



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Centro Interdipartimentale di Studi e Attività Spaziali (CISAS)

**SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE TECNOLOGIE E
MISURE SPAZIALI (XX Ciclo)**

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

**Indirizzo: Astronautica e Scienze da Satellite
Curriculum: Ottica e Strumentazione Spaziale**

Tesi

**ACCOMODAMENTO E PRESTAZIONI DEL PAYLOAD OTTICO DI BEPICOLOMBO, SIMBIO-
SYS, IN RELAZIONE AI SUOI REQUISITI SCIENTIFICI**

**ACCOMODATION AND PERFORMANCE OF BEPICOLOMBO OPTICAL PAYLOAD (SIMBIO-
SYS) ACCORDING TO ITS SCIENTIFIC REQUIREMENTS**

Dottoranda: Anna Gasparotto

Supervisore: Prof. Stefano Debei (Dip. Ingegneria Meccanica, Università degli studi di Padova)

Co-Supervisore: Dr.ssa Antonella Ferri (Thales Alenia Space)

Coordinatore dell'Indirizzo: Prof. Giampiero Naletto (Università degli Studi di Padova)

Direttore della Scuola: Prof. Cesare Barbieri (Università degli Studi di Padova)

31 Luglio 2008

Indice

Summary	pag. I
Riassunto	pag. XI
Introduzione	pag. XIII
Lista degli acronimi	pag. XVII
CAPITOLO 1 – OBIETTIVI SCIENTIFICI PER SIMBIO-SYS	pag. 1
1.1 Caratteristiche del pianeta Mercurio	pag. 1
1.2 Geologia superficiale di Mercurio	pag. 3
1.3 Vulcani	pag. 4
1.4 Tettonica	pag. 5
<i>1.4.1 Struttura geologica.</i>	pag. 5
<i>1.4.2 Proprietà meccaniche della litosfera</i>	pag. 5
<i>1.4.3 Età superficiale</i>	pag. 5
<i>1.4.4 Composizione superficiale</i>	pag. 5
<i>1.4.5 Proprietà della regolite e processi atmosferici</i>	pag. 7
<i>1.4.6 Geofisica</i>	pag. 7
<i>1.4.7 Esosfera</i>	pag. 8
CAPITOLO 2 – GLI STRUMENTI	pag. 9
2.1 Descrizione degli strumenti	pag. 9
<i>2.1.1 Introduzione</i>	pag. 9
<i>2.1.2 Banco ottico</i>	pag. 10
<i>2.1.3 HRIC (High Resolution Imaging Camera)</i>	pag. 11
<i>2.1.4 STC (STereo imaging Channel)</i>	pag. 13
<i>2.1.5 VIHI (Visible and near Infrared Hyper-spectral Imager)</i>	pag. 15
2.2 Prestazioni degli strumenti	pag. 17
<i>2.2.1 HRIC</i>	pag. 17
<i>2.2.2 STC</i>	pag. 17

2.2.3 <i>VIHI</i>	pag. 18
2.2.4 <i>Osservazione di Mercurio</i>	pag. 18
2.2.5 <i>Strategia osservativa di VIHI</i>	pag. 18
2.2.5.1 <i>Mappatura mineralogica globale</i>	pag. 18
2.2.6 <i>Strategia osservativa di HRIC</i>	pag. 19
2.2.6.1 <i>Copertura superficiale</i>	pag. 19
2.2.7 <i>Strategia osservativa per STC</i>	pag. 19

CAPITOLO 3 – REQUISITI DI PUNTAMENTO E

ALLINEAMENTO	pag. 21
3.1. Puntamento/ interazione con LAT	pag. 21
3.1.1 <i>Orbita, operazioni, puntamento</i>	pag. 21
3.1.2 <i>Requisiti di puntamento</i>	pag. 21
3.2 RSE	pag. 22
3.3 Raccolta dei dati	pag. 22
3.4 Sommario dei requisiti di allineamento e puntamento	pag. 23
3.4.1 <i>HRIC</i>	pag. 23
3.4.2 <i>STC</i>	pag. 23
3.4.3 <i>VIHI</i>	pag. 23
3.4.4 <i>LAT</i>	pag. 24

CAPITOLO 4 – RIDUZIONE DELLA STRAY LIGHT CON I

BAFFLES	pag. 25
4.1 Introduzione	pag. 25
4.2 Formulazione analitica del problema	pag. 26
4.3 Qualche definizione	pag. 26
4.3.1 <i>Funzione di ombreggiamento del baffle</i>	pag. 27
4.3.2 <i>Requisiti di prestazione</i>	pag. 27
4.4 Disegnare i baffles (metodo grafico)	pag. 27
4.5 Tecniche di disegno	pag. 28

4.5.1	<i>Considerazioni preliminari</i>	pag. 28
4.5.2	<i>Setti dei baffles</i>	pag. 28
4.5.3	<i>Bordi dei setti</i>	pag. 29
4.5.4	<i>Radiazione diffratta</i>	pag. 29
4.6	Baffles con profili differenti	pag. 29
4.6.1	<i>Profilo Radovich</i>	pag. 30
4.6.2	<i>Configurazione Greynolds</i>	pag. 30
4.6.3	<i>Profilo Stavroudis</i>	pag. 31
4.6.4	<i>Il concetto Linlor</i>	pag. 33
4.6.5	<i>Concentratore parabolico composto (CPC) - il cono di Winston</i>	pag. 33
4.6.6	<i>Concentratore ellittico composto (CEC)</i>	pag. 34
4.6.7	<i>Confronto fra le varie soluzioni</i>	pag. 34
CAPITOLO 5 – STUDIO E SIMULAZIONE DI BAFFLES CON OPTICAD		pag. 37
5.1	Il programma Opticad	pag. 37
5.2	Analisi degli intervalli di confidenza	pag. 37
5.3	Analisi parametrica di un baffle per HRIC	pag. 40
5.4	La geometria Stavroudis	pag. 46
5.4.1	<i>Simulazioni con baffle riflettente</i>	pag. 48
5.4.2	<i>Simulazioni con superfici assorbenti</i>	pag. 49
5.4.3	<i>Approssimazione delle ellissi</i>	pag. 50
5.5	Analisi termica	pag. 52
5.5.1	<i>Proprietà ottiche delle superfici</i>	pag. 53
5.5.2	<i>Analisi preliminari</i>	pag. 54
5.5.3	<i>Variazione della riflettività del baffle</i>	pag. 56
5.6	Simulazione di baffle per STC	pag. 57
CAPITOLO 6 – EFFETTI DELL’AMBIENTE SPAZIALE		pag. 61
6.1	Introduzione	pag. 61

<i>6.1.1 Effetti sull'elettronica: definizioni</i>	pag. 62
<i>6.1.2 Effetti sui materiali</i>	pag. 63
<i>6.1.3 Effetto Čerenkov</i>	pag. 63
<i>6.1.4 Ambiente particellare</i>	pag. 64
<i>6.1.5 Scattering da polvere interplanetaria</i>	pag. 64
6.2 Effetti della radiazione intrappolata sui satelliti e loro componenti .	pag. 64
6.3 Il campo magnetico di Mercurio	pag. 65
6.4 Effetti della radiazione ed accorgimenti per minimizzarli	pag. 68
6.5 Simulazioni con SPENVIS	pag. 70
Conclusioni	pag. 79
Bibliografia	pag. 81

Summary

Introduction

BepiColombo space mission (planned by European Space Agency in co-operation with Japanese Space Agency JAXA, launch scheduled for 2012), is intended for the study of planet Mercury, with two different spacecrafts: MPO (Mercury Planetary Orbiter) and MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter). In order to analyze the geological and mineralogical characteristics of the Mercury surface and the exosphere, MPO module will have on board, among other instruments, SIMBIO-SYS (Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo – Integrated Observatory SYStem), an integrated package which has three different optical channels:

- HRIC (High Resolution Imaging Channel), a high resolution camera operating in 400 – 900 nm spectral range (visible),
- STC (Low Resolution Colour Imaging and Stereo Channel), a camera with stereoscopic and colour imaging capability,
- VIHI (Visible and near-Infrared Hyperspectral Imager), a spectrometer in visible and near infrared spectral range.

The STC Channel will provide the global colour coverage of the surface at 50 m/pixel resolution with the aim of defining the main geological units, large scale tectonic features, impact crater population and, if present, volcanic edifices. The STC Stereo Channel will be a useful tool to define with high detail the topography, which is a critical measurement for tectonic features characterisation, geological units lateral boundaries definition and for measuring important geophysical parameters.

The STC will also provide the context for the HRIC investigation at 5 m/pixel resolution at perihelion. Main objective of HRIC is the characterisation of special surface targets with high resolution.

VIHI is a hyperspectral imager in the visible and near-infrared range that will map the planet in order to provide the global mineralogical composition of the surface. The selected spectral characteristics (range 400 – 2000 nm with possible extension to 2200 nm, spectral sampling 6.25 nm) and the imaging capability (IFOV=250 μ rad, which translates into a 100 m spatial resolution at perihelion) will permit to unambiguously cross-correlate the surface composition with the morphological features.

Scientific objectives for SIMBIO-SYS package

Mercury is the smallest planetary body in the inner Solar System, together with the Moon. The two planetary bodies however exhibit large differences in densities (3.3 g/cm³ for the Moon, 5.4 g/cm³ for Mercury) which indicate that they must be different in internal composition and that their formation and evolution must have followed different paths.

Most models of Mercury indicate that it should have a large dense core, the radius of which will depend on the evolutionary model and on the overall composition of the planet. In general, it is widely inferred by Mercury's large density that its composition is characterised by a large Fe/Si ratio. However, different evolutionary scenarios could lead to such a large Fe/Si ratio. While Mercury might have formed from highly reduced material, its larger density seems to indicate an overall higher metallic iron content.

The illuminated surface of Mercury is dominated by craters (fig. 1), basins and hilly and lineated terrain, and also large basins and large tracts of relatively smooth areas. The impact crater population (about 447 craters) differs in size and preservation degree. They range in size from 100 m to 1300 km (Caloris Basin). Craters are generally classified according to the degree of degradation of morphological components such as rays, secondary craters, rim sharpness and the presence of interior terraces. Small craters on Mercury are bowl-shaped but with increasing size they develop central peaks, terraces, ejecta deposits and swarms of secondary impact craters.

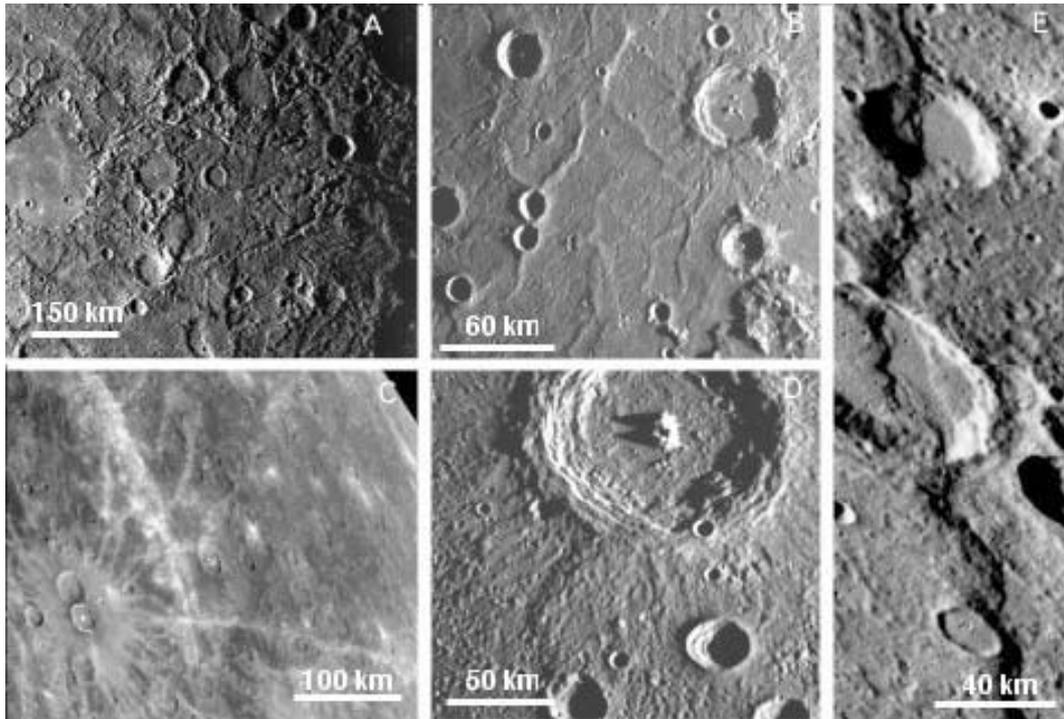


Figure 1. Different impact craters on the surface of Mercury as seen by Mariner 10.

It is very important to analyse and map the lateral and vertical contacts among the geological units in order to establish the type and sequence of events that formed and modified the crust of Mercury.

The presence of volcanism on Mercury is still under debate, although there is evidence for a volcanic origin of some plain units. If smooth and intercrater plains were originated only by impact basin ejecta processes, then it is likely that no volcanic activity occurred on Mercury. In this case Mercury would be unique among terrestrial planets.

Here are summarised the main expected scientific performances for each channel of SIMBIO-SYS:

STC:

- Global classification of morphological and textural surface units at kilometre-scale
- Global mapping of the albedo and colour variations at kilometre-scale
- Reconnaissance of kilometre-scale tectonic features and detailed topographic modelling
- Identification of craters with diameter >500 m
- Use of stereo derived DTM (Digital Terrain Model) to enhance the quality of the low details of the laser altimeter across-tracks interpolation

HRIC:

- Local mapping with high spatial resolution (from 5 m/pixel at perihelion to 11 m/pixel at the poles) of selected areas of the surface in a panchromatic filter: identification of layered deposits, small-scale texture of volcanic intercrater plains, characterisation of the floor of flat-floored crater, study of link between small-scale features and geological aspect
- Local mapping of colour variations at 10 meter-scale
- Support to the libration experiment

VIHI

- Global mapping of the surface at high spectral resolution ($\lambda/\Delta\lambda$ between 64 and 320) and at spatial resolution between 375 m and 100 m
- Mineralogical analysis of different hermean terrains with S/N always > 100 under all observing and operations conditions (needed to characterise the most important features in terms of strength, band centre and asymmetry)
- Determination of the abundances of detected mineralogical species to approx. 10% accuracy
- Identification of expected mineralogical species at 5 – 10% confidence level

- To perform spectrophotometric phase curves of the Hermean surface at a spatial resolution between 375 and 100 m.

Instruments description

The baseline approach used in the SIMBIO-SYS (Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo – Integrated Observatory SYStem) IFE (Instrument Front End) design is oriented to the best sharing of tasks between the different optical channels for imaging and spectroscopic observations. To achieve the best coordination, the proposed instrument concept is based on a highly integrated suite. This approach is effective in obtaining maximum scientific return, with respect to the goals attributed to the imaging and spectroscopic Hermean exploration, while minimising the overall resource allocation. In fact, the proposed architecture takes advantage of the commonalities between the different channels that constitute the SIMBIO-SYS IFE. Moreover, the suite is aimed to provide a simplified interface to the spacecraft, by handling internally the needs of the management of the various channels. In this respect, the proposed instrument architecture foresees a common main electronics and power supply.

The three channels forming the SIMBIO-SYS IFE are:

- High Resolution Imaging Channel (HRIC)
- STereo imaging Channel (STC)
- Visual and Infrared Hyper-spectral Imager (VIHI) channel.

Additionally SIMBIO-SYS includes a digital electronics unit for telecommand / telemetry link, and to the power supply. Main electronics and power supply are common at IFE level. Each channel is characterised by optics, detector, thermal hardware (if needed), proximity electronics and electrical interface to the Main Electronics.

The high level integration of the SIMBIO-SYS configuration is achieved by using an optical bench common to the three IFE channels and to the Main Electronics. Duplication of common resources and functions shall be avoided whenever possible, in order to achieve maximum resource saving for the whole suite.

From a mechanical point of view, this means that the channels are not intended to be designed as self standing instruments, but as an integrated system. Thus, requirements on the structure (e.g. stiffness, vibration performance) can be optimised. Moreover, all the testing activity (thermal, vibration, alignment) shall be carried on at suite level, more than at IFE subsystem level. Thus, overall mass saving can be obtained.

At system level, the channels shall be integrated on a IFE common bench (see Figure 2), that represents a single interface towards the spacecraft for thermal, mechanical, electrical and optical aspects (e.g., co-alignment between channels are managed internally to the IFE). This approach is aimed also to guarantee the needed stability in coalignment between the three channels, that is required for best co-ordinated operations and data inter-link. The bench acts also as supporting structure for the common electronics (power supply and main electronics unit).

From an electrical point of view, the proposed IFE approach allows the sharing of two main functions among the channels, that are implemented at suite level to avoid duplication, namely:

- main electronics function,
- power supply.

The first is mainly devoted to data management and compression, instrument control and telecommand / telemetry handling from / to the S/C interface. The second is optionally incorporated in the SIMBIO-SYS capabilities and is devoted to supply all the subsystems with the required power, providing a common set of required voltages.

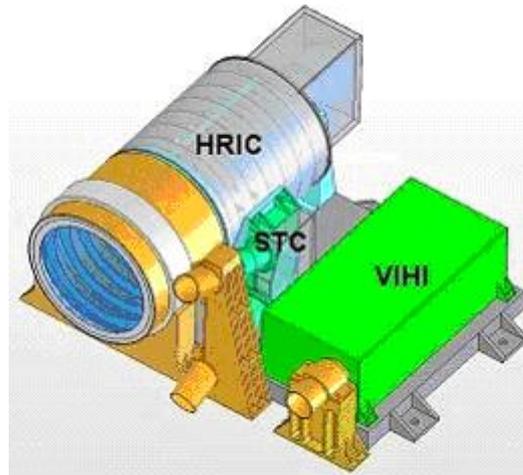


Figure 2. SIMBIO-SYS Optical Bench.

Another important synergistic aspect that is possible to optimise with an integrated experiment approach is related to the passive thermal control of channels and heat rejection. In fact, one common cold finger can be used for thermal control of detectors in HRIC and STC channels, while a dedicated cooling device is needed for VIHI detector. Main electronics shall be accommodated as close as possible to S/C radiator to dissipate conductively the internally generated heat. As far as heat rejection is concerned, preliminary evaluations demonstrate that only for HRIC (aperture diameter = 100 mm) a dedicated filter is required. For the other channels, dedicated reflective baffles (without filters) are sufficient to minimise down (to about 2 W) the total heat to dissipate. In the case of HRIC, if a filter with gold coating (with margin with respect to the ITO technology, not yet fully demonstrated) and a baffle (length about 90 mm), conductively decoupled from the HRIC itself, are considered, 6 W have to be dissipated via dedicated cold finger. The external reflective baffles (made of reflective metal, i.e. aluminium) of VIHI and STC shall be thermally connected to the same finger to dissipate the 2 W heat. These synthetic considerations clearly demonstrate the advantage of an integrated approach in handling one of the most critical aspects of Bepi Colombo mission, i.e. the management of the thermal environment and heat rejection.

HRIC (High Resolution Imaging Channel)

The High Resolution Imaging Channel has been designed in order to satisfy the primary scientific requirement of performing imaging of selected areas of the planet (potentially over 20 % of the surface) with ground pixel size of 5 m / pixel at a distance of 400 km from the planet surface. To achieve this goal within allocated resources the field of view has been chosen 1.47°, based on the optimised optical design described below, rather than 4°, formerly required to assist the low resolution imaging channel for the stereo imaging (no more required by the STC in SIMBIO-SYS).

The optical design is based on a catadioptric solution (i.e. lenses and mirrors) with a focal length of 800 mm, in order to achieve the required on ground resolution with a 10 μm pixel-size. The considered optical configuration is a Ritchey-Chretien one (figure 3), modified with refractive elements, in order to correct the field of view.



Figure 3. HRIC model.

The focal ratio of the instrument is $F/8$, in order to be diffraction limited at 400 nm and to optimise radiometric flux and overall mechanical dimensions. An obscuration ratio of 0.3 (between primary and secondary mirror diameters) has been chosen. The refractive corrector is made of four silica spherical lenses; it corrects and transmits well over the whole band of observation (400 - 900 nm). The main tasks of HRIC are to provide high resolution images with a pan-chromatic filter and to help in geo-mineralogical characterisation of local surface features by band-pass filters. Filters at 550, 700 and 880 nm (bandwidth 40 nm) are presently foreseen. Filter bands are compatible with the selection performed for the STC filters. The composite filter element is formed by parallel strips deposited on a thin window and is placed close in front of the focal plane and is part of the sensor package.

The proposed optical solution presents advantages with respect to other solutions based, for example, on all dioptric or two mirrors designs; it is simpler, lighter, compact and well chromatically (i.e. for chromatic aberration) corrected with few components on the wide wavelength range over the whole field of view. Although the selected optical design perfectly guarantees scientific requirements and optical performance, other possible catadioptric configurations (for example Maksutov or Mangin) shall be considered for a trade off during phase A, in terms of manufacturing, mass and volume budgets.

A 2048 x 2048 CMOS APS array has been chosen as baseline for sensor, due to its characteristics and capabilities which ensure required performances to the system. It allows low power consumption and shall benefit from the huge on-going research and development in CMOS technology. In addition, it appears that CMOS technology has a better tolerance to radiation. Existing sensors have a radiation tolerance better than 230 krad (Co60). A backup solution is based on 1024 x 1024 FT-CCD (i.e. Front – Thinned), with a pixel size of 14 μm , with performance characteristics only slightly different from the nominal solution: lower quantum efficiency, but also lower noise and higher saturation level.

The array solution is preferred to linear detectors to allow snapshot image acquisition, which appears less critical with respect to requirements on pointing and stability from S/C in an extreme thermal environment as that expected at Mercury orbit.

The optical performances analysis of the camera conducted for different fields of view and for different wavelengths show that the fraction of energy ensquared in a pixel is almost 70 % over the whole FOV, and slightly less at the longer wavelengths.

STC (Stereo imaging Channel)

The STC optical configuration has been designed to satisfy the scientific requirements coming from the need to provide stereo and colour images of the entire surface of Mercury.

In the Payload Study Document it is suggested to use the low and the high resolution cameras to perform stereo imaging assuming they have the same FOV. Unfortunately this condition cannot be easily realised if the requirement of reducing the HRIC spatial resolution to 5 m/pixel will be satisfied. Moreover, this new requirement forces the two cameras to have substantially different optical designs: so if these two cameras have to be used to perform stereo reconstruction, many problems are introduced owing to the necessary inter-calibration between the two cameras.

Taking into account these considerations, the optical design for the STC has two identical optical paths and a single focal plane assembly.

The required spatial resolution is 50 m/pixel from 400 km, which corresponds to 125 $\mu\text{rad}/\text{pixel}$. The selected detector is an APS 1024×1024 array with 10 μm square pixel, which allows the coverage of the required 4° field of view. There are two identical cameras placed in the “along track” plane: the *forward* (the bottom channel) and the *backward* (the upper one) cameras are oriented at $+20^\circ$ and -20° , respectively, with respect to nadir, to allow the stereo reconstruction of the images.

The cameras have a 80 mm focal length necessary to reach the desired image scale with the APS detector chosen, while the entrance pupil is 12 mm in diameter giving an effective focal ratio of 6.6. The design adopts a classical Petzval solution, that is two achromatic air-space doublets with an intermediate stop, to reduce chromatism as well as monochromatic aberration. The lenses have to be manufactured with rad-hard glasses, to sustain the hazardous radiation environment the system will be immersed in.

The identification of different surface composition and their relation to the observed morphology will be realised with 3 filters centred at wavelengths of 550, 700 and 850 nm with a 20 nm bandwidth. There will be also two panchromatic filters. Three filters and one panchromatic will be used by the forward camera, while the backward camera will use only the second panchromatic filter for realising the stereo imaging. With such configuration, the system will be able to image simultaneously five almost contiguous portions of the planet surface at different wavelengths, each one corresponding to an along track FOV of about 1° . This composite image will be reconstructed after the acquisition in the detector and read while the spacecraft moves; only when the projected image on the detector has been shifted by an amount corresponding to a filter strip along track FOV, another composite image will be acquired.

VIHI (Visible and near Infrared Hyper-spectral Imager)

The VIHI instrument is designed to perform hyper-spectral imaging observation of the whole surface of Mercury with medium spectral and spatial resolution. The instrument field of view is such that global coverage of the planet can be achieved during the first 6 months phase of the BepiColombo mission, with a varying ground resolution according to orbit eccentricity and orientation.

The instrument makes use of reflecting telescope and grating spectrometer in Littrow configuration. Two dioptric doublets are used to correct aberrations both in the telescope and spectrograph optical path.

A layout of the optical design is represented in figure 4, where the detector is folded out of the plane of the figure for reasons of space. The whole design has been driven by the necessity to reduce the volume (and consequently the mass) of the instrument as much as possible, without degrading its performance.

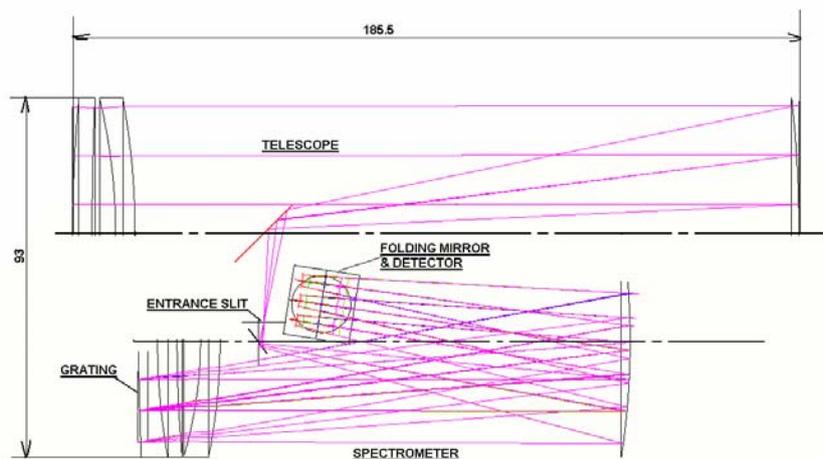


Figure 4. Optical design of VIHI.

The selected wavelength range is the result of a preliminary trade off which takes into account both scientific and technical aspects. The requirement is for a 0.8-2.5 μm range, but it will be possible to extend the range to the shorter wavelengths, 0.4-2.0 μm , having a spectral sampling of 6.25 nm. The instrument performances in this range have been optimised to fulfil all the scientific requirements for this instrument. However, an extension to an upper limit of 2.2 μm is possible with the present optical design.

Stray light reduction with baffles

Almost every optical imaging system suffers from stray light or unwanted light. In an optical imaging system, stray light is caused by light from a bright source shining into the front of the system and reaching the image as unwanted light. Stray light also occurs in non-imaging systems. Stray light is commonly manifested in two ways: ghost images and scattered light. The aim of the baffle – designer is to reduce stray light in optical systems.

Single scatter stray light occurs when a stray light source such as the sun directly illuminates the optics in the system. Some portion of the light will scatter in a direction that causes it to reach the focal plane. We say that it scatters into the field of view. Once light has scattered into the field of view, it becomes stray light, and there is no way to eliminate it without also causing vignetting. Thus a basic goal of baffle design is to keep light from shining on the optics.

Multiple scatter stray light occurs when stray light sources indirectly illuminate the optics. These paths cause stray light indirectly, by first scattering from the baffle surfaces and then illuminating the optics. Stray light from this source will always be smaller than direct scatter, but it may still be large enough to be of concern. Stray light can never be totally eliminated. However, it can often be reduced to a level at which it is tolerable.

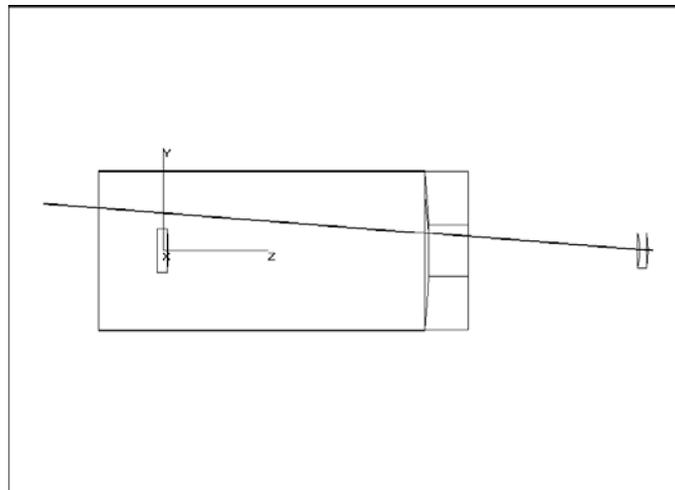


Figure 5. Example of stray light: an off axis ray arrives to the detector of a telescope.

The only way to stop straight shots is by adding baffles to the telescope.

In particular for BepiColombo mission, baffle design must be careful because of the particular thermal environment the spacecraft and the instruments will be immersed in. Baffles usually are absorbing, but in this case this could be a serious problem because if the baffle becomes too hot it could be damaged and compromise the quality of the optics (for example giving problems of misalignment) and of the images. A solution could be the use of reflecting baffles instead of classical absorbing ones. In particular there are, besides cylindrical baffles with plain vanes, other designs, such as Stavroudis and Radovich configurations, which make use of ellipses and hyperbolas to form the vanes, and, thanks to their geometric construction, they allow the almost total rejection of off axis incoming rays. Such designs avoid that rays could be trapped in the vanes, and so the performance can be enhanced.

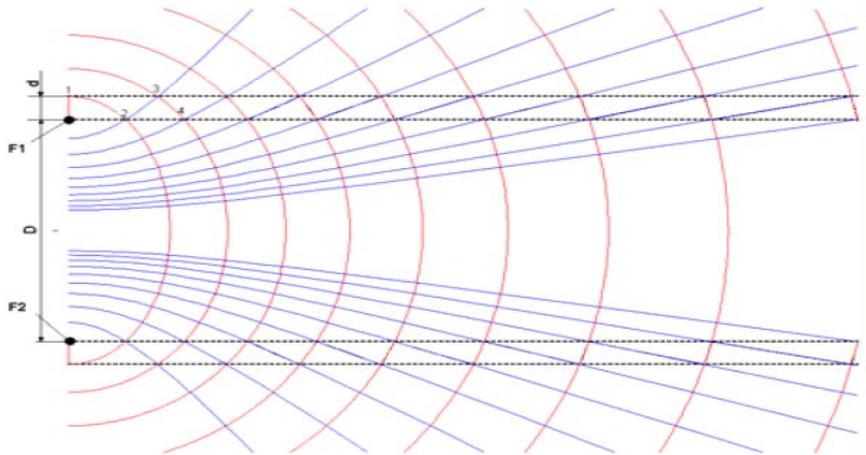


Figure 6. Stavroudis profile by intersection of ellipses and hyperbolas.

Results of simulations

With the Monte Carlo ray tracing software Opticad, several simulations have been performed to evaluate the parameters influence on the design: angle of incidence of the source, diameter of the aperture, number of vanes, thickness. Both a cylindrical baffle with plain vanes and a Stavroudis configuration has been considered. The results show that a reflecting Stavroudis baffle could be better than a plain vanes absorbing baffle for its natural rejection of rays (for construction this type of baffle traps very little rays), so it could give less thermal problems; moreover if the internal surfaces (i.e. the hyperbolas) of the baffle are made absorbing, the performance could be even better, but in this last case the feasibility of two different coatings for a baffle has to be verified.

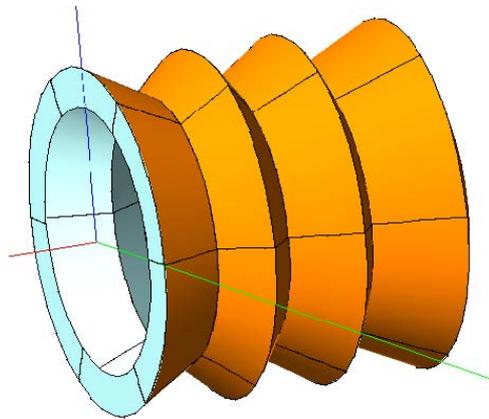


Figure 7. Stavroudis baffle.

Also a thermal analysis has been performed, in order to complete the baffle evaluation: using the ESARAD software packet a model of the system under analysis was defined and then introduced in a simplified temperature distribution which approximately reproduces the thermal condition MPO payload will be immersed in.

Besides the Stavroudis baffle, also a filter was added to the model, in order to reject infrared incoming radiation and allow visible radiation transmittance.

Two different Stavroudis baffles were compared: one with a circular ring in front of the baffle entrance (as in figure 7), and the one without the ring (see fig. 8).

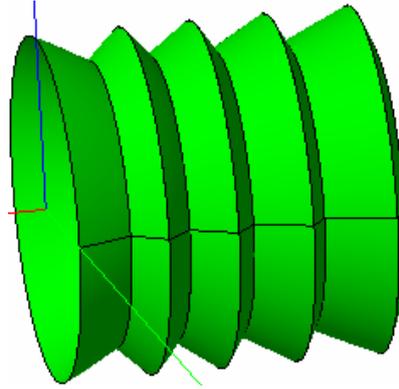


Figure 8. Stavroudis baffle model without circular ring.

Also different optical properties for the baffle surface were considered: specular reflectivity and diffuse one for IR and visible radiation.

Comparing fluxes absorbed both by baffle and filter, the best solution seems to be, as expected, the model with the circular ring and specular reflective surface (see Tab. 1 and 2):

Fluxes (W)	Filter with ring	Filter without ring	Baffle with ring	Baffle without ring
Solar flux	0.0032	0.0000	2.4395	1.9748
Albedo flux	0.1023	0.1297	0.7035	0.9262
Planetary flux	2.7008	3.2071	2.6972	3.1707
Total flux	2.8062	3.3368	5.8402	6.0716

Tab. 2. Absorbed fluxes by filter and Stavroudis baffle in both cases, considering model with and without the circular ring at the entrance of the baffle. (Specular reflectivity case)

Fluxes (W)	Specular refl filter	Diffuse refl filter	Specular refl baffle	Diffuse refl baffle
Solar flux	0.0032	0.0673	2.4395	3.4130
Albedo flux	0.1023	0.1318	0.7035	1.1441
Planetary flux	2.7008	3.2872	2.6972	4.0691
Total flux	2.8062	3.4864	5.8402	8.6263

Tab. 2. Absorbed fluxes by filter and Stavroudis baffle in both cases, considering specular or diffuse reflective surfaces..

Finally space environment interactions and effects were considered, especially charged (electrons and protons) and neutral particle fluxes, radiation dose, cosmic rays, on detectors.

Riassunto

La missione spaziale BepiColombo, (in fase di sviluppo da parte dell'ESA in collaborazione con l'agenzia spaziale giapponese JAXA, lancio previsto nel 2012) ha come obiettivo l'esplorazione del pianeta Mercurio attraverso due differenti spacecrafts, MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter) e MPO (Mercury Planetary Orbiter). Per analizzare le caratteristiche geologiche e mineralogiche della superficie e dell'esosfera del pianeta, MPO ospiterà a bordo vari strumenti, tra i quali il progetto SIMBIO-SYS (Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo – Integrated Observatory SYStem), che comprende un sistema di acquisizione di immagini con molteplici capacità nell'intervallo dal visibile al vicino infrarosso grazie alla presenza di tre differenti strumenti:

- HRIC (High Resolution Imaging Channel), una telecamera ad alta risoluzione nel visibile,
- STC (Low Resolution Color Imaging and Stereo Channel) stereo-camera con possibilità di immagini a colori,
- VIHI (Visible and near-Infrared Hyperspectral Imager) spettrometro nel visibile e vicino infrarosso.

STC fornirà la copertura globale a colori della superficie del pianeta allo scopo di definire le principali caratteristiche geologiche, la tettonica su grande scala, la distribuzione dei crateri da impatto, e, se presenti, formazioni di origine vulcanica. STC sarà uno strumento valido a definire con alto dettaglio la topografia di Mercurio, importante per la caratterizzazione delle strutture tettoniche, e per misurare importanti parametri geofisici. La STC provvederà anche il contesto per l'investigazione ad alta risoluzione al periermio di HRIC, il cui obiettivo principale è quello di caratterizzare particolari oggetti sulla superficie. VIHI avrà il compito di mappare il pianeta per fornire la composizione mineralogica globale della superficie.

Il progetto SIMBIO-SYS è attualmente in via di sviluppo da parte di un consorzio internazionale guidato dall'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) con il contributo dei due principali partners, CNES (Centre National d'Etudes Spatiales, Francia) e Svizzera (ESA attraverso Swiss Space Office).

Simbio-sys: filosofia

L'approccio di base usato nel disegno di SIMBIO-SYS è volto a distribuire al meglio i compiti tra i differenti strumenti presenti nel sistema. Per raggiungere la miglior coordinazione, gli strumenti sono concepiti ad un alto livello di integrazione, per ottenere il massimo ritorno scientifico rispettando gli obiettivi dell'esplorazione del pianeta.

L'integrazione di cui sopra è raggiunta usando un unico banco ottico, comune ai tre strumenti; perciò da un punto di vista meccanico, gli strumenti non sono intesi come singoli, ma come parte di un sistema integrato. In questo modo è possibile ottimizzare i requisiti termo-strutturali; inoltre tutti i test (di tipo termico, vibrazionale, di allineamento) possono essere effettuati a livello di sistema, invece che su ogni singolo strumento, snellendo le attività a livello di satellite. Uno studio di trade-off è in corso, per verificare se a livello di satellite sia più opportuno avere un unico banco ottico in cui il payload di SIMBIO-SYS e gli star trackers sono integrati.

La verifica del coallineamento interno tra gli strumenti e del coallineamento con gli star tracker del satellite è necessaria per garantire che le osservazioni effettuate dai tre strumenti siano correlate e per ottenere i migliori risultati scientifici dalla combinazione delle diverse osservazioni. Si prevede anche il coallineamento con altri strumenti di BepiColombo, in particolare per l'esperimento sulla misura della librazione di Mercurio.

Uno degli aspetti critici per la missione, ed in particolare per gli strumenti di SIMBIO-SYS, è quello del controllo termico e della luce diffusa (*stray light*) che può entrare nello strumento e giungere al rivelatore, a causa dell'ambiente critico in cui il satellite si troverà ad operare (alla minima distanza da Mercurio si prevede un carico termico dal Sole di circa 13000 W/m^2 , quasi 10 volte quello ricevuto a Terra). A tal fine è opportuno studiare delle soluzioni per minimizzare questi disturbi, che possono influire negativamente sulla qualità del segnale acquisito (riduzione del rapporto segnale-rumore), sia per la luce che arriva direttamente al rivelatore, sia perché il riscaldamento delle ottiche del telescopio può causare un disallineamento delle stesse. L'approccio più comunemente utilizzato è quello di aggiungere dei baffles agli strumenti, ovvero dei dispositivi che servono ad assorbire o a riflettere la luce incidente riducendo così il carico termico in ingresso sul telescopio e la luce diffusa.

Solitamente vengono utilizzati baffles assorbenti, ma per la particolare situazione termica in cui gli strumenti si troveranno ad operare, sembra più opportuno utilizzare baffles riflettenti, che differiscono dai classici a

setti piani per la costruzione geometrica che utilizza sezioni di coniche (ellissi ed iperboli). Tali configurazioni prendono il nome dai loro ideatori, quali ad esempio Radovich, Greynolds, Stavroudis.

E' stata effettuata un'analisi parametrica delle prestazioni dei baffles per mezzo di simulazioni con un software di ray tracing, prendendo in considerazione sia una classica costruzione cilindrica a setti piani, sia una geometria Stavroudis a setti tronco – conici formati da ellissi ed iperboli. Tale soluzione sembra dare buoni risultati, soprattutto se si rendono riflettenti le superfici ellittiche (quelle rivolte verso l'esterno) e assorbenti quelle verso l'interno del baffle.

È stata inoltre condotta l'analisi termica sul baffle in modo da poter avere una panoramica completa delle prestazioni dello stesso: utilizzando il software ESARAD/ESATAN è stato dapprima definito il modello, comprensivo anche di un filtro trasparente al visibile che respinga la radiazione infrarossa, posizionato tra lo strumento ed il baffle stesso.

Una volta costruito il modello da analizzare e successivamente riprodotte in modo semplificato le condizioni di temperatura che il baffle dovrà sopportare in orbita attorno a Mercurio, sono stati confrontati due differenti modelli di baffle Stavroudis, ovvero con o senza la corona circolare posta alla sezione d'ingresso del baffle stesso e considerando una superficie che riflette in modo speculare oppure diffuso la radiazione di lunghezze d'onda comprese tra il visibile e l'infrarosso.

Confrontando i flussi assorbiti dal baffle e dal filtro si è visto, come del resto ci si aspettava, che la soluzione migliore appare quella del baffle con corona circolare e superficie caratterizzata da riflettività speculare.

Infine sono state effettuate alcune simulazioni che tengono conto dell'interazione e degli effetti dell'ambiente spaziale sullo S/C ed in particolare sugli apparati - strumenti e sui detector – rivelatori che più sono soggetti a tali effetti e possibile degrado. Si è tenuto conto del flusso di particelle, cariche e neutre, protoni ed elettroni, dose di radiazione da protoni per diversi materiali, raggi cosmici, SEU rates, NIEL, etc. Si è fatta un'approssimazione perché il tool permette di simulare l'ambiente spaziale per un'orbita terrestre; la situazione per il pianeta Mercurio sarà sicuramente diversa ma si ottiene una buona approssimazione.

Introduzione

La missione spaziale BepiColombo (in fase di sviluppo da parte dell'ESA in collaborazione con l'agenzia spaziale giapponese JAXA) ha come obiettivo l'esplorazione del pianeta Mercurio attraverso due differenti spacecrafts, MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter) e MPO (Mercury Planetary Orbiter).

Il lancio è previsto ad agosto – settembre 2013. Viaggio dura circa 6 anni (arrivo previsto 2019) poi durata della missione un anno (fino a settembre 2020) estendibile per un altro anno (sett 2021).

Orbita polare MPO 400 x 1500 km periodo 2,3 ore

“ “ MMO 400 x 12000 km periodo 9,2 ore

Dopo il lancio in un'orbita geostazionaria, lo spacecraft MCS (Mercury Composite Spacecraft), composto dai due *orbiters* MPO e MMO, un modulo di trasferimento MTM (Mercury Transfer Module) ed uno scudo solare per MMO (MOSIF) verrà sottoposto ad una sequenza di manovre per elevare l'apogeo utilizzando la propulsione chimica. Da lì, lo *spacecraft* verrà posizionato nella sua traiettoria interplanetaria attraverso uno *swing-by* lunare nell'ottobre 2013.

Durante il lungo viaggio verso Mercurio, lo S/C dovrà vincere la forza di gravità solare, che è maggiore avvicinandosi alla stella, mentre avviene l'opposto per i pianeti più esterni del sistema solare. Per compensare questo effetto sarà necessario sfruttare la gravità terrestre nel 2015, quella di Venere per due volte nel 2016, dello stesso Mercurio due volte nel 2018 e utilizzando la SEP (Solar Electric Propulsion) propulsione elettrica solare.

Questa combinazione innovativa di propulsione a basso uso di carburante e *gravity assist* è già stata utilizzata dall'ESA nella missione lunare SMART-1.

Avvicinandosi al pianeta Mercurio, il modulo MTM verrà sganciato ed il rimanente modulo composito utilizzerà una speciale tecnica di cattura "al limite della stabilità" (Weak Stability Boundary Capture) per inserirsi in un'orbita polare, che verrà stabilizzata per mezzo di motori a tradizionale propulsione chimica. L'arrivo avverrà nel giugno 2019.

L'inserzione nell'orbita con questo metodo fornisce flessibilità ed è maggiormente al riparo da fallimenti se confrontato al tradizionale metodo del "*big kick*" (un'unica grande spinta che viene data utilizzando una esplosione del motore principale per ottenere la cattura nell'orbita).

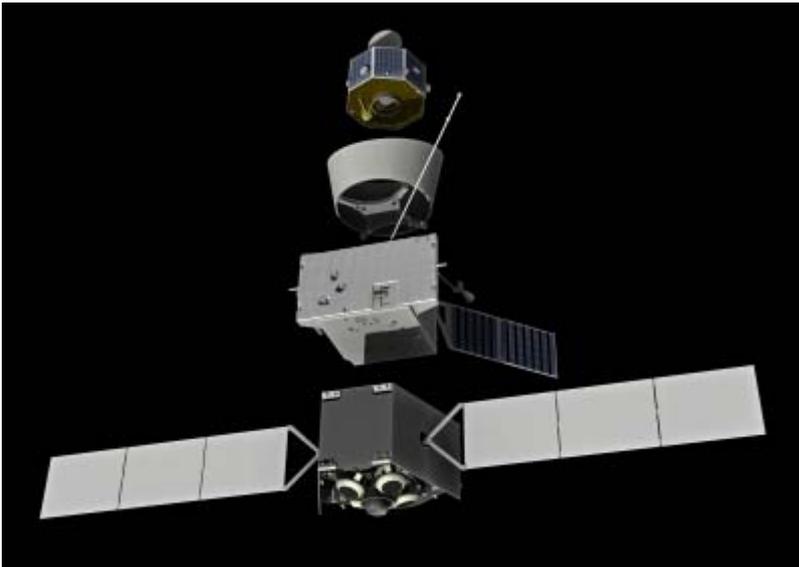
MMO verrà poi rilasciato nella sua orbita operativa, quindi lo scudo solare e la struttura di interfaccia con MMO si separeranno mentre il sistema di propulsione chimica porterà MPO nella sua orbita più bassa.

