



**MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO**  
**DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE**  
**UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI**

<b>DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO</b>	<b>102015000075497</b>
<b>Data Deposito</b>	<b>23/11/2015</b>
<b>Data Pubblicazione</b>	<b>23/05/2017</b>

Classifiche IPC

Titolo

APPARATO E METODO PER L'ISPEZIONE NON INVASIVA DI CORPI SOLIDI MEDIANTE  
IMAGING MUONICO

## **APPARATO E METODO PER L'ISPEZIONE NON INVASIVA DI CORPI SOLIDI MEDIANTE IMAGING MUONICO**

### **Descrizione**

#### Campo di applicazione

5 La presente invenzione trova applicazione nel settore tecnico degli strumenti di misura ed ha per oggetto un apparato per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico utilizzabile nell'ingegneria civile, archeologia, vulcanologia, tettonica ed ovunque sia necessaria una ispezione radiografica e/o tomografica non distruttiva di strutture geologiche e/o ingegneristiche anche di  
10 dimensioni considerevoli.

L'invenzione ha altresì per oggetto un metodo di ispezione non invasiva mediante imaging muonico implementabile con il suddetto apparato.

#### Stato della tecnica

Sono note indagini tomografiche basate su tecniche di "tracciamento" che sfruttano il  
15 rilevamento dell'energia associata alle particelle cariche delle radiazioni cosmiche che attraversano un materiale da ispezionare al fine di condurre ispezioni non invasive.

Tali tecniche si basano sulla visualizzazione della traiettoria della particella che attraversando dei piani di rivelazione, usualmente scintillatori, producono un impulso  
20 elettrico che opportunamente analizzato fornisce la direzione di provenienza della particella.

L'interazione della radiazione cosmica primaria (adroni e fotoni gamma) con gli atomi dell'atmosfera crea una pioggia di altre particelle, tra cui molti pioni che decadono molto velocemente in muoni, particelle altamente penetranti.

25 Questi ultimi, essendo dotati di un tempo di decadimento più lungo e interagendo principalmente con la materia attraverso la forza Coulombiana, riescono a raggiungere la superficie terrestre dando luogo ad un flusso isotropico di radiazione carica penetrante che al livello del mare è di circa 1 muone al centimetro quadro al minuto.

30 Le tecniche di "tracciamento" muonico per la radiografia/tomografia di oggetti

massivi sfruttano l'alta penetrabilità dei muoni e la loro contemporanea perdita di energia attraverso le interazioni elettromagnetiche nel materiale attraversato, in quanto l'assorbimento energetico dipende dallo spessore e densità del materiale attraversato e dall'energia del muone incidente.

- 5 Pertanto, il muone uscente ha un'energia inferiore rispetto a quello incidente ed inoltre devia dalla direzione originaria a causa di un gran numero di piccole deviazioni angolari che si verificano durante l'attraversamento (scattering Coulombiano).

Inoltre, l'angolo medio di deviazione è proporzionale all'inverso della quantità di  
10 moto della particella e alla radice quadrata della densità reale del materiale misurato in lunghezze di radiazione.

Pertanto, attraverso una misura dell'attenuazione del flusso dei muoni in funzione della quantità di materia attraversata in direzioni differenti è possibile determinare la densità di distribuzione all'interno del materiale indagato.

- 15 Le note tecniche di prospezione, utilizzate in particolare in ambito vulcanologico, prevedono l'utilizzo di telescopi con barre scintillanti lette da sensori di luce come fotomoltiplicatori o fotomoltiplicatori al silicio che intercettano i muoni uscenti dal vulcano, come descritto ad esempio in JP20060096285.

Tuttavia, il segnale prodotto da questi strumenti risente dell'effetto di coincidenze  
20 accidentali, ad esempio dovute a particelle a bassa energia che colpiscono contemporaneamente i piani del telescopio simulando un evento, e soprattutto del cosiddetto *back-flux*, ossia del flusso che arriva dalla direzione opposta rispetto a quella che attraversa il materiale esaminato.

Inoltre, tali strumenti non forniscono informazioni sullo spettro di energia dei muoni  
25 incidenti che deve essere conosciuto per calcolare il modello di flusso integrato attraverso il corpo da confrontare con i dati osservati.

Alcuni strumenti hanno cercato di limitare il *back-flux* inserendo fino a sei piani di scintillatori tra piani assorbitori di piombo e ferro. Questa soluzione ha diminuito in modo significativo, anche se non del tutto, il fondo muonico non coerente, ma ha  
30 anche aumentato eccessivamente il peso dello strumento limitandone la

trasportabilità e la compattezza.

