

montatura → telescopio, coordinate astronomiche, cupola. Parte meccanica del telescopio dedicata alla movimentazione del tubo ottico per l'inseguimento di oggetti celesti secondo la loro diversa velocità annullandone l'apparente moto nel corso dell'osservazione.

La montatura deve obbedire al requisito della rigidità, i frizionamenti fra le masse debbono essere ridotti senza nulla concedere alla stabilità strumentale, per evitare qualsiasi stress meccanico altrimenti notevole in telescopi anche con obiettivi di soli 300 mm di diametro che non appartengano alla categoria dei «giocattoli»; di conseguenza negli strumenti in cui il tubo ottico abbia dimensioni superiori al metro (e l'obiettivo sia quindi di una buona lunghezza focale) particolare accortezza va usata nella scelta dei materiali per evitare che le escursioni termiche possano variare sensibilmente la distanza fra le componenti ottiche di primo e secondo ordine: obiettivo e oculare o sistema elettronico di ripresa.

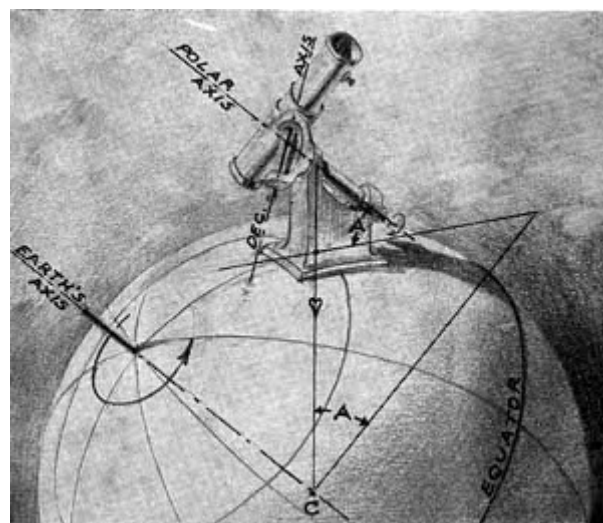
Tecnicamente una montatura, trascurando il pilastro (supporto) ove posa, si compone di tre parti: a) un sostegno suscettibile di microaggiustamenti in piano (sistemazione a bolla) o in declinazione a seconda del tipo di montatura (altazimutale o equatoriale) con un breve *excursus* di gradi per aggiustamenti alla latitudine locale in quest'ultimo caso. Sul sostegno è installato l'*asse orario* destinato all'inseguimento siderale (da Est ad Ovest) che sostiene a sua volta b) l'*asse secondario* o di *declinazione* strumentale a questo ortogonale; c) un tubo o traliccio metallico che asserva la componente ottica alle due movimentazioni: oraria e in declinazione. Completano la montatura varie parti meccaniche addette al trascinamento (ruote dentate e viti senza fini o rulli a frizione), cuscinetti a sfera e a rulli, frizioni, blocchi, regolazioni fini nonché la motorizzazione per il puntamento rapido dell'oggetto ed il suo inseguimento.

Le parti maggiormente soggette a sollecitazione meccanica vanno costruite in ferro e l'alluminio usato nelle parti ove la tensione meccanica è moderata, mai per gli assi per i quali occorre ricorrere ad acciaio di qualità. Telescopi costruiti in multistrato o addirittura in cartone pressato come i diffusissimi → dobson non appartengono alla categoria degli strumenti con i quali si possa svolgere ricerca, e qui non saranno trattati.

Particolare attenzione va posta a che tutte le parti della montatura abbiano una frequenza di risonanza estremamente bassa: il valore ottimale è inferiore ai 10 Hz: essendo notevoli le masse in gioco, è necessario evitare specie nelle montature altazimutali soggette a bruschi e notevoli mutamenti di velocità, che l'intera massa strumentale inizi a vibrare per le sollecitazioni cui è sottoposta, sollecitazioni che diventano un problema quando si tratta di muovere qualche tonnellata e anche più. Per evitare che la montatura entri in risonanza comportandosi in modo elastico, secondo i principi di costruzione meccanica le strutture più imponenti presentano nei punti di massima sollecitazione strutture secondarie di rinforzo atte ad interrompere la continuità della tensione di lavoro.

In un telescopio la montatura non assolve un ruolo inferiore all'ottica che rappresenta il cuore dello strumento. Avere un'ottica eccellente su un supporto meccanico che non sia in grado di compiere ogni movimento senza che la minima vibrazione si trasmetta alla parte ottica è perfettamente inutile: le immagini risulteranno traballanti, afflitte da un tremolio costante, rendendo inutile qualsiasi attività.

▼ Modalità di lavoro di una montatura equatoriale; disegno di R. Porter da *Amateur Telescope Making* [7, volume I, pag. 23]



- *Evoluzione delle montature*
- *Tipologie di montature*
 - ▶ *Montature equatoriali*
 - ▶ *Montatura altazimutale*
 - ▶ *Montatura alt-alt*
 - ▶ *Montature sperimentali*
 - ▶ *Montatura per telescopi solari: rinvio*
- *Il tubo ottico*
- *Motorizzazione*
 - ▶ *Trasmissione del moto*

■ *Evoluzione delle montature.* Sin dall'applicazione galileiana all'indagine astronomica delle proprietà delle lenti rifrangenti, il primo supporto strumentale per l'osservazione (e l'inseguimento) di un corpo celeste fu a lungo altazimutale. L'osservatore doveva muovere in continuazione lo strumento in azimuth (da Est ad Ovest) ed in declinazione dall'orizzonte al massimo punto di altezza dell'astro (e viceversa), a seconda che l'oggetto fosse transitato o meno al meridiano locale. Il continuo aggiustamento delle posizioni disturbava l'osservazione, ed oltretutto il cannocchiale veniva allora poggiato su un sostegno assai poco stabile, e svolgendosi le osservazioni all'aperto era sufficiente un soffio di vento per dover iniziare di nuovo l'allineamento con il corpo osservato ed il suo inseguimento: vedi immagine sub lemma G. Galilei.

Anche quando si passò a strumenti di notevole lunghezza focale (vedi immagine a pagina ??), si continuò a pensare al supporto altazimutale (il termine montatura è ancora improprio) come il più immediato e facile da costruire anche se ci si doveva rendere conto che il metodo non era certo il più efficace.

Tavole equatoriali come il → torquetum esistevano da tempo, erano descritte e studiate, ne erano conosciute le proprietà, quindi si trattava soltanto di trovare un metodo per applicare ad esse, previa debita modifica, la nuova strumentazione d'osservazione che non esauriva più la sua funzione nel mirare un oggetto misurandone le coordinate come con il quadrante, bensì nello studio dettagliato dei corpi celesti per la prima volta notevolmente ingranditi: di conseguenza la minima imperfezione strumentale amplificava l'errore di inseguimento (stellare o planetario).

Era quindi necessario rendere, in qualsiasi località ci si trovasse, l'asse orario parallelo all'asse terrestre, visto che la coincidenza con questo era impossibile da ottenere, inclinandolo in gradi del-

lo stesso valore della latitudine locale: *vedi* disegno nella pagina precedente. In questo modo, una volta determinata la declinazione dell'astro, essa sarebbe rimasta fissata per l'intera durata dell'osservazione, e l'inseguimento stellare o planetario sarebbe stato cura del solo asse orario mentre eventuali aggiustamenti dovevano essere imputati o ad un non perfetto allineamento col polo celeste o a residue imperfezioni strumentali.

Il ricorso alla montatura equatoriale se era ottimale per disegnare i corpi celesti, divenne d'obbligo con l'avvento della fotografia e l'applicazione di essa all'astronomia. Costruire montature altazimutali sarebbe stato più semplice che costruirne di equatoriali, ma c'era da evitare il problema cui queste ultime sono soggette: la rotazione di campo e l'inaccessibilità al polo (*infra*).

■ *Tipologie di montature.* Le montature dei telescopi si dividono nelle due famiglie principali degli equatoriali e degli altazimutali con varie sottospecie per gli equatoriali; esiste inoltre una quantità innumerevole di varianti sperimentate nel tempo che appartengono alla categoria che gli anglosassoni chiamano *unusual telescope*, ma le principali, e più diffuse, sono quelle qui esaminate.

Entrambe le famiglie lavorano sui due assi, ciò che muta è solo la declinazione strumentale: fissa nel caso delle montature equatoriali, variabile nel caso delle montature altazimutali. Per strumenti di grosse dimensioni entra in gioco anche la configurazione ottica e diverse sono le soluzioni da adottare se la montatura è funzionale a un rifrattore o a un riflettore, variabili ancora se la configurazione è → newtoniana, cassegrain, couder, nasmyth. Un telescopio riflettore nasce generalmente almeno con due configurazioni: newton e cassegrain o newton e ritchey-chretien, e la sua montatura deve essere in grado di soddisfare questi requisiti rispetto alle focali di lavoro. Montature finalizzate a particolari osservazioni come gli strumenti dei passaggi, il tubo zenitale, l'eliostato sono trattate ai relativi lemmi.

► *Montature equatoriali.* Storicamente il merito della prima montatura equatoriale è riconosciuto al tedesco J. van Fraunhofer, la cui realizzazione è mostrata a pagina ??; un precedente tentativo di Newton relativo al suo telescopio riflettore (una sfera che supporta il tubo ottico in un alloggiamento concavo) non è da prendere in considerazione, essendo una variante di comodo dell'altazimutale: *vedi* immagine *sub* lemma Newton.

