



I programmi spaziali e la problematica delle radiazioni

Rassegna delle iniziative europee

Barbara Negri - ASI

Scuola Nazionale

"Rivelatori ed Elettronica per Fisica delle Alte Energie,

Astrofisica ed Applicazioni Spaziali"

INFN-Laboratori Nazionali di Legnaro

4-8 Aprile 2005

Introduzione

- **L'effetto delle radiazioni costituisce un problema importante per le future missioni.**
- **Le cause principali di ciò sono l'incremento dell'uso dei COTS (*components off the shelf*) e l'aumento della complessità delle piattaforme, dei payload e delle missioni.**
- **Questi effetti includono**
 - **singoli eventi, come transitori nell'elettronica analogica**
 - **interferenza con i sensori (incremento del *background*)**
 - **ionizzazione dell'elettronica e dei materiali**
 - **caricamento elettrostatico "profondo" dovuto ad elettroni energetici**
 - **effetti sugli esseri umani (*non trattati in questa presentazione*)**

Centri europei

L'ESA e le agenzie nazionali hanno attivato iniziative R&D, anche per aspetti già indagati negli USA, per acquisire autonomia in un'area considerata critica anche a causa di una tendenza degli USA a bloccare l'esportazione di modelli e S/W.

I centri principali sono:

- Dip. per gli effetti e l'ambiente delle radiazioni del CNES
- ONERA-DESP, Tolosa
- QinetiQ (UK), Spacecraft Protection Group
- BIRA-IASB, Bruxelles

L'ESA ha avviato studi per strutturare un programma completo relativo allo *space weather* riguardante gli effetti anche sui sistemi terrestri di TLC, navigazione, difesa, ecc.

Un sito di riferimento è:

<http://space-env.esa.int/>

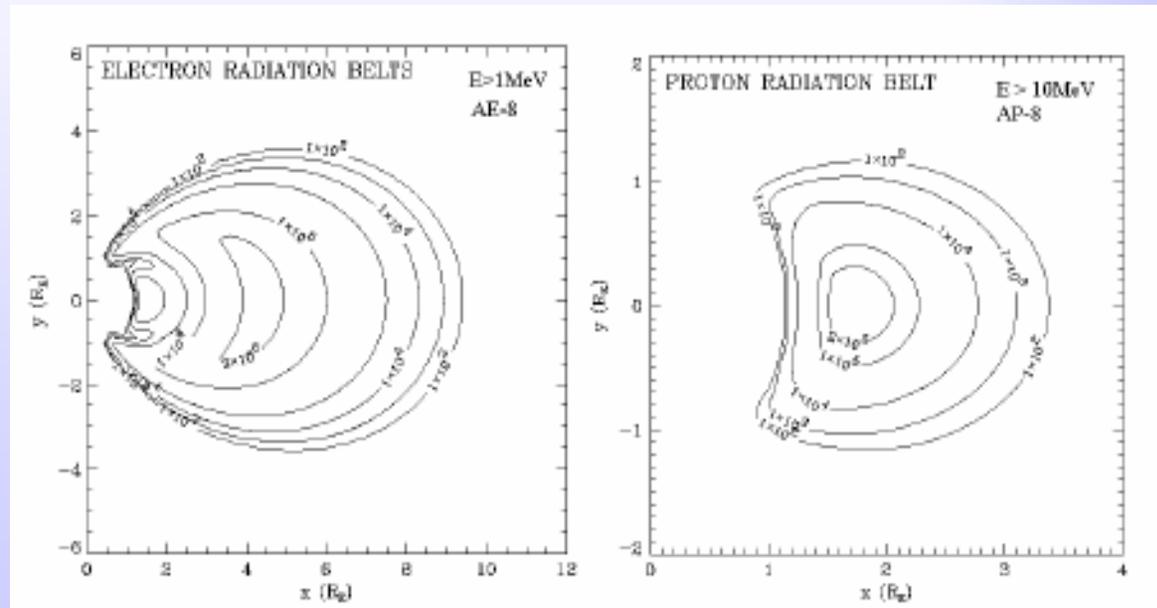
Stato della tecnologia - Modelli

Fasce di radiazione

I modelli AE8 e AP8 della NASA sono basati su misure a lungo termine di flussi di particelle basate su rilevazioni degli anni 60' effettuate tramite satelliti.

La presenza crescente soprattutto dei satelliti di navigazione in orbite basse (circa 600 Km) rende necessari modelli

migliori, soprattutto degli elettroni energetici, che tengano conto della grande dinamica delle Fasce di Van Allen. US Air Force e Onera-DESP stanno sviluppando nuovi modelli.



