, si deduce che, anche se nel primo caso il fondo è dello stesso ordine di grandezza del segnale fisico, nel secondo caso esso risulta totalmente trascurabile.

Come già detto, la genuinità dello sciame rivelato tramite coincidenze multiple di muoni temporalmente correlati potrà essere ulteriormente attestata estrapolando le tracce di muoni nell’alta atmosfera. Il riconoscimento, entro gli errori sperimentali, di un “vertice” comune di provenienza (il “punto” dove ha interagito il protone primario) sarà infatti di grande rilevanza. Inoltre dalla separazione angolare dei muoni rivelati, ossia dall’apertura angolare dello sciame, sarà possibile risalire a una stima dell’energia dello sciame stesso.

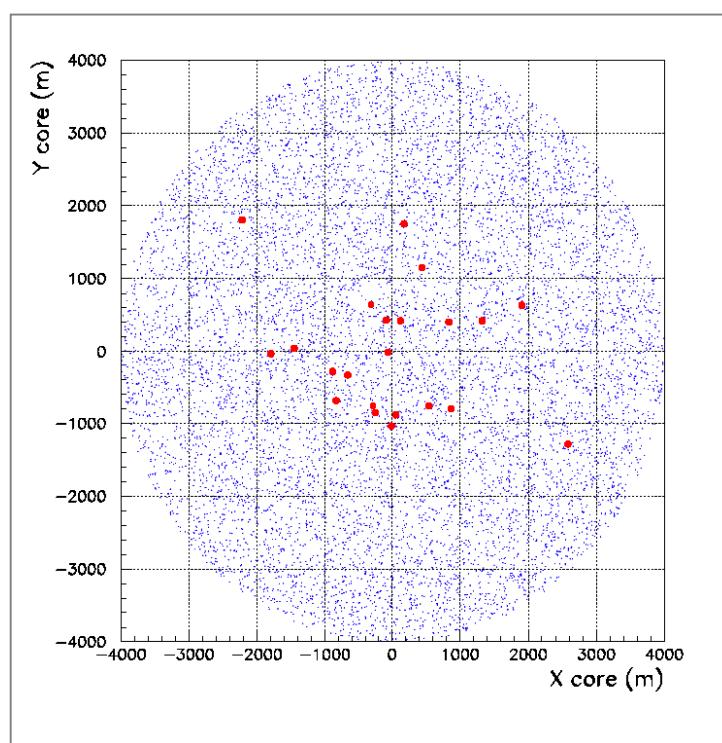


Figura C.12 – Distribuzione al suolo dei centri degli sciami cosmici verticali generati su un’area di 4 km di raggio (puntini piccoli) e delle posizioni dei telescopi EEE (punti grandi).

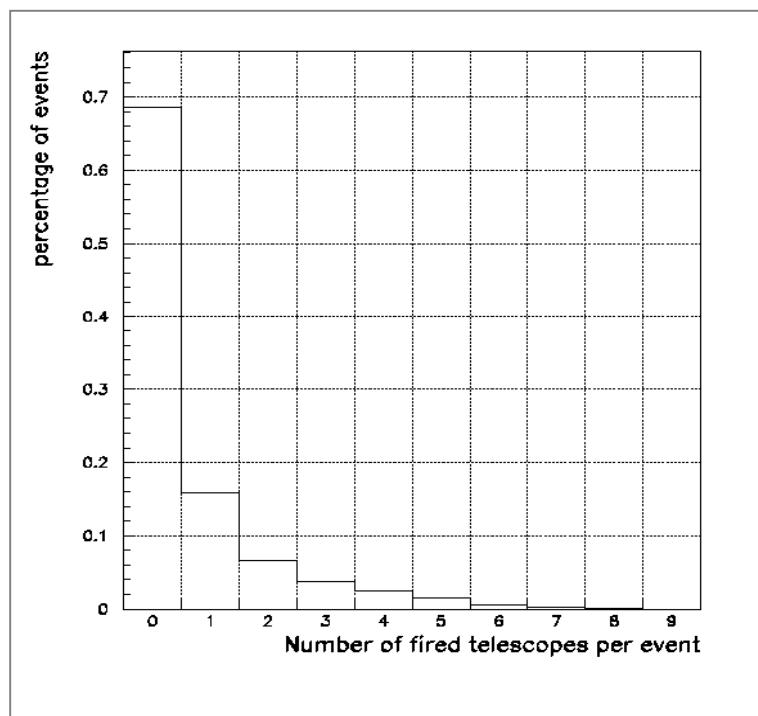


Figura C.13 – Rate di coincidenze, fra due telescopi, di eventi dovuti a muoni cosmici, in funzione della durata della finestra temporale della coincidenza.