Come si nota dal disegno di R. Porter nell'immagine riprodotta nella pagina precedente l'asse orario, inclinato della latitudine del luogo, rende la montatura parallela all'asse terrestre; l'intero strumento punta quindi il polo Nord celeste nell'emisfero boreale e quello Sud se nell'emisfero australe. Una volta ricavata la declinazione del corpo in osservazione, lo strumento viene bloccato in quella posizione tramite una frizione che consente piccoli aggiustamenti. A questo punto, in qualsiasi montatura equatoriale, lavora solo l'asse orario dal sorgere al tramontare dell'astro senza che siano necessari ulteriori interventi, tranne che in alcuni tipi di cui si dirà ove al transito dell'oggetto al meridiano occorre riposizionare lo strumento.

• *Alla tedesca, o di Fraunhofer.* La montatura tedesca (o di Fraunhofer) così chiamata in onore del suo ideatore, presenta l'asse di declinazione innestato direttamente sull'asse orario: *vedi* immagine in questa pagina. Talvolta il telescopio, per motivi di bilanciamento ed ingombro e specie se di lunga focale, si trova abbastanza distanziato dall'asse orario per evitare che durante il lavoro in prossimità dello zenith la parte terminale del tubo ottico vada ad urtare il pilastro che sostiene la montatura. I contrappesi sempre presenti servono a bilanciare la parte strumentale. La montatura non avendo alcuna componente che

▼ Montatura tedesca: rifrattore da 500 mm, Oakland, California



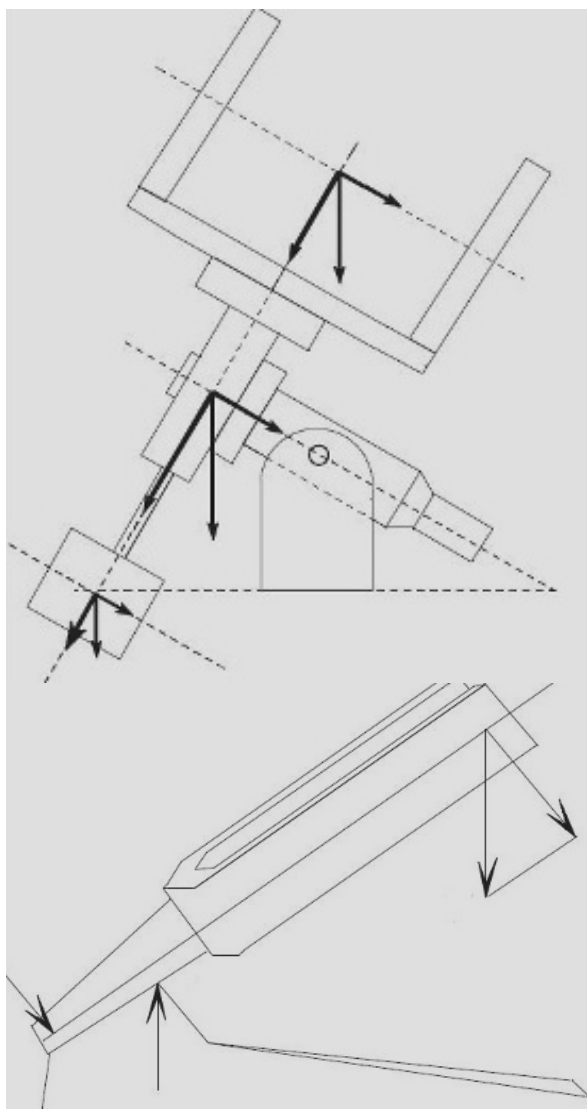
ostruisca il tubo ottico concede l'accessibilità al polo, non tipica di tutte le montature (equatoriali e no).

Il vantaggio della montatura tedesca è la sua estrema semplicità costruttiva, richiedendo soltanto un pilastro per essere posizionata. Per contro essa presenta svantaggi non indifferenti: a) al crescere della massa strumentale cresce proporzionalmente la massa passiva di contrappeso necessaria a bilanciare lo strumento, quindi l'asse orario e quello di declinazione vanno sovradimensionati notevolmente per evitare flessioni; b) l'ingombro in cupola è notevolmente più ampio rispetto a qualsiasi altro tipo di montatura equatoriale perché sia che il telescopio si trovi puntato verso Est che verso Ovest, esso deve poter ruotare liberamente: si vedano le immagini relative alle notevoli cupole degli osservatori di Lick, Meudon e Yerkes, il tubo ottico di quest'ultimo superava i 15 m in lunghezza, nonché il disegno a pagina ?? per lo spazio libero che essa richiede; c) il centro gravitazionale è spostato all'estremità superiore dell'asse orario fuori dal baricentro ideale (immagine a fronte); d) la reversibilità degli assi.

La *reversibilità degli assi* è un problema che la montatura tedesca presenta per oggetti ad Est prossimi al loro transito al meridiano e che è comune anche ad un tipo di montatura inglese: *infra*. Per la sua stessa configurazione infatti la montatura tedesca non è in grado di seguire l'oggetto una volta che esso sia transitato al meridiano, in sostanza lo perde.

Per continuare l'osservazione bisogna sbloccare gli assi orari e di declinazione, ruotare l'asse orario di 12 h e l'asse di declinazione di 180°, effettuare di nuovo il posizionamento strumentale (declinazione ed angolo orario), e quindi riprendere l'osservazione. Questo rappresenta un serio problema nel caso di fotografia

▼ Geometria delle diverse forze vettoriali in una montatura tedesca ed in una montatura afarcella; fonte



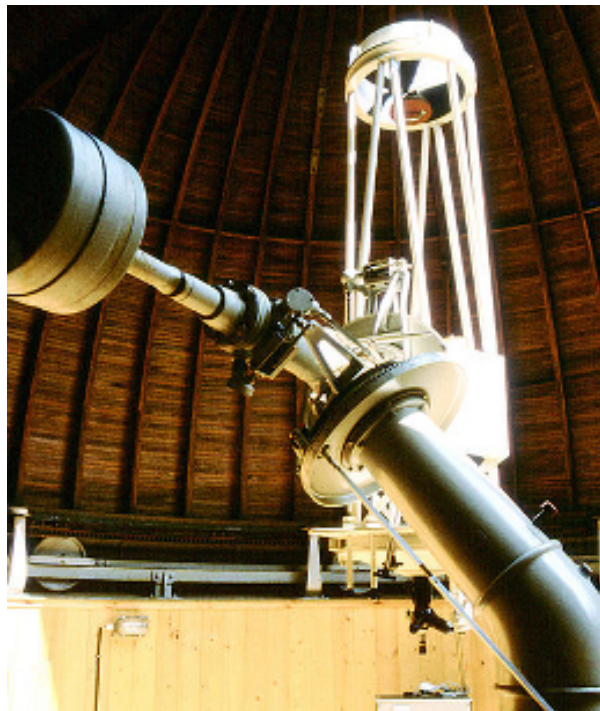
o spettroscopia perché ovviamente al fuoco del telescopio si ha un rovesciamento del campo di 180° (le 12 h) e se l'oggetto è prossimo al transito nel caso siano previste lunghe pose occorre attendere per poterlo seguire con il telescopio dal lato Est: gli oggetti ad Est del meridiano si osservano con il telescopio dalla parte Ovest e viceversa.

Questa montatura sempre amata dalle associazioni amatoriali per la sua elementarietà costruttiva, qualche anno fa aveva avuto un momento di crisi in quanto non permetteva osservazioni in automatico ed in remoto appunto per il problema della reversibilità degli assi al meridiano; il successivo sviluppo di pacchetti software e di elettronica dedicata che trattano automaticamente il problema l'ha presto riportata in auge.

- **Astrografica.** Detta anche parallattica, la montatura fu concepita per unire i vantaggi della montatura tedesca e di quella inglese. La montatura ha il proprio centro gravitazionale assai al di fuori del pilastro di supporto come si vede dall'immagine in questa pagina) e non presenta il problema della reversibilità degli assi al meridiano e quindi permette riprese fotografiche senza interruzione per oggetti in prossimità di transito.

Non applicabile ai telescopi a lunga focale appunto perché il centro gravitazionale dello strumento è lontano dal supporto che può flettere quando si trovano applicate grandi masse, la

▼ Montatura astrografica. Riflettore da 500 mm, osservatorio di Jena



montatura ebbe una discreta fortuna all'epoca della stesura della Carte du Ciel, ma risulta adatta solo a piccoli strumenti.

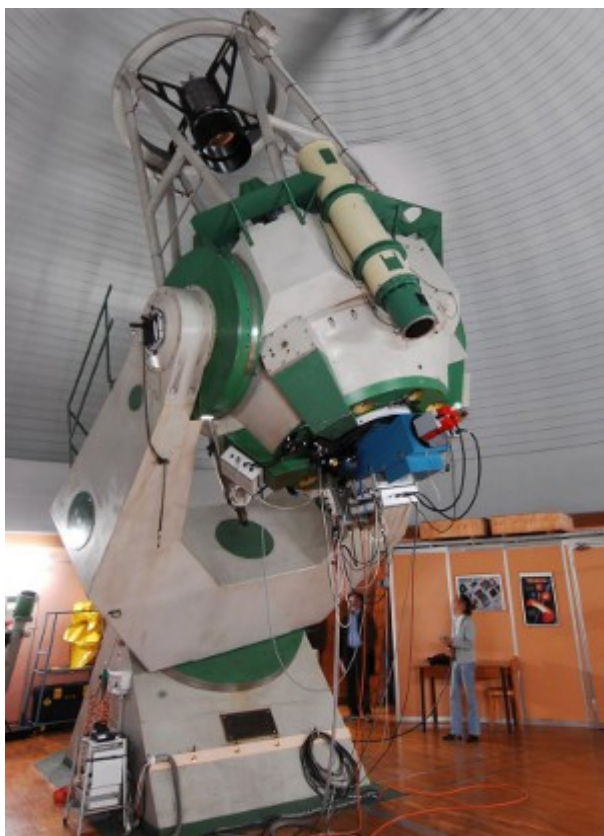
Occorre precisare che il risolto problema della reversibilità degli assi esige una condizione, e cioè che il braccio polare di supporto inclinato della latitudine del luogo, sia di lunghezza maggiore della metà della lunghezza del telescopio installato. Simile a questa è la montatura → Stützmontierung ideata da A. Jensch.

