
L'UNIVERSO 'INVISIBILE': L'OSSERVAZIONE DEL CIELO CON I TELESCOPI SPAZIALI DI ULTIMA GENERAZIONE

CARMELO SGRÒ

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa

LUCA BALDINI

Dipartimento di Fisica "Enrico Fermi", Università di Pisa

1. Introduzione

Osservare il cielo e ammirare le stelle è sempre stato un gesto naturale per l'uomo. Sin da tempi antichi abbiamo trovato ispirazione nelle stelle, contemplandone il fascino e cercando di capirne la natura. Abbiamo presto imparato a sfruttarne le proprietà per scopi pratici, come guidare i navigatori nel tenere la rotta lontano dalla costa. Abbiamo raggruppato oggetti vicini, formando costellazioni, e oggetti simili per classificarne le proprietà e cercare di distinguerne tipi diversi.

A poco a poco siamo giunti alla conclusione che le stelle non sono tutte uguali – anche se ci sembrano tali a occhio nudo – e che in cielo ci sono tanti oggetti luminosi che non sono identificabili con esse, ma che hanno proprietà molto diverse. Ci siamo resi conto che il nostro occhio non era sufficiente e che c'è molto di più di quello che si vede in una chiara notte stellata. Un passo avanti degno di nota è stato costruire strumenti sempre più raffinati. Siamo passati dal telescopio con due lenti e quello con specchi di grandi dimensioni fino ai grandi osservatori moderni. La luce che percepiamo con gli occhi è solo una piccola parte della luce che riceviamo. I telescopi tradizionali ci sono sembrati insufficienti e abbiamo costruito, di conseguenza, strumenti sensibili ad altri tipi di luce, come onde radio, luce infrarossa o ultravioletta, raggi X e raggi gamma (γ). Importante è stato lanciare in orbita satelliti artificiali con cui far volare telescopi al di sopra dell'atmosfera che filtra e assorbe gran parte della radiazione che arriva a noi.

Col passare del tempo siamo stati in grado di sviluppare tecnologie e capacità sempre superiori, che hanno consentito di migliorare le osservazioni e acquisire una conoscenza sempre più profonda degli oggetti celesti. Tutto questo processo continua ancora oggi, con lo scopo fondamentale di soddisfare la naturale, innata, curiosità dell'uomo verso la natura.

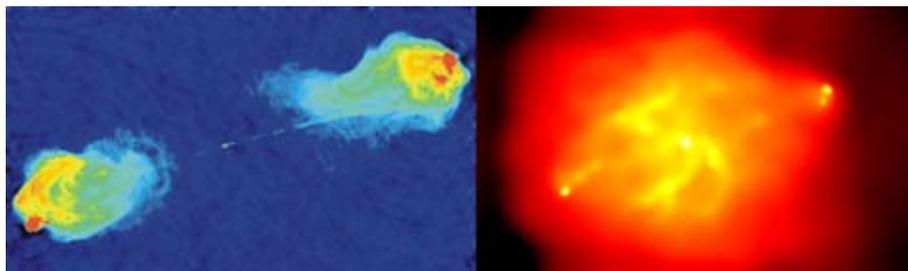


Figura 1. *Cygnus A*, a sinistra osservata tramite onde radio (VLA [1]), a destra tramite raggi X (Chandra [2]).

Nel corso di questo lavoro chiariremo meglio cosa è la luce, cosa significa compiere osservazioni con luce ‘non visibile’ e come si riesce a catturarla. Vedremo perché è necessario andare al di sopra dell’atmosfera e come funzionano questi telescopi spaziali. Infine ci concentreremo su un tipo di luce che siamo riusciti a sfruttare solo di recente: i raggi γ . Si capirà come lo sviluppo tecnologico ha avuto un ruolo chiave in questo campo.

Lo scopo del presente lavoro è quello di introdurre alla comprensione dei telescopi. Per questo motivo non entreremo nei dettagli di ogni strumento menzionato, nè potremo dare una descrizione di tutti gli osservatori in funzione. Cercheremo di fornire indicazioni e riferimenti in modo tale che un lettore interessato possa trovare facilmente spunti per approfondire la propria conoscenza.

2. La luce e le sue proprietà

Della luce abbiamo un concetto intuitivo, familiare a tutti, ma nel momento in cui ci chiediamo di cosa è fatta, le cose si complicano. Il motivo è che il comportamento della luce varia in base alle condizioni di osservazione e per tanto tempo, nei secoli passati, la sua natura è stata al centro di un acceso dibattito nella comunità scientifica. Solo durante il Novecento, con lo svilupparsi della meccanica quantistica, i fisici hanno ottenuto una risposta soddisfacente. Quello che ci interessa, per il momento, è avere un quadro generale delle proprietà della luce per capirne il comportamento in varie condizioni di osservazione.

Possiamo pensare alla luce come a un’onda che viaggia da una sorgente fino all’osservatore. Dal punto di vista matematico, un’onda è un oggetto abbastanza semplice, caratterizzato da pochi parametri ovvero l’ampiezza, la lunghezza d’onda (λ) e la velocità di propagazione. La frequenza (ν) di un’onda non è altro che il rapporto tra la velocità e la lunghezza d’onda. Per capire meglio questi concetti pensiamo a un esempio più familiare, anch’esso descritto da onde: il suono. La velocità di propagazione del suono dipende dal materiale in cui il suono viaggia: in aria è di 340 m/s. Fissato questo parametro, la lunghezza d’onda (o, equivalentemente, la frequenza) determina l’altezza del suono: a bassa frequenza sentiamo un suono grave, ad alta frequenza un suono acuto.

Ci sono differenze sostanziali tra la luce e il suono. La prima è che la luce non ha bisogno di un mezzo in cui muoversi, ma può viaggiare nel vuoto. Questo fenomeno è dovuto al fatto che il suono è legato al movimento degli atomi di un materiale, mentre la luce all’oscillazione del campo elettromagnetico. Per questo motivo, i fisici preferi-

scono chiamare la luce “radiazione elettromagnetica”. La seconda differenza importante è che la velocità di propagazione della luce nel vuoto è una costante fondamentale della fisica, chiamata convenzionalmente “ c ”, e vale 299.792 km/s.

