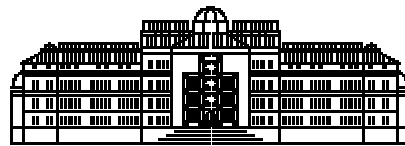




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI TRENTO

Facoltà di Ingegneria



Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria delle Telecomunicazioni

corso di Satelliti e Missioni Spaziali

Lo Spettrometro a raggi gamma

studente: Rizzo Patrick
matricola: 106509

ANNO ACCADEMICO 2003-2004

Introduzione

Lo spettrometro a raggi gamma è uno strumento utilizzato per l'analisi della composizione chimica dei materiali. In ambito spaziale è uno strumento indispensabile per rivelare la presenza di vari elementi chimici sulla superficie di pianeti con atmosfere sottili.

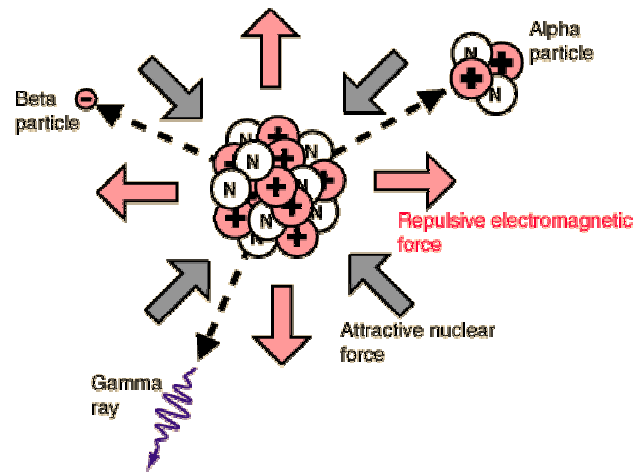
La conoscenza della composizione chimica della superficie serve ad aiutare a comprendere la formazione e l'evoluzione dei corpi celesti. Utilizzando la spettroscopia a raggi gamma può essere rilevata la presenza e misurata la concentrazione fino a 10cm nel sottosuolo dei principali elementi costituenti le rocce, come ad esempio *O, Fe, Ti, Al, Si, Mg e Ca*, e di elementi come *U, Th e K* con i loro isotopi radioattivi.

I Raggi Gamma

Il Nucleo degli atomi possiede al suo interno vari livelli energetici come l'atomo stesso, l'energia di tali livelli è però milioni di volte più alta.

Quando l'equilibrio tra le due forze più intense presenti in natura (l'attrazione nucleare e la repulsione elettromagnetica) diventa instabile, il nucleo dell'atomo decade da uno stato energetico all'altro emettendo 3 tipi di radiazioni ad alta energia:

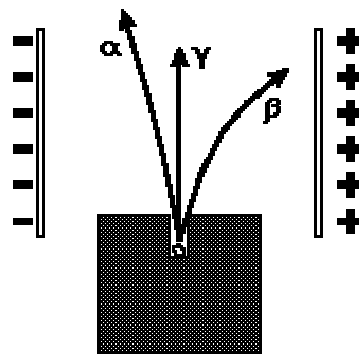
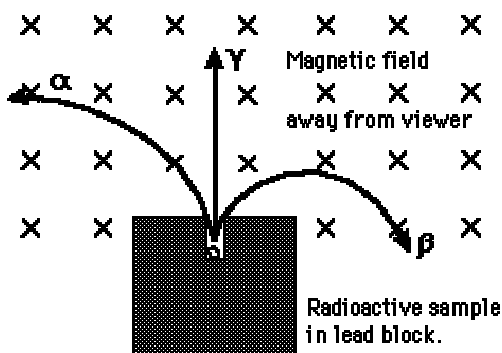
raggi *alfa*, *beta* e *gamma*.



I raggi alfa sono composti da 2 neutroni e 2 protoni (carica positiva).

I raggi beta da elettroni (carica negativa).

I raggi gamma, al contrario delle altre due forme di radiazioni, sono delle onde elettromagnetiche (fotoni) e non delle particelle cariche elettricamente. Campi magnetici ed elettrici quindi non cambiano la loro traiettoria.