Stato della tecnologia - Modelli

Particelle solari energetiche

I protoni prodotti durante i picchi di attività solare non possono che essere trattati statisticamente; il modello standard usato è il JPL-1991 basato sui dati di tre cicli solari.

Sono in sviluppo sistemi di “Space Weather” che possono predire l’evoluzione sulla base di dati in tempo quasi-reale e tecniche IT quali le reti neurali. Stanno crescendo le restrizioni all’esportazione da parte degli USA.

Raggi cosmici

Il modello standard è CREME-96, basato su una prima versione (CREME) creata negli anni '80 dal U.S. Naval Research Laboratory. E' possibile l'accesso via web-site, ma non quello al S/W, che è soggetto a restrizioni.

Radiazioni secondarie

La radiazione prodotta come risultato delle interazioni delle sorgenti di radiazione primaria può assumere un ruolo molto importante. ESA fa parte di una collaborazione che ha realizzato Geant4, un simulatore *general-purpose* delle interazioni particelle-materia, che può dare una predizione accurata di radiazioni secondarie di vari tipi.

Stato della tecnologia - Strumentazione

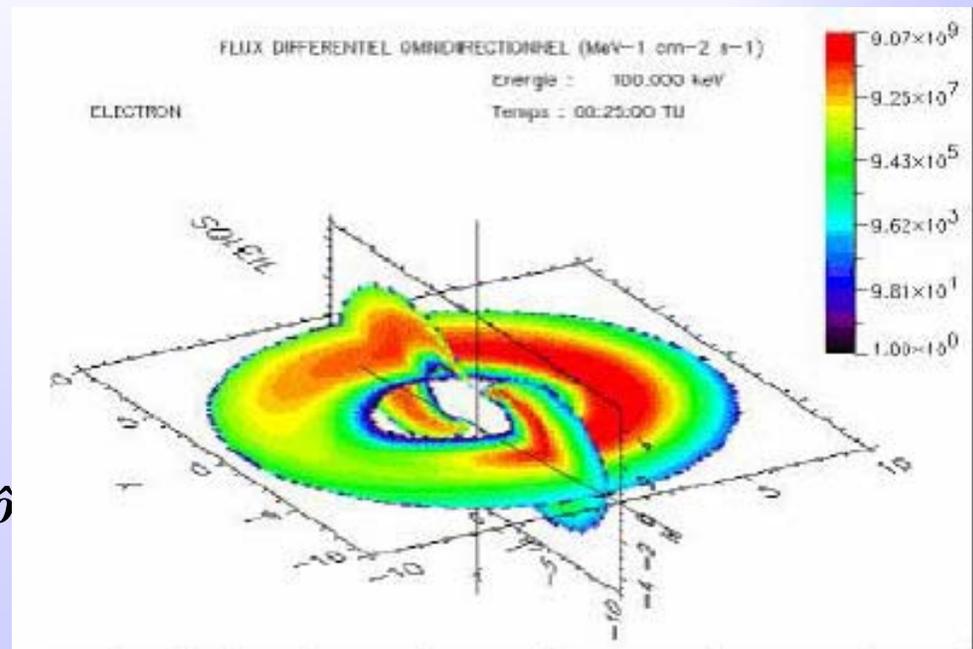
- Per le misure vengono utilizzate molteplici tecniche, dagli effetti sui componenti (*RadFETs*) e dalla scintillazione, al comune metodo di conteggio di particelle mediante sensori al silicio.
- L'identificazione del tipo e dell'energia delle particelle incidenti richiede spesso l'utilizzo di sistemi di Shielding e anche alcuni accorgimenti per evitare la "contaminazione" della misura a causa delle emissioni secondarie.
- Per quanto riguarda l'elaborazione del segnale è necessario migliorare il *signal to noise*; inoltre, la contemporanea necessità di un'elettronica veloce e della sua miniaturizzazione pongono problemi di complessità e costo.
- La calibrazione della strumentazione migliore è quella fatta con acceleratori (*beam-lines*), ma spesso non è possibile utilizzarla a causa degli alti costi e della difficile disponibilità degli impianti. Pertanto, una utile alternativa è quella di ricorrere all'utilizzo di sorgenti radioattive.

Attività in Europa – Modelli (1/3)

Come anticipato l'Europa deve recuperare un notevole *gap* rispetto agli USA. Ciò è dovuto soprattutto alla mancanza di sorgenti di dati, necessari alla validazione dei modelli. Molte attività sono quindi attualmente in corso o in programma.