La prova del comportamento ondulatorio della luce è connesso alla verifica sperimentale di fenomeni che sono caratteristici delle onde come diffrazione e interferenza. Questi fenomeni sono spiegabili tramite il principio di sovrapposizione: se due o più onde partono da sorgenti diverse, si può descrivere la radiazione in ogni punto dello spazio come la somma algebrica delle due onde. In realtà ci si è accorti come questo formalismo non sia l'unico modo di descrivere la luce: possiamo concepirla anche come composta da tanti piccoli pacchetti di energia, singoli quanti di radiazione elettromagnetica, che chiamiamo “fotoni” e si comportano come particelle elementari. A essi possiamo associare un'energia che è legata alla frequenza dell'onda tramite la formula $E = h\nu = hc/\lambda$, ove la costante di proporzionalità h è detta costante di Planck. L'idea che la luce possa avere un'energia quantizzata proporzionale alla frequenza è dovuta a Einstein e gli è valso il premio Nobel nel 1921, cfr. [3].

Ci proponiamo a questo punto di esplorare in maniera sistematica la luce in base alla sua frequenza. Ci domandiamo come si comportano onde di frequenza diversa, come vengono classificate e come possono essere utilizzate per esplorare il cielo.

L'insieme di tutti i valori possibili per le frequenze viene chiamato lo “spettro” della radiazione elettromagnetica (Figura 2).

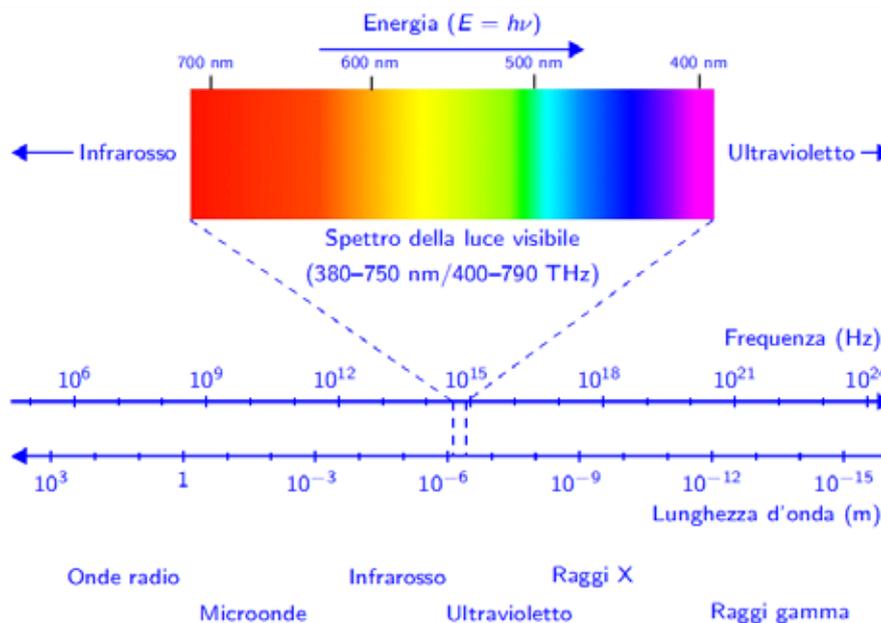


Figura 2. Rappresentazione dello spettro elettromagnetico. Le scale orizzontali indicano le frequenze e lunghezze d'onda corrispondenti alle bande descritte in basso. La banda della luce visibile è espansa per evidenziare la corrispondenza tra frequenza e colore della luce.

Siamo naturalmente abituati allo spettro visibile dall'occhio umano. Dal rosso al violetto, abbiamo familiarità con i vari colori dell'arcobaleno, in realtà a ogni suo colore è possibile associare in maniera univoca una frequenza (o un intervallo di frequenza) delle

onde elettromagnetiche. I colori, d'altra parte, non sono altro che il modo utilizzato dal nostro cervello per misurare e classificare le onde luminose tramite la loro frequenza.

È possibile ravvisare, di contro, onde di luce anche a lunghezze d'onda impossibili da vedere direttamente ad occhio nudo. In teoria non ci sono limiti allo spettro, ovvero possono esistere onde di lunghezza infinitamente piccola o infinitamente grande. Nella pratica i limiti sono legati dalla capacità della nostra tecnologia di osservare o produrre onde di lunghezza troppo piccola o troppo grande. Nonostante ciò, lo spettro della radiazione utile è estremamente vasto e si estende su oltre 20 ordini di grandezza. Per darne un'idea, le lunghezze d'onda vanno dalle decine o centinaia di km (onde radio VLF) fino a meno di un femtometro (10^{-15} m) dove il comportamento della luce è controllato dalla fisica quantistica, come vedremo nel § 4. La banda di luce 'visibile', ovvero quella a noi familiare, è soltanto una fettina molto sottile dello spettro nella sua zona centrale, da circa 760 nm (luce rossa) a circa 380 nm (luce violetta). Cominciamo adesso a esplorare lo spettro e a classificare i tipi di onde in base alla loro frequenza. Bisogna comunque considerare che il confine tra due classi (bande) diverse non è sempre netto ed è spesso legato a convenzioni [4]. Può perciò variare in base alle applicazioni.

Le onde a lunghezza relativamente alta sono le onde radio, delle quali abbiamo un concetto familiare in quanto sono parte della nostra vita quotidiana come mezzo per trasmettere informazioni. Le onde radio sono elettromagnetiche esattamente come la luce visibile, ma sono caratterizzate da lunghezze d'onda superiori al millimetro circa (ovvero frequenze inferiori a circa 300 GHz). Con il termine "onde radio" si intende in realtà un intervallo molto ampio di possibilità. Di conseguenza esistono varie convenzioni che, in base alle diverse applicazioni, classificano le onde radio in diverse bande [5]. Ad esempio, le trasmissioni televisive analogiche vengono effettuate su bande denominate VHF (Very High Frequency, frequenze da 30 a 300 MHz) e UHF (Ultra High Frequency, frequenze da 300 MHz a 3.0 GHz). Le radio FM invece trasmettono a frequenza tra 87.5 ed i 108 MHz. Alcuni sistemi di comunicazione, come quelli con i sottomarini, utilizzano frequenze ancora più basse, tra i 3 ed i 300 Hz.

