

Radioprotezione nello Spazio

Dosimetria

Lorenzo Marini

Dipartimento di Fisica, Pisa

Esame, Luglio 2020

1. Il campo di radiazione nello spazio

- 1.1. Radiazione cosmica galattica
- 1.2. Eruzioni solari
- 1.3. Radiazione Confinata *TP*

2. Effetti biologici della radiazione nello spazio

- 2.1. Rischi da radiazione nello spazio
- 2.2. Protocolli di sicurezza

3. Detector

- 3.1. RAD - *Radiation Assessment Detector*

4. Schermature

Introduzione

Il nostro pianeta è costantemente bombardato da **raggi cosmici galattici** presenti nello spazio interstellare.

Rappresentano un enorme **ostacolo alle missioni spaziali**.

Possono causare il **cancro** e altri problemi di salute negli astronauti esposti.

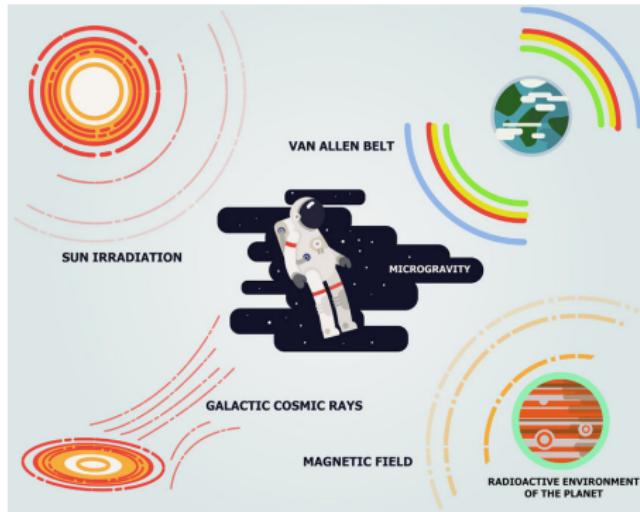
Non abbiamo ancora metodi efficaci per proteggere i veicoli spaziali e i loro occupanti con sufficiente sicurezza.

Le agenzie spaziali (**ESA¹, NASA²**) hanno promosso programmi di ricerca negli ultimi 20 anni per **quantificare i rischi associati all'esposizione alle radiazioni nello spazio e sviluppare contromisure**.

¹European Space Agency

²National Aeronautics and Space Administration (USA)

Introduzione - Rischi Principali



Tre **principali rischi** identificati nello spazio:

- ➊ Problemi fisiologici causati da **microgravità** (o gravità ridotta).
- ➋ Problemi psicologici e medici causati dall' **isolamento**.
- ➌ Rischi acuti e tardivi causati dall' **esposizione alle radiazioni**.

Il campo di radiazione nello spazio

Fonti di radiazioni rilevanti nello spazio

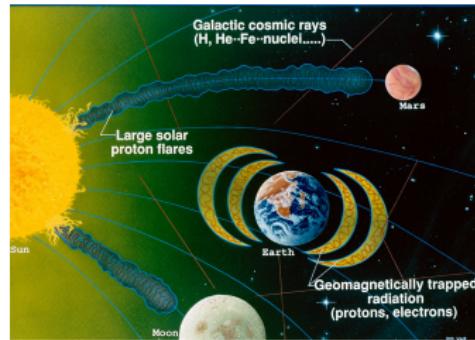
- Galactic Cosmic Rays (GCR)
- Solar Particle Events (SPE)
- Radiazione Confinata (TP)

• Galactic Cosmic Rays:

- **Spettro:**
 - 87% protoni
 - 12% ioni He
 - 1% ioni pesanti

- **Flusso:** $4 \text{ particelle}/(cm^2 s)$ al minimo solare

- **Dose** $\approx 1 \text{ mSv/day}$



• Solar Particle Events:

- **Spettro:**
 - 90% protoni
 - 10% ioni pesanti
- **Flusso:** $\approx 10^{10} \text{ part}/(cm^2 s sr)$ al minimo solare
- **Dose** $\approx \text{Sv/day}$ (fortemente dipendente dalla schermatura e dall'organo)

