

I. INTRODUZIONE ALLA FISICA SPAZIALE

I.1 Scopi dell'esplorazione spaziale

I.1.1 Premessa

Il 1957, l'anno dei primi satelliti artificiali, ha segnato il passaggio da un'epoca in cui la scienza spaziale è vista come la fantasia di pochi che ipotizzano il viaggio sulla luna e l'esplorazione dei pianeti ad un'epoca in cui diventa scienza riconosciuta.

Che tipo di scienza è la scienza spaziale?

Una definizione ragionevole potrebbe essere la seguente: branca della conoscenza che tratta l'origine, lo sviluppo e le varie interazioni fra cultura umana ed ambiente extraterrestre.

Tale definizione è probabilmente corretta ma troppo complessa ed estesa per essere l'oggetto di uno studio monografico perché coinvolge non solo le scienze naturali ma anche quelle umane e sociali. Le tematiche umane e sociali della scienza spaziale sono trattate da esperti in discipline come storia, filosofia, o scienze politiche, ecc. che guardano alla scienza spaziale come un mezzo per sviluppare nuove vie alla conoscenza e migliorare l'umanità. Infatti, uno degli aspetti importanti di questi studi riguarda la definizione della connessione fra i grandi obiettivi che mirano alla comprensione dell'Universo tramite gli studi scientifici e l'esplorazione spaziale e quelli meno ambiziosi ma più pratici che guardano all'educazione scientifica, alle tematiche ambientali, alle collaborazioni fra popoli e, contemporaneamente, al mantenimento delle loro diversità culturali come mezzo per rinforzare la nostra civiltà.

Degli aspetti naturalistici della scienza spaziale si dà un riassunto schematico in Tabella I.1.1. Da qui si deduce che, sebbene detti aspetti non si riferiscano ad una singola disciplina, tuttavia, hanno un'identità sufficientemente coerente da unire in sé ed usare le risorse di differenti discipline. La scienza spaziale, anche nei suoi contenuti naturalistici, è quindi multidisciplinare; una di queste discipline è la Fisica spaziale che a sua volta, come vedremo, è multidisciplinare.

Bisogna aggiungere inoltre che la scienza spaziale garantisce una grande universalità della conoscenza umana attraverso la cooperazione internazionale caratteristica degli studi scientifici ed in particolare della missioni scientifiche spaziali e favorisce lo sviluppo intellettuale proponendo obiettivi sempre più ambiziosi come la costruzione d'osservatori sulla Luna, lo sbarco umano su Marte, la spinta verso le frontiere della tecnologia in nome dell'esplorazione dello spazio.

L'aspetto tecnologico è l'ulteriore elemento trainante della ricerca spaziale e della discussione sociale. Tutti siamo beneficiari (ovviamente in misura differente) dello sviluppo tecnologico nei campi delle comunicazioni, meteorologia, navigazione, geodesia e geologia, medicina, scienza dei materiali, ottica ed elettro-ottica, etc. seguito all'esplorazione dello spazio. L'accesso alla tecnologia spaziale è però molto più ristretto perché per la prima volta l'uomo si pone di fronte ad un ambiente fisico radicalmente differente da quello in cui vive ed a tematiche che non trovano analogie

precedenti. Si aprono, allora, nuovi orizzonti per la ricerca e, contemporaneamente, nuove tematiche per i sociologi. Queste ultime riguardano i fattori sociali che hanno generato la tecnologia spaziale, le conseguenze sociali dell'introduzione di nuove tecnologie, i comportamenti e le necessità dell'uomo nello spazio, etc. Alcuni degli aspetti delle tematiche tecnologiche, in particolare quelli legati alla ricerca, saranno discussi in questa sede.

Ultimo punto della premessa: come si definisce "spazio"? Non è possibile darne una definizione precisa. Si potrebbe definirlo come quella parte dell'Universo che sta al di fuori di un certo limite situato entro l'atmosfera terrestre. Tale limite potrebbe essere la regione al di sopra della quale gli aeroplani non volano a causa della bassa densità dell'aria e quindi della mancanza di spinta sulle ali. Non c'è però un limite esatto perché la densità "critica" dipende dalla forma dell'aereo e da altre condizioni. Non è quindi possibile definire unicamente questo limite: tipicamente è dell'ordine di 50 km; a quest'altezza la densità dell'aria è circa un millesimo di quella a livello del mare. Assumiamo questo valore come limite inferiore dello spazio.

Tabella I.1.1: scienza spaziale

Studia le relazioni fra la Terra e l'umanità considerando anche la Terra come un sistema di cui vanno analizzati i cambiamenti globali.
Studia la Terra come un pianeta anche per mezzo dello studio degli altri pianeti e con le tecniche della planetologia comparativa.
Studia il Sole, non solo come unica fonte di tutta la nostra energia, ma anche come una stella utilizzando l'astrofisica stellare osservativa e teorica per caratterizzare la nascita, l'evoluzione e la fine delle stelle e dei sistemi stellari.
Studia il posto dell'uomo nel Cosmo attraverso la comprensione della vastità dello spazio e del tempo ed attraverso lo studio dei problemi fondamentali sull'origine, l'evoluzione ed il destino dell'Universo.
Studia l'origine ed il valore della vita attraverso l'analisi delle molecole organiche di natura extraterrestre, incluse le molecole del mezzo interstellare, l'analisi chimico-fisica delle atmosfere di mondi come Giove e Titano, o di pianeti come Marte che una volta possono essersi trovati in condizioni adatte allo sviluppo d'organismi viventi simili a quelli terrestri, la ricerca di pianeti esterni al sistema solare, la ricerca di vita extraterrestre.
Studia le leggi che governano le proprietà dei materiali, d'aggregati e di macchine quando sono sottoposti alle condizioni estreme di gravità, temperatura, vuoto, flussi di particelle cariche che si trovano nello spazio.

I.1.2 Comunicazioni da satelliti

Per le comunicazioni a lunga distanza (ad esempio trasmissioni televisive) che usano le microonde si ricorre a satelliti perché questi ultimi possono avere accesso diretto (in trasmissione o ricezione) ad una regione più vasta che non le normali antenne trasmettenti perché il raggio d'azione delle microonde è limitato dalla curvatura della terra. Le microonde, infatti, come la luce normale, si propagano in linea retta e per la loro trasmissione (e ricezione) si devono utilizzare antenne distanti fra loro circa 40 km.

I.1.3 Meteorologia

Immagini da satelliti, acquisite con video-camera e trasmesse a terra, danno la distribuzione delle nubi su larga scala, e l'evoluzione temporale ed il moto di grandi masse d'aria. Questi tipi d'informazione, insieme con misure d'assorbimento ed emissione del calore irradiato dalla Terra e il calcolo di modelli d'atmosfera, formano le basi della moderna meteorologia da satellite.