Salendo a frequenze più elevate, tra circa 1 e 300 GHz, troviamo le microonde. Si tratta sempre di onde radio ma, per via delle loro caratteristiche peculiari, si tende a considerarle una categoria a parte. Le microonde hanno molteplici applicazioni nella moderna tecnologia. Molti sistemi di telecomunicazione sono basati su microonde: i telefoni cellulari GSM (0.9 e 1.8 GHz in Europa) o UMTS (1.9 o 2.1 GHz), il Wi-Fi (2.4 o 5 GHz, standard IEEE 802.11), le TV satellitari (4-8 GHz) per la trasmissione di dati con satelliti artificiali (che utilizzano vari sistemi da pochi GHz fino ad oltre 30 GHz) ecc. I forni a microonde che abbiamo in casa emettono onde a 2,45 GHz che scaldano le molecole (soprattutto d'acqua) nei cibi.

L'intervallo tra le microonde e la luce visibile è riempito dalla radiazione infrarossa – letteralmente: "sotto il rosso". Si tratta di radiazione di frequenza compresa tra circa 300 GHz e 430 THz, ovvero con una lunghezza d'onda tra 1 mm e circa 700 nm. Tra le sue applicazioni pratiche ci sono sistemi di comunicazione, come nei telecomandi

per televisori o tra computer portatili, telefoni cellulari e altri apparecchi elettronici. La radiazione infrarossa è spesso associata alla radiazione termica poiché quest'ultima è legata all'agitazione ("termica", appunto) delle molecole all'interno di un oggetto (radiazione di corpo nero) che è tipicamente emessa in questa banda. Per questo motivo, la radiazione infrarossa è utilizzata nelle videocamere termiche, ad esempio per evidenziare differenze di temperatura tra varie zone di un soggetto.

Per quanto riguarda la luce visibile, a frequenza tra 400 e 790 THz, l'esperienza comune è sufficiente a descrivere questo tipo di radiazione. Lo spettro della radiazione e la sua associazione con i colori sono mostrati in figura 2. È bene notare che non tutti i colori che siamo in grado di distinguere sono associati a una determinata frequenza dello spettro. Alcuni di essi, come il marrone o il rosa, sono ottenuti dalla sovrapposizione di varie lunghezze d'onda. Per questo motivo nei *display* a colori dei televisori o dei computer si utilizzano solo pochi colori (rosso, verde, blu secondo lo standard RGB) per comporre tutte le varie possibilità.

A frequenze appena superiori a quelle visibili troviamo l'ultravioletto o UV ("oltre il violetto", essendo questa la frequenza più elevata dello spettro visibile), con lunghezze d'onda tra i 400 e i 100 nm che corrispondono alle dimensioni tipiche di microorganismi come i virus. Anche questa banda viene convenzionalmente suddivisa in varie sottoclassi. Sentiamo spesso parlare di raggi UVA e UVB a proposito delle protezioni dai raggi solari: non sono altro che classificazioni in base alla lunghezza d'onda, rispettivamente negli intervalli 400-315 nm e 315-280 nm. Altre classificazioni, non legate all'effetto sulla salute umana, distinguono gli ultravioletti in vicini (*Near*, 400-300 nm), medi (*Middle*, 300-200 nm), lontani (*Far*, 200-121 nm). Vengono inoltre chiamati "*Vacuum*" UV quelli tra i 200 e i 10 nm, che vengono fortemente assorbiti dalle molecole di ossigeno presenti in aria e che quindi viaggiano senza problemi solo nel vuoto. Le applicazioni comuni dei raggi ultravioletti sono molteplici grazie alla capacità di produrli con apposite lampade o diodi e grazie alla capacità di numerosi materiali di assorbirli. Ad esempio, vengono utilizzati per la disinfezione di cibo, aria o acqua, dal momento che molti batteri e virus non sopravvivono all'esposizione con raggi UV intensi; vengono inoltre utilizzati per analisi scientifiche, per identificare i materiali in base alle loro proprietà di assorbimento/emissione. Anche le comuni lampare fluorescenti utilizzano luce ultravioletta, prodotta tramite l'eccitazione di un gas, che viene assorbita da un materiale fluorescente e trasformata in luce visibile.

A lunghezze d'onda sempre più corte troviamo i raggi X. In merito a essi è comodo utilizzare l'energia associata a una certa frequenza tramite la formula $E=h\nu=hc/\lambda$ ed in particolare un unità di misura, l'elettronvolt eV, che corrisponde all'energia guadagnata da un elettrone che si muove attraverso una differenza di potenziale di 1 Volt. Per i raggi X, le lunghezze d'onda vanno da circa 10 a circa 0.01 nm e le energie corrispondenti vanno da circa 120 eV fino a circa 120 keV (kilo-eV, ossia 1000 elettronvolt). Di solito si classificano come "soffici" se la loro energia è inferiore a circa 10 keV, oppure "duri", al di sopra di tale valore. Le lunghezze d'onda di queste radiazioni sono confrontabili

con le grandezze tipiche degli atomi, e inferiori quindi alle distanze tra questi. I raggi X, perciò, interagiscono e vengono assorbiti solo quando ‘urtano’ i singoli atomi. La materia, nel loro cammino, rappresenta uno spazio prevalentemente vuoto con pochi ‘bersagli’ rarefatti (gli atomi, appunto) con cui scontrarsi. Questo è il motivo per cui è una radiazione molto penetrante capace di attraversare sottili strati di materiale senza essere assorbita.

Le applicazioni dei raggi X sfruttano soprattutto questa caratteristica, ad esempio per osservare l’interno di corpi come nella diagnostica medica o nei controlli di bagagli negli aeroporti, oppure per studiare come si dispongono gli atomi all’interno di un cristallo.

È opportuno notare che la radiazione con lunghezze d’onda inferiore a circa 100 nm ($E > 12$ eV) è ‘ionizzante’, ovvero è in grado di strappare via elettroni dagli atomi lasciando ioni carichi. Tali ioni possono essere molto reattivi chimicamente e cambiare la struttura chimica del materiale circostante. Per questo motivo, quando le reazioni coinvolgono tessuti viventi, la radiazione ionizzante può produrre danni biologici.

