

Astrophysics Laboratory

22 ottobre 2022

Indice

1	Introduzione	1
2	Antenne e telescopi	8
2.1	Figura d'antenna	9
2.2	Antenne radio	10
2.3	Telescopi	11
2.3.1	Telescopi rifrattori	11
2.3.2	Telescopi riflettori	11
2.3.3	Telescopi compositi	12
2.4	Montature	13
2.5	Schermi	13
3	Ricevitori e tecniche osservative	13
3.1	Caratteristiche dei rivelatori	13
3.2	Tipi di rivelatori	14

Lezione 1

gio 06 ott
2022 10:30

1 Introduzione

Si studiano le tecniche e la strumentazione utilizzate nelle osservazioni astrofisiche:

- grandezze ed osservabili in astrofisica;
- antenne, telescopi, ottiche;
- sistemi di rivelazione;
- caratterizzazione e calibrazione di rivelatori;
- sorgenti di rumore e motivi di limitazione alle osservazioni;
- tecniche di estrazione del segnale;
- analisi dei dati;

Le lezioni fanno riferimento alle bande spettrali radio, microonde e raggi cosmici.

Si descrivono le caratteristiche di alcuni oggetti e sorgenti astronomici: Sole, Luna, galassia, Radiazione cosmica a microonde. Vengono introdotti i raggi cosmici, si studiano le loro proprietà e come si possono osservare.

Grandezze ed osservabili astrofisiche. Le osservazioni fatte a 2.5 GHz sono molto disturbate. Tale frequenza è usata in molte applicazioni (Wi-Fi, microonde) perché è una radiazione che penetra i materiali.

Diverse frequenze forniscono un'immagine diversa del cielo. Si fanno osservazioni a 1.4 GHz cioè la frequenza della radiazione di transizione iperfina dell'idrogeno. Si osservano anche radiazioni di Bremsstrahlung.

Banda radio. Le tecniche radio si possono usare fino a frequenze di 1 THz. Questo limite è dato dall'utilizzo di ricevitori coerenti: misurano il campo elettrico. Oltre una certa frequenza, un ricevitore coglie solamente una media temporale. Questi sono i rilevatori incoerenti, non misurano la fase, sebbene continuano a misurare l'ampiezza. Con un'antenna si può osservare un solo modo spaziale e quindi esse operano in regime diffrattivo: si ha una figura di diffrazione. Si ha una relazione tra apertura ed angolo di osservazione

$$A\Omega = \lambda^2$$

dove A è la superficie di osservazione e Ω l'angolo solido. Queste due sono da intendersi come grandezze efficaci. Per ricevitori incoerenti, la relazione non è più valida, ma si ha

$$A\Omega \geq \lambda^2$$

si possono osservare più modi di radiazione.

Brillanza. Una sorgente è definita dalle caratteristiche della luce emessa e dalle sue proprietà geometriche. Un osservatore determina queste proprietà a partire da un sistema che ha una sua area sensibile dA ed un angolo solido $d\Omega$ [r].

La brillantezza B (brightness) si definisce a partire dalla potenza ricevuta dalla sorgente

$$dW = B \cos \theta d\Omega dA d\nu$$

[r] Ricevendo N fotoni al secondo, allora il numero per unità di area, angolo solido e frequenza è

$$n = \frac{dN}{dA d\Omega d\nu} \implies B(\nu) = n(\nu)h\nu$$

La potenza per unità di frequenza w è

$$dw = B \cos \theta d\Omega dA$$

Quando la brillantezza è uniforme si ha

$$w = \pi AB$$

Se è uniforme anche in banda spettrale, allora

$$W = \pi AB \Delta\nu = Nh\nu$$

Flusso. La densità di flusso S è

$$S = \int_{\Omega_{\text{sorg}}} B(\theta, \phi) d\Omega$$

La densità di flusso si esprime in Jansky

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

Per passare al flusso bisogna integrare rispetto la frequenza

$$S' = \int_{\Omega_{\text{sorg}}} \int_{\nu} B(\theta, \phi) d\Omega d\nu = \int_{\Omega_{\text{sorg}}} B'(\theta, \phi) d\Omega$$

Flusso osservato. Un'antenna ha diversa efficienza in base alla direzione di osservazione. Sia $P_n(\theta, \phi)$ la risposta angolare normalizzata. Si definisce l'angolo solido dell'antenna

$$\Omega_A = \int P_n(\theta, \phi) d\Omega$$

Bisogna confrontare tale quantità con l'angolo solido della sorgente per studiare vari fenomeni osservativi. La densità di flusso osservata è

$$S_o = \int B(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega$$

Per una sorgente puntiforme $\Omega_s \ll \Omega_A$ si ha

$$P_n \approx P_0 \approx 1, \quad S_o \approx P_0 \int_{\Omega_s} B(\theta, \phi) d\Omega \approx S$$

Si cattura tutto il flusso che arriva dalla sorgente. Aumentando la superficie di raccolta del telescopio, si restringe l'angolo solido perché $A\Omega = \lambda^2$, ma il flusso è identico.