Radiazione cosmica galattica - CGR

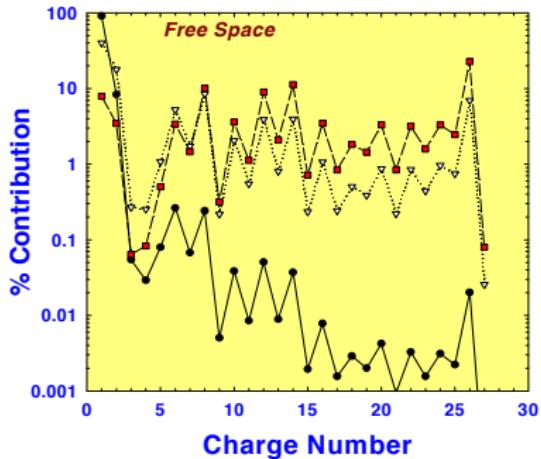


Figure: Contributo dei CGR dalle differenti particelle

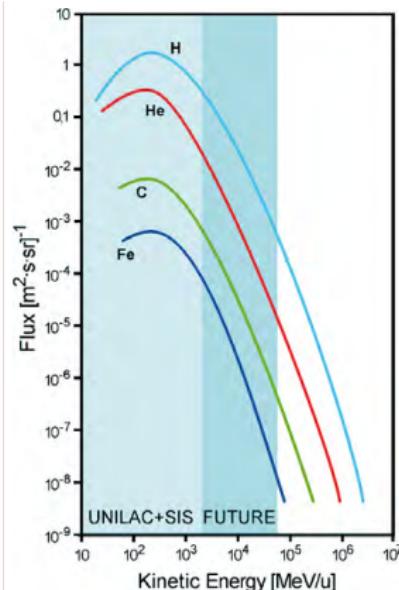


Figure: Spettri energetici di diversi ioni nei GCR [2]

Eruzioni solari - SPE

Il Sole emette una radiazione di natura particellare costituita dal **vento solare**
Flusso di particelle con velocità di $300 \div 800 \text{ km/s} \implies E \approx 100 \text{ eV} \div 3.5 \text{ keV}$

Occasionali **esplosioni superficiali** + **intensi campi magnetici** della corona solare
accelerano la materia \implies **Solar Particle Events**.

Intense esplosioni solari che iniettano alti flussi di particelle cariche, costituite
per il 90% da protoni ed il restante 10% da He ed ioni pesanti, nello spazio
interplanetario con $E \approx \text{GeV}$

Durata poche $h \div$ qualche settimana

La **pericolosità degli SPE** dipende dal flusso p di alta energia ($>100 \text{ MeV}$)
difficilmente schermabili (e da prevedere!)

Maggior contributo alla D_{eq} prodotta da SPE $\sim 90\%$

Radiazione Confinata TP

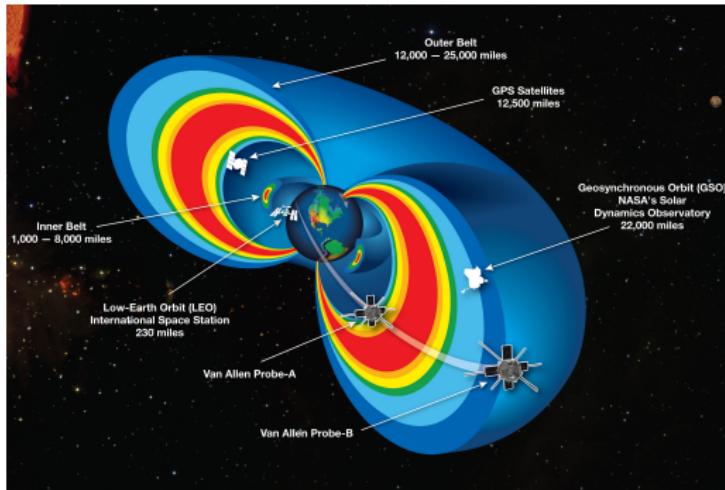


Figure: Trapped radiation: Van Allen belts

Le particelle che la compongono, prevalentemente protoni ed elettroni energetici (da 40 keV a 600 MeV), ma anche alcuni ioni più pesanti, sono raccolte in regioni concentriche a forma d'anello che si estendono sopra l'atmosfera ($h = 1.6 \div 40.0 \text{ km}$)

Effetti biologici della radiazione nello spazio



Rischi da radiazione nello spazio

Per valutare la pericolosità dell'esposizione alla radiazione è necessario considerare due grandezze:

- **Dose assorbita**, ossia la quantità di energia depositata dalle radiazioni per unità di massa ³ $D = d\varepsilon/dm$
- **Dose equivalente**, che tiene conto del danno biologico che i differenti tipi di radiazione sono in grado di infliggere⁴ $H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$

Rischi per la salute associati all'esposizione alle radiazioni spaziali [2]

- Cancro
- Effetti tardivi (stocastici) degenerativi dei tessuti
- Sindromi da radiazioni acute (i sistemi ematopoietico, gastrointestinale, cutaneo e neurovascolare).
- Effetti ereditari

³Negli USA la dose assorbita viene misurata in [rad] (Radiation Absorbed Dose), mentre nel S.I. viene misurata in [Gy]

⁴Misurata in [Sv]

Rischi da radiazione nello spazio

NASA Education - Space faring: The radiation challenge - Mod. 1, p. 8

Mission type	Radiation Dose [mSv]
Space Shuttle 41C (8-day orbiting the Earth at 460 km)	5.59
Skylab (87-day orbiting the Earth at 473 km)	11.4
Skylab 4 (87-day orbiting the Earth at 473 km)	178
ISS (up to 6 orbiting Earth at 353 km)	160
Estimated Mars	1200

Missione Skylab 4

In soli tre mesi gli occupanti della stazione spaziale hanno accumulato una dose di radiazioni simile a quella che, per effetto del fondo naturale, un italiano^a accumulerebbe in quasi 54 anni.

^aMediamente noi italiani siamo annualmente esposti a 3.3 mSv. La media mondiale è di 2.4 mSv annui

<https://www.scienzainrete.it/articolo/spazio-radiazioni-pi%C3%9C-B9-pericolose-del-previsto/claudio-elidoro/2017-07-26>

Rischi da radiazione nello spazio

- Dose eq. Terra = $10 \mu\text{Sv/d}$
- Dose eq. Luna = $100 \div 200 \mu\text{Sv/d}$
- Dose eq. Missione per Marte (9 mesi) = 1.2 Sv
 \Rightarrow *What Happens to Your Brain on the Way to Mars*
<https://www.researchgate.net/publication/275866556>

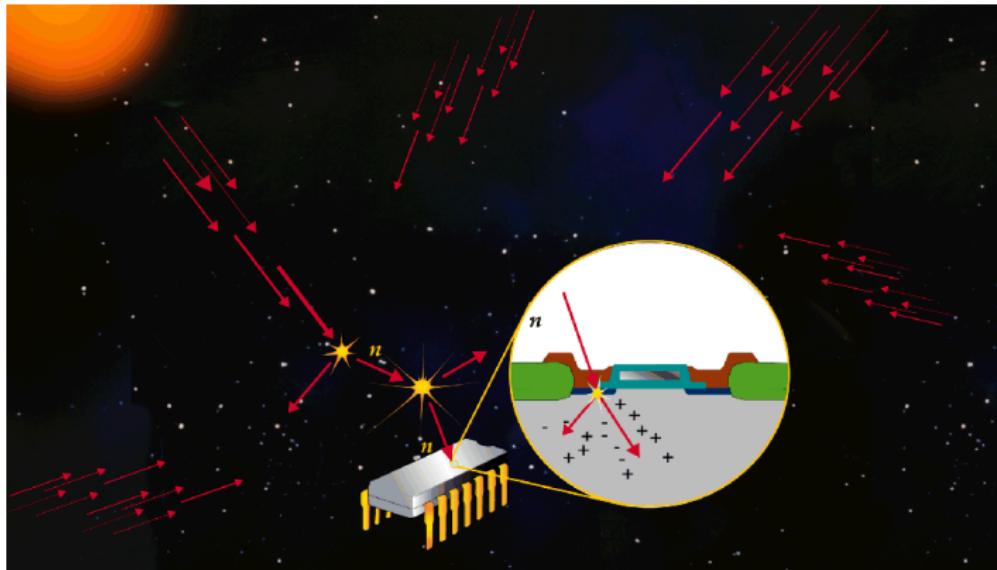
- $1 \div 2 \text{ Sv}$ Avvelenamento radioattivo lieve $\Rightarrow 10\%$ di mortalità dopo 30 dì
- Sintomi tipici includono nausea da lieve a moderata (con un 50% di probabilità a 2 Sv), con vomito occasionale, che comincia da 3 a 6 ore dopo l'irraggiamento e permane per circa un giorno.
- Seguito da una fase latente che dura da 10 a 14 giorni, quando appaiono sintomi lievi di astenia e malessere generale (con un 50% di probabilità ai 2 Sv).
- Il sistema immunitario va incontro a depressione \Rightarrow periodo di convalescenza esteso per molte infezioni comuni e un aumento del rischio di infezione opportunistica.
- Uomo: comune la sterilità temporanea.
- Donna: Aborto spontaneo oppure aumento di incidenza del parto prematuro si verifica comunemente nelle donne incinte.

