

1.6 Telescopi e astronomie

♣ **Fino all’inizio del secolo scorso le osservazioni astronomiche erano limitate alle frequenze visuali**, a lunghezza d’onda da 4000 a 7000 Å⁶, e l’unico rivelatore disponibile era l’occhio umano. L’avvento dei rivelatori montati su telescopi ha allargato l’orizzonte dell’astronomia non solo grazie all’incremento della profondità delle osservazioni ottiche, ma anche grazie all’allargamento della gamma di frequenze osservate. Se prima si osservava in una gamma di frequenze o lunghezze d’onda pari ad un fattore 2, oggi si osserva su più di 10 ordini di grandezza in λ .

♣ Lo spettro elettromagnetico costituisce un continuo; tuttavia, si usa suddividerlo in diverse parti, o **bande**. Questa suddivisione rispecchia nient’altro che le diverse tecniche utilizzate per la rivelazione della radiazione, e può variare da autore ad autore. Le bande principali, definite nella tabella 1.1, sono il radio, il sub-millimetrico (sub-mm), l’infrarosso (IR), il visuale, l’ultravioletto (UV), l’X ed il γ . Inoltre, si riescono a rivelare anche altri tipi di radiazione extraterrestre, cioè i raggi cosmici, i neutrini e, a partire dal 2015, le onde gravitazionali.

♣ Per telescopio qui intendiamo **qualsiasi strumento finalizzato alla misura della radiazione proveniente dallo spazio**. Tipicamente questo nome viene riservato agli strumenti ottici; tuttavia riteniamo utile utilizzare un singolo nome per caratterizzare tutta la classe di strumenti per le osservazioni astronomiche. Un telescopio, come la pupilla umana, è uno strumento **capace di raccogliere radiazione da una grande superficie**, concentrandola in un punto (nella maggior parte dei casi). La luce viene in genere raccolta da uno specchio o antenna, quindi elaborata da vari strumenti, come per esempio un filtro o uno spettrografo, e infine indirizzata ad un rivelatore, che può essere l’occhio umano, una lastra fotografica, un CCD, un rivelatore radio, una camera a scintille etc.

♣ Le principali caratteristiche di un sistema telescopio + filtro + rivelatore sono la **banda** in cui esso funziona, la sua **area efficace**, ovvero la superficie equivalente che raccoglie luce ad una certa frequenza, e la **risoluzione angolare** che lo strumento riesce a raggiungere. La capacità dello strumento di misurare la lunghezza d’onda dei fotoni è quantificata dalla **risoluzione spettrale**.

♣ Descriveremo nel seguito **tutte le astronomie** oggi in voga. La tabella 1.1 riporta le definizioni delle principali bande e sottobande, mentre la tabella 1.2 riporta l’assorbimento atmosferico (o interstellare) nella banda, e quindi l’altezza a cui l’osservazione è possibile. La tabella 1.3 riporta i principali oggetti astrofisici visibili in una certa banda e il meccanismo di emissione.

♣ **La maggior parte della radiazione extraterrestre viene assorbita dall’atmosfera**. Questo è illustrato nella figura 1.19, mentre i principali meccanismi responsabili per l’assorbimento sono elencati nella tabella 1.2. Le due principali “finestre”, ovvero bande in cui la radiazione riesce a passare senza problemi, sono quella radio e quella ottica. Ci sono anche delle piccole finestre nel NIR e nel MIR (difficilissimo da misurare da terra) e nel sub-mm. Le frequenze bassissime sono assorbite dal plasma interplanetario, rendendo in pratica impossibili le osservazioni anche da satellite. Un altro intervallo di frequenze molto problematico è quello a lunghezze d’onda minori del Lyman break (912Å), corrispondente all’energia di ionizzazione dell’idrogeno neutro nello stato fondamentale. In questo caso la radiazione è bloccata dall’idrogeno neutro (*HI*) galattico, per cui sono visibili solo le stelle più vicine, a parte qualche piccola zona del cielo

⁶Chiamiamo visuale la banda visibile dall’occhio umano, mentre nell’ottico includiamo le bande U e I.

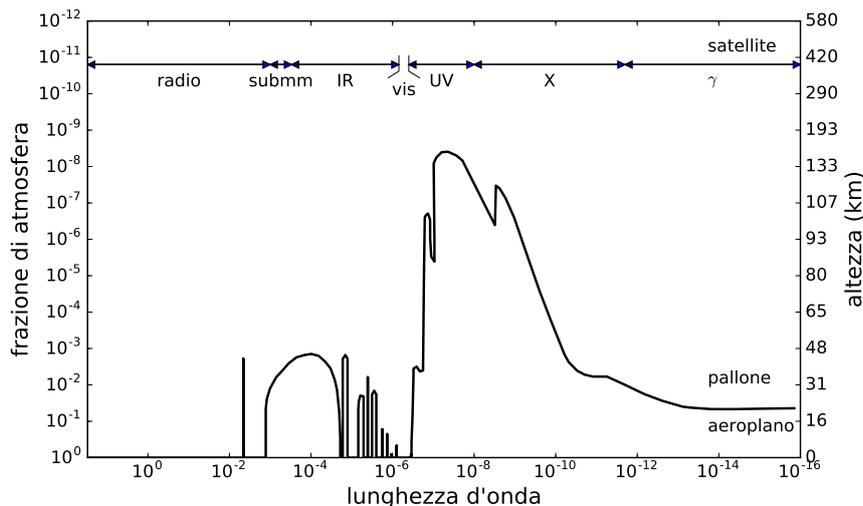


Figure 1.19: Assorbimento atmosferico in tutte le bande.