I.1.4 Satelliti per navigazione

Segnali radio emessi da satelliti di cui si conoscono le effemeridi hanno sostituito i vecchi metodi di navigazione che si basavano sulla misura dell'elevazione sopra l'orizzonte di almeno due stelle (navigazione celeste). Il "Global Positioning System" (GPS) usa una rete di satelliti ognuno dei quali trasmette le sue effemeridi e il tempo. Ciò permette ad un veicolo dotato di ricevitore GPS di determinare la sua posizione tramite l'osservazione simultanea di quattro satelliti della rete. Il sistema è in grado di dare all'utente un'accuratezza di posizione di 20 m, un'accuratezza di velocità di 0.06 m/s ed un'accuratezza del tempo di 10 ns. Utenti con un opportuno sistema di decodificazione possono ottenere accuratèzze in posizione e velocità migliori di un fattore due. La rete di satelliti GPS permette non solo la navigazione sulla Terra ma anche la navigazione di missili e di satelliti.

I.1.5 Geodesia

Per la determinazione della posizione di punti sulla superficie terrestre o d'altre importanti caratteristiche geografiche, si procede con il metodo tradizionale della triangolazione. A tale scopo si divide una data area in regioni geodetiche.

Tipicamente entro ogni regione le distanze fra i punti sono note con una precisione di circa 15 m, ma tra un punto di una regione ed uno di un'altra la precisione tipica con cui sono nate le distanze è molto maggiore. Si ottengono risultati migliori usando un satellite geodetico. Un tipo di satellite geodetico emette un segnale luminoso lampeggiante. Il satellite è fotografato da un telescopio in cielo di notte e la sua posizione, relativamente alle stelle, è calcolata. Contemporaneamente si fotografa il satellite da un'altra regione geodetica e si calcola la sua posizione relativamente alle stelle. Da queste osservazioni si calcola la distanza.

I.1.6 Fisica spaziale

Per quanto riguarda la ricerca di base, cioè le osservazioni scientifiche fatte dallo spazio, i campi d'attività sono molto vasti. Si vogliono ottenere informazioni sulla Terra e la Luna, sul Sole ed i suoi pianeti, sulle stelle della Galassia, la Via Lattea, di cui il Sole è un membro, e sull'Universo che è formato da miliardi di galassie.

Studi della terra riguardano il "remote sensing", cioè l'acquisizione d'immagine e spettri della superficie della Terra per studi ambientali, la misura del campo gravitazionale terrestre, la struttura e le proprietà degli strati più elevati dell'atmosfera terrestre ed in particolare della ionosfera, al di sopra dei circa 60 km.

La ionosfera è particolarmente importante per il ruolo che gioca nelle comunicazioni radio a grandi distanze. L'emissione di particelle ionizzate dal Sole, durante periodi d'attività, può modificare sostanzialmente la composizione della ionosfera e influire sulle trasmissioni in maniera importante.

E' noto che la Terra ha un campo magnetico significativo che diventa trascurabile a distanze d'alcune migliaia di km (il campo è approssimativamente dipolare e diminuisce con r^3). Tali distanze segnano il bordo della magnetosfera terrestre. Una delle conseguenze del campo magnetico terrestre è che particelle ionizzate sono intrappolate nelle fasce di van Allen, attorno alla Terra. La conoscenza dettagliata di queste regioni di particelle ad alta energia è importante non soltanto per la ricerca scientifica ma anche per l'effetto che possono avere sulla strumentazione in orbita e, soprattutto sull'uomo. L'altitudine delle stazioni abitate o degli Shuttle sono scelte opportunamente in modo che queste radiazioni non rappresentino un pericolo biologico. Tuttavia, con lo sviluppo dell'esplorazione spaziale e per i futuri viaggi sulla Luna ed oltre, queste problematiche dovranno essere tenute in considerazione.

L'uomo è già stato sulla Luna, ma ci vuole ritornare. Ci sono varie ragioni per questo: in primo luogo perché la Luna non ha atmosfera o acque che possano modificare le proprietà della superficie lunare che perciò è rimasta inalterata per milioni d'anni. Quindi la superficie lunare può comunicarci informazioni sull'origine del sistema solare. La Luna è anche il potenziale miglior sito per una nuova generazione di telescopi per l'esplorazione profonda dell'Universo. Si sa che anche i più sofisticati telescopi terrestri sono limitati dall'atmosfera terrestre (sia per la degradazione dell'immagine alle lunghezze d'onda in cui essa è trasparente, sia per la non trasparenza alla maggior parte della radiazione dello spettro elettromagnetico). I telescopi in orbita terrestre (*Copernicus, IUE, IRAS, HST*, etc.) hanno dato e danno un sostanziale miglioramento rispetto quelli terrestri, ma un osservatorio sulla Luna ha sensibilità che sono ordini di magnitudine migliori in ragione della grande stabilità. Si potrebbero costruire enormi strumenti di transito con specchi o antenne di materiali leggeri, anche a formare una rete. Infine la Luna potrebbe essere l'avamposto per le future missioni su altri pianeti, ed in particolare su Marte, che sarà il primo pianeta che sarà esplorato dall'uomo con presenza diretta. L'esplorazione dei pianeti costituisce una parte importante della scienza spaziale perché permetterà di comprendere meglio la storia del sistema solare e, possibilmente, di aiutare a comprendere l'origine della vita. L'esplorazione dei pianeti è già stata intrapresa in passato con sonde automatiche che hanno anche deposto sulla superficie strumentazione scientifica. Per il viaggio umano su Marte bisognerà attendere il prossimo decennio; naturalmente bisognerà sviluppare sistemi di propulsione opportuni ed aspettare una posizione della Terra favorevole per il lancio di un veicolo spaziale capace di arrivare a Marte.

Essendo il Sole la "nostra" stella, il suo studio e la comprensione delle fenomenologie solari sono assolutamente importanti anche per comprendere meglio le relazioni Sole-Terra. In precedenza si è discusso l'effetto dell'attività solare sulle trasmissioni radio a grande distanza. Esistono moltissimi altri fenomeni terrestri che sono influenzati da ciò che avviene sul Sole e che sono legati al ciclo undecennale di

"attività" ed ad altri episodi, più sporadici, connessi alla presenza di campi magnetici, d'oscillazioni della stella, etc.