Per una sorgente estesa $\Omega_A \ll \Omega_s$ si ha

$$S_o \approx B(\theta, \phi) \int P_n(\theta, \phi) d\Omega \approx B(\theta, \phi) \Omega_A$$

in quanto la brillantezza è, in approssimazione, costante. Il flusso osservato è inferiore al flusso della sorgente ($S \approx B\Omega_s$):

$$S_o \approx B(\theta, \phi) \Omega_A \approx S \frac{\Omega_A}{\Omega_s} \ll S$$

In questo caso, aumentando la superficie di raccolta (l'angolo solido diminuisce), la potenza osservata rimane costante ($W = SA$), ma il flusso osservato diminuisce.

Brillantezza osservata. La brillantezza apparente è legata al flusso osservato

$$B_o = \frac{S_o}{\Omega_A}$$

La brillantezza media è intrinseca alla sorgente

$$B_m = \frac{S}{\Omega_s}$$

Per una sorgente estesa si ha

$$B_o = \frac{S_o}{\Omega_A} \approx \frac{\Omega_A}{\Omega_s} \frac{S}{\Omega_A} = \frac{S}{\Omega_s} = B_m$$

Per la sorgente puntiforme si ha

$$B_o = \frac{S_o}{\Omega_A} = \frac{S}{\Omega_A} = \frac{\Omega_s}{\Omega_A} B_m \ll B_m$$

Corpo nero. Tutti i corpi emettono radiazione elettromagnetica. Un buon assorbitore è anche un buon emettitore (per Kirchhoff). Un assorbitore perfetto è il corpo nero. In natura esistono corpi neri quasi ideali in un intervallo limitato di frequenze. Per costruire un corpo nero si può utilizzare la cavità di corpo nero. Tale cavità si utilizza per la calibrazione degli strumenti.

Lezione 2mer 12 ott
2022 10:30

La brillantezza di un corpo nero per unità di banda spettrale è

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^x - 1} = 2h\nu \frac{\nu^2}{c^2} n, \quad x = \frac{h\nu}{k_B T}$$

cioè la legge di Planck. Sono presenti diversi termini:

- l'energia del fotone, $h\nu$;
- densità spaziale di modi, $\frac{\nu^2}{c^2}$;
- numero di occupazione, $n = \frac{1}{e^x - 1}$;
- stati di polarizzazione, 2.

In funzione della lunghezza d'onda si ha

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^x - 1}$$

Si ricorda che bisogna considerare anche il differenziale. Infatti

$$B' = \int B_\nu d\nu = \int B_\lambda d\lambda$$

La temperatura è l'unico parametro del corpo nero, essa determina univocamente la brillantezza.

Per una sorgente che irraggia su di un angolo solido Ω_s , la densità di energia è

$$U_\nu = \frac{1}{c} \int_{\Omega_s} B_\nu d\Omega = \frac{2h\nu^3 \Omega_s}{c^3} \frac{1}{e^x - 1}$$

La brillantezza integrata su tutto lo spettro è data dalla legge di Stefan-Boltzmann

$$B' = \int_0^\infty B_\nu d\nu = \int_0^\infty B_\lambda d\lambda = \sigma T^4$$

Il picco di radiazione si sposta in funzione della temperatura secondo la legge di Wien

$$T\lambda_{\max}(B_\nu) = 5.1 \text{ K mm}, \quad T\lambda_{\max}(B_\lambda) = 2.9 \text{ K mm}$$

Il valore è diverso nei due casi perché la brillantezza è scritta in modo diverso. In base alla temperatura si può determinare il picco di emissione.

Risulta utile osservare i casi limite della legge di Planck. L'approssimazione di Rayleigh-Jeans si ha per basse frequenze, $h\nu \ll k_B T$, da cui

$$B_\nu \approx 2 \frac{\nu^2}{c^2} k_B T = \frac{2k_B T}{\lambda^2}$$

che è quadratica nella frequenza. L'approssimazione di Wien è $h\nu \gg k_B T$ e si ha per alte frequenze:

$$B_\nu \approx 2 \frac{h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{k_B T}}$$

che decade esponenzialmente.

Flusso da un corpo nero. La densità di flusso in frequenza è

$$S_\nu = \frac{2h\nu^3\Omega_s}{c^2} \frac{1}{e^x - 1}$$

Nell'approssimazione di Rayleigh-Jeans si ha

$$S_\nu = 2\frac{\nu^2}{c^2}k_B T\Omega_s = \frac{2k_B T}{\lambda^2}\Omega_s$$

in caso di temperatura non uniforme si ha

$$S_\nu = \frac{2k}{\lambda^2} \int_{\Omega_s} T(\theta, \phi) d\Omega$$

Nell'approssimazione di Wien segue

$$S_\nu = 2\frac{h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{k_B T}} \Omega_s$$

Temperatura di brillantezza. La temperatura di brillantezza è la temperatura che compare nell'approssimazione di Rayleigh-Jeans

$$B_\nu(\theta, \phi) = \frac{2k_B}{\lambda^2} T_B = 2k_B \frac{\nu^2}{c^2} T_B$$

La potenza che colpisce una superficie A in un angolo Ω nella banda $\Delta\nu$ è

$$W \approx \frac{2k_B}{\lambda^2} T_B \Delta\nu A\Omega = 2k_B \frac{\nu^2}{c^2} T_B \Delta\nu A\Omega$$

Per un sistema radio coerente si ha $A\Omega = \lambda^2$ ed una sola polarizzazione. Dunque

$$W = k_B T_B \Delta\nu$$

Questa relazione è indipendente dal sistema che si sta utilizzando.