JP2010101892 descrive una tecnica di misurazione applicata in ambito vulcanologico basata sul rilevamento delle tracce muoniche attraversanti odoscopi a piani scintillanti.

- 5 Tuttavia, tale tecnica richiede diversi strati di rilevamento ed un tempo di risoluzione sufficientemente elevato per ridurre il livello di falsi positivi dovuti alle inevitabili particelle di background.

#### Presentazione dell'invenzione

- Scopo della presente invenzione è quello di superare gli inconvenienti sopra indicati,  
 10 mettendo a disposizione un apparato per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico che sia particolarmente efficiente e relativamente economico.

- Uno scopo particolare è quello di realizzare un apparato per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico che permetta di realizzare radiografie e/o  
 15 tomografie di strutture anche di notevole dimensioni in maniera affidabile, minimizzando gli errori ed in tempi considerevolmente ridotti rispetto alle tecniche note.

- Ancora altro scopo è quello di realizzare un apparato per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico che presenti ingombri e pesi notevolmente  
 20 ridotti per poter essere eventualmente trasportato e consentire indagini radiografiche e/o tomografiche di corpi di grandi dimensioni, quali i vulcani, in maniera rapida ed affidabile.

- Ancora altro scopo è quello di realizzare un apparato per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico che sia flessibile nell'utilizzo.

- 25 Uno scopo ulteriore è quello di mettere a disposizione un metodo per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico che sia particolarmente affidabile ed economico e permetta di minimizzare gli errori sistematici ed i falsi positivi.

- Tali scopi, nonché altri che appariranno più chiari inseguito, sono raggiunti da un apparato per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico che,  
 30 in accordo alla rivendicazione 1, comprende un dispositivo ricevitore atto ad

intercettare un flusso muonico associato ai raggi cosmici attraversanti una porzione di un corpo da ispezionare, mezzi sensori atti a rilevare la quantità di fotoni o luce Cherenkov associata al flusso muonico intercettato, mezzi di elaborazione elettronica atti a ricostruire l'energia e la direzione del flusso muonico incidente la porzione di  
5 corpo da ispezionare per calcolarne la densità locale.

Il dispositivo ricevitore comprende un'ottica provvista di almeno una superficie ricevente avente proprietà riflettenti e/o diffrattive atta a convogliare la luce Cherenkov associata ai muoni verso detti mezzi sensori.

A loro volta, i mezzi sensori comprendono una camera di rilevamento multipixel atta  
10 a fornire un'immagine anulare del muone avente raggio e posizione variabili in funzione dell'energia e della direzione del flusso muonico.

Grazie a questa combinazione di caratteristiche sarà possibile utilizzare uno strumento estremamente più semplice ed affidabile rispetto a quelli utilizzati per le tecniche di tracciamento muonico al fine di ottenere misure di densità.

15 Inoltre, l'indagine si basa sull'analisi e la ricostruzione dell'immagine dell'anello Cherenkov, ossia su una tecnica consolidata ed efficiente. La misura dell'energia del muone permette anche di valutare l'assorbimento all'interno dell'oggetto e quindi stabilire in modo efficace il percorso reale del muone all'interno dell'oggetto stesso.

Un ulteriore vantaggio sarà rappresentato dal fatto che non saranno richiesti elementi  
20 attivi per la rivelazione del muone, come per esempio plastici scintillanti, essendo l'atmosfera il mezzo di conversione muone-fotoni Cherenkov.

Vantaggiosamente, detta camera di rilevamento potrà essere disposta in corrispondenza del piano focale di detta ottica ricevente.

L'ottica potrà comprendere una superficie ricevente primaria atta a convogliare il  
25 flusso di fotoni Cherenkov verso detto piano focale.

Inoltre, l'ottica potrà essere del tipo a doppia riflessione e/o diffrazione con una superficie ricevente secondaria affacciata ed allineata a detta superficie ricevente primaria per trasferire il flusso di fotoni ricevuto da quest'ultima e concentrarlo verso  
30 detta camera di rilevamento affacciata a detta superficie riflettente o diffrattiva secondaria.

In questo modo il segnale Cherenkov prodotto dal muone sarà direzionale ed altamente collimato e sarà possibile eliminare il *back-flux* prodotto dagli altri muoni generati nell'atmosfera che inevitabilmente contribuirebbero a false coincidenze.

Infatti solo i muoni che arrivano alla superficie ricevente dell'ottica entro un angolo  
5 di  $1.3^\circ$ , ossia l'apertura angolare del cono di luce del fotone Cherenkov, rispetto all'asse ottico saranno in grado di generare un anello Cherenkov nel piano focale dell'ottica.