6C.7 – Muoni provenienti dal basso

Come abbiamo visto, il flusso di muoni provenienti dagli sciami cosmici è pari a $85 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Tali muoni, naturalmente, provengono dall’alto (dall’atmosfera) e sono diretti verso il basso (verso la Terra).

I muoni prodotti agli antipodi del telescopio devono attraversare tutta la Terra per poter essere rivelati. Ma, nel passaggio attraverso la Terra, i muoni perdono tutta la loro energia e sono fermati.

C’è tuttavia la possibilità di rivelare muoni provenienti dal basso (dalla Terra) e in questo caso si tratta di muoni che hanno un’origine particolare. Infatti, nell’interazione dei raggi cosmici con l’atmosfera terrestre sono prodotti in abbondanza anche particelle di altro tipo: i neutrini. Essi hanno una piccolissima probabilità di interagire con la materia e quindi possono attraversare tutta la Terra senza essere fermati, come illustrato nella Figura C.14. Quindi ogni punto della superficie terrestre è investito continuamente da un flusso di neutrini, sia provenienti dall’alto (neutrini generati in atmosfera sopra il punto di rivelazione) sia provenienti dal basso (neutrini generati agli antipodi, i quali hanno poi attraversato tutta la Terra).

I neutrini, pur se con probabilità molto ridotta, possono interagire nella materia generando un muone. Allora, se un neutrino proveniente dal basso e diretto verso l’alto ha una interazione nelle immediate vicinanze del telescopio, il muone prodotto nell’interazione può proseguire il suo cammino nella Terra, uscire alla superficie ed essere rivelato nel telescopio.

È possibile discriminare il verso di volo dei muoni (e così riconoscere quelli indotti da neutrini da quelli generati negli sciami cosmici) grazie all'ottima risoluzione temporale dei rivelatori MRPC, la quale, nella configurazione studiata per il telescopio EEE, è pari a circa 100 ps. Infatti il tempo impiegato da un muone (che si muove con velocità prossima a quella della luce) per attraversare i due metri che separano i piani superiore e inferiore del telescopio è circa 7 ns, ossia settanta volte maggiore della precisione con cui può essere misurata.