Ground station (stazione a Terra)

Il centro operativo della missione sarà dislocato all'ESOC (European Space Operation Centre) a Darmstadt, in Germania. La stazione terrestre principale per BepiColombo sarà l'antenna da 35 metri a Cebreros (Spagna), supportata dall'antenna sempre da 35 metri in New Norcia (Australia) nelle fasi critiche.

Un accordo con l'agenzia spaziale giapponese JAXA prevede un supporto incrociato e quindi assicura la possibilità di utilizzare in fasi critiche l'antenna da 64 metri dell'Usuda Deep space Centre giapponese a Nagano, come back-up ed in casi di emergenza.

Durante la fase di crociera verso Mercurio, il MCS sarà controllato dall'ESOC; dopo l'arrivo su Mercurio e la separazione del modulo MMO, il Sagami-hara Space Operation Centre della JAXA, a sud ovest di Tokyo, ne prenderà il controllo mentre l'ESOC manterrà il controllo di MPO fino alla fine della missione.



Dal fondo si vedono: il modulo di trasferimento MTM, il Mercury Planetary Orbit (MPO), lo scudo solare ed il Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO).

Per analizzare le caratteristiche geologiche e mineralogiche della superficie e dell'esosfera del pianeta, MPO ospiterà a bordo vari strumenti, tra i quali il progetto SIMBIO-SYS (Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo – Integrated Observatory SYStem).

L'approccio di base usato nel disegno di SIMBIO-SYS è volto a distribuire al meglio i compiti tra i differenti strumenti presenti nel sistema. Per raggiungere la miglior coordinazione, gli strumenti sono concepiti ad un alto livello di integrazione, per ottenere il massimo ritorno scientifico rispettando gli obiettivi dell'esplorazione del pianeta.

La suite comprende un sistema di acquisizione di immagini con molteplici capacità nell'intervallo dal visibile al vicino infrarosso grazie alla presenza di tre differenti strumenti:

- HRIC (High Resolution Imaging Channel), una telecamera ad alta risoluzione nel visibile,
- STC (Low Resolution Color Imaging and Stereo Channel) stereo-camera con possibilità di immagini a colori,
- VIHI (Visible and near-Infrared Hyperspectral Imager) spettrometro nel visibile e vicino infrarosso.

STC fornirà la copertura globale a colori della superficie del pianeta allo scopo di definire le principali caratteristiche geologiche, la tettonica su grande scala, la distribuzione dei crateri da impatto, e, se presenti, formazioni di origine vulcanica. STC sarà uno strumento valido a definire con alto dettaglio la topografia di Mercurio, importante per la caratterizzazione delle strutture tettoniche, e per misurare importanti parametri geofisici. La STC provvederà anche il contesto per l'investigazione ad alta risoluzione al periermio di HRIC, il cui obiettivo principale è quello di caratterizzare particolari oggetti sulla superficie. VIHI avrà il compito di mappare il pianeta per fornire la composizione mineralogica globale della superficie.

Il progetto SIMBIO-SYS è attualmente in via di sviluppo da parte di un consorzio internazionale guidato dall'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) con il contributo dei due principali partners, CNES (Centre National d'Etudes Spatiales, Francia) e Svizzera (ESA attraverso Swiss Space Office).

In questo lavoro, nel primo capitolo vengono descritti gli obiettivi scientifici che la missione si propone di ottenere, soprattutto con gli strumenti oggetto di studio: obiettivi riguardanti la geologia superficiale di Mercurio (crateri, vulcani, strutture presenti, nonché loro composizione ed origine); successivamente nel capitolo 2 vengono presentati e descritti gli strumenti, nelle loro caratteristiche di disegno ottico e di prestazioni previste, in relazione alle osservazioni del pianeta che dovranno effettuare e dei risultati da ottenere.

Il capitolo 3 è dedicato ad approfondire l'aspetto dei requisiti di puntamento e di allineamento degli strumenti, sempre in relazione a quanto si prevede e si auspica di ottenere dal payload in termini di

osservazioni, inoltre si tiene conto del fatto che le immagini ottenute dagli strumenti saranno correlate ai dati sull'altitudine della superficie di Mercurio ottenuti con un altimetro laser.

Nel capitolo 4 si affronta la teoria che permette la progettazione di strutture per limitare la stray light – luce di disturbo – in entrata negli strumenti, e vengono descritti alcuni dispositivi - i baffles – e le configurazioni comunemente studiate ed utilizzate per scopi spaziali.

Il capitolo 5 riporta le analisi parametriche condotte ed i dati ottenuti per mezzo di simulazioni, volte ad individuare una possibile configurazione di baffle adatta agli strumenti (in particolare HRIC e STC) della suite SIMBIO-SYS ed al particolare ambiente in cui si troverà ad operare.

Per quanto riguarda il baffle per HRIC è stata condotta anche un'analisi termica, definendo un modello comprensivo di un filtro trasparente al visibile che respinga la radiazione infrarossa, posizionato tra lo strumento ed il baffle stesso.

Infine il capitolo 6 presenta i risultati di alcune simulazioni che tengono conto dell'interazione e degli effetti dell'ambiente spaziale sullo S/C ed in particolare sugli apparati - strumenti e sui detector – rivelatori che più sono soggetti a tali effetti e possibile degrado. Si è tenuto conto del flusso di particelle, cariche e neutre, protoni ed elettroni, dose radiazione da protoni per diversi materiali, raggi cosmici, SEU rates, NIEL, etc. Si è fatta un'approssimazione perché il tool permette di simulare l'ambiente spaziale per un'orbita terrestre; la situazione per il pianeta Mercurio sarà sicuramente diversa ma si ottiene una buona approssimazione.

Lista degli acronimi

MPO Mercury Planetary Orbiter
MMO Mercury Magnetospheric Orbiter
SIMBIO-SYS Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo – Integrated Observatory SYStem
HRIC (talvolta HRC) High Resolution Imaging Channel
STC STereo imaging Channel
DTM Digital Terrain Model
VIHI Visible and near-Infrared Hyperspectral Imager
BELA Bepi Colombo Laser Altimeter
LAT Laser Altimeter
IFE Instrument Front End
RSE Radio Science Experiment
ESOC European Space Operation Centre

APE Absolute Pointing Error
AME Absolute Measurement Error
AMA Absolute Measurement Accuracy
RPE Relative Pointing Error

FOV Field Of View
APS Active Pixel Sensor
FPA Focal Plane Assembly
RMS Root Mean Square
TBC To Be Confirmed
ITO Indium Tin Oxide
FT-CCD Front Thinned Charge Coupled Device
NIR Near InfraRed
UV UltraViolet
CMOS Conductor Metal – Oxide - Semiconductor
MCP Micro – Channel Plate
CAD Computer Aided Design
SDR Sistema di riferimento

TID Total Ionizing Dose
SEE Single Event Effect
SEU Single Event Upset
SEL Single Event Latch-up
SEB Single Event Burn-out

Capitolo 1

Obiettivi scientifici per Simbio-Sys

1.1 Caratteristiche del pianeta Mercurio

Mercurio è il pianeta più piccolo (escludendo la Luna) e più interno del Sistema Solare; esso ruota attorno al Sole su di un'orbita fortemente inclinata ed eccentrica. Il suo periodo di rotazione è superiore al periodo di rivoluzione attorno al Sole, pertanto ciò fa sì che il giorno su Mercurio abbia una durata più lunga dell'anno. Per questo motivo, tenendo anche conto della vicinanza al Sole, la temperatura sulla superficie illuminata del pianeta è la più alta raggiungibile nel Sistema Solare, e la superficie del pianeta è inoltre caratterizzata dalle massime escursioni termiche.

Nonostante Mercurio abbia dimensioni simili a quelle della Luna, i due corpi hanno delle rilevanti differenze in densità (3.3 g/cm^3 per la Luna, 5.4 g/cm^3 Mercurio), il che indica una differente composizione interna e delle differenti "storie" che hanno riguardato la loro formazione ed evoluzione.

La maggior parte dei modelli descrittivi del pianeta Mercurio indicano che esso dovrebbe avere un grosso nucleo denso centrale, il cui raggio dipende dal modello evolutivo e dalla composizione totale del pianeta. In generale, è ormai consolidato dalla consistente densità di Mercurio che la sua composizione è caratterizzata da un elevato rapporto di abbondanze di ferro e silicio (Fe/Si), anche se tale particolarità potrebbe derivare anche da differenti scenari evolutivi. Mercurio potrebbe essersi formato da materiale molto ridotto, e la sua elevata densità sembra indicare un elevato contenuto metallico totale di ferro.

Esso inoltre è caratterizzato da un debole campo magnetico, il che fa pensare che parte del nucleo sia liquido. Come conseguenza, a causa dell'interazione del campo magnetico con il vento solare, il pianeta è dotato di una magnetosfera altamente attiva, che è a contatto diretto con la superficie, essendo assente l'atmosfera (le uniche particelle presenti provengono dal vento solare o sono eiettate dalla fotosfera).

Le forze derivanti dalle maree solari hanno da sempre influenzato il suo moto di rotazione e la risonanza 2:3 del periodo di rivoluzione e di rotazione; la superficie del pianeta è stata alterata durante la fase di raffreddamento iniziale e la composizione chimica è stata modificata nelle prime fasi di vita a causa di impatti sulla superficie e dell'elevata temperatura della superficie solare, che ha provocato la sublimazione di tutti i materiali a bassa temperatura di condensazione. Di conseguenza la conoscenza di Mercurio gioca un ruolo determinante per lo sviluppo di teorie riguardanti la dinamica della formazione dei pianeti. Obiettivo ultimo della ricerca spaziale è la comprensione dei meccanismi che hanno portato all'origine e all'evoluzione del Sistema Solare. Con la missione Rosetta, l'ESA sta conducendo un programma che ha lo scopo di investigare sull'origine dei materiali presenti nella zona più esterna e fredda del Sistema Solare; lo studio di Mercurio rappresenta l'estremo opposto: la sua esplorazione permette di studiare la formazione planetaria nella parte più interna e calda della nebulosa proto – solare. Tuttavia la sua vicinanza al Sole rende il pianeta difficile da studiare, sia da Terra (il pianeta è visibile solo per 2 ore al giorno) che con missioni spaziali (il flusso di radiazione solare, anche 10 volte maggiore rispetto a quello ricevuto a Terra, quello riflesso dal pianeta ed emesso dal pianeta stesso nel campo della radiazione IR costituiscono degli input termici enormi e dei vincoli estremamente limitanti per spacecrafts in orbita attorno a Mercurio).

Proprietà fisiche generali	
Massa [$\cdot 10^{24}$ kg]	0.3302
Volume [$\cdot 10^{10}$ km ³]	6.083
Densità media [kg/cm ³]	5427
Raggio medio R [km]	2439.7
Ellitticità	0
Albedo	0.119
Temperatura sulla superficie (max e min) [K]	100 – 688.5
Temperatura di corpo nero (valore medio) [K]	442.5
Accelerazione di gravità in superficie [m/s ²]	3.701
Velocità di fuga [km/s]	4.435
Costante gravitazionale GM [$\cdot 10^6$ km ³ /s ²]	0.02203
Intensità del dipolo di campo magnetico [nT·R _h ³]	330

Parametri orbitali	
Semiassse maggiore [$\cdot 10^6$ km]	57.909
Semiassse minore [$\cdot 10^6$ km]	56.672
Altezza di perielio [$\cdot 10^6$ km]	46.001
Altezza di afelio [$\cdot 10^6$ km]	69.817
Eccentricità	0.20563
Inclinazione [°]	7.005
Periodo di rivoluzione (sidereo) [yr]	0.2408467
Periodo di rotazione (sidereo) [days]	58.646 ± 0.0005
Periodo sinodico [days]	115.88
Lunghezza del giorno (passaggio del Sole allo stesso meridiano) [days]	175.94
Velocità orbitale media [km/s]	47.87
Massima velocità orbitale [km/s]	58.98
Minima velocità orbitale [km/s]	38.86
Massimo angolo dalla congiungente Terra-Sole [°]	28
Massima distanza Terra-Mercurio [$\cdot 10^6$ km]	221.6
Minima distanza Terra-Mercurio [$\cdot 10^6$ km]	77.3

Tab.1.1. e 2. Proprietà fisiche e parametri orbitali del pianeta Mercurio.

Prima della missione BepiColombo, l'unico spacecraft che si è avvicinato a Mercurio e che ha permesso di ottenere le attuali conoscenze sul pianeta è la sonda della NASA Mariner 10, che sorvolò Mercurio il 29 marzo 1974 ad una distanza minima di 705 km, il 21 settembre 1974 ad una distanza di 50000 km, il 16 marzo dell'anno successivo ad una distanza di 327 km. La superficie visibile mappata dallo spacecraft in queste occasioni raggiunge circa il 45% della superficie complessiva. In particolare, la Mariner 10 ha portato a termine 7 esperimenti scientifici: l'imaging del pianeta, radiometria IR, spettroscopia UV, rilevazione del campo magnetico, scienza del plasma e scienza delle particelle cariche.

Il 3 agosto del 2004, la NASA ha lanciato la sonda Messenger, che, secondo le previsioni, sarà inserita in orbita nel marzo 2011 e supporterà, tra gli altri, strumenti per acquisire immagini della superficie del pianeta, spettrometri per radiazioni X e γ e per rilevare particelle cariche e plasma, un altimetro ed un magnetometro.

Gli obiettivi della missione BepiColombo sono stati fissati nel 2000 dal gruppo scientifico responsabile e possono essere riassunti come segue:

- Esplorazione dell'emisfero sconosciuto di Mercurio;
- Studio dell'evoluzione geologica del pianeta;
- Ricerca delle cause che hanno portato all'elevata densità di Mercurio;
- Analisi della struttura interna del pianeta e ricerca di un eventuale nucleo esterno liquido;
- Ricerca della causa che ha portato all'origine del campo magnetico di Mercurio;
- Studio dell'interazione del campo magnetico con il vento solare;
- Caratterizzazione della composizione della superficie del pianeta;
- Identificazione della composizione dei bright spots radar nelle regioni polari;
- Determinazione della temperatura globale della superficie;
- Determinazione della composizione dell'esosfera di Mercurio;
- Determinazione dei processi di sorgente/pozzo dell'esosfera;
- Determinazione delle strutture dell'esosfera e della magnetosfera;
- Studio dei meccanismi di carica delle particelle nell'ambiente di Mercurio;
- Verifica della teoria della gravità di Einstein.

1.2 Geologia superficiale di Mercurio

La superficie di Mercurio si presenta dominata da crateri (fig. 1.1), bacini e terreni collinosi e delineati, e anche da grandi bacini e ampi tratti di aree relativamente pianeggianti. Gli oltre 400 crateri da impatto si differenziano molto tra loro in dimensioni e grado di conservazione. Le dimensioni variano tra 100 e 1300 Km (Caloris Basin).

I crateri in genere sono classificati in base al grado di conservazione delle componenti morfologiche come i raggi, crateri secondari, acutezza dei bordi e la presenza di terrazzamenti interni. Piccoli crateri hanno forma sferica ma all'aumentare delle dimensioni appaiono dei picchi centrali, terrazze e depositi, sciame di crateri secondari da impatto.

E' molto importante analizzare e mappare i contatti tra le unità geologiche per stabilire il tipo e la sequenza di eventi che hanno portato alla formazione e successiva modifica della crosta di Mercurio. Per meglio caratterizzare l'evoluzione della crosta superiore del pianeta ed i processi che hanno agito sul pianeta durante la sua storia geologica, sono da tenere in considerazione i seguenti punti:

- Caratterizzazione dei crateri. Sulla base dei dati forniti dal Mariner 10, i crateri sembrano essere meno estesi di quanto ci si aspetta, mentre le unità inter-crateri sono più grandi delle strutture analoghe presenti sulla Luna. Per spiegare questa anomalia è necessario ricostruire l'evoluzione geologica del pianeta, e questo sarà possibile grazie a STC (STereo Camera) e HRIC (High Resolution Imaging Channel). Inoltre il VIHI (Visible and near-Infrared Hyperspectral Imager Channel) provvederà ad effettuare una mappatura mineralogica con una risoluzione spettrale di 10 nm ed un valore compreso tra 100 e 375 metri di risoluzione spaziale, che permetterà di distinguere eventuali differenze nell'origine di queste strutture.
- Origine, limite ed estensione dei terreni collinosi e dei pianori. La formazione dei terreni collinosi sembra correlata con le onde sismiche prodotte dell'impatto con il Caloris Basin. E' presente del materiale pianeggiante all'interno dell'unità collinosa, che può essere il risultato del riemergere (a causa delle onde sismiche) del magma intrappolato lungo le fratture. In questo caso, la mineralogia di questi terreni dovrebbe evidenziare la loro origine magmatica mostrando una differente

composizione rispetto a quelli circostanti.(analisi spettrale grazie a vihi) e anche mappatura geologica di questi particolari depositi.

- Stratigrafia per ricostruire l'evoluzione dei processi avvenuti sulla superficie e la loro sequenza temporale.Sulla base dei dati del Mariner 10 era stata realizzata una preliminare scala cronostatigrafica. Servono nuovi dati per affinare tale scala e per estenderla all'intera superficie del pianeta. é necessaria una mappa dettagliata e globale per valutare la validità delle relazioni temporali (STC e HRIC)
- Caratterizzazione geomorfologica dei crateri da impatto. I crateri da impatto e i depositi di materiale eiettato sono solitamente considerate come unità geologiche a se stanti. Le loro caratteristiche morfologiche forniscono informazioni importanti sul grado di maturità, sulle proprietà del substrato, sugli oggetti che vi hanno impattato sopra e sui processi di ricreazione della superficie. (anche qui STC e HRIC). per caratterizzazione morfometrica dei crateri, stime di profondità e analisi della stabilità della pendenza (usando il modello digitale del terreno ricavato da STC).
- Identificazione dei depositi stratificati. a causa della debole risoluzione di mariner 10 non è stato finora possibile riconoscerli; la loro presenza ed identificazione permetterebbe di individuare possibile presenza di piroclasti e flussi di lava e permetterebbe di misurare lo spessore dello strato di regolite. questi multistrato sono considerati anche la diretta conseguenza della erosione (dovuta ad agenti atmosferici?) meccanica delle rocce. alta risoluzione di HRIC di regioni selezionate per distinguere i depositi di lava.

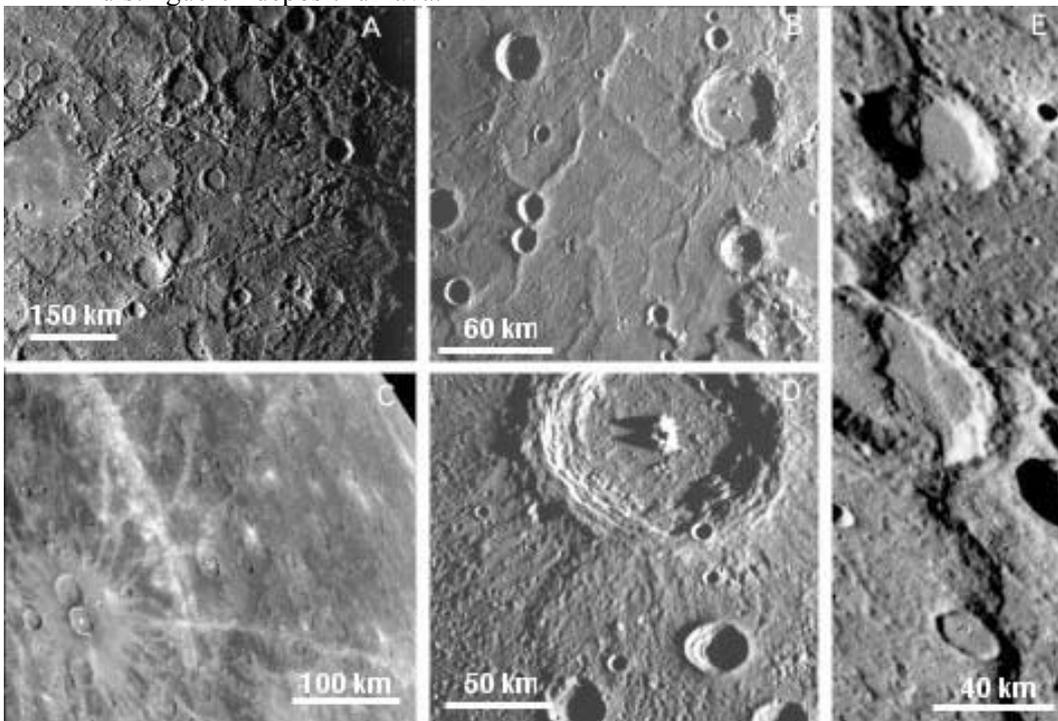


Figura 1.1. Differenti tipi di crateri da impatto presenti sulla superficie di Mercurio come visti dal Mariner 10.

1.3 Vulcani

La loro presenza sul pianeta è ancora in discussione, anche se c'è conferma dell'origine vulcanica di alcune pianure. Se i ripiani intercrateri fossero stati originati solo per mezzo di processi di materiale dei bacini da impatto, allora sarebbe probabile che non ci fosse attività vulcanica su Mercurio, e in tal caso esso sarebbe un caso tra i pianeti terrestri. Gli obiettivi principali per Simbio-Sys per quanto riguarda l'attività vulcanica di Mercurio sono:

- identificazione dell'origine delle zone pianeggianti da osservazioni morfologiche il principale obiettivo è quello di trovare evidenze su piccola scala (quindi usando HRIC) di flussi di lava nelle zone intercrateri.
- identificazione di strutture vulcaniche e depositi correlati le dimensioni dei vulcani nei pianeti terrestri variano da poche centinaia di metri a centinaia di chilometri, quindi con la risoluzione ottenibile dagli strumenti di Simbio-Sys sarebbe possibile identificare anche i piccoli vulcani. ci si aspetta una differenza negli spettri dei materiali vulcanici rispetto a quelli che non lo sono (mappe

mineralogiche a risoluzione 100 metri con VIHI). Importante è anche la possibilità di ottenere immagini stereoscopiche (con il canale STC) per ricostruire la topografia e morfologia delle strutture vulcaniche.

1.4 Tettonica

1.4.1 Struttura geologica

La definizione della tettonica globale darà informazioni chiave sulla dinamica della crosta che caratterizza il pianeta. 5 tipi di tettonica è stata individuata: una griglia globale durante il rilassamento (di origine controversa) del bulge equatoriale; scarpate a lobi correlate al raffreddamento del core ed alla associata contrazione della crosta; strutture connesse al bacino Caloris, che include il terrapieno collinoso che è agli antipodi del bacino stesso; strutture minori come passaggi rettilinei, solchi e colline, collegati ad eventi tettonici locali; creste lineari di origine incerta.

La griglia globale è composta di linee ben sviluppate che caratterizzano le antiche regioni a crateri; queste strutture sono poco frequenti nelle regioni piane più giovani. Per questo motivo, esse sono considerate la primitiva architettura strutturale della crosta.

1.4.2 Proprietà meccaniche della litosfera

La topografia riflette il carattere della tettonica e dell'ambiente di erosione in cui si è evoluta una zona pianeggiante. Essa inoltre fornisce informazioni sulla struttura della crosta e può fungere da condizione al contorno per i modelli di problemi geologici su scala da regionale a globale. Poter correlare il modello digitale del terreno con i dati dell'anomalia sulla gravità può permettere di porsi delle domande importanti, come ad esempio se c'è correlazione tra anomalie topografiche e gravitazionali, e a quali lunghezze d'onda, o fino a che punto la topografia è supportata dalla forza meccanica della crosta o ancora se è necessario invocare un meccanismo di compensazione isostatica per spiegare le strutture topografiche più grandi, come sulla terra, e, se è il caso, quali proprietà termiche e meccaniche del fluido più denso provvederebbe alla spinta necessaria. Un'altra questione importante è se il processo di contrazione della litosfera a qualche stadio della sua storia termica, dovuto al graduale raffreddamento del pianeta, sia avvenuto solo nelle scarpate lobate o anche negli strati in profondità.

1.4.3 Età superficiale

I crateri danno informazioni sui processi geologici, le scale dei tempi e l'origine di oggetti impattanti. Sulla base delle relazioni ricavate tra le unità geologiche riconosciute il conteggio dei crateri e somiglianze con la superficie lunare, è stata definita una scala cronostatigrafica in cui la distribuzione della frequenza dei crateri in base alla dimensione osservata corrisponde alla distribuzione della frequenza di creazione di crateri in base alla misura, e questo riflette la distribuzione in frequenza dei proiettili in base alla grandezza. Questo è importante per stimare il flusso di impatto e le sue variazioni nel tempo nel Sistema Solare. Le immagini del Mariner 10 hanno mostrato che la superficie di mercurio presenta molti crateri come quella della luna e di marte. Comunque, i vecchi altopiani di mercurio e marte hanno meno crateri inferiori a 50 km rispetto alla luna. Per quanto riguarda mercurio ciò potrebbe essere spiegato da una parziale ostruzione dei crateri piuttosto che il rimpiazzo da parte di unità intercratere. Questi piani intercratere sono le unità pianeggianti più estese e i dati sui crateri indicano che essi si sono formati durante l'ultimo pesante bombardamento (circa 4 – 4.2 miliardi di anni). Se queste strutture avessero origine vulcanica, ciò significherebbe che mercurio è stato soggetto in tempi antichi a molta più attività vulcanica rispetto alla luna e i due pianeti hanno una differente dinamica interna.

1.4.4 Composizione superficiale

La composizione della superficie di Mercurio è argomento di dibattito, ed è difficile determinarla dalle osservazioni da terra. Una conoscenza della composizione ci permetterebbe di affinare i modelli sull'accrescimento dei pianeti terrestri. Calcoli sugli scenari possibili per l'accrescimento dei pianeti terrestri permettono varie conclusioni anche sul conto di mercurio e sono state suggerite tre differenti spiegazioni per l'elevata frazione di metalli presente. La prima suggerisce che ci siano delle differenze nella risposta da parte delle particelle di ferro e silicati al drag aerodinamico del gas nebulare. Nella seconda si ipotizza una vaporizzazione preferenziale dei silicati da parte della radiazione da una nebulosa calda e la rimozione ad

opera di un forte vento solare. Nell'ultima si suppone ci sia stato un grosso impatto che ha provocato la rimozione selettiva del silicato. Queste tre differenti ipotesi portano a differenti valori per il quantitativo di silicato su Mercurio. Nel caso della vaporizzazione, il modello prevede una perdita di alcali e ossidi di ferro, nel caso dell'impatto, sarebbe il silicato il materiale dominante del mantello. In entrambi i casi la crosta attuale dovrebbe rappresentare principalmente il volume integrato del magma prodotto dalla parziale fusione del mantello residuo (relitto). L'ipotesi aerodinamica invece prevede una spessa crosta primordiale, vale a dire la separazione cristallo – liquido di un oceano di magma di silicato. Le attuali informazioni che abbiamo sulla mineralogia superficiale del pianeta sono troppo limitate per poter scegliere una delle tre ipotesi come la più plausibile. VIHI ci permetterà di risolvere dubbi chiave sulla composizione del pianeta con una potente combinazione di risoluzione spaziale e spettrale.

Le caratteristiche principali degli spettri nel visibile e vicino infrarosso di Mercurio, da quanto si è visto con le osservazioni a bassa risoluzione da terra, è che sono poco definiti e mostrano un aumento nella riflettanza all'aumentare della lunghezza d'onda (pendenza spettrale). La pendenza spettrale è un parametro legato sia alla composizione che alla maturità del suolo (che è il tempo di esposizione del materiale al bombardamento micrometeoritico ed al flusso di radiazione); in genere la pendenza cresce con la soil maturity. Variazioni nelle strutture spettrali con la longitudine di mercurio indicano che la composizione mineralogica superficiale è eterogenea nello spazio e ciò implica che siano avvenuti processi di differenziazione a livello locale. In base alla ricalibrazione delle immagini a colori del mariner 10 è possibile distinguere le unità geologiche dai colori.

Il range spettrale proposto per lo spettrometro VIHI idealmente dovrebbe essere adatto ad identificare la maggior parte dei minerali che hanno larghe bande di assorbimento nel visibile e vicino IR. L'estensione al visibile che è stata proposta per lo strumento (fino a 800 nm, cioè 8000 Å) mira a vedere delle caratteristiche della superficie (basalto)

La maggior parte delle features dei minerali che ci si aspetta di osservare sono entro 2000 nm; si richiederebbe una copertura fino a 2500 nm ma in questo caso ci sarebbero dei problemi di dark current che riduce il rapporto segnale rumore, quindi si tratta di vedere se questo porterebbe ad un valido risultato scientifico; è in corso uno studio di trade off per valutare la possibilità di estendere il range fino a 2200 nm.

Il canale spettroscopico VIHI si propone i seguenti obiettivi scientifici:

- 1) Mappatura globale della superficie del pianeta in termini di composizione mineralogica per trovare le relazioni tra le strutture morfologiche, geologiche e di composizione di mercurio. Per avere la mappa spettrale dell'intera superficie è necessaria una risoluzione spaziale di almeno 500 m (in modo che sia confrontabile con la lunghezza caratteristica della regolite), o anche migliore.
- 2) L'identificazione della distribuzione spaziale delle diverse specie minerali presenti nel pianeta ad alte risoluzioni (spaziale e spettrale) fornirebbe importanti informazioni sulle differenti origini dei materiali.
- 3) L'identificazione delle differenti specie minerali e le loro abbondanze.
- 4) Identificazione di possibili minerali a lunghezze d'onda del visibile (per esempio solfidi a lunghezze inferiori a 600 nm, ossidi di titanio a 400 – 500 nm). Per soddisfare questo obiettivo è necessaria una risoluzione spettrale di 10 nm.
- 5) Identificazione dei tipi di silicati (pirosseno, feldspato, plagioclasio, olivina) la cui presenza è possibile sulla superficie di Mercurio per affinare i modelli sulla formazione: le bande principali per identificare questi minerali sono tra 800 e 2000 nm.
- 6) Analisi locale delle strutture su piccola scala (crateri, scarpate, flussi di lava, eiezioni), mettendo in relazione la morfologia osservata con le caratteristiche spettrali. Tale analisi darà informazioni sui processi che sono stati dominanti nella storia del pianeta: tettonica, attività vulcanica e crateri.
- 7) Identificazione dell'origine (endogena o esogena) delle strutture sulla superficie, distinguendo tra strutture vulcaniche e da impatto utilizzando le informazioni spettroscopiche ottenibili ad alta risoluzione spaziale (100 metri).
- 8) Identificare le differenze nella composizione tra i 4 tipi principali di terreno: con crateri profondi, piani, zone inter-crater, terreni collinosi. (Per questo obiettivo basterebbe una risoluzione di 500 metri).
- 9) Provare la stratigrafia superficiale attraverso i crateri: caratterizzazione mineralogica dei differenti strati. Mappatura mineralogica ad alta risoluzione potrebbe permettere l'identificazione della differente composizione mineralogica dei crateri di differenti età. Poiché questi materiali sondano la crosta a varie profondità, a seconda della dimensione del cratere, e a differenti epoche, a seconda

dell'età del cratere, questa osservazione permetterà di ottenere una panoramica sull'evoluzione nel tempo del materiale che compone la crosta.

10) Investigazione dettagliata della zona di confine tra i differenti tipi di terreni.

1.4.5 Proprietà della regolite e processi atmosferici

Mercurio è virtualmente privo di atmosfera, per cui l'evoluzione della sua superficie nel corso degli ultimi miliardi di anni è stata principalmente dominata da processi di "tempo atmosferico" spaziale; la conseguenza è che la superficie del pianeta è piena di piccoli crateri e ricoperta da regolite, che si pensa sia differente dallo strato di polvere superficiale che ricopre di altri corpi privi di atmosfera come, ad esempio, la luna. Nel caso di mercurio la prevalenza è di micrometeoriti (al massimo dell'ordine del centinaio di micron), la cui maggioranza provengono da comete sia a breve che lungo periodo in vicinanza del perielio. A causa dell'alta eccentricità delle orbite, i meteoriti impattano sulla superficie del pianeta a differenti velocità tra 15 e 120 km/s. Questo bombardamento continuo, insieme a impatti occasionali con eruzioni dei crateri, determina la frammentazione dei grani più grossi, la formazione di sferule vetrose sulle pietre più grosse e la riduzione del ferro in forma metallica. Quindi la regolite è un misto di rocce di diverse origini. Il paesaggio di mercurio su scala locale è caratterizzato anche da rocce assemblate per via meccanica formatesi dallo shock di un grosso impatto o tenute insieme da una fusione dovuta all'impatto. Gli impatti su media scala danno un movimento verticale e laterale della regolite, determinando così un continuo rimescolamento delle caratteristiche globali della superficie. La distribuzione dei grani in base alle dimensioni, la proporzione delle particelle vetrose, la frazione di ferro metallico libero come conseguenza dei micro impatti, il danneggiamento da radiazione dovuto alle particelle solari e ai flussi di fotoni (da 4 fino a 10 volte maggiore che alla distanza di 1 UA) costituiscono quelli che vengono definiti gli effetti di "maturità".

L'obiettivo principale del pacchetto Simbio-Sys per questo argomento sarà l'analisi delle proprietà della formazione della regolite e dei processi di evoluzione come pure il suo ruolo nell'interpretazione delle figure di albedo. La regolite di mercurio è più "matura" di quella presente sulla luna, con grani più piccoli (circa 40 micron) e maggiori proporzioni di particelle vetrose (>70%). Come conseguenza, l'aspetto dello strato superficiale dovrebbe essere più scuro e più rosso a parità di composizione. Come già visto con i campioni di rocce lunari, l'analisi della maturità del suolo è molto importante per trovare la composizione mineralogica dalle caratteristiche di riflettività spettrale. Per raggiungere questo obiettivo hric immagini ad alta risoluzione dei crateri a differenti valori di latitudine e longitudine per trovare il ruolo delle variazioni di ambiente termico e particellare nel modificare le proprietà di superficie. Vihi effettuerà osservazioni a differenti angoli di fase, per avere informazioni sulla distribuzione in dimensione delle particelle e la microstruttura fisica della regolite dalla misura della curva di fase spettrofotometrica.

1.4.6 Geofisica

La scoperta di un possibile campo magnetico intrinseco grazie alle misure fornite dal Mariner 10 richiede che al centro del pianeta vi sia una regione allo stato liquido di spessore sconosciuto. Gli obiettivi principali dal punto di vista geofisico si basano sulla misura dei parametri rotazionali di mercurio con la miglior precisione possibile, in particolare l'inclinazione e l'ampiezza della sua librazione forzata di periodo 88 giorni. Queste due quantità daranno informazioni sullo stato fisico del core, se solido o liquido, e la sua estensione. Grazie a questi dati è possibile ricavare il rapporto tra il momento d'inerzia delle parti solide esterne (crosta + mantello) di mercurio rispetto all'asse di rotazione e il momento d'inerzia (totale) dell'intero pianeta attorno all'asse di rotazione. Se tale rapporto è vicino all'unità, indica che il core è strettamente accoppiato al mantello e quindi è molto probabilmente solido, ma secondo gli attuali modelli che descrivono l'interno del pianeta, gran parte del core sarebbe liquida, e quindi il suddetto rapporto è inferiore a 0.5.

Una volta ottenuti i parametri orbitali, che sono essi stessi importanti obiettivi scientifici, è possibile studiare con maggior dettaglio la struttura interna e l'origine del suo campo magnetico con l'ausilio di altre informazioni indipendenti, provenienti dalle maree e da considerazioni di ordine chimico - cosmologico. Per l'estrema vicinanza al Sole, Mercurio ha maree più grandi che la Terra, e il potenziale che genera le maree su mercurio provoca delle variazioni periodiche sulla superficie, variazioni di gravità alla superficie, e variazioni nel campo potenziale gravitazionale esterno del pianeta. L'ampiezza degli effetti mareali è notevole, e viene espressa tramite i numeri di Love h , l , k , che indicano rispettivamente lo spostamento verticale ed orizzontale, e la variazione di potenziale gravitazionale esterno. Il numero di Love più utile è k_2

che misura il potenziale della massa spostata dalla marea rispetto al potenziale forzante. Esso dipende dalla struttura interna e dà la misura sia del raggio del core che del raggio del core interno.

1.4.7 Esosfera

Mercurio ha un'atmosfera molto tenue, di una densità misurata inferiore ai 10^7 atomi/cm³. A causa della bassa densità, l'atmosfera è non collisionale (in altre parole il libero cammino medio degli atomi è maggiore dell'altezza di scala dell'atmosfera), perciò l'intera atmosfera si può considerare come un'esosfera con l'esobase coincidente con la superficie del pianeta.

L'esistenza dell'atmosfera attorno a Mercurio è stata scoperta per la prima volta dagli spettrometri del Mariner 10 che hanno rivelato la presenza di tre elementi atomici: H, He, O. La presenza di Na, K, Ca fu scoperta successivamente per mezzo di telescopi a terra.

Le caratteristiche uniche dell'esosfera del pianeta sarebbero dovute essere studiate dallo spettrometro HIRIS, che però non è entrato a far parte del pacchetto Simbio-Sys.

Capitolo 2

Gli strumenti del pacchetto Simbio-Sys

2.1 Descrizione degli strumenti

2.1.1 Introduzione

La strumentazione di bordo del modulo MPO Mercury Planet Orbiter sarà finalizzata ai seguenti studi:

- analisi di porzioni ridotte della superficie del pianeta;
- investigazione della struttura di Mercurio;
- indagine scientifica di base;
- magnetometria;
- studio dell'atmosfera.

L'imaging e l'analisi spettrale saranno realizzati sia nei campi della radiazione infrarossa, visibile e ultravioletta che nel campo della radiazione γ e X; sono previsti inoltre spettrometri a neutroni, che permetteranno di collezionare dati aggiuntivi riguardo gli elementi che compongono la superficie, e altimetri laser. Telemetria e telecomando (up e down – link) supporteranno l'indagine nel campo delle onde radio; è previsto inoltre un transponder dedicato e un accelerometro ad alta precisione per tener conto degli effetti del plasma solare sulla propagazione delle onde elettromagnetiche e delle forze non gravitazionali sul moto dello spacecraft.

Il payload sarà costituito dai seguenti componenti:

- Imagers: Camera Suite (SIMBIO – SYS).
- Radiometer & IR Mapping Spectrum (MERTIS).
- Laser Altimeter (BELA).
- Ultraviolet Spectrometer (PHEBUS).
- X-ray spectrometer (MIXS – SIXS).
- Gamma – ray & neutron spectrometer (MGNS).
- Radio Science Experiments (MORE, ISA).
- Magnetometer (MERMAG).
- Particle Suite:
 - Neutral Particle Analyser ELENA/Strofiio.
 - Ion Spectrometers MIPA/PICAM.

Per quanto riguarda la suite SIMBIO – SYS, l'approccio di base utilizzato nel disegno dell'Instrument Front End (IFE) è orientato a distribuire al meglio i compiti tra i differenti canali ottici per le osservazioni spettroscopiche e di *imaging*. Per raggiungere la miglior coordinazione, il concetto proposto per gli strumenti è basato su un alto livello di integrazione. Questo approccio è volto ad ottenere il massimo ritorno scientifico rispetto agli obiettivi previsti con l'esplorazione di Mercurio, minimizzando l'impiego di risorse totali. Infatti, l'architettura proposta trae vantaggio dalle parti in comune tra i differenti canali che costituiscono SIMBIO - SYS. Inoltre, l'apparato è inteso anche per costituire una semplice interfaccia con lo S/C, provvedendo internamente alle necessità di gestire i singoli canali. Per questo aspetto, l'architettura prevista per gli strumenti prevede l'elettronica principale e la fornitura di corrente in comune. I tre strumenti che formano SIMBIO-SYS sono:

- HRIC (High Resolution Imaging Channel)
- STC (STereo imaging Channel)
- VIHI (Visible and near Infrared Hyperspectral Imager)

Inoltre SIMBIO-SYS include una unità di elettronica digitale per i collegamenti ai telecomandi o alla telemetria, e alla fornitura di energia elettrica. L'elettronica principale e la potenza sono comuni a livello di IFE (Instrument Front End). Ogni canale è costituito dagli elementi ottici, rivelatore, dispositivo per il controllo termico (se necessario), elettronica locale e interfaccia elettrica con quella principale.

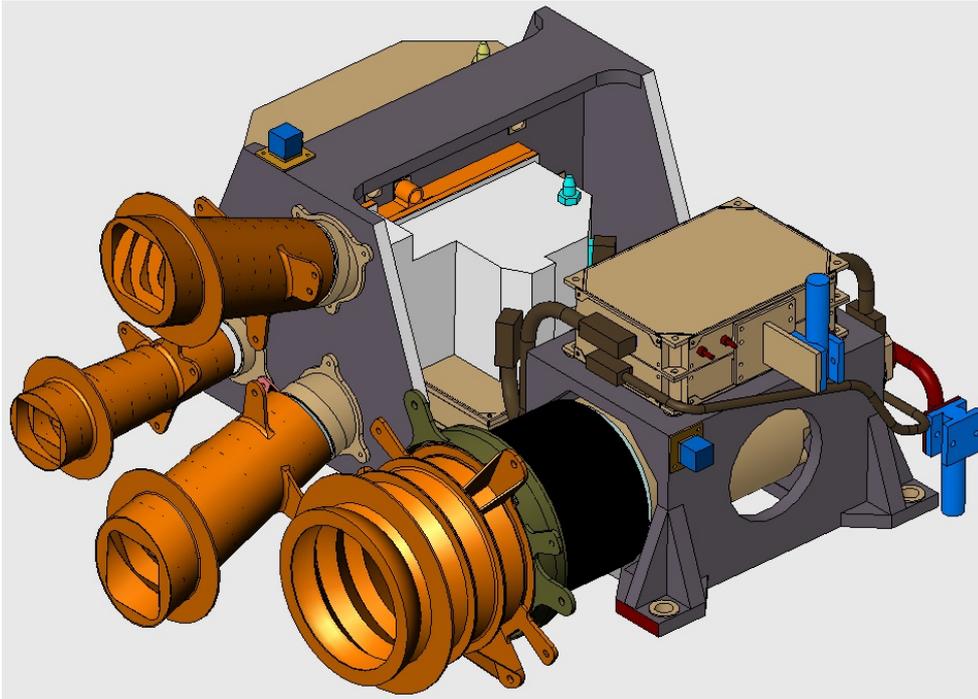


Figura 2.1. Il sistema integrato SIMBIO-SYS con i tre strumenti.

2.1.2 Banco ottico

L'elevato livello di integrazione della configurazione di SIMBIO-SYS è raggiunto utilizzando un unico banco ottico comune ai tre canali ottici e all'elettronica principale. Si dovrebbe evitare, dove possibile, la presenza di doppioni nelle risorse e funzioni comuni, per ottenere il massimo risparmio di risorse.

Da un punto di vista meccanico, ciò significa che i canali ottici non sono intesi come strumenti singoli a sé stanti, ma come un sistema integrato. In questo modo, i requisiti strutturali (ad esempio di rigidità e vibrazionali) possono essere ottimizzati a livello di sistema e non singolarmente, come pure tutti i test di tipo termico, vibrazionale e di allineamento: in questo modo è possibile anche contenere la massa totale.

A livello di sistema, i canali saranno integrati su un unico banco ottico, che rappresenta l'unica interfaccia verso lo S/C per quanto riguarda gli aspetti termici, meccanici, elettrici ed ottici (ad es. il coallineamento tra i canali è gestito internamente all'IFE). Questo tipo di approccio si propone anche lo scopo di garantire la stabilità del coallineamento tra i 3 canali, richiesta per avere migliori operazioni coordinate e inter-relazione tra i dati. Inoltre il banco funge anche da struttura di supporto per l'elettronica comune.

Da un punto di vista elettrico, l'IFE proposto permette di condividere tra i canali due funzioni principali, implementate a questo livello per evitare doppioni, e cioè la funzione dell'elettronica principale e quella della fornitura di energia. La prima è dedicata principalmente alla gestione e compressione dei dati acquisiti, controllo degli strumenti e gestione dei comandi – telemetria da e verso l'interfaccia con lo S/C. La seconda è incorporata nelle funzioni di SIMBIO-SYS ed è dedicata a rifornire tutti i sottosistemi dell'energia necessaria, provvedendo ad un comune set di voltaggi richiesti.