- **A forcella.** La montatura è un'evoluzione di quella tedesca e si risolve essenzialmente nell'innestare sull'asse orario, anziché un asse di declinazione, una forcella su cui è posizionato un tubo ottico regolabile in declinazione. La configurazione meccanica elimina il problema della reversibilità degli assi al meridiano, potendo inseguire un oggetto con continuità dal sorgere al tramonto, e il polo è accessibile: nella pagina seguente *sub (a)*.

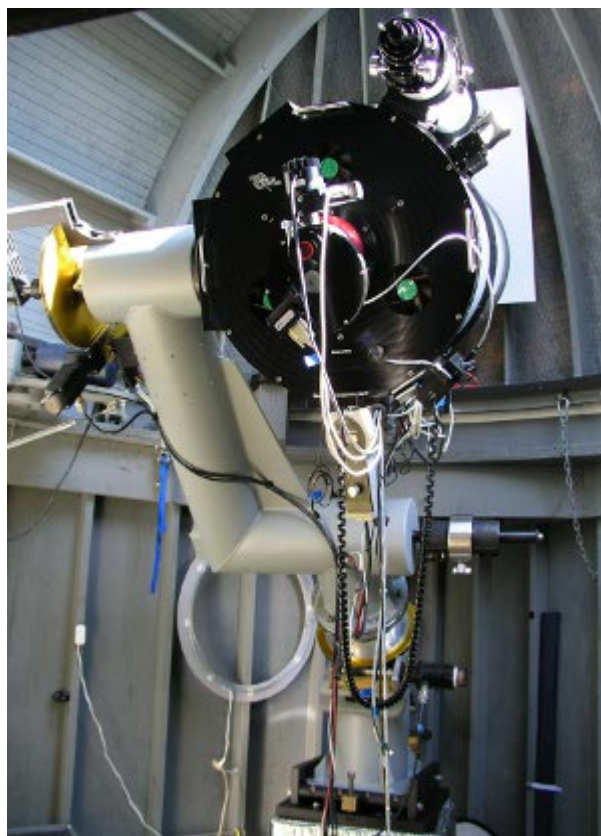
Gli svantaggi dipendono dalla mole, in quanto, agli assi ortogonali, la montatura perde la compattezza della tedesca, e – soprattutto – dal fatto che le masse si trovano a gravitare tutte molto al di fuori dell'estremità superiore dell'asse polare, tanto più notevoli quanto maggiori sono le dimensioni strumentali. L'asse orario deve essere infatti di diametro proporzionato al carico da sostenere per ridurre al minimo la spinta gravitazionale e torsionale cui è sottoposto evitando flessioni anche minime. Sopra i due metri la montatura comincia a dare seri problemi ai quali si è cercato di dare una soluzione rendendo l'asse orario solidale con un disco di diametro eguale almeno alla larghezza della forcella che poggia su rulli in modo da distribuire la massa all'estremità dell'asse: una soluzione tipo quella Porter (*infra*) adottata per telescopi come → l'INT.

Anche questa montatura presenta notevole ingombro in cupola, anche se minore rispetto alla montatura tedesca. La variante a sbalzo, immagine nella pagina successiva *sub (b)*, non offre alcun vantaggio, anzi costringe ad un sovradimensionamento del singolo braccio, del relativo asse di declinazione e dei suoi cuscinetti che devono sostenere in maniera perfettamente ortogonale all'asse orario una massa altrimenti distribuita su due punti. Va bene per strumenti di piccole dimensioni. Si notino le

- ▼ Tipologie di montature equatoriali: (a) a forcella, telescopio *Copernico* a Cima Ekar; (b) variante *a sbalzo*, da B. Lula ; (c) inglese a culla, riflettore da 60 pollici dell'osservatorio di Steward, Arizona; (d) inglese fuori-asse, riflettore da 1,2 m dell'osservatorio di Asiago



(a)



(b)



(c)



(d)

▼ Riflettore da 200 pollici di Monte Palomar su montatura a ferro di cavallo o Porter; fonte CalTech



dimensioni della semiforcina per un telescopio da 300 mm di diametro ed i rinforzi necessari per abolire le flessioni.

- *All'inglese a culla*. Ideata nel 1791 da J. Ramsden, l'inventore del sestante, per facilitare l'accessibilità all'oculare, è una variante della montatura a forcella: a fronte *sub* (c). La culla entro cui è alloggiato il telescopio evita la necessità di contrappesi in quanto lo strumento (tubo ottico) si trova posizionato esattamente al centro dell'asse orario: le dimensioni strumentali possono crescere notevolmente. Al presente è utilizzata solo amatorialmente per la relativa facilità costruttiva e non è più usata per strumenti di grandi dimensioni, ma all'inizio del secolo scorso ha avuto il suo momento di celebrità quando fu scelta per ospitare il telescopio Hooker da 100 pollici di Monte Wilson. La montatura non presenta il problema della reversibilità degli assi come la variante della *consorella* (*infra*), ma non consente l'accessibilità al polo precluso da parte della culla.

- *All'inglese fuori-asse*. Deriva dalla montatura inglese a culla e presenta similarità con la montatura tedesca con cui condivide il principale svantaggio, la reversibilità degli assi, ma come quella consente l'accessibilità al polo: nella pagina precedente *sub* (d).

Si tratta di una montatura in cui problema principale da risolvere che ci si pose fu la stabilità gravitazionale. Dal momento che la massa strumentale (telescopio e contrappesi) si trova comunque

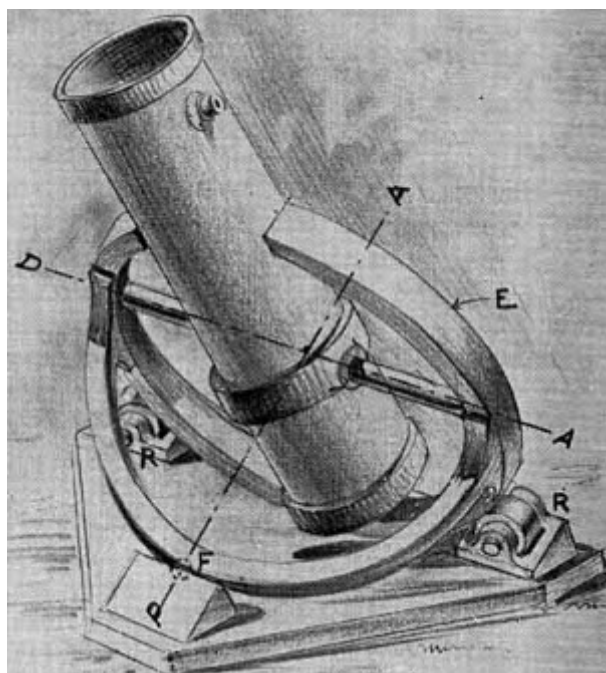
sempre bilanciata, si pensò di distribuire l'intera massa al centro di un robusto e lungo asse: in questo modo le masse si sarebbero scaricate al centro dell'asse orario, e il baricentro strumentale sarebbe avrebbe corrisposto con quello naturale dello strumento. Essendo l'asse di lunghezza non indifferente, non si può ricorrere ad un unico asse di acciaio, ma occorre costruire una struttura a coni contrapposti (*vedi* immagine a fronte) al cui interno nelle migliori costruzioni, com'è per il telescopio Galileo ad Asiago, è sempre collocato un ulteriore asse che unisce i pilastri Nord e Sud.

Gli svantaggi (oltre quello della reversibilità degli assi al meridiano) sono le notevoli dimensioni e quindi l'ingombro in cupola. Per il resto si tratta di una validissima montatura anche se da tempo abbandonata.

- *A ferro di cavallo, o Porter*. Il progredire della tecnica nella costruzione di menischi in vetro-ceramica sempre di maggiore qualità applicando la tecnica costruttiva a celle (→ vetro *sub* «Menischi a struttura composita») permetteva di disporre di superfici ottiche maggiori ricorrendo a soluzioni tecnologiche che sostenessero masse gigantesche.

A trovare una nuova soluzione per le montature equatoriali fu un geniale architetto appassionato di astronomia, → R. Porter, il quale aveva già sperimentato decine di nuove montature per i suoi strumenti. Porter ideò per il telescopio da 200 pollici di

- ▼ Disegno di R. Porter per la montatura da lui ideata e denominata *split-ring*; da *Amateur Telescope Making*, [7]



Monte Palomar la montatura che poi prese il suo nome e che viene comunemente chiamata anche *a ferro di cavallo*: immagine nella pagina precedente. La soluzione adottata da Porter si risolse nello sfruttare i vantaggi della montatura inglese a culla (che consentiva un ottimale bilanciamento delle masse strumentali) eliminandone gli svantaggi: la non accessibilità al polo e gli intrinseci limiti dimensionali; uno specchio da 5 m di diametro avrebbe richiesto dei bracci di 7 - 8 m di lunghezza suscettibili di flessioni.