Rischi da radiazione nello spazio

Effetti ed eventuali **danni recati a tutte le apparecchiature di bordo**

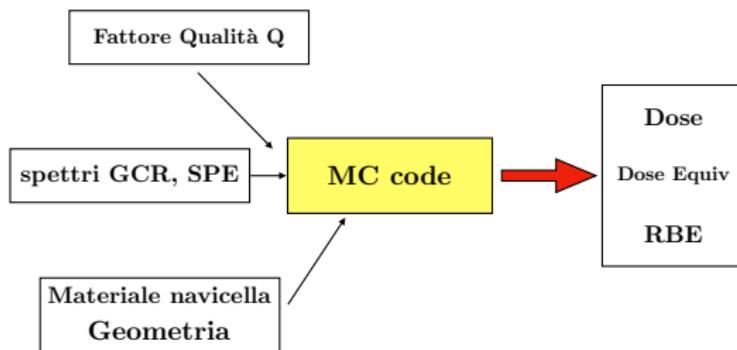
Effetti sono catalogabili in **effetti irreparabili** e **temporanei**: i primi si riscontrano soprattutto nelle apparecchiature dotate di transistors (semiconduttori), i secondi, invece, influenzano le memorie e i registri inducendo dei **cambiamenti nei bits** (*spin – flip* delle memorie logiche) e quindi **cambiamenti nelle informazioni registrate**.

Tali effetti possono limitare enormemente la durata di una missione spaziale.



Altre conseguenze meno catastrofiche, ma non per questo trascurabili, sono la creazione di interferenze nei dispositivi elettronici \Rightarrow degrado dell'efficienza della missione.

Calcoli di dose



Software principali

- FLUKA
- GEANT4
- The High Energy Transport Code (HETC^a)

^ahttps://www.researchgate.net/publication/24383391_Verification_and_Validation_of_High_Charge_and_Energy_HZE_Transport_Codes_and_Future_Development

Protocolli di sicurezza

A partire dagli anni '80 la NASA ha steso un piano normativo in linea con le regole dettate dall'OSHA⁵.

I protocolli NASA fissano un **limite massimo per l'esposizione a radiazioni ionizzanti** relativo all'intera carriera di un astronauta e stabiliscono che la **probabilità di contrarre un cancro mortale a seguito di tale esposizione** debba essere **inferiore al 3 %** \Rightarrow tecnicamente si parla di **REID⁶**.

Molto complicato tradurre questo limite in quantità di radiazione equivalenti valide in assoluto. Nella valutazione intervengono molti fattori:

- sesso
- età
- sensibilità dell'organismo alle radiazioni
- stile di vita dell'astronauta.

⁵Occupational Safety and Health Administration, l'ente deputato alla sicurezza sul lavoro.

⁶Risk Exposure Induced Death

Protocolli di sicurezza

Nella seguente tabella[3] possiamo leggere i **limiti massimi di radiazione per l'intera carriera** stabiliti dalla NASA a seconda dell'età degli astronauti e del loro genere:

Career Exposure Limits for NASA Astronauts by Age and Gender

Age(years)	25	35	45	55
Male	1500 mSv	2500 mSv	3250 mSv	4000 mSv
Female	1000 mSv	1700 mSv	2500 mSv	3000 mSv

I valori sono più bassi per gli astronauti più giovani.

Si presume che, sebbene possano vivere più a lungo degli astronauti più anziani, l'esposizione a maggiori quantità di radiazioni nelle prime fasi della loro carriera potrebbe presentare maggiori rischi per la salute durante la vecchiaia.