Un altro importante aspetto della sinergia che è possibile ottimizzare con un approccio integrato riguarda il controllo termico passivo dei canali e la dissipazione del calore. Infatti, per il controllo termico dei detectors di HRIC e STC si può utilizzare un *cold finger* comune, mentre per quello di VIHI sarà necessario un dispositivo per il raffreddamento esclusivamente dedicato, essendo questo un canale che opererà nell'infrarosso e quindi più sensibile al rumore termico. L'elettronica principale dovrebbe essere accomodata il più vicino possibile al radiatore dello S/C per dissipare per conduzione il calore generato internamente. Per quanto riguarda la reiezione del calore, delle valutazioni preliminari mostrano come solo per HRIC è necessario un filtro dedicato. Per gli altri canali, dei baffles riflettenti (senza filtri) dedicati sono sufficienti per minimizzare il calore totale da dissipare (a circa 2 W). Nel caso di HRIC, se si considera un filtro con rivestimento d'oro ed un baffle termicamente disaccoppiato da HRIC stesso (lunghezza circa 90 mm), restano 6 W da dissipare con *cold finger*. I baffles riflettenti esterni (fatti di metallo riflettente, ad esempio alluminio) di STC e VIHI dovranno essere termicamente collegati allo stesso finger per dissipare il calore da 2 W. Queste brevi considerazioni mostrano chiaramente quali sarebbero i vantaggi di adottare un approccio

integrato per gestire uno degli aspetti più critici della missione Bepi Colombo, cioè la gestione dell'ambiente termico e la dissipazione del calore. Nel caso di HRIC, la dissipazione del calore dal baffle al cold finger dovrebbe permettere di controllare la temperatura sul filtro fino a 300 °C (TBC), mentre il vetro in boro-silicato permette una stabilità ottica fino a 400 °C. Questo tipo di approccio minimizza il flusso radiativo verso le teste ottiche, permettendo la stabilità termica delle ottiche per tutti i canali.

2.1.3 HRIC (High Resolution Imaging Channel).

La camera ad alta risoluzione è stata concepita per soddisfare il requisito scientifico primario di ottenere immagini di aree selezionate del pianeta (circa il 20% della superficie) con una risoluzione al suolo di 5 m/pixel alla distanza di 400 Km dalla superficie stessa. Per permettere questo, il FOV è stato scelto di 1.47 gradi (in base al disegno ottico ottimizzato e descritto sotto) anziché 4° richiesti inizialmente per operare insieme al canale a bassa risoluzione per ottenere immagini stereo (non più richiesto da STC).

Questo canale ha i seguenti obiettivi: mappare l'intera superficie del pianeta ad una risoluzione di 30 metri per pixel, fornire immagini di aree selezionate della superficie con la risoluzione già detta sopra di 5 m/pixel, supportare l'esperimento sulla librazione del pianeta.

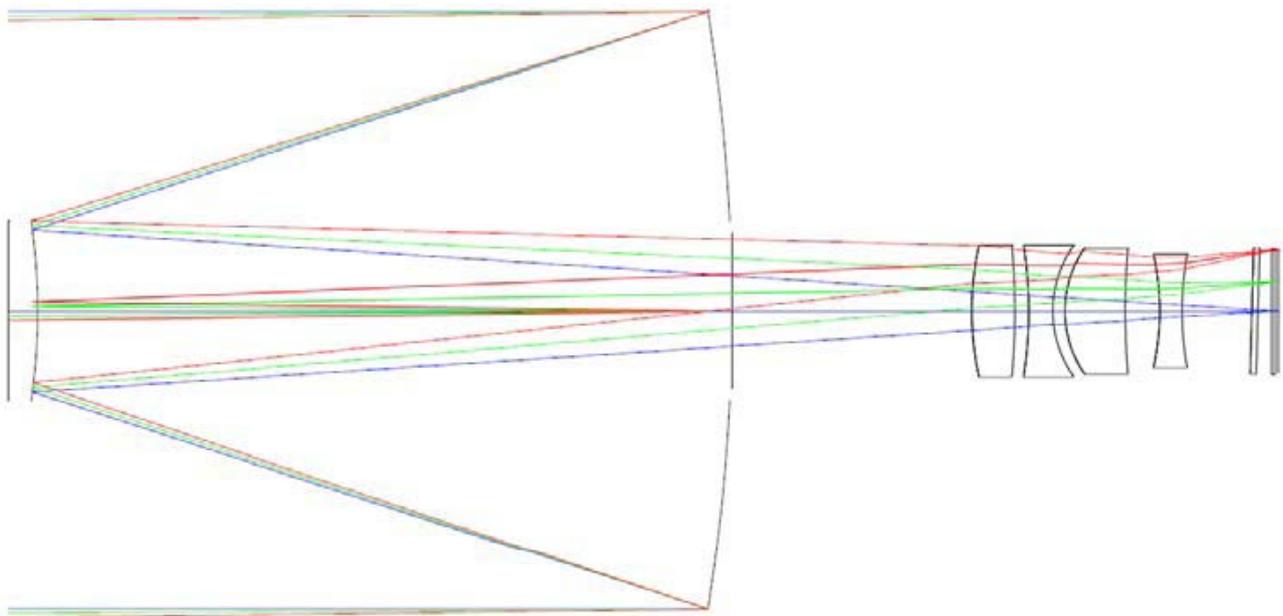


Fig.2.2. Disegno ottico di HRIC.

Il disegno ottico è costituito da un telescopio catadiottrico (lenti e specchi) in configurazione Ritchey – Chretien modificato con elementi rifrattivi, per correggere il campo di vista. La lunghezza focale è di 800 mm, che dà una risoluzione a terra di 10 metri per pixel con dimensione dei pixel di 10 μm ; la risoluzione potrebbe essere anche migliore a distanze di circa 400 Km dal suolo del pianeta. Per poter coprire interamente la superficie del pianeta da una rivoluzione all'altra, all'equatore è necessario un FOV di almeno 3.6°. Prevedendo un'orbita polare, le zone ai poli saranno osservate più spesso di quelle più vicine all'equatore. Alla lunghezza d'onda di 4000 Å l'apertura dev'essere di 100 mm (f/8) per raggiungere il limite di diffrazione, in modo da ottimizzare il flusso radiometrico e le dimensioni meccaniche totali. Il rapporto di oscuramento tra i diametri dello specchio primario e quello secondario è stato scelto pari a 0.3; la lente correttiva è costituita da 4 lenti sferiche in silicio, che corregge e trasmette bene in tutta la banda di osservazione (400 – 900 nm).

La velocità di tracking al perielio è di 2 Km/s, considerando il caso della massima risoluzione possibile. Per un valore del pixel al suolo di 10 m, il tempo di lettura dev'essere dell'ordine di 3.3 ms (millisecondi) al pericentro. Gli intervalli di lunghezze d'onda da osservare possono essere divisi in 3 bande, ciascuna larga 400 Å, centrate a 5500, 7000, 8800 Å. L'elemento che costituisce il filtro composto è formato da strisce parallele depositate su una finestra sottile, è posto davanti al piano focale ed è parte del pacchetto che include il sensore.

La soluzione proposta presenta notevoli vantaggi rispetto ad altre soluzioni basate, ad esempio, su disegni tutti diottrici o a due specchi; è più semplice, leggera, compatta, corregge bene l'aberrazione cromatica e possiede poche componenti sull'ampio range di lunghezze d'onda sull'intero campo di vista. Sebbene il disegno ottico selezionato garantisca perfettamente i requisiti scientifici e le prestazioni ottiche, verranno considerate altre possibili configurazioni catadiottriche (ad es Maksutov o Mangin) per uno studio di trade off durante la fase A, in termini di imperfezioni nella costruzione e rugosità della superficie degli specchi asferici rispetto alle limitazioni dovute alla massa e al volume massimi.

Lo strumento proposto è concepito senza uno shutter meccanico, in quanto per gli scopi di imaging la funzione dello shutter sarà svolta dal detector di tipo APS (active pixel sensor). Il carico termico, punto critico per gli strumenti, verrà evitato per mezzo di un filtro riflettente oppure di un coating riflettente in ITO (indium tin oxide, vale a dire un ossido di indio e alluminio) sulla prima lente, che riduce il calore incidente di circa l'80%. I requisiti sui baffle sono oggetto di studio, ma probabilmente esso verrà posizionato dietro il filtro riflettente, e non avrà quindi influenza sul carico termico della camera.

HRIC sarà un sistema cosiddetto "push-broom", (ovvero a "spazzettone"), utilizzerà come detto sopra un set di 3 filtri per lavorare in 3 differenti intervalli di lunghezze d'onda che sono da confermare. Tali filtri saranno posti in vicinanza del piano focale, o montati direttamente sul rivelatore. Ci sarà una regione o riga del detector dedicata a ciascun filtro, sicché alla fine il detector necessita di un numero di righe (o regioni) pari al numero di filtri utilizzati. È anche possibile utilizzare un sensore a matrice coperto di 3 filtri più grandi. Per il detector al piano focale, sensori a pixel attivi (i cosiddetti APS) sono i favoriti, per la loro intrinseca elevata tolleranza alla radiazione. Sensori esistenti hanno una tolleranza alla radiazione migliore di 230 krad (cobalto 60), il che equivale a sopportare una radiazione di $2,3 \cdot 10^5$ erg per grammo di materiale.

Il piano focale sarà costituito da una matrice APS da 2048 x 2048 pixel. Ciò potrebbe richiedere circa 1 secondo di lettura della matrice, e 3 ms per una singola riga. Uno dei vantaggi di utilizzare sensori APS è anche che essi riducono le risorse di potenza per l'elettronica a circa 1 W. Inoltre sarebbe possibile leggere una finestra random o selezionare un certo numero di pixel per le regioni di interesse.

È prevista anche una soluzione di back-up basata su un FT-CCD (Front Thinned, cioè assottigliato) da 1024 x 1024 pixel di 14µm di dimensione, con prestazioni solo leggermente differenti dalla soluzione con APS (ad esempio, efficienza quantica più bassa, ma anche rumore più basso e più elevato livello di saturazione).

La soluzione con array bidimensionale è da preferire rispetto a quella lineare per permettere l'acquisizione istantanea delle immagini, che sembra meno critica rispetto ai requisiti di puntamento e stabilità per uno S/C che si trova in un ambiente termico estremo come quello previsto per l'orbita attorno a Mercurio.

L'analisi delle prestazioni ottiche della camera mostra come quasi il 70% dell'energia cada entro il pixel, per differenti lunghezze d'onda (un po' meno alle lunghezze maggiori) e angoli del campo di vista.

Parametro	Descrizione	Note
Telescopio		
Tipo di ottiche	Catadiottrico: telescopio Ritchey – Chretien + correttore	
Apertura	100 mm	
Lunghezza focale	800 mm	
F/N	8	
λ per limite di diffrazione	400 nm	
Campo di vista	1.47°	
Ostruzione centrale	10%	
IFOV	12.5 µrad/pixel	
Intervallo spettrale	400-900 nm	
Larghezza di banda dei filtri	Tra 40 e 500 nm	Per i 3 filtri pancromatici

Canali spettrali	Pancromatico (centrato a 650, 550, 700, 880 nm)	Filtri
Efficienza dello specchio	98%	
Materiale degli specchi	Alluminio	Alternative possibili: SiC, zerodur
Encircled energy per pixel	67%	Caso peggiore nel FOV
Diametro dello spot	3.4 μm	Bordi del FOV
Curvatura di campo	0.05 nm	Caso peggiore
Distorsione	0.16%	Caso peggiore
Rivelatore	APS	CCD come soluzione di back up
Dimensioni	2048 x 2048 pixel	1024 x 1024 nel caso del CCD
Dimensione del pixel	10 μm	14 μm per il CCD
Fill factor del pixel	80%	
Efficienza quantica	55%	A $\lambda = 500 \text{ nm}$
Well capacity	10^5 e^-	
Temperatura operativa	- 10°C	
Tempo di esposizione	$\geq 0.5 \text{ ms}$	0.2 ms è l'obiettivo dello sviluppo tecnologico
Tempo di acquisizione del frame	< 1 s	Integrazione + lettura
Risoluzione		
IFOV	12.5 $\mu\text{rad/pixel}$	
Scala del pixel	5 m/pixel	A 400 Km

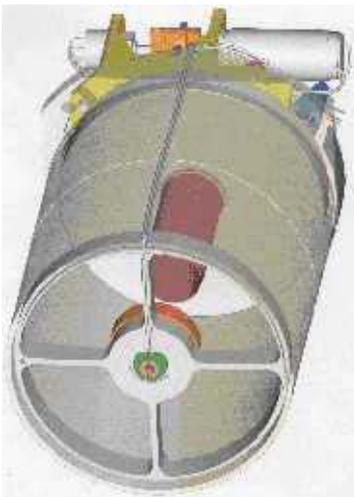


Figura 2.3. Modello di HRIC.

2.1.4 STC (STereo imaging Channel).

La configurazione ottica è stata disegnata per raggiungere lo scopo di fornire immagini stereo e a colori dell'intera superficie del pianeta (inizialmente era previsto in combinazione con quelle acquisite da HRIC) con una risoluzione di 50 m/pixel.

Inizialmente era stata adottata l'idea di utilizzare le due camere, HRIC a bassa risoluzione e STC, insieme per avere le immagini stereo partendo dal presupposto che esse abbiano lo stesso FOV; purtroppo questa condizione difficilmente potrà essere realizzata se al contempo si deve soddisfare anche il requisito che l'alta risoluzione spaziale di HRIC sia ridotta a 5m/pixel anziché 10. Inoltre, questo requisito forza anche il disegno ottico della camera, ed in questo modo i due strumenti sarebbero piuttosto differenti; la conseguenza è anche che per poter effettuare la ricostruzione stereo delle immagini, si aggiungono nuovi problemi come l'inter-calibrazione delle due camere.

Tenendo conto di queste considerazioni, si è deciso di adottare per STC un disegno ottico con due cammini ottici identici tra loro ed un unico piano focale; in una configurazione Petzval per ciascuno dei due, "a binocolo", in cui i due canali stereo sono orientati a +20° e -20° rispetto al nadir, ottenendo un campo di vista di 4°.

La stereo camera ha una risoluzione più bassa della HRIC, e quindi una focale più corta. Per la risoluzione richiesta (50m/pixel), è sufficiente una lunghezza focale di 80 mm. La pupilla d'entrata ha un diametro di 12 mm, dando così un f/N=6.6. Il disegno adotta come detto una classica configurazione Petzval, vale a dire due doppietti acromatici separati da aria e con uno stop intermedio, per ridurre l'aberrazione cromatica come pure altre aberrazioni monocromatiche; allo stesso tempo il disegno offre distorsione e curvatura di campo molto ridotte. Le lenti dovranno essere costituite di un vetro resistente alla radiazione, per sopportare l'ambiente termico critico previsto.

Le due camere condividono lo stesso rivelatore, i due cammini ottici nell'ultimo tratto sono paralleli ed entrambi i fasci luminosi arrivano perpendicolarmente al rivelatore; in prossimità del detector, i due fasci sono separati da un setto.

Il piano focale utilizza lo stesso schema di quello per HRIC, quindi un rivelatore APS con 3 filtri passabanda, centrati a 5500, 7000 e 8500 Å, ciascuno largo 200 Å. Le dimensioni del detector in pixel sono di 1024 x 1024. La scelta è caduta su un array bidimensionale piuttosto che un rivelatore lineare perché in tal modo è possibile avere un singolo detector ed elettronica relativa per entrambe le camere; inoltre permette l'acquisizione di immagini istantanee (come già detto per HRIC).

I tre filtri, più due pancromatici, saranno depositati su una sottile finestra davanti al detector a strisce larghe 1.4 mm. I 3 filtri e uno pancromatico saranno utilizzati dalla camera "davanti" - anteriore (quella che acquisirà l'immagine per prima) mentre la camera "dietro" - posteriore utilizzerà soltanto il secondo filtro pancromatico per realizzare l'immagine stereo. Grazie a tale configurazione, il sistema è in grado di acquisire simultaneamente 5 porzioni (una per ciascun filtro in uso) quasi contigue della superficie del pianeta a differenti lunghezze d'onda, ciascuna corrispondente ad un FOV lungo la direzione del tracking di 1° circa. Questa immagine composta, dopo l'acquisizione nel detector verrà letta durante il moto dello S/C; solo quando l'immagine sarà stata spostata della quantità pari alla larghezza della strip del filtro, verrà acquisita l'immagine successiva. Per quanto riguarda le prestazioni ottiche di STC, sono state valutate per differenti lunghezze d'onda (5000, 7000 e 9000 Å) e per differenti angoli del campo di vista; nel peggiore dei casi circa il 60% dell'energia cade entro un pixel (supponendolo di 10 µm), mentre nei casi migliori si arriva anche a raccogliere quasi il 90% dell'energia.

Parametro	Descrizione	Note
Telescopio		
Tipo di ottiche	Catadiottrico: configurazione Petzval + specchi	
Apertura	12 mm	
Lunghezza focale	80 mm	
F/N	6.6	
Campo di vista	4°	
Ostruzione centrale	0%	
IFOV	125 µrad/pixel	
Intervallo spettrale	500 – 900 nm	
Larghezza di banda dei filtri	20 – 250	
Canali spettrali	Pancromatico (650), 550, 700, 850 nm	
Efficienza dello specchio	> 80%	
Materiale delle ottiche	BK7	
Coating	Al + MgF ₂	
Encircled energy	> 70%	
Distorsione	< 0.001%	

Rivelatore	APS	CCD come back up
Dimensioni	1024 x 1024	
Dimensione del pixel	10 μm	14 μm per il CCD
Fill factor del pixel	80%	
Efficienza quantica	55%	A $\lambda = 500 \text{ nm}$
Well capacity	10^5 e^-	
Temperatura operativa	- 10°C	
Scala del pixel	50 m/pixel	A 400 Km
Tempo di esposizione	5 ms	
Tempo di acquisizione del frame	< 1 s	
Risoluzione		
Risoluzione angolare	125 $\mu\text{rad/pixel}$	
Risoluzione spaziale	50 m/pixel	

2.1.5 VIHI (Visible and near Infrared Hyper-spectral Imager).

Lo strumento è disegnato per effettuare l'osservazione dell'intera superficie del pianeta ad una media risoluzione spaziale e spettrale. Il campo di vista dello strumento è tale da garantire la copertura globale del pianeta nei primi 6 mesi della missione, con una risoluzione variabile secondo l'eccentricità ed orientazione dell'orbita.

Lo strumento è basato su di un'architettura collaudata, utilizza un telescopio riflettente ed uno spettrometro a reticolo di diffrazione in configurazione Littrow (fig. 2.3; il detector per ragioni di spazio uscirebbe dal piano del foglio). Per correggere le aberrazioni del cammino ottico sia del telescopio che dello spettrografo, sono inseriti due doppietti diottri. Il disegno ottico dello strumento nel complesso è vincolato dalla necessità di ridurre il volume, e di conseguenza la massa, dello strumento il più possibile senza comprometterne le prestazioni. L'intervallo di lunghezze d'onda selezionato per questo strumento risulta dall'aver tenuto conto sia degli aspetti scientifici che di quelli tecnici: mentre i requisiti scientifici prevedrebbero 0.8 - 2.5 μm , la proposta si estende a lunghezze più corte, tra 0.4 e 2.0 μm (con possibilità di arrivare a 2.2 μm), con una risoluzione spettrale di 6.25 nm/pixel. L'estensione alle lunghezze d'onda più corte permetterebbe di osservare le bande spettroscopiche caratteristiche di silicati, ossidi di ferro, composti di zolfo; inoltre l'intervallo tra 0.4 e 0.9 μm è coperto solo in parte dagli altri strumenti (nel caso di HRIC ad esempio solo 3 filtri a larga banda).

Tramite queste osservazioni sarà possibile il supporto per lo studio mineralogico di Mercurio e completare le informazioni sulla composizione elementare fornite dagli spettrometri a raggi X e raggi gamma, con una copertura globale della superficie del pianeta nelle bande del visibile e del vicino infrarosso (NIR near infrared), cioè nell'intervallo 0.7 – 2.5 μm , e si auspica la possibilità di estendere la sensibilità dello strumento fino a 0.4 μm (questo per poter rivelare materiali come pirosseni contenenti ferro, olivina, plagioclasio, ed argille).

Si deve anche tener conto del fatto che la regione compresa tra 2.0 e 2.5 μm è quella dove il contributo termico dal pianeta comincia ad influire sullo spettro, coprendo il segnale da acquisire; infatti già a 2.2 μm il contributo al segnale da parte di un corpo nero a 700 °K (427 °C) con la stessa emittanza spettrale della superficie di Mercurio è dello stesso ordine del segnale riflesso all'equatore.

C'è quindi un aspetto tecnico molto importante da considerare, ed è legato al rumore termico intrinseco del rivelatore. Il livello di "dark current" (cioè il livello al di sotto del quale non si ha segnale) dipende molto dalle lunghezze d'onda a cui è sensibile il rivelatore e alla temperatura a cui si trova.

Per la banda NIR verrà eseguita una mappatura dell'intera superficie con una risoluzione spaziale migliore di 400 metri al suolo. Per aree specifiche, circa il 5 – 10% della superficie, è richiesta una alta risoluzione (almeno 100 m). Quest'ultimo requisito si traduce in un FOV di 0.25 milliradiani, vale a dire 50". La risoluzione spettrale richiesta è di 20 nm.

Gli spettri vengono presi con un rapporto segnale – rumore superiore a 100 nell'intervallo 0.7 – 2.5 μm . Il disegno attuale dello strumento prende spunto dagli strumenti VIRTIS, FTIS, SIAM di Rosetta, e AMIE di Smart-1.

Lo strumento funzionerà in modalità "spazzolone" (push-broom), e sarà costituito da un'apertura di circa 18 mm di diametro, che si restringe verso lo specchio in modo da schermare il FOV di 4°; per ridurre il flusso solare del 35% circa, potrebbe essere inserito un filtro ottico, che riflette le $\lambda < 0.55 \mu\text{m}$. Il sistema sarà a due specchi, scelto in modo da raggiungere la risoluzione di 0.25 mrad, e l'elemento disperdente potrebbe essere

o un cubo beam splitter, oppure un prisma o un filtro variabile. Nel caso si adotti un prisma o un sistema che utilizza il concetto di trasformata di Fourier, è richiesta un'ottica che fornisca l'imaging. Infine servirà un filtro ITO, come per HRIC e STC, che respinga la maggior parte della radiazione IR a $\lambda > 2.5 \mu\text{m}$. Per il vicino infrarosso, i requisiti per il detector al piano focale sono di una matrice da 256 x 256 pixel (spaziale x spettrale), ciascuno di dimensione 30 μm , una well capacity di circa $10^6 e^-$ ed una velocità di lettura di 25 Hz, ovvero 25 frame al secondo. Al momento, tali requisiti sarebbero soddisfatti da un dispositivo costituito di InGaAs (Indio Gallio Arsenico) raffreddato termo - elettricamente fino alla temperatura di -50°C (223°K). Data la grande attività di ricerca in questo campo, ci si aspetta un notevole miglioramento di questi requisiti; il numero di pixel sia nella direzione spaziale che spettrale è compatibile con i requisiti sulla risoluzione, in modo da limitare la banda di rumore equivalente.

È prevista anche un'unità elettronica che comprende soltanto quella per l'acquisizione e gestione dei dati, conversione analogico – digitale, controllo. I compiti del sistema saranno compressione dei dati, memoria di massa, funzione di trasmissione dati. I detectors opereranno con corrente molto bassa, (la corrente massima che fluisce attraverso i diodi fotovoltaici è solitamente 25 pA) con un tempo di integrazione di 10 ms.

Punti critici:

Qui il problema dei baffles è meno critico perché si potrà utilizzare un filtro ITO per respingere il calore corrispondente a lunghezze d'onda al di sopra di 2.5 μm . La versione più semplice dello strumento utilizza un filtro variabile invece che disperdere la radiazione; in caso il filtro variabile non sia disponibile, si potrà utilizzare un prisma oppure un beam splitter.

Parametro	Descrizione	Note
Telescopio		
Tipo di ottiche	Schmidt modificato; spettrografo in configurazione Littrow	
Apertura	25 mm	
Lunghezza focale	160 mm	
F/N	6.4	
Campo di vista	3.7°	
Ostruzione centrale	No	
IFOV	250 $\mu\text{rad}/\text{pixel}$	
Intervallo spettrale	400 – 2000 nm	Possibile estensione fino a 2200 nm
Scala del pixel	100 m/pixel	A 400 Km
Canali spettrali	256	
Dispersione spettrale	6.25 nm/pixel	
Rivelatore	CMOS ibrido	HgCdTe su substrato trasparente al visibile raffreddato termoelettricamente
Dimensioni	256 x 256	
Dimensione del pixel	40 μm	
Efficienza quantica	> 50%	In tutto l'intervallo spettrale
Well capacity	$10^7 e^-$	
Temperatura operativa	- 50°C	Possibilità di raggiungere temperature inferiori
Tempo di esposizione	10 ms	
Tempo di acquisizione del frame	0.04 s	
Risoluzione		
Risoluzione spettrale	64 – 320 $\lambda/\Delta\lambda$	
Risoluzione angolare	250 $\mu\text{rad}/\text{pixel}$	
Risoluzione spaziale	100 - 375 m/pixel	A 400 e 1500 Km

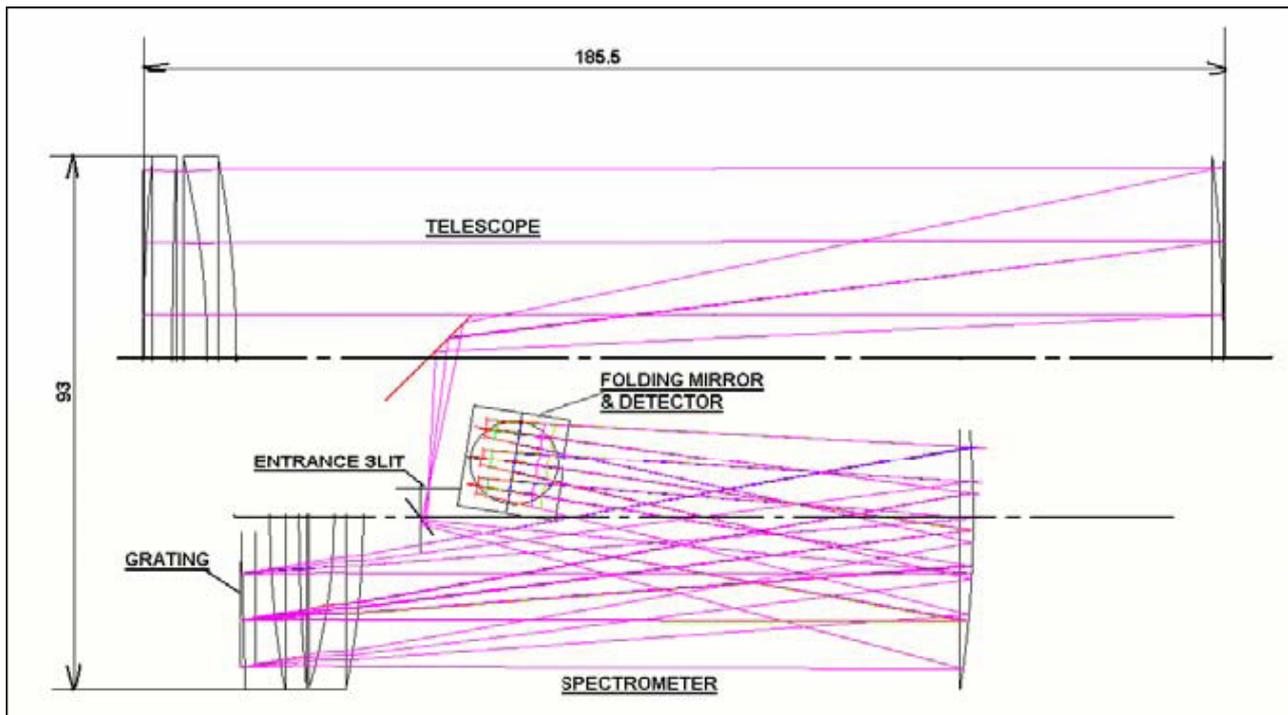


Figura 2.4. Disegno ottico dello spettrometro VIHI.

2.2 Prestazioni degli strumenti

2.2.1 HRIC

Per valutare il rapporto segnale – rumore (S/N) dello strumento si fissano dei parametri di valutazione, basati sulla definizione dell'analisi di missione, che sono i seguenti:

- orbita di MPO;
- ambiente di radiazione; sono da considerare condizioni estreme, per la costante solare sia al perielio che all'afelio;
- albedo superficiale di Mercurio, in media del 12%, variabile su tutta la superficie tra 8 e 45%; si assume che la superficie del pianeta sia Lambertiana.

Per quanto riguarda la copertura superficiale del pianeta, effettuando una simulazione delle osservazioni durante la missione nominale di MPO, si ha che, per osservazioni che avvengono lungo tutta l'orbita di MPO, la copertura è totale, con la scala che varia da 5 a 19 m/pixel (da pericentro ad apocentro); in caso invece di osservazioni solo lungo l'arco di orbita dove la risoluzione è maggiore (tra 5 e 11 m/pixel), la copertura risulta del 97%, con una mancanza solo del 3% che corrisponde alla fascia equatoriale compresa tra latitudini di +/- 32°.

2.2.2 STC

Tenendo conto dell'eccentricità dell'orbita, l'acquisizione delle immagini potrebbe venire ristretta ad un arco più vicino al pianeta, e in questo caso la distanza massima sarebbe di 860 Km dai poli. A causa della variazione lungo l'orbita della distanza tra lo strumento e l'oggetto, la distanza tra le posizioni dei due canali che osservano lo stesso punto (la cosiddetta baseline), aumenta con la latitudine; perciò l'accuratezza è migliore lungo l'equatore, peggiorando man mano verso le latitudini maggiori. Da un punto di vista puramente geometrico, la condizione migliore per l'accuratezza si ha quando una coppia di fasci provenienti dai due canali stereo si intersecano perpendicolarmente a 90°. Comunque, a parte considerazioni riguardo al disegno ottico, differenze di prospettiva rendono più difficile trovare la corrispondenza tra i punti e porta ad un aumento dell'intervallo di tempo tra le due immagini: questo potrebbe cambiare le condizioni di illuminazione, ed in particolare le lunghezze delle ombre. Aumentando l'angolo del campo di vista migliora l'accuratezza in elevazione e cala leggermente quella in longitudine e latitudine. Dopo simulazioni di

differenti angoli, si è concluso che il miglior compromesso è quello rappresentato dall'angolo simmetrico rispetto al nadir di 20° .

2.2.3 VIHI

Ci sono da considerare i contributi da Mercurio sia di luce riflessa che di emissione. Come valore per la riflettività di Mercurio si può utilizzare l'albedo a 550 nm (cioè nel visibile) così come presente in letteratura, e si può al momento trascurare l'assorbimento. È possibile tramite un codice modificare le condizioni di osservazione, la posizione orbitale e l'illuminazione come pure la temperatura superficiale. Ci sono due casi estremi:

- 1) alta irradianza e valore basso di dark current, questo si verifica quando: Mercurio si trova al perielio (lo S/C dovrebbe quindi trovarsi all'apocentro), l'osservazione avviene all'equatore, temperatura superficiale di $690 \text{ }^\circ\text{K}$ ($417 \text{ }^\circ\text{C}$), detector raffreddato a $200 \text{ }^\circ\text{K}$ ($-73 \text{ }^\circ\text{C}$), con dark current corrispondente di $0.16 \times 10^6 \text{ e}^-/\text{s}$
- 2) bassa irradianza ed alto livello di dark current, quando Mercurio è all'afelio (lo S/C sarà quindi al pericentro), le osservazioni avvengono ad alte latitudini (80°), il detector è alla temperatura di $220 \text{ }^\circ\text{K}$ (-53°C) con una dark current che arriva a $6.5 \times 10^6 \text{ e}^-/\text{s}$.

In entrambi i casi il rapporto S/N risulta essere superiore al valore imposto dai requisiti.

È necessaria la verifica del coallineamento fra i tre canali ottici per garantire la correlazione delle osservazioni effettuate dai 3 strumenti e raggiungere i migliori risultati scientifici dalla combinazione di osservazioni condotte in parallelo o in successione. Gli assi ottici dei due strumenti che puntano verso il nadir dovranno essere coallineati nella direzione perpendicolare a quella del moto dello S/C, mentre STC avrà i suoi 2 canali allineati a $\pm 20^\circ$ rispetto al nadir. Sono previste le seguenti attività: coallineamento della parte posteriore di ogni canale rispetto all'asse del pallet; cross calibrazione spettrale e radiometrica. È previsto anche coallineamento con altri strumenti dello S/C.

2.2.4 Osservazione di Mercurio

La missione nominale durerà un anno terrestre (circa 4 anni di Mercurio); si possono considerare i seguenti parametri orbitali per MPO: argomento del pericentro $\omega = 180^\circ$, ascensione retta $\Omega = 248^\circ$. La priorità nei primi 6 mesi, cioè nella prima metà della missione (2 rivoluzioni complete di Mercurio attorno al Sole) è la copertura globale da parte di STC (per le immagini stereo e a bassa risoluzione) e di VIHI (per la spettroscopia); comunque anche HRIC opererà in questo periodo. A causa della geometria dell'orbita dello S/C e delle proprietà della rotazione di Mercurio, durante questi primi 6 mesi ogni punto sul terreno verrà osservato una sola volta nelle stesse condizioni (inclinazione, altitudine, ...). Nei successivi 6 mesi, mentre STC effettuerà misure specifiche per completare la copertura globale, HRIC e VIHI eseguiranno osservazioni su obiettivi specifici (su circa il 10% della superficie totale) alla loro migliore risoluzione spaziale e spettrale.

Tutti gli strumenti di SIMBIO-SYS opereranno in luce diurna; nella regione dello spettro coincidente con la riflessione della luce solare, sono generalmente migliori le osservazioni a mezzogiorno per ottenere immagini con le stesse condizioni di illuminazione e ombre minime; questo aumenta anche il contrasto, dovuto alle proprietà del suolo, nelle immagini. Comunque verranno acquisite delle immagini specifiche anche con un angolo basso di illuminazione solare: per esempio, per determinare la struttura e la morfologia degli edifici vulcanici, serviranno osservazioni al terminatore.

2.2.5 Strategia osservativa di VIHI

È un imager iperspettrale a fenditura che lavora combinando informazioni spaziali e spettrali sullo stesso detector. L'acquisizione istantanea è quindi l'immagine sul rivelatore della sottile fenditura dello spettrometro, che ha dimensioni $0.25 \times 64 \text{ mrad}^2$, con la lunghezza orientata perpendicolarmente alla direzione del moto. VIHI lavora in modalità "spazzola", quindi l'immagine è costruita da acquisizioni consecutive della fenditura.

2.2.5.1 Mappatura mineralogica globale

Come detto sopra il requisito per VIHI è quello di fornire mappe mineralogiche dell'intera superficie del pianeta nei primi sei mesi.

Al pericentro la risoluzione spaziale massima è di 100 metri e varia con la latitudine fino ad un valore di 240 metri; questo implica che la risoluzione spaziale dello strumento può essere ridotta di un fattore circa 4 per

incontrare il requisito sulla copertura globale (risoluzione al suolo < 500 metri); ciò si potrebbe ottenere facendo la media di 4 acquisizioni lungo la fenditura. Verso latitudini più elevate la risoluzione spaziale cala...

Poiché non c'è sovrapposizione al pericentro tra due passaggi consecutivi dello strumento, VIHI dovrebbe operare per tutte le orbite almeno nella fascia compresa tra le latitudini $\pm 55^\circ$.

Una riduzione considerevole del volume dei dati si può ottenere anche nel dominio spettrale, dove infatti l'accordo tra potenzialità dello strumento e requisiti scientifici implica un fattore 3 di riduzione, da circa 6.25 nm che è la risoluzione massima, a 20 nm che è la risoluzione spettrale richiesta. Comunque è possibile migliorare la risoluzione con i binning del chip fino a 12.5 nm, e di conseguenza aumentare il ritorno scientifico.

All'apocentro invece, all'equatore è possibile coprire con un'acquisizione circa 96 Km; la risoluzione al suolo è proporzionale all'altitudine (varia da 375 m all'equatore a 240 metri alla latitudine di 70°). A latitudini più alte la sovrapposizione aumenta, quindi si possono ridurre le acquisizioni per ridurre anche il volume di dati.

Per coprire l'intera superficie dall'apocentro (che come detto sopra fornisce una miglior risoluzione spaziale) sono necessarie 160 osservazioni per arco (circonferenza di Mercurio/lunghezza all'equatore dello swath). Poiché ogni arco viene acquisito 4 volte, la copertura viene completata in 640 orbite, vale a dire in 62 giorni. Per ottenere questo all'arco dell'apocentro si deve estendere la copertura dell'angolo di fase fino a più di 80° , riducendo così in modo considerevole la qualità dei dati a causa della perdita di contrasto dell'immagine. Limitandosi ad un angolo di 45° , il periodo di osservazione è di 29 giorni o 75 archi, che permettono una copertura del 47%, ed il restante 53% deve essere coperto dal pericentro per poter completare tutto in 6 mesi. Per far questo sarebbe necessario acquisire 325 archi al pericentro. (Questo sarebbe ragionevole anche in termini di volume di dati).

2.2.6 Strategia osservativa di HRIC

HRIC opererà soltanto quando si troverà nella parte illuminata del pianeta e senza restrizioni di longitudine e latitudine del pianeta; principalmente opererà quando MPO si troverà nell'arco di orbita al pericentro, per massimizzare la risoluzione delle immagini. Durante la missione attorno al pianeta, eseguirà la mappatura del 20% circa della superficie del pianeta, e il 5-10% verrà eseguito dal pericentro per avere la massima risoluzione spaziale.

2.2.6.1 Copertura superficiale

La larghezza delle immagini acquisite da HRIC corrisponde al suolo a distanze variabili tra 10 e 38 Km; in questo modo dall'apocentro orbite successive permettono di coprire aree adiacenti, mentre dal pericentro, per osservazioni a latitudini < 50° , restano delle fasce scoperte, a causa dello scorrimento in longitudine tra un passaggio ed il successivo. La possibilità di ricoprire la superficie può arrivare al 97%, con scale da 5 a 11 metri/pixel (rispettivamente all'epicentro e ai poli); ciò garantisce flessibilità nella scelta delle regioni da osservare con i diversi filtri. Al contrario, per latitudini $> 55^\circ$ dalla parte del pericentro, e per qualsiasi altitudine all'apocentro, c'è una sovrapposizione nei campi di vista di HRIC. In questi casi la stessa area sarà osservabile più volte durante la missione, quindi si potrà sfruttare questo fatto per migliorare il ritorno scientifico delle osservazioni o per minimizzare il volume dei dati acquisiti.

2.2.7 Strategia osservativa per STC

Per le caratteristiche del pianeta e dell'orbita dello S/C, la mappatura viene completata in 196 giorni. In un periodo orbitale attorno al Sole, si distinguono due fasi, quella a bassa risoluzione (tra 110 e 190 m/pixel rispettivamente ai poli e all'equatore) e quella a media risoluzione (tra 50 e 110 m/pix all'equatore e ai poli rispettivamente). La prima fase dura per quasi 300 orbite di MPO; a causa della sovrapposizione del tracking, sarebbe possibile per STC operare ogni 4 orbite. Anche la fase a media risoluzione dura 300 orbite, e poiché la sovrapposizione all'equatore in questo caso è solo parziale, è necessaria l'operatività ad ogni orbita.

Capitolo 3

Requisiti di puntamento e allineamento

3.1 Puntamento */(interazione con BELA)*

BELA = BepiColombo Laser Altimeter. Il suo obiettivo scientifico principale è quello di fornire una griglia topografica del pianeta con un'accuratezza nella misura delle altitudini dell'ordine del metro. Le informazioni sulle altitudini fornite da BELA dovranno poi essere correlate alle immagini ottenute dalla HRIC, e per permettere tale correlazione BELA dovrà operare in condizioni di luce diurna. Opererà durante il passaggio di MPO al perielio, a distanze dal pianeta comprese tra 400 e 1000 Km.

3.1.1 Orbita, operazioni, puntamento

Per permettere la mappatura globale della superficie del pianeta, è richiesta un'orbita polare, con pericentro di 400 Km ed apocentro 1500 Km. La precessione naturale dell'orbita di MPO aiuterà a migliorare la copertura superficiale: una delle prime analisi condotte ad ESOC (European Space Operation Centre) indica che ci si aspetta che l'argomento del perielio vari di -33° /anno, il che corrisponde ad uno spostamento in latitudine del perielio verso nord. Gli strumenti durante la mappatura punteranno verso il nadir dello S/C, il cui periodo orbitale sarà di circa 2 ore e mezza.

Nel caso di Mercurio, trascurando la precessione dell'orbita, due orbite successive sono separate da 360° /(giorno siderale/periodo orbitale) pari a circa 0.6° .

Per quanto riguarda la correlazione tra le informazioni fornite da HRIC e LAT, l'impronta – scia del fascio dell'altimetro dovrà restare all'interno di un singolo pixel di HRIC (in modalità media risoluzione, quindi $15''.5$), il che implica un requisito di stabilità in pitch e roll (imbardata e rollio) di 15 arco secondi su un periodo di misura, che sarà di poco più di un'ora (lato notte). Il requisito sulla stabilità del beccheggio è meno stringente, ed è stimato in 2° . Il coallineamento non può essere stabilito in orbita, per cui la conoscenza prima e quella dopo sono richieste allo stesso livello.

Per massimizzare il rapporto segnale – rumore dell'altimetro, è importante che il FOV del telescopio ricevente sia il più possibile compatibile con l'impronta dell'area del fascio laser; in questo caso è possibile infatti minimizzare il contributo dell'illuminazione di sfondo.

3.1.2 Requisiti di puntamento

HRIC: puntamento verso il nadir. La stabilità del puntamento deve permettere di ottenere delle immagini con un'accuratezza di circa $3''.5$ dal satellite, il che implica un jitter accettabile in assetto della dimensione del pixel e una sovrapposizione delle immagini in longitudine in orbite successive. Oltre a questo, per misurare la librazione del pianeta è necessario raggiungere il 10% dell'errore dello spostamento alla superficie (rispetto ad un sistema di riferimento inerziale) dovuto alla librazione, che ha un'ampiezza di circa 350 – 400 m sulla superficie del pianeta all'Equatore. Ciò significa che è necessario ottenere un'accuratezza sulla superficie di 35 m rispetto ad un sistema di riferimento inerziale (nel caso peggiore). Questo è possibile con il seguente budget di errore:

- 2 m dovuti all'errore nella conoscenza della posizione dello S/C
- 28 m (all'altitudine di 1500 Km) dovuto all'angolo sotteso dal singolo pixel ($5''$) assumendo una risoluzione media di 0.75 pixel; ci sono delle indicazioni, le condizioni di illuminazione appropriata potrebbero ridurre ulteriormente l'accuratezza, al costo di limitare l'osservazione a periodi in cui si verificano tali condizioni, ma tutto ciò deve ancora essere confermato.
- 19 m (all'altitudine di 1500 Km) dovuto ad un errore di $2.5''$ distribuito tra i seguenti:
 - o errore sull'assetto ricostruito dello S/C (AMA = Absolute Measurement Accuracy) rispetto ad un sistema di stelle fisse, assumendo un errore del $\pm 1\%$ degli star trackers (soggetto ad una variazione di $\pm 3^\circ\text{C}$ in temperatura)
 - o errore nella conoscenza dell'allineamento della camera rispetto al sistema di riferimento dello S/C
 - o incertezza della deformazione termo- meccanica della struttura tra la camera e la stella. Deve ancora essere dimostrato che è possibile una calibrazione di questo parametro compatibilmente con i requisiti.

I contributi descritti sopra danno un RMS totale di 34 m di errore per un punto sulla superficie del pianeta rispetto ad un sistema di riferimento inerziale (quando il satellite è ad altitudine 1500 Km). Una incertezza maggiore in questo conteggio è data dalla relazione tra dimensione del pixel, condizioni di illuminazione e risoluzione, poiché non ci sono immagini di Mercurio con la risoluzione richiesta per poter provare la fattibilità. Nonostante questo, le immagini di Mariner 10 danno qualche rassicurazione sulla fattibilità dell'esperimento.

Testabilità dei singoli strumenti.

Gli strumenti verranno testati singolarmente e anche calibrati individualmente e successivamente integrati sullo S/C.

Cross- calibrazione.

La cross- calibrazione dell'allineamento degli strumenti verrà eseguita mediante collimatori, poiché gli strumenti sono focalizzati all'infinito, il che significa che la luce di una sorgente puntiforme deve essere resa parallela con molta accuratezza. Particolare attenzione va data alla simulazione e prova delle tecniche di scanning push broom, e la relativa generazione delle immagini.