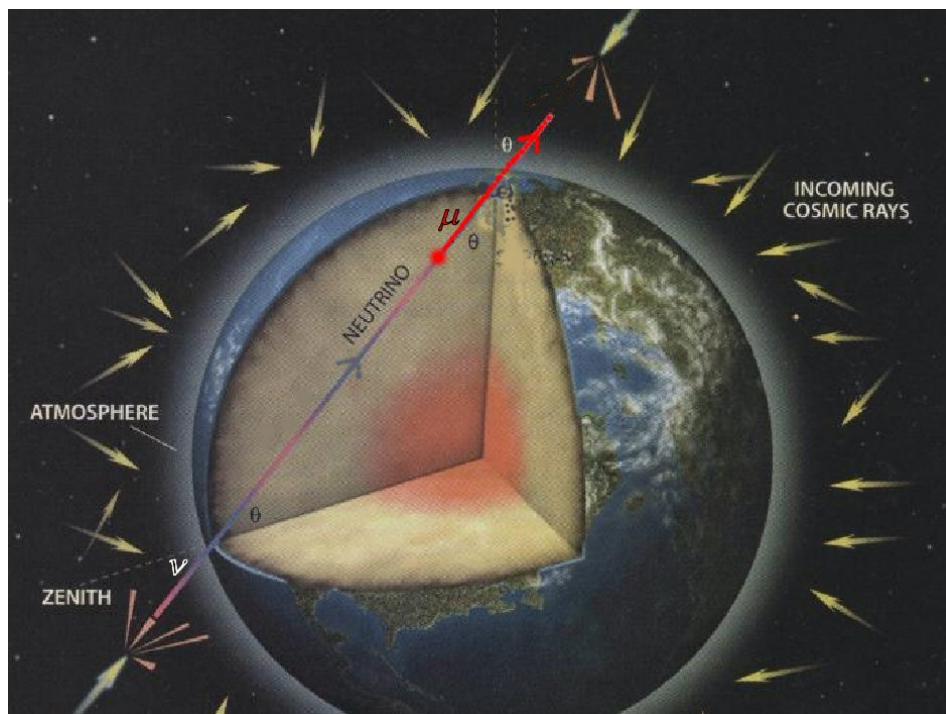


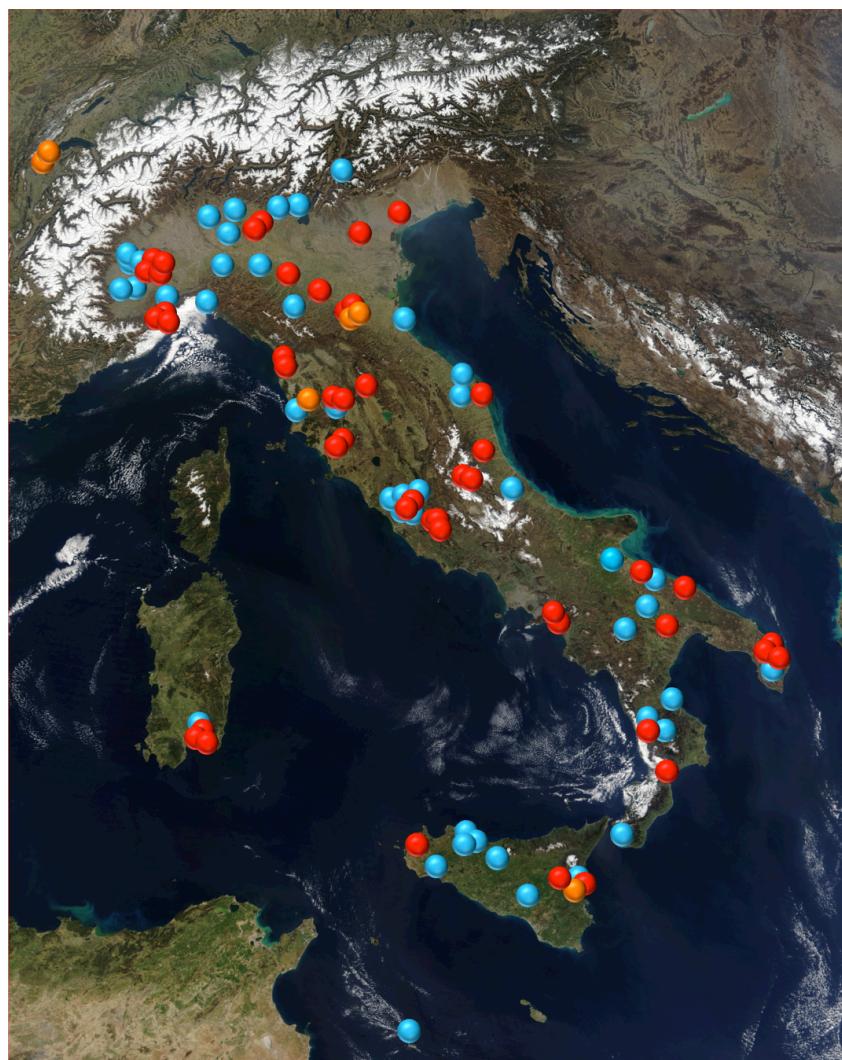
Figura C.14 – Schema della Terra e della atmosfera terrestre. Ogni punto della superficie terrestre è raggiunto da un flusso di muoni dovuti ai raggi cosmici provenienti dall'alto e da un flusso di neutrini provenienti da tutte le direzioni perché essi non sono schermati dalla Terra.