in cui si riesce ad andare un po' più in profondità. Infine, i raggi γ più energetici sono visibili anche da terra grazie allo sciame di particelle che causano quando arrivano nell'atmosfera.

♣ Come mostrato in tabella 1.3, **in ogni banda sono visibili oggetti diversi**, che emettono luce per meccanismi diversi. Accenniamo qui ai diversi tipi di emissione, rimandando una discussione più dettagliata ai capitoli successivi. È da notare come nel radio il meccanismo principale di emissione continua sia la radiazione di sincrotrone da parte di elettroni relativistici confinati da un campo magnetico (tipicamente galattico), mentre nel sub-mm e IR è molto importante, oltre alle righe (bande) molecolari, l'emissione termica da polveri tiepide. Nel NIR-ottico-NUV domina l'emissione termica da stelle o nuclei galattici attivi (AGN), mentre nel EUV-X è fondamentale l'emissione di bremsstrahlung da corone stellari o ammassi di galassie. Ad energie maggiori diventano importanti meccanismi di emissione come l'effetto Compton inverso, l'annichilazione di coppie, i decadimenti nucleari, o casi estremi di radiazione di sincrotrone.

♣ Iniziamo la discussione sui telescopi partendo dall'ottico; le stesse tecniche si applicano al NIR e NUV. I telescopi ottici sono di due tipi, **rifratore** e **riflettore**.

♣ Il **telescopio rifratore**, per esempio quello di Galileo (figura ??), è formato da due lenti, una convergente (l'obiettivo) ed una divergente (l'oculare). La combinazione delle due lenti deve essere capace di fare convergere e poi raddrizzare i raggi provenienti dall'infinito. Alternativamente, nello schema usato da Newton l'oculare è una lente convergente posta oltre il fuoco dell'obiettivo. In questo modo, se utilizziamo l'occhio come rivelatore, la luce dalla superficie S della lente viene raccolta sulla superficie s della pupilla (circa 40 mm^2), per cui il guadagno in flusso è:

$$\frac{f_{\text{telesc.}}}{f_{\text{occhio}}} = \frac{S}{s} \quad (1.18)$$

Un telescopio è anche capace di **ingrandire** le immagini; non approfondiremo questo aspetto. Il problema principale di un telescopio rifratore risiede nell'**aberrazione cromatica**, dovuta al fatto che l'indice di rifrazione del vetro dipende dalla lunghezza d'onda, per cui la posizione del fuoco della lente risulta variabile e la messa a fuoco non è ottimale nel momento in cui si usa un filtro con $\Delta\lambda$ relativamente grande. L'aberrazione cromatica viene minimizzata tramite opportune combinazioni di lenti.

banda	sotto-banda	λ
RADIO	(non oss.) radio microonde	>30m 30m – 3cm 3cm – 1mm
sub-mm		1mm – 300 μ
IR	FIR MIR NIR	300 μ – 30 μ 30 μ – 5 μ 5 μ – 7000 \AA
ottico (visuale)		7000 \AA – 4000 \AA
UV	NUV soft UV EUV	4000 \AA – 3100 \AA 3100 \AA – 912 \AA 912 \AA – 100 \AA
X	soft X hard X	100 \AA – 10 \AA 10 \AA – 0.02 \AA
γ		<0.02 \AA

Table 1.1: Principali bande per le osservazioni astrofisiche.

λ	assorbimento	osservazioni
> 300m	plasma interplanetario	opaco
> 30m	ionosfera	(satellite)
30m – 3cm	finestra radio	da terra
3cm – 1mm	H_2O e O_2	alta montagna
1mm – 10 μ	H_2O , O_2 , CO_2	pallone o satellite
850 μ e 450 μ	finestre sub-mm	alta montagna
10 μ – 7000 \AA	H_2O , molte finestre	alta montagna
7000 \AA – 3100 \AA	finestra ottica	da terra
3100 \AA – 912 \AA	O_3	satellite
\sim 912 \AA	HI galattico	quasi opaco
\lesssim 100 \AA	ionizzazione di stratosfera	satellite
\lesssim 0.02 \AA	<i>scattering</i> Compton etc.	satellite
$E > 100\text{GeV}$	creazione di sciame	da terra