Opportunamente, l'apparato potrà comprendere una pluralità di dette ottiche associate a rispettivi mezzi sensori e rispettivi mezzi di elaborazione elettronica per rilevare  
10 flussi muonici provenienti da diverse direzioni, almeno una di dette ottiche essendo mobile per variare la propria direzione di rilevamento.

In questo modo sarà possibile disporre i piani di rilevamento del flusso muonico attorno al corpo materiale in esame per eseguire tomografie 3D.

Secondo un ulteriore aspetto dell'invenzione è previsto un metodo per l'ispezione non  
15 invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico in accordo alla rivendicazione 9 che presenterà tutti i vantaggi sopra riportati.

Forme vantaggiose di esecuzione dell'invenzione sono ottenute in accordo alle rivendicazioni dipendenti.

#### Breve descrizione dei disegni

20 Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione risulteranno maggiormente evidenti alla luce della descrizione dettagliata di una forma di realizzazione preferita ma non esclusiva di un apparato per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico secondo l'invenzione, illustrata a titolo di esempio non limitativo con l'aiuto delle unite tavole di disegno in cui:

25 la **FIG. 1** è una vista schematica di un apparato secondo l'invenzione;

la **FIG. 2** è un'immagine di un muone generata dall'apparato in due diverse condizioni di impatto del muone;

la **FIG. 3** è una vista schematica di un'ottica appartenente all'apparato secondo una configurazione preferita;

30 la **FIG. 4** illustra un grafico relativo al diagramma degli spot e alla frazione di

fotoni racchiusi nell'immagine per alcuni angoli del campo di vista in funzione del raggio misurato rispetto al centro dell'immagine.

Descrizione dettagliata di un esempio di realizzazione preferito

Con riferimento alle figure allegate è illustrata una configurazione preferita ma non esclusiva di un apparato per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico.

In particolare nella **Fig. 1** è schematizzata una forma preferita di un apparato di tipo mobile, indicato globalmente con **1**, ossia montato all'interno di una struttura mobile **2** per essere trasportato in maniera agevole e collocato in diverse aree di rilevamento.

L'apparato **1** potrà essere così utilizzato sia per radiografie 2D che per tomografie 3D, eventualmente in un sistema comprendente due o più apparati secondo l'invenzione, non necessariamente simili tra loro.

L'apparato **1** comprende essenzialmente un dispositivo ricevitore **3** atto ad intercettare un flusso muonico associato ai raggi cosmici attraversanti una porzione di un corpo da ispezionare, mezzi sensori **4** atti a rilevare la quantità di fotoni o luce Cherenkov associata al flusso muonico intercettato e mezzi di elaborazione elettronica, non visibili in quanto incorporati all'interno della struttura meccanica dei mezzi sensori, atti a ricostruire l'energia e la direzione del flusso muonico incidente la porzione di corpo da ispezionare per calcolarne la densità locale.

Il dispositivo ricevitore **3** comprende un'ottica **5** provvista di almeno una superficie ricevente **6** avente proprietà riflettenti atta a convogliare la luce Cherenkov associata ai muoni verso i mezzi sensori.

In particolare la superficie riflettente **6** apparterrà ad uno specchio **7** opportunamente configurato per intercettare il flusso muonico e direzionarlo verso i mezzi sensori **4**.

Questi ultimi comprenderanno una camera di rilevamento multipixel **8** disposta in corrispondenza del piano focale dell'ottica ricevente **5** ed atta a fornire un'immagine anulare del muone avente raggio e posizione variabili in funzione dell'energia e della direzione del flusso muonico.

In **Fig. 2** è illustrata l'immagine anulare tipica di un muone come elaborata da una camera multipixel **8**. In particolare l'immagine di sinistra raffigura il caso in cui il

muone impatta la superficie ricevente, mentre quella di destra il caso in cui il punto di impatto del muone è esterno alla superficie ricevente.

Secondo la configurazione illustrata, preferita ma non esclusiva, l'ottica **5** sarà del tipo a doppio specchio, con uno specchio primario **7** ed uno specchio secondario **9** aventi rispettive superfici riflettenti.

La superficie ricevente riflettente primaria **6** sarà atta ad intercettare il flusso di fotoni Cherenkov ed a convogliarlo sulla superficie riflettente secondaria **10** affacciata ed allineata alla superficie ricevente primaria **6**.

I mezzi sensori **4** saranno interposti tra le due superfici riflettenti **6, 10** con la relativa camera di rivelazione **8** che sarà affacciata alla superficie riflettente secondaria **10** in modo da ottenere l'allineamento del piano focale.