I raggi gamma si distinguono dai raggi X, oltre per la loro più elevata frequenza ed energia, per il fatto che provengono direttamente dal nucleo degli atomi, mentre i raggi X sono generati a causa di improvvise accelerazioni di elettroni ad alta energia (*bremstrahlung*).

I raggi gamma sono le onde elettromagnetiche con la più alta frequenza ed energia.

L'instabilità di un elemento (e quindi l'emissione di raggi gamma) può essere naturale, come in alcuni isotopi di vari elementi chimici (Uranio, Potassio, Torio, Carbonio), oppure stimolata da radiazioni estremamente energetiche provenienti dall'esterno.

Interazione delle radiazioni con la materia



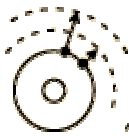
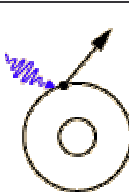


In base all'energia delle radiazioni che incidono su un materiale, questo ha dei comportamenti differenti. Con energia non si intende semplicemente l'ampiezza o il n° di particelle che colpiscono la materia, bensì l'energia di ogni singola particella incidente, misurata in *elettronVolt* (l'energia di un elettrone accelerato da un campo elettrico di 1 *volt*).

Quest'energia, assimilabile all'energia cinetica di un proiettile, aumenta con la frequenza della radiazione e varia in base al tipo di particella che la trasporta. In radiazioni elettromagnetiche l'energia di un fotone è data dalla relazione $E = h\nu$

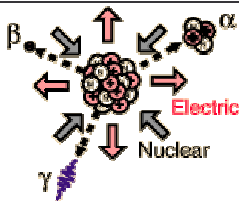
,dove h rappresenta la costante di Planck e ν la frequenza dell'onda elettromagnetica.

Nella seguente tabella vengono riportati alcuni tipi di radiazione con relative energie e effetti sulla materia.

Radiazioni Elettromagnetiche: l'energia è trasportata da fotoni

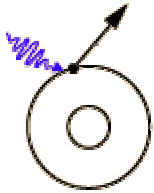
| Tipo di radiazione | Frequenze / lunghezze d'onda | energia | Effetto sulla materia | |
|--------------------|--|--------------------------|---|--|
| Microonde | 1,6-30 GHz / 187 – 10 mm | 10 - 1000 μeV |  | rotazione e torsione molecolare e quindi calore |
| Infrarosso | 0.03–40·10 ¹⁵ Hz/ 1mm – 750 nm | 1 – 1500 meV |  | vibrazione molecolare e quindi calore |
| Visibile | 40 – 75·10 ¹⁵ Hz/ 750-400 nm | 1,5 – 3,2 eV |  | Vibrazione molecolare e transizione di livello degli elettroni |
| Ultravioletta | 75 – 300·10 ¹⁵ Hz/ 400 – 10 nm | 3,2 – 124 eV |  | Transizione di livello degli elettroni e ionizzazione di alcuni elementi |
| Raggi X | 10 ¹⁶ – 10 ²⁰ Hz/ 10 nm-1pm | 124 eV – 1MeV |  | Ionizzazione |
| Raggi Gamma | > 10 ²⁰ Hz / < 1 pm | 1 – 3 MeV |  | Ionizzazione, e per energie superiori a 1,02 MeV produzione di coppie elettrone-positrone |

I raggi cosmici non sono una radiazione elettromagnetica: sono composti al 90% da protoni e per il resto da raggi alfa e altre particelle subatomiche.

| | | | |
|---------------|---|--|---|
| Raggi cosmici | In media 0,3 GeV con punte fino a 1000 TeV |  | L'energia è talmente elevata da rendere instabile il nucleo di alcuni elementi provocando l' emissione di raggi gamma e neutroni |
|---------------|---|--|---|