Table 1.2: Principali meccanismi di assorbimento dell'atmosfera o del plasma interstellare o interplanetario.

banda	oggetti visibili	meccanismi di emissione
radio	galassie, AGN, pulsar, SNR <i>HI</i>	sincrotrone, maser H_2O riga 21 cm
mm e sub-mm	Galassia CMB	bremstrahlung ($T \sim 10^4$ K) cosmologico
sub-mm	polveri nubi molecolari	emissione termica ($T \sim 50$ K) righe di emissione molecolari
FIR, MIR NIR	polveri nubi molecolari stelle K-M	emissione termica ($T \sim 50$ K) righe di emissione molecolari emissione termica ($T \sim 3000$ K)
ottico e NUV	stelle, AGN regioni <i>HII</i>	emissione termica fluorescenza
soft UV	stelle O-B corone stellari regioni <i>HII</i>	emissione termica ($T \sim 10^4$ K) bremstrahlung ($T \sim 10^6$ K) fluorescenza
EUV e X	corone stellari ammassi di galassie pulsar, binarie X, AGN e SNR	bremstrahlung ($T \sim 10^6$ K) bremstrahlung ($T \sim 10^8$ K) Compton inverso, sincrotrone
γ	GRB, AGN, pulsar	annichilazioni, decadimenti, sincrotrone, Compton inverso

Table 1.3: Oggetti astrofisici osservabili nelle varie bande e principali meccanismi di emissione. Abbreviazioni: AGN = Active Galactic Nuclei, nuclei galattici attivi. SNR = SuperNova Remnants, resti di supernova. GRB = γ -Ray Burst, lampi γ .

♣ Telescopi ottici più moderni focalizzano i raggi tramite uno specchio parabolico (**telescopi riflettori**) invece di una lente. Sono basati sul principio di ottica per il quale uno specchio parabolico concentra nel suo fuoco i raggi provenienti dall'infinito. Il vantaggio di tali telescopi risiede sia nell'assenza di aberrazione cromatica che nella maggiore facilità di costruire grandi specchi piuttosto che grandi lenti (che comunque assorbirebbero molta radiazione).

♣ In un telescopio riflettore lo specchio parabolico concentra la luce nel suo **primo fuoco**, che viene a trovarsi proprio davanti allo specchio. Per potere ricevere tale segnale è quindi necessario porre uno specchietto (detto **secondario**) nella posizione del primo fuoco, per deviare il fascio di luce in una posizione da cui è facile piazzare un rivelatore. Alcuni tipi di montaggio di un telescopio riflettore sono schematicamente indicati in figura 1.20.

♣ La risoluzione angolare di un telescopio di diametro D che osserva alla lunghezza d'onda λ , ovvero la minima distanza angolare a cui si riescono a distinguere due sorgenti puntiformi (come due stelle), non può essere migliore del **limite di diffrazione**:

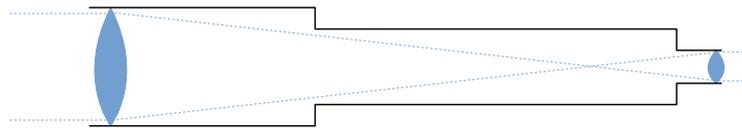
$$\theta_{\text{diff}} = \frac{1.22 \lambda}{D} \quad (1.19)$$

(con θ_{diff} misurato in radianti). Infatti, come è noto dagli studi di ottica, la diffrazione della radiazione diffonde un'immagine puntiforme in un alone sferico di diametro angolare $\sim \theta_{\text{diff}}$. Questo limite è importante soprattutto per i telescopi che lavorano con lunghezze d'onda grandi, come i telescopi (o antenne) radio fino all'IR.

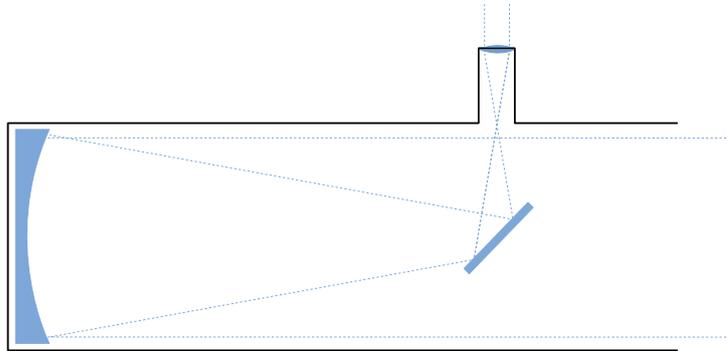
♣ Per i telescopi ottici la risoluzione angolare è determinata soprattutto dalla turbolenza atmosferica, la quale sparpaglia la luce di una stella su un cerchio di raggio dell'ordine di alcuni arcosecondi, detto **disco di seeing**. Risulta quindi importante costruire i telescopi in siti caratterizzati da turbolenza molto limitata. Nei casi migliori il seeing risulta inferiore ad $1''$. L'effetto della turbolenza è quello di trasformare una sorgente puntiforme in una estesa, il cui profilo di luce è detto **point spread function**. Malgrado sia impossibile distinguere da un'immagine una qualsiasi caratteristica della stella su scale minori del seeing, la precisione con cui si determina la posizione della stella è **inferiore** al seeing, per lo stesso motivo per cui l'errore con cui si determina la media di una distribuzione è minore della varianza della distribuzione stessa. I **centroidi** delle immagini stellari possono quindi essere noti con un'accuratezza di centesimi di secondo d'arco anche da terra. Questo fatto è molto importante come abbiamo visto per la misura dei moti propri e delle parallassi stellari.