La determinazione della sensibilità degli strumenti richiede sorgenti calibrate di riferimento; parte di questi compiti possono essere eseguiti a livello di unità prima dell'integrazione. I segnali generati dovrebbero essere il più vicino possibile all'ambiente del target per simulare osservazioni reali. Questo richiede operazioni anche ad alte temperature. Il co- allineamento e gli impatti termici possono essere studiati per interi gruppi di strumenti (come ad esempio per il pacchetto Simbio-Sys).

3.2 Esperimento sulla librazione di Mercurio: RSE

L'esperimento sulla librazione di Mercurio è parte del Radio Science Experiment (RSE) che sarà portato a termine da HRIC e STC insieme. Per la camera ad alta risoluzione questo esperimento richiede in particolar modo stretta conoscenza dell'assetto e del puntamento e perciò buona conoscenza del coallineamento tra HRIC e lo star tracker dello S/C.

I requisiti di puntamento sono specificati altrove ($AMA = 3''$).

La velocità delle osservazioni e/o il numero di pixel letti nella direzione spaziale viene ridotta ad alte latitudini a causa della ridondanza spaziale da un'orbita alla successiva. Le osservazioni verranno effettuate principalmente nel lato diurno.

Per l'*imaging*, l'AMA (Absolute measurement accuracy) richiesta per gli strumenti è di 10 arcsec (da notare che l'esperimento sulla librazione richiede requisiti più stringenti).

HRIC opera solo su terreno illuminato, con angoli di fase che variano tra 0 e 180°.

Per essere in grado di acquisire ripetutamente l'immagine di un'area specifica, è desiderabile che lo S/C punti tra -5° e +5° dal nadir.

Il coallineamento della parte posteriore di HRIC con gli altri strumenti dev'essere di 0.4° (24') (cioè 1/10 del FOV), mentre quello di STC dovrebbe essere migliore di circa 0.5° (30').

La stereo camera funzionerà nelle fasi iniziali della missione, e sarà utilizzata per definire le aree di cui acquisire immagini dettagliate con HRIC in alta risoluzione. Anche STC opererà solo su terreno illuminato, con angoli di fase tra 0 e 180°.

Lo strumento VIHI richiede che la sua parte posteriore sia puntata verso il nadir durante la mappatura, con la larghezza di *swath* trasversale alla direzione del *tracking* (cioè perpendicolare al vettore velocità). A causa della larga sovrapposizione nell'effettuare la scansione, VIHI potrà tollerare un errore assoluto di puntamento (APE, absolute pointing error) fino a 3 arcmin, dato che l'accuratezza assoluta sulla misura (AMA, absolute measurement accuracy), che è poi la conoscenza dell'assetto, è migliore di 5'' (corrisponde al 10% della dimensione del pixel al suolo). L'errore relativo di puntamento (RPE, relative pointing error) è meno costrittivo che in HRIC, ma dovrebbe essere simile alla STC.

3.3 Raccolta dei dati

L'area totale della superficie di Mercurio è di $75 \cdot 10^6 \text{ Km}^2$ (diametro 4879 Km). MPO sarà in orbita polare (come già detto apoermio 400 km, periormio 1500 km) con una velocità al suolo di 2.58 e 1.34 km/s, rispettivamente. Il pianeta ruota attorno al suo asse con un periodo di 58.65 giorni, mentre l'orbita dello S/C resta fissa.

L'orbita polare ha un periodo di 2.3 ore, e ciò significa che il pianeta ruota di 0.595° ($35'42''$) per ogni rivoluzione del satellite; questo corrisponde a 25312 Km all'equatore, o un FOV di 3.62° ($3^\circ37'12''$) a 400 Km di altitudine. Gli strumenti quindi dovrebbero avere un FOV di circa 4° , considerando una sovrapposizione del 10% all'equatore, in modo da coprire la superficie del pianeta in rivoluzioni consecutive. Si noti come la copertura ai poli è densa (il polo viene misurato 600 volte), così che una gran parte dei dati alle alte latitudini potrebbe essere scartata per risparmiare sulla telemetria.

Poiché lo S/C sarà dal lato notturno per metà del tempo e spesso molto più distante di 400 Km, si assume che ci vorranno circa 6 mesi anziché 58.65 giorni per mappare la maggior parte della superficie del pianeta.

3.4 Sommario dei requisiti di allineamento e di puntamento

Si assume che la velocità dello S/C sia di circa 3 Km/s e 2.2 Km/s al periermio e all'apoermio, rispettivamente; questo dà velocità angolari per quanto riguarda il puntamento del nadir di 3.63 e 1.89 arcmin/s in pitch (coordinata x). I dati forniti sotto sono tutti intesi come 2σ , e vanno intesi come ampiezze.

3.4.1 HRIC

Lo strumento ha al suolo una pixel size di 10 e 37.5 metri, rispettivamente, al periermio e apoermio. Per evitare lo sbrodolamento dei pixel al periermio, ogni pixel deve essere letto entro 3.3 ms, che è la massima velocità di lettura richiesta.

I requisiti di puntamento sono forzati dall'esperimento sulla librazione, che quindi influisce anche sulla risoluzione della camera. Per la HRIC è ammesso un errore totale di 2.5 arcsec, quindi l'AMA in pitch e roll (imbardata e rollio) è anch'esso di 2.5 arcsec. Il requisito per la coordinata yaw (beccheggio) dipende dalla risoluzione ottenibile dai pixel ai bordi del FOV, che dovrebbe essere sempre di 2.5 arcsec, e dà un AMA di 2.5 arcmin in yaw.

Per l'APE (absolute pointing error) si richiede che l'immagine sia centrata entro il 10% dell'intero FOV, quindi APE per pitch e roll è di 0.4° ($24'$). L'immagine non dovrebbe essere spostata di più di 10 pixel sul campo di vista, e quindi APE per lo yaw è di $24.6'$.

L'immagine è costruita da un sistema che "spazzola" il campo di vista, e quindi per poter ricostruire un'immagine da diverse linee, i *jitters* a breve termine tra due linee consecutive non dovrebbero essere più grandi di 1/10 di pixel, quindi l'errore relativo di puntamento RPE (relative pointing error) richiesto per il rollio è di $0.5''/3.3$ ms. Similmente per il pitch, linee successive non devono sovrapporsi per più del 10%, perciò il RPE per questa coordinata è 0.5 arcsec/3.3 ms, mentre per il rollio è di 14.8 arcsec/3.3 ms.

3.4.2 STC

Lo strumento ha una risoluzione di 30 m alla superficie del pianeta, e per evitare che i pixel acquisiscano altri dati prima della lettura dei precedenti, essa deve avvenire in 10 ms. Si richiede inoltre che le immagini di STC e di HRIC coincidano almeno entro mezzo pixel. Non è possibile ricavare dai dati l'angolo della visuale posteriore rispetto a quello di HRIC. Per raggiungere la risoluzione verticale richiesta che potrebbe essere raggiunta con la modalità stereoscopica, serve un'accurata stabilità e conoscenza dell'assetto; la conoscenza del coallineamento è richiesta, rispetto alla HRIC, entro $\frac{1}{2}$ pixel per il pitch, cioè $7.7''$. Per lo stesso motivo di accurata sovrapposizione dell'immagine, lo stesso requisito di 7.7 secondi d'arco vale per il rollio. Per lo yaw si richiede la stessa accuratezza di mezzo pixel per i pixel ai bordi del campo di vista, e quindi la richiesta per la conoscenza dell'allineamento rispetto ad HRIC per lo yaw è di $3.7'$.

Questa stabilità è necessaria per l'intero periodo di acquisizione delle immagini, che in genere è circa metà periodo di rivoluzione, quindi nel caso specifico di MPO circa 1h e 12 minuti. Poiché è impossibile calibrare il coallineamento con HRIC con l'accuratezza richiesta, il requisito per il coallineamento "post-facto" è identico.

3.4.3 VIHI

Lo strumento ha una risoluzione al suolo di 107 m al periermio. Per evitare pixel smearing, il tempo di lettura deve essere di 192.2 ms.

La pixel size è circa 3 volte quella di HRIC in modalità media risoluzione. È permesso che il coallineamento abbia una deriva di circa 1 pixel di HRIC in media risoluzione, e quindi la stabilità del coallineamento in pitch e roll deve essere di $15.5''$ sul periodo di misura, che nel caso specifico coincide con il tempo in cui MPO passa davanti al lato illuminato di Mercurio, e quindi tale periodo corrisponde a metà del periodo

orbitale di MPO e cioè 1.2 ore. Il requisito per il coallineamento in yaw coincide con quanto richiesto per i pixel ai bordi del FOV, e quindi la stabilità richiesta per il coallineamento sarà di 7.4 arcmin.

Per gli stessi motivi (coallineamento con accuratezza di almeno un pixel di HRIC), si richiede che la conoscenza del coallineamento “*post facto*” sia la stessa. Per poter raggiungere questa accuratezza dall’analisi dei dati, il coallineamento “*pre-facto*” con HRIC dovrà essere conosciuto almeno con una accuratezza equivalente a 5 pixel di HRIC in media risoluzione, vale a dire 77” per pitch e roll, e 36.9 arcmin in yaw.

3.4.4 LAT (ora BELA)

Il coallineamento del BepiColombo Laser Altimeter deve restare entro un pixel di HRIC in media risoluzione (3 volte il binning, quindi 15.5 arcsec), il che implica per pitch e roll un requisito sulla stabilità di 15” su un periodo di misurazione, che è di 1.2 ore (lato notte). La stabilità in yaw è meno critica, ed è perciò stimata in 2°.

Il coallineamento non può essere stabilito in orbita, e perciò la conoscenza “*pre-facto*” deve essere dello stesso valore di quella *post-facto*.

Capitolo 4

Riduzione della stray light con i *baffles*

4.1 Introduzione

Una delle maggiori difficoltà che si incontra nell'ottimizzazione delle prestazioni di telescopi spaziali è legata al fenomeno indesiderato della luce diffusa, dovuto alla riflessione della radiazione che proviene dall'ambiente esterno da parte delle superfici che precedono il rivelatore del telescopio e che sono caratterizzate da una certa rugosità superficiale (da cui deriva la riflessione diffusa).

I *baffles* sono dei dispositivi che proteggono la strumentazione a contatto con l'esterno da tutte le fonti di illuminazione diretta, che costituiscono una sorgente di disturbo, e dalla radiazione diffusa, che viene riflessa dalle superfici: nel caso della missione BepiColombo, strumenti come HRIC, adibiti all'osservazione della superficie di Mercurio, sono esposti all'intensa radiazione solare, che va quindi attenuata mediante l'uso di *baffles*.

I *baffles* servono ad evitare che radiazione fuori asse indesiderata (*stray light*) entri nello strumento (fig. 4.2). Sono spesso usati per ridurre la radiazione riflessa dalle pareti in un sistema.

La *stray light* può causare i cosiddetti ghost (immagini fantasma da raggi che si dividono) e luce diffusa da scattering se la superficie non è perfettamente speculare ma è lambertiana. Può essere causata da vari motivi: ghost in ottiche rifrattive e finestre, luce singola diffusa dovuta a un disegno non ottimale del baffle o ad un detector altamente riflettente, *stray light* dovuta a scattering multipli sempre dovuta a disegno non ottimale del baffle.

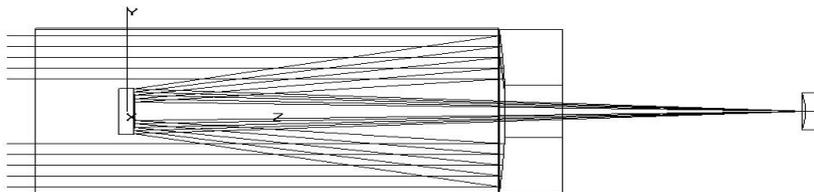


Figura 4.1. Disegno ottico di un telescopio.

Il punto cruciale di un uso efficace dei *baffles* è quello di fare in modo che non ci sia alcuna parte del detector che “veda” una superficie illuminata direttamente.

La luce entra in un tubo (cilindro), incontra delle pareti a corona circolare (setti) e di conseguenza subisce numerose riflessioni prima di giungere all'altra estremità del tubo: a questo punto il flusso luminoso (e termico) si è notevolmente ridotto. Questo tipo di soluzione fa parte del cosiddetto controllo termico passivo, che in casi particolarmente critici può non bastare, ed essere quindi adottato insieme al controllo termico attivo.

Nel disegnare i *baffles* si deve tenere conto anche dell'ostruzione che essi provocano all'immagine, quindi la situazione migliore è quella in cui si ha la minore ostruzione. Il problema principale dei *baffles* è che essi, pur eliminando la luce diffusa secondaria e quindi indesiderata, riduce anche la luce utile sul piano focale, perché in genere sono posti nello spazio dove passano i raggi che formano l'immagine. Questo significa riduzione del potere risolutivo dello strumento.

I tipi più frequenti di radiazione indesiderata sono la luce diretta del sole, la radiazione di corpo nero dai pianeti e la loro albedo, in altre parole la luce solare riflessa dal pianeta.

4.2 Formulazione analitica del problema

Il problema dipende dai seguenti parametri:

Diametro dell'apertura, D ;

Geometria del disegno ottico: raggi di curvatura ed eccentricità delle ottiche dello strumento, distanza delle stesse tra loro;

Angolo di campo di vista, α .

Heinisch e Jolliffe (1971) hanno presentato dei principi base che regolano i processi di propagazione dei raggi, assai importanti per disegnare i *baffles*.

Il primo è che nessun componente ottico deve “vedere” direttamente una parete illuminata dal sole o i bordi dei setti, questo significa che la *stray light* proveniente da una sorgente deve essere riflessa almeno due volte da parte delle superfici nere del *baffle* prima di raggiungere le ottiche dello strumento. In secondo luogo, la luce proveniente dal *baffle* deve subire un numero massimo di riflessioni.

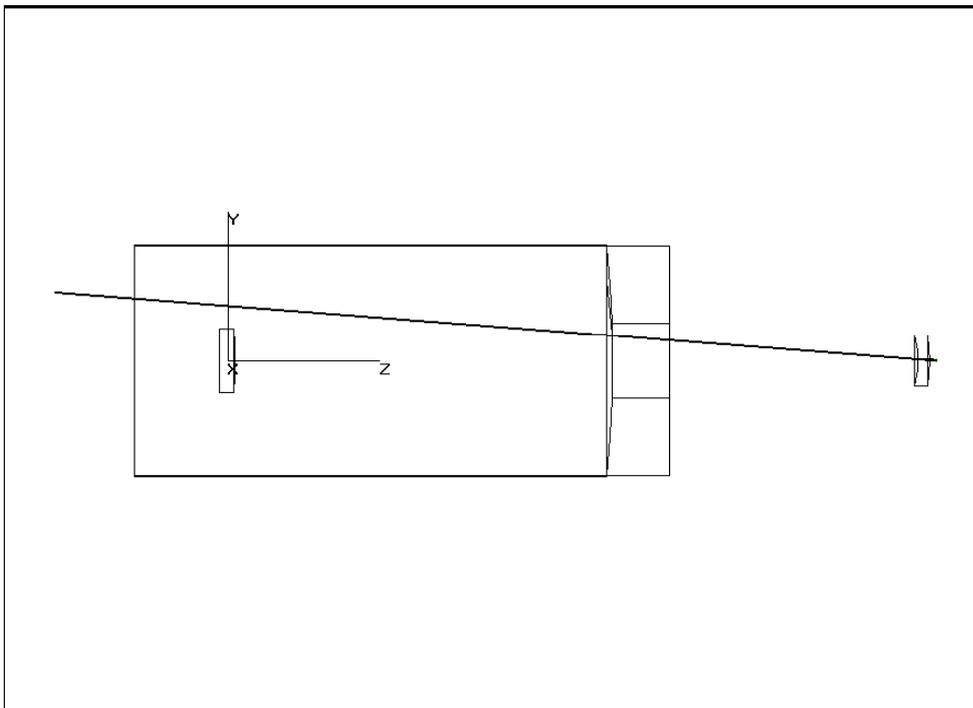


Figura 4.2. Esempio di stray light: un raggio luminoso proveniente da una sorgente esterna al campo di vista giunge al detector senza incontrare ostacoli e senza essere riflessa dallo specchio primario, né dal secondario.

4.3 Qualche definizione

Un sistema ottico che attenua le sorgenti fuori dal campo di vista (FOV) si dice che ha una buona reiezione (respinge bene) fuori asse (OAR, off-axis rejection, oppure OFVR, out field of view FOV rejection). Ma l'utilizzo del termine reiezione, preso in prestito dall'ingegneria elettronica, è improprio: la maggior parte dei baffles sono disegnati per assorbire la radiazione fuori asse piuttosto che respingerla. Meglio quindi parlare di assorbimento o attenuazione fuori asse. In ogni caso, la proprietà viene descritta dalla PST (point source transmittance) oppure dalla PSR (Point source rejection ratio). Sono entrambe quantità adimensionali, usate indifferentemente, anche se hanno significati differenti.

Si definisce la PST (T_{ps}) come:

$$T_{ps}(\theta, \varphi) = H_d(\theta, \varphi) / H_c(\theta, \varphi), \quad (1)$$

cioè il rapporto tra $H_c(\theta, \varphi)$, l'irradianza all'apertura d'entrata (collecting) del sistema ottico da un punto sorgente posto a distanza infinita ad angoli polare e radiale rispettivamente θ e φ dall'asse ottico, e $H_d(\theta, \varphi)$, che invece è l'irradianza che arriva al detector del sistema.

Analogamente la PSR (R_{ps}) è definita come rapporto tra potenze:

$$R_{ps}(\theta, \varphi) = W(\theta, \varphi) / W_0, \quad (2)$$

con W_0 potenza raccolta dal rivelatore da un punto sorgente sull'asse ottico, e $W(\theta, \varphi)$ è la potenza raccolta dal rivelatore dalla stessa sorgente posta a (θ, φ) .

Se H_d è uniforme sul detector, si ha che

$$W(\theta, \varphi) = H_d(\theta, \varphi) \cdot A_d, \quad (3)$$

dove A_d è l'area del detector. Quando l'area di apertura di raccolta è pari a quella di apertura libera, ed il detector raccoglie tutta l'irradianza in asse, si può scrivere

$$W_0 \cos\theta = H_c(\theta, \varphi) A_c \quad e \quad R_{ps}(\theta, \varphi) = T_{ps}(\theta, \varphi) A_d \cos\theta / A_c, \quad (4, 5)$$

A_c è l'area di apertura. Sia PST che PSR sono utili misure delle prestazioni di un baffle ottico. Poiché la PST non dipende dall'area del detector, essa è utile per confrontare vari sensori tra loro. La PSR è più facile da usare nel calcolo di altre quantità, come ad esempio i rapporti di attenuazione di sorgenti estese, quando l'area di apertura non è uguale a quella libera. Inoltre la PSR è anche più facile da misurare in laboratorio rispetto alla PST.

4.3.1 Funzione di ombreggiamento del baffle

Poiché il primario diffonde la luce nel campo di vista, esso deve essere protetto – ombreggiato il più possibile, e questo è possibile ponendo un lungo tubo davanti al primario. Assumendo che tutta la luce incidente sul tubo venga assorbita dallo stesso, si può approssimare la PSR con:

$$R_{ps}(\theta) = B(\theta) \Omega_d F(\theta), \quad (6)$$

dove $B(\theta)$ è la funzione di distribuzione della riflettanza bidirezionale (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) del primario, Ω_d è il campo di vista del detector, e $F(\theta)$ è la frazione del primario che viene illuminata da un punto sorgente (sorgente puntiforme) ad un angolo θ rispetto all'asse ottico, anche detta funzione d'ombra del baffle. La (6) è il limite inferiore per la PSR, vale a dire è la PSR per un baffle perfetto.

4.3.2 Requisiti di prestazione

Spesso i requisiti sono del tipo “la stray light non deve superare il valore R quando il sole si trova ad un angolo θ_s o la Terra ad un angolo θ_E rispetto all'asse ottico”.

Gli angoli θ_s e θ_E influenzano pesantemente il disegno del baffle al primo ordine. Se le condizioni lo richiedono, si può rendere l'angolo critico θ_c in $F(\theta)$ più piccolo di θ_s o di θ_E , eliminando il primario come diretto responsabile della diffusione-scattering. Il tubo sarà piuttosto lungo, comunque, se θ_E oppure θ_s è piccolo. Consideriamo soltanto il Sole; allora, se θ_s è grande, si può disegnare un grande pre-baffle conico, cosicché la maggior parte della radiazione viene riflessa via lontano dal sensore, e solo una piccola frazione viene scatterata al baffle principale.

4.4 Disegnare i baffles (metodo grafico)

Esiste un metodo grafico per determinare il *baffle* più adatto per uno strumento: in questo modo si delimita subito lo spazio di vista utile, in modo che non ci sia vignettatura del campo di vista desiderato.

I bordi interni dei setti dovrebbero essere appuntiti, e le loro superfici rivide e scure, cioè con un elevato coefficiente di assorbimento; questo comporta un aumento dei costi di produzione, ed esistono alternative meno costose ed ugualmente efficienti. Talvolta è sufficiente lavorare le superfici interne della montatura del telescopio in modo che siano rigate, e già questo serve a ridurre lo scattering interno.

In questo modo le riflessioni vengono bloccate e diffuse, riducendo la quantità di riflessione e distruggendo le immagini secondarie.

E' anche consigliabile l'uso di una vernice nera, sebbene si deve stare attenti al fatto che la vernice rimanga opaca e nera anche per angoli di incidenza quasi radente e alle lunghezze d'onda d'interesse. Un trattamento semplice, efficace e poco costoso è anche quello della satinatura (lavorare le superfici con la sabbia o altro materiale abrasivo) per irruvidire ed annerire la superficie. Oppure è possibile applicare della carta nera in “focchi” (il cosiddetto *black velvet*), che si trova in rotoli, si taglia a misura e poi si applica alle superfici.

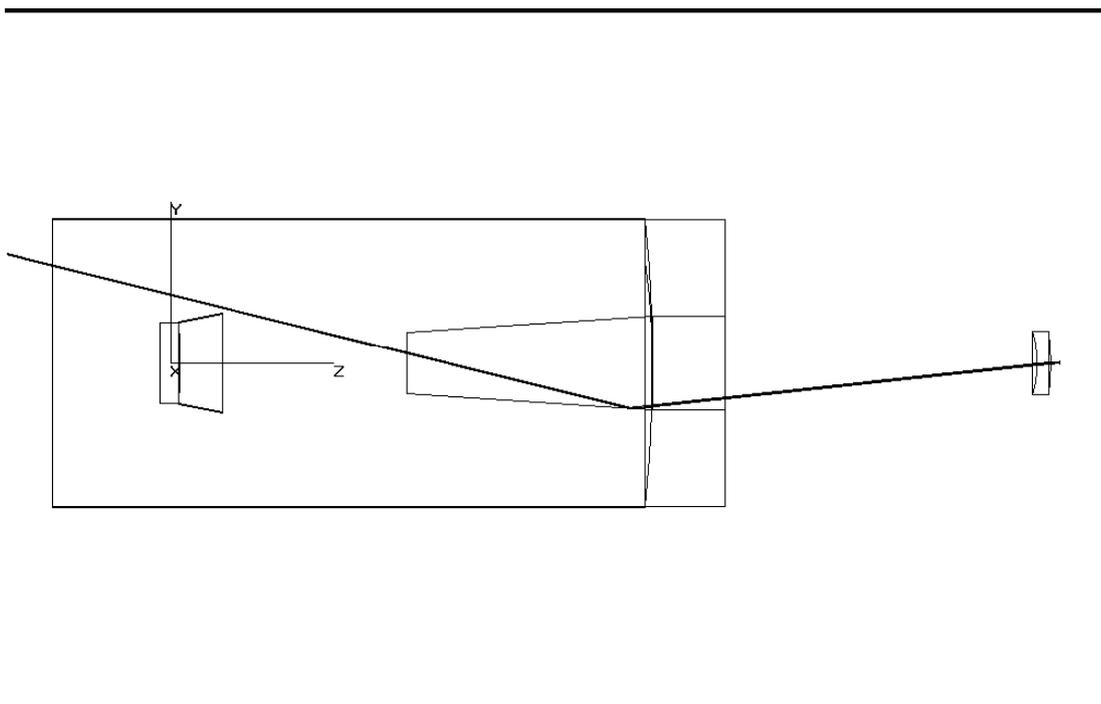


Figura 4.3. Ancora un raggio fuori asse che viene intercettato dal bafflo ma raggiunge ugualmente il rivelatore.

Per sistemi soggetti a riscaldamento si deve trovare un giusto compromesso tra eliminazione della *stray light* e di diffusione termica; se le superfici sono nere, altamente assorbenti si scaldano molto e questo potrebbe essere un problema, quindi è da valutare l'utilizzo di superfici riflettenti per limitare il flusso termico assorbito ed il conseguente degrado delle proprietà dello strumento e della qualità dell'immagine.

4.5 Tecniche di disegno

4.5.1 Considerazioni preliminari

Ci sono dei concetti di base da tener presente quando si disegnano i baffles. Nella visualizzazione della propagazione della *stray light* in un sistema ottico, uno degli scopi del progettista è quello di far sì che la luce subisca un numero massimo di riflessioni o scattering (più in generale, si vuole ottenere un numero massimo di "rimbalzi") ad opera di superfici assorbenti prima che essa giunga al detector. Questo perché l'attenuazione (a) dipende dal numero (n) di riflessioni, oltre che dalla riflettività (ρ) del materiale: $a = \rho^n$. Quindi disegnando il bafflo in modo appropriato si può ottenere un numero arbitrariamente alto di riflessioni. Un altro scopo principale del progetto è di assorbire il massimo della radiazione indesiderata prima che giunga all'obiettivo primario, specchio o apertura, altrimenti questa luce potrebbe essere diffusa direttamente all'interno del campo di vista e venire focalizzata sul rivelatore.

Per tubi e setti più piccoli, c'è meno superficie utile e quindi ci si aspetta che in questo caso venga assorbita una minore quantità di *stray light*; questo porta alla conclusione che l'efficienza di un bafflo dipende dall'area delle sue superfici, ma questo vale fino ad un certo punto.

Un altro fattore di cui tener conto nella progettazione sono i costi di produzione, perciò si cerca di adottare delle soluzioni che siano allo stesso tempo semplici da costruire ed ugualmente efficaci, ad esempio si possono usare dei setti piani piuttosto che conici o con altre forme particolari.

Bisogna avere un metodo per poter valutare il bafflo anche durante la fase iniziale del disegno, per questo è molto utile disporre di programmi che eseguono il ray-tracing del sistema ottico considerato, ed in particolare del bafflo oggetto di studio.

4.5.2 Setti dei baffles

In un sistema che ricrea l'immagine, i setti nei baffles sono necessari solo nel tubo di fronte al primario. Comunque, in altri sistemi, i setti probabilmente sono necessari lungo tutto il bafflo.

Esistono anche dei criteri per determinare la spaziatura dei setti per un dato angolo d'incidenza dei raggi e un numero minimo di riflessioni desiderato, sia nel caso di setti perpendicolari al tubo che inclinati di 45°; ad esempio ponendo questi ultimi ad una distanza pari alla loro profondità, si avranno tre riflessioni speculari. Si noti che queste considerazioni valgono solo nel caso di baffles altamente riflettenti specularmente, ed in questo caso si può ottenere un numero arbitrariamente alto di riflessioni speculari, semplicemente variando-aumentando il rapporto a/s , ovvero il rapporto profondità dei baffles/ spaziatura. Va ricordato inoltre che queste considerazioni vengono fatte trascurando lo scattering dai bordi dei setti.

Utilizzando il concetto di un semplice tubo con uno specchio primario all'estremità, è possibile creare dei baffles con vari criteri; uno di questi è quello secondo cui non si devono avere riflessioni speculari direttamente dal baffle allo specchio primario. Già questo accorgimento comporta un notevole miglioramento per un tubo piano, e se si applica una finitura-vernice che riflette specularmente, può bastare come soluzione.

Un altro requisito può essere quello che non ci siano riflessioni diffuse dal baffle al primario, (altrimenti definito che il primario non “veda” porzioni del baffle direttamente illuminate, tranne i bordi del baffle); quando il baffle ha una finitura-vernice che riflette in modo diffuso, è più difficile determinare la posizione ottimale dei setti rispetto al caso di riflessione speculare della superficie. È possibile assicurare più di due rimbalzi da un baffle che riflette in modo diffuso prima di giungere allo specchio primario, e questo comporta un'analisi complicata, che deve tener conto della BRDF della vernice e di tutti i possibili cammini ottici a causa dello scattering. È possibile anche aumentare la superficie dei setti, ad esempio adottandone di forma conica; in questo caso, quando si usano superfici riflettenti specularmente, si deve fare attenzione a che i setti conici non formino l'immagine della sorgente sullo specchio primario. In un sistema ad ampio campo di vista, i setti possono anche “immaginare” la sorgente sul detector.

4.5.3 Bordi dei setti

Bisogna anche tener conto dello scattering ad opera del bordo dei setti; si può calcolare una stima della PSR da questa fonte nel caso peggiore calcolando l'area dei bordi che sono visti sia dalla sorgente che dallo specchio primario, da dividere poi per l'area dell'apertura.

Lo scattering dai bordi può essere minimizzato specificando un piccolo raggio. A meno che il numero dei setti sia molto elevato, lo scattering dai bordi è trascurabile, perché di solito non contribuisce in modo importante alla stray light.

4.5.4 Radiazione diffratta

Nei sistemi ottici che hanno requisiti stringenti per quanto riguarda la stray light, oppure in cui il rapporto tra la lunghezza d'onda e l'apertura (λ/D , ossia il raggio del disco di Airy che determina la diffrazione del sistema) è grande, il contributo dovuto alla diffrazione non è trascurabile, anzi può contribuire in modo significativo alla PSR. La radiazione diffratta in un sistema che ricrea l'immagine può essere ridotta inserendo uno stop di campo e di Lyot. Nei sistemi non imaging, invece, si può fare in modo che la luce venga diffratta più di una volta prima di entrare nel campo di vista.

In conclusione, si può affermare che il disegno e la progettazione dei baffles è una materia complicata, bisogna controllare la stray light rivestendo il baffle con una finitura riflettente specularmente, e utilizzando elementi ottici a basso scattering. Per valutare la stray light vengono in aiuto potenti programmi, indispensabili per il disegno di sistemi complessi.

4.6 Baffles con profili differenti

Negli ultimi anni sono state studiate e sviluppate valide soluzioni alternative rispetto alla “classica” configurazione del baffle con setti piani, soprattutto per applicazioni spaziali in cui i requisiti sono molto più stringenti che per telescopi terrestri: configurazioni a setti tronco - conici, setti cioè da sezioni di coniche (il baffle ha così un profilo a “dente di sega”).

Vengono di seguito descritti i più comuni, anche alla luce delle recenti analisi preliminari per BELA (BepiColombo Laser Altimeter).

Tutte queste differenti configurazioni sono state prese in considerazione anche per la camera ad alta risoluzione HRIC, e confrontate tra loro per stabilire quale sia la più adatta; come si vedrà poi, si è scelto di adottare la configurazione denominata “Stavroudis” per le sue caratteristiche.

4.6.1 Profilo Radovich

L'idea di base consiste nel far "ruotare" i due punti focali di una ellisse attorno all'apertura dello strumento: questo funzionerebbe per una sola ellisse, ma in un sistema con una serie di ellissi con i fuochi in comune, la prima ellisse, cioè quella davanti all'apertura, bloccherebbe in parte il percorso da quelle del retro.

L'idea di Radovich è quella di tenere un fuoco fisso davanti all'apertura, e l'altro all'apertura corrispondente all'ellisse precedente (si veda fig. 4.4). La superficie del setto risulta dalla rotazione del segmento ellittico attorno all'asse ottico; in questo modo, tutti i raggi entranti trovano una via d'uscita attraverso l'apertura precedente. Il vantaggio principale di questa configurazione è che prevede una sola riflessione per i raggi (che arrivano) in piano (si intende il piano del foglio), mentre alcuni raggi sghembi vengono intrappolati dai vani. Infatti in questa configurazione si creano delle cavità in cui i raggi possono essere intrappolati se il loro cammino ottico non è perfetto, o meglio non sono compresi nel piano del foglio. Essi vengono intrappolati maggiormente nelle prime due cavità; il disegno è determinato completamente dal diametro esterno ed interno e dalla lunghezza del baffle. Tutti i vani avranno forme differenti e quindi necessitano di manifattura e coating individuali, cosa che condiziona i costi di realizzazione rispetto ad un baffle in cui i vani sono tutti uguali.

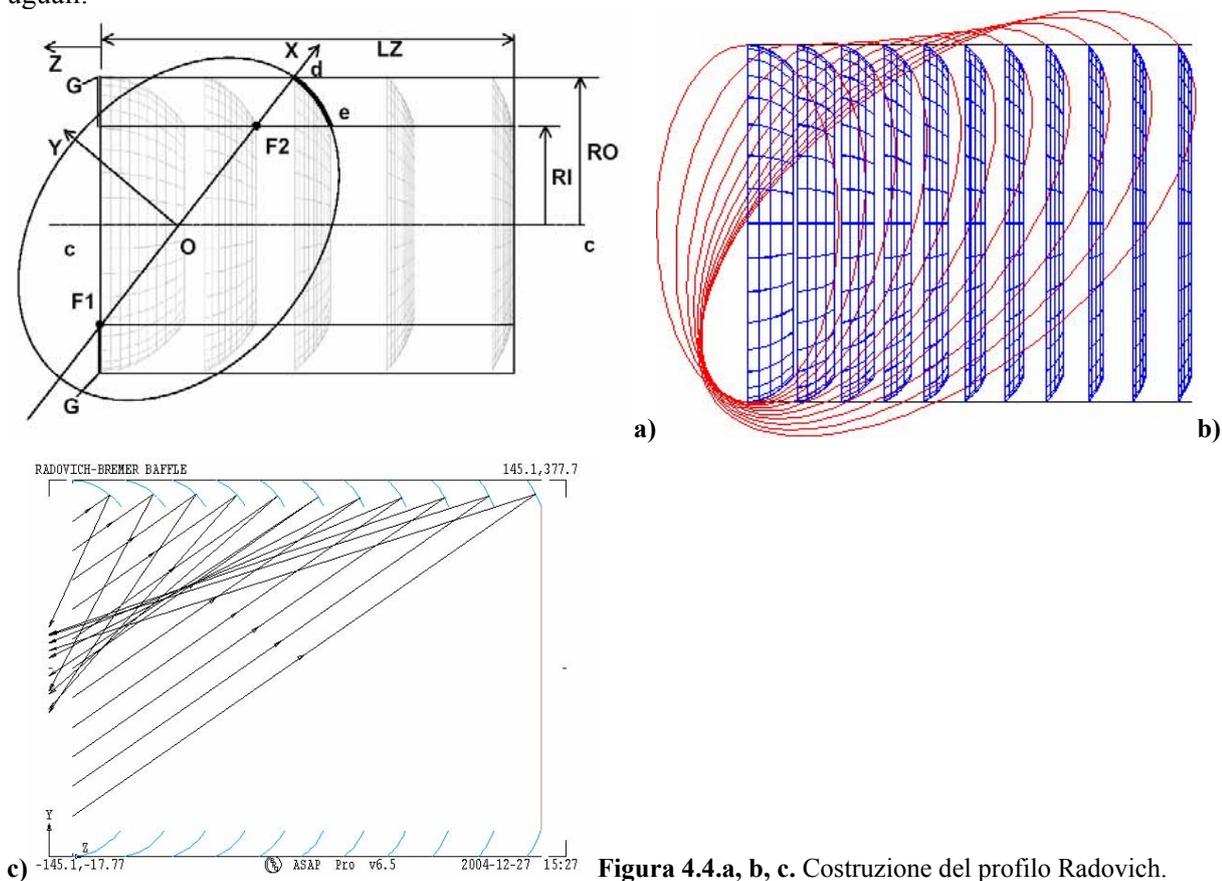


Figura 4.4.a, b, c. Costruzione del profilo Radovich.

4.6.2 Configurazione Greynolds

E' un Radovich modificato, cioè con le ellissi che "guardano" anche verso l'apertura del baffle; è più efficiente del Radovich perché respinge di più, tuttavia questi tentativi di modifiche portano all'unico risultato di non poter evitare che i raggi riflessi raggiungano l'uscita. In sostanza la configurazione Radovich è ancora migliore in termini di potenza assorbita, con la superficie posteriore dei vani resa riflettente. Per quanto riguarda la potenza intrappolata, il profilo Radovich viene dietro anche al profilo Stavroudis (descritto nella sezione successiva); d'altra parte il Radovich potrebbe essere migliore per quanto riguarda le performance di stray light.

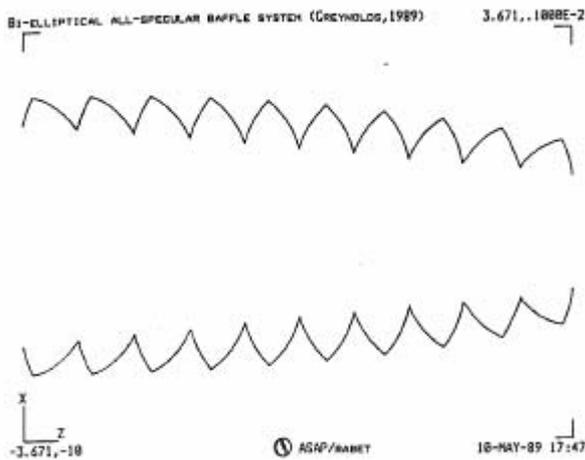


Figura 4.5. Profilo Greynolds.

4.6.3. Profilo Stavroudis

Dal nome dell'ideatore, è una configurazione più efficiente dal punto di vista ottico rispetto a quella con setti tronco conici; il baffle, anziché da successivi tronchi di cono è costituito da tronchi aventi profilo ellittico ed iperbolico (si veda per maggior chiarezza la figura 4.6). Le ellissi e le iperboli hanno i due fuochi in comune, situati sul bordo d'ingresso del baffle, e la distanza dei 2 fuochi coincide con il diametro di apertura del baffle. Questa configurazione risulta efficiente in quanto questi profili non creano delle cavità che possono imprigionare i raggi all'interno; anzi il fatto che i fuochi delle coniche si trovino all'ingresso fanno in modo da respingere (riflettere) verso l'esterno la maggior parte dei raggi, perché proprio per costruzione i raggi entranti sono compresi tra i due fuochi e di conseguenza i raggi fuori asse, cioè non paralleli all'asse ottico, vengono riflessi indietro allorché incontrano le superfici riflettenti del baffle lungo una direzione ancora compresa tra i due fuochi. Operativamente per costruire geometricamente un profilo Stavroudis si procede nel modo seguente: fissato il diametro interno (l'apertura del baffle che conterrà i due fuochi) e quello esterno che determina lo spessore del baffle si determinano in modo ricorsivo (utilizzando le equazioni dell'ellisse e dell'iperbole) i profili consecutivi, finché si raggiunge la lunghezza dello strumento desiderata. Uno degli svantaggi è che le superfici illuminate frontalmente (cioè le porzioni ellittiche) sono poste di fronte a quelle posteriori (iperboliche), e anche la direzione speculare è rivolta all'indietro. Inoltre è difficile realizzare bordi perfetti alla giunzione tra ellisse ed iperbole, e ciò non è del tutto positivo per quanto riguarda la reiezione della stray light. Dal punto di vista realizzativo, poi, è necessaria una apposita produzione e lo sviluppo di un processo specifico di coating per poter realizzare un rivestimento argentato internamente al cilindro.

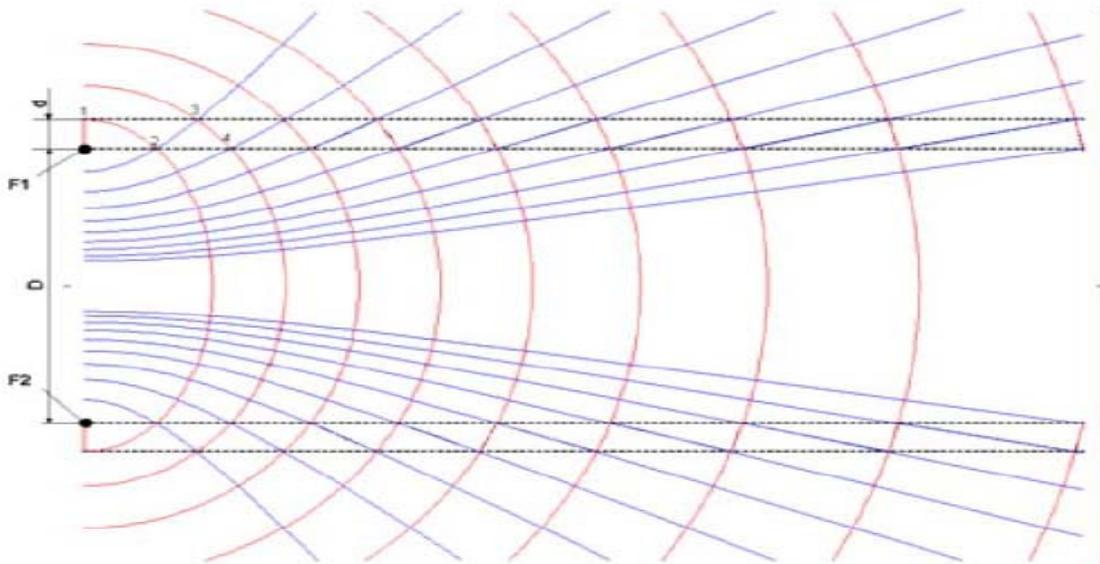


Figura 4.6. Costruzione geometrica del profilo Stavroudis con ellissi ed iperboli.

Come si vede dalla figura 4.6 e dalla 4.7, man mano che ci si allontana dall'apertura, le sezioni coniche diventano via via più allungate ed i segmenti possono essere approssimati con segmenti retti. E' sempre opportuno utilizzare un numero pari di coniche, cioè coppie di ellissi ed iperbole.



Figura 4.7. Sezione di un profilo Stavroudis come risulta dalla costruzione.

Un'altra caratteristica del profilo Stavroudis è che il numero effettivo di riflessioni subite ai raggi dipende dall'angolo di incidenza dei raggi, e varia tra 1.24 e 1.42

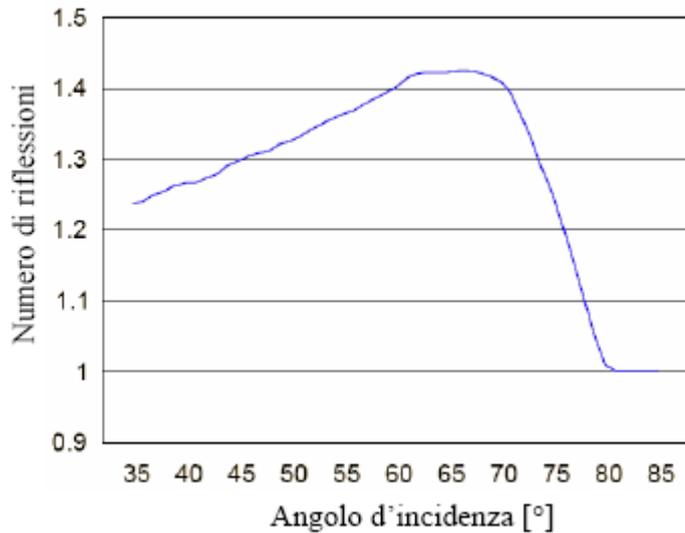


Fig.4.8. Numero effettivo di riflessioni in funzione dell'angolo di incidenza dei raggi.

4.6.4 Il concetto Linlor

Differente dai tipi presentati sopra, in quanto il disegno prevede delle cavità che consistono di un segmento circolare il cui raggio di curvatura si trova all'apertura di uscita ed una sezione piana. I raggi entranti vengono riflessi all'indietro in modo che escono nella stessa direzione in cui sono entrati, anche se questo avviene per mezzo di riflessioni multiple.

4.6.5 Concentratore parabolico composto (CPC) – cono di Winston

Questi dispositivi si differenziano dai precedenti che sono stati descritti; la luce in ingresso è ancora compresa tra i due fuochi, ma l'apertura di uscita è posta al di fuori dei punti focali. Sono stati inventati proprio per concentrare un fascio di luce compreso in un dato angolo solido in una specifica apertura. Al contrario, può anche essere usato per fare in modo che un fascio di luce al di fuori di un dato angolo solido non entri in una certa apertura. In tre dimensioni il riflettore è una superficie di rivoluzione di una porzione di parabola attorno alla linea di vista; e il disegno è determinato completamente dalle dimensioni dell'apertura d'entrata e dall'angolo di vista, non ci sono altri gradi di libertà. La radiazione termica dal baffle può arrivare fino all'uscita solo direttamente, non per mezzo di riflessioni. Il numero di riflessioni necessarie aumenta man mano che ci si allontana dal piano del foglio del disegno.