L'accessibilità al polo fu ottenuta costruendo un semicerchio (il ferro di cavallo) di dimensioni generose (in tal modo non vi era ostruzione al polo) rotante su rulli scaricando su di essi la maggior parte della massa, permettendo così alla motorizzazione posta sull'asse Sud di muovere lo strumento senza eccessivo sforzo.

La montatura ha rappresentato la massima evoluzione nel campo delle equatoriali, ed ha conosciuto notevoli sviluppi, uno dei più rilevanti dei quali, sviluppato sempre da R. Porter, è la montatura detta *split-ring* adottata dall'Anglo-Australian Observatory e dal telescopio Mayall, dove il grado di compattezza raggiunto per strumenti della classe 4 m di apertura ha consentito di posizionare l'asse di declinazione del telescopio all'interno della montatura a ferro di cavallo che viene così a costituire una forcella *oraria* già declinante conformemente alla latitudine, in cui le masse non risultano decentrate, ed il baricentro corrisponde con il centro strumentale.

L'idea poi fu ripresa in numerose costruzioni amatoriali dando sempre ottimi risultati, anche perché ci si accorse presto, dato il notevole arco di circonferenza a disposizione, che era del tutto inutile ricorrere per il trascinamento (cioè per il moto orario) alla classica vite senza fine che innesta su ruota dentata, potendosi benissimo applicare il moto orario ai rulli su cui poggia il ferro di cavallo, evitando così anche il fastidioso problema del periodismo *infra*.

Queste costruzioni meccaniche rappresentano il limite massimo cui ci si possa spingere per le montature equatoriali. Oltre non si può andare senza pagare un prezzo troppo alto alla precisione.

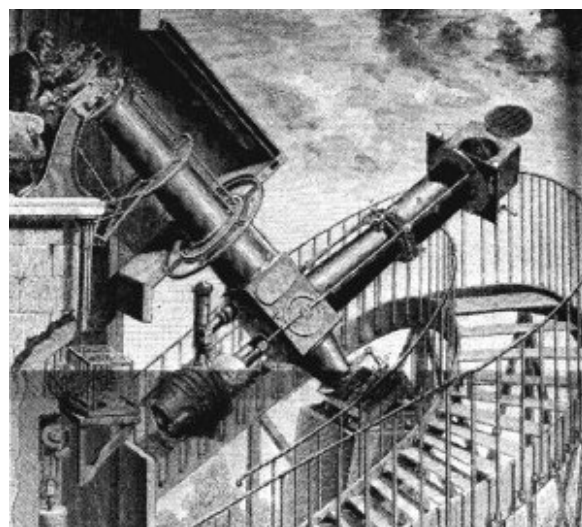
- *Montature equatoriali sperimentali*. S'intendono con questo

nome alcune montature equatoriali costruite a cavallo fra il XIX e il XX secolo, realizzate da osservatori astronomici e da amatori, che non hanno avuto grande diffusione, specie per via della loro esosità e sostanziale inutilità costruttiva, anche se alcune di esse godettero all'epoca di una certa popolarità, nonché di montature sperimentate a livello amatoriale.

Nella maggior parte dei casi, come per il grande rifrattore con obiettivo da 1,25 m di diametro e lunghezza focale di 60 m progettato per l'osservatorio di Parigi (vedi immagine a pagina ??), si andò agli estremi della ragione, tanto è vero che lo strumento non entrò mai in funzione: il caso, se rappresenta l'esempio più vistoso di inutili realizzazioni in materia, non fu certo l'unico: si cercava di gestire le lunghe focali degli strumenti d'allora ponendo in movimento uno strumento ottico di dimensioni abbastanza contenute.

La via alle grandi costruzioni strumentali era stata aperta mezzo secolo prima da W. Parsons che aveva inaugurato l'era dei telescopi all'aperto, cioè senza cupola, perché le dimensioni degli strumenti erano tali che la cupola o era impossibile da costruire o sarebbe costata almeno decine di volte il prezzo dello strumento. Per gran parte della metà del XIX secolo si continuarono a costruire montature *en plein air*, come il riflettore da 48 pollici di W. Lassell il riflettore dell'osservatorio di Melbourne, il rifrattore dell'osservatorio di Archenold e diversi altri.

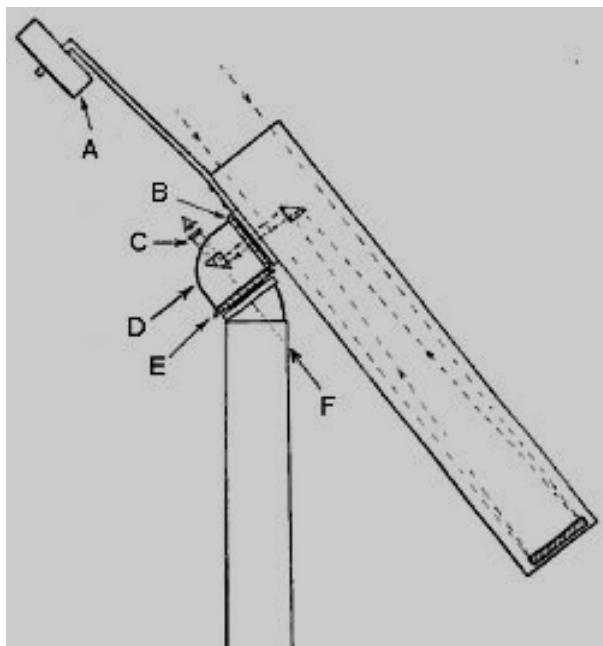
Difettava la tecnica (ottica e meccanica) per costruire strumenti



- ▲ Montatura Loewy-Coudé: in alto telescopio da 300 mm di diametro dell'osservatorio di Lione; in basso disegno dell'epoca raffigurante il funzionamento dello strumento all'osservatorio di Parigi

▼ Montatura *Springfield* ideata da R. W. Porter; da *Amateur Telescope Making* [7, I, p. 30].

Legenda: A contrappeso; B cerchio di declinazione; C oculare; D supporto dell'asse di declinazione; E cerchio orario; F asse polare



affidabili con focale ridotta, gli specchi erano ancora in metallo, e difettava soprattutto la tecnica dell'alluminatura delle superfici otticamente trattate. Questo fece sì che ci si indirizzasse verso rifrattori e riflettori con focali lunghe o lunghissime, essendo in questo caso specchi e lenti più facili da lavorare, con la conseguenza che si avevano montature all'aperto traballanti che non permettevano altra osservazione che quella visuale.

Queste montature sperimentavano una stessa via: la comodità dell'osservazione (visuale prima e fotografica poi), raggiunta talvolta come nel caso del riflettore di Lassel facendo ruotare il posto osservativo assieme al telescopio, una torretta sita nei pressi del fuoco newtoniano del riflettore a lunga focale.

La successiva evoluzione fu la necessità di avere un campo visivo fisso o con poca libertà di movimento: su lunghe focali se il fuoco restava fisso, considerando che all'epoca la fotografia astronomica richiedeva pose lunghissime spesso distribuite nell'arco di più notti, la precisione del lavoro era superiore a quello ottenuto con l'inseguimento siderale in telescopi traballanti di mastodontiche dimensioni rispetto alla struttura che li sosteneva. Il fuoco → nasmyth era conosciuto ed usato da tempo, e si trattava quindi di estrarre il fuoco dal telescopio per condurlo lì dove gli strumenti di lavoro (apparati fotografici e spettroscopici) avrebbero poi potuto sfruttarlo.

• *Loewy-Coudé*. La Loewy-Coudé (immagine nella pagina precedente) è senz'altro la più nota fra queste inusuali montature equatoriali; ne furono costruite varie versioni, ma il principio era sostanzialmente sempre lo stesso.

Uno specchio piano inclinato di 45° e posto su montatura equatoriale catturava la luce della sorgente, rinviando l'immagine ad uno specchio parabolico posto di fronte ad esso che amplificando l'emissione luminosa, tramite specchio deviatore a 45° , focalizzava il fascio ottico verso l'osservatore o l'apparato in uso. Telescopi del genere furono in dotazione agli osservatori di Parigi, Nizza, Lione, Algeri, e presso diversi altri europei.

• *Pasadena e Springfield*. Fra i tanti tipi di montatura equatoriale ideati da R. Porter quelle più note sono senz'altro la montatura *Springfield* e la montatura *Pasadena*. Un ruolo a parte

riveste la famosa *torretta* a → Stellafane. La configurazione ottica delle due montature è la medesima, e qui pertanto si tratterà di quella più conosciuta, la *Springfield*.

La montatura appartiene a quelle con oculare fisso, il campo ottico cioè durante la rotazione del telescopio rimane fisso in un unico punto dove è agevole l'osservazione. Caratteristica della montatura è l'estrema compattezza: l'asse di declinazione è ridotto al minimo per la maggiore stabilità, ed in effetti non si tratta, per questo come per quello orario, di assi, quanto piuttosto di borchie.

Concepita per i riflettori newtoniani, può essere immaginata come una versione modificata della montatura coudé, perché il fuoco non segue i movimenti del tubo ottico, ma è condotto, a prescindere dalla declinazione e dall'angolo orario sempre al medesimo punto. Lo specchio deviatore del secondario non rinvia infatti direttamente all'oculare, ma ad un altro specchio, anch'esso a 45° , situato in un quarto di calotta sferica che funge da moto orario e da supporto del moto di declinazione.