La temperatura di brillantezza coincide con la temperatura termodinamica T_0 di corpo nero solamente nella regione di R-J: $T_B \approx T_0$ per $h\nu \ll k_B T$ (più o meno intorno a 1 GHz). In generale si ha

$$T_B = \frac{h\nu}{k_B} \frac{1}{e^x - 1}$$

Temperatura apparente. La temperatura apparente è associata al flusso o alla brillantezza misurati

$$S_o = \int B P_n d\Omega = \frac{2k_B}{\lambda^2} \int T_B P_n d\Omega$$

$$T_A = \frac{\int T_B P_n d\Omega}{\int P_n d\Omega} = \frac{1}{\Omega_A} \int T_B P_n d\Omega$$

La seconda quantità è la temperatura d'antenna. Esso è quanto misurato in termini di temperatura di brillantezza.

Per una sorgente puntiforme $\Omega_s \ll \Omega_A$ si ha

$$T_A \approx \frac{\Omega_s}{\Omega_A} T_B$$

Per una sorgente estesa $\Omega_A \ll \Omega_s$ si ha

$$T_A \approx T_B$$

Esempi di corpo nero. Alcuni esempi sono

- la radiazione cosmica a microonde $T_0 = (2.725 \pm 0.001) \text{ K}$;
- Le stelle $T = 5800 \text{ K}$; la radiazione è un po' distorta a causa del percorso che i fotoni devono compiere per fuggire dalla superficie, inoltre ci sono varie regioni a temperature diverse. Si hanno anche delle righe di assorbimento dovute alla corona solare.

Assorbimento e profondità ottica. Si consideri un flusso che viaggia attraverso un mezzo assorbente. Il decremento di flusso a causa di un assorbimento è dato da

$$dS = -S\alpha dx$$

con α costante di attenuazione e dx lunghezza del percorso. Per α costante si ha

$$S(x) = S_s e^{-\alpha x} = S_s e^{-\tau}$$

con $\tau = \alpha x$ è la profondità ottica. Analogamente, per la brillantezza

$$B(x) = B_s e^{-\alpha x} = B_s e^{-\tau}$$

Un mezzo è otticamente sottile se $\tau \ll 1$, mentre è otticamente spesso se $\tau \gg 1$.

Nube assorbente. Una nube di gas e polveri nel mezzo interstellare è un caso tipico di mezzo assorbente. La costante di attenuazione è legata alla densità del mezzo ed al coefficiente di assorbimento:

$$\alpha = K\rho$$

La profondità ottica è

$$\tau = \int_0^{x_c} K\rho dx$$

dove c sta per “cloud”. Per un mezzo omogeneo si ha

$$\tau = K\rho x_c$$

Emissione di una nube. La potenza emessa da un volume unitario con densità ρ e coefficiente di emissione j è

$$dw = j\rho dV$$

La densità di flusso osservata a distanza r è

$$dS = \frac{dw}{4\pi r^2} = \frac{j\rho dV}{4\pi r^2}$$

Considerando un volume $dV = r^2 dr d\Omega$, la brillantezza infinitesima è

$$dB = d_\Omega S = \frac{j\rho dV}{4\pi r^2 d\Omega} = \frac{j\rho dr}{4\pi}$$

Per uno spessore finito $[r]$

Nube in auto-assorbimento. La radiazione emessa dalla nube è anche auto-assorbita dal fattore $e^{-\tau}$:

$$dB = \frac{j\rho dr}{4\pi} e^{-\tau} \implies \frac{Bj}{4\pi K} \int_0^{r_c} e^{-\tau} K\rho dr = \frac{j}{4\pi K} \int_0^{\tau_c} e^{-\tau} d\tau = \frac{j}{4\pi K} (1 - e^{-\tau_c}) = B_c (1 - e^{-\tau_c})$$

Per $\tau \gg 1$ la brillantezza della nube è B_c . Per la temperatura di brillantezza si ha

$$T_B = T_c (1 - e^{-\tau_c})$$

Sorgente vista attraverso una nube. Ponendo una sorgente dietro una nube assorbente, si ha

$$dB = -Bk\rho dr + \frac{j\rho}{4\pi}e^{-\tau}dr = -Bd\tau + \frac{j}{4\pi K}e^{-\tau}d\tau$$

La brillantezza osservata è

$$B = B_s e^{-\tau_c} +$$

[r] La temperatura di brillantezza osservata è

$$T_B = T_s e^{-\tau_c} + T_c(1 - e^{-\tau_c})$$

Per una nube sottile si ha $T_B \approx T_s$. Per una nube spessa si ha $T_B \approx T_c$.