- **Modelli delle fasce di radiazione**

I modelli esistenti richiedono continui aggiornamenti. Onera-DESP sta sviluppando un codice denominato *Salammbô* che simula i processi di fisica fondamentale nella fascia di radiazioni. I modelli delle fasce di radiazioni solitamente contengono medie statiche o quasi-statiche di misure da satellite, invece *Salammbô* può anche simulare l'evoluzione delle fasce di radiazioni a seguito delle tempeste nella magnetosfera.



Example of Salammbô simulation of the outer electron radiation belt

Attività in Europa – Modelli (2/3)



• SPENVIS

Il *Radiation Belt modelling, data analysis, Space Environment Information System (SPENVIS)*, sviluppato da BIRA (B), fornisce un'interfaccia web (<http://www.spennis.oma.be/spennis/>) verso un insieme di modelli e tools dell'ambiente spaziale e di strumenti per valutarne l'effetto sui sistemi spaziali. Lo sviluppo del sistema è partito nel 1995 sotto il finanziamento dell'ESA GSTP ed è stato continuamente aggiornato con nuovi modelli dell'ambiente, tools ed interfacce utente.

• OMERE

***Outil de Modélisation de l'Environnement Radiatif Externe* è un software sviluppato dalla società TRAD (F) con finanziamento del CNES, le cui potenzialità sono simili a quelle di SPENVIS.**

• POLE

Modello di ambiente elettronico geostazionario, basato su un progetto comune fra Onera (F) – Los Alamos National Labs (LANL) (US), che analizza i dati di uno strumento del LANL a bordo di un satellite del US DoD. Candidato per essere adottato come standard internazionale per questa orbita, si basa sui dati di numerosi satelliti lanciati nel periodo 1976-2001, che coprono più di 2 cicli solari.

Attività in Europa – Modelli (3/3)

- **Strumenti di calcolo per interazioni ed effetti delle radiazioni**

La collaborazione già citata *Geant4* tra ESA, CERN ed altri laboratori ha permesso lo sviluppo di capacità di simulazione per l'interazione tra particelle energetiche e satelliti (<http://geant4.esa.int/>). Molti gruppi tecnologici europei che hanno progettato payload e spacecraft hanno utilizzato *Geant4* come strumento di previsione.

- **SEDAT**

Space Environment Data Analysis Tool, sviluppato da RAL (UK) dal 1998 fornisce un nuovo approccio particolarmente flessibile per l'analisi ingegneristica dell'interazione dell'ambiente di particelle cariche con i satelliti. Il progetto contiene un grande database e l'utente può selezionare un set di dati relativi alla situazione da analizzare; i dati selezionati possono essere elaborati con uno degli strumenti forniti o con uno strumento in possesso dell'utente.

- **Ricerca sull'ambiente di radiazioni tramite monitoring diversi**

Attività nell'ambito del programma tecnologico ESA TRP condotta da Onera (F), BIRA (B), DMI (DK) e QinetiQ (UK) per coordinare l'utilizzo dei dati provenienti da diversi modelli e rivelatori di radiazione europei (XMM/ERMD, Orsted CPD, SAC-C ICARE, SREM su Proba e INTEGRAL).

Attività di monitoring in Europa

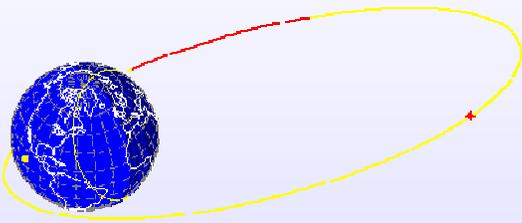
In Europa ci sono diverse attività nel campo, che riguardano molti tipi di tecnologie per rivelatori di particelle.

Sono stati realizzati molteplici strumenti per lo spazio, dai semplici dosimetri ad unità molto sofisticate. Molte attività sono di tipo R&D ed hanno lo scopo di indagare strategie di misura alternative. Il *driver* progettuale più importante è la massa: l'obiettivo è di avere un peso inferiore al Kg per uno strumento che fornisca il flusso di elettroni, protoni e ioni in un minimo di 16 canali.