♣ Per **migliorare il seeing** dei telescopi ottici vi sono due possibilità. Una è quella di spedire un **telescopio in orbita**, come l'Hubble Space Telescope (HST), che con gli ultimi rivelatori (l'Advanced Camera for Surveys e la Wide Field Camera 3) riesce a raggiungere il limite di diffrazione di $\sim 0.05''$. Un'altra possibilità è quella di correggere elettronicamente l'effetto della turbolenza atmosferica, sfruttando una o più immagini di stelle brillanti nel campo di osservazione. Questa tecnica è detta di **ottica adattiva**. Al giorno d'oggi l'ottica adattiva funziona regolarmente nel vicino IR in molti telescopi della classe 10m (il vicino IR è più facile da correggere perché l'effetto della turbolenza atmosferica è minore.)

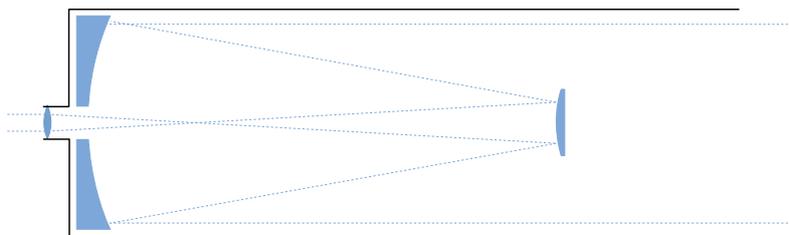
♣ L'astronomia ottica rimane fondamentale, malgrado l'importanza che le altre astronomie hanno assunto nel tempo. Esistono sul pianeta centinaia di ottimi telescopi ottici in attività, ed è impossibile elencarli tutti. Questi tendono comunque a concentrarsi nei siti più idonei, che sono per esempio le isole Canarie, le ande cilene, le Hawaii, o alcuni siti nelle montagne rocciose statunitensi, in Australia o in India. Tra i telescopi ottici citiamo solamente l'europeo **VLT**, dell'ESO (**European Southern Observatory**, in cui l'Italia ha una partecipazione importante), che si



Telescopio rifrattore Galileiano



Telescopio riflettore, montatura Newtoniana



Telescopio riflettore, montatura Cassegrain

Figure 1.20: Principali montature dei telescopi ottici. Dall'alto verso il basso: telescopio rifrattore, telescopio riflettore con montatura Newtoniana, telescopio riflettore con montatura Cassegrain.

trova nel deserto di Atacama in Cile. Il VLT è un sistema formato da 4 telescopi di 8 metri di diametro, tutti dotati di ottica adattiva nonché di strumenti di altissima precisione. Sono collegati tutti e quattro in interferometria (vedi sotto), e risultano così equivalenti ad un telescopio di 16 metri di diametro, con limite di diffrazione equivalente ad uno specchio di un centinaio di metri. Nelle Hawaii troviamo i telescopi **Keck** (USA), due specchi di 10 metri di diametro, costruiti con pochi anni di anticipo rispetto al VLT. Altri telescopi di 8 metri di diametro sono **Gemini**, formato da due telescopi gemelli situati in Cile e alle Hawaii, e il giapponese **Subaru** (situato anch'esso alle Hawaii), mentre il **Gran Telescopio Canarias** raggiunge i 10.4 metri di diametro. Il telescopio più grande su un'unica montatura è invece il **Large Binocular Telescope**, negli USA, che è italiano al 25%. La comunità italiana ha un suo telescopio di 3.5 metri di diametro sulle Canarie, chiamato **Telescopio Nazionale Galileo**. È in costruzione da parte di ESO l'ambizioso **E-ELT**, European Extremely Large Telescope, un telescopio ottico di 39 metri di diametro; analoghi progetti sono in via di sviluppo in altre parti del mondo. Nello spazio troviamo il già citato **HST**, che ha uno specchio di "appena" 2.4 metri. È in fase finale di costruzione il James Webb Space Telescope (**JWST**), un telescopio spaziale ottico-NIR di 6.5 metri di diametro, che sostituirà HST e, secondo le aspettative, dovrebbe essere capace di osservare le prime stelle che si sono formate nell'Universo, e osservare le atmosfere dei pianeti extrasolari di tipo terrestre.