Atmosfera terrestre. L'atmosfera terrestre si comporta come un mezzo assorbente che a sua volta emette radiazione termica con emissività $\varepsilon < 1$. La trasparenza atmosferica è funzione della frequenza. Le bande spettrali in cui l'atmosfera è trasparente sono il visibile ed il radio, quelle in cui è opaca sono gli UV, gli X ed i gamma; per gli infrarossi e le microonde si hanno finestre di trasparenza. Le molecole che contribuiscono all'assorbimento sono l'acqua, l'ossigeno, l'ozono, l'anidride carbonica, il monossido di carbonio, etc. L'azoto molecolare, la sostanza più presente, non assorbe radiazione perché non ha momento di dipolo elettrico né magnetico.

Per ridurre l'impatto dell'atmosfera occorre scegliere siti osservativi in alta montagna ed in luoghi secchi dove il vapore acqueo è minimo. Si possono usare anche palloni stratosferici, ma in alcune bande di frequenza occorre utilizzare satelliti.

L'emissione e la trasparenza atmosferica sono dipendenti dallo spessore ottico τ . La trasparenza è definita come il rapporto tra segnale osservato e segnale intrinseco di una sorgente

$$T(\nu) = \frac{B_o}{B_s} = e^{-\tau(\nu)}$$

L'emissione atmosferica può essere schematizzata come un corpo nero la cui emissività è variabile con la frequenza

$$B_{\text{atm}}(\nu) = (1 - e^{-\tau(\nu)})B_{\text{BB}}$$

Lo spessore ottico dipende dalla direzione di osservazione. Questo è minimo quando si osserva lo zenith. In approssimazione di strati piani e paralleli, si ha dipendenza dall'angolo zenitale z :

$$\tau(z) = \frac{\tau_0}{\cos z} = \tau_0 \sec z$$

L'atmosfera limita le osservazioni astronomiche a causa dell'inquinamento elettromagnetico antropico. In banda ottica, la luce diffusa limita la sensibilità. In banda radio, le interferenze dovute ai vari dispositivi elettronici limitano le frequenze utili.

Un'altra limitazione proviene dalla turbolenza atmosferica. La luce attraversa masse d'aria di densità diversa e non percorre una traiettoria rettilinea. L'immagine si muove sul piano focale e risulta meno nitida: si ha il fenomeno di seeing atmosferico che limita la risoluzione angolare a circa 1 arcsec. Bisogna correggere attivamente questo effetto. Si misura la fase dell'onda incidente e si deforma un elemento ottico che corregge il fronte d'onda rendendolo piano.

I siti osservativi sono scelti in modo tale da limitare la turbolenza atmosferica (magari dovuta al vento).

Sistemi di coordinate. Si possono utilizzare le coordinate locali o alt-azimutali. Le coordinate sono:

- l'altezza h è la distanza angolare dell'astro dall'orizzonte;
- l'azimuth A è la distanza angolare tra il meridiano locale (tipicamente il nord) e il meridiano passante per l'astro.

Questo sistema varia nel tempo e con la posizione dell'osservatore.

Esistono anche le coordinate equatoriali celesti:

- la declinazione δ la distanza angolare dall'equatore celeste (che è l'estensione dell'equatore della Terra sulla volta celeste);
- l'ascensione retta α è la distanza angolare tra il punto γ o d'ariete e l'intersezione del cerchio orario dell'astro con l'equatore celeste.

Infine, esistono le coordinate galattiche. Il riferimento è il piano galattico e il sole è al centro:

- la longitudine galattica l è la distanza angolare tra il centro galattico e l'intersezione del meridiano galattico con il piano;
- la latitudine galattica b è la distanza angolare dal piano galattico celeste.

Per convertire tra le coordinate equatoriali e le coordinate alt-azimutali bisogna conoscere alcune grandezze accessorie che includono il tempo e la posizione dell'osservatore. Le grandezze usate sono

- l'angolo orario H è la distanza angolare tra il punto di mezzogiorno M e l'intersezione del meridiano celeste passante per l'astro con l'equatore celeste;
- il tempo siderale locale (LST) è l'ascensione retta che sta passando in quel momento sul meridiano locale;
- la latitudine geografica φ .

Per convertire coordinate equatoriali in coordinate galattiche bisogna operare una rotazione rigida.

Lezione 3

gio 13 ott
2022 10:30

2 Antenne e telescopi

Un radiotelescopio è un sistema in grado di ricevere e misurare le onde radio che interagiscono con l'antenna. L'antenna è l'elemento che raccoglie le onde elettromagnetiche dall'esterno e le traduce in una grandezza che può essere rivelata. L'antenna è la regione di transizione tra lo spazio libero e la regione di onde guidate (in guida o in cavo). La sua funzione è assicurare che non ci siano perdite nella transizione. L'antenna definisce la regione di spazio da cui la radiazione viene raccolta. Essa delimita l'intervallo spettrale della radiazione che può essere rivelata. Il teorema di reciprocità afferma che l'antenna si comporta nello stesso modo in assorbimento ed in emissione.

Teorema di Nyquist. Un resistore è un assorbitore di potenza elettrica e costituisce l'equivalente elettrico di un corpo nero alla temperatura termodinamica T con un singolo modo spaziale ed un singolo grado di polarizzazione. A causa del moto termico degli elettroni di conduzione, il valore quadratico medio della corrente $\langle I^2 \rangle$ è diverso da zero.