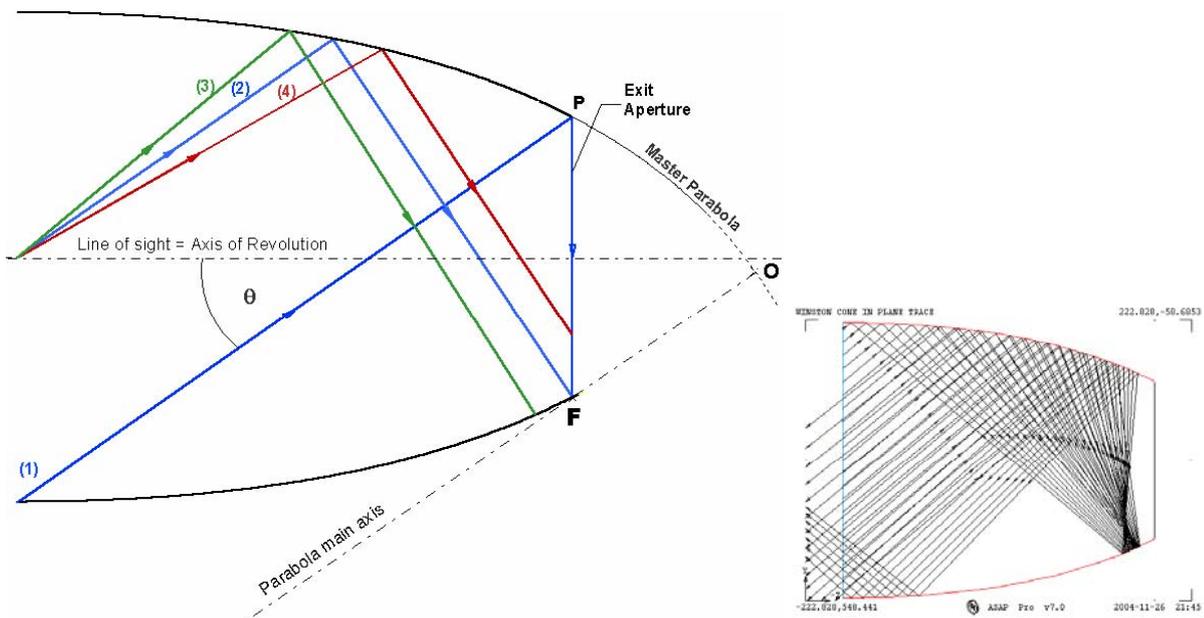


Figura 4.9. Il CPC, concentratore parabolico o cono di Winston.

4.6.6 Concentratore ellittico composto (CEC)

Mentre le configurazioni Radovich, Greynolds e Stavroudis sono completamente determinate da pochi parametri geometrici del sistema (quali diametro interno ed esterno, angolo di inclinazione del fascio luminoso rispetto al baffle, FOV dello strumento e lunghezza totale), il cono di Winston ha anche meno gradi di libertà, e risulta già dalle dimensioni dell'apertura di uscita e dall'angolo d'inclinazione del fascio. Il concentratore ellittico ha un disegno più flessibile, perciò richiede un maggiore sforzo. Il motivo di studiare anche questo tipo di configurazione sta nel fatto che può essere utile per risolvere alcuni problemi riscontrati nel CPC concentratore parabolico, ad esempio se è possibile ridurre il rapporto tra diametro d'entrata e uscita al valore uno, e poi se è possibile avere un po' più di flessibilità sulla lunghezza (e quindi sulla massa). Il disegno principale del CEC ellittico nasce dal problema di come raccogliere la radiazione che arriva da un disco che si trova a distanza finita. Dalle simulazioni effettuate per BELA, si è visto che il CEC non è realizzabile, perché la possibilità di ridurre l'apertura d'entrata (rispetto al CPC) è limitata ad angoli superiori a 55° ; inoltre non vi è possibilità di ridurre la lunghezza totale. Per l'angolo desiderato di 35° , si avrebbe una lunghezza esagerata quindi non compatibile con i requisiti, oppure le iterazioni per migliorare il disegno porterebbero ad un CPC. Quindi per quanto riguarda il Laser Altimeter l'opzione CEC è stata accantonata. Diverso sarebbe il caso se lo strumento oggetto di studio avesse un FOV maggiore.

4.6.7 Confronto tra le varie soluzioni

Si considerano i seguenti criteri per stabilire la configurazione migliore:

Per quanto riguarda la reiezione del flusso solare, le migliori risultano essere le due configurazioni Stavroudis per la specularità perfetta, poi viene il Radovich (intrappola solo il 9% dei raggi). Il peggiore risulta il cono di Winston e Linlor per il numero elevato di riflessioni.

Anche la reiezione del flusso planetario è un fattore d'interesse (anche se meno importante rispetto al flusso solare) per lo studio di trade off, anche se in questo caso non ha molta importanza il numero di riflessioni poiché le superfici sono trattate in modo da avere una alta riflettività nell'infrarosso. Ancora il profilo Stavroudis risulta il migliore, a pari del Linlor, e seguito dal Radovich e Greynolds (meglio rispetto al criterio del flusso solare). Il peggiore è il Winston perché concentra sull'uscita la luce incidente ad angoli inferiori a 35° .

Per quanto riguarda le prestazioni di stray light (si tiene conto dei raggi riflessi specularmente e dell'angolo solido della diffusione al primo ordine verso l'uscita), il migliore è ancora il Radovich, perché le superfici direttamente illuminate guardano verso l'uscita. Poi viene il Radovich modificato per le superfici retro riflettenti. Il peggiore risulta il Greynolds, perché i raggi speculari arrivano all'uscita.

Un altro criterio è la radiazione fuori asse, in cui si tiene conto della capacità di irradiare verso l'esterno la potenza assorbita attraverso l'apertura frontale: essa è determinata dall'angolo solido formato dall'apertura frontale come viene visto dalle superfici; in questo il comportamento migliore è dato dal cono di Winston (tutta la radiazione emessa esce dall'apertura eccetto quella irradiata direttamente verso l'uscita), mentre gli altri sono tutti peggiori, in particolare il Greynolds per le superfici che guardano verso il retro del baffle. In effetti questa è il vantaggio principale del CPC e del CEC.

Prestazioni del coating: il problema è se sia tecnicamente realizzabile un rivestimento d'argento, perché in effetti è questo il criterio da adottare per valutare le singole configurazioni, e quindi a parte Greynolds e Stavroudis in un unico pezzo (per le quali non è realizzabile un tale rivestimento) le altre vanno tutte bene.

Complessità del coating: tiene conto della complessità del processo di rivestimento, e specialmente di quante deposizioni sono necessarie, inoltre si deve tener conto dell'eventuale presenza di superfici nascoste o che guardano verso il retro, per valutare quanto complessa dovrebbe essere la camera a vuoto per la deposizione. Il migliore è Stavroudis unico pezzo (serve solo soluzione galvanica) e cono Winston (una sola superficie). I peggiori sono Vanasse (completamente sconosciuto il metodo di deposizione) e Linlor (molti segmenti).

Robustezza: tiene conto della sensibilità delle prestazioni della reiezione della radiazione in relazione alle distorsioni, primariamente dovute a gradienti termici. (in pratica è una sensibilità alle tolleranze che solitamente viene considerata anche nella fase di MAIT, Manufacturing Assembly Integration and Testing).

Risposta del telescopio: tiene conto di quanto il baffle irradia attraverso il telescopio: quant'è ampio l'angolo solido e se crea zone calde, e nel caso quali sarebbero i gradienti di temperatura. La migliore è la configurazione Radovich originale, la peggiore Greynolds.

Effetto del Sole incidente ad angoli $<35^\circ$ attraverso il baffle: il baffle è esposto al Sole; non fa molta differenza se il Sole incide a 35° o a 10° : l'effetto principale è dato dal fatto che il fuoco del primario potrebbe colpire la superficie del baffle. Il migliore è il cono di Winston e Stavroudis in un unico pezzo. I peggiori sono il Radovich originale, per le superfici nere del retro, e Vanasse perché i fogli difficilmente sopporterebbero il tutto.

Effetto del Sole incidente sul payload retrostante: in questo caso si tiene conto del carico ulteriore che dal baffle arriverebbe sul payload; i migliori sono ancora Stavroudis, Greynolds e Linlor, mentre i peggiori sono il cono di Winston (perché concentrerebbe tutto all'uscita).

Accomodamento: tiene conto dello spazio necessario per l'accomodamento. Per questo criterio vanno tutti bene a parte il cono di Winston, perché ha il diametro più largo degli altri, e di conseguenza risulta anche più lungo.

Massa: è la massa risultante dalla geometria, ma anche dalle richieste di robustezza e di limitazione dei gradienti termici. I migliori sono il Radovich originale, Stavroudis e Greynolds. Winston no perché più grande, Linlor neanche perché ha molti vani.

Costi: il più economico è il cono di Winston perché ha solo un segmento, mentre il più dispendioso è il Linlor perché, al contrario, ha molti vani.

Tenendo conto di tutti questi aspetti e valutandoli in base ad un peso assegnato a ciascuno a seconda dell'importanza, risulta che la soluzione migliore può essere quella del profilo Stavroudis oppure il Radovich modificato, e c'è poca differenza anche con il Radovich originale. Tra questi, comunque, solo il profilo Stavroudis in più pezzi è in grado di garantire la reiezione desiderata del 95%; da ricordare che questa soluzione va bene per il BELA, quindi per un campo di vista limitato, molto stretto. Per un campo di vista un po' più esteso ($5^\circ - 10^\circ$) anche il cono di Winston diventa competitivo con le altre soluzioni.

Inoltre ci sono da fare delle considerazioni di tipo costruttivo, cioè riguardanti la facilità di realizzazione e di deposizione del coating, e le modalità di manifattura, anche per poter evidenziare i processi dai possibili aspetti critici e per poter individuare il costruttore adatto. Gli aspetti critici sono individuati dalla presenza di un limite superiore sulla massa, dalla rugosità della superficie ($\text{rms} \leq 4 \text{ nm}$, per la reiezione della stray light) e dai requisiti di tipo termico. Da tutto ciò dipende la scelta dei materiali (solitamente una lega di nichel oppure di alluminio o acciaio, comunque metalli), del coating (argento è la scelta migliore per l'alta riflettività nell'intervallo di lunghezze d'onda d'interesse), del trattamento delle superfici.

Alla luce delle considerazioni di cui sopra, per il baffle di HRIC la soluzione migliore da adottare sembra essere la configurazione Stavroudis; nel capitolo seguente verranno descritte le simulazioni condotte, dapprima con una configurazione classica (cilindro con setti piani), successivamente con quella Stavroudis.

Capitolo 5

Studio e simulazione di baffles con Opticad

5.1 Il programma Opticad

In ottica, la luce esterna (cioè non proveniente dalla sorgente che si vuole osservare) è un fattore di disturbo; per rilevare la luce esterna (detta anche *stray light*) nei sistemi ottici si utilizzano dei codici (*software*) di *ray-tracing*. In genere, i programmi che si usano a tale scopo, si basano sulla funzione di simulazione Monte Carlo del tracciato del raggio. Ciò permette all'utente di calcolare la variazione della direzione dei raggi luminosi, mentre si propagano attraverso un modello.

Opticad è un programma per la costruzione e l'analisi di sistemi ottici tridimensionali. Il programma è strutturato secondo un formato CAD nel quale l'utilizzatore definisce gli oggetti, li posiziona e li orienta secondo un sistema di coordinate globali. Il programma può essere usato per simulare una grandissima varietà di sistemi ottici.

Opticad rappresenta l'assorbimento, la riflessione e la rifrazione speculare. I risultati possono anche essere osservati come mappe di profilo o come dati del raggio sotto forma di tabella. Il programma è adatto a modellare elementi ottici, solidi, ad esempio lenti, deflettori, sistemi di illuminazione completi, semplici oggetti. Le progettazioni di sistemi ottici possono essere visualizzate da più angoli e in prospettive tridimensionali. Gli oggetti possono essere spostati e ruotati, ed essere modificati, come pure le proprietà ottiche assegnate loro.

Il programma Opticad consente di disegnare degli oggetti, in modo analogo ai vari software di disegno industriale, oppure è possibile disegnare l'oggetto con altri software (ad esempio CAD, ProE, etc) ed "importare" la geometria in Opticad, specificando in seguito le caratteristiche ottiche delle superfici (come coefficienti di riflettività e di assorbimento); il software permette in seguito di simulare l'effetto di una sorgente sulle superfici dell'oggetto disegnato, una volta stabilite per esse le proprietà ottiche in termini di riflettività, assorbimento, trasmittività, diffusione lambertiana.

In particolare la caratteristica lambertiana di una superficie introduce un elemento di casualità nella simulazione, che sfrutta in questo caso il metodo "Monte-Carlo", in pratica ogni volta che si ripete una simulazione i raggi incidenti sulla superficie vengono riflessi lungo una direzione casuale, e ciò consente di ripetere le simulazioni ed ottenere sempre risultati diversi.

E' possibile scegliere il coefficiente di diffusione lambertiana, in modo da rendere la superficie più o meno dipendente da tale caratteristica. Inoltre è possibile definire il tipo di fascio della sorgente luminosa, se collimato, inclinato, o divergente (conico o rettangolare), il numero di raggi e la distribuzione all'interno del fascio (se ordinata secondo una griglia oppure casuale).

Il sistema viene poi visualizzato in proiezione assonometrica e permette di visualizzare anche i raggi come se fosse presente un rivelatore di immagine.

Opticad tuttavia non è un programma di ottimizzazione, ma un programma di sola analisi che si rivela molto utile nel suo utilizzo geometrico di ray tracing.

5.2 Analisi degli intervalli di confidenza

Scopo delle prime simulazioni è stato quello di testare l'efficacia del programma tramite l'analisi di una semplice geometria, costituita da un cilindro senza setti interni, per ricavare, attraverso simulazioni più volte ripetute, le distribuzioni gaussiane e gli intervalli di confidenza. La prima simulazione è stata effettuata con 10000 (114*114) raggi tracciati e la seconda con 104013 (365*365) raggi, poi sono state ripetute 30 volte mentre la terza, con 1018812 (1140*1140) raggi, è stata eseguita 12 volte. In tutte le simulazioni la sorgente è rappresentata da un fascio collimato.

SIMULAZIONI CON 10^4 RAGGI:

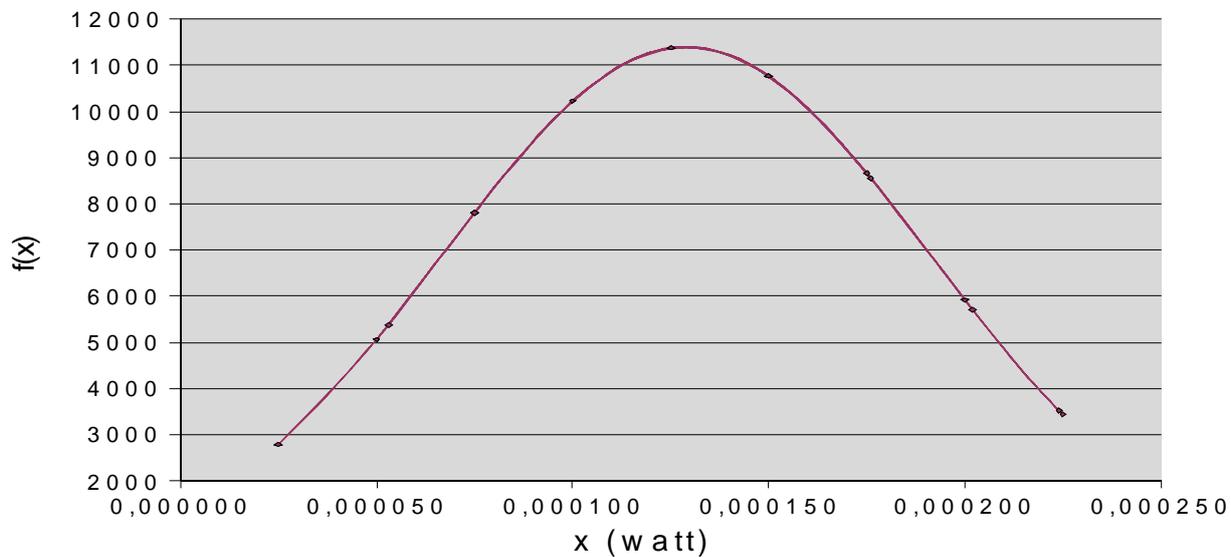


Figura 5.1. Distribuzione gaussiana dei valori per 10^4 raggi.

media	deviazione standard
0,000129 W	0,000062 W

INTERVALLI DI CONFIDENZA:

68.3%	0,000066 W (valor medio $- \sigma$)	0,000191 W (valor medio $+ \sigma$)
95.4%	0,000004 W (valor medio $- 2\sigma$)	0,000253 W (valor medio $+ 2\sigma$)

Tabella 5.1. Tabella riassuntiva delle simulazioni con 10^4 raggi.

SIMULAZIONI CON 10^5 RAGGI:

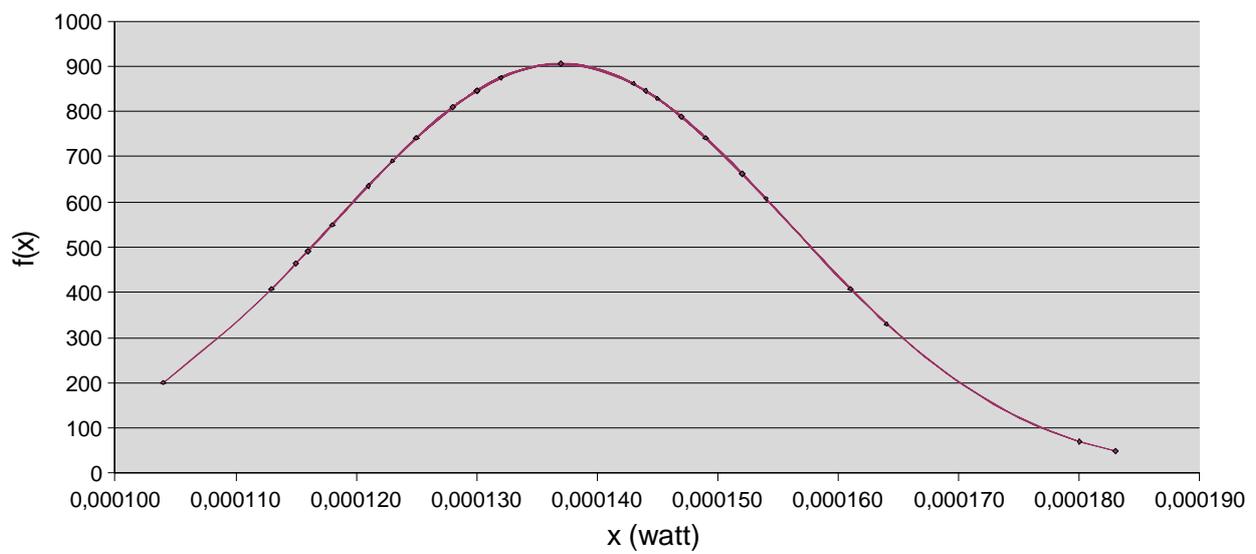


Figura 5.2. Distribuzione gaussiana relativa a 10^5 raggi.

media	deviazione standard
0,000137 W	0,000019 W

INTERVALLI DI CONFIDENZA:

68,3%	0,000118 W (valor medio $- \sigma$)	0,000156 W (valor medio $+ \sigma$)
95,4%	0,000099 W (valor medio $- 2\sigma$)	0,000175 W (valor medio $+ 2\sigma$)

Tabella 5.2. Tabella riassuntiva delle simulazioni con 10^5 raggi.

SIMULAZIONI CON 10^6 RAGGI:

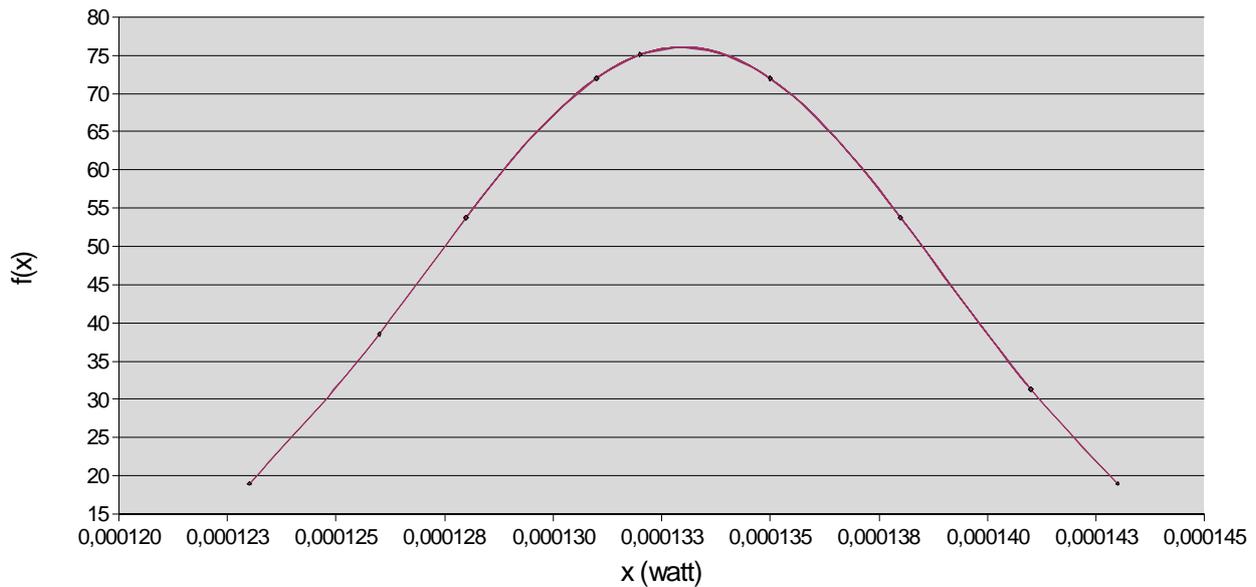


Figura 5.3. Distribuzione gaussiana per simulazioni con 10^6 raggi.

media	deviazione standard
0,000133 W	0,000006 W

INTERVALLI DI CONFIDENZA:

68,3%	0,000128 W (valor medio $- \sigma$)	0,000139 W (valor medio $+ \sigma$)
95,4%	0,000122 W (valor medio $- 2\sigma$)	0,000144 W (valor medio $+ 2\sigma$)

Tabella 5.3. Tabella riassuntiva delle simulazioni con 10^6 raggi.

TABELLA RIASSUNTIVA DEI RISULTATI OTTENUTI:

Numero di raggi	Valore medio (W)	Deviazione Standard (W)
10000 (114*114)	0,000129	0,000062
100000 (365*365)	0,000137	0,000019
1000000 (1140*1140)	0,000133	0,000006

Tabella 5.4. Tabella riassuntiva delle simulazioni a 10000, 100000 e 1000000 raggi.

L'analisi preliminare sulla validità del programma mostra un'ottima precisione dello stesso. Le tre medie si discostano di poco l'una dall'altra e la deviazione standard si riduce progressivamente aumentando il numero dei raggi impiegati. In modo particolare conducendo una simulazione con circa un milione di raggi la deviazione standard risulta molto piccola, il che indica una ripetibilità della misura. In base a questi buoni risultati le simulazioni da qui in poi condotte saranno effettuate con $1140 * 1140$ raggi, e basterà quindi eseguire per ogni geometria una sola simulazione poiché la campana delle curva gaussiana risulta particolarmente stretta.

5.3 Analisi parametrica di un baffle per HRIC

Poiché il canale HRIC (High Resolution Imaging Camera), è quello che presenterà i maggiori aspetti critici da un punto di vista termico e di luce diffusa, con l'ausilio del software Opticad sono state eseguite delle simulazioni della propagazione di un fascio luminoso e la conseguente attenuazione dell'energia all'interno

di un baffle; come prima configurazione è stato considerato un tubo cilindrico con dei setti piani ad apertura circolare utili a studiare le soluzioni da adottare per tale strumento.

La geometria dell'oggetto e le proprietà ottiche delle superfici quali riflettività ed assorbimento influiscono sul comportamento dei raggi in ingresso, pertanto le simulazioni effettuate hanno rivelato, variando alcuni dei parametri in gioco, tale variabilità al fine di suggerire quali possano essere le migliori caratteristiche che deve avere un baffle.

Per quanto riguarda la geometria del disegno, i parametri di interesse sono:

- la lunghezza L ed il diametro D del tubo, ed il loro rapporto L/D ,
- il numero dei setti inseriti all'interno del tubo,
- la distanza tra i setti,
- il diametro dell'apertura dei setti d in rapporto al diametro del tubo, d/D ,
- lo spessore dei setti.

Inoltre vi sono:

- l'angolo di inclinazione del fascio luminoso incidente,
- le proprietà delle superfici che dipendono dal tipo di materiale, descritte da α , coefficiente di assorbimento, e da ρ , coefficiente di riflessione.

Inizialmente si è considerato un generico tubo di lunghezza 60 cm e diametro 20 cm, con 7 setti a distanze di 10 cm l'uno dall'altro. Essi hanno un'apertura centrale di 10 cm di diametro e uno spessore di 1 mm.

In seguito sono stati variati i parametri riguardanti lo spessore dei setti, considerando anche spessori di 0.1 e 3 mm, e il numero stesso dei setti (anche 4 o 13). Mantenendo costante la lunghezza del tubo è variata di conseguenza anche la distanza tra i setti che negli altri due casi risulta rispettivamente di 20 e 5 cm.

Un altro parametro considerato è stato il coefficiente di assorbimento (e in conseguenza anche quello di riflessione, in quanto la loro somma dà 1); i valori in alcuni casi variano tra 0.1 e 0.99 (e di conseguenza la riflettività varia tra 0.01 e 0.9).

Infine si è considerato un fascio collimato, inclinato di 2 o di 5 gradi rispetto all'asse del baffle.

Il programma inizialmente assegna a ciascun raggio uscente dalla sorgente un valore unitario per l'energia: successivamente, a causa delle riflessioni o assorbimenti che il raggio subisce, la sua energia cala.

Per ottenere i valori di attenuazione dell'energia all'uscita del baffle e su ciascun setto (fronte e retro), sono stati posizionati dei film, ovvero dei rivelatori fittizi, sulle superfici di interesse, per valutare la quantità di raggi, e quindi di energia, che vi incide. In fig.5.4 si vede un esempio di geometria utilizzata per le simulazioni.

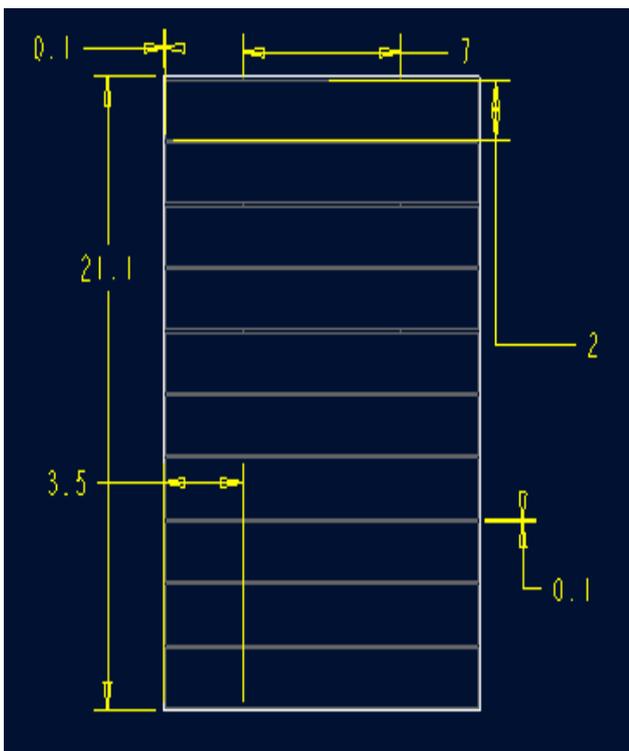


Figura 5.4. Esempio di geometria utilizzata nelle simulazioni.

Come esempio, in fig.5.5 si vede l'andamento dell'energia raccolta da un setto in funzione di α e dell'inclinazione del fascio. Si nota innanzitutto che al diminuire del coefficiente di assorbimento aumenta la frazione di energia incidente; inoltre essa aumenta per angoli minori.

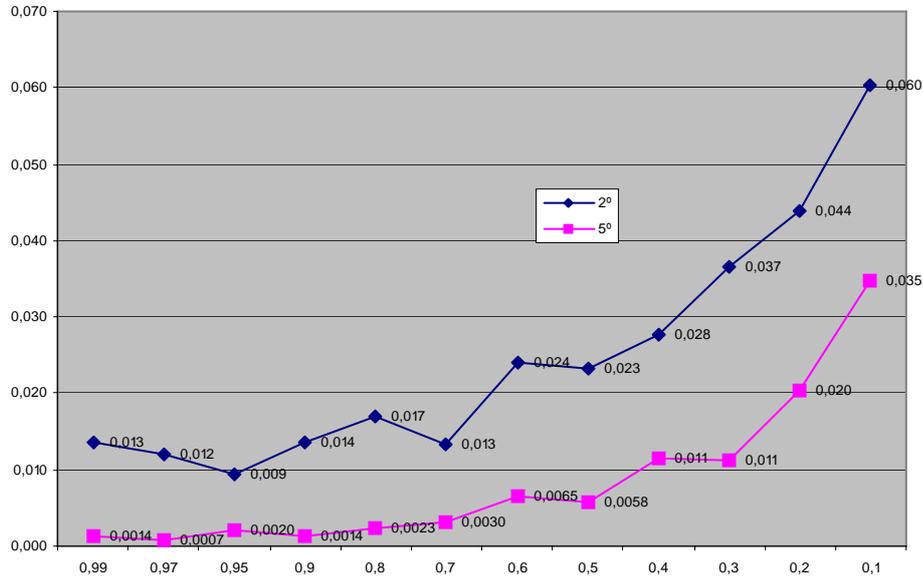


Figura 5.5. Frazione di energia in funzione del coefficiente di assorbimento e dell'inclinazione del fascio.

In figura 5.6 è possibile vedere invece come varia la frazione di energia all'interno del tubo, cioè quanta energia cade su ciascun setto (con b è indicato il retro del setto); si nota che il primo è quello maggiormente investito dai raggi, e che il setto n.5, uno di quelli centrali, riceve molta più energia degli altri, probabilmente per la geometria del tubo che focalizza i raggi proprio in corrispondenza di quel setto.

Per quanto riguarda lo spessore dei setti, ci si aspetta che quanto questo sarà maggiore, più la luce verrà assorbita da esso: in effetti per alcuni setti sembra essere così (figura 5.7).

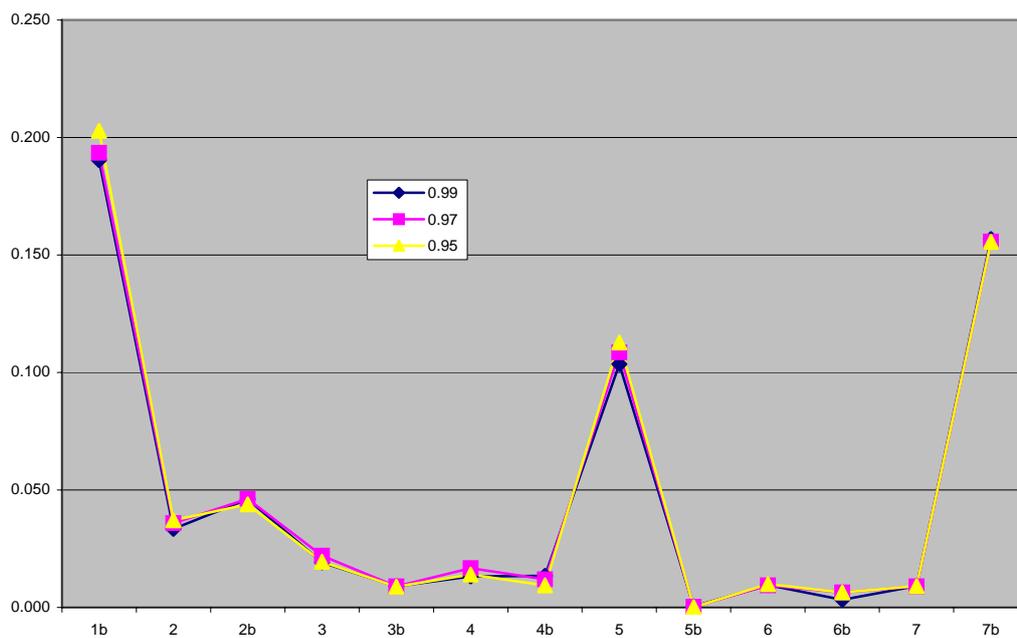


Figura 5.6. Andamento dell'energia all'interno del tubo.

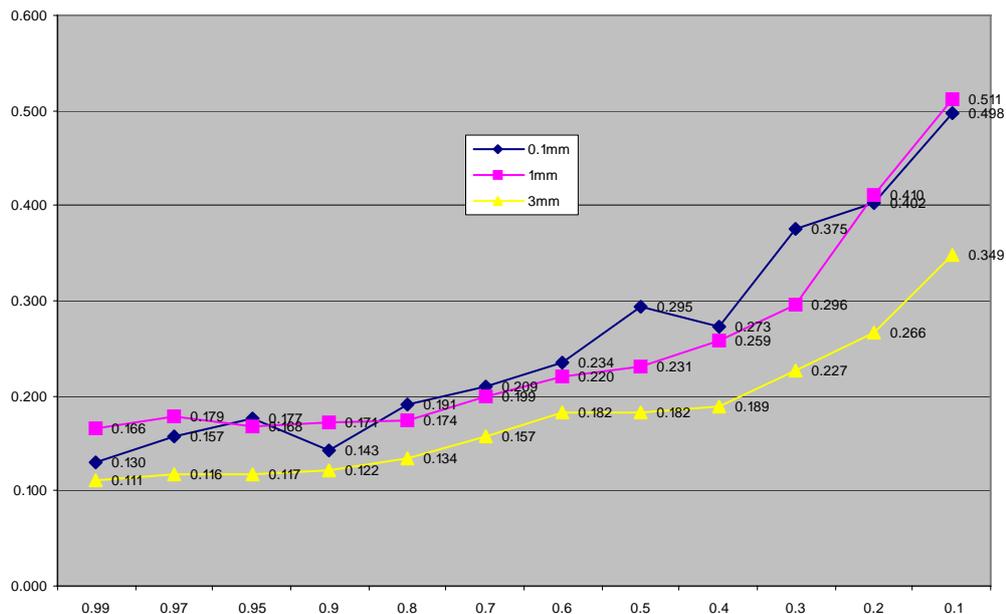


Figura 5.7. Dipendenza dallo spessore.

Infine, anche il numero dei setti (e , nel caso in esame, di conseguenza anche la distanza tra essi) ha un ruolo nel variare la quantità di energia attenuata (fig.5.8): infatti maggiore è il numero dei setti interposti, (e in questo caso minore è la distanza tra essi), maggiormente l'energia risulta attenuata sull'ultimo setto, che rappresenta l'ingresso dello strumento vero e proprio. Si potrebbe pensare quindi che la configurazione ottimale sia quella con un numero elevato di setti molto spessi, ma spingendo questa geometria al caso limite, non si otterrebbe più una superficie intervallata dai setti, ma una superficie continua all'interno del tubo, vanificando così l'effetto che la presenza dei setti ha sui raggi incidenti.

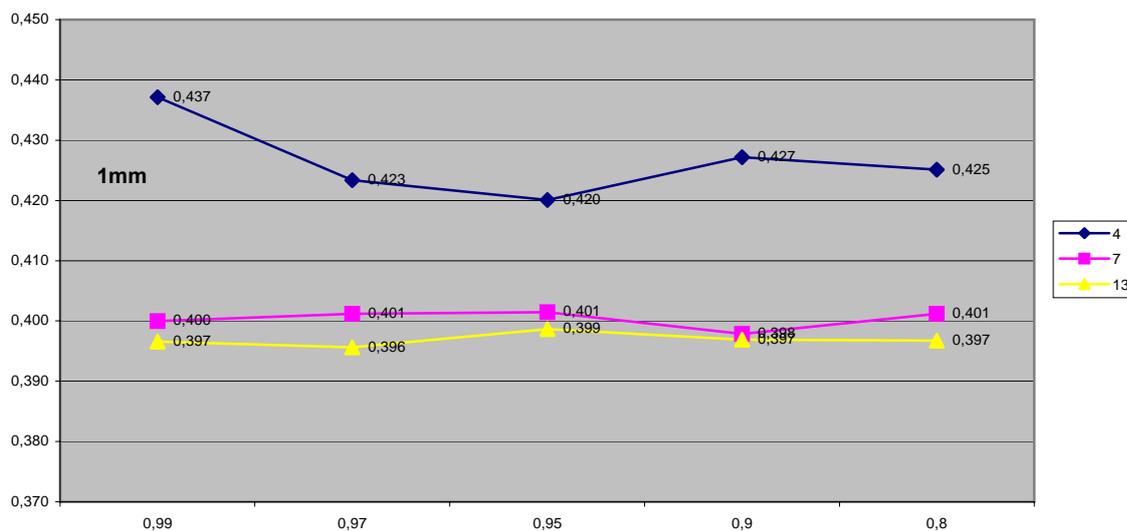


Figura 5.8. Dipendenza dal numero dei setti.

Infine sono state eseguite delle simulazioni per vedere come influisce il diametro dell'apertura del baffle; ci si aspetta che aumentando il diametro dell'apertura centrale (in questo caso pari a 15 cm), l'energia in ingresso aumenti (fig. 5.9).

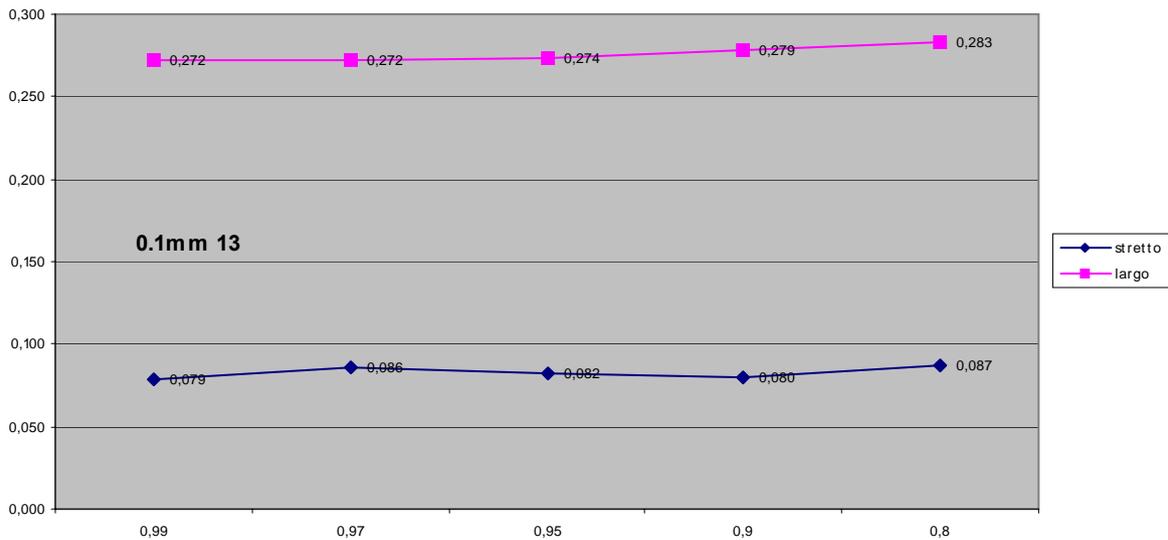
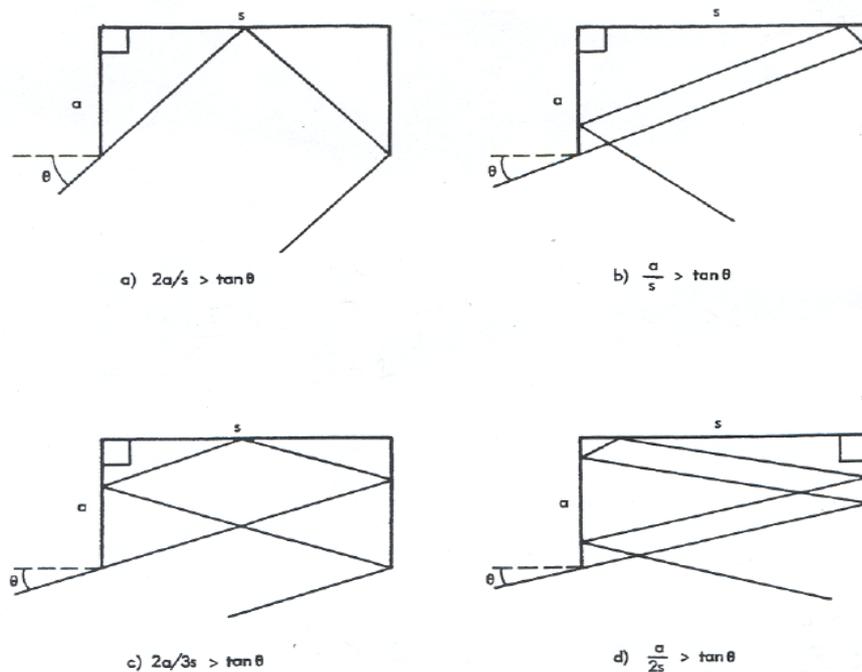


Figura 5.9. Dipendenza dal diametro dell'apertura.

Dopo queste considerazioni a carattere generale, si è cercato di simulare una geometria applicabile al caso di HRIC, con un baffle più corto del precedente (20 cm circa), e mantenendo l'apertura di 10 cm, che è quella prevista per lo strumento. Il criterio adottato questa volta è stato quello di trovare un numero di setti adatto a fare in modo che i raggi subiscano, all'interno del baffle, un numero minimo di riflessioni, secondo le seguenti equazioni:

Figura 5.10. Rapporto distanza-altezza per avere un numero minimo di riflessioni all'interno di un vano.



rispettivamente per avere un numero minimo pari a 2, 3, 4 e 5 riflessioni variando il rapporto distanza/altezza dei setti in funzione dell'angolo di incidenza del fascio (d'ora in poi pari a 45°).

Con questo metodo si è visto che, mantenendo fissa la lunghezza del baffle a circa 20 cm, nell'intervallo compreso tra un numero di vani tra 6 e 12, le configurazioni migliori sono quelle con 8 e 10 vani:

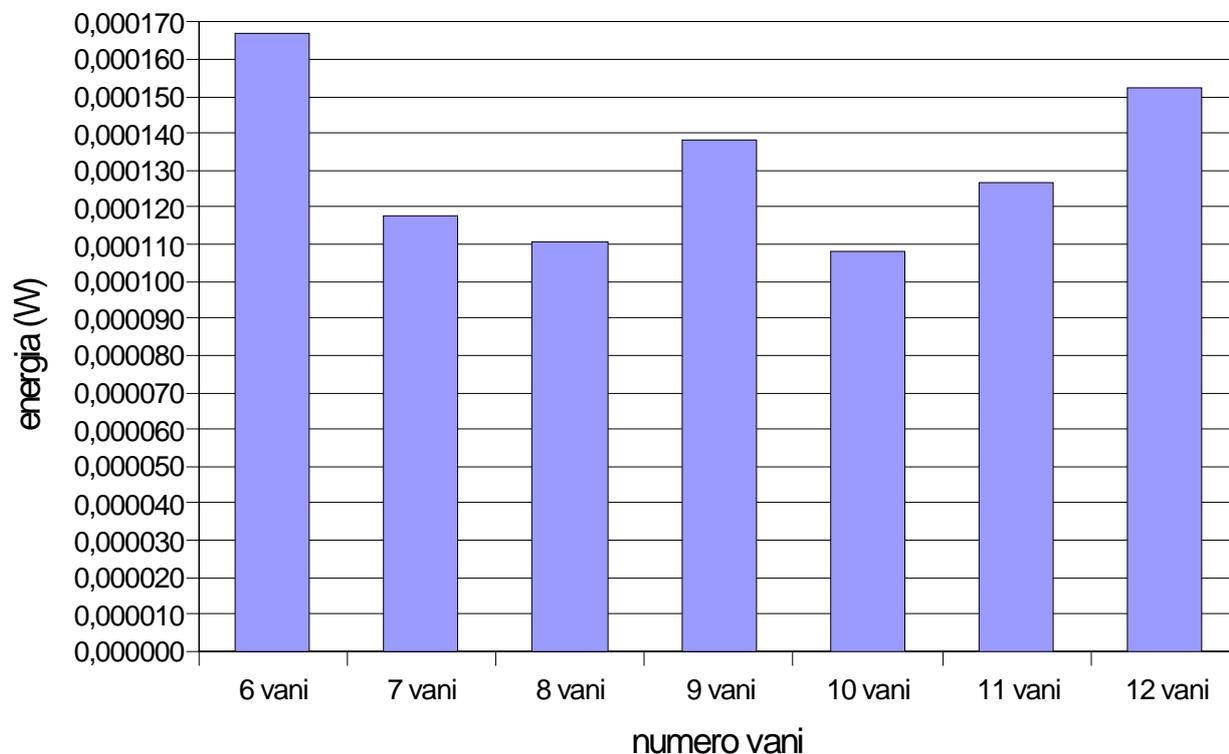


Figura 5.11. Energia sul film in funzione del numero di vani.