♣ Il limite di diffrazione è molto severo per le lunghezze d'onda maggiori, e cioè per i **telescopi radio**. Per migliorare la risoluzione non c'è altra possibilità che costruire specchi, in questo caso antenne paraboliche, sempre più grandi. L'opera è agevolata dal fatto che il grado di rifinitura di uno specchio dipende dalla lunghezza d'onda che deve riflettere. Un'antenna radio quindi può essere fatta da una griglia metallica molto rozza sulle piccole distanze, basta che sia molto regolare sulla scala della lunghezza d'onda da rilevare. In questo modo è possibile costruire antenne come quella di **Arecibo**, che è adagiato in un cratere e ha un diametro di 300 metri. Per esempio, per l'importante lunghezza d'onda di 21 cm, il limite di diffrazione del telescopio di Arecibo è $\theta_{\text{diff}} \sim 3'$.

♣ Per aumentare ulteriormente la risoluzione senza dovere costruire antenne chilometriche si usa la tecnica dell'**interferometria**: i segnali di molte antenne, disposte a distanza tra di loro, vengono combinati rispettando le fasi. In questo modo i telescopi si comportano, in termini di limite di diffrazione (ma non di area efficace!), come una singola antenna di diametro uguale alla massima distanza delle antenne, che può essere di decine di chilometri. Questa tecnica fu messa a punto a Cambridge, presso il **MRAO** (Mullard Radio Astronomy Observatory). Un altro esempio è il **VLA** (Very Large Array) del New Mexico. Infine è possibile anche raccogliere con la tecnica dell'interferometria il segnale di antenne che stanno in luoghi diversi, lontani anche migliaia di chilometri. Questa tecnica è chiamata **VLBI** (Very Large Baseline Interferometry), e permette di ottenere immagini radio con risoluzione dell'ordine del centesimo di arcosecondo, la miglior risoluzione ottenibile al giorno d'oggi. Nel futuro queste tecniche saranno utilizzate per costruire giganteschi network di radiotelescopi; un esempio già in funzione è **LOFAR**, che lavora a frequenze minori di 250 MHz.

♣ **La radiazione tra il radio e l'infrarosso è tra le più difficili da osservare.** Essa è in parte bloccata dall'atmosfera, ed è quindi osservabile solo ad alta quota. Inoltre, la rivelazione di questa radiazione presenta difficoltà strumentali: le frequenze molto alte rendono difficile l'elaborazione elettronica, i rivelatori sono spesso bolometri, che misurano il calore prodotto della radiazione assorbita. Comincia inoltre ad essere importante la contaminazione da emissione termica, per cui i rivelatori vanno immersi in ambienti molto freddi (**criogenia**). Contemporaneamente, il limite di diffrazione continua ad influenzare in modo importante la risoluzione angolare. Le misure del fondo cosmico vengono tipicamente condotte da satellite

(come **Cobe** - premiato nel 2006 con il Nobel per la fisica - **WMAP** o **Planck**) o da pallone (come **Boomerang**), oppure (alle lunghezze d'onda radio) in alta montagna o in Antartide. In questi casi la risoluzione è di solito modesta: per Cobe era di 7°, Planck raggiunge una risoluzione da 5' a 33', dipendente dalla frequenza. Osservazioni nelle due finestre del sub-mm vengono condotte da terra: l'ESO ha appena ultimato la costruzione di **ALMA** (Atacama Large Millimeter Array), una gigantesca matrice di 80 antenne sub-millimetriche collegate in interferometria.

♣ **Lontano e medio IR vengono osservati da satellite.** In questo caso la criogenia è l'aspetto di massima importanza, ed è anche quello che limita a pochi anni la vita degli strumenti. In queste bande la contaminazione del cielo è così grande da essere maggiore dei tipici segnali, cosicché la sua sottrazione costituisce un aspetto di importanza primaria. Il satellite **IRAS** negli anni '80 fece una mappa dell'intero cielo, con una risoluzione di circa 1'. La risoluzione è passata a 10" grazie al satellite **ISO**, lanciato verso la fine degli anni '90. Negli ultimi anni, **Spitzer** Space Telescope della NASA e il giapponese **Akari** sono stati attivi nel MIR, mentre il recente satellite europeo **Herschel** con i suoi 3.5 metri di diametro ha osservato nel FIR.

♣ La difficoltà delle **osservazioni UV** sta non tanto nella rivelazione della radiazione (che viene fatta con tecniche simili all'ottico) quanto nell'assorbimento atmosferico ed interstellare di questa radiazione. Molti telescopi UV sono stati mandati in volo, tra i quali **IUE** negli anni '80 è risultato uno dei più importanti. Oltre ad HST, che può osservare poco oltre al vicino UV, molto risalto negli anni 2010 ha avuto il piccolo telescopio a grande campo **GALEX**.