La potenza che il resistore è in grado di scambiare (emettere o assorbire) è detta potenza di rumore=

$$W d\nu = \frac{h\nu}{e^x - 1} d\nu$$

In approssimazione di R-J si ha

$$W d\nu = k_B T d\nu$$

La potenza risulta costante con la frequenza e si parla di rumore bianco.

Teorema d'antenna. Si consideri ad un resistore a temperatura T connesso ad un'antenna. Un'antenna ideale è in grado di irradiare tutta la potenza trasferita dal resistore:

$$W_{\text{out}} d\nu = k_B T d\nu$$

Si ponga l'antenna in una cavità isoterma con pareti assorbenti a temperatura T . L'antenna riceve dall'ambiente una potenza

$$W_{\text{in}} d\nu = \frac{1}{2} A \Omega B_\nu(T) d\nu = A \Omega \frac{\nu^2}{c^2} k_B T d\nu$$

In quanto si è in equilibrio termodinamico, la potenza in ingresso è uguale alla potenza in uscita. Dunque

$$k_B T = A \Omega \frac{\nu^2}{c^2} k_B T = A \frac{\Omega}{\lambda^2} k_B T \implies A \Omega = \lambda^2$$

Una relazione analoga si ottiene considerando l'angolo corrispondente al primo minimo di diffrazione per un foro circolare

$$\sin \theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

La superficie A è una superficie efficace le cui dimensioni sono paragonabili alla superficie fisica dell'antenna.

2.1 Figura d'antenna.

Definizione. L'angolo solido dell'antenna è

$$\Omega_A = \int P_n(\theta, \varphi) d\Omega$$

L'angolo solido del lobo principale:

$$\Omega_M = \int_{\text{lobo princ}} P_n(\theta, \varphi) d\Omega$$

L'angolo solido dei lobi laterali:

$$\Omega_m = \Omega_A - \Omega_M = \int_{\text{lobi lat}} P_n(\theta, \varphi) d\Omega$$

Il profilo d'antenna non è una gaussiana, ma è simile ad una figura di diffrazione: un picco centrale ed altri picchi secondari ai lati.

Definizione. L'angolo in cui la risposta si riduce a metà del massimo:

$$P_n(\theta_{\text{HPBW}}) = \frac{1}{2} P_n(0) = \frac{1}{2}$$

Il primo angolo in cui la risposta assume un valore nullo:

$$P_n(\theta_{\text{BWFN}}) = 0$$

Definizione. La direttività è il numero massimo di oggetti che possono essere risolti in un angolo solido di 4π :

$$D = \frac{4\pi}{\int P_n(\theta, \varphi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

Definizione. Il guadagno direttivo è

$$G(\theta, \varphi) = D P_n(\theta, \varphi)$$

Definizione. L'efficienza del fascio è il rapporto tra angolo solido sotteso dal lobo principale ed angolo solido totale:

$$\varepsilon_M = \frac{\Omega_M}{\Omega_A}$$

Definizione. Il fattore di dispersione è il rapporto tra angolo solido sotteso dai lobi laterali ed angolo solido totale

$$\varepsilon_m = \frac{\Omega_m}{\Omega_A}$$

Definizione. L'efficienza dell'apertura è il rapporto tra apertura efficace ed apertura fisica dell'antenna

$$\varepsilon_A = \frac{A_e}{A_p}$$

Osservazione. Per antenne e radiotelescopi ad apertura circolare, la figura d'antenna è a simmetria cilindrica cioè funzione solo della distanza θ rispetto all'asse del fascio. Per antenne con aperture rettangolari è possibile definire due assi principali e descrivere la figura di antenna attraverso il profilo lungo i due piani principali.

Il lobo principale di una figura di diffrazione è bene approssimato da una gaussiana fino ad un certo angolo.

2.2 Antenne radio

Dipolo. Un filo lungo L può essere eccitato da un campo elettrico che oscilla nella direzione del filo. Si pone

$$L = \frac{n\lambda}{2}$$

Si studia il campo prodotto da una carica che oscilla lungo il filo e si applica il teorema di reciprocità

$$P_n = \frac{\cos^2 \left[\frac{\pi}{2} \cos \theta \right]}{\sin^2 \theta}$$

Il dipolo si utilizza a distanza D da uno schermo riflettente. Per cui

$$p_n = \frac{\cos^2 \left[\frac{\pi}{2} \cos \theta \right]}{\sin^2 \theta} \sin^2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} D \sin \varphi \right]$$

Un dipolo

- è utilizzato per osservare direttamente e per raccogliere la radiazione al fuoco di un telescopio;
- è in grado di ricevere la radiazione dallo spazio e trasferirla al ricevitore attraverso un cavo RF;
- ha bassa direttività;
- ha una illuminazione non isotropa;
- può essere usato al fuoco di un telescopio con un rapporto focale basso $\frac{f}{D} \approx 0.25$.
- La risposta angolare non risulta simmetrica rispetto all'asse ottico del telescopio.

Horn. L'antenna horn è una guida che si allarga gradatamente in modo da consentire alle onde radio di avere una transizione morbida tra lo spazio libero e la regione in guida.

