

ACHILLE A. NUCITA

Appunti di astronomia

tavole astronomiche a cura di Domenico Licchelli

*A tutti i miei cari e ai miei tre amori: in ordine gerarchico Berlinda, Sara e Matteo.
E alla mia stella guida silenziosa. Ora che anche tu sei una luce del cielo, ti sento ancora più
vicina. Perdonami per non esserti stato accanto come avrei dovuto fare. Ciao mamma.*

AAN



Indice

- p. 13 Capitolo 1
Introduzione alla trigonometria sferica
- 1.1. Unità di misura degli angoli piani, 14
 - 1.2. La trigonometria sferica, 14
 - 1.3. La distanza tra due punti su di una superficie sferica, 17
 - 1.4. Trasformazioni tra sistemi di coordinate sferiche, 22
- 27 Capitolo 2
L'astronomia posizionale
- 2.1. Stelle e costellazioni, 27
 - 2.2. Orientarsi nel cielo: costellazioni guida ed allineamenti, 29
 - 2.3. Il sistema altazimutale, 31
 - 2.4. La forma della Terra, 38
 - 2.5. Il sistema orario, 42
 - 2.6. Il sistema equatoriale, 47
 - 2.7. Condizioni di osservabilità di un astro, 54
 - 2.8. Il sistema di riferimento eclittico e galattico, 60
- 63 Capitolo 3
Correzioni alle coordinate astronomiche
- 3.1. La rifrazione della luce e le coordinate apparenti di un astro, 63
 - 3.2. L'aberrazione della luce, 68
 - 3.3. La deflessione gravitazionale, 76
 - 3.4. Precessione delle coordinate equatoriali, 81
 - 3.5. Il moto proprio di un astro, 86

- p. 89 Capitolo 4
La misura del tempo
4.1. Il tempo siderale, il tempo solare vero e il tempo solare medio, 90
4.2. L'anno e il calendario, 97
4.3. La data giuliana JD e la data giuliana modificata MJD, 100
- 103 Capitolo 5
La misura delle distanze
5.1. La parallasse, 103
5.2. La distanza di un ammasso di stelle, 111
5.3. Le variabili Cefeidi e RR Lyrae, 116
5.4. La legge di Hubble ed il redshift cosmologico, 120
5.5. Le supernovae di tipo Ia, 121
5.6. Le sirene standard, 122
- 133 Capitolo 6
Principi di fotometria astronomica
6.1. La propagazione della radiazione e alcune definizioni, 134
6.2. Cenni sul corpo nero, 136
6.3. Il Sole e le stelle, 139
6.4. La scala delle magnitudini, 141
6.5. I sistemi fotometrici, 148
6.6. La magnitudine assoluta, 153
6.7. Stima della temperatura di una stella, 154
6.8. Estinzione e profondità ottica, 156
6.9. Stima del raggio di una stella: formula di Russell, 159
6.10. Stima della massa di una stella, 161
6.11. Spettri stellari, 162
6.12. La classificazione di Harvard, 167
6.13. Diagramma di Hertsprung-Russell, 169
- p. 173 Capitolo 7
Il sistema solare
7.1. Formazione del sistema solare, 173
7.2. Caratteristiche generali di pianeti, 175

- 201 Capitolo 8
Elementi di meccanica celeste
- 8.1. I sistemi binari stellari, 201
 - 8.2. Formalismo newtoniano, 204
 - 8.3. Classificazione geometrica delle orbite, 213
 - 8.4. La velocità orbitale, 216
 - 8.5. La classificazione energetica delle orbite, 222
 - 8.6. L'equazione di Keplero, 228
 - 8.7. Il problema ristretto dei tre corpi, 239
 - 8.8. Alcune applicazioni astrofisiche e astrodinamiche, 251
- 273 Capitolo 9
Esercizi in cooperazione
- 279 Letture consigliate



Lontano dalle luci della città, e in assenza di nuvole che coprono il cielo, il firmamento ci appare in tutta la sua maestosità. In questo scenario, è facile comprendere lo stupore delle antiche civiltà e come esse basarono la propria esistenza sull'osservazione delle stelle sia per scopi religiosi che per aspetti più pratici quali l'agricoltura e la navigazione in mare.