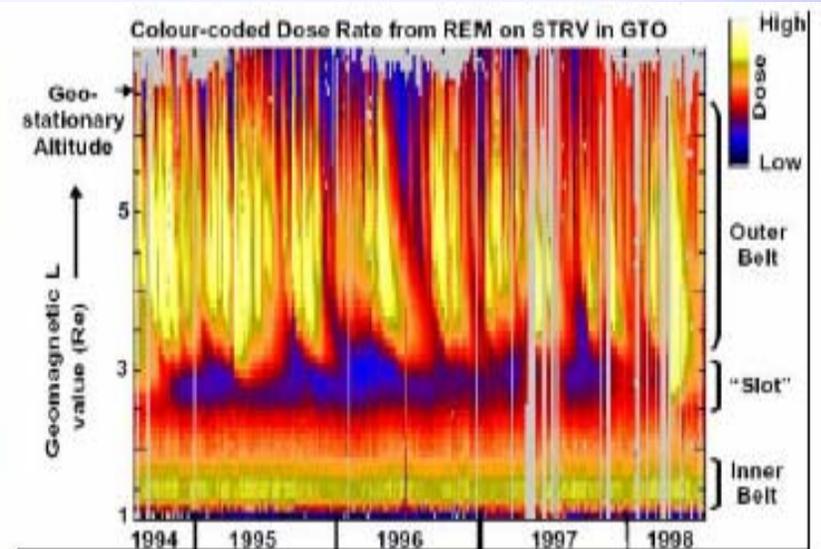
Si sottolinea che spesso ci sono stati *overlap* nelle tecnologie, dovuti principalmente alla competizione fra gruppi per la selezione dei payload. Di seguito si illustrano alcuni dei principali strumenti realizzati.

Radiation Environment Monitor (REM)

Il REM (Radiation Environment Monitor), primo *monitor* dell'ESA per la misura di elettroni e protoni nella fascia di radiazioni, realizzato da CIR e PSI (CH), consisteva in due rivelatori al Si indipendenti con differenti sistemi di schermaggio. E' stato lanciato nel 1994 con il satellite STRV-1b in orbita GTO (Geosynchronous Transfer Orbit).



Progettato per durare 1 anno ha funzionato per 4. Un secondo modello è stato installato all'esterno della MIR ed ha operato per 2 anni.



REM on STRV-1b before launch in 1994 and its radiation belt measurements

SREM ed EPIC

REM, pur avendo dimostrato l'importanza di queste misure è stato giudicato troppo specifico e costoso.

Perciò ne è stata proposta una versione “standard” (**SREM**) replicabile a basso costo e con una migliore capacità di discriminazione delle particelle. La Contraves Space (CH) ne ha prodotto 10 esemplari. Il primo è stato installato su STRV-1c (che ha operato solo brevemente). Altre unità hanno volato su PROBA (10/2001), INTEGRAL (10/2002) e Rosetta (3/2004).

Per XMM, lanciato alla fine del 1999, ESA, riconoscendo la rilevanza dell'effetto delle radiazioni, ha richiesto sin dalle prime fasi l'inserimento di uno strumento di monitoraggio. Le misure di *EPIC Radiation Monitor Subsystem*, realizzato da CESR (F), hanno permesso una più corretta elaborazione dei dati del payload primario e la generazione di allarmi nel caso di alti livelli di flusso.

SREM



Strumenti CNES

Il CNES con Onera (F) ha sviluppato una serie di esperimenti per la stazione russa MIR.

Il primo è stato **EXEQ** iniziato nel 1992.

I successivi, basati sul citato strumento per XMM, sono stati **SPICA** per la MIR, **COMRAD** per STENTOR (il cui lancio è fallito) e **ICARE** per il satellite argentino SAC-C.

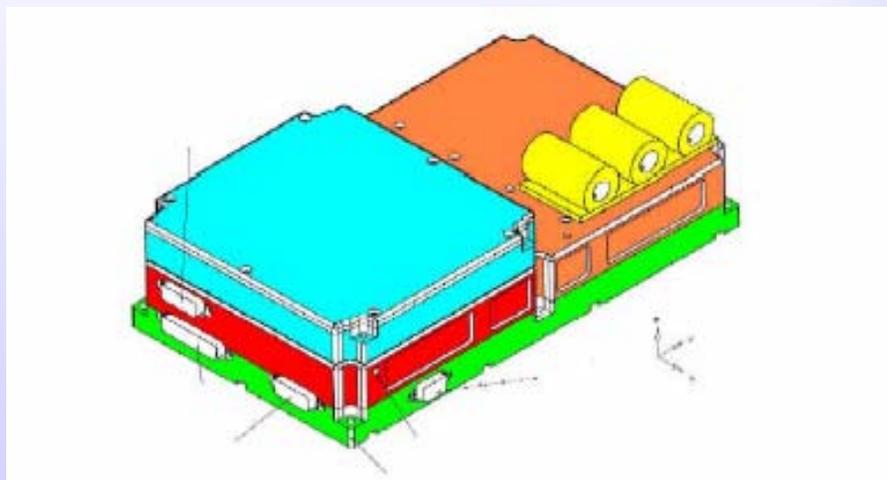
Misure:

Elettroni 100 keV – 6 MeV

Protoni 8 MeV – 30 MeV

Ioni pesanti nell'intervallo del
Linear Energy Transfer (LET)

10^3 - 10^5 MeV/g/cm²



ICARE drawing: yellow: detectors; orange: detector electronics; green processing and interface

electronics; red: power supply; blue: removable component test unit.