A questo punto è stata scelta la geometria con 10 vani, e si è vista l'influenza che avrebbe adottare aperture diverse per i setti; mantenendo fissa l'apertura centrale di 10 cm, si è variato il diametro esterno del baffle, tra 15 e 25 cm:

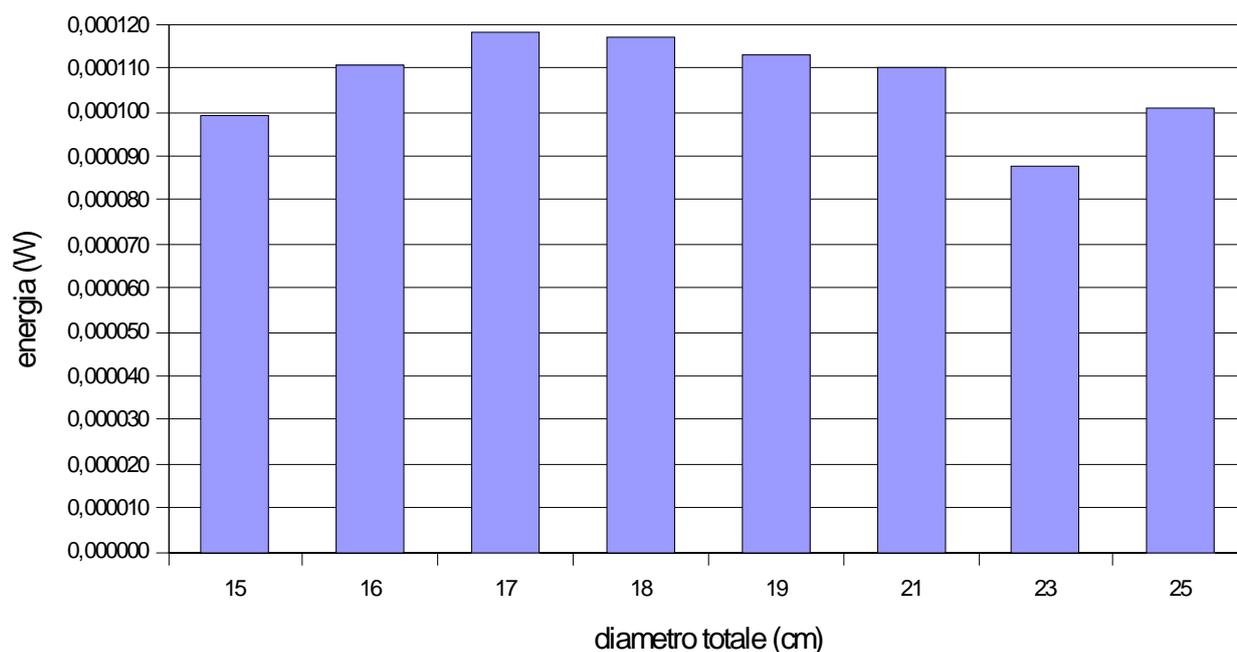


Figura 5.12. Influenza del diametro esterno del baffle.

Il caso migliore risulta quello con diametro esterno pari a 23 cm; tale geometria non pare però conveniente da utilizzare, soprattutto considerando il fatto che, essendo un baffle molto largo, presenterebbe una maggiore superficie soggetta a riscaldamento. I valori fin qui ottenuti comunque mostrano un'attenuazione dell'energia di un fattore 10^{-5} .

5.4 La geometria Stavroudis

Fin qui si è considerato esclusivamente il problema di stray light, adottando delle superfici assorbenti; dal punto di vista termico, le simulazioni effettuate mostrano come sarebbe preferibile utilizzare un baffle riflettente, per lo meno nella parte anteriore di esso, quella maggiormente esposta alla radiazione. E' allo studio quindi anche una configurazione che si differenzia da quella classica cilindrica con setti piani o tronco-conici; alla luce di quanto detto nel capitolo precedente e del confronto tra le varie possibilità esistenti (si veda 4.6), si è considerata per le successive simulazioni l'utilizzo di superfici che sono sezioni di ellissi ed iperboli collegate tra loro, in modo da formare un cilindro con il profilo corrugato (a "fisarmonica"); tale soluzione prende il nome di geometria Stavroudis, dal nome dell'ideatore. Come già detto, tale geometria è allo studio anche per il baffle di un altro strumento previsto per la missione, il BELA (BepiColombo Laser Altimeter), per le sue caratteristiche già descritte nel paragrafo 4.6.3. In particolare lo studio per BELA si propone di progettare un baffle con una capacità di reiezione del 95% ad un angolo di vista di 35° .

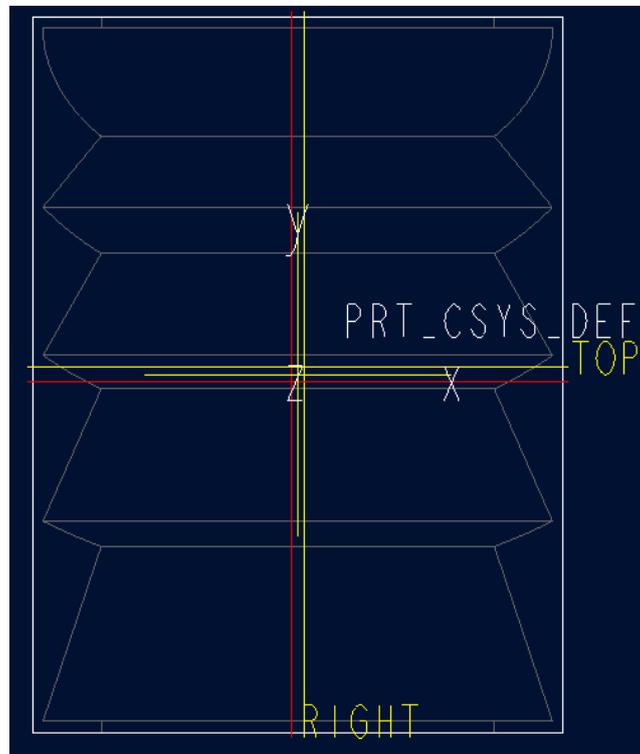


Figura 5.13. Baffle con profilo Stavroudis disegnato con Pro-E.

Come anticipato nella sezione 4.6.3, per determinare geometricamente il profilo Stavroudis è necessario partire dalle note equazioni delle coniche utilizzate (ellisse ed iperbole):

equazione dell'ellisse:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$

equazione dell'iperbole:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1$$

Una volta fissato il diametro interno (l'apertura del baffle che coincide con la distanza tra i due fuochi delle coniche) e quello esterno che determina lo spessore del baffle, si determinano in modo ricorsivo (utilizzando le suddette equazioni) i profili consecutivi, finché si raggiunge la lunghezza dello strumento desiderata.

In pratica, facendo riferimento alla figura 5.14, il punto P_0 coincide con l'estremità del baffle, il punto P_1 si determina come punto d'intersezione tra la prima ellisse e la retta (detta anche linea di clearance, che nel caso in esame è parallela all'asse ottico) che congiunge le estremità anteriore e posteriore del baffle; successivamente si determina la prima iperbole che avrà gli stessi fuochi della prima ellisse e passante per il punto P_1 ; di seguito si determinerà il punto P_2 come intersezione tra l'iperbole e il bordo esterno del baffle, e così via fino a raggiungere la lunghezza o il numero di setti desiderati.

Di seguito sono riportati i parametri e le coordinate dei punti per il baffle che è stato utilizzato per condurre le simulazioni:

	ell 1	ip 1	ell 2	ip 2	ell 3	ip 3	ell 4	ip 4
a^2	0.0042	0.0015	0.0071	0.0009	0.0121	0.0005	0.0204	0.0003
b^2	0.0017	0.001	0.0046	0.0016	0.0096	0.002	0.0179	0.0022

Tabella 5.5. Parametri delle coniche.

	F	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
z	5	6.5	5	6.5	5	6.5	5	6.5	5	6.5
x	0	0	2.65	4.35	5.49	7.89	8.71	11.91	12.53	16.75

Tabella 5.6. Coordinate dei punti d'intersezione tra ellissi ed iperboli (si faccia riferimento alla figura 5.14).

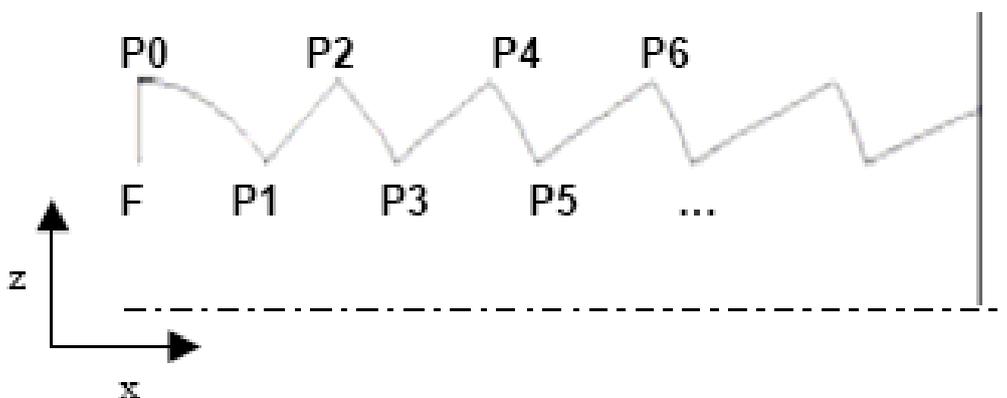


Figura 5.14. Punti di intersezione delle coniche.

Una volta determinata la geometria, sono state condotte varie simulazioni per cercare di raggiungere un buon compromesso tra requisiti termici - strutturali e requisiti ottici.

Si è studiato prima il caso di un baffle interamente riflettente e poi quello di un baffle con alcune superfici assorbenti e alcune riflettenti (facendo riferimento a valori di assorbività e riflettività solari e non per l'infrarosso).

In ultima analisi si è verificata la possibilità di approssimare l'ellisse del primo setto con due e quattro segmenti.

	Assorbività solare	Riflettività solare lambertiana (diffusa)
baffle riflettente	0.15	0.85
black anodize	0.88	0.12

Tabella 5.7. Caratteristiche ottiche dei materiali impiegati.

5.4.1 Simulazioni con baffle riflettente

Il baffle esterno modellato al ProE è stato reso interamente riflettente, secondo le caratteristiche della tab. 5.6 e verificato con una sorgente fuori asse inclinata di 45° che genera 100 W. E' stato posto un film all'uscita del baffle, ovvero un rivelatore fittizio per avere informazioni sull'energia in uscita.

Successivamente è stata calcolata l'attenuazione A , come rapporto tra energia in ingresso ed energia che arriva al rivelatore, E_t/E_i oppure il suo inverso, E_i/E_t .

I risultati della simulazione condotta con un milione di raggi sono riportati nella tab.5.8:

numero di raggi sul film	potenza radiante (W)	A
70839	1.358170	73.62

Tabella 5.8. Prestazioni del baffle Stavroudis.

Si può subito notare come rispetto al baffle totalmente assorbente realizzato precedentemente il coefficiente di attenuazione peggiori sensibilmente.

Come secondo caso è stato analizzato un profilo costituito solo da linee spezzate per verificare quanto la realizzazione di superfici ellittiche incida nel migliorare il risultato.

numero di raggi sul film	potenza radiante (W)	A
89352	2.053143	48.7

Tabella 5.9. Prestazioni del baffle Stavroudis approssimato da soli segmenti.

Le ellissi rispetto ai segmenti danno un notevole vantaggio riducendo l'energia che arriva sul film.

Dal disegno del profilo si può notare come solo il primo arco di ellissi sia particolarmente pronunciato (ha cioè un piccolo raggio di curvatura), mentre i successivi, avendo raggio di curvatura molto maggiore, si possono approssimare con dei segmenti: da questa considerazione si è voluto realizzare un baffle in cui solo il primo setto è ellittico mentre le tre ellissi successive sono state approssimate con un segmento.

numero di raggi sul film	potenza radiante (W)	A
--------------------------	----------------------	---

numero di raggi sul film	potenza radiante (W)	A
69962	1.565706	63.86

Tab 5.10. Prestazioni del baffle con solo il primo setto ellittico.

Il risultato permette di affermare che è il primo setto ellittico il maggior responsabile della riflessione della stray light verso l'esterno. Viste le problematiche connesse alla realizzazione di superfici ellittiche si può affermare che un ipotetico baffle con solo il primo setto ellittico è un buon compromesso.

I tre casi studiati sono riportati nel grafico in funzione del coefficiente di attenuazione A (fig. 5.15).

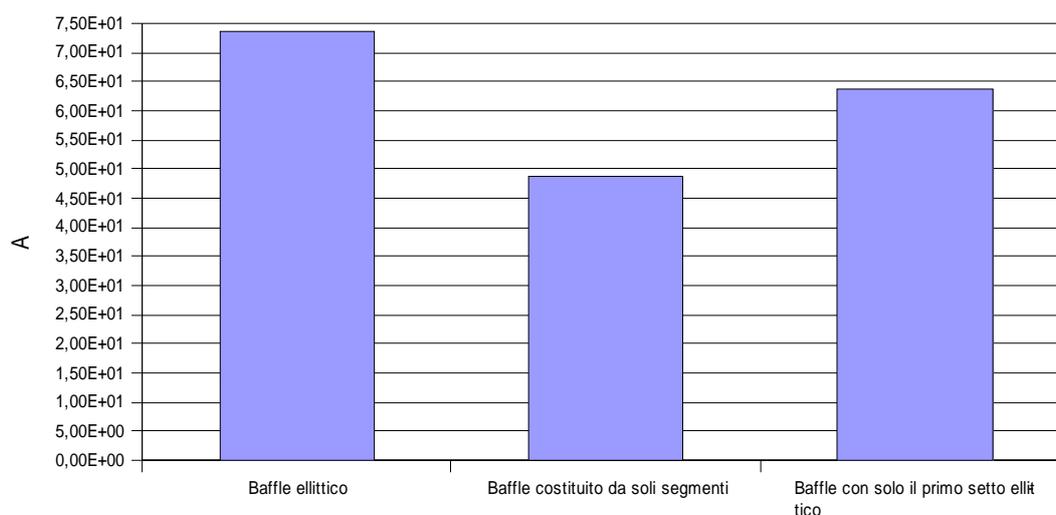


Figura 5.15. Prestazioni dei baffle riflettenti.

Fin qui, per esigenze termiche, il baffle è stato reso interamente riflettente, tuttavia un miglioramento si può avere dal punto di vista ottico realizzando le superfici che non vedono direttamente l'esterno in materiale assorbente. Le tre simulazioni sono state dunque ripetute modificando le caratteristiche superficiali delle superfici rivolte verso l'interno del baffle e rendendole nere secondo i parametri riportati nella tab. 5.6.

5.4.2 Simulazioni con superfici rivolte verso l'interno assorbenti

Rendendo nere le superfici rivolte verso l'interno (cioè le iperboli) le prestazioni ottiche del baffle dovrebbero migliorare, inoltre queste superfici non sarebbero direttamente esposte verso l'esterno e alla radiazione solare, quindi i vincoli termici – strutturali a cui il baffle dovrà sottostare sarebbero rispettati.

Le simulazioni hanno portato ai seguenti risultati:

numero di raggi sul film	potenza radiante (W)	A
46965	0.157645	634.27

Tabella 5.11. Prestazioni del baffle con le superfici rivolte verso l'interno assorbenti.

numero di raggi sul film	potenza radiante (W)	A
--------------------------	----------------------	---

numero di raggi sul film	potenza radiante (W)	A
48144	0.230801	433.23

Tabella 5.12. Prestazioni del baffle costituito da soli segmenti e superfici verso l'interno assorbenti

numero di raggi sul film	potenza radiante (W)	A
47985	0.162530	615.21

Tabella 5.13. Prestazioni del baffle con solo il primo setto ellittico e superfici verso l'interno assorbenti

Come nel caso precedente i tre risultati sono stati riportati nell'istogramma in funzione del coefficiente di attenuazione A:

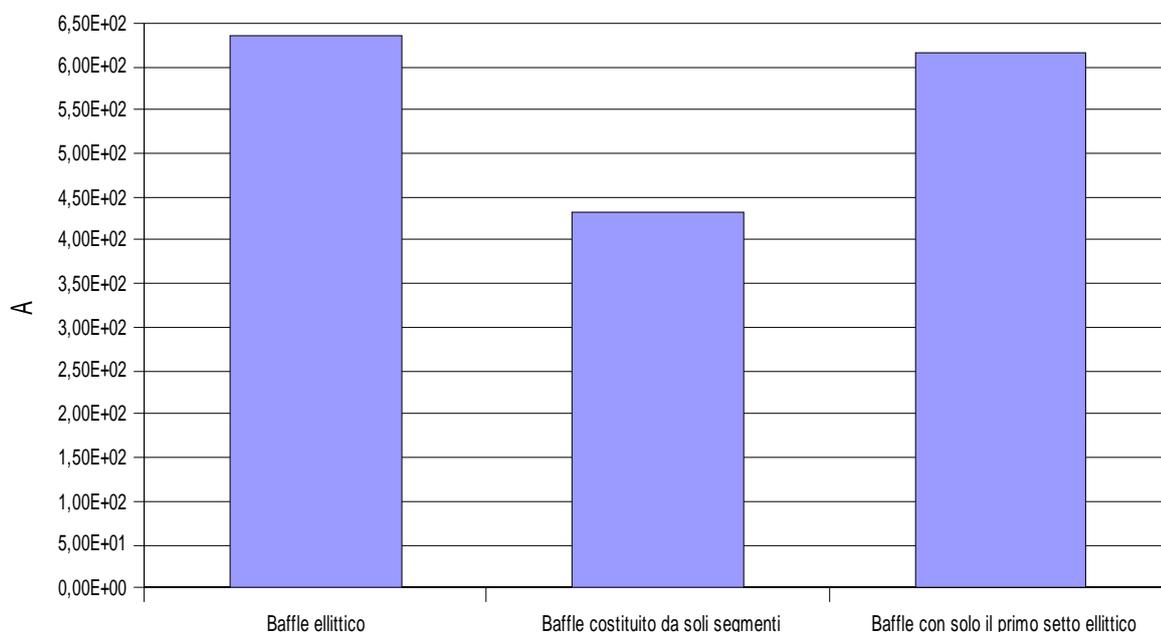


Figura 5.16. Prestazioni dei baffle con le superfici rivolte verso l'interno assorbenti.

Risulta evidente che realizzare solo il primo setto ellittico e gli altri con dei segmenti e verniciare di nero le superfici non rivolte verso l'esterno del baffle rappresenterebbe un buon compromesso. Tuttavia si dovrà condurre anche un'analisi termica per vedere quanto è effettivamente il carico termico assorbito dal baffle se si rendono le superfici rivolte verso l'esterno assorbenti.

Un'ultima analisi si può effettuare sul primo setto ellittico approssimando l'ellisse con quattro segmenti, mantenendo sempre la superficie completamente riflettente.

5.4.3 Approssimazione dell'ellisse

Con queste simulazioni condotte sul baffle completamente riflettente si vuole analizzare la possibilità di approssimare l'ellisse del primo setto del baffle con due o con quattro segmenti (fig.5.18b), mantenendo gli altri setti costituiti da segmenti:

numero di raggi sul film	potenza radiante (W)	A
75715	1.749310	57.16

Tabella 5.14. Baffle riflettente con il primo setto ellittico approssimato da due segmenti.

numero di raggi sul film	potenza radiante (W)	A
63571	1.468930	68.07

Tabella 5.15. Baffle riflettente con il primo setto ellittico approssimato da quattro segmenti .

Come si può notare dai valori l'approssimazione con due segmenti peggiora le prestazioni del baffle mentre l'approssimazione con quattro segmenti conduce anche a un lieve miglioramento delle prestazioni.

Questo dipende principalmente dal fatto che il software utilizzato non gestisce bene le superfici coniche, quindi l'aver approssimato l'ellisse con 4 segmenti fornisce risultati migliori rispetto a quelli che si ottengono facendo simulare al software una ellisse vera e propria.

Un ulteriore miglioramento si potrebbe ottenere sostituendo all'ellisse una approssimazione con un numero maggiore di segmenti, ad esempio a 10 o 20 segmenti come è stato fatto nel caso dell'analisi termica.

Per confrontare meglio i risultati si è ricorsi ad un istogramma (fig. 5.17):

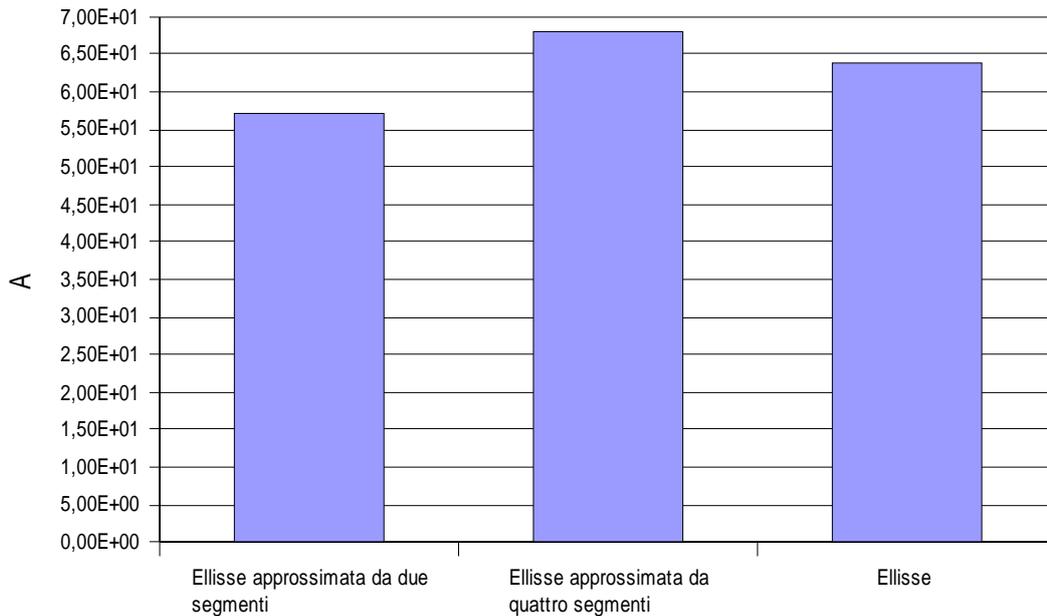


Figura 5.17. Approssimazione dell'ellisse.

Senza considerare le problematiche termiche, per la geometria Stavroudis un buon compromesso consisterebbe nell'approssimare la prima ellisse del setto con 4 segmenti. Le successive ellissi possono essere sostituite da segmenti senza peggiorare di molto le prestazioni, mentre il miglioramento più significativo si ottiene rendendo nere le superfici rivolte verso l'interno.

A tutto ciò si devono aggiungere anche i problemi costruttivi connessi alla realizzazione di superfici ellittiche, ai punti di incontro tra superfici ellittiche ed iperboliche e quelli riguardanti la necessità di verniciare in maniera diversa due superfici attigue. Per ovviare al secondo problema si può ipotizzare di costruire il baffle diviso in sezioni, verniciarle e procedere poi all'assemblaggio.

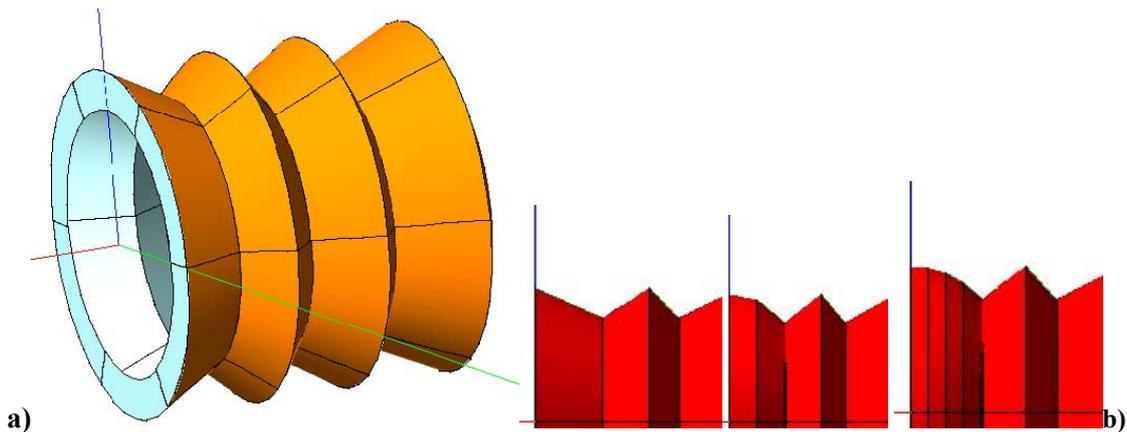


Figura 5.18. a) Modello di baffle Stavroudis, b) successive approssimazioni della prima ellisse con 1, 2 e 4 segmenti.

5.5 Analisi termica

Un aspetto fondamentale nella valutazione delle prestazioni di uno spacecraft e delle sue componenti consiste nel mantenimento della temperatura entro un range prestabilito in tutte le condizioni operative, o mediante sistemi di controllo termico passivo (che non richiedono risorse di potenza dedicate) o sistemi di controllo termico attivo.

Il pacchetto di software per l'analisi termica ESARAD consente di valutare vari aspetti nella gestione di geometrie complesse definite dall'utente e inserite in un contesto ambientale caratterizzato principalmente da scambi termici radiativi quale quello spaziale: in particolare ESARAD permette di modellare una struttura, di calcolare gli accoppiamenti radiativi e di fornire come output il modello termico della struttura stessa; tale modello termico costituisce l'input del solutore ESATAN.

Nel caso in esame si è proceduto col definire un modello costituito dallo spacecraft (box giallo in figura 5.19), utile a definire le dimensioni e l'ingombro totali del satellite; dallo s/c poi sporgono i baffles di HRIC (in marrone il black-baffle, ovvero un tradizionale baffle cilindro a setti piani rivestito internamente di un materiale che assorbe la radiazione incidente), e in verde il baffle riflettente Stavroudis. È stato inoltre posizionato un filtro (in blu nella figura) tra HRIC ed il baffle Stavroudis.

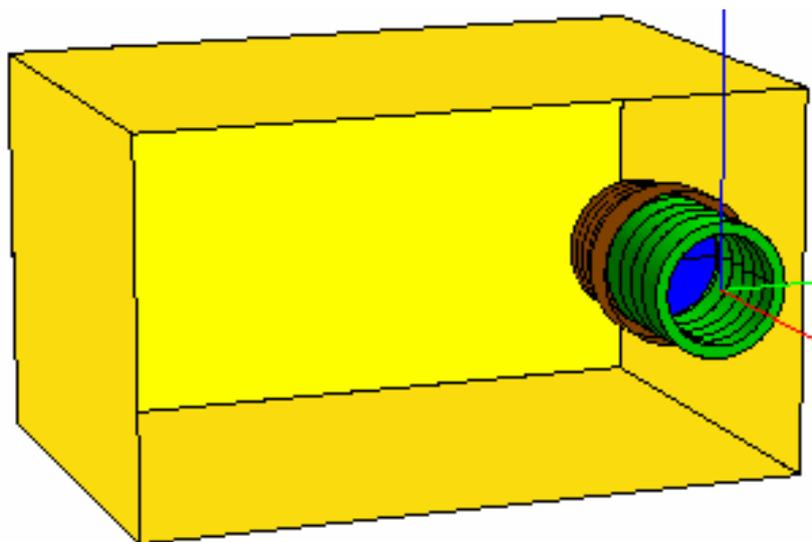


Fig. 5.19. Modello per l'analisi termica in ESARAD (il box in giallo rappresenta lo s/c, in marrone il black baffle, in verde lo Stavroudis, in blu il filtro).

Il filtro, il black – baffle e il box dello spacecraft sono stati modellati impiegando le *shells* disponibili in ESARAD e assemblandole opportunamente e la loro geometria è stata fissata a priori e non ha subito modifiche nel corso delle analisi termiche:

- il filtro è rappresentato da un disco di raggio 60 mm e spessore 15 mm, ed è posizionato in modo tale che la sezione media disti 145 mm dalla sezione di ingresso del baffle Stavroudis (ovvero dall'origine del sistema di riferimento);
- il black – baffle è un cilindro di 80 mm circa di lunghezza e 70 mm di raggio, rivestito internamente di un materiale in grado di assorbire il più possibile la radiazione incidente, presenta al suo interno 5 anelli riflettenti, equidistanti tra loro 16 mm l'uno dall'altro, aventi un raggio interno di 57.5 mm ed un raggio esterno di 70 mm, che hanno la funzione di bloccare la radiazione all'interno del cilindro. Il black baffle è connesso al filtro in modo da avere scambi termici per conduzione con esso e la sua sezione d'ingresso dista 145 mm dall'origine del sistema di riferimento.
- il box che rappresenta lo spacecraft è disegnato come un parallelepipedo opportunamente forato su una delle 6 facce in modo da consentire al baffle Stavroudis di affacciarsi all'ambiente esterno.

5.5.1 Proprietà ottiche delle superfici

Il black – baffle e lo Stavroudis saranno realizzati in alluminio, il filtro in vetro zerodur, il box in MLI (isolante multistrato, costituito da Kapton). Per eseguire l'analisi termica, è necessario assegnare a ciascun componente il materiale costitutivo, specificando per ognuno i valori di densità, calore specifico e conducibilità come riportato nella tabella seguente:

Materiale	Densità [kg/m³]	Calore specifico [J/(kgK)]	Conducibilità termica [W/(mK)]
Alluminio	2700	800	300
Zerodur	2530	800	1.46
MLI	1420	0	0.12

Tabella 5.16. Proprietà dei materiali considerati nell'analisi termica.

Ciascun componente sarà rivestito con un coating opportuno a seconda della funzione del componente stesso, quindi sarà caratterizzato da proprietà di riflessione, assorbimento o trasmissione differenti. Anche per quanto riguarda le proprietà ottiche, quindi, per poter eseguire l'analisi termica è necessario assegnare a ciascuna superficie i valori di riferimento, sia per le lunghezze d'onda nel visibile che per l'infrarosso. Nella tabella seguente (5.17) sono riportati i valori dei coefficienti di riflessione ρ speculare e diffusa, trasmissione τ e assorbimento α (nel visibile) o remissività ϵ (nell'IR), per ogni parte componente il modello termico.

In alcuni casi, i componenti hanno proprietà diverse a seconda che si consideri la faccia esposta o quella nascosta ai flussi di radiazione provenienti dall'ambiente esterno, in particolare:

- il black – baffle è ricoperto in materiale flat absorber (coefficiente di assorbimento nel visibile ed emissività nell'IR alti) internamente, solar absorber (coefficiente di assorbimento nel visibile alto ed emissività nell'IR bassa) esternamente;
- il filtro ha proprietà ottiche diverse a seconda che si consideri la superficie rivolta verso il baffle Stavroudis, ovvero quella anteriore, o quella posteriore, rivolta verso il telescopio;
- la superficie dello spacecraft ortogonale alla direzione del nadir, ovvero quella che sarà rivolta verso Mercurio, è rivestita internamente in materiale solar absorber, esternamente in materiale flat reflector (coefficiente di assorbimento nel visibile ed emissività nell'IR bassi).

Componente	ϵ IR	α vis	τ IR	τ vis	ρ diff IR	ρ diff vis	ρ spec IR	ρ spec vis
Baffle riflettente	0.04	0.015	0	0	0	0	0.96	0.85
Black baffle interno	0.88	0.88	0	0	0.12	0.12	0	0

Black baffle esterno	0.03	0.85	0	0	0.97	0.15	0	0
Filtro anteriore	0.2	0.1	0	0.8	0	0	0.8	0.1
Filtro posteriore	0.04	0	0	1	0	0	0.96	0
Faccia interna box	0.03	0.85	0	0	0.97	0.16	0	0
Faccia esterna box	0.02	0.1	0	0	0.98	0.9	0	0
Altre facce box interno	0.03	0.85	0	0	0.97	0.16	0	0
Altre facce box esterno	0.03	0.85	0	0	0.97	0.16	0	0

Tabella 5.17. Proprietà ottiche delle superfici considerate per l'analisi termica: ϵ è l'emissività nell'infrarosso, α il coefficiente di assorbimento nel visibile, τ la trasmittività, ρ la riflettività, diffusa o speculare.

5.5.2 Analisi preliminari

Le analisi termiche preliminari volte all'ottimizzazione della geometria del baffle Stavroudis sono state condotte supponendo il satellite in orbita nominale attorno a Mercurio, all'inizio della sua vita operativa (Beginning of Life, BOL).

Inizialmente si è supposta una distribuzione di temperature sul pianeta semplificata, determinata in riferimento al caso caldo, ovvero alla situazione in cui, a causa dei flussi solari, sono raggiunti i valori di temperatura massima sulla faccia del pianeta illuminata dal Sole.

In particolare, si è ipotizzato inizialmente che la superficie di Mercurio sia caratterizzata da due soli valori di temperatura, vale a dire il valore della temperatura massima, pari a 688 K, sulla faccia direttamente esposta al flusso solare ed il valore della temperatura minima, pari a 100 K, sulla faccia in ombra del pianeta.

In questo modo la sfera che rappresenta Mercurio è suddivisa in due parti uguali e isoterme.

Nella tabella seguente sono riportati i valori dei parametri orbitali (altezze di periermio e apoermio, argomento di periasse, ascensione retta del nodo ascendente) e di altre grandezze (flusso di radiazione solare, temperatura massima e minima del pianeta, coefficiente di albedo), riferiti al valore medio di J_2 ($60 \cdot 10^{-6}$), che devono essere specificati in ambiente ESARAD per l'analisi termica del satellite. I parametri sono riferiti tutti al caso caldo, nell'ipotesi di orbita all'inizio della vita operativa, ad un anno e a 2 anni dall'inizio della vita operativa.

Parametri (unità di misura)	Simbolo	BOL	1 anno	2 anni
Periermio (km)	h_p	400	400	427
Apoermio (km)	h_a	1508	1508	1481
Argomento di periermio (°)	ω	16	-16	-48
Ascensione retta del nodo ascendente (°)	Ω	180	180	180
Flusso solare (W/m^2)	C_s	14489	14489	14489
Temperatura massima (°K)	T_{max}	688	688	688
Temperatura minima (°K)	T_{min}	100	100	100
Albedo	a	0.12	0.12	0.12

Tabella 5.18. Parametri orbitali utilizzati in ESARAD per definire l'orbita nel caso caldo.

Le analisi sono state condotte utilizzando un modello di baffle Stavroudis costituito da una successione di paraboloidi e superfici coniche, e si è valutata l'ipotesi di modificare la configurazione iniziale eliminando la corona circolare posta alla sezione d'ingresso del baffle stesso:

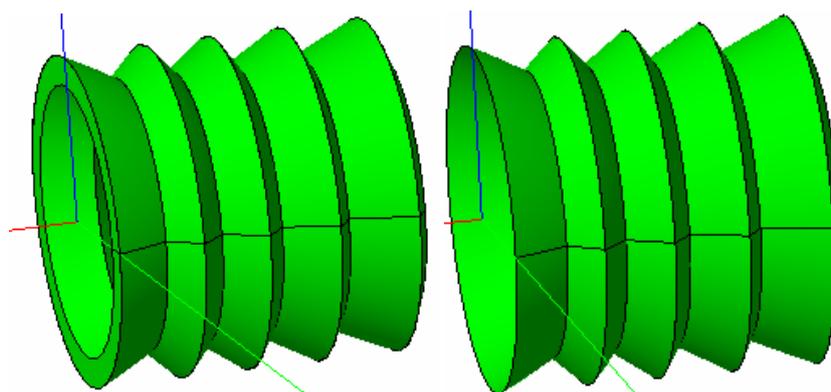


Fig. 5.20. Modelli di baffle Stavroudis con e senza corona circolare alla sezione d'ingresso.

Inoltre sono stati considerati i due differenti casi con baffle caratterizzato da riflettività speculare e diffusa. Nella figura che segue è riportato l'andamento del flusso totale (dato dalla somma di flusso solare, di albedo e planetario) assorbito dal filtro in funzione del tempo (nel caso caldo). La curva rossa si riferisce al baffle privo di corona circolare, mentre quella blu al baffle con corona circolare.

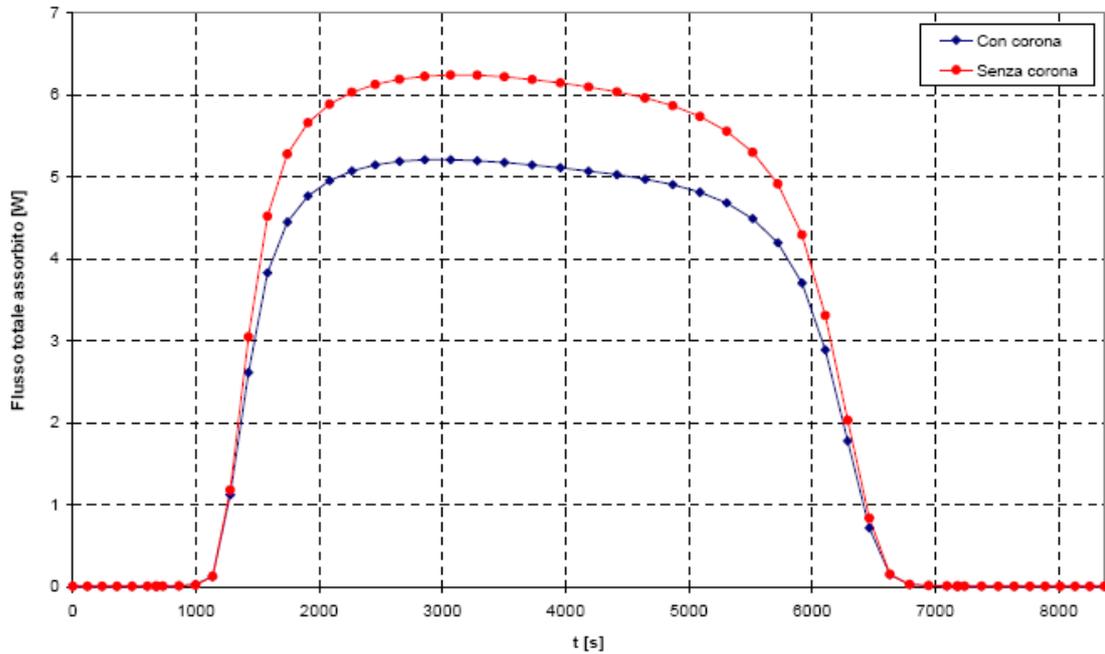


Fig. 5.21. Andamento del flusso totale assorbito dal filtro in funzione del tempo in un periodo orbitale. La curva rossa è relativa alla configurazione senza corona circolare, quella blu alla configurazione con corona circolare.

Dal grafico precedente si osserva che, nell'arco dell'intero periodo orbitale, il flusso totale assorbito dal filtro nel caso in cui il baffle sia privo di corona circolare è sempre maggiore di quello assorbito nel caso in cui il baffle presenti la corona circolare.

Analoghe considerazioni possono essere fatte osservando l'andamento del flusso totale assorbito dal baffle, sempre considerando i due casi con e senza corona circolare all'ingresso.

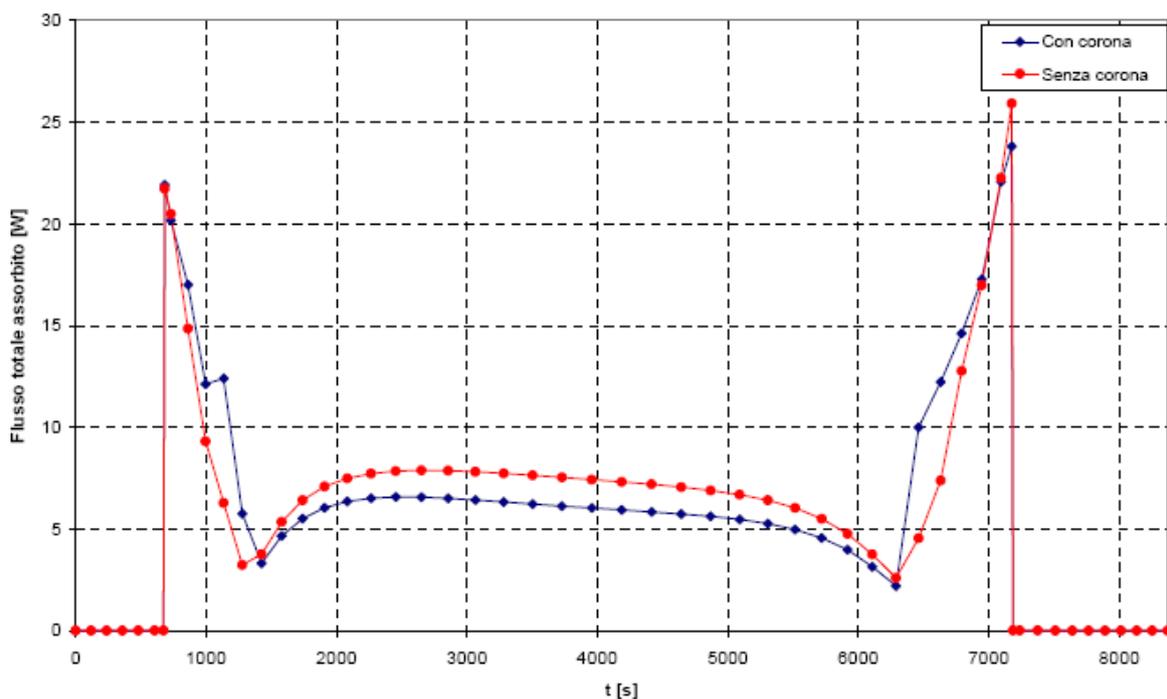


Fig. 5.22. Andamento del flusso totale assorbito dal baffle in un periodo orbitale.

Nella tabella seguente sono riportati i valori medi (in Watt) dei flussi solare, di albedo, planetario e totale assorbiti dal baffle e dal filtro, nel caso in cui sia presente o meno la corona circolare.

Flussi (W)	Filtro con corona	Filtro senza corona	Baffle con corona	Baffle senza corona
Flusso solare	0.0032	0.0000	2.4395	1.9748
Flusso di albedo	0.1023	0.1297	0.7035	0.9262
Flusso planetario	2.7008	3.2071	2.6972	3.1707
Flusso totale	2.8062	3.3368	5.8402	6.0716

Tabella 5.19. Valori medi dei flussi assorbiti dal filtro e dal baffle Stavroudis nei due casi, con e senza la corona circolare.

Dai valori riportati in tabella si osserva che i flussi globalmente assorbiti dal filtro e dal baffle Stavroudis sono maggiori nel caso in cui venga eliminata la corona circolare in corrispondenza della sezione d'ingresso del dispositivo, pertanto la presenza di tale elemento geometrico rende migliori le prestazioni del baffle, riducendo la quantità di flusso di radiazione mediamente assorbito.

Si nota inoltre come il contributo principale al flusso assorbito dal filtro sia quello planetario, mentre per il baffle è considerevole anche il contributo solare.