Con uomini quali Copernico, Brahe, Keplero, Galilei e Newton (che posero le basi delle leggi che governano il moto dei pianeti) l'astronomia ha cambiato ruolo passando da scienza *pratica* a scienza fondamentale grazie alla quale verificare *osservativamente* e *sperimentalmente* le nostre teorie nel più grande laboratorio mai esistito: l'Universo.

Questo testo nasce dall'esigenza di unire, in un unico raccoglitore, le lezioni di Astronomia (ed i relativi esercizi) tenute per il corso di laurea magistrale in fisica presso il Dipartimento di matematica e fisica "Ennio de Giorgi" dell'Università del Salento. Ovviamente il libro non riguarda tutti gli aspetti dell'astronomia, ma argomenti selezionati in modo da permettere a chi si avvicina alla disciplina di coglierne l'essenza.

Un doveroso ringraziamento è rivolto a tutti i colleghi del gruppo di astrofisica (Francesco Strafella, Francesco De Paolis, Gabriele Ingrosso e Vincenzo Orofino) per gli

incoraggiamenti durante la scrittura e agli ex studenti che hanno letto la prima stesura del libro contribuendo ad essa con numerosi commenti.

Ringrazio infine Domenico Licchelli con il quale condivido parte della mia attività di ricerca. Domenico, con perizia professionale e con tante ore passate al telescopio, ha fornito nel corso degli anni non solo dati importanti ma anche le immagini astronomiche riportate in questo testo.

Siate critici e non limitatevi ad una lettura superficiale. Se alcuni punti dovessero risultare oscuri, allora il mio sforzo di rendere la trattazione accessibile a tutti non è stato sufficiente. Solo discutendone insieme potremo raggiungere una versione comprensibile veramente da tutti.

Achille A. Nucita

La fotografia astronomica nasce come necessità scientifica, principalmente per slegare l'osservazione e l'analisi dei corpi celesti dall'acuità visiva e dalla capacità descrittiva dell'osservatore. Assolve anche al fondamentale compito di conservare memoria nel tempo dei fenomeni astronomici. Permette, inoltre, analisi e studi successivi alla luce delle maggiori conoscenze acquisite nel frattempo. Si pensi, per esempio, alle lastre fotografiche conservate negli archivi dei grandi osservatori astronomici del passato che ancora oggi riservano meravigliose sorprese agli studiosi. Tuttavia, la fotografia astronomica ha anche una straordinaria peculiarità rispetto alle altre forme di fotografia scientifica: la sua straordinaria bellezza estetica. Che si tratti di riprese di stelle, pianeti o galassie il fil rouge che le unisce è una prorompente valenza artistica che facilita enormemente la comunicazione e la didattica dell'astronomia presso il grande pubblico. Le riprese qui allegate sono state ottenute con strumentazione oramai alla portata di qualunque appassionato che possieda un buon bagaglio teorico ed un minimo di esperienza nel processing di immagini digitali. Al di là della funzione didattica ci auguriamo che possano anche essere motivo di ispirazione e di approfondimento delle tematiche trattate, certi che una maggiore conoscenza porterà con sé il piacere di nuove scoperte.

Domenico Licchelli



Capitolo 1

Introduzione alla trigonometria sferica

L'astronomia (dal greco $\alpha\sigma\tau\rho\omicron\nu$ – astro – e $\nu\omicron\mu\omicron\sigma$ – legge –) è la scienza che studia le posizioni relative ed il moto degli astri.