La montatura ovviamente non è stata mai utilizzata per telescopi di dimensioni medio-grandi, ma ha conosciuto a Stellafane una sua variante nella realizzazione della celebre torretta.

• *Tavole equatoriali*. Fino a pochi decenni fa con questo termine ci si riferiva a dei supporti equatorialmente disposti, sui quali era possibile montare una batteria di strumenti per fotografie astronomiche; come tali erano presenti presso diversi osservatori professionali. Le tavole equatoriali erano anche molto diffuse a livello amatoriale: su queste veniva montata una macchina fotografica con teleobiettivo o obiettivo a grande campo secondo l'esigenza per la fotografia di distinti oggetti o per un grande campo: si trattava in tutto e per tutto di piccoli telescopi che avevano il vantaggio della trasportabilità cui univano l'efficienza propria di un equatoriale secondo un tipo di montatura che può essere assimilata a quella a forcella.

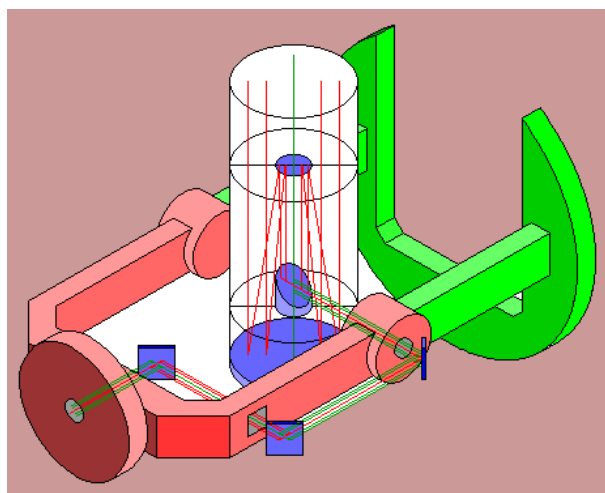
Oggi con lo stesso termine s'intendono – a livello amatoriale – tavole equatoriali come quella mostrata in questa pagina che non appartengono proprio alla categoria delle montature, ma costituiscono soltanto degli artifici per trasformare un telescopio altazimutale ultraleggero come un dobson, e quindi di poca pretesa, in uno strumento capace di seguire un corpo celeste per l'acquisizione di immagini.

Esse sono per lo più realizzate in multistrato di basso spessore, ed anche se spesso motorizzate, sono adatte soltanto a strumenti di piccolo peso ed usate unicamente a livello amatoriale. Il prin-



▲ Tavola equatoriale amatoriale per un riflettore portatile da osservazione visuale

- ▼ Schema del percorso ottico della luce nel telescopio Hale di Monte Palomar. La sorgente fuoriesce dall'asse Sud dopo aver attraversato un braccio del telescopio tramite una serie di rinvii ed è focalizzata sullo spettrografo



cipio di funzionamento è basato sull'oscillazione intorno all'asse di rotazione dello strumento, oscillazione che viene ottenuta nella maniera più *semplice* inclinando la tavola facendola scorrere su due rulli anteriori mentre nella parte posteriore è incernierata; nella costruzione più *elaborata* l'oscillazione avviene su quattro punti della tavola: due anteriori e due posteriori.

- *Allineamento delle montature equatoriali* L'allineamento delle montature avviene come s'è detto ponendo l'asse orario parallelo al polo celeste (Nord o Sud a seconda dell'emisfero). Eseguito un allineamento di approssimazione, il metodo più preciso che consente un'eliminazione degli errori strumentali è quello noto come di → Bigourdan.

► *Montatura altazimutale.* Negli ultimi decenni del secolo scorso si tornò a riconsiderare la montatura altazimutale. La via fu aperta dall'allora Unione Sovietica negli anni settanta con il telescopio da 6 m di apertura di Zelunčukskaja, cui seguì quasi subito il Multiple Mirror Telescope.

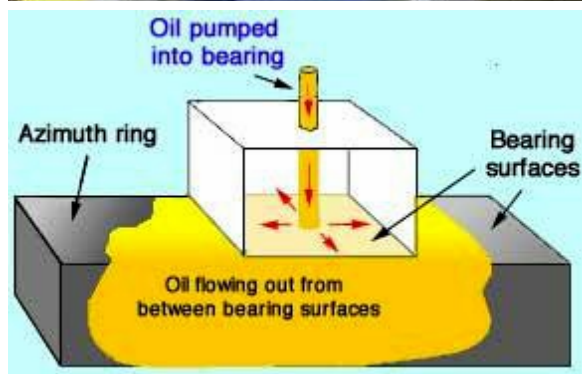
Il progresso nel campo dell'elettronica e nello sviluppo del software aveva infatti azzerato quello che era il maggior problema di questa montatura, la → rotazione di campo ormai risolta da quando si era avviata la tecnica di estrarre il fuoco (generalmente *coudé* o *nasmyth*) dal telescopio guidandolo tramite una serie di specchi di rinvio verso la strumentazione: gli spettrografi che, non essendo solidali con la montatura per via del loro ingombro, rendevano l'immagine soggetta al medesimo problema che si sarebbe incontrato in una montatura altazimutale: *vedi* immagine in questa pagina.

Per di più tramite motori elettronicamente controllati il tasso variabile di velocità richiesto per strumenti in questo tipo di montatura non costituiva più un problema, e si riduceva alla stesura di codice sorgente dedicato. Rimaneva l'inaccessibilità al polo dove la rotazione di campo va incontro a repentini mutamenti di velocità, ma questo non fu visto come un problema rispetto ai vantaggi che si potevano ottenere.

Nelle montature altazimutali gli assi in rotazione sono dunque tre. Ai due movimenti già discussi (orario e di declinazione) se ne aggiunge un terzo che non esiste nelle montature equatoriali, l'asse da cui, tramite una serie di specchi di rinvio, viene estratto il fuoco, generalmente un fuoco *nasmyth*, che deve essere ruotato nel corso dell'acquisizione dell'immagine in quanto proprio l'immagine ruota.

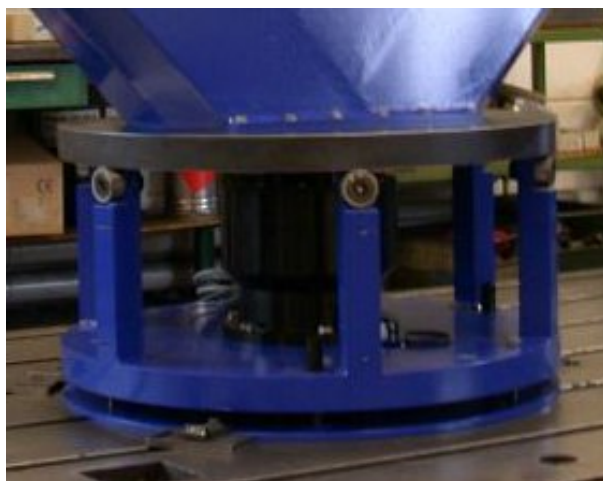
Preposto a questa funzione è il *derotatore di campo* un congegno

- ▼ Riflettore Liverpool da 2 m di apertura in montatura altazimutale a Roque de Los Muchachos, Canarie e sistema di cuscinetto idrealico per il moto orario; J. Moores University

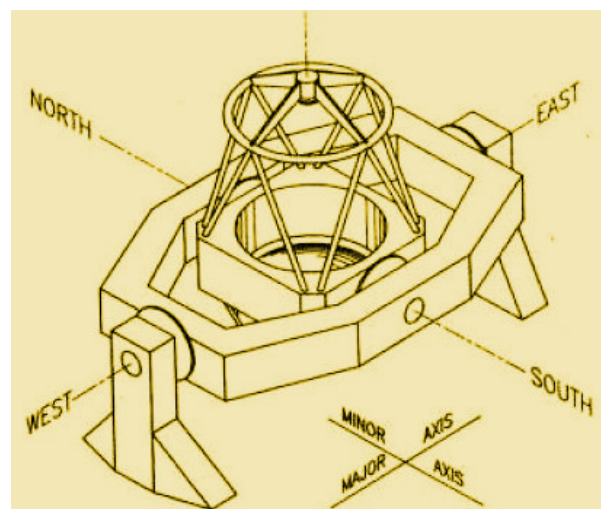


meccanico elettronicamente guidato che fa ruotare il sensore delle immagini (CCD o spettrografo) nella direzione opposta a quella della rotazione terrestre, per mantenere come nelle montature equatoriali l'immagine immobile durante l'inseguimento evitandone la rotazione (di 180° dal sorgere al tramonto del corpo). Nel caso di esposizione fotometriche di breve durata, essendo la sorgente puntiforme, il derotatore non è necessario,

- ▼ Sistema di rotazione oraria (disco rettificato su cuscinetti a sfera ortogonalmente disposti) del telescopio TROBAR da 600 mm dell'Università di Valencia



- ▼ Montatura alt-alt, da Richardson, op. cit.



ma è indispensabile nel caso di osservazioni spettroscopiche di decine di minuti ed anche in caso di osservazioni planetarie. Il problema è discusso al lemma → rotazione di campo.

Fra i vantaggi della montatura altazimutale è da annoverare il minor ingombro in cupola, assai ridotto rispetto a quello necessario per un equatoriale della stessa classe in montatura a forcella; inoltre i progressi nel campo dell'ottica attiva ed adattiva e dei sensori CCD, rendono un telescopio della classe 2 - 3 m competitivo quanto il telescopio Hale di Monte Palomar all'epoca in cui fu inaugurato quando esisteva solo la fotografia a processi chimici. In questa montatura infine, il baricentro strumentale corrisponde finalmente con l'asse ottico del telescopio e le masse scaricano in questo centro ideale.