Protocolli di sicurezza

Depth of Radiation Penetration and Exposure Limits for Astronauts and the General Public [mSv]

	Exposure Interval	Blood Forming Organs (5 cm depth)	Eyes (0.3 cm depth)	Skin (0.01 cm depth)
Female	30 Days	250	1000	1500
	Annual	500	2000	3000
	Career	1000-4000	4000	6000
General Public	Annual	1	15	50

Integrative Risks Models Toolkit

- ARRBOD \Rightarrow Acute Radiation Risk and BRYNTRN Organ Dose
- GERMCode \Rightarrow GCR Event-based Risk Model
- NASARTI \Rightarrow NASA Radiation Track Image
- ...

<https://www.nasa.gov/hrp/elements/radiation/irModels>

Protocolli di sicurezza

Come si passa dalla **Dose** al **Rischio** \Rightarrow **NASA radiation risk model**

Per una popolazione omogenea che riceve una dose efficace E , all'età a_E , la **probabilità di morire** nell'intervallo di età da $[a, a+1]$ è descritta dal **tasso di mortalità di fondo per tutte le cause di morte**, $M(a)$ e il **tasso di mortalità per tumore da radiazione** $m(E, a_E, a)$ come

$$q(E, a_E, a) = \frac{M(a) + m(E, a_E, a)}{1 + \frac{1}{2}[M(a) + m(E, a_E, a)]}$$

La **probabilità di sopravvivenza** per vivere fino all'età a , a seguito di esposizione E , all'età a_E , sarà

$$S(E, a_E, a) = \prod_{u=a_E}^{a-1} [1 - q(E, a_E, u)]$$

Protocolli di sicurezza

Come si passa dalla **Dose** al **Rischio** \Rightarrow **NASA radiation risk model**

Il **rischio di morte indotta da radiazione** (REID⁷) è il rischio per la vita che un individuo nella popolazione muoia per un cancro causato dalla sua esposizione alle radiazioni.

$$REID = \sum_{a=a_E}^{a-1} m(E, a_E, a) S(E, a_E, a)$$

dove

$$m(E, a_E, a) = [\nu ERR(a_E, a) M_c(a) + (1 - \nu) EAR(a_E, a)] \frac{\sum_L Q(L) F(L) L}{DDREF}$$

$ERR = E/C$ e $EAR = (E - C)$ in Sv^{-1} derivano da sopravvissuti alla bomba atomica, M è il tasso di mortalità per cancro specifico per genere ed età negli USA, $\nu = 1/2$ per il cancro solido e $\nu = 0$ per la leucemia.

⁷Risk of Exposure Induced Death

Detector

Una parte importante di ogni missione con equipaggio è la dosimetria delle radiazioni, ossia il **processo di monitoraggio**, **caratterizzazione** e **quantificazione della radiazione ambientale** in cui vivono e lavorano gli astronauti.

Le missioni includono anche:

- Stime calcolate dell'esposizione dell'equipaggio durante l'attività extra-veicolare
- Valutazione di tutte le apparecchiature che producono radiazioni trasportate sul veicolo spaziale;
- Modellizzazione computerizzata completa dell'esposizione dell'equipaggio.

RAD - Radiation Assessment Detector



Launch date: 26/11/2011
Landing date: 06/08/2012

Grande miglioramento proviene dalle misurazioni dello strumento Radiation Assessment Detector (RAD) trasportato dal **rover Curiosity** durante la missione su Marte.

La maggior parte della dose è sostenuta **durante la fase di crociera**.

La dose sul pianeta può essere ulteriormente ridotta usando basi con schermatura pesante, sfruttando materiali planetari in situ.

RAD - Radiation Assessment Detector

Il 31 maggio 2013, gli scienziati della NASA hanno riportato i risultati ottenuti durante la crociera e hanno affermato che

il valore della dose equivalente per il viaggio di sola andata e senza sosta ($t_{tot} \sim 1$ anno) con i sistemi di propulsione e di schermatura attuali risulta essere 0.66 ± 0.12 Sivert.

L'esposizione a 1 Sv aumenta il rischio di morte per cancro di $\sim 5\% \Rightarrow$
Grande rischio per la salute
per qualsiasi missione umana su Marte.