Dallo spazio, il Sole si può studiare sia da satelliti in orbita terrestre, che da sonde che vi si avvicinano e da sonde che si allontanano. I primi satelliti artificiali hanno già scoperto un fenomeno inaspettato: il vento solare, un flusso di particelle cariche (essenzialmente protoni) emesse dal Sole che impatta con gli strati alti dell'atmosfera terrestre a velocità variabili da poche centinaia di km/s a circa 1000 km/s. Sonde che avvicineranno il Sole misureranno, in situ, fenomeni di cui sulla Terra si vedono solo gli effetti distanti. Sonde che si allontanano dal Sole, come le sonde *Voyager*, vedono il Sole "come fosse una stella" e permettono di confrontarlo con altre stelle simili della Galassia per meglio comprendere queste ultime ed il loro ruolo nell'evoluzione stellare.

Come detto in precedenza, l'astronomia dello spazio si avvantaggia dai fatti che non c'è degradazione delle immagini del Sole, delle stelle e della galassie dovute all'atmosfera terrestre e che tutto lo spettro elettromagnetico è accessibile: dai raggi e raggi γ all'estremo infrarosso e le microonde. La possibilità di avere una copertura multi-frequenza dello spettro è indispensabile per una visione moderna dell'Universo: per determinare meglio la natura degli oggetti celesti, caratterizzare i processi fisici che intervengono, comprendere la storia e l'evoluzione dell'Universo e verificare le leggi fondamentali della fisica.

I.1.7 Vita nello spazio

Un ulteriore aspetto importante della ricerca spaziale è quello biologico. Il principale problema è associato alla dimensione umana: la comprensione degli effetti sull'uomo e sulla sua fisiologia dell'ambiente spaziale, del veicolo spaziale e della sua atmosfera, dei problemi legati alla nutrizione, alla luce, all'impatto di micrometeoriti, alla radiazione ionizzante, all'assenza di peso o alla presenza di gravità artificiale.

Altrettanto importante è la possibilità di cercare in modo nuovo la presenza di vita al di fuori della Terra. C'è la possibilità d'avere indicazioni di una vita estinta su Marte, o forse evidenza di forme primitive di vita ancora esistenti.

I.2. Storia dell'esplorazione dello spazio

I.2.1. Razzi

Si conosce solo un metodo pratico di propulsione nello spazio: il sistema a razzo. Un sistema alternativo è tramite spinta fotonica ed usa una vela solare.

Ci sono ragioni, riassunte in Tabella I.2.1, per cui si può affermare che il principio di propulsione a razzo è il metodo pratico per eccellenza. I razzi operano sul principio di azione e reazione tramite l'emissione continua di un flusso di gas che produce il movimento (Figura I.2.1).

Il materiale che produce il gas di alta temperatura è il propellente che può consistere di un singolo liquido, una miscela di liquidi, un solido, una combinazione di liquido e solido. Per la propulsione non è necessaria la presenza di un mezzo. Perciò il razzo è differente dai motori a jet convenzionali. Nei motori dei jets il gas d'alta temperatura è formato dalla combustione di kerosene con l'ossigeno dell'aria. Quindi un motore di jet non può funzionare in assenza d'aria. Un razzo invece acquisisce l'ossigeno necessario sotto forma di sostanze ossidanti o sostanze come il perossido d'idrogeno che producono gas d'alta temperatura per decomposizione chimica cioè senza utilizzare reazioni d'ossidazione.

Il fattore che determina la velocità massima di un razzo è la velocità con cui è espulso il gas d'alta temperatura. La velocità del gas aumenta con la temperatura e, inversamente, con il peso molecolare medio. Inoltre sono importanti la scelta del propellente ed il disegno del motore. Per lanciare un satellite in un'orbita bassa (LEO, "Low Earth Orbit", da circa 200 km a qualche migliaio di km) la velocità di partenza deve essere circa 9 km/s; per sfuggire dal campo di gravità della terra, la velocità di lancio deve essere di 13 km/s.

Tabella I.2.1: propulsione a razzo

La propulsione è possibile in ogni mezzo, anche nel vuoto (o quasi vuoto) dove è addirittura più efficiente che in un mezzo. Il funzionamento di un razzo non dipende dalla presenza dell'aria perché il razzo contiene la sua sorgente d'energia e non richiede ossigeno dall'esterno. Il motore di un razzo è l'unica macchina che si conosce che può produrre l'alta velocità iniziale necessaria a vincere la forza gravità.

Razzi per fuochi d'artificio erano già noti nel 1200 in Cina, consistevano di una freccia cui era attaccato un razzo spinto da polvere da sparo. Dalla Cina questi razzi si diffusero in altre parti dell'Asia ed in Europa e sporadicamente furono usati come armi: ad esempio all'inizio del 1800 contro gli inglesi durante l'invasione dell'India. Furono poi gli inglesi, (William Congrave e William Hale) che li migliorarono nel disegno e, impartendo una rotazione durante il volo, li resero più stabili.

Il primo disegno semi-scientifico di un razzo fu realizzato nel 1891 dal tedesco Hermann Ganswindt che proponeva di far esplodere cariche di dinamite contenute entro un involucro d'acciaio. All'esplosione della dinamite parte dell'involucro

sarebbe stata "sparata" e la reazione avrebbe spinto la parte restante dell'involucro contro la parete del razzo dandogli la spinta necessaria per il moto. Ganswindt ipotizzava correttamente che, una volta raggiunta una velocità elevata, si poteva cessare di sparare i proiettili perché il razzo avrebbe continuato il suo moto con traiettoria balistica. I possibili passeggeri avrebbero sperimentato l'assenza di peso (come descritto da J. Verne); per simulare la gravità bastava mantenere in rotazione la cabina.

Contemporaneo di Ganswindt, ma di gran lunga più importante per il contributo dato alla scienza spaziale, il russo Konstantin Eduardovitch Tsiolkovsky gettò le basi scientifiche della propulsione a razzo e derivò alcune delle equazioni dei razzi. Nella sua opera fondamentale, "Studi dello spazio interplanetario per mezzo di razzi" pubblicato nel 1903, Tsiolkovsky descrive l'importanza di espellere ad alta velocità il gas prodotto nel bruciamento del propellente del razzo.

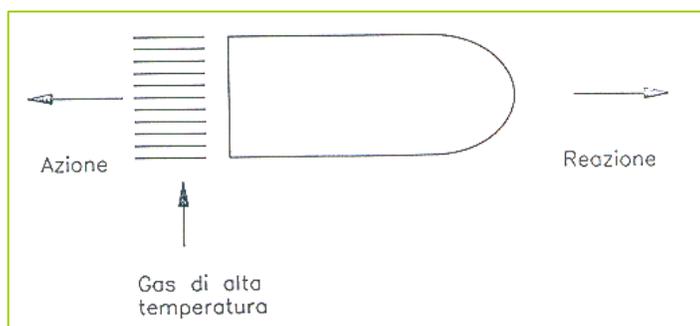


Figura I.2.1: Principio di propulsione di un razzo.