Tale allineamento potrà essere ottenuto attraverso un'apposita struttura meccanica di supporto **11** che consente il fissaggio reciproco degli specchi **7, 9** e della camera **8**, oltre che il fissaggio dell'apparato **1** alla struttura di contenimento **2**.

La superficie ricevente secondaria **10** di tipo riflettente potrà così trasferire il flusso di fotoni ricevuto dalla superficie primaria **6** e concentrarlo verso la camera di rivelazione **8** ad essa affacciata.

La configurazione specifica dell'ottica **5** potrà essere scelta in funzione delle esigenze di risoluzione ed anche di spazio. In **Fig. 3** è illustrata schematicamente una possibile configurazione del tipo Schwarzschild-Couder in cui le due superfici riceventi **6, 10** sono definite da due specchi asferici **7, 9** progettati per correggere aberrazioni sferiche e coma.

Tale configurazione permette di avere un campo di vista osservativo compreso tra  $10^\circ$  e  $15^\circ$  e preferibilmente prossimo a  $12^\circ$ , così da avere una maggiore risoluzione.

Inoltre questa configurazione consente una significativa riduzione in dimensioni della camera **8**, rendendo le dimensioni dei pixel del piano focale compatibili con i moderni sensori di fotoni come i SiPM.

In una forma esemplificativa lo specchio primario **7** potrà essere formato da 8 petali che formano una superficie riflettente primaria **6** di 2100 mm di diametro. Lo specchio secondario **9** sarà monolitico con un diametro di 800 mm. La distanza tra lo

specchio primario **7** e lo specchio secondario **9** sarà di 1600mm, con la camera **8** posta ad una distanza di 275mm dallo specchio secondario **9**.

Le simulazioni eseguite con il software di progettazione ottica ZEMAX mostrano che in questa configurazione l'80% di fotoni è concentrata all'interno di un raggio di  
5 2,8 mm.

**Fig. 4** illustra alcuni grafici relativi al diagramma degli spot e alla frazione di fotoni racchiusi nell'immagine per alcuni angoli del campo di vista in funzione della dimensione lineare (raggio) misurato rispetto al centro dell'immagine.

La configurazione Schwarzschild-Couder presenta il vantaggio di ridurre gli  
10 ingombri e di ottenere un'elevata collimazione ma non è una configurazione esclusiva.

Ad esempio potranno essere utilizzate lenti di Fresnel, anche in materiale plastico, con il vantaggio di ridurre ulteriormente il peso dell'apparato **1**, migliorandone la trasportabilità.

15 Secondo configurazioni alternative, non illustrate, le superfici riceventi **6**, **10** potranno essere di tipo diffrattive. In particolare al posto degli specchi **7**, **9** potranno adoperarsi due lenti opportunamente configurate per convogliare il flusso muonico verso un piano focale in corrispondenza del quale sarà disposta la camera **8**.

In particolare i mezzi sensori **4** con la relativa camera di rivelazione **8** saranno posti  
20 in corrispondenza del fuoco della lente secondaria.

Saranno possibili anche configurazioni ibride, in cui una superficie ricevente sarà uno specchio riflettente mentre l'altra sarà una lente rifrattiva.

A prescindere dalla specifica configurazione adoperata per l'ottica **5**, l'apparato **1** potrà essere costituito di un sistema provvisto di una pluralità di ottiche associate a  
25 rispettivi mezzi sensori e rispettivi mezzi di elaborazione elettronica per rilevare flussi muonici provenienti da diverse direzioni, così da effettuare tomografie 3D.

Le ottiche non saranno necessariamente dello stesso tipo e preferibilmente almeno una di esse potrà essere inserita all'interno di una struttura mobile, possibilmente autonoma da un punto di vista energetico, per variare la propria direzione di  
30 rivelazione.

Per quanto riguarda le caratteristiche dei mezzi sensori **4**, la camera multipixel **8** potrà comprendere sensori di fotoni del tipo SiPM, fotomoltiplicatori o similari atti a generare segnali analogici in funzione del fotone incidente e della direzione del flusso muonico da inviare ai mezzi di elaborazione elettronici che provvederanno alla loro conversione in segnali digitali tramite un'apposita unità di elaborazione.

In particolare i mezzi di elaborazione elettronica saranno atti a rivelare il segnale di luce Cherenkov e ad eseguire un'analisi atta a misurare l'attenuazione differenziale e l'energia del flusso muonico attraversante la porzione ispezionata lungo direzioni differenti e determinare così la densità locale del corpo ispezionato.

La camera di rivelazione **8** si comporrà essenzialmente di una struttura meccanica, la cui funzione principale è quella di contenere l'intera elettronica, e delle componenti elettroniche vere e proprie, tra cui il modulo di distribuzione delle tensioni, i rivelatori, il processore d'immagine e il modulo di comunicazione comandi e dati.