Un horn rettangolare si costruisce in modo che $\frac{\lambda}{2} < l_x < \lambda$ così da trasferire tutta la potenza in un singolo modo. [immagine] Le dimensioni L_x dell'apertura determinano le proprietà di diffrazione.

Per un horn circolare, il diametro del lato ricettivo dev'essere $\frac{\lambda}{2} < d < \lambda$.

2.3 Telescopi

Il telescopio è un sistema ottica in grado di formare una immagine da un oggetto posto a grande distanza. Una delle qualità di un telescopio è la capacità di raccogliere e concentrare la radiazione. Per aumentare la sensibilità del sistema è necessario concentrare la maggior quantità possibile di radiazione proveniente da una sorgente. Per poter studiare i dettagli della distribuzione di luce che si osserva occorre avere una adeguata qualità dell'immagine. L'intervallo di lunghezze d'onda che è possibile osservare con un telescopio è limitato dalle dimensioni del telescopio. Per la lunghezza d'onda massima risulta:

$$\lambda_{\max} < D$$

La lunghezza d'onda minima è fissata dalle imprecisioni della superficie del telescopio. Sia ε la rugosità RMS. L'errore di fase risulta essere

$$\delta = 4\pi \frac{\varepsilon}{\lambda}$$

Si lavora fino ad una lunghezza d'onda limite $\lambda_{\min} = 20\varepsilon$. Le dimensioni dell'apertura D del telescopio sono determinanti per la risoluzione angolare. L'angolo θ_{HPBW} che definisce l'ampiezza a mezza altezza (half power beam width), dovuto al fenomeno di diffrazione, risulta essere

$$\theta_{\text{HPBW}} \approx \frac{\lambda}{D}$$

Questo angolo, per un telescopio di focale equivalente f_{eq} , corrisponde ad una dimensione dell'immagine sul piano focale data da

$$X_{\text{HPBW}} = f_{\text{eq}} \theta_{\text{HPBW}} \approx \lambda \frac{f_{\text{eq}}}{D}$$

2.3.1 Telescopi rifrattori

Il telescopio rifrattore è stato il primo telescopio utilizzato per osservazioni astronomiche da Galileo. Esso è costituito da una coppia di lenti: un obiettivo ed un oculare. L'obiettivo è una lente di focale lunga. Si definisce l'ingrandimento angolare come il rapporto tra l'angolo β sotteso dall'immagine dell'oculare e l'angolo α sotteso dalla sorgente

$$M = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{f_c}{f_{\text{eye}}}$$

Per aumentare l'ingrandimento bisogna aumentare la focale f_C dell'obbiettivo e quindi allungare il telescopio.

I grandi telescopi sono dei riflettori a causa delle difficoltà a costruire lenti di diametro maggiore alle decine di centimetri. I rifrattori sono affetti da problemi di trasparenza del materiale attraversato dalla radiazione che causa una perdita di flusso, e da problemi di aberrazione cromatica, ovvero una variazione dell'indice di rifrazione in base alla lunghezza d'onda. Per mitigare l'aberrazione si usano sistemi acromatici formati da più lenti.

2.3.2 Telescopi riflettori

I telescopi utilizzati negli osservatori sono telescopi a riflessione. Le perdite per assorbimento sono basse: gli specchi offrono una elevata riflettività in tutto lo spettro elettromagnetico, dalla banda radio fino alla banda ottica, al limite con il vicino ultravioletto. In particolare nell'infrarosso, la trasparenza del materiale con cui tipicamente vengono prodotte le lenti non può competere. Le proprietà di riflessione degli specchi non dipendono, in prima approssimazione, dalla lunghezza d'onda. Pertanto le ottiche sono esenti dall'aberrazione cromatica. Gli specchi possono raggiungere dimensioni molto superiori a confronto con le lenti. Questo significa poter costruire telescopi di grande apertura con i quali poter raccogliere un grande flusso di fotoni. Inoltre per la costruzione degli specchi è possibile scegliere vari

materiali a seconda delle esigenze.

L'uso degli specchi consente anche di disegnare dei sistemi più compatti. Di contro, le lenti consentono di disegnare dei sistemi che si sviluppano lungo un solo asse ottico, evitando le complicazioni geometriche derivanti dalle riflessioni fuori asse degli specchi.

I riflettori vengono usati per trasformare un fronte d'onda piano in uno sferico. La radiazione proveniente da una distanza infinita e una direzione ben definita viene concentrata in un punto. Si possono usare riflettori singoli: in tal caso si pone il sistema che raccoglie la radiazione, un feed o i rivelatori, al fuoco dello specchio. Generalmente si tratta di uno specchio parabolico. Uno specchio parabolico trasforma un fronte d'onda piano perpendicolare all'asse ottico in un'onda sferica concentrata nel fuoco della parabola. I sistemi più usati sono combinazioni di due specchi, in cui feed o rivelatori vengono posti al fuoco del sistema. Le combinazioni più frequenti sono: sistemi Cassegrain e Gregoriani.