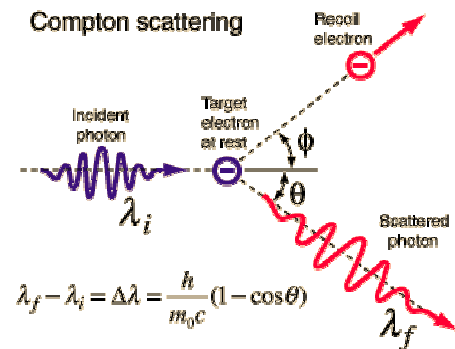
Ionizzazione

La ionizzazione è il processo che comporta l'espulsione di un elettrone dall'atomo, il quale resta con una carica positiva ed è chiamato perciò ione positivo. Una radiazione produce questo effetto quando la sua energia è sufficientemente elevata da superare l'energia di ionizzazione dell'atomo. Tale energia varia da elemento a elemento. In particolare è bassa per gli elementi alcalini che hanno un solo elettrone nel guscio più esterno, alta per i gas nobili che hanno il guscio di elettroni completo. Ad esempio un atomo di sodio (Na) ha un'energia di ionizzazione pari a 5,14 eV, mentre per ionizzare un atomo di Neon ci vogliono 21,56 eV.



Quando l'energia del fotone di radiazione ionizzante viene trasferita completamente all'elettrone espulso (urto non elastico) si parla di **fotoionizzazione**.

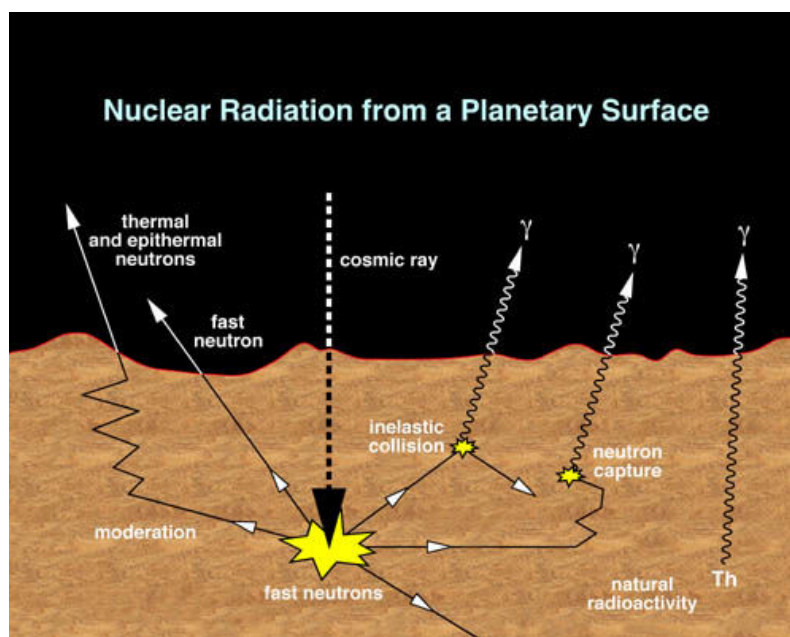
Se l'energia viene in parte trasferita all'elettrone (urto elastico) e la restante parte viene emessa sotto forma di un altro fotone ad energia (e frequenza) più bassa si parla di **scattering di Compton**.



Raggi gamma provenienti dalla superficie dei pianeti

I raggi cosmici fortunatamente vengono in gran parte schermati dall'atmosfera terrestre, ma in pianeti con atmosfere sottili, quali Marte, Mercurio e in satelliti naturali come la Luna i raggi cosmici colpiscono il suolo e interagiscono con i materiali presenti su di esso.

Elementi chimici sottoposti a tali energie diventano instabili ed emettono raggi gamma.