In maniera esemplificativa la struttura meccanica della camera di rivelazione **8** avrà forma cilindrica con dimensioni di 300mm di diametro e 300mm di altezza ed includerà opportunamente una finestra trasparente per l'ingresso dei fotoni riflessi o diffratti ed una flangia d'interfaccia meccanica per il collegamento alla struttura di supporto **11** dell'ottica **5**.

L'elettronica della camera **8** comprende i sensori SiPM, l'elettronica di *front-end* e l'elettronica di *back-end*.

La funzione principale dell'elettronica di *front-end* è l'elaborazione dei segnali analogici dei SiPM in segnali digitali, mentre l'elettronica di *back-end* gestisce e controlla il comportamento globale del sistema, compresa la lettura e gestione dei dati mediante una FPGA (*Field Programmable Gate Array*).

L'elettronica di *back-end* fornisce inoltre tutte le funzioni necessarie per elaborare e trasmettere ad un elaboratore esterno l'intero flusso di dati incluse le informazioni di stato del sistema come per esempio, temperature e tensioni.

Il piano focale della camera **8** sarà di tipo modulare, ad esempio formato da 16 moduli di dimensioni 57mm \* 57mm \* 30mm. Ogni modulo contiene la scheda con i SiPM (8 pixel \* 8 pixel), la scheda ASIC di lettura e processamento dei segnali dei

SiPM e la scheda FPGA di controllo e gestione di tutte le funzioni operative dell'elettronica di *front-end*. Le schede di ogni modulo potranno essere meccanicamente fissate ad un contenitore metallico, ad esempio alluminio, e tra di loro collegate tramite connettori. I 16 moduli saranno disposti geometricamente su una griglia contenente 4\*4 moduli e saranno meccanicamente fissati ad un supporto  
5 di alluminio per una dimensione di 228mm \* 228mm.

L'elettronica di *back-end* rappresenta il processore di sistema e deve essere capace di ricevere e processare i dati ad una velocità maggiore di quella degli eventi triggerati. L'elettronica di *back-end* sarà basata su una FPGA che governa e controlla il flusso  
10 dei dati e dei comandi per/da l'elettronica del piano focale.

Una scheda di distribuzione tensioni fornisce le tensioni necessarie ai vari moduli utilizzando un'unica tensione di ingresso di 24 V. La scheda prevede l'abilitazione/disabilitazione indipendente di ogni sottosistema ad essa connesso.

E' anche previsto un sistema di acquisizione dati, ad esempio un PC portatile  
15 collegato alla scheda di *back-end* per mezzo di un cavo Ethernet da cui inviare i comandi e ricevere i dati.

Appare tuttavia evidente che la camera **8** potrà essere configurata anche diversamente, ad esempio con un numero diverso di moduli e/o con una loro diversa disposizione spaziale, senza uscire dall'ambito di tutela della presente invenzione.

20 Da quanto descritto appare evidente che l'apparato ed il metodo secondo l'invenzione raggiungono gli scopi prefissati.

L'apparato ed il metodo secondo l'invenzione sono suscettibili di numerose modifiche e varianti, tutte rientranti nel concetto inventivo espresso nelle rivendicazioni allegate. Tutti i particolari potranno essere sostituiti da altri elementi  
25 tecnicamente equivalenti, ed i materiali potranno essere diversi a seconda delle esigenze, senza uscire dall'ambito di tutela della presente invenzione.

Anche se l'apparato ed il metodo sono stati descritti con particolare riferimento alle figure allegate, i numeri di riferimento usati nella descrizione e nelle rivendicazioni sono utilizzati per migliorare l'intelligenza dell'invenzione e non costituiscono  
30 alcuna limitazione all'ambito di tutela rivendicato.