Quando si osservano le stelle nel cielo si ha l'impressione che esse siano dei punti luminosi fissi su di una superficie sferica, la sfera celeste, avente un raggio indeterminato e con l'osservatore posto al suo centro. Anche se le osservazioni ad occhio non permettono di stimare alcuna distanza lineare delle stelle da noi, è sempre possibile determinare, talvolta con grande precisione, la distanza angolare tra due oggetti generici. L'astronomia sferica è quindi quella parte dell'astronomia che tratta principalmente della misura delle distanze angolari sulla sfera celeste rispetto ad un dato sistema di riferimento. Nei prossimi paragrafi si daranno alcune definizioni e si richiamerà un certo numero di relazioni della trigonometria sferica.

1.1 Unità di misura degli angoli piani

Gli angoli piani sono generalmente misurati in radianti¹ o, come accade tradizionalmente in astronomia, nelle unità *sessagesimali* di grado (⁰), primo ([']) e secondo (^{''}). In questo modo, dato che π radianti corrispondono a 180^0 , si può passare tra le diverse unità attraverso una semplice proporzione. In pratica si possono usare le seguenti conversioni

$$R^0 \simeq 57^0.2957795, \quad R' \simeq 3437'.74677, \quad R'' \simeq 206264'' .806, \quad (1.1)$$

dove i tre numeri R^0 , R' , e R'' equivalgono ad 1 radiante. Quindi, ad esempio, per convertire un angolo espresso in radianti $\theta(rad)$ in secondi d'arco è sufficiente eseguire l'operazione $\theta'' = \theta(rad)R''$.

Molto spesso, al posto dell'unità radiante, si può misurare un angolo in ore, relativi sottomultipli. In particolare, l'angolo giro è suddiviso in 24 ore, ciascuna delle quali è formata da 60 minuti, ciascuno dei quali caratterizzato da 60 secondi. Segue quindi che

$$\begin{aligned} 24^h &= 360^0 = 2\pi \text{ rad}, & 1^h &= 15^0 \simeq 0.26179935 \text{ rad}, \\ 1^m &= 15' \simeq 0.00436332 \text{ rad}, & 1^s &= 15'' \simeq 0.000072722 \text{ rad}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Nel corso del testo si farà un uso molto frequente delle trasformazioni date senza dover necessariamente ricorrere alle proporzioni mostrate in precedenza.

1.2 La trigonometria sferica

La sfera è il luogo geometrico dello spazio cartesiano tridimensionale equidistante da un punto (centro). Sia data una sfera di raggio unitario; le aree su di essa sono espresse in *steradiani* (sr) o in gradi quadrati di modo che l'area di tutta la sfera è 4π sr = $4\pi(360/2\pi)^2 = 129600/\pi \simeq 41252.96125$ gradi quadrati. Da ciò si ricava che 1 sr = $32400/\pi \simeq 3282.80635$ gradi quadrati.

Si consideri una sfera² di raggio arbitrario R e centro O come data in Figura 1.1.

¹Si ricordi che il radiante è per definizione l'angolo sotteso al centro di una circonferenza da un arco di lunghezza pari al raggio. Per maggiori dettagli sulle relazioni della trigonometria piana si rimanda a testi specializzati.

²In questo testo, e con riferimento alla Figura 1.1, un qualsiasi cerchio giacente su di una sfera è indicato da una terna di lettere come ABA' ad indicare che il cerchio passa per i punti A, B e A'. Con la notazione del tipo \widehat{POA} si indica l'angolo al vertice O. Con la notazione \widehat{CD} si indica un arco di estremi C e D. Una coppia di lettere (come nel caso di OP e CD) o anche una sola lettera (ad esempio δ) indica la lunghezza di un segmento o un arco dipendendo dal contesto.

Ogni piano passante per il centro della sfera interseca la superficie in un cerchio detto *cerchio massimo*. Al contrario, ciascun piano non passante per il centro della sfera interseca la superficie in un *cerchio minimo*. Il cerchio $B'AB$ è un cerchio massimo in quanto passante per il centro della sfera, ed è assunto come cerchio di riferimento detto *equatore*.