5.5.3 Variazione della riflettività del baffle

È stato confrontato il flusso totale assorbito dal baffle Stavroudis (con corona circolare) in due casi distinti, ovvero quello in cui il baffle sia caratterizzato da riflettività speculare (curva blu in figura) e da riflettività diffusa (curva rossa). Gli andamenti dei flussi totali assorbiti da filtro e baffle nel tempo sono visibili nei grafici seguenti (fig. 5.23 e 5.24):

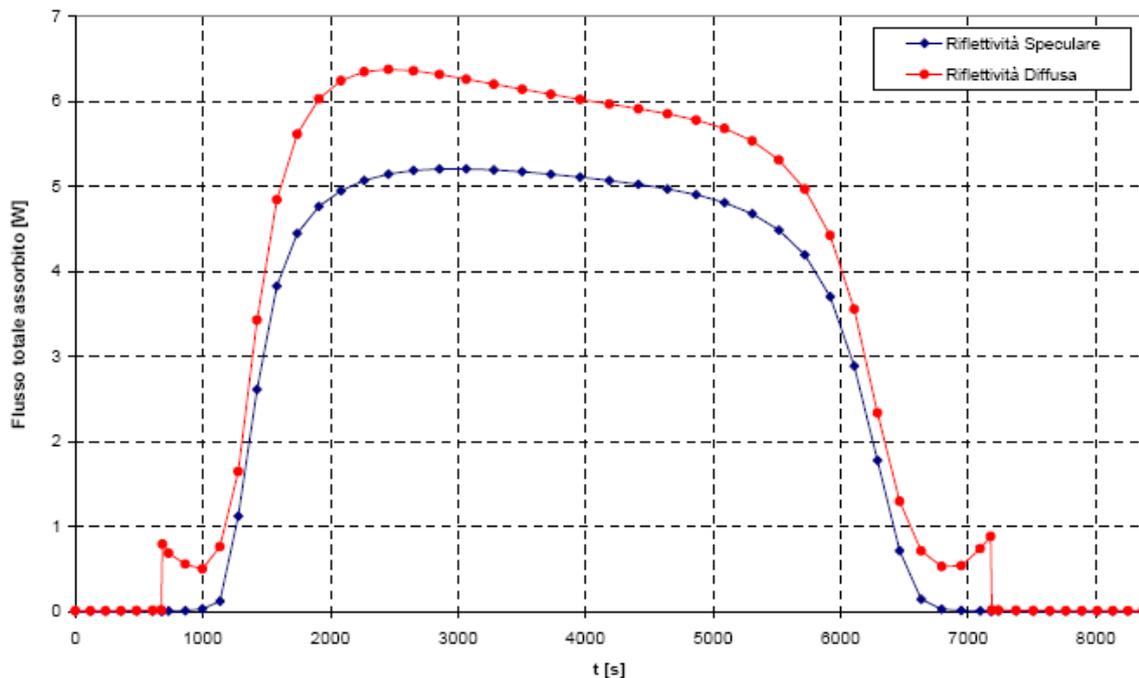


Fig. 5.23. Andamento del flusso totale assorbito dal filtro in un periodo orbitale. La curva rossa è relativa alla configurazione con riflettività diffusa, quella blu alla configurazione con riflettività speculare.

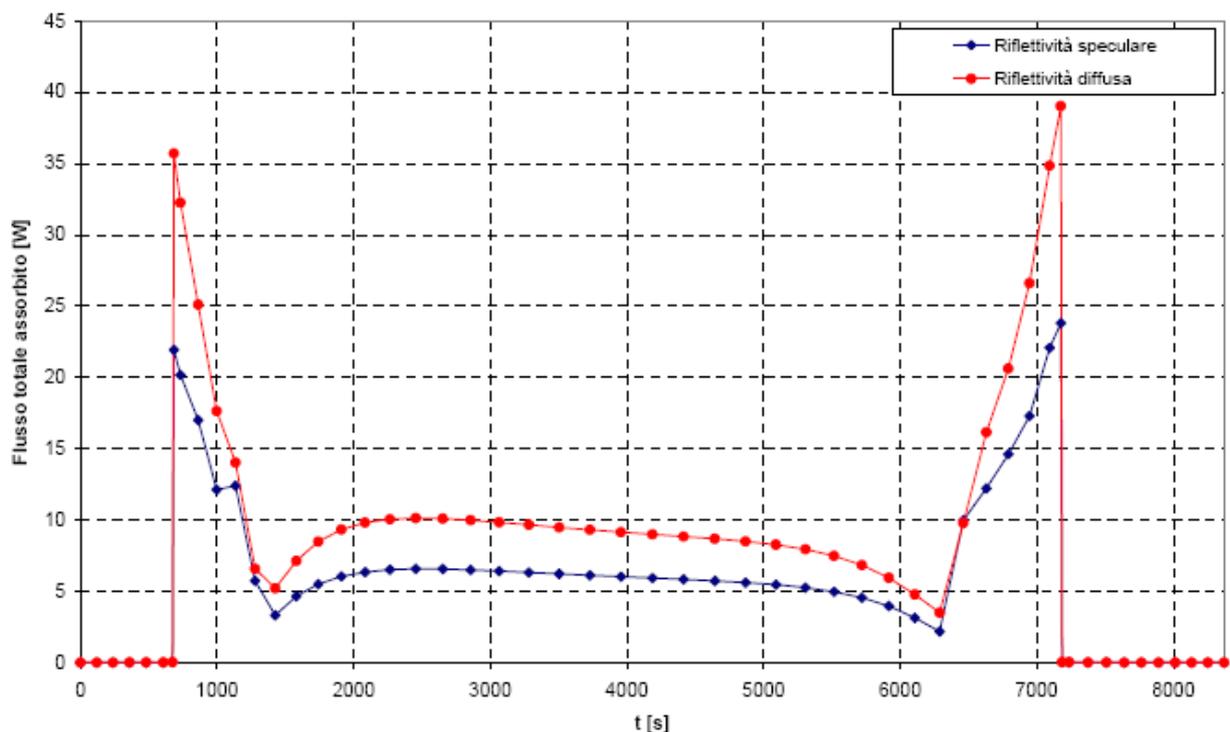


Fig. 5.24. Andamento del flusso totale assorbito dal baffle in un periodo orbitale in funzione del tempo.

Dai grafici precedenti, come ci si può aspettare, si vede chiaramente che le prestazioni del baffle migliorano sensibilmente quando la riflettività delle superfici è di tipo speculare: infatti, in questo caso, il flusso totale assorbito dai 2 componenti considerati è minimo. Lo si osserva anche dai risultati riportati nella tabella seguente, in cui sono riportati i valori medi (in Watt) dei flussi solare, di albedo, planetario e totale assorbiti dal baffle e dal filtro, nel caso di riflettività speculare e diffusa:

Flussi (W)	Filtro rifl speculare	Filtro rifl diffusa	Baffle rifl speculare	Baffle rifl diffusa
Flusso solare	0.0032	0.0673	2.4395	3.4130
Flusso di albedo	0.1023	0.1318	0.7035	1.1441
Flusso planetario	2.7008	3.2872	2.6972	4.0691
Flusso totale	2.8062	3.4864	5.8402	8.6263

Tab. 5.20. Valori medi dei flussi assorbiti dal filtro e dal baffle Stavroudis nel caso di superfici a riflettività speculare o diffusa.

C'è da aggiungere infine che la configurazione geometrica costituita da paraboloidi e coni in serie non rappresenta realisticamente la geometria Stavroudis originale; risultati migliori si otterrebbero approssimando ogni superficie di rivoluzione che costituisce il profilo con una serie di superfici coniche, in numero progressivamente crescente. Si è visto che un buon compromesso tra risultati ottenuti e velocità di calcolo si ottiene impiegando 20 coni per la rappresentazione di ogni ellissoide e ogni iperboloido.

5.6 Simulazione di baffle per STC

Per la Stereo Camera il problema principale della progettazione di un sistema che elimini o riduca la stray light è che le dimensioni in gioco dello strumento sono talmente piccole da pregiudicarne le prestazioni e l'efficacia, e da mettere in dubbio l'effettiva realizzabilità di un tale dispositivo; inoltre vi è da considerare che essendo un sistema ottico a due canali, sono necessari due baffle distinti, con conseguenti problemi di accomodamento.

Tenendo conto di queste restrizioni, le simulazioni condotte per i baffles per STC hanno previsto una configurazione semplificata, consistente in due cilindri senza setti, anche se attualmente anche il disegno di STC prevede l'utilizzo di baffles a geometria Stavroudis.

Di seguito sono riportate le caratteristiche e i risultati ottenuti con le simulazioni effettuate:

Misure: lunghezza cilindro 112 mm

Diametro: 27 mm

Sono state fatte simulazioni con una sorgente inclinata di un angolo di 25°, 45°, 65°. (per simulare le condizioni orbitali)

Numero di raggi: 10000

Coefficienti di assorbimento 0.1, 0.2, 0.8, 0.9 (il valore del coefficiente di riflessione è complementare, cioè la somma deve dare 1)

I risultati ottenuti danno un'attenuazione che come al solito dipende molto dall'angolo di incidenza considerato: per angoli di incidenza vicini alla normale (condizione simulata 25°) l'attenuazione non è del tutto soddisfacente.

Anche nel caso di STC l'utilizzo di un baffle Stavroudis migliorerebbe molto le prestazioni, pur presentando maggiori difficoltà realizzative anche in considerazione delle minori dimensioni in gioco rispetto all'accomodamento di HRIC.

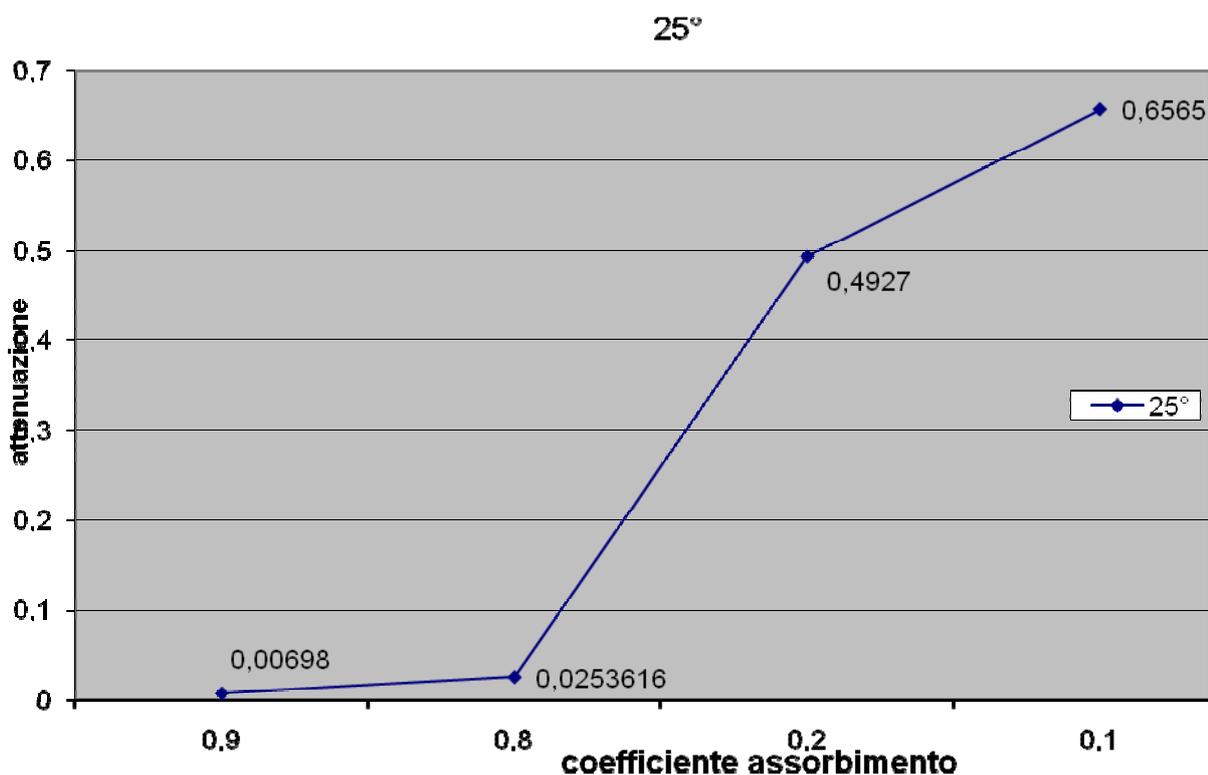


Figura 5.25. Baffle per STC con fascio incidente inclinato di 25°.

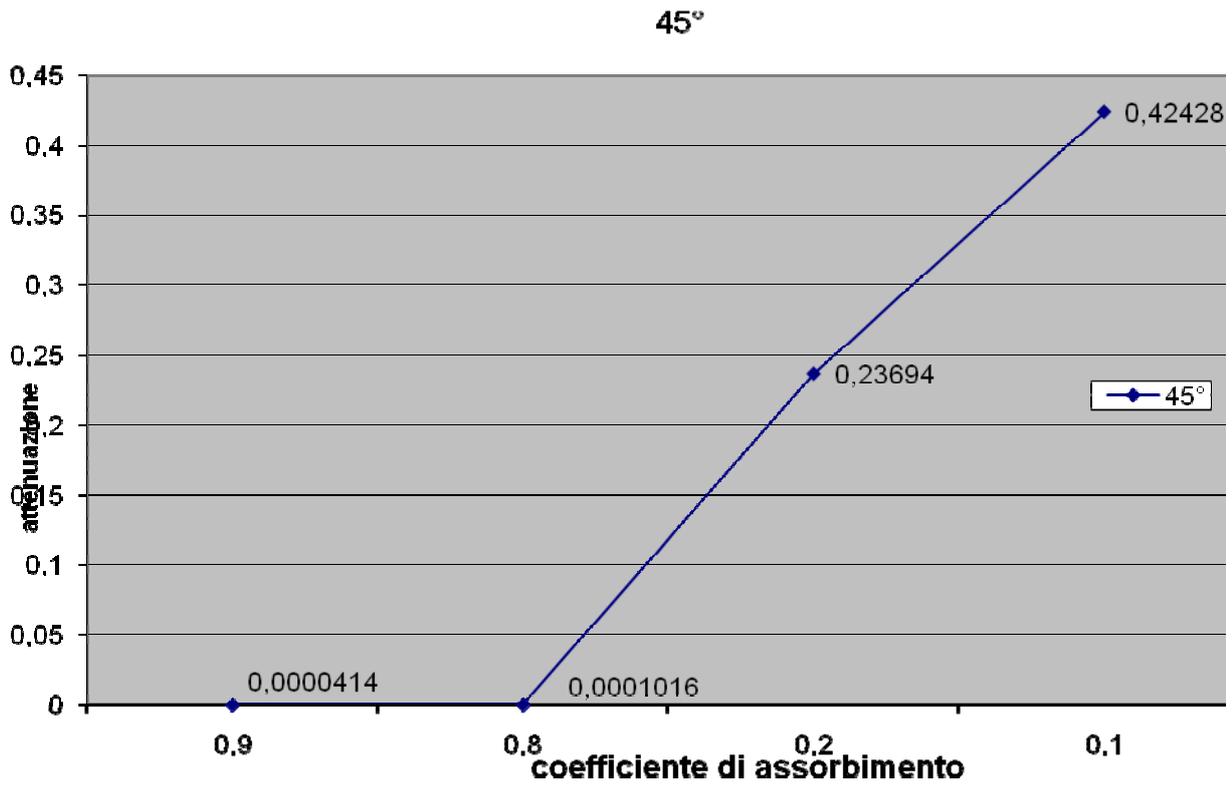


Figura 5.26. Baffle per STC con fascio incidente inclinato di 45°.

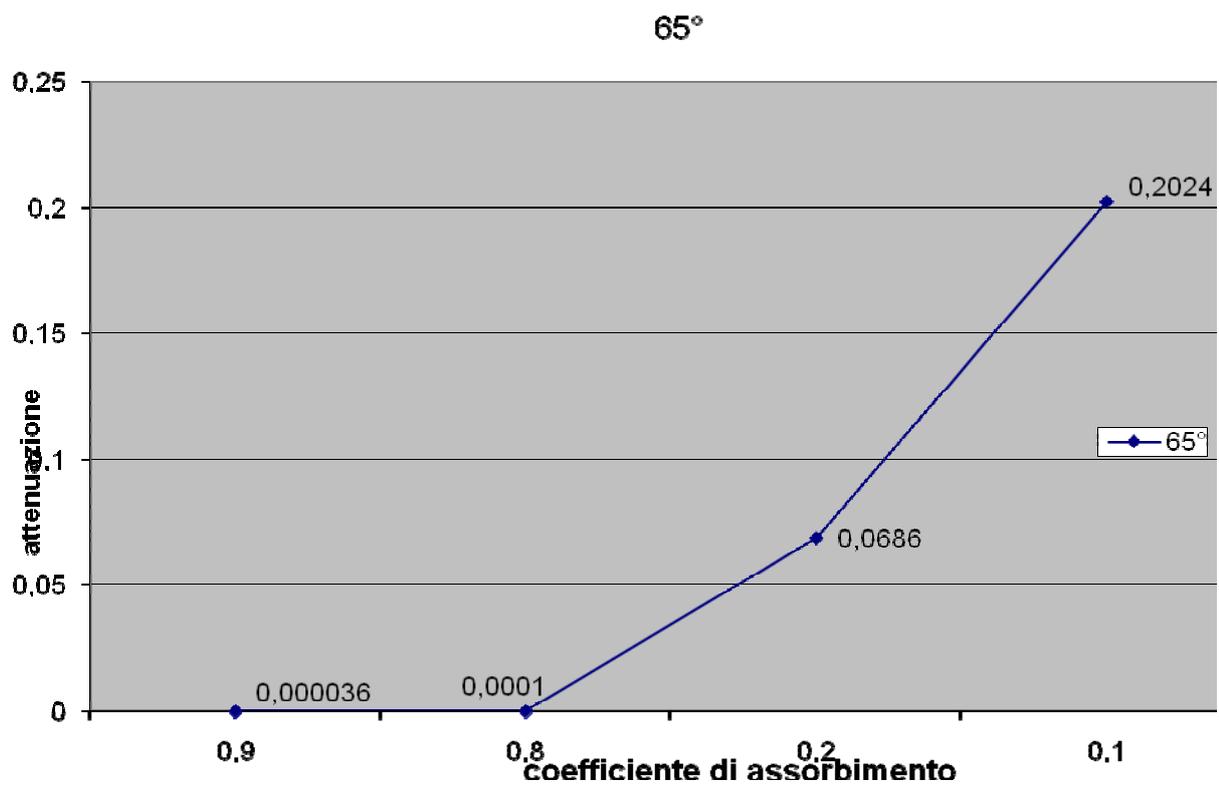


Figura 5.27. Baffle per STC con fascio incidente inclinato di 65°.

Capitolo 6

Effetti dell'ambiente spaziale sulla missione BepiColombo

6.1 Introduzione

Le interazioni dell'ambiente spaziale con i vari componenti spaziali possono alterarne il funzionamento o influire sulle prestazioni, alterando così le misurazioni effettuate; durante la fase di analisi di missione è pertanto opportuno valutare con molta attenzione le caratteristiche degli strumenti e dei materiali impiegati in modo da minimizzare le interazioni con l'ambiente spaziale che possono provocare dei danni e/o dei rischi. L'ambiente spaziale può essere suddiviso in quattro componenti: il primo è l'ambiente neutro, che comprende composti gassosi di origine naturale, gas rilasciati per degassamento o per decomposizione chimica dai materiali costituenti le superfici di uno S/C e i componenti neutri presenti nell'atmosfera (atomi e molecole neutre, neutroni); essi possono contaminare le superfici reagendo con i materiali con cui sono realizzate. Il plasma proveniente dal vento solare e dai motori al plasma, e quello generato dall'interazione tra le superfici e i gas neutri, costituiscono una seconda componente.

Inoltre l'ambiente di radiazione, cioè la radiazione elettromagnetica e quella particellare cioè costituita da particelle ad alta energia (raggi cosmici o elettroni e protoni delle fasce di Van Allen). La radiazione elettromagnetica ha origine sia dalla radiazione solare che da quella riflessa ed emessa dalla Terra.

Infine l'ambiente particellare, cioè i detriti, i meteoroidi e le polveri rilasciate dalle superfici dei satelliti per effetto dell'interazione con l'ambiente spaziale.

Un satellite risentirà di differenti effetti da parte dell'ambiente spaziale a seconda del tipo di orbita, e in particolare della sua altitudine e posizione: per un satellite in un'orbita ad un'altezza dell'ordine di 10000 km l'effetto principale sarà dato dalla radiazione dalle fasce di Van Allen, per un'orbita più bassa, 200 km, risentirà della SAA (South Atlantic Anomaly – Anomalia del Sud Atlantico).

Il plasma

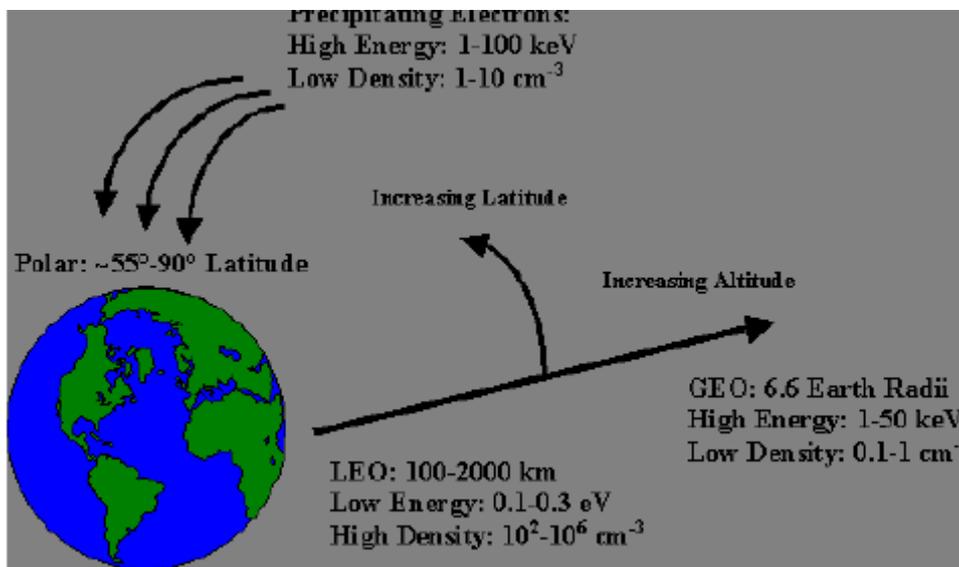


Fig. 6.1. Proprietà del plasma spaziale; esso varia a differenti altitudini: per orbite basse (LEO) esso ha basse energie (0,1 eV ad una densità di 10⁶ particelle per cm³ a circa 300 km di altitudine), mentre ad orbite più elevate di tipo GEO e polari l'energia è dell'ordine delle decine di keV ed una densità inferiore ad 1 particella su cm³.

SEB Single Event Burn-out: in questo caso si ha dispositivo che si brucia.

SEGR Single Event Gate Rupture: idem.

Per valutare la probabilità che si verifichi un *SEU* oppure un *SEL* bisogna calcolare la LET linear Energy transfer cioè l'energia trasferita lungo il device per unità di lunghezza quando una particella ionizzante attraversa un materiale.

La perdita di energia ΔE di uno ione pesante avente energia iniziale E_i che attraversa un materiale di spessore X_s con un angolo θ_i è data da una funzione dipendente dalla variazione dell'energia in funzione dello spostamento, dallo spessore e dall'angolo d'incidenza. Un *SEU* o *SEL* si verificano se la perdita di energia ΔE supera l'energia critica E_c che causa una variazione della parità.

La risposta in termini di *SEE* del dispositivo alla radiazione ionizzante è chiamata sezione d'urto σ e, per una specifica energia di soglia, è data dal rapporto del numero di errori su flusso di ioni.

Per evitare insorgenza di *SEE* sarebbe opportuno posizionare i dispositivi critici in siti non esposti alla radiazione, anche utilizzando delle schermature, come ad esempio *boxes* di spessore e materiale adeguati, ed utilizzare, specialmente per l'elettronica, materiali resistenti alle radiazioni (i cosiddetti *rad-hard*); in alcune situazioni, ad esempio all'attraversamento della South Atlantic Anomaly, è più conveniente spegnere del tutto i dispositivi.

Per scegliere la soluzione più efficiente ottenendo un buon compromesso tra prestazioni, massa e costi, è possibile utilizzare codici che forniscono metodi numerici per stimare gli eventi che possono verificarsi; in genere essi utilizzano le simulazioni di tipo Monte Carlo per simulare la penetrazione di ioni pesanti nei dispositivi elettronici per determinate orbite: materiale schermante e spessore, spettro e distribuzione degli ioni incidenti e potere del materiale di fermare gli ioni incidenti.

6.1.2 Effetti sui materiali

Effetti di radiazione sui materiali dello S/C possono portare ad una diffusione e ad un assorbimento del flusso incidente, creazione di una radiazione secondaria, cioè elettroni e fotoni X e γ , emissione visibile (Čerenkov, un effetto termico spesso trascurabile), e rottura dei legami chimici dovuta a ionizzazione, eccitazione e spostamento atomico.

L'emissione secondaria di radiazione può rappresentare una sorgente di rumore di fondo nei dispositivi elettronici oppure può causare emissione di luce nelle parti ottiche dello S/C, mentre gli effetti di ionizzazione e rottura dei legami chimici possono indurre danni permanenti nei materiali, anche negli strati del device.

Le principali modificazioni chimiche causate ad un polimero per effetto della radiazione fanno combinare due catene molecolari, e di conseguenza aumenta il peso molecolare medio, oppure si verifica il processo opposto, cioè il peso molecolare diminuisce causando un degrado dell'elasticità della molecola del polimero; inoltre durante la divisione di una catena molecolare possono essere emessi dei composti volatili che, depositandosi sulle superfici critiche come ad esempio le ottiche, ne comportano la contaminazione.

Il bombardamento di protoni altera le superfici formando delle "bolle", agglomerati di idrogeno intrappolati nel reticolo, nei metalli e interstizi di vuoto tra i films; questi effetti in genere si verificano ad alte temperature e per elevati flussi di protoni.

Infine, la radiazione di particelle sembra causi l'aumento dell'assorbività nei materiali ottici, talvolta il vetro trasparente può presentare degli aloni colorati mentre resine polimeriche e i films possono cambiare il loro colore.

6.1.3 Effetto Čerenkov

Una sorgente di radiazione secondaria indotta da particelle energetiche è una radiazione Čerenkov.

Quando una particella energetica, ad esempio un nucleone proveniente dai raggi cosmici attraversa un mezzo materiale di un certo indice di rifrazione n alla velocità $v = \beta c$, dove c è la velocità della luce, il suo campo elettrico si propaga alla velocità c/n , quindi se la velocità della particella è maggiore della velocità di propagazione del campo elettrico, come in un fenomeno di onde di shock, allora la radiazione viene emessa lungo una direzione che dipende dall'indice di rifrazione del mezzo e dal coefficiente β .

Questo effetto può essere considerato una sorgente di luce spuria per un rivelatore; se questa emissione ha, alla lunghezza d'onda specifica d'interesse, un'intensità superiore di quella della sorgente da osservare, essa può modificare considerevolmente i dati acquisiti dal rivelatore.

6.1.4 Ambiente particellare

Le particelle che costituiscono l'ambiente spaziale sono essenzialmente meteoroidi e detriti.

Le prime sono particelle di origine naturale: quasi tutti i meteoroidi sono originati da asteroidi o comete ed il flusso naturale di meteoroidi rappresenta, ad ogni istante, un totale di circa 200 kg della massa entro 2000 km dalla superficie della Terra.

La densità media dei meteoroidi è di circa 0.5 g/cm^3 , ma si differenzia a seconda della massa dei meteoroidi: in particolare è maggiore per particelle più piccole (si arriva ad un valore di 2.0 g/cm^3 per particelle di massa inferiore a 10^{-6} g).

Alcuni meteoroidi mantengono l'orbita del corpo genitore creando periodi di flusso elevato (per questo motivo vengono chiamati sciame), ma ci sono anche meteoroidi sporadici con flussi casuali senza una apparente forma ordinata.

A differenza dei meteoroidi, i detriti spaziali sono un risultato dell'attività umana e sono i residui di S/C o satelliti non più in attività, payloads non operativi, frammenti o parti derivanti da procedure di separazione o dispiegamento, o ancora da esplosioni accidentali di missili.

Si è stimato che, in circa 40 anni, oltre 3500 lanci hanno portato ad una popolazione di circa 9000 oggetti monitorabili (vale a dire di dimensioni superiori ai 10 cm in orbite di tipo LEO) nello spazio ed oltre il 90% di tali oggetti sono da considerarsi detriti.

Per quanto riguarda poi il numero di detriti spaziali di dimensioni superiori a 1 cm, esso è stimato tra 30000 e 130000. L'ambiente costituito da detriti è più pericoloso di quello rappresentato dai meteoroidi per orbite più basse di 2000 Km e per orbite ad alte inclinazioni con una velocità media di 10 Km/s.

Mentre il flusso di meteoroidi è considerato quando colpisce una superficie sotto un angolo di vista pari a 2π se vengono trascurati gli effetti di schermatura da parte della Terra, si assume che l'orbita dei *debris* appartenga ad un piano parallelo alla superficie terrestre e la distribuzione delle velocità d'impatto dei detriti sia dipendente dall'inclinazione orbitale e dall'orientazione della superficie esposta.

Un satellite può venire danneggiato da collisioni ultraveloci con micro meteoroidi o detriti naturali o di origine artificiale, e la previsione di tali impatti costituisce uno degli aspetti principali che vengono considerati durante la fase di analisi di missione.

6.1.5 Scattering da polvere interplanetaria

Finora si è trattato degli effetti dell'ambiente spaziale sull'elettronica e sui dispositivi, ma uno dei fattori dell'ambiente spaziale che può rappresentare un serio problema ad una missione ed in particolare alle osservazioni astronomiche è quello dato dalla polvere interplanetaria; essa infatti può causare la diffusione della luce e di conseguenza luce spuria in entrata negli strumenti ottici.

6.2 Effetti della radiazione intrappolata sui satelliti e loro componenti

A causa della loro ampia distribuzione in energia, le particelle intrappolate provocano una varietà di effetti in uno S/C, nei suoi componenti e anche sui sistemi biologici eventualmente presenti a bordo.

Gli elettroni a bassa energia contribuiscono alla carica superficiale dello S/C, mentre quelli di alta energia, iniettati ed accelerati attraverso la magnetocoda, possono causare una carica dielettrica in profondità e portare a dei contatti distruttivi. Anche gli elettroni della cintura interna ed esterna (delle fasce di Van Allen) possono contribuire a dosi ionizzanti per mezzo di deposizione diretta di energia ed effetti di *bremsstrahlung*.

I protoni ad alta energia nella cintura interna di radiazione sono i maggiori responsabili della deposizione di ionising dose nelle componenti schermate. Dominano anche nelle rates di Single Event Upset (SEU) a basse altitudini e latitudini, dove raggi cosmici e particelle solari energetiche vengono efficacemente schermate dal campo geomagnetico. Protoni a energie più basse (fino a 10 MeV) contribuiscono alla Non-Ionising Energy Loss (NIEL) dose che ha effetto sui Charged-Coupled Devices (CCD) ed altri detectors; detectors non schermati possono essere danneggiati anche nella cintura esterna dove sono presenti protoni con energie $<1 \text{ MeV}$.

6.3 Il campo magnetico di Mercurio

Il campo magnetico di Mercurio ha una forma molto simile a quello terrestre, anche se si pensa che la magnetosfera di Mercurio potrebbe essere accoppiata al vento solare in modo più forte rispetto a quella di altri pianeti; questo perché Mercurio non ha un'atmosfera o ionosfera importante dal punto di vista dinamico. Inoltre la minore distanza dal Sole rende probabile il fatto che i processi trascurabili nella magnetosfera terrestre non lo siano per quanto riguarda Mercurio.

Qualsiasi spacecraft quindi che orbiterà attorno al pianeta trascorrerà molto tempo immerso nel vento solare ancora giovane ed in evoluzione e potrebbe osservare fenomeni come onde di shock interplanetari a velocità del suono ancora elevate, permettendo tra l'altro studi sull'eliosfera.

Le osservazioni compiute dalla missione Mariner 10 hanno mostrato che i processi che avvengono nella magnetosfera di Mercurio sono più veloci di circa un fattore 30 rispetto agli analoghi terrestri.

Le correnti generate dall'interazione con il vento solare che di solito negli altri pianeti si fermano nella ionosfera, non possono fare altrettanto in Mercurio. E proprio per l'assenza di atmosfera (tranne una tenue presenza di sodio e potassio) sarebbe più opportuno confrontare Mercurio alla Luna terrestre.

Ciò nonostante i dati osservati dalla sonda Mariner 10 nel 1974 – 1975 portano a pensare al campo magnetico di Mercurio come ad una miniatura della magnetosfera terrestre, sia come forma (un campo generato da un dipolo magnetico, anche se non è ancora chiaro se quella del dipolo sia una buona approssimazione per descrivere il campo magnetico, si dovrebbe considerare anche il momento di quadrupolo), sia come interazione con il vento solare (che viene distorto dal campo stesso).

Infatti una delle scoperte di Mariner 10 fu proprio quella che Mercurio possiede, contrariamente a ciò che ci si sarebbe aspettati, un campo magnetico intrinseco. La scoperta della presenza di un campo magnetico intrinseco è stata sorprendente sia per la rotazione molto lenta del pianeta e sia per la mancanza di lune/satelliti naturali.

L'intensità del campo magnetico di Mercurio è circa 1/100 di quello terrestre; la magnetosfera è più piccola di quella terrestre, rispetto al raggio del pianeta, di un fattore 7.5. Poiché il pianeta quindi occupa una grande frazione del volume della magnetosfera, non ci sono cinture di radiazione permanenti in cui vengono intrappolate particelle cariche come avviene per la Terra, sebbene ci sia, come per il caso terrestre, una coda magnetica e uno strato neutro inserito.

Le ridotte dimensioni della magnetosfera di Mercurio derivano da un valore molto basso del momento magnetico (circa 10^{-4} rispetto a quello terrestre) combinata ad una pressione del vento solare che è 7 volte maggiore di quella a Terra.

La figura 7.3 mostra le linee di campo magnetico sul piano contenente il Sole e l'asse di dipolo magnetico del pianeta Mercurio. Il campo magnetico deflette il vento solare ad una distanza di solo 1.5 raggi di Mercurio dal centro del pianeta. Poiché il vento solare si muove, relativamente a Mercurio, più velocemente, si forma un'onda di shock che riscalda, rallenta e fa deviare il vento solare in modo che esso fluisca attorno alla magnetosfera. Simili bow shocks si trovano davanti a tutte le magnetosfere planetarie. La dissipazione di energia richiesta per scaldare il flusso avviene tramite processi non-collisionali in cui i campi magnetici ed elettrici diffondono le particelle, che non interagiscono tra loro tramite collisioni dirette. Importante è per tutti i pianeti l'accoppiamento del flusso di energia nel vento solare all'atmosfera planetaria. Nel caso terrestre, gli urti vengono trasmessi dal vento solare alla ionosfera e all'atmosfera, e di qui alla parte solida del pianeta per mezzo di correnti elettriche che fluiscono lungo le linee di campo magnetico nella parte inferiore della ionosfera. Mercurio non ha ionosfera o atmosfera significativa dal punto di vista dinamico, così l'accoppiamento sarà molto differente dal caso terrestre. In genere, le atmosfere planetarie sono una importante sorgente di ioni che possono contribuire alla popolazione di particelle cariche della magnetosfera. Da osservazioni sugli eventi dinamici effettuate dal Mariner 10, si ritiene che la magnetosfera di Mercurio sia dinamica e marcatamente variabile (in un intervallo di tempo dell'ordine dei minuti). Chiaramente il trasporto di energia da parte del vento solare sarà molto maggiore che sulla Terra, e in modo analogo è la "coda" dalla parte opposta al bow shock la zona ritenuta importante per l'accumulo di energia da parte del plasma, comunque si conosce ancora molto poco sulla magnetosfera di Mercurio.

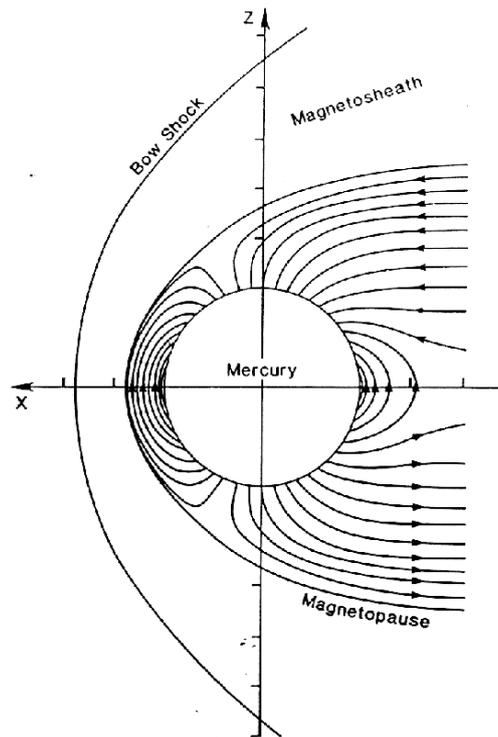


Fig. 6.4. Sezione della magnetosfera di Mercurio lungo il meridiano nord – sud. Le linee che partono e arrivano al pianeta indicano la direzione del campo magnetico. Analogamente al campo magnetico terrestre, le linee di campo escono dall'emisfero meridionale ed entrano in quello settentrionale.

Per quanto riguarda le linee di campo e l'effetto di "rimbalzo" sulle particelle intrappolate lungo esse, la situazione è simile a quella terrestre; infatti dai dati raccolti dal magnetometro di Mariner 10 è stato possibile stimare il periodo di rimbalzo e di conseguenza valutare se si trattava della frequenza fondamentale o di armoniche. Sarebbe stato possibile avere maggiori informazioni se fosse stato misurato anche il campo elettrico, cosa che purtroppo non è avvenuta.

Nel complesso vi sono varie differenze che porterebbero a ritenere la magnetosfera di Mercurio molto diversa da quella degli altri pianeti, eppure i dati ottenuti da Mariner 10 hanno mostrato che in realtà essa è caratterizzata da fenomeni molto simili a quelli terrestri.

La magnetosfera di Mercurio è molto più piccola di quella terrestre.

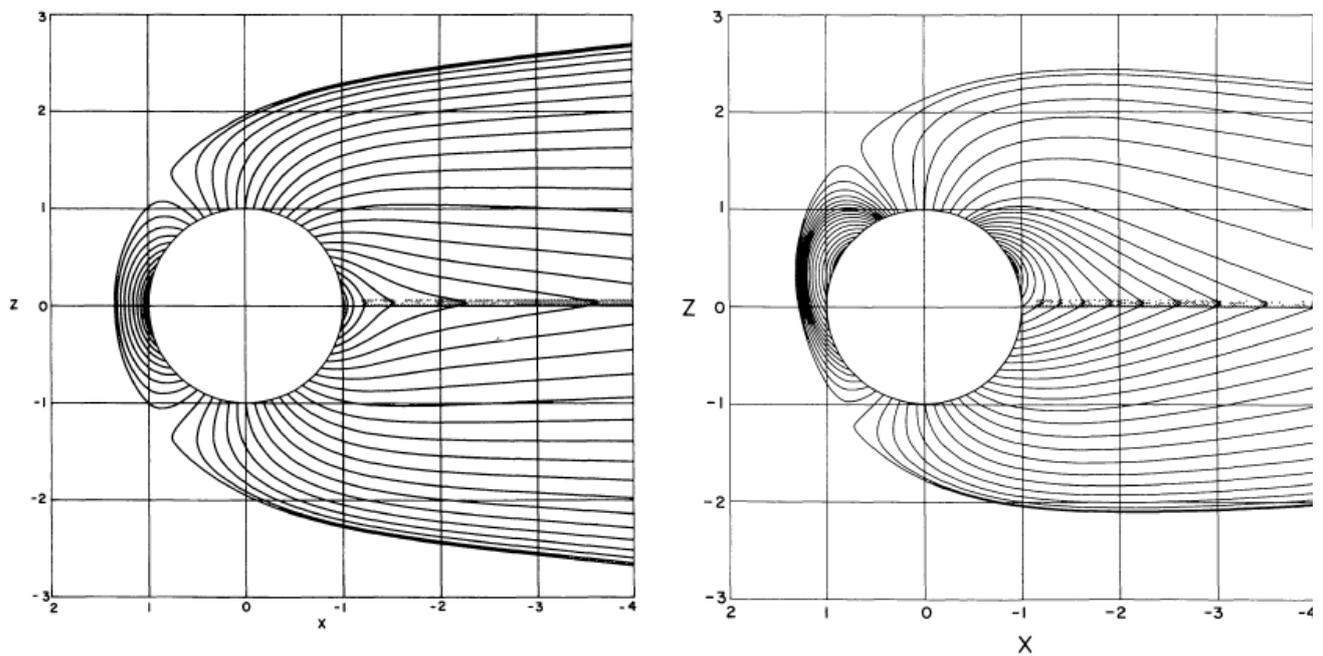


Fig. 6.5. Linee di campo della magnetosfera di Mercurio per differenti modelli del campo interno ed esterno: a) dipolo, b) dipolo + quadrupolo + ottupolo (Whang 1977).

Uno dei parametri chiave che controlla la dinamica degli shock è il numero di Mach. In condizioni di vento solare calmo, la velocità del vento in prossimità dell'orbita di Mercurio è quasi la stessa che per l'orbita terrestre, ma il campo magnetico interplanetario (IMF, interplanetary magnetic field) è maggiore di circa 5 volte e la densità di un fattore 10. Perciò il numero di Mach del bow shock di Mercurio sarà più piccolo di quello del bow shock terrestre, ed in condizioni estreme il suo valore può essere inferiore all'unità.

D'altra parte, per quanto riguarda shocks interplanetari causati dai flares solari, se ne possono osservare con numero di Mach molto grande all'orbita di Mercurio durante il massimo solare.

Per una missione su Mercurio, il problema maggiore consiste nelle particelle energetiche provenienti dal vento solare. I protoni solari sono il prodotto di eventi solari, con energie di parecchie centinaia di MeV e flussi massimi di protoni dell'ordine di $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, per protoni con energie maggiori di 10 MeV. Questi eventi, comunque, sono piuttosto rari, ed avvengono principalmente durante periodi di parecchi anni in prossimità del massimo solare, e la durata di questi eventi di solito è di qualche giorno. La natura stocastica di tali eventi impone una trattazione statistica del problema: poiché il flusso atteso varia con la distanza dal Sole, la posizione dello spacecraft influenza molto il tipo di flusso che potrebbe incontrare.

Per ottenere il flusso totale durante l'intera missione, si utilizza la distanza dal centro del Sole mediata nel tempo per poter scalare i modelli di flussi ad 1 UA. Il flusso durante la fase operativa viene usato come esempio di worst-case, in quanto si assume che un grande evento avvenga quando lo s/c si trova in vicinanza del Sole, cioè in orbita, anziché durante la fase di trasferimento. Gli elevati flussi di protoni energetici e di ioni pesanti possono contribuire alla dose totale ed aumentare le rates di upset nell'elettronica ed il rumore di fondo indotto dalla radiazione nei detectors. Il periodo di attività della missione BepiColombo coinciderà con un minimo dell'attività solare (Fig. 6.6).

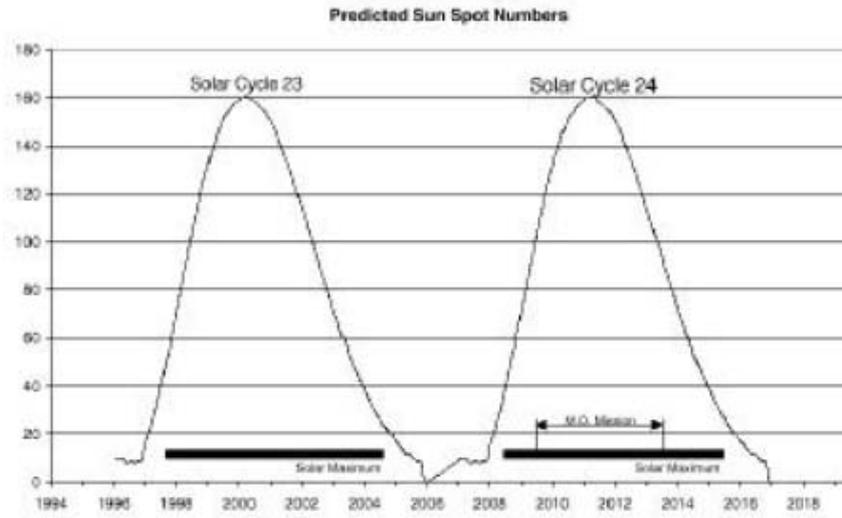


Fig. 6.6. Attività solare prevista tra il 1994 ed il 2020.