### Rivendicazioni

1. Un apparato per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico, comprendente:
- un dispositivo ricevitore (3) atto ad intercettare un flusso muonico associato ai raggi cosmici attraversanti una porzione di un corpo da ispezionare;
  - mezzi sensori (4) atti a rilevare la quantità di fotoni o luce Cherenkov associata al flusso muonico intercettato;
  - mezzi di elaborazione elettronica atti a ricostruire l'energia e la direzione del flusso muonico incidente la porzione di corpo da ispezionare per calcolarne la densità locale;
- 10 **caratterizzato dal fatto che** detto dispositivo ricevitore (3) comprende un'ottica (5) provvista di almeno una superficie ricevente (6) avente proprietà riflettenti e/o diffrattive atta a convogliare la luce Cherenkov associata ai muoni verso detti mezzi sensori (4), questi ultimi comprendendo una camera di rivelazione multipixel (8) atta
- 15 a fornire un'immagine anulare del muone avente raggio e posizione variabili in funzione dell'energia e della direzione del flusso muonico.
2. Apparato secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detta camera di rivelazione (8) è disposta in corrispondenza del piano focale di detta ottica ricevente (5).
- 20 3. Apparato secondo la rivendicazione 1 o 2, caratterizzato dal fatto che detta ottica (5) comprende una superficie ricevente primaria (6) atta a convogliare il flusso di fotoni Cherenkov verso detto piano focale.
4. Apparato secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che detta ottica (5) è del tipo a doppia riflessione e/o diffrazione con una superficie ricevente secondaria
- 25 (10) affacciata ed allineata a detta superficie ricevente primaria (6) per trasferire il flusso di fotoni ricevuto da quest'ultima e concentrarlo verso detta camera di rivelazione (8) affacciata a detta superficie ricevente secondaria (10).
5. Apparato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detta ottica (5) è configurata per avere un campo visivo compreso tra
- 30 10° e 15° e preferibilmente prossimo a 12°.

6. Apparato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto di comprendere una pluralità di dette ottiche associate a rispettivi mezzi sensori e rispettivi mezzi di elaborazione elettronica per rilevare flussi muonici provenienti da diverse direzioni, almeno una di dette ottiche essendo mobile per  
5 variare la propria direzione di rilevamento.
7. Apparato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detta camera multipixel (8) comprende sensori di fotoni del tipo SiPM, fotomoltiplicatori o similari atti a generare segnali analogici in funzione dell'energia e della direzione del flusso muonico, detti mezzi di elaborazione elettronici  
10 comprendendo un'unità di elaborazione atta a trasformare detti segnali analogici in segnali digitali.
8. Apparato secondo la rivendicazione 7, caratterizzato dal fatto che detti mezzi di elaborazione elettronica son atti a rivelare il segnale di luce Cherenkov e ad eseguire un'analisi atta a misurare l'attenuazione differenziale e l'energia del flusso muonico  
15 attraversante la porzione ispezionata lungo direzioni differenti e determinare la densità locale del corpo ispezionato.
9. Un metodo per l'ispezione non invasiva di corpi solidi mediante imaging muonico, comprendente le seguenti fasi:
- a. intercettazione di un flusso muonico associato ai raggi cosmici attraversanti una  
20 porzione di un corpo da ispezionare lungo almeno un piano di rilevamento;
- b. rilevamento della quantità di fotoni o luce Cherenkov associata al flusso muonico intercettato per definire un'immagine anulare del muone;
- c. elaborazione elettronica della luce Cherenkov rilevata per ricostruire l'energia e  
25 la direzione del flusso muonico incidente la porzione di corpo da ispezionare per calcolare l'energia e della direzione del flusso muonico in funzione del raggio e della posizione di detta immagine anulare e misurare la densità locale del corpo ispezionato in funzione dell'energia e della direzione calcolate.
10. Metodo secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che il flusso muonico è intercettato lungo una pluralità di piani di rilevamento, almeno uno di  
30 detti piani essendo mobile per eseguire una tomografia 3D del corpo da ispezionare.