In funzione dei telescopi di notevole dimensione che si andavano a concepire, la stessa configurazione di questa montatura doveva però comportare nuove soluzioni per gli assi di declinazione e per quello orario. Per l'asse di declinazione, negli strumenti più grandi si è optato per un'intera struttura oscillante dall'orizzonte allo zenith come nel → LBT; la soluzione classica non era perseguibile, ed è restata solo per strumenti di non eccessiva apertura in cui lo specchio sia di diametro uguale o inferiore ai 4 m, come nel telescopio Liverpool mostrato nell'immagine in alto a fronte.

Quanto all'asse orario, con la tradizionale tecnica dei rotismi su cuscinetti a sfera si sarebbe dovuto ricorrere a cuscinetti di notevoli dimensioni antieconomici e sostanzialmente inadatti a sopportare senza eccessivi frizionamenti la spinta gravitazionale loro impressa. Si sono adottati cuscinetti reggispinga soltanto in caso in cui questi fossero di dimensioni contenute, creando un cono rovesciato che terminava sulla base del cuscinetto e che sosteneva all'estremità opposta la base della forcella. Il sistema era inapplicabile per strumenti di grosse dimensioni come, ad esempio, un telescopio della classe 8 m.

La soluzione adottata, immagini in basso alla pagina citata, fu quella di costruire un anello di azimuth che fungesse da supporto fisso su cui poggiavano altri supporti mobili (immagine al centro). Apposite pompe immettono nelle cavità di questi ultimi supporti, solidali con la base della forcella del telescopio, olio idraulico a pressione, ed in questo modo si hanno cuscinetti a film d'olio che creano una pellicola su cui l'intera massa strumentale ruota con pochissimo, quasi nullo, attrito.

Un'interessante variante mostrata nell'immagine in questa pagina è stata adottata per il telescopio TROBAR dell'Università

di Valencia. In questo caso una serie di cuscinetti disposti tangenzialmente al limite estremo di un disco d'acciaio rettificato, assolve al lavoro di un solo reggispinga centrale, trasportando gran parte del lavoro dall'asse centrale alla periferia del disco che presenta un adeguato spessore. In questo caso, i rulli dei cuscinetti non hanno ovviamente alcuna funzione motrice come nei rotismi a frizione (*infra*) essendo questa affidata al motore centrale direttamente innestato sull'asse che assolve comunque anch'esso alla sua funzione di carico ma che in tal modo risulta più equamente distribuita.

Le montature altazimutali conoscono una fase di continuo rinnovamento che le ha portate a sperimentare soluzioni, efficacemente valide, impensabili sino ad una ventina d'anni fa. Si veda ad esempio la montatura del telescopio LBT, dove l'asse declinante funge da supporto a tutt'intera

► *Montatura alt-alt*. La montatura alt-alt, detta anche *altitude-altitude*, può essere definita come una montatura che unisce alcuni vantaggi della montatura equatoriale e ne elimina altri dell'altazimutale. Descritta per la prima volta da E. H. Richardson [13], essa ha la caratteristica di avere l'asse polare parallelo al suolo. Quest'asse (disegno in questa pagina) ospita in una culla, come in una montatura inglese, lo strumento che può operare in declinazione strumentale.

Dal punto di vista meccanico, rispetto ad una montatura equatoriale a forcella ad esempio, si ha il vantaggio che lo stress meccanico, a prescindere dalla declinazione in cui lo strumento lavora, è uniformemente distribuito e gravita al centro della culla come in una montatura inglese, ma rispetto a questo richiede una cupola di minore dimensioni, anche se la compattezza non è il pregio di questa montatura. Tuttavia, rispetto all'altazimutale, presenta diversi vantaggi.

Innanzitutto gli specchi sono solo tre (primario, secondario e nasmyth da cui estrarre il fuoco attraverso un asse di declinazione naturalmente cavo) contrariamente alle montature altazimutali ed a quelle a fuoco coudé che richiedono una serie di specchi con conseguente perdita di efficienza in termini d'immagine ad ogni passaggio su una sorgente speculare.

Inoltre, pur potendo essere posizionata secondo un qualsiasi allineamento, non c'è motivo di far uso di tanta libertà e non orientarla [17]; conviene scegliere un allineamento dell'asse polare Nord-Sud od Est-Ovest a seconda delle necessità. Il primo allineamento è idoneo per ricerche del tipo asteroidali, quando l'accesso alla zona polare sia da considerare privilegiato rispetto a tutti gli altri campi, o quando si desideri *abbattere* (vale

▼ Caratteristiche delle montature equatoriali, altazimutali e alt-alt. Legenda delle sigle: inglese-cl = – a culla; inglese-fa = – fuori asse

Montatura N/C	Accessibilità polo	Irreversibilità assi	Declinazione interna all'asse polare	Telescopio su supporti di declinazione	Compattezza	Totale
tedesca	*	–	–	–	*	2
inglese-cl	–	*	*	*	–	3
inglese-fa	*	–	*	–	–	2
astrografica	*	*	–	–	*	3
forcella	*	*	–	*	*	4
ferro di cavallo	*	*	*	*	–	4
altazimutale	–	*	–	*	*	3
alt-alt	*	*	–	*	–	3

soprattutto per le nostre latitudini) l'effetto della rotazione di campo; il secondo allineamento va invece preso in considerazione in tutti gli altri casi, specie per ricerche effettuate allo zenith od in sua prossimità, e quando non sia richiesta una eccessiva declinazione Nord-Sud.

Un software che plotta il miglior allineamento a seconda della latitudine in cui lo strumento si trova ad operare è reperibile assieme ad una pubblicazione dedicata all'indirizzo citato in bibliografia [10]. Dalle tabelle riportate in quell'articolo si rileva che il tasso di rotazione di campo è quasi insignificante per un allineamento Nord-Sud, tanto che la linearità della curva per declinazioni intorno ai 60° rende la derotazione pressoché nulla, contrariamente ad una montatura altazimutale in cui le curve vanno incontro a repentini quanto bruschi cambiamenti. La rotazione di campo è invece notevole all'orizzonte: in questo caso lo strumento non può operare perché la velocità di derotazione di campo «sarebbe» eccessiva; ma dato che non si effettuano osservazioni agli orizzonti dal momento che polluzione luminosa, masse d'aria, turbolenza, assenza di trasparenza, ... si presentano come determinanti fattori per impedire l'osservazione scientifica, il problema di fatto non esiste.

In prossimità dell'equatore celeste la velocità derotativa è addirittura eguale a zero, per campi in prossimità del meridiano; alle altre declinazioni, le velocità di derotazione rimangono estremamente basse, raggiungendo un massimo di 15°/h in prossimità del polo, in coincidenza con il tempo siderale orario.

• *Quadro riassuntivo delle varie montature.* Nella tabella riprodotta in questa pagina sono riportate le caratteristiche delle varie montature esaminate.

► *Montature sperimentali.* In questa categoria si fanno rientrare alcune montature che studiano nuovi supporti per gli strumenti. Qui ne trattiamo due.

• *Strutture a bolla.* Montatura sperimentale che ha trovato la prima realizzazione nel telescopio francese OVLA; in questo caso la cupola sferica (a bolla) si muove con all'interno il suo strumento.

La bolla è sostenuta da un gruppo di rulli appositamente movimentati che provvedono a mantenere l'oggetto celeste nel campo. Questo tipo di montatura è stata concepita per una utilizzazione ad array di un certo numero di simili telescopi da collocare sulla Terra e sulla Luna, ma per ora ovviamente ci si è fermati ai prototipi.

• *Strutture esapodali.* Non si tratta propriamente di montature, piuttosto di supporti particolari per strumenti astronomici che ne asservono una componente. A differenza delle montature a bolla non esistono rotismi, ma solo pistoni che con movimenti di precisione agiscono su una piattaforma o un sostegno che sostiene la strumentazione ottica.

Un esapode non è altro in sostanza che un robot a braccia che sfrutta una tecnologia nata per l'industria data l'estrema mobilità posseduta: le macchine ad esapode sono spesso usate per il collaudo e la prova di stress dei materiali.

Un'applicazione di questo particolare supporto è nel telescopio DOT installato a La Palma, uno strumento destinato alla ripresa di immagini ad alta risoluzione della superficie solare, ed in diversi telescopi come il LBT dove asservisce i sistemi di movimentazione degli specchi secondari e i supporti attivi degli specchi terziari e dei secondari adattivi. Una documentazione è reperibile qui [16].

► *Montatura per telescopi solari: rinvio.* Le montature per telescopi solari sono montature equatoriali che differiscono da quelle destinate all'osservazione di corpi celesti stellari o planetari in quanto diverso ne è il principio di funzionamento. Inoltre la parte ottica svolge un ruolo assai diverso rispetto ai tradizionali telescopi. Sono trattate al lemma → eliostato. Vedi anche telescopio sub «Telescopi solari».

■ *Il tubo ottico.* È la parte della montatura che supporta gli elementi ottici, di diversa proprietà nei rifrattori e nei riflettori, ed assolve la funzione di tenere perfettamente in asse fra loro le parti fondamentali di un telescopio, l'obiettivo e il dispositivo di osservazione (oculare, camera CCD, spettrografo) posto immediatamente dopo il foccheggiatore destinato ad aggiustamenti di focale. Nei telescopi riflettori, a seconda del tipo di configurazione ottica, prima del rivelatore possono trovarsi uno, due, tre e anche più specchi di diversa geometria.