Rilevamento di radiazioni ionizzanti

I dispositivi utilizzati per la rivelazione e la misurazione di radiazioni ionizzanti sono principalmente di quattro categorie:

- **ionization counters:** un filo teso all'interno di un cilindro riempito di gas viene mantenuto ad un alto potenziale positivo. La carica totale prodotta dal passaggio di una particella ionizzante passante attraverso il volume attivo, può essere immagazzinata e misurata. La carica totale è proporzionale al numero di eventi ionizzanti. Un dispositivo di questo tipo è il contatore Geiger.
- **particle track devices:** dispositivi che fotografano la traccia del passaggio di particelle. Dispositivi di questo tipo sono le camere a bolle.
- **scintillation counters:** Le radiazioni possono essere misurate mediante l'utilizzo di scintillatori, sostanze che emettono luce quando vengono colpite da particelle ionizzanti. Misurando l'intensità della luce emessa dallo scintillatore si ottiene una misura della radiazione. Questo principio è sfruttato negli spettrometri a raggi gamma attuali.
- **Semiconductor detectors:** Ancora in fase sperimentale. Utilizzati in spettrometri a raggi gamma al posto degli scintillatori o in abbinamento con loro, promettono prestazioni superiori.

Ogni elemento colpito da raggi cosmici produce raggi gamma con valori di energia caratteristici. Contando le particelle emesse e misurando la loro energia è possibile stabilire da quali elementi chimici è composto il materiale analizzato e con quali concentrazioni.

L'energia caratteristica di queste emissioni costituisce l'equivalente di un' "impronta digitale" inconfondibile dell' elemento e ne rivela la natura.

L'intensità dello spettro rivela la concentrazione di tale elemento nel materiale investigato

Rilevatori nello spettrometro a raggi gamma

Il cuore di uno spettrometro gamma è il suo rivelatore.

Negli spettrometri più usati è costituito da materiali scintillatori e da un array di fotomoltiplicatori.

Esempi di materiali scintillatori e altri rilevatori utilizzati negli spettrometri a raggi gamma:

- cristalli di ioduro di sodio drogati con tallio "NaI(Tl)"
- cristalli di ioduro di Cesio drogati con tallio "CsI(Tl)"
- cristalli di ossido di germanato di bismuto "BGO" ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)
- plastica borata
- Xenon allo stato liquido (LXe)
- cristalli di Cadmio - Zinco - Tellurio "CdZnTe"
- ioduro di mercurio (HgI_2)
- fluoruro di bario (BaF_2)
- Germanio ad alta purezza "HPGe" , "Li-drifted-Ge"

Funzionamento dello spettrometro a raggi gamma

Quando un raggio gamma penetra nel scintillatore e ionizza un suo atomo, l'elettrone espulso collide a sua volta con altri elettroni eccitandoli e provocando l'emissione di fotoni di radiazioni visibili o ultraviolette.

L'energia totale di questa cascata di fotoni (lambo di luce) è pari all'energia del fotone gamma incidente nel caso di fotoionizzazione, mentre se avviene l'effetto *Compton* l'energia totale del lambo potrebbe essere leggermente inferiore, dato che qualche fotone gamma potrebbe sfuggire al cristallo.

L'intensità del lambo luminoso è proporzionale all'energia (eV) del fotone, mentre il numero di lampi è proporzionale all'intensità dei raggi gamma.

Un sensore sensibile alla radiazione visibile (solitamente un array di fotomoltiplicatori) converte i flash luminosi in segnali elettrici che, una volta amplificati, vengono inviati all'analizzatore.

Il rivelatore attualmente più utilizzato è il cristallo di ioduro di Sodio drogato con Tallio $NaI(Tl)$. Viene preferito agli altri materiali essenzialmente per tre motivi:

- abbinato a fotomoltiplicatori è lo scintillatore con la migliore risoluzione,
- buona trasparenza e quindi visibilità anche dei flash più deboli
- economicità del processo produttivo dei cristalli

Dato che la probabilità che un raggio gamma passi attraverso un grande cristallo senza che venga rilevato è più piccola di quella che si avrebbe con un cristallo piccolo, l'efficienza di un rivelatore è data anche dalle dimensioni del cristallo.

L'accuratezza della stima dell'abbondanza degli elementi dipende dalla risoluzione dello spettrometro e dalla capacità di sopprimere o sottrarre le sorgenti di rumore che interferiscono con i raggi gamma di interesse.