Nel periodo fra le due guerre mondiali, lo statunitense Robert H. Goddard costruisce razzi e li brevetta. Il primo brevetto riguarda un razzo a due stadi a propellente solido; il secondo riguarda l'ugello di scarico, a forma di tronco di cono, che è tuttora quello che garantisce maggiore efficienza. Nel 1919 pubblica un rapporto per conto dello Smithsonian Institute intitolato "Un metodo per raggiungere altezze estreme" che dà un trattamento teorico della propulsione a razzo e descrive la possibilità di raggiungere la Luna con un razzo. In seguito Goddard brevetterà il primo razzo a combustibile liquido, una pompa centrifuga per propellenti liquidi, metodi per raffreddare la camera di combustione, un sistema di stabilizzazione giroscopica, etc. Molte delle sue idee sono tuttora valide e usate nei razzi moderni.

La propulsione a razzo comincia a suscitare grande interesse soprattutto dopo la pubblicazione, nel 1923, del libro "Razzi nello spazio interplanetario" di Hermann Oberth, un professore di matematica austriaco che conosceva molto bene i lavori di Tsiolkovsky e Goddard. Nel suo lavoro, Oberth supera in alcuni aspetti il lavoro dei predecessori particolarmente nel propugnare i vantaggi del combustibile liquido su quello solido in ragione del fatto che il primo dà maggior velocità ai gas di scarico e quindi il razzo raggiunge maggiori altezze. Oberth diventa presto il più noto esperto di propulsione a razzo anche perché da una parte il lavoro di Tsiolkovsky non viene

diffuso al di fuori della Russia e dall'altra è Goddard stesso che non rende pubbliche le sue idee ed i risultati conseguiti per paura che siano copiati. Sulla base del lavoro d'Oberth, che nel frattempo si è trasferito in Germania, si ha una proliferazione di lavori dedicati all'argomento. Si ricorda in particolare il lavoro di Walter Hohmann, ingegnere ed architetto tedesco, sulla "Raggiungibilità dei corpi celesti". In questo lavoro vengono discussi matematicamente 1) le condizioni per lasciare la Terra e ritornarvi e 2) la circumnavigazione e l'atterraggio sui pianeti. Le "ellissi di trasferimento" di Hohmann sono ancora oggi considerate la via più economica anche se non la più breve per i viaggi interplanetari.

Il successo delle idee d'Oberth e degli esperimenti di Goddard fecero ricordare ai russi che Tsiolkovsky era stato anticipatore di quelle stesse idee; vennero ristampati i suoi scritti e i suoi studi vennero proseguiti da numerosi ricercatori fra cui si ricorda F.A. Tsander che nel 1932 scrisse "Il problema del volo per mezzo dei razzi". Anche negli Stati Uniti lo studio della propulsione a razzo conquista larga diffusione. Si ricorda "La conquista dello spazio" di David Lester scritto nel 1931 ed il primo periodico scientifico dedicato alla propulsione dei razzi ed ad argomenti correlati. Inoltre viene fondato l'American Interplanetary Society che diventa in seguito American Rocket Society per diventare nel 1963 la famosa American Institute of Aeronautics and Astronautics. Simili società vennero fondate agli inizi degli anni 30 in Russia, Germania, Austria e Francia.

Una curiosità: nel 1928 il noto regista cinematografico Fritz Lang assume Oberth come consulente del film "La ragazza sulla Luna". Nel film si utilizza un modello in scala 1:1 di un'astronave spinta da razzi e, per la prima volta, si usa il sistema di "countdown". Nel film muto lo scandire dei secondi segnato da dei "flash" successivi che illuminano i numeri decrescenti.

Nel 1930, in Germania, si fanno i primi test statici di razzi a combustibile liquido. Come propellenti si usa una miscela d'ossigeno liquido e benzina. Gli sperimentatori sono l'ing. Klaus Riedel ed il suo giovane assistente, uno studente di 18 anni, Werhner von Braun. I test di volo seguirono poco dopo con l'uso di vari propellenti: alcool al posto di benzina perché richiede meno ossigeno liquido per la combustione, alcool con aggiunta d'acqua per diminuire il peso molecolare medio della miscela. In quegli anni, gli americani, che non riuscivano ad avere informazioni da Goddard, si rivolsero ai tedeschi per definire i principi operativi dei loro razzi a combustibile liquido e realizzarono alcuni esperimenti. I russi a loro volta realizzarono vari lanci con razzi disegnati da Tsander. In Germania, dal 1933-34, i militari presero il completo controllo della ricerca sui razzi e fondarono il centro di Peenemunde dove in seguito realizzarono i famosi V-2 (V sta per Verteltung, vendetta). Il V-2 era un razzo sofisticato. La sua massa era di circa 14000 kg ed era alto 14.3 m. Il propellente era ossigeno liquido (5500 kg) mescolato con 4225 kg d'alcool (75%) ed acqua (25%). Poteva trasportare un carico di 1100 kg con altezza di picco di circa 100 km e gittata di circa 350 km. Il propellente era spinto nella camera di combustione da pompe centrifughe alimentate da una turbina a vapore; il vapore era prodotto da reazioni chimiche fra perossido d'idrogeno ed una soluzione acquosa di permanganato di potassio. Il primo test soddisfacente venne fatto nell'ottobre 1942 e nel settembre 1944

iniziò l'uso operativo dei V-2 che, con il loro carico di bombe, vennero lanciati contro l'Inghilterra. Fra il settembre 1944 e il marzo 1945 ne vennero lanciati più di 1000 e di questi circa l'8% fallirono alla partenza; dei restanti il 50% colpì il bersaglio.

La risposta USA al controllo da parte dell'esercito tedesco degli esperimenti nei razzi fu la creazione nel 1936 di un laboratorio di ricerca presso il California Institute of Technology (Caltec). Il laboratorio, che nel 1943 acquisirà il prestigioso nome di Jet Propulsion Laboratory (JPL), fu inizialmente guidato da Theodore van Karman, un eminente aerodinamico, che chiamò attorno a sé ingegneri e ricercatori di grande prestigio. Il laboratorio si dedicò inizialmente allo studio di propellenti solidi, molto più facili da usare che quelli liquidi e perciò più adatti a scopi militari. I più importanti tipi di razzi militari ancora ora in produzione negli Stati Uniti usano combustibili solidi sviluppati presso il JPL.