Quindi, nonostante il flusso di muoni provenienti dal basso sia estremamente piccolo, pari a circa $10^{-9} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, è comunque possibile discriminare i muoni provenienti dall'alto, anche se questi ultimi sono circa 10^{11} volte più numerosi.

In ogni telescopio, data la limitata accettanza geometrica (Sezione 6C.2), il *rate* di muoni provenienti dal basso, risulta essere dell'ordine di 0,01/anno (ossia di 1 al secolo). Tuttavia, con 10 telescopi, tale *rate* diventa ovviamente dell'ordine di 0.1/anno e, con 100 telescopi, di 1/anno. Per un gran numero di telescopi EEE, operanti per diversi anni, la misura dei muoni provenienti dal basso diventerebbe dunque statisticamente significativa.

6C.8 – Distribuzione geografica dei rivelatori

Nella mappa sottostante sono indicati gli Istituti Scolastici (pallini rossi) e i Laboratori²⁶ (pallini arancioni) nei quali si trovano attualmente i 53 telescopi del Progetto EEE, insieme ai quasi altrettanti Istituti Scolastici che partecipano al Progetto pur non essendo ancora dotati di telescopi (pallini blu).



I destinatari principali del Progetto EEE sono dunque le Scuole nelle quali vengono installati e messi in funzione i telescopi, ciascuno dotato di tre rivelatori MRPC. Questi rivelatori sono costruiti dagli alunni stessi presso i Laboratori del CERN (si veda la successiva Sezione 7.2).

²⁶ Laboratori del CERN (Ginevra) e Sezioni INFN (Bologna, Catania, Pisa).

7 — APPENDICI

7.1 — Breve storia del Progetto EEE

Il Progetto EEE è stato originariamente concepito per almeno 100 moduli in 100 Scuole disseminate su tutto il territorio nazionale e presentato ufficialmente al Ministro dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca, L. Moratti, il 3 Maggio 2004 al CERN.

Dopo una fase preliminare di avvio, che coinvolgeva solo 7 Scuole "pilota", il Progetto EEE ha finora coinvolto 47 Scuole dotate di telescopi e circa un ugual numero di Scuole che, pur essendo ancora prive di telescopi, partecipano però all’analisi dei dati raccolti. Le 91 Scuole attualmente afferenti al Progetto EEE sono elencate nella successiva Sezione 7.3. Queste sono distribuite a Nord, Centro e Sud d’Italia, in modo da coprire la più grande distanza tra moduli estremi.

7.2 — Schema di attività

La realizzazione del Progetto EEE segue il seguente schema di attività.

- 1) Le attrezzature, le strumentazioni e i materiali necessari alla costruzione e alla successiva messa in funzione del telescopio sono acquistati e forniti dagli Enti e Istituzioni che partecipano al Progetto (Sezione 7.4). Sono poi trasportati e raggruppati presso il CERN o presso altre Strutture di Ricerca (Laboratori o Sezioni INFN o Dipartimenti di Fisica).
- 2) Inizialmente gli alunni delle Scuole in cui vengono montati i telescopi EEE si recano al CERN per contribuire in prima persona alla costruzione dei rivelatori MRPC che costituiscono i telescopi. Gli alunni hanno così la possibilità di partecipare a veri e propri stage di training tecnico-scientifico, a diretto contatto con il mondo della Ricerca.
- 3) In parallelo, il personale scientifico e tecnico delle Strutture di Ricerca predisponde presso le Scuole, con la collaborazione degli alunni delle Scuole, l’installazione dei telescopi EEE e di tutte le strumentazioni e attrezzi a essi connesse che saranno via via trasferite presso le Scuole.
- 4) I rivelatori MRPC costruiti al CERN vengono poi trasportati nelle Scuole, dove si procede alla fase di montaggio e messa in funzione dei telescopi EEE. Tale fase viene di nuovo espletata grazie all’intervento del personale scientifico e tecnico delle Strutture di Ricerca in collaborazione con gli alunni delle Scuole.
- 5) In fase di funzionamento, quando i telescopi EEE sono in grado di acquisire dati scientifici, è compito degli alunni delle Scuole garantire l’operatività costante dei telescopi, ed eseguire una serie di regolari controlli e misure. Il personale delle Strutture di Ricerca garantisce un’assistenza e una vigilanza costante dei telescopi presso le Scuole.
- 6) Tutti i telescopi operativi spediscono in maniera automatica i dati raccolti presso il centro di calcolo CNAF dell’INFN a Bologna. Qui i dati vengono ricostruiti e messi a disposizione per le analisi successive. Tramite le informazioni GPS è possibile correlare tra di loro le tracce di muoni ricostruite in telescopi diversi. La raccolta dati è normalmente organizzata in una serie di *runs* di presa dati che coprono normalmente il periodo di apertura delle Scuole (ottobre-giugno). Più di 40 miliardi di tracce di muoni sono state finora raccolte (maggio 2017). L’intera