Sia PQ il diametro della sfera, perpendicolare al piano contenente $B'AB$ e sia R un suo punto generico. I punti P e Q sono detti poli, rispettivamente, Nord e Sud. Tutti i cerchi massimi giacenti in piani perpendicolari a quello contenente l'equatore sono detti *meridiani*.

Si consideri il piano passante per R e perpendicolare al diametro PQ ; la superficie della sfera è quindi intersecata nel cerchio minimo CDC' . Tutti i cerchi minimi giacenti in piani paralleli a quello contenente l'equatore sono detti *paralleli*.

Il cerchio massimo PCQ passa per i poli P e Q ed interseca il cerchio minimo CDC' in C ed il cerchio massimo $B'AB$ in A . Quando due cerchi massimi (quali PAQ e PBQ) si intersecano in un punto (in questo caso P) si dice che essi includono un certo angolo sferico definito nel seguente modo.

Si tracciano ora le rette tangenti (aventi versori \hat{PS} e \hat{PT}) ai due cerchi massimi considerati nel loro punto di intersezione. Per costruzione il versore \hat{PT} è parallelo al raggio OB in quanto giace nel piano POB ed è perpendicolare al diametro PQ . Analogamente, il versore \hat{PS} è parallelo al raggio OA .

Possiamo quindi definire l'angolo sferico tra i cerchi massimi PAQ e PBQ come l'angolo \widehat{SPT} incluso tra le due tangenti ai due meridiani nel punto P . Ovviamente, $\widehat{SPT} = \widehat{AOB}$ e quindi l'angolo può essere definito anche come diedro tra i due piani meridiani contenenti i cerchi massimi considerati.

N Un cerchio massimo è generato dall'intersezione di una sfera con un piano passante per il suo centro. Un cerchio minimo è invece generato da un piano non passante per il centro della sfera.

Dati quindi tre punti sulla superficie sferica, essa può essere sempre bisecata da un piano tale che i tre punti giacciono nello stesso emisfero. Se i tre punti sono uniti da archi di cerchio massimo, la figura ottenuta si chiama *triangolo sferico*. Analogamente, e con riferimento alla Figura 1.2, tre cerchi massimi che si intersecano dividono la sfera in otto porzioni. Diremo triangolo sferico quella porzione i cui tre lati sono ciascuno minore di π o, in altre parole, quella parte tutta contenuta in un solo emisfero.

Ad esempio i punti P , A e B sulla superficie sferica sono i vertici del triangolo sferico PAB in quanto i tre punti dati giacciono su tre cerchi massimi. Al contrario,