Dopo la capitolazione della Germania, nel maggio 1945, molti scienziati tedeschi che avevano lavorato sulle V-2 furono trasferiti in Russia e negli Stati Uniti. Assieme agli scienziati vennero portati anche molti V-2 che furono studiati ed usati per stabilire la base delle potenzialità balistico-militari delle due potenze vincitrici. In Russia, i discendenti diretti dei V-2 furono i Pobeda, più potenti e stabili; negli Stati Uniti, i Redstone. Fu il gruppo guidato da von Braun che nel 1950 a Huntsville in Alabama (in un laboratorio militare ora sede del Marshall Space Center della NASA) realizzò i Redstones; questi erano delle V-2 di massa e dimensioni circa 4 volte maggiori e con gittata circa 5 volte più grande. Il primo Redstone fu lanciato nel 1953. Tuttavia già da alcuni anni l'U.S. Naval Research Laboratory aveva realizzato indipendentemente e sperimentato il Viking, un razzo di prestazioni simili ai Redstones; anche il Viking usava combustibile liquido.

Dagli anni 50 in poi lo sviluppo dei razzi procede parallelamente allo sviluppo dei satelliti orbitanti, delle sonde spaziali e del volo umano.

I.2.2. Satelliti

Le novelle di Verne, Eyraud, Wells ed altri spinsero Tsiolkovsky, Goddard e Herman Oberth a disegnare e, nel caso di Goddard e Oberth, costruire prototipi di macchine necessarie per andare nello spazio. Il loro lavoro fu usato dai militari - dapprima nella guerra fra nazisti ed alleati ed in seguito durante la guerra fredda - per stabilire quel livello di conoscenze scientifiche e tecnologiche che ha dato luogo all'era spaziale.

Nell'era spaziale la spinta verso l'utilizzo dello spazio è stata molto forte. Si è avuta una biforcazione in due grandi canali: 1) tecnologia militare e 2) ricerca e tecnologia per usi civili. Il secondo canale, quello che è l'oggetto di queste note, è iniziato già con Goddard con l'uso di razzi per misure scientifiche a grandi altezze. Al giorno d'oggi i razzi sono ancora usati per la ricerca; sono i "sounding rockets" e vengono lanciati verticalmente (o quasi) per discendere sulla terra in un posto vicino alla base di lancio. Di solito salgono fino circa 400 km (ma possono raggiungere anche altezze di 6000 km) ed hanno durata di volo utile per misure scientifiche dell'ordine di qualche decina di minuti.

Per misure più continue e su aree maggiori, si usano i satelliti artificiali, che sono macchine che ruotano attorno la Terra su un'orbita ben definita. A meno che l'orbita non sia molto alta, la resistenza aerodinamica rallenta il moto del satellite e, come tratteremo in seguito, ne degrada l'orbita fino a farlo rientrare nelle regioni di più alta densità dell'atmosfera terrestre ed eventualmente distruggerlo a causa dell'attrito. La vita media di un satellite dipende dalle dimensioni e dalla forma, dalla massa e dall'altezza dell'orbita. Un piccolo satellite di grande massa che ha un'orbita alta avrà vita molto lunga. L'aumento delle dimensioni, e le diminuzioni di massa e d'altezza dell'orbita contribuiscono a diminuirgli la vita media. A causa della resistenza dell'aria non ha senso utilizzare orbite minori di circa 350 km.

La storia dei satelliti artificiali comincia praticamente con il lancio del 4 ottobre 1957 dello Sputnik I da parte dei russi (la parola russa *sputnik* significa satellite) in occasione delle celebrazioni dell'Anno Geofisico Internazionale. Questo fu il primo satellite artificiale della Terra ed aveva una massa di circa 270 kg. Lo Sputnik II, lanciato il 3 novembre 1957, aveva una massa, compreso il carico scientifico, di più di 1500 kg. Oltre a vari strumenti per la misura dei raggi cosmici e della radiazione solare, lo Sputnik II portava la prima creatura vivente messa in orbita dagli uomini: una cagnetta di nome Laika.

I successi dei russi presero di sorpresa il mondo intero e spinsero gli americani a finanziare il loro programma di satelliti che, anche se ben definito, languiva per mancanza di finanziamenti. Il 31 gennaio 1958 gli americani misero in orbita l'Explorer I che aveva una massa di 45 kg e conteneva strumenti scientifici per la misura dei raggi cosmici. Il 17 marzo 1958, dopo alcuni fallimenti, venne lanciato il secondo satellite americano, Vanguard I, che aveva un'orbita ellittica di circa 700 km al perigeo e di circa 4000 km all'apogeo. La massa era di 5 kg ed aveva due ricetrasmittenti per segnalare la sua posizione.

I.2.3. L'uomo nello spazio

Perché con il progresso tecnologico e la possibilità di ottenere informazioni dallo spazio senza la presenza dell'uomo, si ritiene indispensabile la sua presenza?

Ci sono varie risposte a questa domanda che implicano una serie di problematiche legate sia ad argomenti scientifici e tecnologici come l'uso commerciale ed industriale dello spazio e l'esplorazione ed utilizzazione dei pianeti che ad argomenti filosofici ed ambientali come: l'esplorazione dello spazio e la difesa dell'ambiente spaziale, la conservazione dei valori naturali nel sistema solare, etica ambientale ed ecosistemi extraterrestri, etc. Le risposte devono inoltre considerare l'esistenza di tematiche legate direttamente alla dimensione umana: l'organizzazione sociale e fisica delle future colonie spaziali, i limiti di rischio nello spazio, la teologia e lo spazio, e purtroppo anche gli usi militari e nucleari dello spazio.

Più semplicemente si può dire che l'uomo, lo scienziato, se propriamente addestrato, è un osservatore di gran lunga superiore a qualunque strumento automatico e ciò è importantissimo nella fase d'esplorazione che ancora è in corso.

Il primo uomo nello spazio fu un russo, Yuri Gagarin, che il 12 aprile 1961 volò sulla Vostok I per circa 90 minuti, la durata di un'orbita ellittica di raggio al perigeo

di 175 km e all'apogeo di 300 km. Il secondo fu il cosmonauta Gherman Titov (2 agosto 1961) rimase in orbita 25 ore. A loro seguirono molti altri russi, tra cui la prima donna cosmonauta: Valentina Tereshkova che rimase in orbita 71 ore nel giugno 1963.

Dopo due voli suborbitali avvenuti nel 1961, il 20 febbraio 1962 un razzo Atlas portò in orbita una capsula Mercury con il primo astronauta americano, John Glenn. Il volo durò 5 orbite di 160 km al perigeo e di 260 km all'apogeo.

Dopo i programmi Vostok e Mercury, i programmi Gemini, Apollo (che portò l'uomo sulla Luna), Skylab, Shuttle, Spacelab, Voskhod, Soyuz, Salyut, Mir, etc. hanno popolato le nostre menti con immagini d'uomini che galleggiano attorno l'astronave, che saltellano sulla superficie della Luna, che fanno misure ed osservazioni scientifiche, che lanciano e recuperano satelliti, che fanno lavori di riparazione. Il futuro promette una continuazione di queste attività con la stazione spaziale, le basi sulla Luna e l'esplorazione umana di Marte.