La radiazione con energia maggiore di quella dei raggi X è chiamata “radiazione gamma” (γ). È chiaro che non c’è limite superiore all’energia per questa banda; inoltre, il confine tra raggi X e gamma è piuttosto mal definito e dipende dal tipo di applicazioni. I raggi gamma si comportano in maniera simile ai raggi X. Con una lunghezza d’onda ancora più piccola, ‘vedono’ i singoli nuclei degli atomi quando attraversano la materia e sono ancora più penetranti: sono infatti in grado di rompere i nuclei generando reazioni complesse, governate dalla fisica quantistica. I raggi gamma sono spesso prodotti nel decadimento nucleare di elementi radioattivi, ma esistono anche altri modi di produrli, in maniera artificiale. Le loro applicazioni sono spesso di tipo diagnostico: ad esempio, i container per il trasporto delle merci vengono spesso ispezionati tramite raggi gamma che consentono di fotografarne il contenuto. Si utilizzano i raggi gamma anche in medicina nucleare, per studi diagnostici come la PET [6] o per il trattamento di determinate patologie.

Come spiegato in precedenza, non c’è un limite superiore alle energie possibili per la luce. L’intervallo di quelle accessibili è però limitato dalle nostre capacità tecnologiche. Vedremo, nel prossimo paragrafo, quali sono le tecnologie che utilizziamo per sfruttare tutta la radiazione nell’osservazione del cielo.

3. La rivelazione delle onde elettromagnetiche

Siamo appena venuti a conoscenza di quanto lo spettro della radiazione elettromagnetica sia ampio. Si è rivelato utile classificare la luce in bande secondo la sua frequenza e ci siamo resi conto di come la radiazione in bande diverse abbia proprietà molto diverse. In particolare si comporta in modo molto differente quando incontrano la materia: le onde radio generano segnali elettrici nei conduttori, la radiazione visibile viene assorbita o riflessa dalle superfici, i raggi X attraversano spessori sottili e interagiscono con i singoli atomi. Se si vuole quindi utilizzare tutto lo spettro per osservare il cielo,

dobbiamo costruire telescopi molto diversi, ognuno in grado di operare in una banda relativamente ridotta, e combinare le informazioni dei vari strumenti.

C'è ancora un'altra difficoltà da superare: l'atmosfera terrestre. Essa infatti assorbe e filtra la maggior parte della radiazione che arriva sulla Terra. È una protezione essenziale per gli esseri viventi, in quanto alcuni tipi di radiazione sono estremamente pericolosi per gli esseri viventi, ma è allo stesso tempo un limite enorme per l'esplorazione dell'Universo. Solo le onde radio e la luce visibile sono in grado di attraversare l'atmosfera senza subire grandi attenuazioni (Figura 3). Per tutte le altre bande è necessario spostare i telescopi al di sopra dell'atmosfera, su satelliti artificiali.

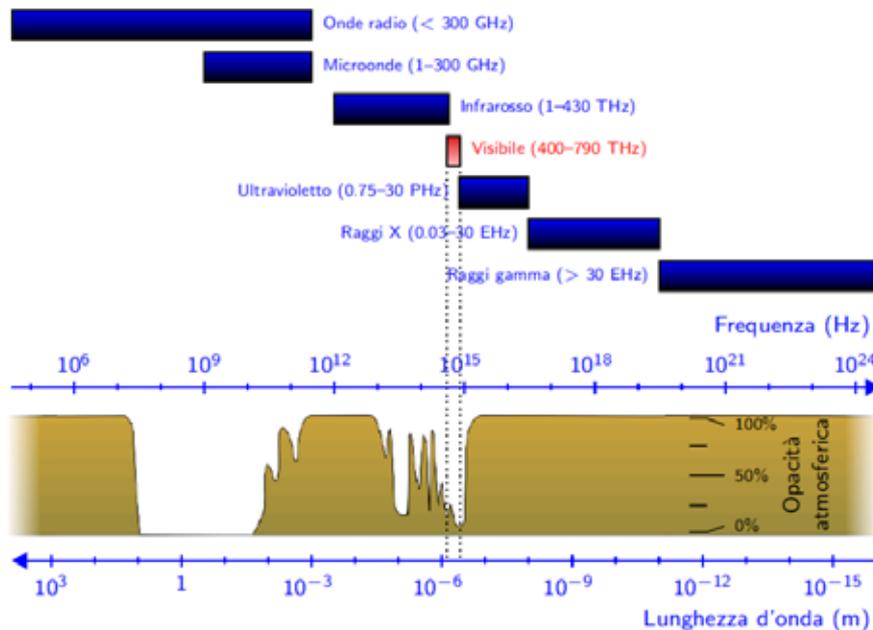


Figura 3. Rappresentazione dell'opacità dell'atmosfera terrestre in funzione dello spettro elettromagnetico.

Nell'osservazione del cielo utilizzando onde radio possiamo quindi posizionare i nostri telescopi a terra. Inoltre, rivelare onde radio è relativamente semplice in quanto si utilizza la tecnologia delle comuni antenne. L'astronomia radio è perciò quella che, dopo l'astronomia ottica, ha goduto di maggior sviluppo. Esistono molteplici radiotelescopi attualmente operativi, i quali sono in genere formati da una antenna parabolica ('disco') che raccoglie i segnali radio e li invia a un ricevitore. Possono operare singolarmente o combinando i segnali provenienti da diverse antenne. Il più grande radiotelescopio a singola antenna è quello di Arecibo, in Puerto Rico, che utilizza un disco di ben 305 metri di diametro costruito all'interno di un avvallamento naturale; è entrato in funzione nel 1963 e da allora raccoglie dati nella banda 50 MHz – 10 GHz. In Italia è in fase di completamento un grande radiotelescopio in Sardegna, a circa 35 Km da Cagliari, denominato SRT *Sardinia Radio Telescope*, [7]. Il suo specchio primario avrà un diametro di 64 metri e raccoglierà dati nella banda tra 0.3 e 100 GHz.

Insieme ai telescopi a terra, diverse missioni spaziali sono state concepite per osser-

vare il cielo tramite onde radio e in particolare tramite microonde. Il primo satellite dedicato è stato COBE (*Cosmic Background Explorer*) [8], lanciato nel 1989 con lo scopo di misurare la radiazione cosmica di fondo nelle microonde (o CMB, *Cosmic Microwave Background*). COBE ha scoperto che questa radiazione segue lo spettro di corpo nero con una temperatura di 2.73 kelvin e ha mostrato delle variazioni spaziali nella sua distribuzione che sono stati il principale argomento di studio delle successive missioni. La missione WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) [9] è stata lanciata nel 2001 proprio con questo scopo e ha raccolto dati fino al 2010 in 5 bande diverse nell'intervallo tra circa 20 e 100 GHz. Per schermare gli strumenti dalle emissioni di Sole, Terra e Luna, il satellite è stato posto in un'orbita molto particolare, intorno al punto di Lagrange L2 del sistema Terra-Sole ovvero a 1,5 milioni di km circa dalla Terra (~ 4 volte la distanza Terra-Luna).