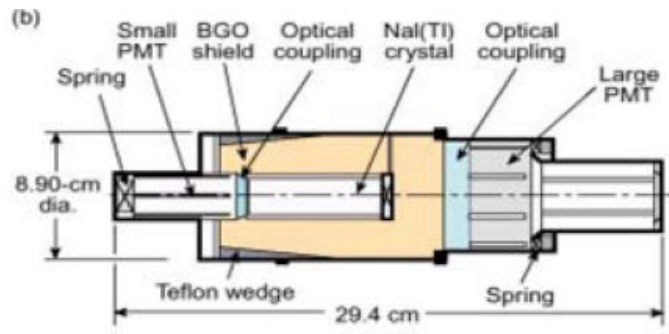
Il **rumore di sottofondo** è dovuto principalmente ai raggi gamma generati dall'interazione dei raggi cosmici con i materiali del satellite, a maggior ragione se lo spettrometro è montato sul corpo del satellite anziché su di un braccio. Senza un'adeguata schermatura tale rumore degraderebbe significativamente il rilevamento della superficie del pianeta. Un'altra fonte di rumore di sottofondo è causata dai raggi cosmici che interagiscono direttamente con il rivelatore.

Un metodo per schermare gli effetti di questi rumori è l'utilizzo di **collimatori attivi**, costituiti a loro volta da scintillatori dotati di una risoluzione più scarsa rispetto al rivelatore, che rilevano interazioni simultanee nello schermo e nel rivelatore inibendo la misurazione di tale evento (effetto anti-coincidenza). Il più usato tra i materiali scintillatori negli schermi attivi è il cristallo di germanato di bismuto (*BGO*). L'utilizzo di collimatori attivi è anche utile per l'assorbimento di raggi gamma generati all'interno del rivelatore dovuti all'effetto Compton.

Tuttavia c'è il rischio di perdere parte dell'informazione utile utilizzando schermi attivi. Per esempio picchi dovuti a produzione di coppie elettrone-positrone possono venire significativamente ridotti dall'effetto anti-coincidenza.

Sezione dello spettrometro a raggi gamma utilizzato nella missione *NEAR* (lanciata nel 1996) per rilevare la composizione chimica della superficie dell'asteroide 433 Eros:

- rivelatore centrale al NaI(Tl) , schermo al BGO , relativi fotomoltiplicatori (PMT) in metallo-ceramica.



Tutte le missioni spaziali di successo fino al 2001 montavano spettrometri a raggi gamma a bassa risoluzione basati su scintillatori. Quando si utilizza questa tecnologia, pochi picchi isolati compaiono nello spettro e per determinare i count-rate per la maggior parte dei raggi gamma di interesse è necessario l'uso di tecniche "response function fitting".

L'accuratezza dei picchi determinati con questi metodi dipende in larga misura dall'accuratezza dei modelli usati per il rumore di sottofondo.

Vi sono dei rilevatori basati su semiconduttori allo stato solido (come Ge, Si) molto più efficienti dei cristalli di NaI(Tl) .

Ad esempio i cosiddetti "lithium-drifted germanium crystals" hanno una risoluzione 50-80 volte superiori rispetto al NaI(Tl) .

Rilevatori al germanio ad alta purezza (HPGe) sono utilizzati nello spettrometro a bordo del satellite *Mars Odyssey* (lanciata nel 2001). Tale sensore è in grado di misurare raggi gamma nell'intervallo $0,3 - 8 \text{ MeV}$ suddividendo lo spettro in ben 16000 canali.

Tuttavia i processi produttivi di questi cristalli semiconduttori sono costosi e complicati.

Inoltre per essere in grado di operare, tali cristalli devono essere mantenuti a bassissime temperature mediante radiatori (come nel satellite *Mars Odyssey*) o mediante refrigeratori, come nello spettrometro HPGe montato sul satellite *SELENE* (che verrà lanciato nel 2006).

Da considerare sono anche le relative ripercussioni sulla gestione e sulla massa del dispositivo.