I.2.4. Fantascienza

La ricerca spaziale ha anche dato impeto a quella forma d'arte che si chiama fantascienza. La grande quantità di nuove informazioni ha eccitato la fantasia degli scrittori. I quasars, le stelle a neutroni, ed altri oggetti esotici che non si sarebbero potuti rivelare senza l'astronomia dei raggi X e sono stati e sono tuttora protagonisti delle storie di fantascienza. I risultati delle missioni delle sonde Pioneer e Voyager sulle lune di Giove e sulla fisica del pianeta gassoso hanno ispirato Arthur Clarke nella sua novella "2001, Odissea nello spazio". Marte non è più considerato un pianeta abitato - come lo avevano disegnato H. G. Wells nella sua "Guerra dei mondi" e Ray Bradbury nelle sue "Cronache da Marte" - perché le sonde Mariner e Viking hanno rivelato la realtà dell'ambiente marziano: non una civiltà che ha costruito canali, ma solo crateri, tempeste di polvere ed un'atmosfera rarefatta.

I.2.5. Propulsione a pressione di radiazione

E' il solito Tsiolkovsky che, nel 1920, per primo propone l'idea di utilizzare la pressione di radiazione come mezzo di propulsione. Poi Tsander scrive: "Per viaggiare nello spazio interplanetario sto lavorando sull'idea di utilizzare grandissimi specchi di materiale molto sottile...". Nel 1951 E. Wiley scrive "Clipper ships of space" una prima pubblicazione tecnica sulla vela solare. Verso la metà degli anni '60 la NASA inizia studi tecnologici per veicoli spinti da energia solare senza riferimento a particolari missioni, ma nel 1977-78 dà il compito al JPL di progettare un veicolo spinto da luce solare per un "rendez-vous" con la cometa Halley. Il progetto viene abbandonato perché la tecnologia implicata non è ritenuta matura. Nel 1989 si forma negli Stati Uniti una commissione per le Celebrazioni del 500-mo anniversario del viaggio di Colombo. E' indetta una gara per veicoli spaziali, di massa inferiore ai 500 kg, spinti dalla sola pressione di radiazione solare. L'obiettivo primario è di arrivare a Marte. Tra gli altri obiettivi c'è quello di verificare il concetto di propulsione a vela solare, di esplorare nuovi orizzonti e di stimolare la ricerca

scientifica. L'Aeritalia (ora Alenia Alcatel Space) presenta un progetto molto avanzato e, soprattutto, realizzabile che si qualifica fra i vincitori. Nel 1990, il programma è cancellato per mancanza di fondi. I principi fisici ed operativi della navigazione solare si riassumono nei punti di Tabella I.2.2.

Tabella 1.2.2: pressione della luce

La forza propulsiva è dovuta a riflessione della luce del Sole.
La luce solare, riflessa dalla vela, subisce una variazione di quantità di moto che si manifesta come una forza agente sulla vela.
Per valori di riflettività compresi fra 88% e 95% (ragionevolmente acquisibili) la forza propulsiva agisce essenzialmente lungo la perpendicolare della vela.
L'accelerazione risultante della vela dipende da 1) rapporto area-massa, 2) distanza dal Sole, 3) proprietà termo-ottiche della superficie, 4) orientamento della vela.
Nota: non è il vento solare (flusso d'elettroni e protoni ad alta energia) che spinge la vela. Il suo effetto propulsivo è molto minore, un fattore 1000-10000, di quello della luce.

La pressione solare ad una distanza di un'unità astronomica (circa 150 milioni di km) e per una vela perpendicolare al Sole è di $9 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$, cioè 0.09 miliardesimi d'atmosfera. Le accelerazioni caratteristiche sono di 0.2 mm/s^2 per una vela di 40 g/m^2 e di 1.3 mm/s^2 per una vela di 6 g/m^2 .

I maggiori problemi tecnici sono l'apertura della vela in orbita, la costruzione di "pennoni" di basso peso e rigidità adeguata, il controllo dell'orientamento della vela

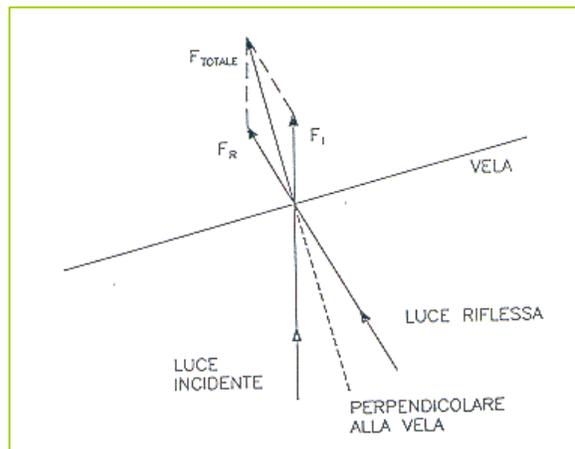


Figura I.2.2: Principio di propulsione di una vela solare.

I.3. Astronomia dallo spazio

I.3.1. Premessa

L'atmosfera terrestre è da sempre una barriera per gli astronomi. La radiazione dai corpi celesti che raggiunge il suolo è degradata per l'effetto della turbolenza atmosferica (Figura I.3.1) ed è selettivamente assorbita da processi atomici e/o molecolari che intervengono a varie altezze nell'atmosfera. In Tabella I.3.1, nella quinta e sesta colonna, sono date le altezze di penetrazione nell'atmosfera dei differenti tipi di radiazione e il meccanismo d'assorbimento. In tabella 1 sono anche date le bande spettrali di massima emissione e le relative temperature da parte di differenti tipi di gas e plasmi astrofisici (da colonna 1 a 4). Si può vedere che l'universo visibile da terra non è altro che una piccola frazione dell'universo reale.

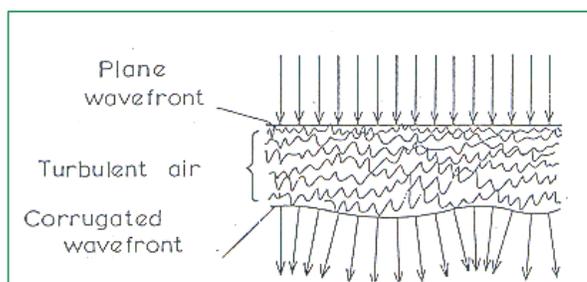


Figura I.3.1: la distorsione del fronte d'onda da parte dell'atmosfera è la causa principale della degradazione della radiazione (cattivo "seeing").