Per osservare la radiazione infrarossa è invece necessario non solo spostarsi al di sopra dell'atmosfera, ma anche allontanarsi da ogni possibile oggetto 'caldo' che, emettendo radiazione infrarossa, andrebbe a confondere i deboli segnali dei corpi celesti. Tra questi oggetti c'è la Terra stessa. Per questo motivo lo *Spitzer Space Telescope* [10] è stato posto in un'orbita intorno al Sole che quindi segue la Terra nella sua orbita e a poco a poco si allontana da essa. Lanciato nel 2003, ha uno specchio primario di 85 cm di diametro che deve essere raffreddato a 5.5 kelvin per sopprimere la sua emissione termica.

Sui telescopi ottici non ci soffermeremo, dal momento che sono studiati e utilizzati da più di quattro secoli. Sebbene l'atmosfera sia trasparente nello spettro visibile, essa rappresenta comunque un problema in quanto la sua turbolenza deforma il fronte d'onda e distorce l'immagine. Le possibili soluzioni comprendono la scelta accurata del sito di osservazione, generalmente ad alta quota e con condizioni atmosferiche stabili, o l'utilizzo di ottiche adattive che modificano in maniera attiva la superficie dello specchio e correggono le distorsioni. Porre il telescopio in orbita è sempre una soluzione valida, ma estremamente costosa. L'esempio più famoso è il Telescopio Spaziale Hubble, messo in orbita nel 1990 e ancora attivo, grazie a ben 5 missioni di servizio che hanno sostituito i componenti guasti o deteriorati. Lo specchio primario di Hubble è di 2.4 metri, relativamente piccolo se consideriamo che i grandi osservatori a terra hanno specchi fino a 8-10 metri di diametro, ma, grazie alle sue elevate prestazioni, ha riscosso un enorme successo scientifico. Il telescopio Hubble è inoltre in grado di osservare la luce ultravioletta tra 115 e 320 nm di lunghezza d'onda, normalmente assorbita dall'atmosfera terrestre.

Per osservare frequenze maggiori, ovvero raggi X, sono richieste tecniche completamente diverse. Essendo ionizzanti, i raggi X vengono assorbiti dagli atomi che incontrano e non possono essere deviati da specchi o lenti come la luce visibile. Inoltre, è necessario portare gli strumenti al di sopra dell'atmosfera che assorbe tutta la radiazione ionizzante, anche a energie superiori ai raggi X, proveniente dal cosmo.

L'astronomia tramite raggi X si è quindi sviluppata di pari passo con la tecnolo-

gia spaziale. I primi strumenti sono stati semplici contatori di radiazione ionizzante lanciati con razzi, ma il grande passo avanti è stata l'invenzione di sistemi in grado di focalizzare i raggi X. Essi possono infatti essere deviati se incidono con piccoli angoli (minori di $\sim 2^\circ$) su superfici metalliche. Mettendo insieme vari fogli si riescono a focalizzare i raggi X nell'intervallo di energia tra 1 e circa 10 keV in maniera efficiente (Figura 4).

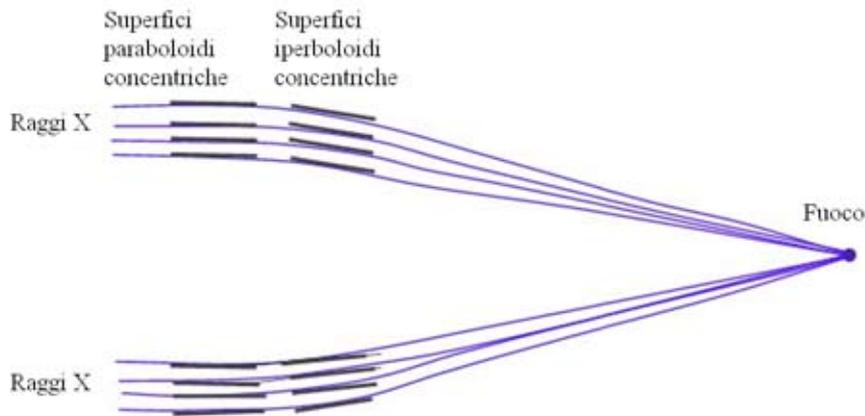


Figura 4. Schema di un'ottica per raggi X.

Le ottiche per raggi X consentono di ottenere risoluzioni angolari estremamente elevate fino a circa 1 secondo d'arco. L'esempio più famoso di telescopio per raggi X è sicuramente il telescopio spaziale Chandra [11], lanciato nel 1999 e ancora in funzione. Il suo specchio ha un diametro di 1.23 metri e una distanza focale di 10 metri circa. Si trova su un'orbita molto ellittica che, con un apogeo di 133000 km, gli consente di essere oltre le fasce di radiazione intorno alla Terra che ne disturberebbero gli strumenti. In questo modo, Chandra è in grado di compiere fino a 55 ore di osservazioni continue e ha una frazione di tempo utile per le ricerche molto maggiore di quella che avrebbe in un'orbita tipica di qualche centinaio di chilometri.

Le ottiche per raggi X perdono efficienza sopra i 10 keV, ma esistono tecnologie che permettono di estendere l'intervallo di energia utile a circa 80 keV e che verranno utilizzate nei prossimi telescopi. A energie superiori, dove non siamo in grado di focalizzare la radiazione, si usano tecniche diverse, come ad esempio dei collimatori che selezionano un angolo di vista molto piccolo in cui misurare l'intensità della radiazione. È possibile sfruttare altresì i processi completamente diversi come la 'produzione di coppia' (che vedremo nel prossimo paragrafo) tramite le tecnologie sviluppate per la fisica delle particelle fondamentali. Un esempio è il *Large Area Telescope* (LAT) a bordo dell'osservatorio spaziale Fermi [12], che è stato lanciato nel 2008 e fornisce dati nella banda tra 20 MeV (mega-eV, un milione di elettronvolt) e circa 300 GeV (giga-eV, un miliardo di elettronvolt). Insieme al LAT, l'osservatorio ha a bordo un secondo strumento chiamato *Gamma-ray Burst Monitor* (GBM) che invece opera nella banda tra 10 keV e 30 MeV circa ed è dedicato allo studio di particolari fenomeni astrofisici in cui

lampi di raggi gamma appaiono nel cielo all'improvviso e durano per pochi secondi o minuti.