♣ Il principio dello specchio parabolico funziona dal radio fino ai raggi UV. Con i **raggi X** i fotoni diventano così energetici da trapassare qualsiasi tipo di specchio, a meno che l'angolo di incidenza non sia vicino a 90°. Per condensare la luce dei fotoni X si usa quindi la tecnica dell'**incidenza radente**, nella quale lo specchio è formato da corone di paraboloidi. Dato che una singola corona riflette solo i fotoni provenienti da una piccola sezione circolare del cielo, per ottenere una grande area efficace vengono utilizzate parecchie corone concentriche. Una tale configurazione ha una profondità di campo molto limitata, per aumentarla si usano configurazioni più elaborate dove il fotone viene riflesso una seconda volta da uno specchio di forma iperboloidi. I rivelatori in questo caso consistono in **camere a scintillazione**, in cui del gas neutro viene immerso in un forte campo elettrostatico; al passaggio di un fotone X il gas si ionizza, provocando una rottura del dielettrico e quindi una scintilla. Dall'entità della scintilla è possibile anche ricavare l'energia del fotone incidente. Queste tecniche sono così evolute che i rivelatori attuali sono in pratica dei CCD. Grazie allo sviluppo dell'astronomia X **Riccardo Giacconi** ha ottenuto nel 2002 il Nobel per la fisica. Tra i molti satelliti X ricordiamo **EXOSAT** (ESA), **Einstein** (NASA), **ROSAT** (ESA), **ASCA** (Giappone), **BeppoSax** (Italia-Olanda), e gli attuali **Suzaku** (giappone) **Chandra** (NASA) ed **XMM-Newton** (ESA). Il satellite Chandra è notevole per la sua risoluzione angolare, che è di circa 1", migliore di un ordine di grandezza rispetto al passato, e per la sua area efficace, che migliora di due ordini di grandezza rispetto ai precedenti satelliti. Per darne un esempio, la figura 1.21 mostra immagini ottiche ed X della nebulosa del Granchio. XMM-Newton ha una risoluzione angolare più povera di Chandra, ma una un'area efficace ancora maggiore ed un'ottima risoluzione spettrale. Nel prossimo futuro volerà il satellite tedesco-russo **eROSITA**, mentre l'ESA ha recentemente approvato la costruzione di un satellite X di nuova generazione chiamato **Athena**.

♣ Per i **raggi γ** neanche l'incidenza radente è sufficiente per concentrare i fotoni. Si usano in questi casi dei rivelatori di particelle di alta energia, come per esempio le **camere a scintilla** (spark chambers), che consistono in una batteria di rivelatori, per esempio griglie ad alto voltaggio immerse in un gas inerte, oppure rivelatori al silicio. In questo caso il fotone γ , arrivando sul rivelatore, crea una coppia elettrone-positrone di alta energia, che viene rivelata da