RAD: calorimetro CsI per particelle cariche e raggi γ

Schermature

Esistono tre mezzi per ridurre l'esposizione alle radiazioni ionizzanti:

- Aumentare la distanza dalla sorgente di radiazione \Rightarrow GCR isotropo
- Ridurre il tempo di esposizione \Rightarrow in aumento secondo i piani di esplorazione e colonizzazione
- Schermare la radiazione \Rightarrow Sfortunatamente, la schermatura nello spazio è problematica

Quando colpiscono gli scudi le radiazioni cosmiche producono particelle secondarie e neutroni mediante frammentazione nucleare.

Sia la perdita di energia (formula di Bethe-Bloch $-\frac{dE}{dx} \sim Z/A$) sia le sezioni d'urto di frammentazione nucleare per unità di massa (formula di Bratt-Peters $\sigma \sim A^{-1/3}$) diminuiscono aumentando il numero atomico A .

I materiali leggeri e altamente idrogenati sono di più efficaci nel ridurre la dose rispetto a materiali pesanti ad alto Z come Al (materiale strutturale comune nel veicolo spaziale) o Pb .

Approfondimenti: *Space radiation protection: Destination Mars - Marco Durante*

Schermature

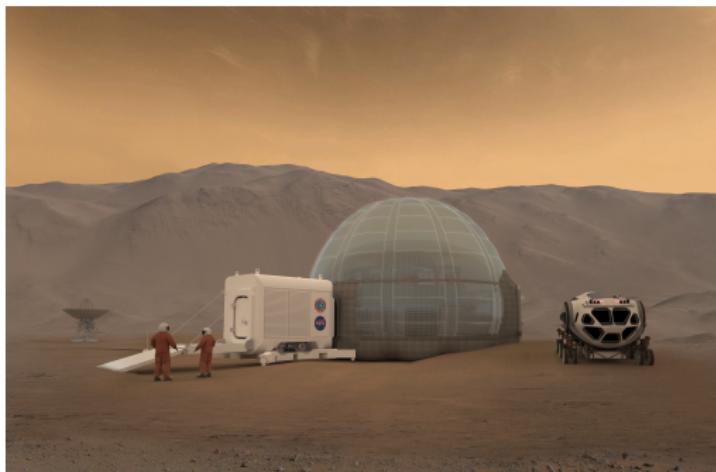
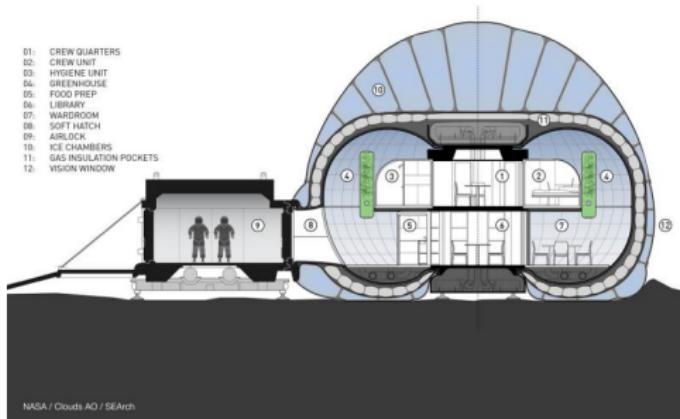


Figure: Artist's view of the mars ice house. Image from the NASA image gallery

H₂O materiale schermante efficace , un'opzione interessante sarebbe quella di coprire una base gonfiabile con un guscio di ghiaccio , che potrebbe essere estratto da Marte. La casa di ghiaccio di Marte sarebbe quasi trasparente, permettendo così alla luce naturale di entrare.

Schermature



Questo risultato paradossale è causato dalla generazione di neutroni, il cui fattore di alta qualita' alla fine aumenta la dose equivalente dietro lo scudo. Tutti i codici suggeriscono che non vi sarà alcun guadagno nei rifugi più pesanti.

References

-  **Antonella Alessandra Blancato**
Rischi da radiazione nei voli interplanetari
Tesi di Laurea, 2007-2008
-  **Marco Durante**
Recent advances in space Radiation Protection
Il Nuovo Saggiatore Vol 33, 2017
-  **Nasa**
Nasa Space Radiation Ebook
<https://www.nasa.gov/hrp/elements/radiation> 2020.
-  **Nasa, CERN**
NASA, CERN Timepix Technology Advances Miniaturized Radiation Detection
<https://www.nasa.gov/hrp/elements/radiation> 2020.
-  **Vincenzo Patera - Rome University ?La Sapienza?**
Radioprotection In Space