La varietà di strumenti e di tecniche utilizzate oggi per esplorare il cielo si è dimostrata cruciale per scoprire sempre nuovi fenomeni che avvengono nell'Universo e per capire come sono fatti e come si comportano gli oggetti celesti, per poi classificarli in tipologie diverse. Per comprendere l'Universo bisogna guardarlo nel suo insieme, perché la radiazione luminosa che osserviamo porta informazioni diverse in base alla sua frequenza. Per fare qualche esempio, nelle microonde studiamo soprattutto la radiazione cosmica e l'origine dell'Universo, ma anche la distribuzione di materia nella galassia; nella radiazione visibile o ultravioletta riusciamo a distinguere bene la forma e l'estensione dei vari oggetti; la radiazione ad alta frequenza invece ci dà informazioni su quanta energia viene emessa e sui processi non termici che avvengono. Lo stesso corpo celeste può apparire il modo molto diverso a lunghezze d'onda diverse, come mostrato in Figura 5 per la nebulosa del Granchio.

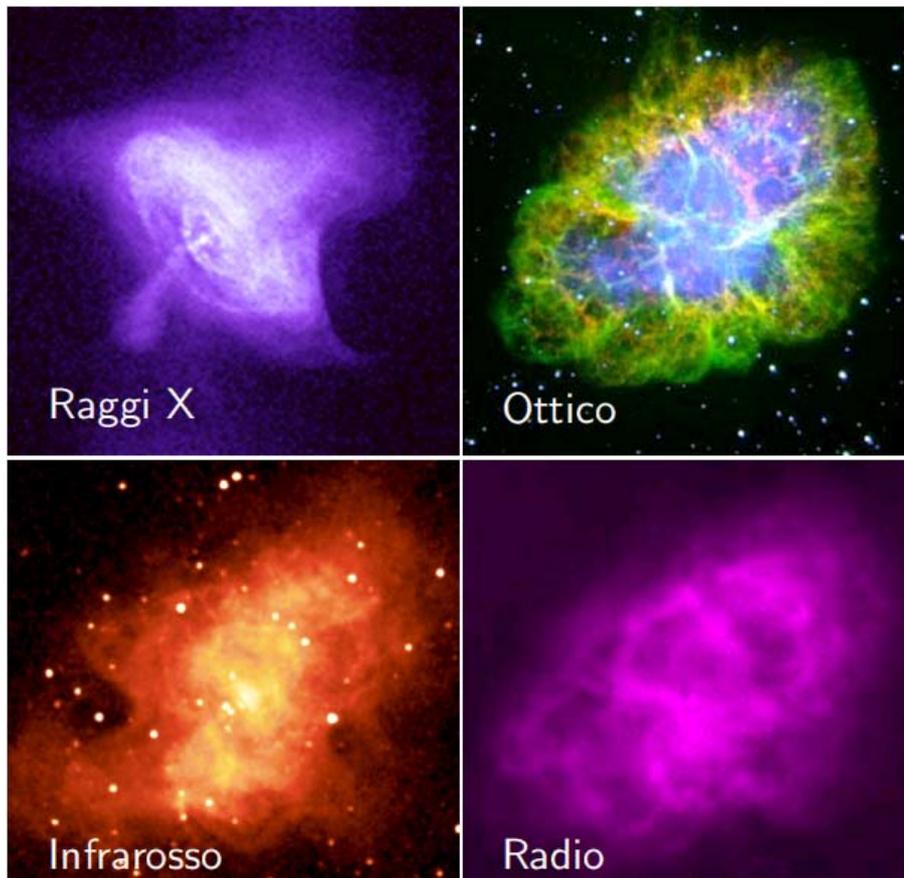


Figura 5. Nebulosa del Granchio osservata in quattro diverse bande della radiazione elettromagnetica.

4. Astronomia a raggi gamma: il *Large Area Telescope*

A partire dal Seicento, si è dibattuto a lungo sulla natura della luce, se si trattasse di un'onda o di una particella. Nei §§ 1-3 abbiamo utilizzato le onde per spiegare le

caratteristiche della luce e descriverne il comportamento. Ci siamo però resi conto che quando la lunghezza d'onda è confrontabile con la lunghezza caratteristica dei costituenti della materia, atomi e nuclei di atomi, la descrizione ondulatoria della luce non è più adeguata. Considerare un fascio luminoso come formato da tante particelle, i fotoni, fornisce una descrizione più accurata dei fenomeni che osserviamo. La fisica quantistica ci viene incontro e ci mostra come gli stessi fenomeni possono essere descritti utilizzando sia onde che particelle. In realtà la distinzione tra queste due 'nature' della luce non è netta, ma solo formale, ed entrambe possono essere utilizzate per comprendere i fenomeni che osserviamo.

Risulta naturale utilizzare i fotoni per capire perché i raggi X e γ siano in grado di attraversare alcuni materiali senza essere fermati: è come se, nel loro percorso, le particelle di luce vedessero un enorme spazio vuoto con atomi sparsi e ben separati tra loro. Le interazioni con gli atomi sono possibili solo quando i fotoni passano abbastanza vicino ai loro bersagli. La probabilità di interazione – quindi lo spessore che possono attraversare – è proporzionale al numero di possibili bersagli, ovvero alla densità del materiale.

Quando i fotoni incontrano la materia possono subire processi diversi in base alla loro energia e alle proprietà della materia che incontrano (densità, numero atomico, ...). Per i raggi X, il fenomeno dominante è l'effetto fotoelettrico: i fotoni sono assorbiti dagli atomi e ne strappano via elettroni. Per i raggi γ altri effetti diventano importanti, come l'effetto Compton e la produzione di coppia che diventa dominante ad energie superiori a qualche decina di MeV. In quest'ultimo caso, il fotone interagisce direttamente con il nucleo atomico e converte la sua energia in due particelle elementari cariche, un elettrone (e^-) e la sua antiparticella, il positrone (e^+). Questo è il meccanismo alla base dei telescopi per raggi gamma di alte energie come il LAT, che abbiamo incontrato nel § 3.