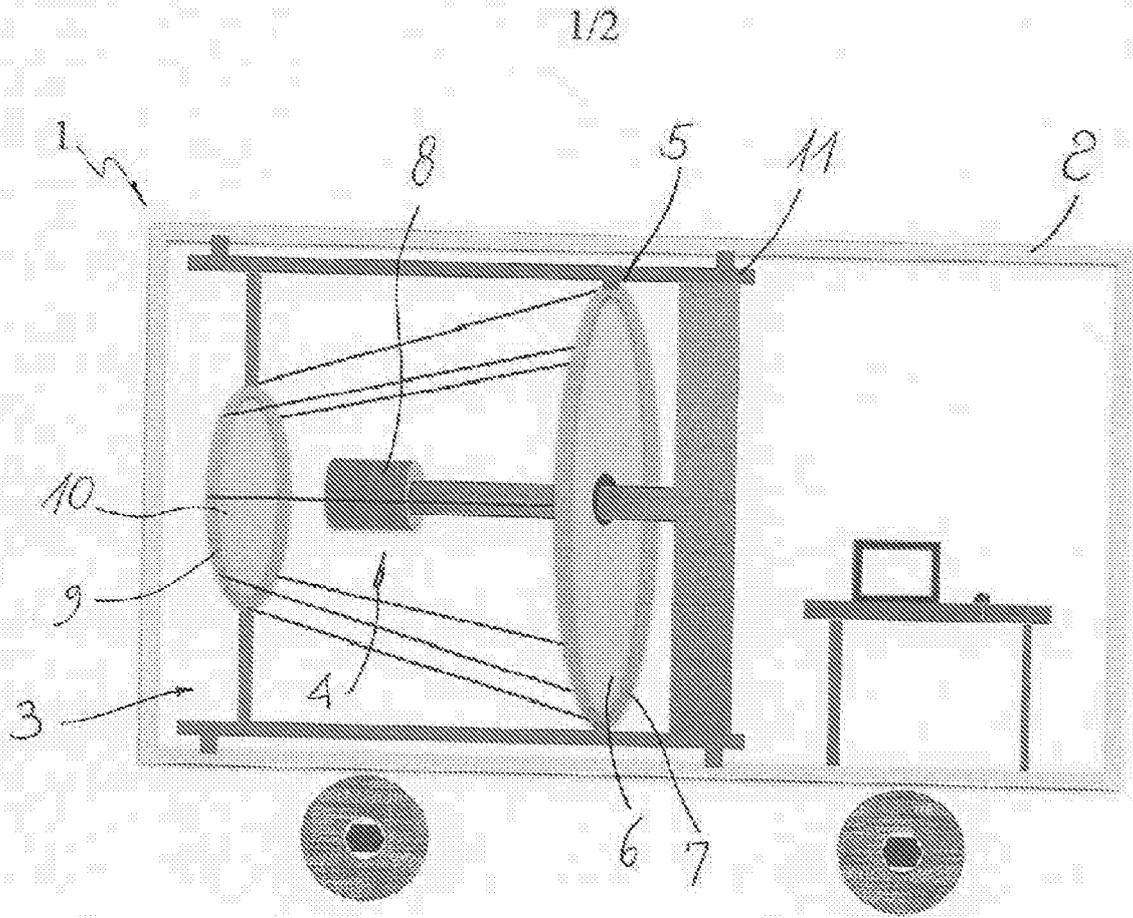


FIG. 1

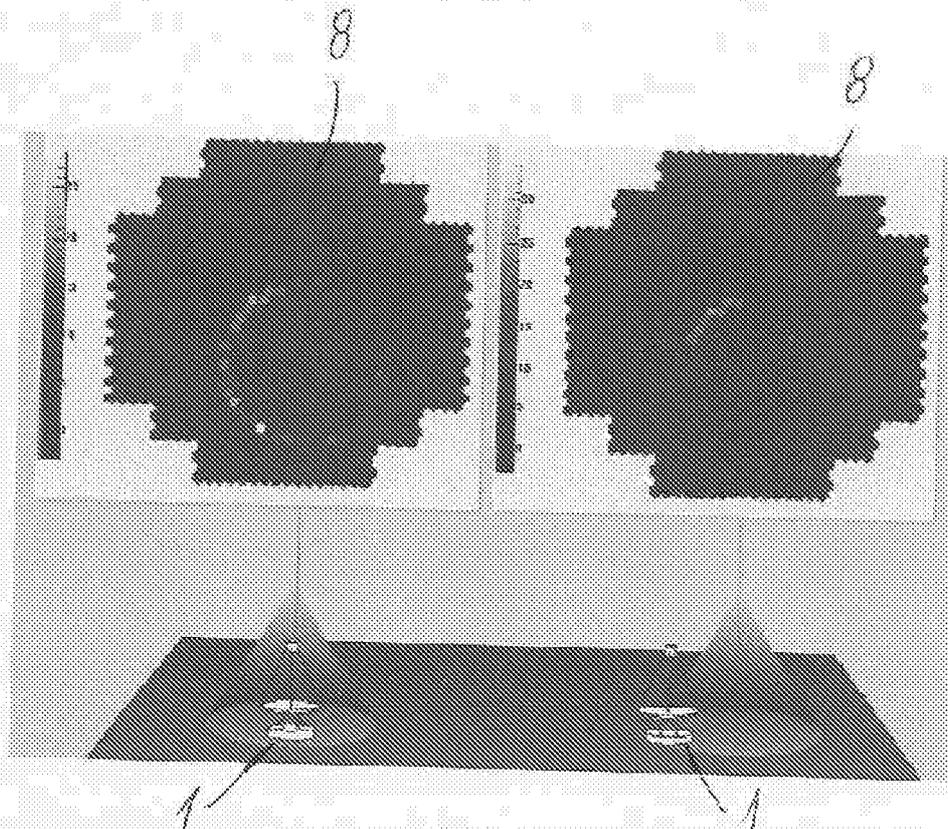


FIG. 2