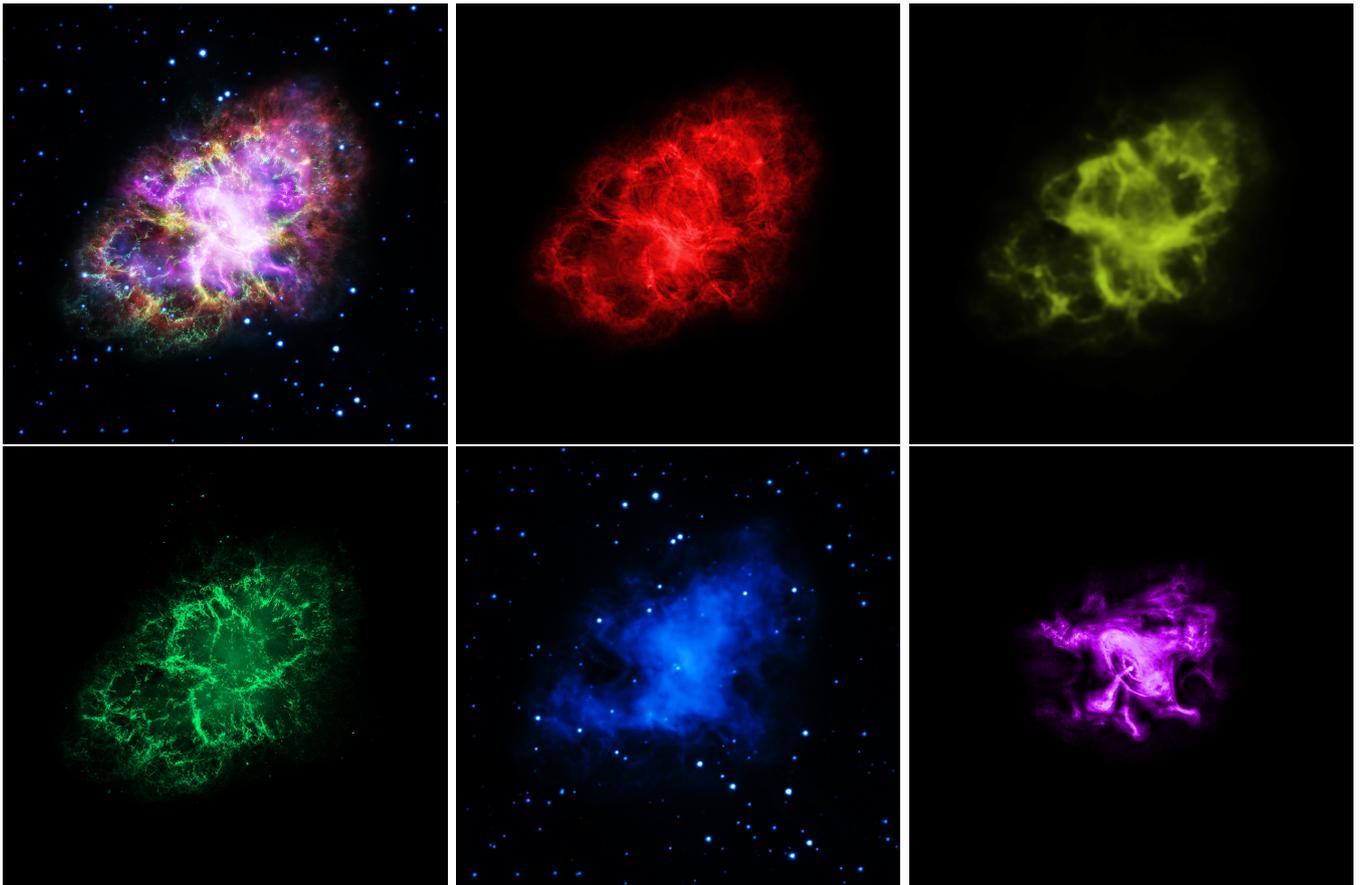


Figure 1.21: Nebulosa del granchio osservata in varie bande. La prima a sinistra è un'immagine composta di tutte le immagini che seguono: radio (VLA), MIR (spitzer), visibile (HST), UV (XMM-Newton), X (Chandra).

tutti gli elementi della griglia. In questo modo si può ricostruire la traiettoria del fotone, e quindi la sua direzione di provenienza, seppur con scarsa risoluzione angolare ($\sim 1^\circ$). Tra i satelliti γ più importanti ricordiamo l'europeo **COS-B** e lo statunitense **Compton-GRO**. Attualmente sono in orbita diversi satelliti per le alte energie, tra cui **SWIFT** (NASA), **INTEGRAL** (ESA), **AGILE** (Italia) e **Fermi** (NASA).

♣ **Raggi γ di altissima energia** (*ultra high-energy γ -rays*), > 100 GeV, possono essere osservati indirettamente da terra tramite la cascata di particelle che creano quando entrano nell'atmosfera. Osservando l'atmosfera (preferibilmente dall'alto, tramite pallone), si possono vedere lampi corrispondenti all'entrata di particelle molto energetiche. Dai dettagli è anche possibile distinguere raggi cosmici da fotoni. Tra i telescopi di questo tipo citiamo **MAGIC**, che ha un'importante partecipazione italiana, ed è situato alle Canarie.

♣ Vale la pena menzionare alcuni progetti futuri che coinvolgono significativamente la comunità astronomica italiana. **Euclid**, (ESA) il cui lancio è previsto per il 2021, è un telescopio ottico progettato per tracciare una mappa dell'Universo lontano, sia fotometrica che spettroscopica (usando la tecnica della spettroscopia slit-less). **Square Kilometer Array (SKA)** è il progetto di un sistema di telescopi radio collegati in VLBI, localizzati in Australia e Sud Africa, destinato a osservare, con un'area efficace record di un chilometro quadro, l'emissione radio di gran parte del cielo, fino ad arrivare alla cosiddetta reionizzazione, quando l'idrogeno dell'Universo viene ionizzato dall'emissione delle prime stelle. **Cherenkov Telescope Array (CTA)** è il progetto di un sistema di telescopi per raggi γ di altissima energia, che permetterà di studiare in gran dettaglio gli oggetti compatti. E, naturalmente, anche i già citati progetti di ESO, **ALMA** e **E-ELT**, coinvolgono in modo importante gli astronomi italiani.

♣ Abbiamo già accennato all'esistenza di **altre radiazioni extraterrestri** rivelabili. I **raggi cosmici** sono nuclei (o elettroni) che bombardano continuamente la nostra atmosfera, e sono rivelabili sia da pallone o da satellite, sia (quelli più energetici) dallo sciame di particelle secondarie che generano entrando nell'atmosfera. Possono essere accelerati a grandi velocità dal sole, e trasportati dal vento solare, oppure dagli shock generati dalle esplosioni di supernove, o possono essere accelerati dagli oggetti compatti. Essendo cariche, queste particelle vengono deflesse dai campi magnetici, e quindi la loro direzione non è utile per capire quale sia la sorgente che li ha generati; in particolare, il campo magnetico galattico mantiene confinati nella galassia quasi tutti i raggi cosmici. I raggi cosmici più energetici tendono ad essere poco deflessi, ma sono così rari che è praticamente impossibile costruire da essi un qualunque tipo di immagine.