Il telescopio a singolo riflettore più usato è il paraboloide. La parabola è la superficie che coniuga un punto a distanza infinita (le sorgenti astronomiche) con un punto a distanza finita (il punto focale della curva). La superficie si ricava dalla rotazione della parabola intorno all'asse di simmetria (z). L'equazione, con l'origine nel vertice, è:

$$z = \frac{1}{R}(x^2 + y^2)$$

dove R rappresenta il valore del raggio di curvatura nel vertice. La distanza focale f è legata al raggio secondo

$$f = \frac{R}{2}$$

L'unico altro parametro che definisce le proprietà dello specchio parabolico in asse è il diametro di apertura D .

Lo svantaggio di questo sistema è che per raccogliere la radiazione nel fuoco non si può evitare di oscurare una parte della superficie. Per questo scopo spesso si utilizza una porzione di superficie fuori asse e la radiazione viene raccolta in una direzione che risulta ruotata rispetto alla direzione di incidenza. L'angolo di deviazione può essere scelto in maniera arbitraria. Un esempio particolare è quello in cui le due direzioni formano un angolo $\alpha = 90^\circ$. Se si fissa come origine il punto di incidenza dell'asse ottico con la superficie dello specchio, l'equazione risulta:

$$z = 4\sqrt{2}f + x - 4\sqrt{2}\sqrt{f^2 + \frac{fx}{2\sqrt{2}} - \frac{y^2}{16}}$$

Le proprietà ottiche della parabola derivano dalla definizione geometrica della superficie. In particolare risulta che i raggi che si propagano parallelamente alla direzione dell'asse ottico convergono, senza aberrazioni, nel punto focale. Quindi una sorgente che viene osservata in asse forma un'immagine non distorta. Se ci si sposta di poco da tale direzione si hanno delle immagini debolmente aberrate. Le aberrazioni diventano più importanti per angoli grandi rispetto all'asse ottico e per valori piccoli del rapporto focale $f_{\#} = \frac{f}{D}$, ovvero quando D è grande. Tale rapporto è una misura dell'angolo di convergenza dei raggi. Le proprietà ottiche del sistema sono molto sensibili al rapporto focale.

Lezione 4

2.3.3 Telescopi composti

I telescopi a due specchi sono più frequentemente utilizzati rispetto a riflettori singoli. Uno dei vantaggi è la compattezza, ovvero il minore spazio occupato a parità di lunghezza focale. Le superfici che si usano sono quasi sempre superfici di secondo grado: paraboloidi, ellissoidi, iperboloidi. Infatti queste superfici coniugano tra loro due punti detti fuochi.

Nel telescopio Cassegrain, il fuoco primario (del primo specchio) produce un'immagine virtuale, mentre il fuoco del secondo specchio (fuoco Cassegrain) produce un'immagine reale. Nel telescopio Gregoriano, sia il fuoco primario che il secondario producono immagini reali. Questo perché gli specchi secondari sono divergente e convergente rispettivamente. Un telescopio Newtoniano cambia solamente la direzione del fascio.

gio 20 ott
2022 10:30

2.4 Montature

Montatura alt-azimutale. Ha un asse di rotazione orizzontale che consente di posizionare l'altezza corretta sull'orizzonte ed un asse di rotazione verticale che consente di posizionare l'azimuth. È il sistema concettualmente più semplice. L'inseguimento delle sorgenti avviene attraverso la combinazione dei due movimenti. Questo sistema ottico è riferito al luogo di osservazione: risulta perfetto per le coordinate alt-azimutali.

Montatura equatoriale. Ha un asse di rotazione polare che consente di posizionare l'ascensione retta ed un asse di rotazione di declinazione che consente di posizionare la declinazione. L'asse polare punta verso il polo celeste ed ha quindi una inclinazione diversa a seconda della latitudine. Questo sistema è particolarmente indicato per inseguire un oggetto, infatti basta un solo movimento di rotazione intorno all'asse polare.

2.5 Schermi

La necessità di schermare la radiazione non voluta è presente nella banda ottica. La luce visibile che proviene da direzioni adiacenti all'asse ottico viene evitata utilizzando uno schermo le cui pareti sono nere e assorbenti.

In banda infrarossa e sub-millimetrica la necessità di una buona schermatura è ancora maggiore. Infatti tutti gli oggetti emettono radiazione termica che, a temperatura ambiente ha il suo massimo nella banda IR. Spesso l'emissione termica ambientale è di gran lunga superiore al segnale celeste che si vuole ricercare. A frequenze IR gli schermi che si utilizzano sono completamente riflettenti e quindi sono dei cattivi emettitori. La loro superficie è rivolta in modo tale da riflettere nella direzione del detector la radiazione proveniente dal cielo. Le superfici degli specchi stessi emettono radiazione. È necessario che le emissioni ambientali non producano un segnale spurio: devono essere ridotte al minimo e devono essere stabili nel tempo.

3 Ricevitori e tecniche osservative

3.1 Caratteristiche dei rivelatori

Si vedono alcune caratteristiche

- La responsività è il rapporto tra potenza in ingresso (P) e segnale elettrico in uscita (S). La responsività si misura in VW^{-1} ed è funzione della frequenza (ν). Un segnale debole è tanto più facile da rivelare, quanto maggiore è la responsività, a parità di rumore

$$S = R(\nu)P$$

- La responsività per i ricevitori radio si indica anche come guadagno. Il guadagno G si misura in V/K , o in ADU/K

$$S = G(\nu)T$$

dove T è una temperatura equivalente di brillantezza (potenza) del segnale.