Per l'analisi delle caratteristiche di un tubo ottico nei rifrattori e nei riflettori si rinvia alla trattazione al lemma dedicato (→ tubo ottico) nonché alle voci correlate: telescopio e osservatorio.

• *Rifrattori.* Nei rifrattori, per antica quanto pratica tradizione



▲ Telescopio sperimentale francese OVLA

costruttiva, il tubo ottico è da sempre un tubo chiuso delimitato alle due estremità dall'obiettivo e dal foceggiatore. Date le lunghe focali tipiche di questi telescopi, al crescere del diametro dell'obiettivo aumenta la lunghezza focale e quindi la dimensione lineare del tubo ottico. Nel XIX secolo si giunse a costruzioni gigantesche: nell'osservatorio di Yerkes il tubo ottico superava i 15 m in lunghezza.

Su tali dimensioni le escursioni termiche nel corso di una notte d'osservazione sono notevoli, modificando sensibilmente il punto focale: le dimensioni del rifrattore pongono, ancora, problemi meccanici di flessione al tubo ottico posizionato generalmente a circa 3/4 della lunghezza sull'asse di declinazione di una montatura alla tedesca, l'unica in grado di gestire simili strumenti. All'inconveniente si cercò di ovviare costruendo il tubo ottico secondo una struttura a coni contrapposti e non cilindrica, ma intanto (fine Ottocento) si era compreso che l'era dei grandi rifrattori era terminata, e così questo problema scomparve col terminare della loro produzione.

Il telescopio rifrattore presenta comunque un vantaggio rispetto al riflettore, e cioè il tubo chiuso di cui sopra si diceva, quasi mai presente nei riflettori al di sopra di mezzo metro di apertura che non siano Schmidt, per via delle tensioni meccaniche cui un tubo del genere sarebbe sottoposto. Il tubo chiuso infatti abbatte la turbolenza all'interno del telescopio, ossia non vi sono correnti d'aria e inoltre lo strumento è interamente protetto da fonti di luce parassite che possano interferire con la sorgente in osservazione. Nei moderni rifrattori commerciali che grazie a doppietti e triplette obiettivi di nuova concezione possono disporre di una buona focale in dimensioni più contenute rispetto al passato, il tubo ottico è costituito in alluminio o in materiale plastico resistente, e nei casi migliori, di strutture a fibra di carbonio: → cella.

- **Riflettori.** Più varia è la struttura di un tubo ottico in un telescopio riflettore: nelle immagini a pagina 4 se ne vedono alcune realizzazioni. Nei riflettori il tubo ottico comprende: a) un «traliccio» che sostiene le componenti ottiche; b) la cella dello specchio primario; c) la cella o supporto dello specchio secondario ed eventualmente del terziario; d) il foceggiatore su cui applicare i dispositivi di rilevamento d'immagine. Spesso sono presenti altre componenti, quali ulteriori specchi di rinvio, riduttore di focale, derotatore, correttore di campo,...

- **Il traliccio.** La costruzione a traliccio è comunemente attribuita a M. Serrurier che la progettò per il telescopio Hale di monte Palomar. In realtà strutture simili esistevano da tempo: a puro titolo di esempio si citano il rifrattore dell'osservatorio di Cambridge del 1835, il telescopio di Greenwich del 1893, il telescopio Hooker di Monte Wilson del 1907.

Quello che differenzia una struttura a traliccio come quella del telescopio Hooker da una struttura Serrurier è la disposizione delle masse in equilibrio secondo principi geometrici più razionali di distribuzione delle forze (parte inferiore e superiore dello strumento), in modo di alleggerire il peso della montatura e di affrontare costruzioni per grandi telescopi (come l'Hale) senza che si vada incontro a flessioni, come avvenne in principio proprio con il telescopio Hooker, e che l'intera struttura risulti, proporzionalmente, assai più compatta. In sostanza la differenza fondamentale fra le due costruzioni consiste nel sostituire una struttura cilindrica o parallelepipedale con una struttura a due tronchi strutturali uniti fra loro alla base sulla culla di declinazione strumentale. In questo modo la massima resistenza meccanica sarà concentrata in questo punto, mentre la parte superiore ed inferiore dello strumento possono essere costruite con materiali più leggeri. S'intende che i due tronchi hanno lunghezze e ingombri diversissimi in funzione delle masse che

▼ In alto e in basso asse orario motorizzato; telescopio da 18 pollici della California Polytechnic State University



debbono supportare: vedi a pagina 4 immagine sub c).

Oggi la tecnica ingegneristica del *Metodo degli Elementi Finiti* (FEM: *Finite Element Method*) consente la costruzione di montature compatte rispetto all'apertura ed alla lunghezza focale degli strumenti, risolvendo in fase progettuale i problemi meccanici che la montatura incontrerà durante il lavoro. Questa metodologia è attualmente adottata nella costruzione di tutti i telescopi moderni.

- **Cella e secondario.** Le altre componenti del tubo ottico di un riflettore sono discusse ai relativi lemmi: → cella, secondario.

- **Motorizzazione.** Sino alla diffusione dell'energia elettrica,¹ l'unico sistema di imprimere il moto alle montature dei telescopi era quello di servirsi di un motore gravitazionale, azionato cioè da pesi, ovvero a molla. In entrambi i casi si poneva in funzione un sistema ad orologeria che trasmetteva, tramite rotismi di riduzione, il moto all'asse orario. Dispositivi gravitazionali erano usati per la movimentazione di strumenti anche di notevoli dimensioni, come nel caso del telescopio da 48 pollici dell'osservatorio di Melbourne.

In questi casi il cuore del sistema era rappresentato da un regolatore di velocità centrifugo-gravitazionale, il cosiddetto → Watt governor: approfondimenti al relativo lemma.

Con la disponibilità e diffusione capillare dell'energia elettrica ed il conseguente diffondersi delle motorizzazioni di questo tipo, si fece a lungo ricorso alla corrente alternata, sia per il minor prezzo dei motori, sia soprattutto perché tramite un variatore di frequenza era possibile regolare (variare) la velocità senza che il motore perdesse potenza, non agendo cioè sulla tensione in ingresso. L'ideale uso di un motore in corrente continua che avrebbe assicurato una maggiore uniformità di moto, era scartato per l'impossibilità tecnica (all'epoca) di controllare i giri del motore senza perdere potenza.

1. Questo titolo ed i seguenti accennano a questioni di meccanica ed elettronica affrontandone i principi solo descrittivamente, trattandosi di tematiche correlate ma non strettamente attinenti a questo lavoro.

In entrambi i casi si tratta di motori a spazzola, quindi di sorgenti di scintillazione che – per quanto schermate – possono sensibilmente disturbare strumenti delicatissimi come i fotometri.

Sul finire degli settanta del secolo passato, con l'avvento e la diffusione delle tecnologie informatiche, ebbero larga diffusione e prezzo sempre più accessibile i motori passo-passo (*step-motors*), che consentivano tramite elettronica di regolare i passi, cioè l'angolo di rotazione dell'asse del motore. I diffusissimi motori a passi di $1,8^\circ$ consentivano per la prima volta tramite opportune riduzioni meccaniche di avere a disposizione movimenti *fini* come si suol dire, ossia di alta precisione, tanto nella funzione *go-to* (puntamento rapido dell'oggetto), quanto nell'inseguimento dello stesso: questa tecnologia da qualche decennio ha sostituito in tutti gli osservatori amatoriali qualsiasi altro tipo di motorizzazione. Rispetto ai tradizionali motori in corrente continua o alternata i motori passo-passo possono bloccarsi in una voluta posizione mantenendo inalterata la coppia di lavoro il che è utilissimo per l'asse di declinazione dello strumento, e possono essere fatti avanzare anche di mezzo passo per una maggiore precisione nella correzione strumentale.

Il successivo sviluppo tecnologico consisté nell'adozione di motori *brushless* (senza spazzole) resi accessibili ancora una volta dalla diffusione dei computer ove all'inizio si trovavano usati nei floppy disk.

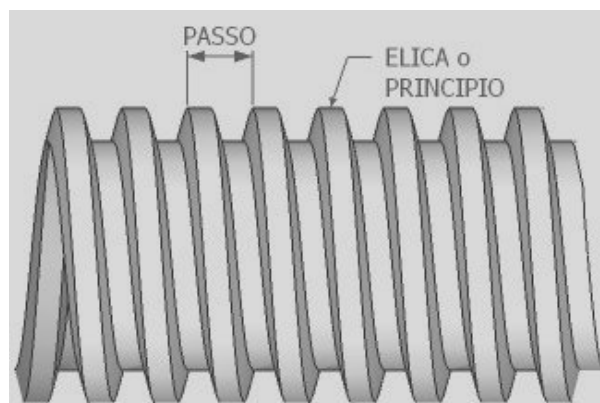
In un motore a spazzola l'interruzione di tensione avviene meccanicamente quando il collettore rotante chiude il circuito e sospende l'alimentazione; in un motore brushless invece l'inversione è ottenuta elettronicamente: questo presuppone ovviamente che il *controllore* debba conoscere la posizione del rotore rispetto allo statore, per questo è usato congiuntamente ad un sensore di Hall o ad altri più avanzati dispositivi.