Altri strumenti (1)

- **Ørsted CPD**

Il satellite danese Ørsted, lanciato a Febbraio 1999, ha imbarcato uno strumento per monitorare le particelle cariche.

- **Attività QinetiQ (UK)**

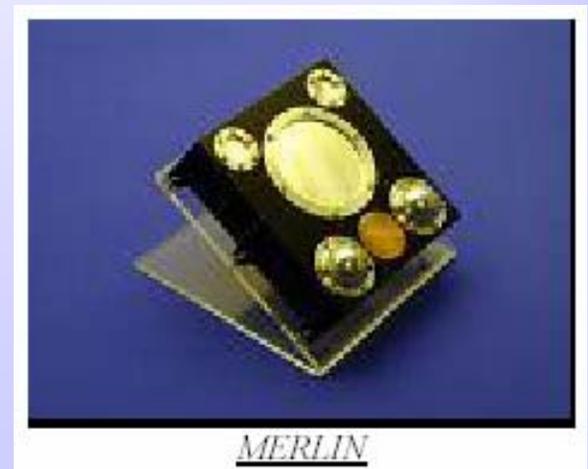
QinetiQ ha imbarcato sullo Shuttle negli anni '80 CREAM per monitorare gli effetti della radioattività indotta nelle misure astrofisiche. Il successivo sviluppo CREDO, per i flussi di protoni e ioni pesanti, ha volato sullo Shuttle e su un satellite DoD. Il nuovo strumento MERLIN volerà su GSTB-V2a e su un satellite militare inglese. Strumenti derivati da questi sono stati installati su molteplici dei piccoli satelliti costruiti dall'Università del Surrey.

Misure di MERLIN

Protoni > 40 MeV

Correnti e flussi di elettroni energetici

Ioni pesanti nell'intervallo LET 100-4·10⁴ MeV/g/cm²



Altri strumenti (2)

• MRM

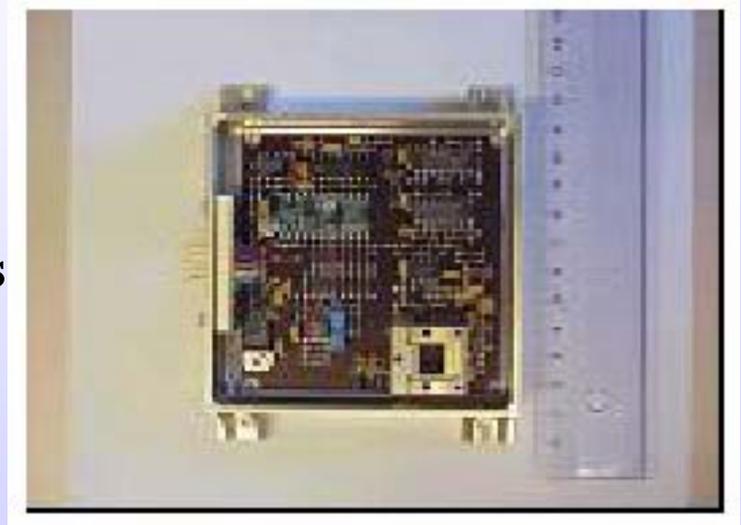
ESA ha finanziato uno studio per nuove tecnologie relative a strumenti di bassissimo costo e bassa massa. Sensys (NL) ne ha prodotto una versione basata sulla scintillazione di un materiale trasparente che sta volando su Proba-1. Misure:

Elettroni 100 keV - >8MeV in 16 canali

Protoni in 16 canali tra 4 MeV a 50 MeV

Ioni pesanti qualitativamente

Nell'ambito dello stesso studio BA e Dynamics ha sviluppato una camera "pinhole" a CCD



• RADFET

Questo dispositivo semplice sviluppato dalla Tyndall (Irlanda) misura l'effetto della dose di radiazione sulla tensione di soglia di un transistor MOSFET modificato.

Altri strumenti (3)

- **NINA**

Il telescopio per raggi cosmici NINA, sviluppato dall'INFN, ha volato nel 1998 a bordo del quarto satellite russo Resurs-O1. Un secondo modello ha volato nel luglio 1999 sul satellite italiano MITA realizzato dall'ASI.

Successivi sviluppi sono stati utilizzati per missioni con astronauti sulla MIR e sulla ISS.