presa dati di tutte le Scuole può essere seguita nei minimi dettagli tramite una pagina web dedicata (<https://www1.cnaf.infn.it/eee/monitor/>).

- 7) Tutti gli alunni delle Scuole, con o senza telescopio, che fanno parte del Progetto EEE vengono resi partecipi dell’analisi dei dati raccolti e dei risultati ottenuti. Sono anche coinvolti in un’azione più vasta e generale di promozione della Cultura Scientifica. Ciò avviene tramite strumenti multimediali, *masterclasses* e tramite *stages* presso il Centro Fermi, le Strutture di Ricerca, il CERN o anche presso la Fondazione “Ettore Majorana” e Centro di Cultura Scientifica (FEMCCS) di Erice. Ogni mese viene fatta una riunione generale via videoconferenza nella quale tutte le Scuole possono seguire l’andamento della presa dati e presentare i loro contributi all’analisi dei dati.
- 8) Il Progetto EEE è anche diventato un importante esperimento scientifico per lo studio dei raggi cosmici di altissima energia, con un’area di copertura unica al mondo, e ha già prodotto numerose pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali (<http://eee.centrofermi.it/collaboration/pubblicazioni>)

7.3 — Lista degli Istituti Scolastici che partecipano al Progetto EEE

CITTÀ	ISTITUTO SCOLASTICO con telescopio (casella beige) senza telescopio (casella celeste)
ALTAMURA (BA)	<u>Liceo L. Cagnazzi</u>
	<u>IISS P.L. Nervi - G. Galilei</u>
ANCONA	<u>Liceo Classico C. Rinaldini</u>
	<u>Liceo Scientifico G. Galilei</u>
AREZZO	<u>ITIS G. Galilei</u>
BARI	<u>Liceo Scientifico A. Scacchi</u>
BITETTO (BA)	<u>Liceo Scientifico E. Amaldi</u>
BOLOGNA	<u>Liceo Scientifico E. Fermi</u>
	<u>Liceo Classico L. Galvani</u>
BRA (CN)	<u>Liceo Scientifico G. Giolitti - G.B. Gandino</u>
CAGLIARI	<u>Liceo Scientifico L.B. Alberti</u>
	<u>Liceo Scientifico Michelangelo</u>
	<u>Liceo Scientifico A. Pacinotti</u>
CALTANISSETTA	<u>Liceo Scientifico A. Volta</u>
CARCARE (SV)	<u>Liceo G. Calasanzio</u>
CARIATI (CS)	<u>Liceo Scientifico S. Patrizi</u>
CASTELVETRANO (TP)	<u>Liceo Scientifico M. Cipolla</u>
CASTROLIBERO (CS)	<u>Liceo Scientifico S. Valentini</u>