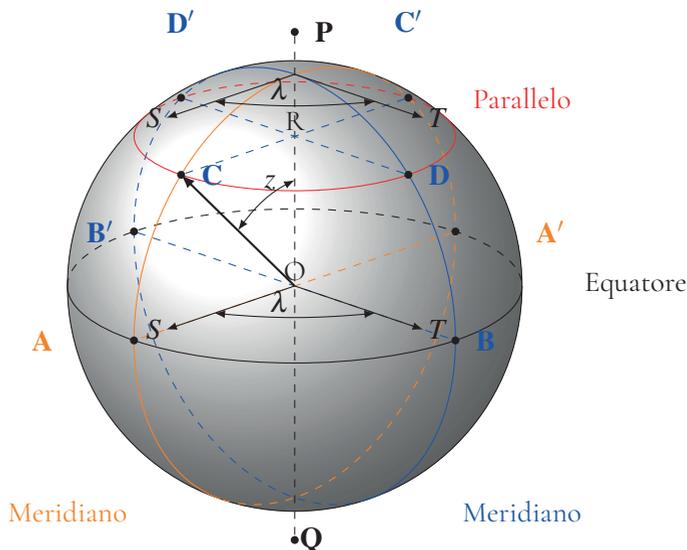
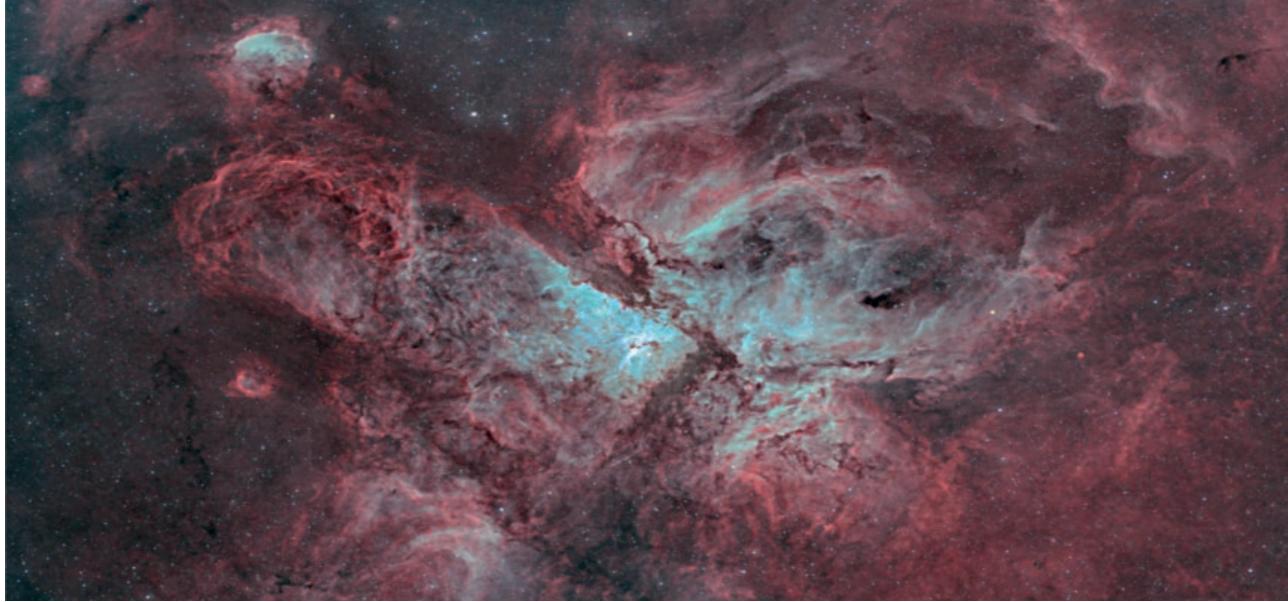


Figura 1.1: Rappresentazione dei cerchi massimi e minimi su di una sfera di raggio generico R e centro O .

la regione sulla superficie sferica delimitata dai punti P , C e D non rappresenta alcun triangolo sferico in quanto l'arco CD è un arco di cerchio minimo e non massimo. In questo caso la lunghezza dell'arco \widehat{PA} è $PA = R\widehat{POA}$, dove l'angolo \widehat{POA} è l'angolo (misurato in radianti) sotteso dall'arco considerato come visto dal centro della sfera O . Poiché il raggio della sfera è costante, e nel caso della sfera celeste completamente indeterminato, possiamo porre in tutta generalità $R = 1$, di modo che la misura dell'arco \widehat{PA} sia semplicemente la misura dell'angolo sotteso al centro \widehat{POA} . In questo modo, se PA è, ad esempio, $1/8$ della circonferenza del cerchio massimo passante per P e A , l'angolo \widehat{POA} è di $\pi/4$. Nella figura si ha, ovviamente, $\widehat{POA} = \pi/2$ si dice quindi che PA , PB e AB misurano $\pi/2$ radianti ad indicare sia la misura dell'angolo che quella della misura dell'arco associato. Infatti molto spesso si usa la stessa notazione per indicare sia la lunghezza dell'arco che la misura dell'angolo sotteso al centro della sfera: nella Figura 1.2, si mostrano le convenzioni usate generalmente per indicare i vertici e i lati di un triangolo sferico.