Vediamo ora come funziona il LAT più in dettaglio. Uno schema del suo funzionamento è mostrato in Figura 6. I fotoni incidenti convertono in coppie elettrone-positrone all'interno di un componente del telescopio, il tracciatore. Per facilitare la conversione vengono impiegati dei piani di materiale ad alta densità ed alto numero atomico – nel caso del LAT si è scelto il tungsteno. Tra i piani di conversione vengono inseriti dei rivelatori di particelle cariche che sono in grado di registrare il punto in cui l'elettrone (o il positrone) è passato. (È bene notare che le particelle cariche si comportano in modo molto diverso dai fotoni quando attraversano la materia. Le prime, infatti, perdono energia gradualmente ionizzando gli atomi intorno al loro percorso.)

Esistono molti tipi di rivelatori di particelle in grado di 'sentire' il campo elettrico degli ioni così prodotti e segnalare il punto di passaggio delle particelle. Nel LAT sono stati utilizzati rivelatori basati sul silicio cristallino, una tecnologia simile a quella dei componenti elettronici. Combinando l'informazione dei singoli rivelatori si può ricostruire il percorso delle particelle cariche e quindi la direzione di provenienza

del fotone. Per misurarne l'energia invece è necessario assorbire la coppia elettrone-positrone. A questo provvede un calorimetro posto al di sotto del tracciatore, formato da una serie di cristalli di ioduro di cesio. Tutto il telescopio è circondato da uno schermo di anticoincidenza che serve a discriminare i fotoni dai raggi cosmici. Questi ultimi sono particelle cariche (soprattutto protoni) naturalmente presenti in orbita e sono molto più abbondanti dei fotoni. Essi possono essere identificati ed isolati perché lasciano segnale nello schermo esterno, mentre i fotoni lo attraversano indisturbati.

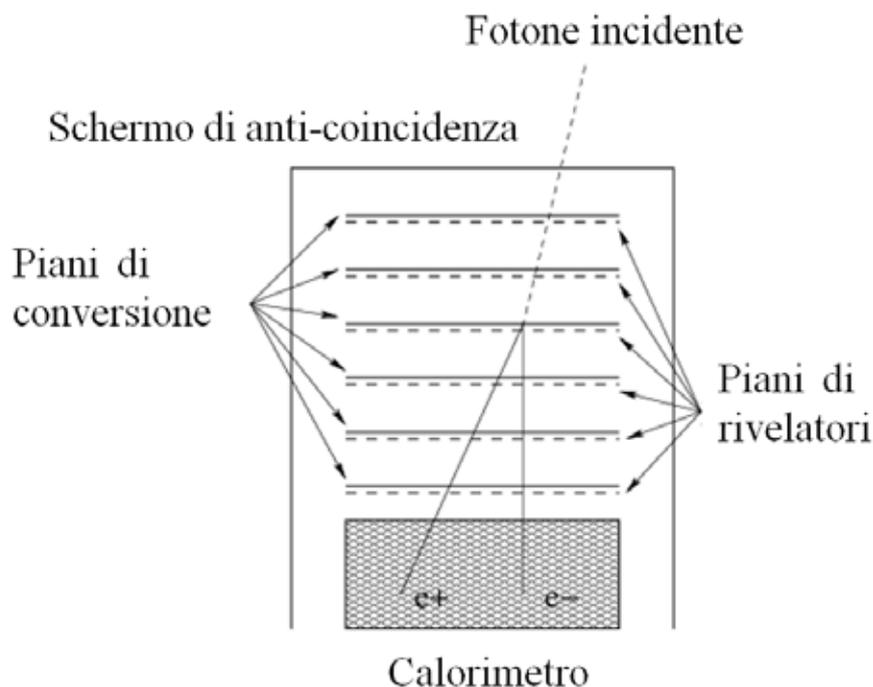


Figura 6. Schema di funzionamento del LAT.

Il *Large Area Telescope* è un progetto della NASA ed è stato concepito e costruito da un team internazionale formato da istituti di ricerca e università di USA, Italia, Francia, Giappone e Svezia. L'Italia ha avuto la grande responsabilità della costruzione del tracciatore, sotto la responsabilità dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). I componenti del tracciatore sono mostrati in Figura 7. Il mattone fondamentale è il singolo rivelatore di particelle, chiamato SSD (*Silicon Strip Detector*). Esso viene assemblato sulle due facce di un supporto meccanico composto da fibra di carbonio su una struttura di alluminio a nido d'ape. Sullo stesso supporto vengono montati i piani di tungsteno e le schede elettroniche di lettura dei rivelatori. Gli elementi così formati, detti "Tray", vengono impilati in una torre in modo da formare strati successivi di convertitori e rivelatori. L'intero strumento è formato da una griglia 4x4 di torri.



Figura 7. Componenti del tracciatore del LAT durante l'assemblaggio dei moduli. In alto a sinistra un singolo SSD, in alto a destra un Tray completo con i sensori visibili su un lato. In basso a sinistra un dettaglio di un Tray in cui è visibile la scheda elettronica di lettura. In basso a destra i Tray sono impilati nella torre e si stanno montando i cavi prima di chiudere i pannelli laterali.

L'integrazione finale di tutti i moduli e del satellite è stata fatta negli Stati Uniti. In figura 8 è mostrato il LAT con la griglia delle 16 torri ben visibile e il satellite completo poco prima del lancio, avvenuto l'11 giugno 2008 da Cape Canaveral in Florida, con un razzo Delta II. La sua orbita è quasi circolare a un'altitudine di circa 565 km, con 25.6° di inclinazione. A differenza di molti telescopi, il LAT ha un enorme campo di vista, pari a 2.4 sr, e funziona in modalità 'survey', ovvero punta sempre in direzione quasi opposta a quella della Terra e osserva tutto il cielo in 3 ore circa (2 orbite). La fase di presa dati è cominciata ufficialmente il 4 agosto 2008 e da allora continua senza interruzioni.