CATANIA	<u>ITIS S. Cannizzaro</u> <u>IISIT G. Marconi</u>
CATANZARO	<u>IIS E. Fermi</u>
CODOGNO (LO)	<u>Liceo G. Novello</u>
COLLEFERRO (RM)	<u>ITI S. Cannizzaro</u>
COSENZA	<u>Liceo Scientifico G.B. Scorza</u>
FOGGIA	<u>Liceo Scientifico G. Marconi</u>
FRASCATI (RM)	<u>ITT E. Fermi</u>
	<u>Liceo Villa Sora</u>
GARDONE VAL TROMPIA (BS)	<u>IIS C. Beretta</u>
GROSSETO	<u>IIS A. Manetti (2 telescopi)</u>
GROTTAFERRATA (RM)	<u>Liceo Scientifico B. Touschek</u>
ISEO (BS)	<u>IIS G. Antonietti</u>
LAMPEDUSA E LINOSA (AG)	<u>Istituto Omnicomprensivo L. Pirandello</u>
LANCIANO (CH)	<u>Liceo Scientifico G. Galilei"</u>
L'AQUILA	<u>Liceo Scientifico A. Bafile</u>
	<u>ITIS A. D'Aosta</u>
LECCE	<u>Liceo Scientifico G. Banzi Bazoli</u>
	<u>ITIS E. Fermi</u>
	<u>Liceo Classico G. Palmieri</u>
LIVORNO	<u>Liceo Scientifico F. Enriques</u>
LODI	<u>Liceo Scientifico G. Gandini</u>
	<u>IIS A. Volta</u>
MAGLIE (LE)	<u>Liceo Scientifico L. da Vinci</u>
MILANO	<u>Liceo Scientifico Vittorio Veneto</u>
MONCALIERI (TO)	<u>IIS E. Majorana</u>
MONTEROTONDO (RM)	<u>Liceo Scientifico G. Peano</u>
OSIMO (AN)	<u>Liceo F. e M. Campana</u>
PALERMO	<u>Liceo Scientifico B. Croce</u>
	<u>ITIS Vittorio Emanuele III</u>
	<u>Liceo Classico G. Garibaldi</u>
PARABIAGO (MI)	<u>Liceo Scientifico C. Cavallieri</u>
PARMA	<u>Liceo Scientifico G. Marconi</u>

PATERNÒ (CT)	<u>Liceo Scientifico E. Fermi</u>
PETRALIA SOPRANA (PA)	<u>ITIS P. Domina</u>
POTENZA	<u>Liceo Scientifico P.P. Pasolini</u>
QUARTU SANT'ELENA (CA)	<u>IISS P. Levi</u>
RAPALLO - RECCO (GE)	<u>IIS G. da Vigo - N. da Recco</u>
REGGIO CALABRIA	<u>Liceo Scientifico A. Volta</u>
REGGIO EMILIA	<u>IIS L. Nobili</u>
RIMINI	<u>Liceo A. Serpieri</u>
ROMA	<u>ITIS H. Hertz</u>
	<u>Liceo Classico P. Albertelli</u>
	<u>Liceo Scientifico C. Cavour</u>
	<u>Liceo Scientifico A. Righi</u>
	<u>Liceo Scientifico Francesco D'Assisi</u>
SALERNO	<u>Liceo Scientifico G. Da Procida</u>
	<u>Liceo Regina Margherita</u>
SALUZZO	<u>Liceo G.P. Bodoni</u>
SAN GIOVANNI IN FIORE (CS)	<u>Liceo Scientifico San Giovanni in Fiore</u>
SAN GIOVANNI VALDARNO (AR)	<u>ITIS G. Ferraris (ISIS Valdarno)</u>
SASSUOLO	<u>Liceo A.F. Formiggini</u>
SAVONA	<u>Liceo Chiabrera - Martini</u>
	<u>ITIS Ferraris - Pancaldo</u>
	<u>Liceo Scientifico O. Grassi</u>
SEREGNO (MB)	<u>Collegio P.A. Ballerini</u>
SIENA	<u>IIS T. Sarrocchi</u>
	<u>Liceo Scientifico G. Galilei</u>
TERAMO	<u>IIS Alessandrini - Marino - Forti</u>
TORINO	<u>Liceo Classico M. d'Azeglio</u>
	<u>Liceo Scientifico G. Ferraris</u>
	<u>Liceo Scientifico G. Bruno</u>
	<u>Liceo Scientifico A. Volta</u>
	<u>Liceo Scientifico P. Gobetti - G. Segre</u>
TRAPANI	<u>Liceo Classico V. Gioberti</u>
	<u>Liceo Scientifico V. Fardella</u>