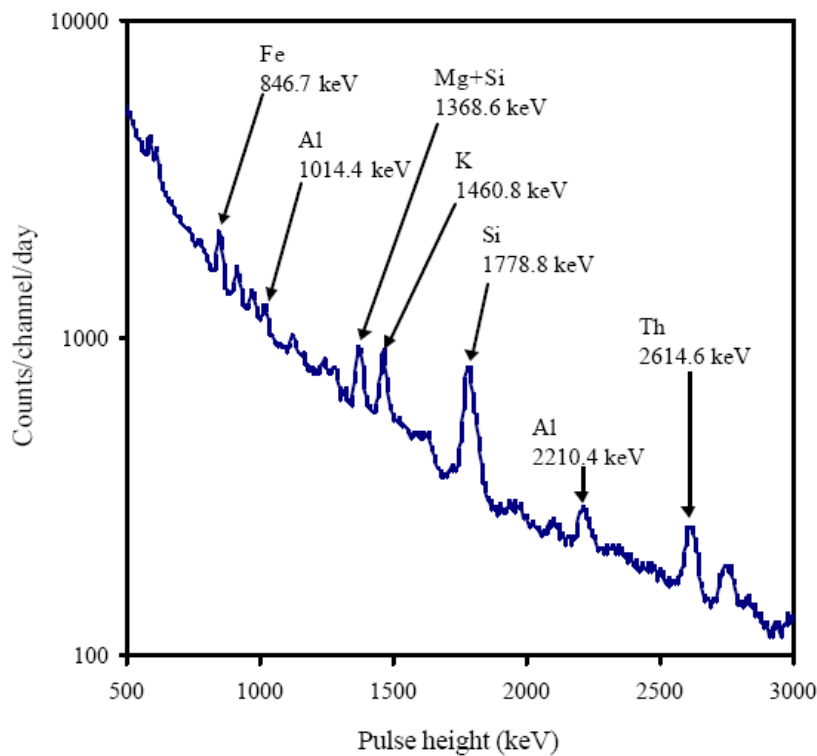
Recentemente è allo studio un particolare semiconduttore in grado di rilevare raggi gamma a temperatura ambiente, il cosiddetto cristallo di Cadmio – Zinco – Tellurio (CdZnTe). Utilizzando un array formato da 8 cristalli CdZnTe si è ottenuta una risoluzione in energia pari al 3% (*pulse height resolution FWHM @ 662 keV*), contro il 10,5% del rivelatore BGO utilizzato nella missione *Lunar Prospector* e il 8,5% del rivelatore NaI(Tl) della missione *NEAR*.

Anche questo tipo di rivelatore ha bisogno di uno scudo attivo BGO se montato sul corpo del satellite. Il quale può comunque essere usato come spettrometro di riserva, riducendo così il rischio associato all'implementazione di una nuova tecnologia.

Lo Spettrogramma

Il legame lineare tra energia dei fotoni e frequenza dell'onda elettromagnetica permette di chiamare "spettro" la misura di energia e di generare dai dati analizzati uno spettrogramma che riporta sull'asse delle ascisse l'energia (pulse height) misurata in eV e sulle ordinate il n° di lampi osservati.

Più alta è la risoluzione del rivelatore, più saranno i canali in cui si può suddividere lo spettro e quindi sarà maggiore la possibilità di discriminare picchi a energie vicine. Per ottenere una buona risoluzione sull'asse delle ordinate dello spettrogramma e quindi una buona stima della composizione chimica è necessario un lungo tempo di esposizione e un rivelatore sufficientemente grande da rilevare più particelle possibile.



Spettrogramma della superficie lunare.

Bibliografia

Siti internet:

- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- <http://grs.lpl.arizona.edu/content/about/gamma>
- http://www.geoexplo.com/airborne_survey_workshop_rad.html
- <http://rkb.home.cern.ch/rkb/PH14pp/node166.html>
- <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=1996-008A&ex=2>

Documenti pdf:

- <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/1523.pdf>
- <http://www.oberlin.edu/faculty/yijiri/phy314/gammaray.pdf>
- <http://esapub.esrin.esa.it/br/br165/BEPI.pdf>
- <http://www.ciw.edu/lrn/preprints/4621evans.pdf>