I.3.2. Astronomia da palloni

Fu l'astronomo francese Jules Jansen dell'Osservatorio di Meudon (Parigi) che nel 1874 per primo organizzò voli di palloni per far osservare, con uno spettroscopio, la luce del Sole nel tentativo di dimostrare che certe righe d'assorbimento sono prodotte dall'atmosfera terrestre. L'idea era corretta ma i tentativi di Jansen fallirono miseramente ed anche tragicamente: nel secondo volo due dei tre aeronauti morirono durante la salita a 10000 metri d'altezza.

Le osservazioni del Sole con il pallone furono continuate da un altro astronomo francese, il conte Aymar de la Baume-Pluvinel che realizzò uno spettrografo automatico a lastra fotografica. Nel 1889 il conte riuscì ad ottenere spettri solari e dimostrare, giustamente, che le intensità di alcune righe di assorbimento diminuiscono con l'altezza e che quindi tali righe sono di origine atmosferica.

Osservazioni da pallone sia con equipaggio umano che con strumentazione automatica furono abbastanza saltuarie fino agli anni 1950. Si ricordano negli anni 1930 le ascensioni ed altezze di oltre 20 km dei fratelli August e Jean Piccard per misure dei raggi cosmici.

Alla fine degli anni 50 si organizzarono le prime osservazioni sistematiche del Sole da pallone con un telescopio f/8 di 30 cm di diametro chiamato Princeton University Stratoscope I. Con lo Stratoscope si ottennero immagini molto dettagliate

delle macchie solari e della granulazione della fotosfera solare. Allo Stratoscope seguirono i Coronascope I e II per l'acquisizione tramite un coronografo di spettri della corona solare, e lo Stratoscope II, un telescopio f/4 di 86 cm di apertura per spettroscopia stellare infrarossa e per immagini. Dopo 8 voli, Stratoscope II si schiantò contro un albero danneggiando irreparabilmente lo specchio.

Tabella 1.3.1: spettro elettromagnetico, sorgente di radiazione, altezza di assorbimento nell'atmosfera e meccanismo di assorbimento.

$\lambda/h\nu$	Nome	T(K)	Sorgente	h (km)	Assorbimento
0.1 - 100 MeV	raggi γ	$> 10^8$	raggi cosmici, gas intergalattico	40	produz. coppie, scatter. Compton
1 - 100 KeV	raggi X	10^7	Dischi accrescimento, corone	80	Effetto fotoelettrico
10 - 1000 Å	XUV/EUV	10^6	nane bianche, gas interstellare	150	effetto fotoelettrico
1000 - 3000 Å	UV	10^5	stelle O	80	dissociaz./ionizz.molecolare (O ₂ , O ₃ , N ₂)
3000 - 8000 Å	Visibile	10^4	stelle A - G	-	-
10 - 100 μ m	NIR-FIR	10^3	polveri cosmiche, comete	<10	CO ₂ , H ₂ O, esis-ono finestre atmosferiche
1 mm - 10 m	onde millim. e microonde	1- 10^2	fondo di radiazione a 3 K	-	-
100 - 1000 m	onde corte, onde medie		Elettroni in campi magnetici	>90	onde riflesse dalla ionosfera

Da allora i palloni sono stati usati per astronomia a raggi X e, per l'ultravioletto e l'infrarosso. La base di lancio più importante è a Palestine (Texas); un'altra base importante è quella di Milo in provincia di Trapani da dove sono lanciati palloni che atterrano due giorni più tardi in Spagna.

La flessibilità nell'organizzazione di programmi scientifici con strumenti montati su palloni è stata dimostrata in occasione dell'esplosione della Supernova 1987a (nella Grande Nube di Magellano, LMC). Una delle misure importanti da acquisire per la comprensione del fenomeno "supernova" era la misura del flusso di radiazione gamma. A quell'epoca non c'erano satelliti con strumentazione per raggi gamma, e lo Shuttle che avrebbe dovuto portarne uno in orbita era fermo a seguito del disastro del Challenger. Si trasportò in tutta fretta lo strumento, del peso di due tonnellate, che sarebbe dovuto essere messo in orbita dallo Shuttle in Antartide per integrazione e lancio con un pallone; lo strumento volò ad un'altezza di 35 km per 72 ore e misurò il flusso di raggi gamma della Supernova.

I.3.3. Astronomia da razzi

Abbiamo già visto come immediatamente dopo la II guerra mondiale i razzi V-2 ed i loro derivati furono usati per osservazioni della radiazione cosmica. Di seguito furono stabiliti molti programmi scientifici con razzi sonda (sounding rockets). I più importanti razzi usati furono gli Aerobee che restarono in servizio fino 1985. Gli Aerobee potevano portare un carico scientifico di 270 kg ad un'altezza di 300 km. Da ricordare anche il canadese Black Brant, ancora operativo, che può raggiungere i 1600 km e l'inglese Skylark, a due stadi, che può raggiungere i 1000 km con un carico di 100 kg.

Rispetto ai satelliti, i razzi sonda hanno lo svantaggio di poter fare osservazioni solo per un tempo molto limitato (poche decine di minuti) e, di solito, gli strumenti hanno potenzialità minori.

Tuttavia hanno alcuni vantaggi che riassumiamo in Tabella 1.3.2.

Gli esperimenti con razzi hanno dato importanti contributi all'astronomia dello spazio: le prime immagini a raggi X del Sole, la prima stella che emette raggi X, i primi spettri ultravioletti delle stelle. Un esperimento tedesco su un razzo Skylark ha misurato il flusso X della Supernova 1987a.

1.3.4 Astronomia da satelliti.

L'idea dei telescopi in orbita venne nel 1923 a Hermann Oberth che scrisse dei vantaggi delle osservazioni dallo spazio e dalla Luna.

Tuttavia, quando i primi satelliti furono lanciati, gli astronomi non furono tra i primi a proporre l'uso per osservazioni dal cosmo. La ragione è che la progettazione e realizzazione di una missione spaziale è un'attività molto lunga, complessa e costosa che spesso necessita il coinvolgimento di grandi organizzazioni come la NASA o l'ESA, l'Agenzia Spaziale Europea. Ci sono molti ostacoli di natura tecnica, finanziaria e politica che si frappongono sin dall'inizio del progetto. Quando alla fine l'esperimento è pronto, comincia l'agonia del lancio, su cui i promotori della missione non hanno alcun controllo e che molto spesso è ritardato per motivi tecnici. Dopo il lancio, c'è l'agonia dei test di funzionamento. Ci sono mille cose che possono non funzionare: i pannelli solari che vibrano, gli schermi protettivi del sistema ottico che restano bloccati, perdite di corrente o scariche elettriche che impediscono il funzionamento dei circuiti e così via.