TRENTO	<u>Liceo Scientifico L. da Vinci</u>
TREVISO	<u>Liceo Duca degli Abruzzi</u>
TRINITAPOLI (BAT)	<u>IISS S. Staffa</u>
VIAREGGIO (LU)	<u>IIS Galilei - Artiglio</u>
	<u>Liceo Scientifico Barsanti e Matteucci</u>
Vicenza	<u>Liceo Scientifico G.B. Quadri</u>
Voghera (PV)	<u>IIS A. Maserati</u>

I 47 telescopi EEE installati negli Istituti Scolastici elencati sono quasi tutti operativi. A questi vanno aggiunti altri 6 telescopi situati al CERN (due) e nelle Sezioni INFN di Bologna (due), Catania e Pisa, per un totale di 53 telescopi.

Da notare che molti Istituti Scolastici hanno anche attivato convenzioni per attività di "Alternanza Scuola Lavoro" basati sul Progetto EEE.

Per maggiori informazioni e dettagli sui dati raccolti e sulle misure fin qui effettuate, si rimanda al sito web del Centro Fermi: <http://www.centrofermi.it/eee>

Recentemente è stata avviata una ulteriore fase di costruzione del Progetto EEE con l'obiettivo di aggiungere altri 20 telescopi in altrettanti Istituti Scolastici entro il 2018. Alcuni di questi Istituti contribuiranno al Progetto anche attraverso fondi propri o resi disponibili da altri *sponsors*. La costruzione sarà realizzata dagli studenti, come per tutte le precedenti Scuole, presso il CERN di Ginevra.

Ricordiamo che l'obiettivo da raggiungere, secondo la proposta originale del Progetto, è quello di dotare di telescopi 100 Scuole in Italia, distribuite su di una superficie complessiva di quasi 1 milione di km².

Sono anche in fase di definizione collaborazioni con Istituzioni di Ricerca e/o Istituti Scolastici di altri Paesi, come Albania (Korce), Cina (Pechino), Russia (Dubna, Novosibirsk), Spagna (Santiago di Compostela), Sud Africa (Città del Capo) e Taiwan (Taipei), che hanno espresso il loro interesse per il Progetto. E' inoltre iniziata una recente collaborazione con l'*International Particle Physics Outreach Group* (IPPOG) per intraprendere scambi di dati con alcuni altri *networks* europei che hanno rivelatori²⁷ per raggi cosmici installati nelle Scuole.

7.4 — Enti e Istituzioni impegnati nel Progetto EEE

Al Progetto EEE partecipano i seguenti Enti e Istituzioni:

- **Centro Fermi** – Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche “Enrico Fermi”
- **CERN** – *European Organization for Nuclear Research* (Centro Europeo di Ricerche in Fisica Nucleare e Subnucleare)
- **CNR** – Consiglio Nazionale delle Ricerche
- **Dipartimenti di Fisica** delle Università Italiane
- **FEMCCS** – Fondazione “Ettore Majorana” e Centro di Cultura Scientifica

²⁷ Si tratta per lo più di rivelatori non traccianti, costituiti da contatori a scintillazione installati sui tetti delle Scuole.

- **INFN** – Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
- **INGV** – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
- **SIF** – Società Italiana Fisica
- **WFS** – *World Federation of Scientists* (Federazione Mondiale degli Scienziati).

Il Progetto EEE è il progetto strategico del Centro Fermi, che ne coordina il lavoro e le operazioni.

I Laboratori del CERN, i Laboratori Nazionali e le Sezioni dell'INFN, e i Dipartimenti di Fisica delle Università sono i punti di riferimento per la parte tecnico-scientifica del Progetto.

Il Progetto usufruisce inoltre della stretta collaborazione con FEMCCS, SIF e WFS che, insieme a tutti gli Enti e Istituzioni partecipanti, hanno una vasta e riconosciuta esperienza di alto livello nel campo della diffusione e della promozione della Cultura Scientifica.

La responsabilità del Progetto EEE compete a un Comitato Tecnico Scientifico presieduto da:

Prof. Antonino ZICHICHI
Università di Bologna, INFN (Bologna),
CERN (Ginevra), Centro Fermi (Roma), FEMCCS (Erice),
WFS (Pechino, Ginevra, Mosca, New York).