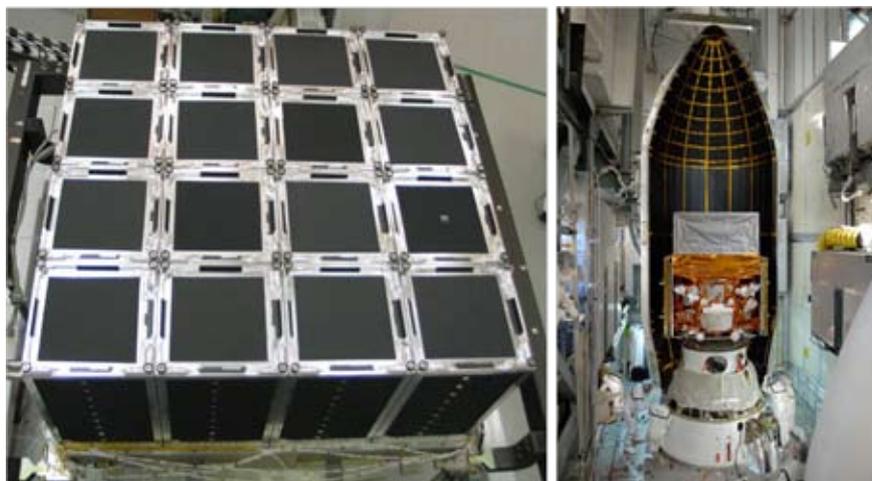


Figura 8. A sinistra il LAT durante la fase finale di integrazione, con le 16 torri del tracciatore chiaramente visibili. A destra il telescopio spaziale Fermi, con a bordo il LAT, integrato sul razzo poco prima del lancio.

I dati raccolti dal LAT sono pubblici, a disposizione dell'intera comunità scientifica, e accessibili tramite internet [13]. In questi anni il LAT ha contribuito a importanti scoperte scientifiche. A titolo di esempio, sono state catalogate più di 1800 sorgenti astrofisiche che emettono raggi γ , circa la metà delle quali sono nuclei galattici attivi in cui si ritiene che un buco nero supermassivo sia responsabile dell'emissione ad alta energia.

Una classe di sorgenti molto interessanti sono le Pulsar, ritenute stelle di neutroni in rotazione, la cui emissione γ è periodica ed è legata al periodo di rotazione della stella. Il LAT ha portato il numero di Pulsar gamma note da 7 a più di 100 consentendo uno studio sistematico delle loro proprietà. Infine, il LAT sta producendo mappe dettagliate dell'emissione gamma diffusa, ovvero non proveniente da singole sorgenti, ma dall'interazione di raggi cosmici nel materiale interstellare nella nostra Galassia. Una mappa di come appare il cielo ad altissime energie è mostrata in figura 9. Si notano facilmente alcune sorgenti puntiformi particolarmente intense, ma la caratteristica più evidente è l'emissione diffusa che ha la sua massima intensità sul piano galattico.

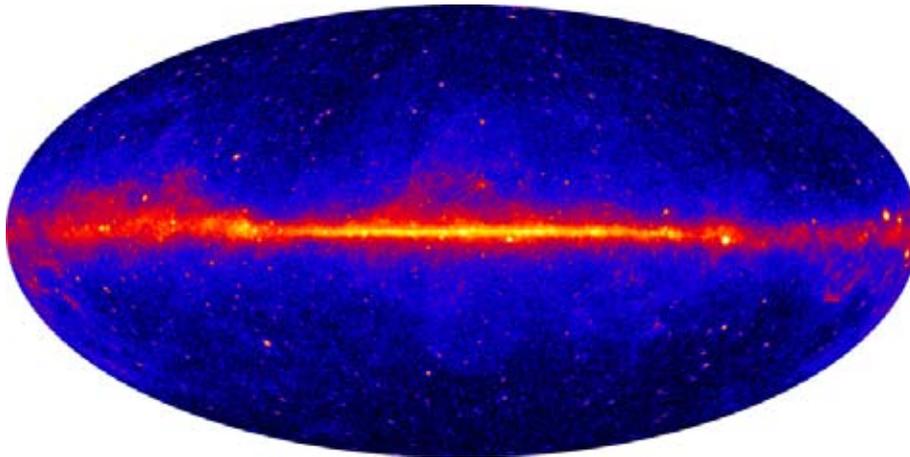


Figura 9. Mappa del cielo visto dal LAT dopo 3 anni di osservazioni (in coordinate galattiche). Si notano molto bene l'elevata luminosità della nostra Galassia (striscia centrale) ed alcune sorgenti puntiformi molto brillanti.

5. Conclusioni

Capire l'Universo è una delle più antiche aspirazioni dell'uomo. L'astronomia è forse la più antica tra le scienze naturali. Da quando i primi astronomi hanno semplicemente guardato gli astri con i loro occhi, si è fatta chiarezza su diversi fenomeni. Soprattutto abbiamo capito il metodo da usare e gli strumenti che dobbiamo sviluppare. Ci si è resi conto, in particolare, di quanto vasta sia la gamma di possibilità offerte dalla radiazione elettromagnetica. Oggi ci sono molti strumenti a disposizione per scrutare il cielo e il loro sviluppo è chiaramente legato alla tecnologia di cui disponiamo. Per migliorare la conoscenza è necessario disporre di strumenti più accurati e più precisi; sono necessarie quindi tecnologie sempre più avanzate e idee innovative su come costruirli e sfruttarli.

Lo strumento migliore che possediamo è sicuramente la passione e la curiosità delle giovani menti che si avvicinano a questa disciplina. Sono loro, infatti, che hanno il compito di sviluppare le prossime generazioni di strumenti, con i quali compiranno le future osservazioni e daranno un significato a quello che vedranno. Solo in questo modo, a poco a poco, otterremo le risposte che cerchiamo da sempre.

BIBLIO/SITOGRAFIA

- [1] http://images.nrao.edu/AGN/Radio_Galaxies/260
- [2] <http://apod.nasa.gov/apod/ap001110.html>
- [3] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/index.html
- [4] http://www.spacewx.com/pdf/SET_21348_2004.pdf
- [5] http://it.wikipedia.org/wiki/Onda_radio
- [6] http://it.wikipedia.org/wiki/Tomografia_a_emissione_di_positroni
- [7] <http://www.srt.inaf.it/>
- [8] Boggess, N. W., et al., The COBE mission. Its design and performance two years after launch, *Astrophysical Journal*, 397, 1992, pp. 420-429.
- [9] <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- [10] <http://www.spitzer.caltech.edu/>
- [11] <http://chandra.harvard.edu>
- [12] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [13] Fermi Science Support Center (FSSC): <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>