- **TEPC**

La Delft University of Technology e l'Università di Padova hanno sviluppato un nuovo tipo di mini-contatore proporzionale multi-elemento (TEPC) basato su un *gas electron multiplier* (GEM). Questo contatore può essere realizzato con un piccolo volume sensibile e può quindi essere usato come microdosimetro. Il concetto può essere esteso ad una versione a molti elementi per applicazioni in cui è richiesta alta sensibilità.

Space Weather

Alcuni servizi basati su dati di radiazione sono in fase di prototipizzazione nell'ambito dello *Space weather application pilot project* dell'ESA.

I principali sono:

- SHAFT (QinetiQ) per la previsione degli effetti di caricamento profondo dei dielettrici in orbita GEO**
- GEISHA (Onera-DESP) per la previsione dell'ambiente di particelle energetiche in orbita GEO**
- SAAPS (IRF(S)) per la previsione e l'analisi post-evento di anomalie nelle piattaforme satellitari**
- SEIS (Uninova(P)) per lo sviluppo degli strumenti precedenti orientati all'utilizzo da parte degli operatori dei servizi satellitari**

Altri servizi di cui si sta analizzando il rapporto costi-benefici sono:

- effetti delle radiazioni sugli aerei**
- effetti delle radiazioni sui lanciatori**

Attività negli USA (1)

Gli USA hanno molteplici centri coinvolti per gli *Space Environments and Effects* , ma i riferimenti principali sono NASA-GSFC e gli Air Force Research Labs (AFRL).

Modelli:

- **NASA-GSFC ospita il *National Space Science Data Centre* ed è responsabile del programma LWS (Living with a Star) che include lo sviluppo di modelli e l'installazione di *Space Environment Testbeds* per la prova delle tecnologie per satelliti suscettibili di influenze da parte dello *Space Weather***
- **AFRL ha una lunga esperienza di studio del caricamento delle piattaforme in orbita e di elaborazione di codici di calcolo (per i quali ci sono restrizioni all'esportazione)**
- **JPL ha una particolare esperienza per le missioni planetarie (ambiente di Saturno e Giove), per i modelli dei flussi di particelle solari e per la degradazione delle celle solari**
- **NRL ha realizzato, come già detto, i codici CREME**

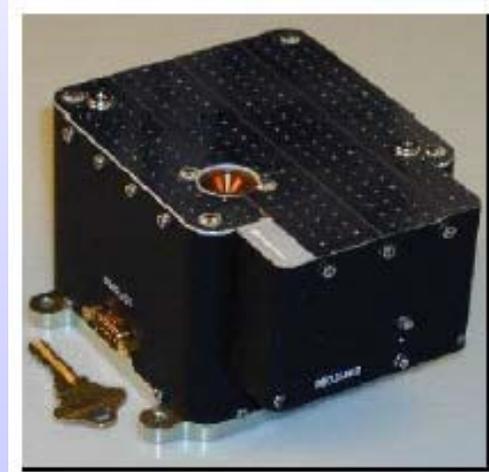
Attività negli USA (2)

Monitoraggio

Molti rilevatori hanno volato sui satelliti militari e su quelli meteorologici della NOAA. Il più significativo è CEASE (*Compact Environment and Anomaly Sensor Experiment*) della AMTEK imbarcato su vari satelliti del DoD e fornito ad Acatel per Spacebus 4000, primo caso di utilizzo su satelliti commerciali

Summary of CEASE Properties

Property	CEASE I	CEASE II
Size	4.0 x 4.0 x 3.2 "	4.0 x 5.1 x 3.2 "
Mass	1.0 kg	1.3 kg
Power*	1.5 Watts	1.7 Watts
Standard Interface	RS422 or MIL-STD-1553B	RS422 or MIL-STD-1553B
Telemetry (minimum)	10 bytes per 60 sec	10 bytes per 60 sec
Diagnostic Sensors	Lightly Shielded Dosimeter Heavily Shielded Dosimeter SEE Detector Particle Telescope	Lightly Shielded Dosimeter Heavily Shielded Dosimeter SEE Detector Particle Telescope Electrostatic Analyzer



Attività negli USA (3)

Strumenti

Negli USA vi è una minore separazione tra scienza ed applicazioni; pertanto, le missioni scientifiche possono avvalersi degli strumenti sviluppati per scopi militari e meteorologici.