Capitolo 2

L'astronomia posizionale

Di notte le stelle sembrano essere proiettate su di una sfera (la sfera celeste) di raggio indeterminato. L'osservatore ha quindi l'impressione di essere posizionato al centro della sfera ma la superficie solida della Terra impedisce di vederla nella sua totalità. La sfera celeste appare poi ruotare da Est ad Ovest (a causa della rotazione diretta della Terra) intorno ad un asse passante per i poli celesti (Nord e Sud) e detto *asse del mondo*. L'asse del mondo è perpendicolare al piano equatoriale terrestre che, se esteso all'infinito, interseca la sfera celeste *nell'equatore celeste*. L'astronomia posizionale si occupa della determinazione delle coordinate delle stelle sulla sfera celeste utilizzando, di volta in volta, il sistema di riferimento più adatto al problema considerato.

2.1 Stelle e costellazioni

Guardando di notte la sfera celeste, le stelle sembrano essere proiettate su di essa senza avere alcuna possibilità di determinarne la distanza. Esse appaiono quindi come dei semplici punti luminosi e, in condizioni ottimali e con una buona vista, se ne possono contare sino a 6000 in tutto il cielo. Alcuni insiemi di stelle sembrano formare

figure geometriche che ricordano vagamente qualcosa di familiare. Nella tradizione comune questi agglomerati di punti luminosi sono chiamati *costellazioni* e a ciascuna di esse è associato un nome mitologico o un riferimento a qualche animale o strumento. Ovviamente, le costellazioni sono solo il prodotto dell'immaginazione umana e vedere nel cielo la forma stilizzata di un animale non è né più né meno che quello che accade *quando si uniscono i punti dei giochi di enigmistica e si osserva l'immagine finale*. A prova di ciò il fatto che culture diverse hanno costellazioni differenti dipendendo dalla loro mitologia.

Nonostante la scarsa valenza dal punto di vista scientifico, le costellazioni sono utili per poter riconoscere facilmente le differenti regioni del cielo. Tuttavia i nomi e i confini delle costellazioni erano abbastanza ambigui sino all'inizio del '900. Successivamente l'Unione Astronomica Internazionale (IAU) ne ha fissato un elenco univoco.

In particolare i confini delle costellazioni sono stati stabiliti considerando delle linee di ascensione retta e declinazione costanti¹ fissate per l'epoca 1875. A partire da questa data, la precessione degli equinozi ha modificato sostanzialmente il cielo, ma i contorni di una costellazione sono rimasti fissi rispetto alle stelle che vi appartengono. Senza considerare i moti propri delle stelle che potrebbero farle muovere apparentemente oltre i contorni di bordi fissati, gli oggetti che sono considerati come facenti parte di un dato settore del cielo ne faranno parte per sempre.

La IAU riconosce 88 costellazioni², in tutto il cielo. A ciascuna costellazione è associato un certo numero di stelle. Al nome di ogni stella di una data costellazione, seguendo un'antica tradizione e salvo alcune eccezioni³, è associata una lettera greca in modo che la stella indicata con α sia la più luminosa dell'insieme. A lettere successive corrispondono le stelle (della stessa costellazione) che appaiono meno luminose all'occhio nudo.

¹Nel seguito verrà data una definizione rigorosa di ascensione retta e declinazione nell'ambito della definizione del sistema di riferimento equatoriale.