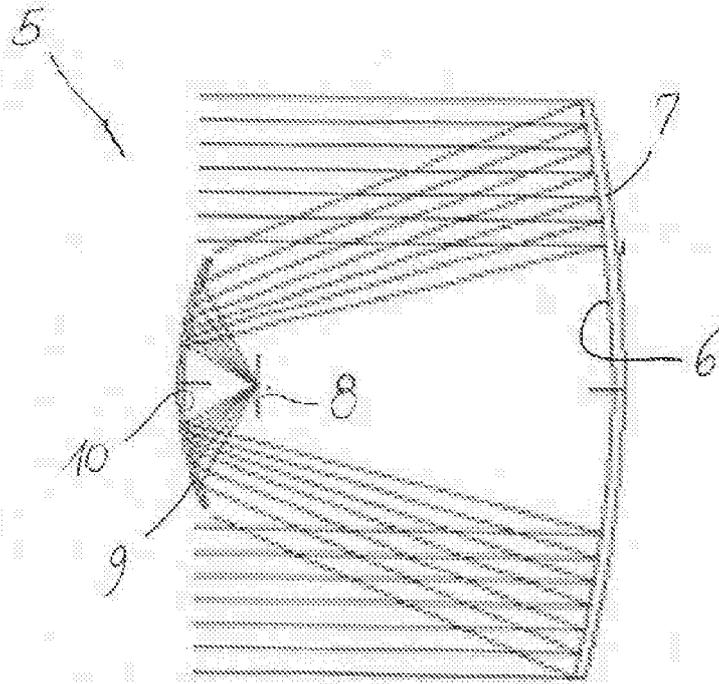


FIG. 3

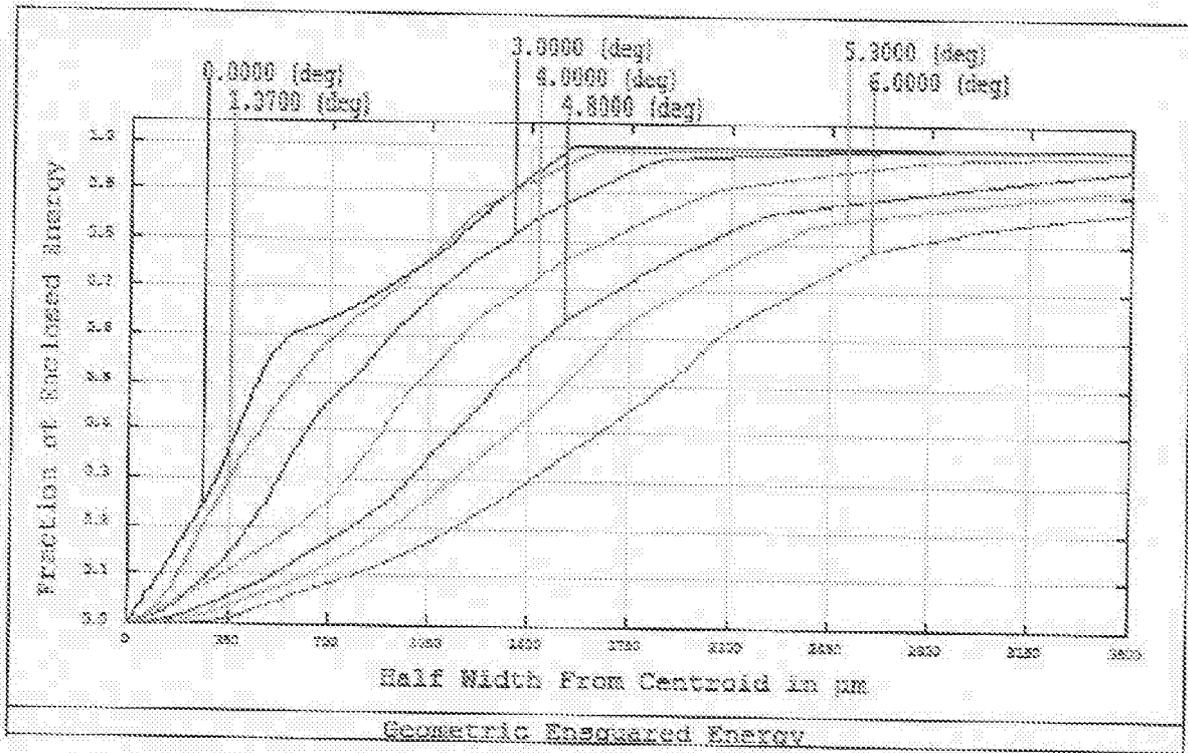


FIG. 4