Tabella 1.3.2: esperimenti con razzi sonda

Alto rapporto costo/ritorno scientifico e di acquisizione di "know how". Anche piccoli gruppi o singoli laboratori possono realizzare l'esperimento, recuperarlo e farlo volare di nuovo dopo averlo migliorato.
Affidabilità. I razzi a combustibile solido hanno minimo tasso di fallimento. La strumentazione è recuperata e, se non ha funzionato, è fatta rivolare dopo averla migliorata.
Flessibilità. Ad esempio: nel marzo del 1970, 25 razzi di vario tipo furono lanciati prima, durante e dopo un'eclisse solare. Di questi 11 furono lanciati durante i sei minuti di durata dell'eclisse.
Semplicità. A causa del basso costo della missione e del breve tempo di volo, gli strumenti per i razzi sono semplici e facili da realizzare. Di solito si costruisce un prototipo e si fa volare; se fallisce, si modifica e si fa volare di nuovo.
Brevi tempi di progettazione, realizzazione e lancio. Per preparare e realizzare un esperimento da

satellite s'impiegano tipicamente 10 anni, cioè dieci volte più che un tipico esperimento con razzi.

È chiaro quindi che le motivazioni scientifiche devono essere molto forti per iniziare il progetto di una missione: si deve convincere le organizzazioni finanziatrici della necessità di esplorare il cielo in un dato intervallo di lunghezza d'onda e con un dato strumento. Inoltre a causa dei costi e dei tempi che sono in gioco, si deve pensare non ad uno strumento semplice e di sicuro funzionamento ma di scarse prestazioni ma piuttosto ad uno strumento o più strumenti sofisticati e complessi. Di solito la pianificazione scientifica di una missione segue uno schema standard. Inizialmente, un gruppo di astronomi ha un'idea su come verificare con osservazioni di un certo tipo una data teoria o su come acquisire una collezione di dati che possano globalmente verificarla. Una volta stabilita la tematica di ricerca, bisogna trovare evidenze sperimentali che supportino il progetto; per esempio tramite osservazioni con razzi o palloni di oggetti che irradiano sul range di lunghezza d'onda d'interesse. Se si è fortunati, le osservazioni confermeranno la teoria o almeno indicheranno la validità della strada seguita. Inoltre, è possibile, come spesso accade, che le osservazioni rivelino l'esistenza di altri fenomeni completamente inaspettati o nuovi tipi di sorgenti. In ogni caso, il passo successivo è l'allestimento di un piccolo satellite di monitoraggio che esplora il cielo alla ricerca di altre evidenze dei fenomeni in studio o di sorgenti e della loro distribuzione in cielo. Poiché una missione di monitoraggio ha capacità limitate, di solito si fa seguire una missione con un satellite più sofisticato per studi dettagliati. Questa missione può essere "dedicata", cioè con unico obiettivo lo studio del fenomeno o della determinata tipologia di sorgenti, oppure del tipo "osservatorio", cioè con una varietà di obiettivi per soddisfare una comunità scientifica più vasta. Una missione del tipo "osservatorio" opera, infatti, come un osservatorio astronomico. Un esempio di osservatorio spaziale è il satellite *IUE* (International Ultraviolet Explorer). Gli astronomi che vogliono utilizzarlo per le loro ricerche, presentano ad un'apposita commissione internazionale un progetto di ricerca, giustificato scientificamente nei dettagli e contenente tutte le specifiche tecniche per l'osservazione: visibilità della sorgente, tempo di esposizione, tipo di dati che si vogliono acquisire, etc.

Una volta approvato il progetto e fissata la data di osservazione, l'astronomo si reca nella stazione di "tracking" del satellite (la stazione europea è a Madrid) e compie le sue osservazioni puntando in tempo reale, attraverso il sistema di puntamento visibile sullo schermo del computer, la sorgente ed acquisendo i dati scientifici.

I.3.5 Sviluppo di un satellite astronomico

Come si procede nella pianificazione di una missione spaziale? Dopo la fase di ideazione di un progetto tecnicamente fattibile e scientificamente valido e superata la fase di approvazione da parte degli enti finanziatori, ha inizio la fase A. La fase A è uno studio dettagliato che determina la fattibilità del progetto. I risultati di tale studio sono la base per lo studio di fase B durante il quale si valutano gli aspetti ingegneristici e i costi e si approfondiscono gli aspetti scientifici facendo simulazioni

avanzate dei risultati previsti. Alla fine della fase B si danno le specifiche tecniche del satellite e del carico scientifico alle ditte o istituti che realizzeranno l'esperimento per l'emissione dei contratti. Quando la fase B è terminata inizia la fase di disegno finale (fase C) e di costruzione e test (fase D) del satellite e della strumentazione scientifica.

La fase D è molto complessa; si costruiscono e testano dapprima una serie di modelli. Quanto si apprende in questo processo serve per la realizzazione del modello di volo (FM, Flight Model). Di solito si costruiscono i modelli strutturali ed elettrico, per verificare la validità del disegno finale. Il modello elettrico è usato per facilitare lo sviluppo dei sottosistemi elettromeccanici definitivi: i motori, i rivelatori, i computers, le unità di memoria, i collegamenti elettrici. Il modello elettrico s'integra nel modello strutturale, che rappresenta lo strumento finale ma non è necessariamente completo in tutti i dettagli. Una delle funzioni più importanti del modello elettrico è di verificare l'interferenza fra i differenti sistemi elettrici. Per esempio: si verifica che, facendo funzionare un motore, non si abbiano effetti sul computer o sul sistema di acquisizione dati. Questo tipo di attività è lo studio di "Compatibilità elettromagnetica" (EMC) e serve a garantire che il satellite non produrrà segnali elettrici spuri che possono interferire e danneggiare il sistema di lancio o la strumentazione scientifica. Il modello elettrico serve anche per sviluppare le procedure che si useranno per verificare il satellite prima del lancio e testare le operazioni in volo. Il modello strutturale serve per verificare le proprietà del disegno meccanico.

Durante le fasi di test il modello strutturale sarà soggetto a vibrazioni più forti di quelle che si avranno durante la fase di lancio, in situazioni di termo-vuoto simili a quelle che s'incontrano nello spazio. Il modello strutturale è formato anche da "mass dummies" che sostituiscono componenti, costose o molto delicate come computers, componenti ottiche o elettroniche, etc. Queste parti sono sottoposte a test individuali prima dell'integrazione sul FM.

FM è la versione finale. Solo dopo che il progetto finale è stato verificato con i test dei modelli strutturali ed elettrico e approvato da esperti indipendenti, se ne comincia la realizzazione. Dopo la costruzione il FM è sottoposto ad una serie di test di qualificazione per verificare che è pronto per il lancio; poi è spedito per l'integrazione con il veicolo di lancio.