²Delle 88 costellazioni della sfera celeste, solo una parte (circa i 2/3) è osservabile dalle latitudini italiane e di queste solo poche (come il Leone, lo Scorpione o Orione) sono facilmente riconoscibili anche ad un occhio non esperto. Infatti la maggior parte delle costellazioni è formata da stelle deboli (come Ercole, Ofiuco, o la costellazione della Lince) tanto da essere osservabili solo in luoghi particolarmente bui. Le costellazioni del cielo sono così divise: 18 costellazioni boreali (emisfero settentrionale), 34 costellazioni equatoriali e 36 costellazioni australi (emisfero meridionale). Storicamente le costellazioni si dividono in due grandi gruppi: le 12 costellazioni dello Zodiaco che sono disposte lungo l'eclittica e chiamate in questo modo dai Greci (intorno al I secolo d.C.). A queste si aggiungono le 26 costellazioni elencate da Tolomeo nel suo *Almagesto* (II secolo d.C.). Le costellazioni iniziali di Tolomeo divennero poi 38 dopo la divisione della Nave di Argo in tre costellazioni distinte (la Carena, la Poppa e le Vele).

³Le stelle della costellazione nota come *il Grande Carro* sono etichettate a seconda dell'ordine in cui esse compaiono.

All'aumentare del numero di stelle osservate, il metodo descritto è diventato ben presto impraticabile. Oggi ad ogni nuovo oggetto osservato si preferisce associare un nome caratterizzato dalle iniziali del catalogo in cui è riportata l'osservazione e dalle coordinate (ad esempio equatoriali) dell'oggetto in questione.

2.2 Orientarsi nel cielo: costellazioni guida ed allineamenti

Il problema principale affrontato da ogni astronomo (o astrofilo) alle prime armi è quello di identificare una stella o una costellazione sulla sfera celeste e, eventualmente, ritrovarla nelle notti successive. Questa operazione è solitamente fatta usando alcune costellazioni facilmente riconoscibili per la loro forma e per essere costituite da stelle particolarmente brillanti e sfruttando allineamenti geometrici.

Il primo passo da seguire è, ovviamente, stabilire la propria orientazione rispetto ai punti cardinali e ricordare che basta trovarne uno per identificare univocamente gli altri sull'orizzonte.

Ad esempio, in prima approssimazione, si potrebbe usare una bussola il cui ago si orienta verso Nord magnetico che dista da quello geografico una quantità (detta *declinazione magnetica*) dipendente dalla posizione sulla superficie della Terra e dal tempo. La declinazione è calcolabile in base ai dati del NOAA (acronimo di National Oceanic and Atmospheric Administration) che studia il modello del campo geomagnetico terrestre. Ad esempio, per le tipiche longitudini in Italia la declinazione è di circa qualche grado a Est rispetto alla posizione del Nord geografico vero. D'altra parte si potrebbero osservare i punti di levata e di tramonto del Sole e identificare, rispettivamente, i punti cardinali Est e Ovest: in questo caso si deve però ricordare che i punti di levata e tramonto coincidono con l'Est e l'Ovest solo agli equinozi e che negli altri periodi dell'anno il Sole appare più spostato a Nord o a Sud a seconda della latitudine del posto di osservazione. In alternativa si potrebbe osservare l'ombra proiettata dal Sole al mezzogiorno vero del posto di osservazione e identificare la direzione Nord-Sud. Come si vedrà in dettaglio successivamente, il mezzogiorno locale equivale alle ore 12 (o 13 quando è vigore l'orario legale in estate) più o meno $\simeq 4$ minuti⁴ per ogni grado a Ovest o a Est rispetto al meridiano dell'Europa centrale che, nel caso dell'Italia, passa approssimativamente per il vulcano Etna e per la città di Termoli, in Molise.

Una volta identificati i punti cardinali, si può procedere a identificare le stelle di interesse. A tale scopo occorre a) essere in un luogo di osservazione con un orizzonte

⁴Il Meridiano dell'Europa centrale si trova a $\simeq 14.99^0$ di longitudine Est (rispetto al meridiano di riferimento di Greenwich). Ad esempio, Lecce si trova a $\simeq 3.18^0$ a Est rispetto al meridiano dell'Europa centrale e quindi, con in vigore l'orario solare, il mezzogiorno vero locale avviene circa alle ore 11 : 48.