Alla distanza di Mercurio la densità del flusso di particelle è circa 10 volte rispetto alla distanza di 1 AU:

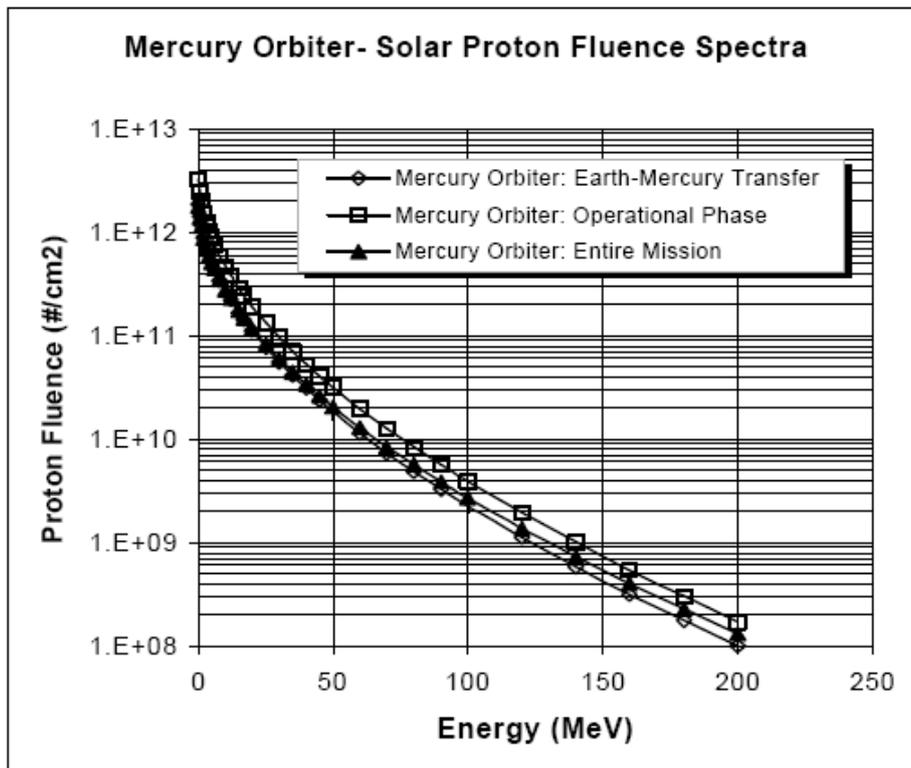


Fig. 6.7. Flusso di protoni durante una missione su Mercurio.

6.4 Effetti della radiazione ed accorgimenti per minimizzarli

Gli effetti della radiazione su uno spacecraft in missione su Mercurio includono la dose totale, il degrado delle celle solari e i SEE (single event effects, effetti da singolo evento). Gli effetti della dose totale sull'elettronica e sulle celle solari sono comparabili con quelli di una missione scientifica in orbita terrestre (ad esempio la missione XMM, 10 anni di durata), prevedendo uno spessore di protezione equivalente a 4

mm di Al (Fig. 7.7). [Orbita di XMM: perigeo 7000 km, apogeo 114000 km, inclinazione dell'orbita 40°, eccentricità 0.79].

I SEE dovuti ai protoni pongono problemi nei periodi di massima attività solare, quindi non dovrebbero costituire un grosso rischio per la missione BepiColombo in quanto, come già detto, la missione è prevista durante un periodo di minimo dell'attività solare: il lancio è previsto per il 2013, a cui aggiungere 6 anni di "cruise" e poi 1 (o anche 2, se la durata della missione verrà estesa), anni di missione scientifica; la missione quindi terminerebbe nel 2020, al massimo nel 2021.

Effetti sulle memorie: i SEE durante gli eventi di protoni solari sono superiori di circa un fattore 10 rispetto alla distanza di 1 AU, perciò sono necessari dei metodi di rilevazione e correzione degli errori: EDAC (error detection and correction) o altri metodi per ridurre la rate di SEU (single event upset, disturbo da evento singolo). Ci si aspetta che la rate di SEE causati da raggi cosmici galattici sarà minore rispetto alla distanza di 1 AU per via dell'azione di attenuazione dei raggi cosmici ad opera del vento solare. La rate massima di SEU è di circa 10^{-10} SEU/(bit giorno): per avere un'idea dell'ordine di grandezza, il requisito per le memorie di XMM è di 10^{-11} SEU/(bit giorno).

Gli effetti dei protoni sono maggiori per Mercurio ed andranno analizzati nel dettaglio.

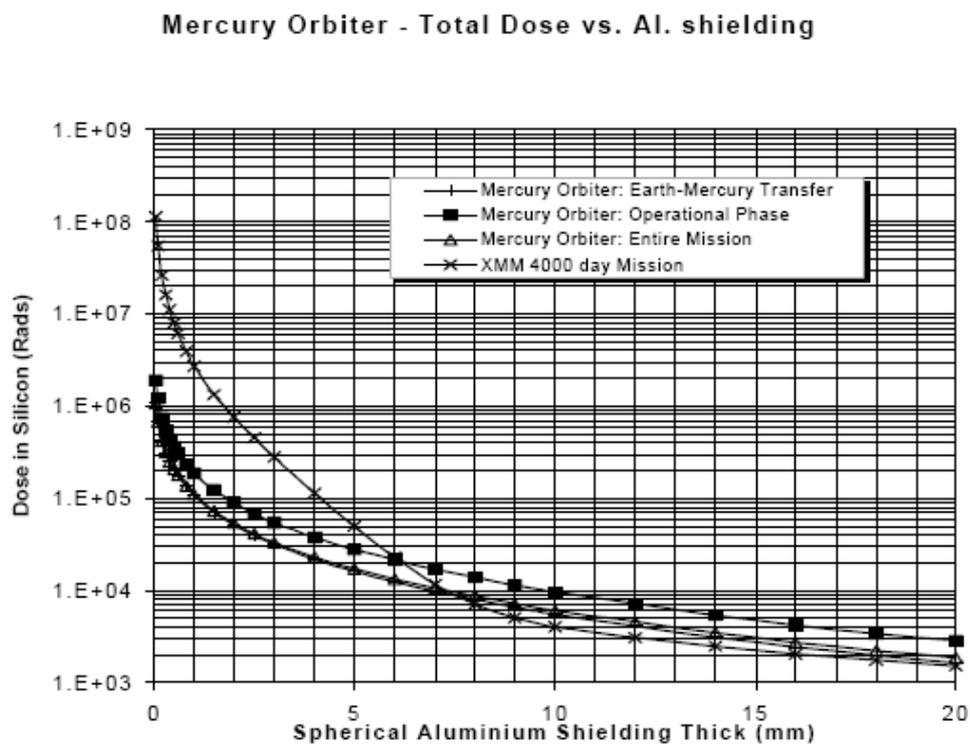


Fig. 6.8. Confronto della total dose tra XMM e Mercurio.

Parti lineari: le parti lineari di uno s/c per Mercurio risentiranno di circa 10 volte di più dei SEU rispetto a missioni che si svolgono alla distanza di 1 AU dal Sole. Durante i periodi di eventi solari, la rate di SEU può raggiungere valori dell'ordine di 1000 eventi al giorno, mentre la rate di eventi da raggi cosmici resta costante.

SEU indotti da protoni: gli effetti dei protoni sui sistemi ottici possono essere drammatici. Danni causati da protoni a bassa energia (0.05 MeV) possono essere critici, ma la protezione fornita dalle ottiche è sufficiente per evitare il problema (il CCD del sistema non è esposto direttamente alla radiazione). Invece gli effetti sui CCD da flussi di protoni ad alte energie sono poco chiari.

Ci si aspetta una riduzione degli effetti indotti dai protoni solari se i materiali utilizzati per la struttura hanno un basso valore di resa per effetti secondari (ad esempio neutroni); sono molto efficaci materiali con un alto contenuto in carbonio: CFRP (carbon fiber reinforced plastic, vale a dire un materiale composito, plastico, rinforzato in fibra di carbonio), C/SiC (carburo di silicio), B₄C (carburo di boro).

6.5 Simulazioni con Spenvis

Spenvis (SPace ENVironment Information System) è un'interfaccia web dell'ESA, gestita dall'Istituto Belga di Aeronomia Spaziale (BIRA-IASB), verso i modelli dell'ambiente spaziale ed i suoi effetti, incluse le cinture di radiazione terrestri, le particelle energetiche solari, raggi cosmici, plasma, gas e micro particelle (meteoroidi e detriti).

Con SPENVIS è possibile generare una traiettoria di uno S/C o un sistema di coordinate e poi calcolare le coordinate geomagnetiche, i flussi dei protoni ed elettroni intrappolati e dei protoni solari; la dose di radiazione (ionizzante e non) per geometrie semplici, la LET di ioni e spettri di flusso e le *rates* di SEU, densità e temperatura di atmosfera e ionosfera, l'erosione da ossigeno atomico.

E' possibile inoltre tracciare le linee di campo magnetico, generare mappe e grafici del campo magnetico in funzione dell'altitudine e modelli di atmosfera e ionosfera.

Sono inoltre disponibili modelli per la carica dello S/C, carica interna e di entrambe le superfici.

Uno strumento per visualizzare i dati del satellite produce dei grafici delle quantità misurate in combinazione con indici solari e geomagnetici.

Sono disponibili modelli di micrometeoroidi e detriti spaziali, ed attualmente è in fase di sviluppo un modello di analisi dei rischi da impatto.

Di seguito una breve descrizione dei modelli presenti:

Coordinate generators: comprende *Orbit generator* e *coordinate grid generator*. La maggior parte dei modelli implementati in SPENVIS richiedono che vengano inseriti alcuni punti della traiettoria oppure dei punti geografici definiti dall'utente.

Questi punti vengono prodotti da due *tools*: il generatore di orbite e il generatore di sistema di coordinate. In genere, uno di questi strumenti devono essere usati prima di accedere ai modelli stessi. SPENVIS può rilevare la creazione di un sistema di coordinate o di una traiettoria, e in caso contrario il sistema fornisce un messaggio di errore.

Una volta determinata la traiettoria o il sistema di coordinate, essa può essere utilizzata da differenti modelli; ciò significa che, all'interno di uno stesso progetto, non è necessario generare di volta in volta l'orbita del satellite separatamente per ciascun modello che si intende utilizzare.

Radiation sources and effects: se il sistema di coordinate selezionato è una griglia, i modelli di particelle intrappolate possono essere valutati e visualizzati sulla griglia. In più, tali modelli possono funzionare anche su una griglia di coordinate magnetiche dal menu di miscelanea di modelli.

Per una traiettoria, sono disponibili una serie di modelli di sorgenti di radiazione ed effetti; per quanto riguarda le sorgenti di radiazione, i flussi delle particelle intrappolate vengono calcolati per ogni segmento in cui è stata divisa la missione ed è possibile anche avere un modello dell'anisotropia dei protoni a bassa altitudine, mentre i flussi dei protoni solari vengono calcolati per l'intero periodo di durata della missione.

Gli effetti da radiazione comprendono i flussi di elettroni per tipi differenti di celle solari, la dose di ionizzazione con tre differenti tipi di coperture di alluminio, il degrado dei device come la perdita di efficienza nel trasferimento delle cariche nei CCD viene stimata calcolando il flusso di protoni equivalente al danno e la perdita di energia non ionizzante (NIEL). E' possibile ottenere una semplice rappresentazione geometrica del satellite per mezzo dello strumento di definizione della geometria. Lo strumento di analisi della copertura per settori genera una distribuzione della schermatura che può essere poi utilizzato come input per i modelli di dose ionizzante e non ionizzante. Inoltre si può simulare una copertura multistrato per valutare il trasporto di radiazione attraverso la geometria, trattando interazioni elettromagnetiche e nucleari.

Spacecraft charging: SPENVIS contiene una serie di utilities sviluppate per l'ESA per risolvere vari problemi legati all'interazione possibile tra satellite e plasma. Con un programma apposito si calcola la corrente di elettroni che passa attraverso uno schermo conduttivo e si deposita in un dielettrico; dalla corrente depositata si trova poi il campo elettrico massimo nel dielettrico. Questo campo viene confrontato con il campo di break down per quel dielettrico per vedere se il materiale è a rischio di scarica elettrostatica. Oltre a questo, altri programmi computano il potenziale di equilibrio di una superficie usando un semplice modello di come si caricano differenti materiali. Stima la raccolta di corrente e perdita di potenza che può subire un pannello solare nell'ambiente di plasma in un'orbita LEO; inoltre è presente un semplice codice

che permette di determinare rapidamente i parametri principali che caratterizzano gli ambienti di un'orbita LEO e di una polare. E' disponibile infine una raccolta di dati su eventi di carica da altre missioni.

Atmosfera e ionosfera: SPENVIS implementa un numero di modelli di riferimento per atmosfera e ionosfera in due differenti applicazioni, versione posizionale ed orbitale, vale a dire la valutazione delle densità e temperatura su una griglia di punti nel primo caso, e valutazione di densità e flussi di particelle lungo la traiettoria del satellite nel secondo.

Campo magnetico:

SPENVIS implementa anche alcuni dei più comunemente usati modelli di campo magnetico in tre applicazioni: anche in questo caso la versione orbitale e di posizione che forniscono una valutazione dei parametri del campo magnetico e, inoltre, la generazione di un guscio di deriva magnetica.

Meteoroidi e debris: sia i meteoroidi naturali che i detriti spaziali di origine umana rappresentano un grave pericolo per i veicoli spaziali in orbita attorno alla Terra. Quasi tutti i meteoroidi hanno origine dalle comete o dagli asteroidi, e sono in genere distribuiti isotropicamente (denominati meteore "sporadiche"), eccetto quelli che mantengono l'orbita del corpo genitore, che sono denominati "sciame di meteore".

L'ambiente dei meteoroidi totale comprende così la media delle meteore sporadiche insieme a alla precedente media degli sciame di meteore. Consistenti con il flusso di particelle naturali sono anche le particelle che compongono gli space debris, la maggior parte dei quali si trovano in orbite ad alte inclinazioni, e sono costituiti da stadi usati di razzi, moduli inattivi, detriti da satelliti esplosi e simili.

SPENVIS include 2 modelli di meteoroidi e debris, il NASA90 ed il Grün.

Utilizzo di Spenvis per Simbio-SYS.

Prima di tutto bisogna definire un'orbita con orbit generator; è possibile suddividere in più segmenti l'orbita: abbiamo considerato come primo segmento un'orbita interplanetaria che dalla Terra simuli il periodo di "cruise" verso Mercurio.

Poi il secondo e terzo segmento sono stati impostati come orbite ellittiche generiche di cui sono stati inseriti i parametri noti dalla definizione di missione (altitudine del perigeo ed apogeo, inclinazione dell'orbita - che in questo caso è polare).

Una volta generate le orbite ci sono varie possibilità, "radiation sources and effects" (trapped radiation), flusso di protoni ed elettroni con il modello AP-8 e AE-8 (è possibile scegliere di utilizzare anche altri modelli) per solar maximum e minimum. Per i motivi esposti sopra, si è considerato il caso di minimo solare. (Che però sono riferiti alla Terra.)

Per l'analisi di radiazione si è simulata una box delle dimensioni previste per l'ingombro totale di Simbio-SYS : 465 x 390 x 200 mm

- 1) Piattaforma di supporto (optical bench) 465 x 390 x 20 mm³
- 2) box 1 400 x 150 x 200 mm³
- 3) "frontalino" 465 x 10 x 200 mm³
- 4) box VIHI 100 x 200 x 100 mm³
- 5) box STC 100 x 100 x 100 mm³
- 6) box HRIC 300 x 100 x 150 mm³
- 7) cilindro HRIC raggio 100 mm

Di seguito sono riportati i grafici delle rates di SEU per il device (nel caso in esame il detector) per un singolo pixel di dimensioni 10x10 micron. La carica critica è di circa 0.01 pC (10⁵ e⁻):

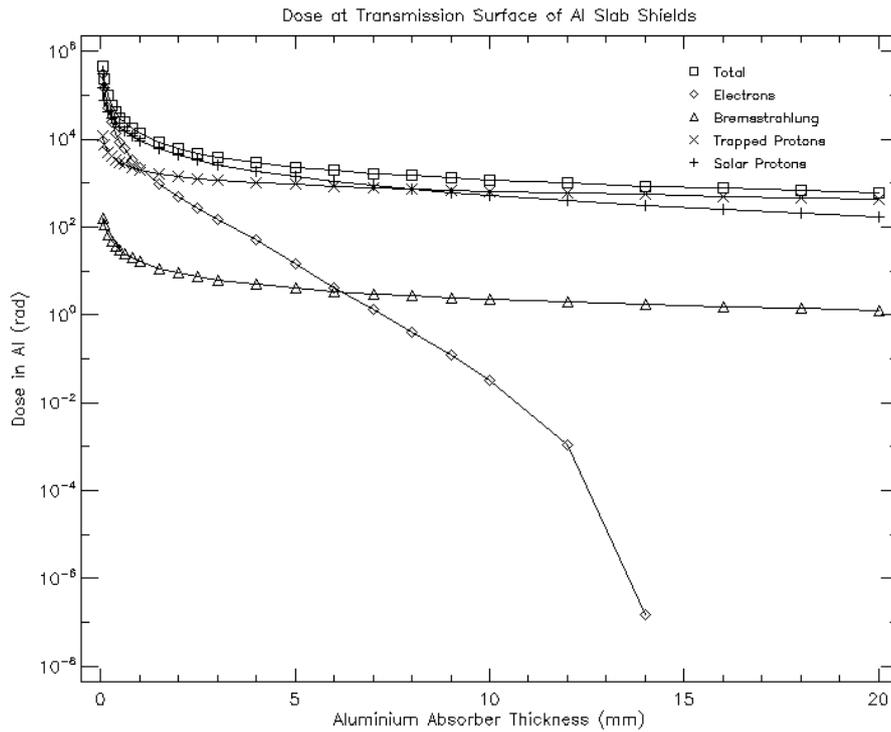


Fig. 6.9. Dose assorbita dall'alluminio in funzione dello spessore di una lastra di Al.

Innanzitutto viene fornita una stima della dose assorbita dai materiali, cioè quanto uno strato di materiale (alluminio) può schermare la radiazione in funzione dello spessore e del tipo di particella considerata. Si vede chiaramente che gli elettroni assorbiti vengono drasticamente ridotti utilizzando lastre con spessori superiori a 10 mm.

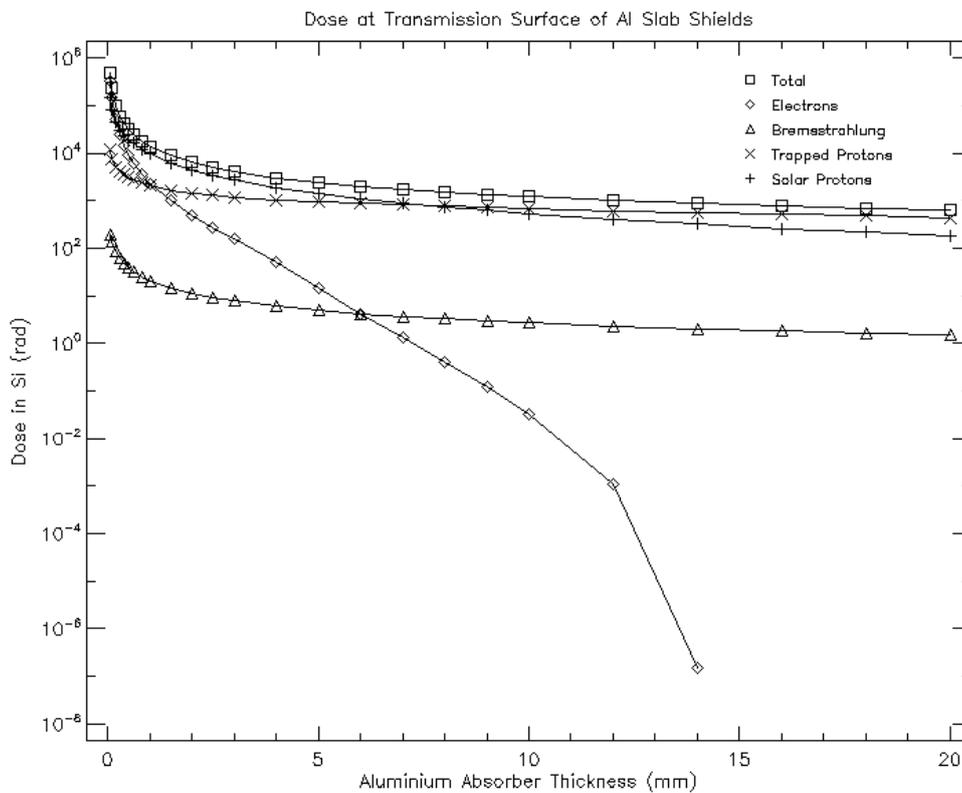


Fig. 6.10. Dose assorbita dal silicio in funzione dello spessore di una lastra di Al.

Il secondo grafico si riferisce alla dipendenza dallo spessore di uno strato di alluminio ma nel caso in cui il target sia il silicio. Segue un grafico analogo per il SiO_2 :

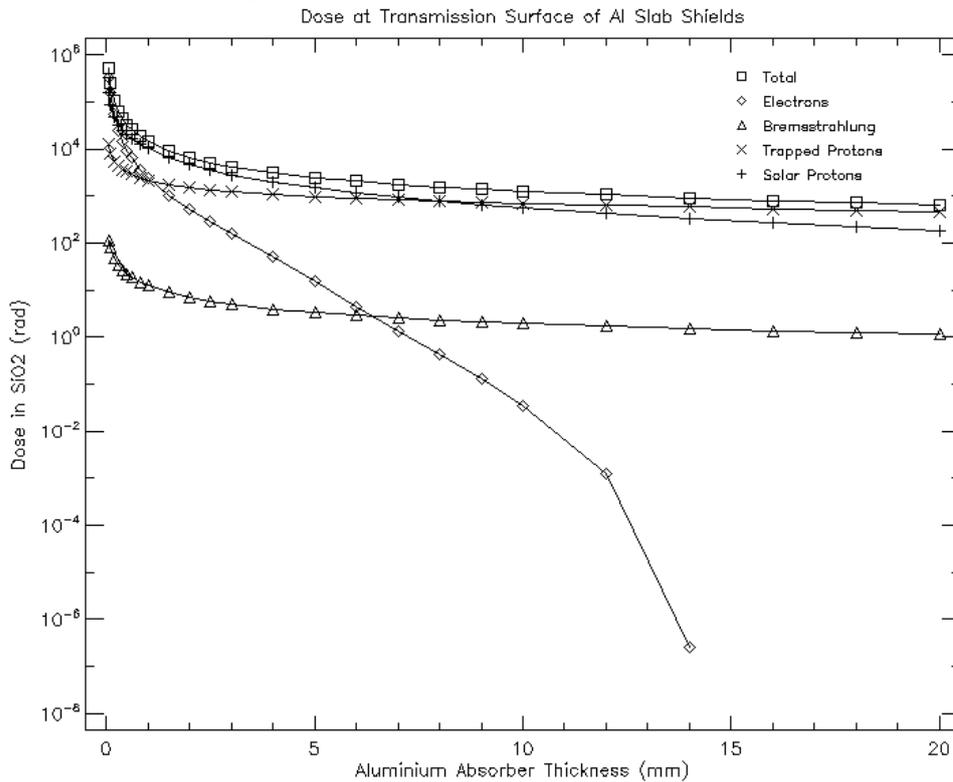


Fig. 6.11. Dose assorbita dall'ossido di silicio in funzione dello spessore di una lastra di Al.

Altro aspetto da considerare oltre alla dose, soprattutto per quanto riguarda i rivelatori CCD, è la NIEL (Non-Ionising Energy Loss), a cui contribuiscono i protoni di energie inferiori a 10 MeV. Tale perdita di energia, pur non avendo effetto ionizzante, ha piuttosto un effetto cumulativo sul materiale e provoca il DDD (Displacement Damage Dose). Di seguito si possono vedere i flussi di protoni e protoni solari aspettati per differenti spessori di protezione di una lastra di Al: in figura 6.12 il flusso di protoni di differenti energie e per differenti spessori del materiale schermante; si nota come per energie superiori a circa 5 MeV l'effetto protettivo di uno schermo, a qualunque spessore, è praticamente nullo.

I protoni solari (fig. 6.13) vengono schermati fino a circa 10 MeV, mentre la dose di DDD (totale tra protoni intrappolati e protoni solari), visibile dal grafico in fig 6.14,

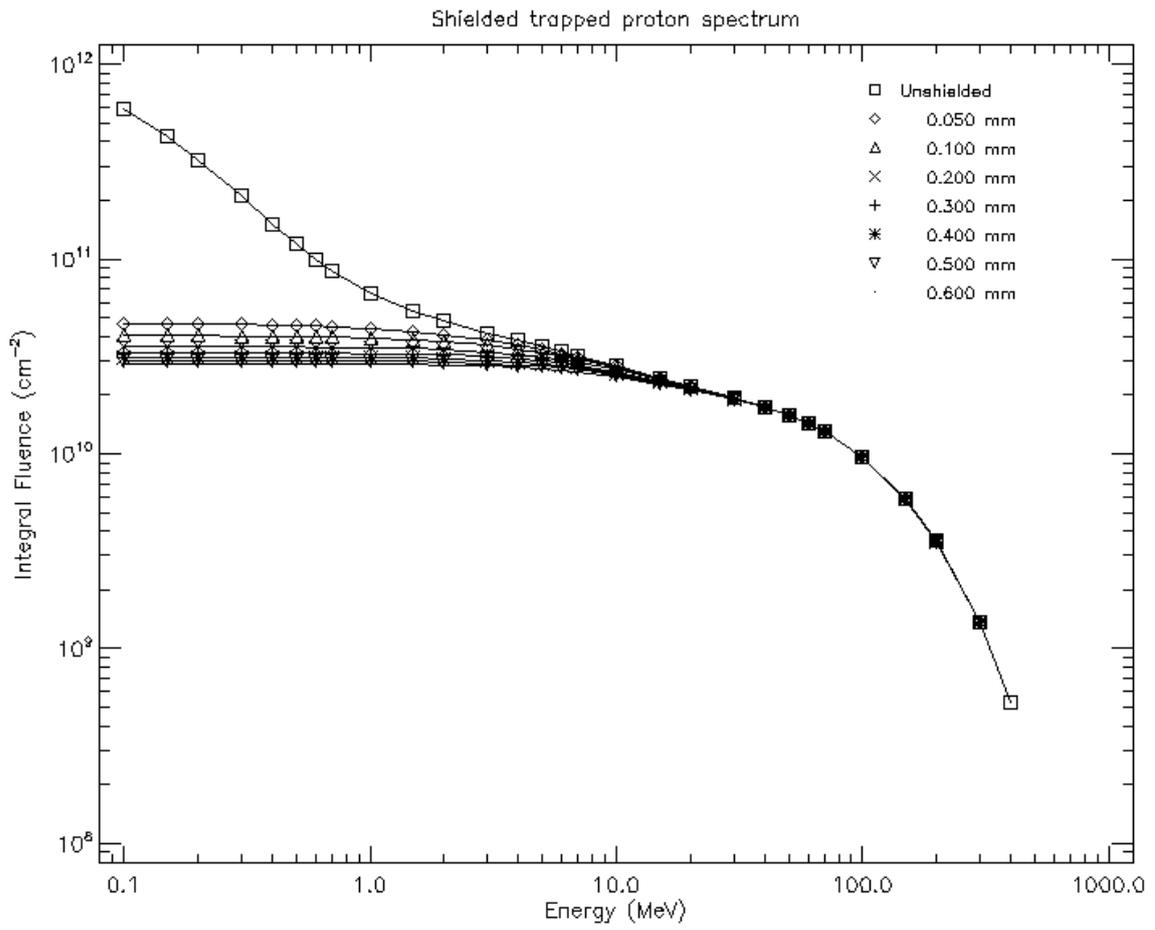


Fig. 6.12. Flusso di protoni a differenti energie e per differenti spessori di una lastra di Al.

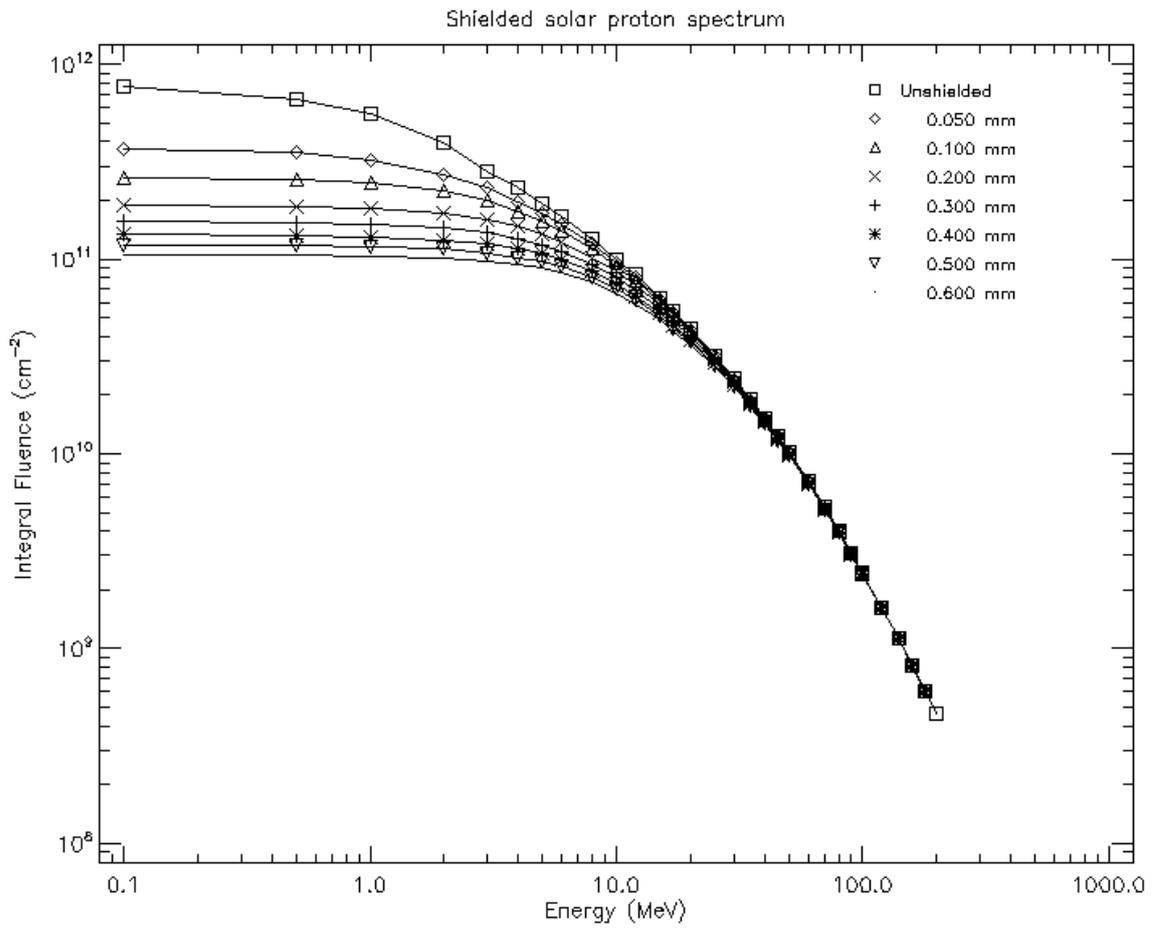


Fig. 6.13. Flusso di protoni solari a differenti energie e per differenti spessori di una lastra di Al.

Infine il DDD totale è visibile nel grafico seguente:

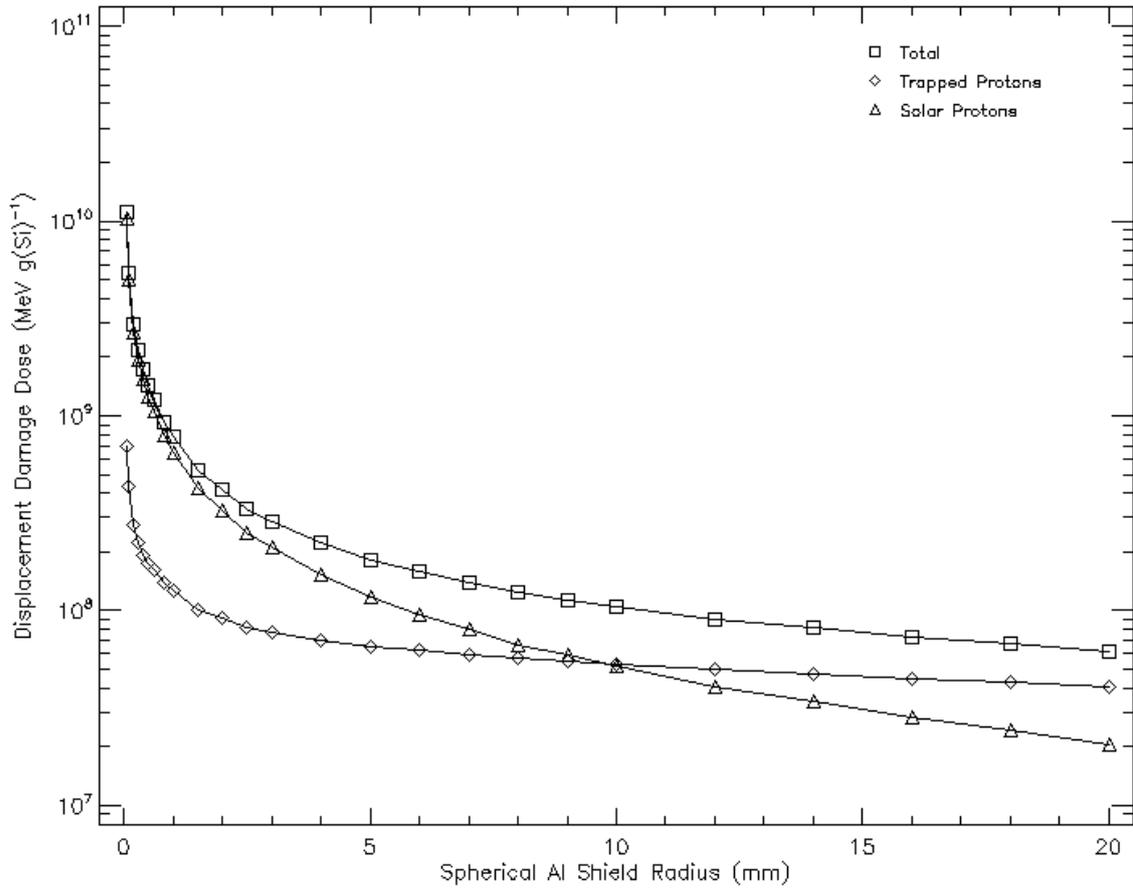


Fig.6.14. Displacement Damage Dose totale in funzione di differenti spessori di uno schermo protettivo di Al.

E' possibile valutare anche il degrado del materiale in funzione dello spessore (fig. 6.15): si noti come per spessori inferiori ai 10 mm, l'effetto maggiore è dovuto ai protoni solari:

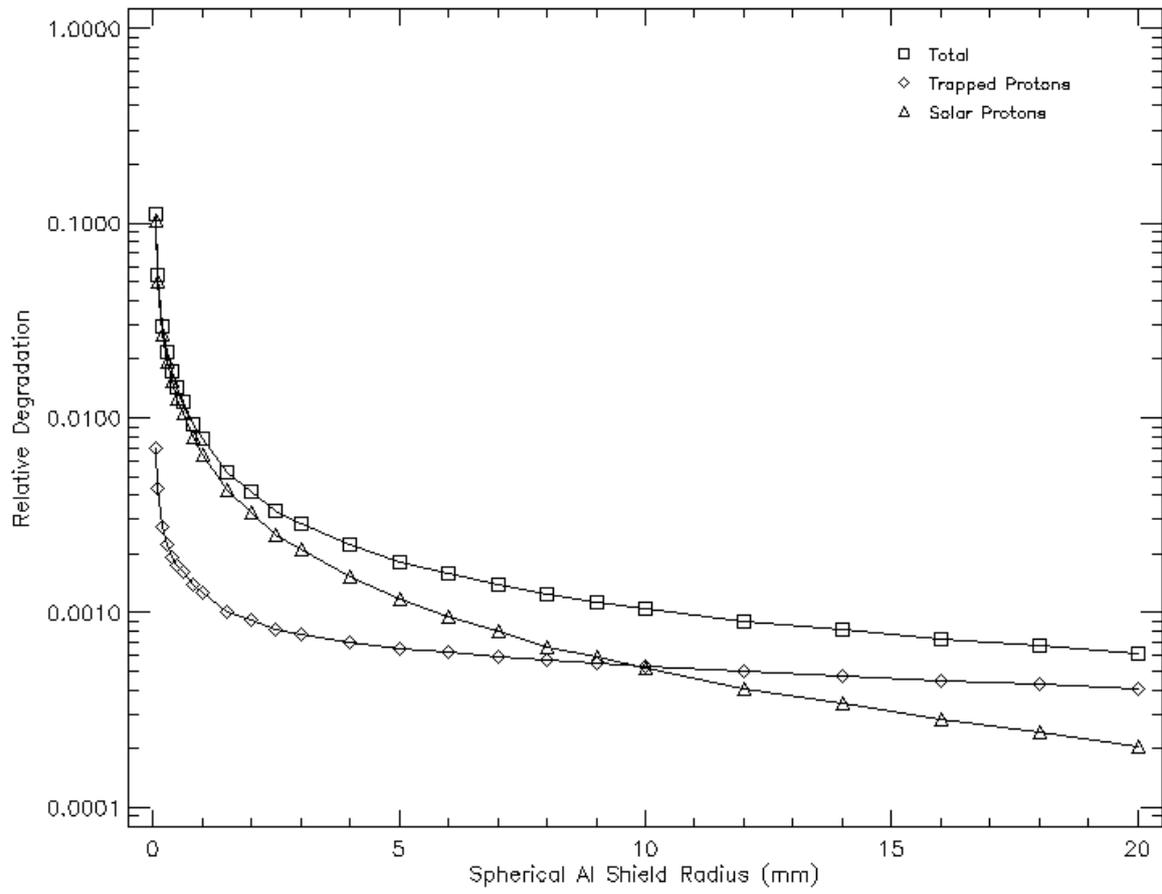


Fig. 6.15. Degrado relativo in funzione di differenti spessori di uno schermo protettivo di Al.

Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è stato principalmente quello di studiare l'accomodamento del baffle di HRIC sia per il notevole carico termico a cui lo strumento sarà sottoposto (circa 10 volte il valore della costante solare a Terra), sia perché il baffle stesso può essere sorgente di stray light all'interno della camera.

Tra le varie configurazioni considerate e studiate la migliore è sembrata quella denominata Stavroudis, anche se un baffle riflettente di tale tipo, come già detto, provoca esso stesso della stray light ovvero luce indesiderata all'interno dello strumento.

Dopo una comparazione tra differenti configurazioni possibili da adottare per il baffle del canale HRIC, con l'ausilio del software Opticad sono state condotte delle simulazioni della propagazione di un fascio luminoso e la conseguente attenuazione dell'energia all'interno di un semplice baffle cilindrico al fine di verificare l'affidabilità del software stesso e la ripetibilità delle simulazioni.

Ciò è stato fatto verificando la distribuzione gaussiana di più simulazioni ripetute; questo ha permesso di concludere che il software è affidabile e che, data l'elevata ripetibilità delle simulazioni, è possibile condurre una sola simulazione per ciascuna configurazione del baffle, con un numero elevato di raggi (10^4 o 10^6).

In seguito sono state condotte varie simulazioni di baffles cilindrici con dei setti piani ad apertura circolare (*baffle* esterno).

La geometria dell'oggetto e le proprietà ottiche delle superfici quali riflettività ed assorbimento influiscono sul comportamento dei raggi in ingresso, pertanto le simulazioni effettuate hanno rivelato, variando alcuni dei parametri in gioco, tale variabilità al fine di suggerire quali possano essere le migliori caratteristiche che deve avere un baffle.

Dal punto di vista termico sarebbe preferibile utilizzare un baffle con superfici riflettenti anziché assorbenti, per lo meno nella parte anteriore di esso, quella maggiormente esposta alla radiazione. E' stata studiata quindi anche una configurazione che si differenzia da quella classica cilindrica con setti piani o troncoconici, e che prevede l'utilizzo di superfici che sono sezioni di ellissi ed iperboli collegate tra loro, in modo da formare un cilindro con il profilo corrugato; tale soluzione prende il nome di geometria Stavroudis, dal nome dell'ideatore. Tale geometria è allo studio anche per il baffle di un altro strumento previsto per la missione, il BELA (Bepi Colombo Laser Altimeter), per le sue caratteristiche geometriche. In particolare lo studio per BELA si propone di progettare un baffle con una capacità di reiezione del 95% ad un angolo di vista di 35° .

Sono state condotte varie simulazioni per cercare di raggiungere un buon compromesso tra requisiti termici - strutturali e requisiti ottici: si è studiato prima il caso di un baffle Stavroudis interamente riflettente e poi quello di un baffle con alcune superfici assorbenti e alcune riflettenti. Inoltre si è analizzato un profilo costituito solo da linee spezzate per verificare quanto la realizzazione di superfici ellittiche incida nel migliorare il risultato.

Le ellissi rispetto ai segmenti danno un notevole vantaggio riducendo l'energia che arriva sul film. Si osserva comunque che solo l'ellisse che costituisce il primo setto è particolarmente pronunciata, mentre le seguenti si avvicinano sempre più a dei segmenti: da questa considerazione si è proceduto anche a realizzare un baffle in cui solo il primo setto è ellittico mentre le tre ellissi successive sono state approssimate con un segmento. In ultima analisi si è verificata la possibilità di approssimare l'ellisse del primo setto con due e quattro segmenti.

Sono state anche condotte delle analisi termiche al fine di valutare i flussi assorbiti dal baffle e dal filtro posto tra il baffle e HRIC nei casi in cui fosse presente o meno una corona circolare, prevista nella configurazione Stavroudis originale, in corrispondenza della sezione d'ingresso del baffle; successivamente sono stati valutati i flussi assorbiti nei casi in cui la riflettività del baffle fosse speculare o diffusa.

Sono state condotte inoltre alcune simulazioni di possibili baffles anche per la stereo camera, STC; date le ridotte dimensioni di questo canale è stata considerata una semplice configurazione cilindrica senza setti, anche se attualmente anche STC prevede l'utilizzo di baffles a profilo Stavroudis.

Infine sono state effettuate alcune simulazioni per mezzo del software Spenvis, per valutare l'influenza dell'ambiente spaziale sulla missione.

Bibliografia

- EID-B, SIMBIO-SYS Experiment Interface Document – Part B, Ref. 6-6-2005 issue 0 rev 1.
- Mercury Environmental Specification – Part 1, Ref. SCI-PF/BC/TN/01, issue 2.0.
- Simbio-Sys Experiment – Scientific and Technological Plan – Part I, Ref. 13-05-2004 issue 0 rev 0.
- BepiColombo Payload Study Document, Ref. SCI-A/2002/007/Dc/CE,CR_BC_TN15 issue 4 rev 1.
- E.R. Freniere, First-order design of optical baffles, SPIE Proceedings, Vol. 257, 1980.
- R.P. Breault, Problems and techniques in stray radiation suppression, SPIE Proc., Vol.107, 1977.
- Y. S. Lee, Y. H. Kim et al., A baffle design for an airglow photometer on board the Korea Sounding Rocket-III, JKAS,33: 165-172, 2000.
- W. J. Smith, Modern Optical Engineering, McGraw-Hill, New York, 1990.
- V. Y. Terebizh, Optimal baffle design in a Cassegrain telescope, Experimental Astronomy 11: 171-191, 2001.
- Progettazione funzionale termica di baffle per HRIC di SIMBIO-SYS per la reiezione del flusso termico – CISAS, 2006.
- Reflective baffle for BepiColombo study – Final report, BELA-CSAG-RP-BAF-00008, issue 1, Aug 2005.
- R. P. Breault, Control of Stray Light, in Handbook of Optics, Optical Society of America, 1996.
- M. Gauvin and E. R. Freniere, Reducing stray light in Opto-Mechanical Systems, Lambda Research Corporation, 2005.
- C. T. Russell and J. G. Luhmann, Mercury: Magnetic Field and Magnetosphere, Encyclopedia of Planetary Science, p. 476 – 478, Chapman and Hall, New York, 1997.
- W. Baumjohann, A. Matsuoka et al., The magnetosphere of Mercury and its solar wind environment: open issues and scientific questions, Advances in Space Research, 38: 604 – 609, 2006.
- L. G. Blomberg, Mercury's magnetosphere, exosphere and surface: low frequency field and wave measurement as a diagnostic tool, Planetary Space Science, 45: 143 – 148, 1997.
- N. F. Ness, The magnetic fields of Mercury, Mars and Moon, Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 7: 249 – 288, 1979.
- N. F. Ness, Mercury: magnetic field and interior, Space Science Reviews 21: 527- 553, 1978.
- Connerney, J. E. P. and Ness, N. F. (1988) Mercury's magnetic field and interior, in *Mercury* (eds F. Vilas, C. R. Chapman and M. S. Matthews). Tucson: University of Arizona Press, pp. 494-513.
- Russell, C. T. (1987) Planetary magnetism, in *Geomagnetism*, Vol. 2 (ed. J. A. Jacobs). London: Academic Press, London pp. 457-523
- Russell, C. T., Baker, D. N. and Slavin, J. A. (1988) The magnetosphere of Mercury, in *Mercury* (eds by F. Vilas, C. R. Chapman and M. S. Matthews) Tucson: University of Arizona Press, pp. 514-61.

Pagine web:

www.esa.int/missions/bepicolombo

http://www-ssc.igpp.ucla.edu/personnel/russell/papers/merc_mag/