Due recenti sviluppi interessanti sono stati condotti dal già citato Los Alamos National Laboratory. Le principali caratteristiche sono elencate nelle tabelle

Species	Energy range	Number of channels	time
Electrons:	50 keV - 1.6 MeV	9 differential	160 ms
Electrons	> 1.6 MeV	1 integral	160 ms
Protons	50 keV - ~50 MeV	12 differential	160 ms
Helium	~0.5 - ~1.3 MeV	3 differential	160 ms

SOPA

CPA

Species	Energy range	Number of channels	time
Electrons:	30 keV - 2.0 MeV	12 nested	256 ms
Protons:	80 keV - ~600 keV	12 nested	256 ms
Protons:	0.4 MeV - ~160 MeV	12 differential	256 ms

Attività in altri paesi (1)

•Giappone

La JAXA ha espresso l'interesse nell'attività di coordinamento riguardante la produzione di modelli, contribuendo con i propri dati, anche se fornendo una bassa visibilità del dettaglio progettuale, e delle simulazioni e calibrazione degli strumenti.

In effetti JAXA ha un programma particolarmente attivo di sperimentazione tecnologica, dedicato in particolare al controllo delle tecnologie in volo e ad un accurato monitoraggio dell'ambiente. Si può citare ad esempio la missione MDS-1 (*Mission Demonstration test Satellite-1*) dedicata proprio alla valutazione di componenti commerciali nell'ambiente spaziale.

Un accordo con gruppi americani ha permesso, tramite trasferimento tecnologico, lo sviluppo di SDOM (*Standard Dose Monitor*), un potente "particle telescopio" con scintillatori ed rivelatori al Si, di massa di circa 8kg.

Attività in altri paesi (2)

Russia

L'Università di Mosca è un centro di notevoli competenze e presiede l'*ISO Working Group* sugli standard relativi all'ambiente spaziale. In questi anni, ha fatto volare molti sensori su satelliti e, in particolare, le Università di Novosibirsk e Krasnoyarsk hanno portato avanti un notevole lavoro sul caricamento elettrostatico. La tecnologia russa, notoriamente, viene sviluppata basandosi una filosofia di grande robustezza e, pertanto, è meno suscettibile all'influenza dell'ambiente.

Cina

Sono stati sviluppati strumenti per la rivelazione di particelle energetiche per il programma congiunto con ESA, *Double Star*. Sono stati lanciati due satelliti per studiare l'effetto del sole sulla magnetosfera terrestre, ma i dati ricavati sono irregolari a seguito di problemi della piattaforma. Altre iniziative sono in programma.

Space Weather

NOAA è l'organizzazione che fornisce negli US il servizio Space Weather sia per la Difesa che per i programmi spaziali con astronauti (*manned programmes*). L'organizzazione mondiale ISES (*International Space Environment Service*) sta cercando di sviluppare un servizio globale analogo a quello fornito dalla NOAA negli USA, ma esclusivamente civile.

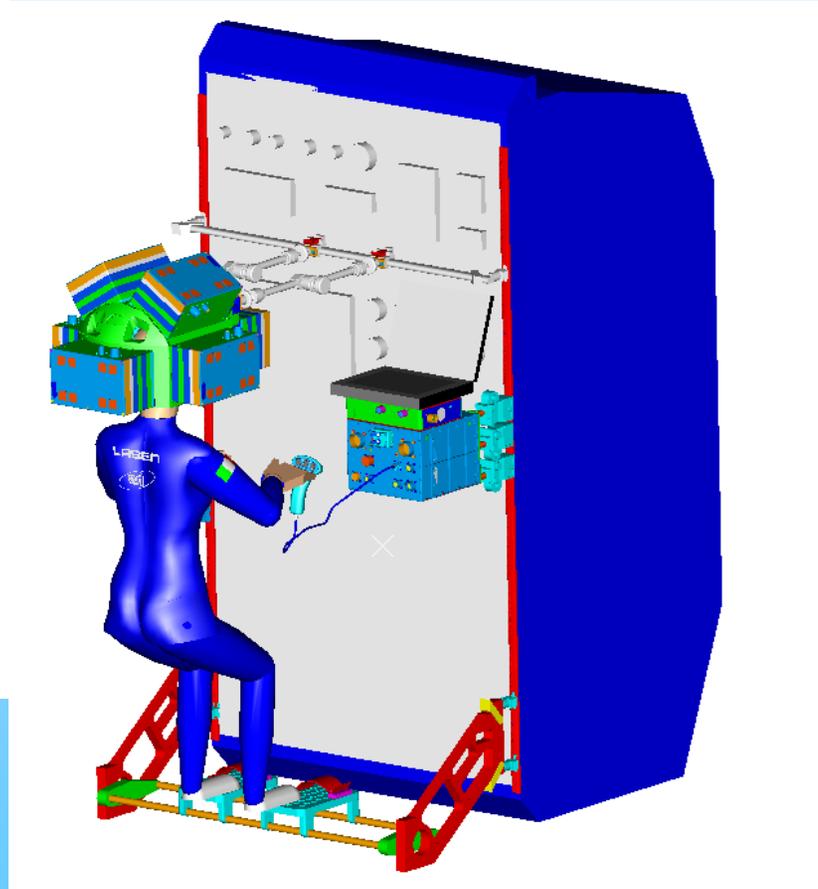
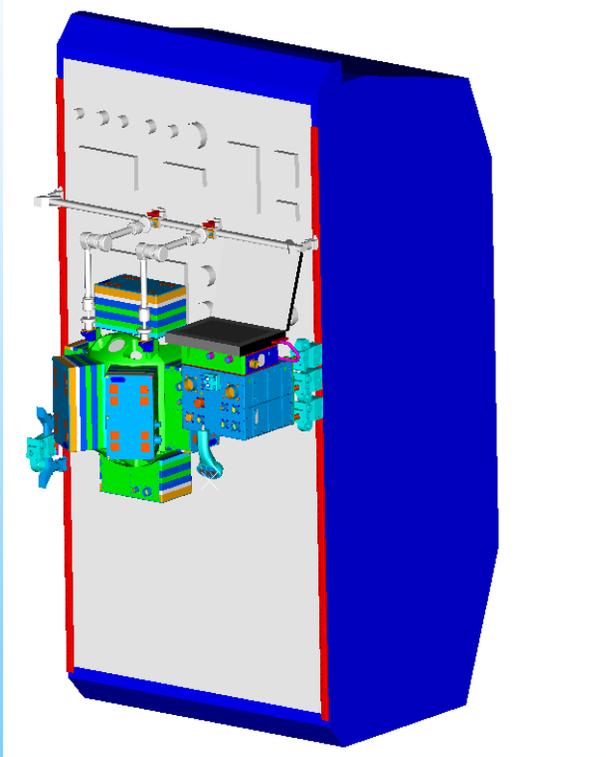
Interessi strategici dell'Europa - Modelli