♣ I **neutrini** sono un'ulteriore radiazione di grande importanza; purtroppo la loro debolissima interazione con la materia li rende molto difficili da rivelare; ne riparleremo a proposito del Sole. Anche questa nuova astronomia è stata premiata nel 2002 con il Nobel a Raymond Davis Jr., per la misura dei neutrini solari, e a Masatoshi Koshiba per la misura, fatta con Superkamiokande, dei neutrini della supernova 1987a, esplosa nella grande nube di Magellano.

♣ La fusione di due oggetti compatti, come buchi neri o stelle di neutroni, causa la generazione di **onde gravitazionali**, perturbazioni della metrica dello spazio-tempo che si propagano alla velocità della luce. Rivelare queste onde gravitazionali ha richiesto decenni di sforzi, fino al 14 settembre 2015, quando gli interferometri della collaborazione americana LIGO hanno rivelato il primo segnale convincente di onda gravitazionale corrispondente alla fusione di due buchi neri di 35 e 30 masse solari. Questa scoperta storica, che conferma la teoria della relatività di Einstein e apre una nuova finestra osservativa, è stata premiata con il premio Nobel per la fisica del 2017, assegnato a Kip Thorne, Rainer Weiss e Barry Barish. Successivamente, il 17 agosto del 2017, gli interferometri di LIGO e di VIRGO, quest'ultimo in Italia, hanno

rivelato un evento di fusione di due stelle di neutroni, corrispondente entro 2 secondi ad un lampo gamma breve (vedi la sezione ??). Questo ha permesso di identificare la galassia ospite di questo evento, che è risultato corrispondente ad una “kilonova”, un tipo di nova particolarmente potente (ma di potenza inferiore ad una supernova). Questa misura ha definitivamente aperto le porte alla cosiddetta **astronomia multi-messenger**, non più basata esclusivamente sulla radiazione elettromagnetica.

1.7 Esercizi

1. Sapendo che $M_{V\odot} = 4.84$, quale magnitudine apparente avrebbe il sole se fosse a 300 pc di distanza? e a 10 kpc?

2. Quale risoluzione spettrale minima (in \AA) è necessaria per misurare una velocità di 1 km s^{-1} da uno spettro usando una riga a $\lambda = 4400 \text{ \AA}$? e per stimare la larghezza e profondità di una riga alla stessa lunghezza d'onda, allargata termicamente ($T = 5800 \text{ K}$)? Date una stima tenendo conto che dovete campionare la riga con diversi bin di λ .

3. La riga Lyman α (1216 \AA) in emissione di un quasar risulta allargata di $\Delta\lambda = 50 \text{ \AA}$. Quale velocità associamo a questo moto (in km s^{-1})? quale temperatura (in K)? È più realistico pensare ad un moto termico o al moto macroscopico di nubi?

4. Con uno specchio di 3.5m di diametro puntiamo per 30 minuti una stella di magnitudine apparente data, che indichiamo con V . Sul telescopio è montato uno spettrografo con risoluzione di 0.01 \AA a 5400 \AA . Lo spettrografo ha un'inefficienza del 20%. Per quale magnitudine V ottengo in media almeno 1000 fotoni in ogni intervallo di $\delta\lambda = 0.01 \text{ \AA}$? Utilizzate la figura 1.4 per stimare la larghezza del filtro V .

5. Per una binaria ad eclissi, di periodo 11 giorni, si riescono a misurare spettroscopicamente le componenti radiali delle velocità delle due stelle al massimo; queste risultano essere 75 e 100 km s^{-1} . Utilizzando le equazioni 1.14 e ipotizzando $i = 10^\circ$ (le eclissi sono ben separate temporalmente), calcolare masse (M_\odot) e separazione (AU) delle stelle. Sapendo che l'eclissi (parziale+totale) dura 8h 45min e la fase di eclissi totale dura 45min, calcolare i raggi delle stelle in raggi solari.

6. Qual'è (in km s^{-1}) la minima velocità di moto proprio misurabile per una stella a distanza $d = 300 \text{ pc}$ se la sua posizione è determinata con un'accuratezza di 0.1, e la stella è osservata per un arco di 20 anni? Qual è la minima velocità lungo la linea di vista misurabile con una risoluzione spettroscopica di 0.1 \AA a 8000 \AA ? Come cambiano questi numeri se $d = 10 \text{ kpc}$?

7. Esprimete il limite di diffrazione in arcosecondi. Quale valore assume per un'antenna radio di 20m alla lunghezza d'onda di 21cm? E per uno specchio di 1m a 6000 \AA ?