- Il NEP (noise equivalent power) è la potenza di rumore equivalente alle fluttuazioni del sistema. Esso è una misura della sensibilità del rivelatore:

$$NEP = \frac{\sqrt{\langle \Delta S^2 \rangle}}{R}$$

- Per i radiometri si usa anche il NET (noise equivalent temperature), considerando la temperatura di brillantezza al posto della potenza:

$$NET = \frac{\sqrt{\langle \Delta S^2 \rangle}}{G}$$

- L'intervallo dinamico è il rapporto tra il massimo livello di segnale che può essere misurato, in regime lineare, e il minimo segnale rivelabile. Normalmente un rivelatore riesce a coprire diversi ordini di grandezza.
- Il tempo di risposta è il minimo intervallo di tempo in cui il rivelatore è in grado di seguire le variazioni di potenza in ingresso. È un parametro molto importante nelle misure di fenomeni ad elevata variabilità temporale. Questo parametro limita la frequenza di campionamento.
- La risposta spettrale è l'intervallo di frequenze in cui il rivelatore è sensibile. Uno stesso rivelatore sensibile in una banda molto ampia può essere utilizzato a diverse frequenze. È un parametro molto importante in caso si voglia fare spettroscopia.
- La linearità è la proporzionalità tra potenza radiativa osservata e segnale elettrico in uscita. È una caratteristica comoda per un rivelatore anche se può non essere essenziale se si calibra la relazione tra potenza in ingresso e segnale in uscita in tutto l'intervallo dinamico.
- L'efficienza quantica è la frazione di fotoni che viene convertita in un segnale rivelabile, ovvero rappresenta l'inverso del numero minimo di fotoni necessari a produrre un segnale rivelabile. È un parametro importante per i rivelatori quantici.
- La matrice di rivelatori determina il numero di zone di cielo indipendenti che si osservano contemporaneamente. È un parametro importante per molti rivelatori il cui scopo è fare imaging del cielo: se il numero di pixels è $\gg 1$ il rivelatore può facilmente produrre immagini.

3.2 Tipi di rivelatori

Rivelatori quantici. Ogni singolo fotone arrivando sul rivelatore produce un effetto misurabile. L'energia del singolo fotone deve essere sufficiente a far transire un elettrone tra due diversi livelli energetici. Ci sono diverse possibilità:

- viene emesso un fotoelettrone;
- un elettrone passa in banda di conduzione.

Un esempio sono i charge coupled devices (CDDs). Sono mosaici di rivelatori a stato solido a fotoconduzione. Ogni pixel del CCD ha un condensatore di integrazione ove viene accumulata la carica generata dai fotoni incidenti. La carica accumulata viene letta attraverso un sistema di trasferimento sequenziale ad un unico transistor di uscita. La zona fotosensibile è (ad es.) un cristallo di silicio drogato p con una struttura che è un condensatore metallo-ossido-semiconduttore (MOS). I fotoni assorbiti nella regione vicina all'ossido formano coppie elettrone - lacuna. Le cariche si accumulano nella regione prossima all'elettrodo. Il trasferimento di carica avviene in più tempi: la carica viene spostata lungo tutti i pixel di una riga, in fondo a cui si trova il sistema di lettura.

Rivelatori termici. I fotoni cedono energia al rivelatore sotto forma di calore. Il rivelatore è quindi sensibile all'effetto integrato di più fotoni. L'energia termica assorbita modifica alcune proprietà che inducono un segnale misurabile. Ad esempio la resistività di alcuni materiali varia con la temperatura. Questi rivelatori sono molto utilizzati nella banda delle microonde.

Un esempio sono i bolometri. I rivelatori termici hanno la capacità di essere sensibili a fotoni di energia molto bassa. Se l'energia dei fotoni diminuisce è ancora più importante ridurre il rumore termico del rivelatore. Si utilizzano infatti rivelatori raffreddati a temperature criogeniche: da 77 K (N_2 liquido) a 0.1 K (3He liquido). I bolometri si usano per rivelare fotoni di lunghezza d'onda $1\mu m \leq \lambda \leq 3mm$. Si utilizzano delle resistenze il cui valore dipende fortemente dalla temperatura. L'elemento sensibile, che possiede una certa capacità termica C , è legato ad un riferimento di temperatura attraverso una conducibilità termica G . Il bolometro viene inoltre inserito in un circuito di polarizzazione. La radiazione che colpisce il bolometro tende a farne aumentare la temperatura, facendo variare la resistenza e quindi la tensione misurata ai capi del bolometro stesso.

Rivelatori coerenti. Sono sensibili al campo elettrico incidente (ricevitori radio). Misurano intensità e fase del segnale incidente. La frequenza deve essere sufficientemente bassa da consentire ai componenti elettronici (amplificatori, filtri, etc.) di seguire le oscillazioni del campo elettrico.