- **Vi è la necessità di un accesso dell'Europa, indipendente dagli US, ai modelli dell'ambiente spaziale e che questi modelli vengano assunti come standard internazionali**
- **Gli effetti delle radiazioni sono un problema crescente per le missioni spaziali, incluse quelle “umane”, ed è essenziale che l'Europa mantenga le competenze chiave per la comprensione dell'ambiente spaziale e della modellizzazione di esso**
- **E' necessario realizzare nell'ambito del contesto europeo modelli che tengano conto di nuove e particolari esigenze degli utilizzatori, attraverso lo sviluppo di tecnologie abilitanti per missioni future**
- **E' necessario che l'Europa abbia un accesso non-dipendente alle tecnologie necessarie e che sviluppi la capacità di analisi dei dati prodotti, evitando così le situazioni di dipendenza causate dall'impossibilità di accedere ai modelli sviluppati da US. Questa posizione permetterà all'Europa di portare avanti cooperazioni paritetiche nei programmi spaziali**

Interessi strategici dell'Europa - Monitoring

- E' crescente la necessità di misure sistematiche nell'ambito dei programmi spaziali; peraltro, l'imbarco di rivelatori è spesso offerta come "opportunità di missione" a progetto avanzato. Ciò comporta costi elevati di sviluppo e difficoltà di standardizzazione.
- Il *background* acquisito dai gruppi europei nello sviluppo di rivelatori, nella simulazione, calibrazione ed analisi dati è fondamentale per la preparazione di missioni future finalizzate allo studio del comportamento delle piattaforme satellitari e alle attività di modellizzazione dell'ambiente.
- I rivelatori di radiazioni sono importanti per le missioni scientifiche per l'analisi degli effetti sui payload e per le missioni operative per lo studio del comportamento dei sistemi e per la comprensione delle anomalie di funzionamento, oltre che per le "*manned missions*" per ciò che riguarda la sicurezza degli astronauti. Inoltre, lo sviluppo di questo tipo di rivelatori presenta anche un potenziale interesse commerciale nel campo dei satelliti per telecomunicazioni.
- E' essenziale che l'Europa possieda o controlli le tecnologie abilitanti per le attività di *monitoring* e che si assicuri che l'analisi dei dati prodotti possa essere svolta interamente in un contesto europeo.

• Anomalous Long Term Effects on Astronauts



SYSTEM/SUBSYSTEMS

- Silicon Detector Subsystem (SDS)
- Visual Stimulation Subsystem (VSS)
- ElectroEncephaloGraph Subsystem (EEGS)
- Data Acquisition Unit (DAU)
- LapTop Unit (LTU)
- Support Structure Assembly (SS)
- System Harness
- EGSE
- MGSE