I motori brushless hanno il vantaggio, oltre all'eliminazione dell'usura delle spazzole, di non essere sorgente di alcuna fonte elettromagnetica e quindi di non interferire con altre apparecchiature poste nelle vicinanze; possono erogare una notevole potenza pur presentando un ingombro ridotto, non costituiscono sorgenti di calore, non vibrano come i passo-passo che possono trasmettere allo strumento fastidiose perturbazioni meccaniche se non montati su supporti isolanti adeguati, e infine il controllo della velocità è estremamente preciso. Unico svantaggio il maggior costo rispetto ai tradizionali passo-passo. Le costruzioni più avanzate tendono a costruire il motore all'interno dell'asse orario, come nella costruzione visibile nella pagina precedente ponendo una serie di bobine tutt'attorno all'asse orario alimentate a basse tensioni (24 volt) [6].

► **Trasmissione del moto.** La trasmissione del moto (orario e di declinazione) avviene attraverso rotismi che nella configurazione di base sono due: l'organo che trasmette il moto (ruota conduttrice) e l'organo che lo riceve (ruota condotta). Fra questi rotismi altri ne possono essere inseriti con lo scopo di ottenere un minore numero di giri sulla ruota condotta e una più fine regolazione del moto. L'innesto della forza motrice sull'ultimo rotismo conduttore avviene in genere tramite un giunto elastico d'acciaio armonico per una partenza non brusca dello strumento; identico risultato si può ottenere per via elettronica dando ai motori una potenza graduale (rampe di salita).

Premesso che nel progettare un rotismo di tal genere deve essere noto (specie in caso di treni di ruote) il senso di rotazione chiesto all'ultima ruota condotta, tralasciando tuttavia i treni di ruote e i differenziali, qui ci si occuperà soltanto della trasmissione del moto prendendo in considerazione i due rotismi fondamentali in ogni sistema (ruota conduttrice e ruota condotta) sottolineando la considerazione di base che nel nostro caso il moto circolare impresso alla corona dentata non serve per sollevare un corpo.

▼ Profilo di vite senza fine con evidenziati il passo e il principio



In tal senso i rotismi attraverso cui nelle montature è possibile trasmettere il moto sono principalmente tre: a) corona dentata innestata sull'asse orario e vite senza fine; b) cinghia; c) rulli e contatto a frizione. Il primo e il terzo rotismo vengono chiamati *a contatto diretto*, il secondo *per collegamento con organo flessibile*. Ognuna di queste modalità presenta vantaggi e svantaggi ed è adatta a determinate costruzioni: la soluzione ideale va ricercata in rapporto alle dimensioni strumentali. Nei sistemi che usano cuscinetti idrostatici il moto è trasmesso all'asse direttamente o tramite riduzione; la trasmissione a catena, simile a quella a cinghia, è assolutamente da evitare, per quanto si trovi in uso anche presso montature di telescopi professionali.

• **Corona dentata e vite senza fine.** È stato questo a lungo l'unico modo adottato in telescopi di medie e grandi dimensioni per la trasmissione del moto, avendo il vantaggio di richiedere una modesta forza motrice sulla vite senza fine e di assicurare un inseguimento siderale abbastanza costante. Il sistema permette infatti, senza organi intermedi, di muovere masse considerevoli con motori passo-passo di piccola potenza: un motore da 1 A con passo di $1,8^\circ$ ed una riduzione 1 : 8 fornisce già una risoluzione di 22 s ed è in grado di muovere agevolmente 100 kg di strumentazione bilanciata. Per calcoli specifici vedi l'articolo citato in bibliografia [19].

In telescopi di grandi dimensioni come il 200 pollici di Monte Palomar con questo sistema si dovettero naturalmente adottare corone dentate sovradimensionate; in questi casi la costruzione può dare qualche problema soprattutto in fase di rettifica finale, ma in compenso resta ancora questo il modo più agevole di trasmissione del moto. Il diametro della corona dentata va appositamente calcolato in relazione alla massa da muovere, e comunque per strumenti di media apertura (500 mm) non bisognerebbe mai scendere sotto i 300 mm di diametro.

Nel dimensionamento della corona dentata, come in quello di una puleggia con trasmissione a cinghia o a frizione, va ovviamente considerato il movimento della Terra, in ultima analisi la finalità per cui l'organo serve. Dal momento che il giorno solare medio vale 23 h 56 min 4 s, approssimando a 24 h si conclude che la Terra compie una rotazione di 15° ogni ora, di 15 min d'arco ogni minuto e di 15 s d'arco ogni secondo.

Quindi, ad esempio, in 15 min la Terra ruoterà di un angolo

$$\omega = 10 \times 60 \times 15 = 13\,500 \text{ s}$$

e poiché la velocità angolare di rotazione di una corona dentata è proporzionale al suo raggio, per evitare di avere una deriva maggiore di 1 s in 15 min occorre che naturalmente la corona dentata sia perfettamente centrata sull'asse orario per evitare derivate maggiori di un secondo d'arco: ad esempio su una corona

dentata di 300 mm di diametro l'errore tollerabile (su questa scala temporale) sarà dato da

$$\delta = \frac{300}{2 \times 13\,500} = 0,011 \text{ mm}$$

Una dibattuta questione in materia riguarda il passo dei denti della corona dentata ed il loro spessore (e della relativa vite senza fine). Alcuni costruttori prediligono corone dentate con un *buon* passo per abbattere il fenomeno del periodismo *infra*. In altri casi i costruttori hanno scelto di non far muovere la corona dentata, di tenerla cioè ancorata ad una struttura, facendo ruotare su di essa la vite senza fine assieme alla strumentazione, facendo cioè lavorare questa secondo una modalità per cui non è concepita, usando la corona dentata come una sorta di cremagliera (anche se non di raggio infinito), ed inoltre, particolare più rilevante, ci si *porta appresso* tutt'intero il periodismo della vite senza fine. Un approfondimento sul rendimento delle ruote dentate sottoposte a lavoro è in un articolo di E. Manfredi [11] dall'omonimo titolo.

- *Periodismo della vite senza fine*. Infatti, per quanto corona dentata e vite senza fine possano essere ben costruite, quest'accoppiamento per sua stessa natura presenta un inconveniente chiamato *periodismo della vite senza fine*.

Il periodismo deriva dal fatto che la velocità angolare trasmessa alla corona dentata (e per essa all'asse di ascensione di retta) dalla vite senza fine che ruota a velocità costante, non è in realtà costante, bensì oscilla con periodicità eguale al periodo di rotazione della vite senza fine. Ad ogni mezzo giro della vite senza fine nel punto di contatto fra il filetto di questa ed i denti della corona si presentano diverse geometrie: dapprima la sommità del filetto si trova nell'incavo fra due denti della corona, quindi (dopo mezzo giro) la sommità di un dente della corona si trova nell'incavo fra due successivi filetti: nella prima situazione l'angolo di cui ruota l'asse di ascensione retta è più grande, nella seconda più piccolo. Il motivo per cui, come si diceva al titolo precedente si costruiscono corone dentate di 359 denti e anche più è dunque chiaro: un tale tipo di corona ha un errore periodico minore rispetto ad una di 144 o 180 denti.

Conseguenza del periodismo è che su lunghe pose, una sorgente puntiforme si presenta come una sinusoide allungata che ripete ad ogni curva l'errore periodico cui la vite senza fine è andata incontro. Se la sinusoide è di forma regolare e simmetrica, la vite senza fine è leggermente eccentrica, se la sinusoide è asimmetrica la sezione della vite senza fine non è perfettamente circolare: *vedi* immagine in questa pagina.

Le migliori montature sono quelle che ottenendo un'elevata precisione meccanica riescono a manifestare un periodismo dell'ordine di 1,5 s o – al massimo – 2 s, ma si tratta di realizzazioni

quanto mai costose. Di questo problema i costruttori, specie negli strumenti commerciali, non si curano se non marginalmente, perché realizzare una vite senza fine con tali caratteristiche a bassissimo valore di periodismo, richiederebbe una lavorazione meccanica di prim'ordine con una spesa quasi pari a quella richiesta nella costruzione delle più accurate ottiche; per non rendere troppo costosi i telescopi si preferisce affidare al software ed all'elettronica la soluzione di questo problema.

I rimedi possono essere vari. Di ordine meccanico, portando entrambi i pezzi a rettifica oppure facendo ruotare per qualche giorno vite senza fine e corona dentata aggiungendo di tanto in tanto carborundum estremamente fine mischiato ad olio per far adattare fra loro le capacità meccaniche di vite senza fine e corona dentata, lavoro questo che andrebbe comunque sempre eseguito; oppure correggendo manualmente durante l'inseguimento; od ancora correggendo automaticamente affidandosi ad un CCD di guida.

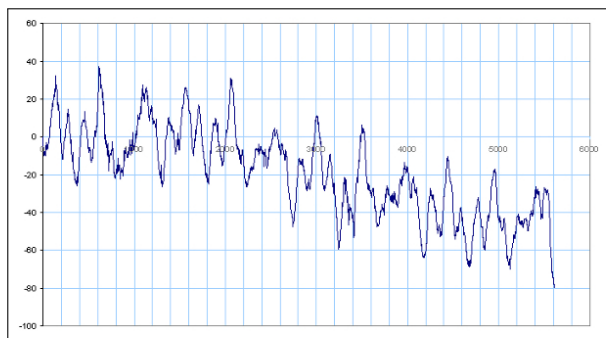
Le possibilità offerte dall'elettronica si risolvono nel sistema denominato PEC (*Periodic Error Corrector*), correggendo la periodicità con un sistema che può essere elaborato in vari modi. Uno dei più semplici ed efficienti, adatto a montature medio-piccole, è stato proposto anni fa da G. Li Causi. La soluzione proposta dall'autore consiste nel *variare in modo automatico con un sistema elettromeccanico il potenziometro della regolazione fine della velocità in modo tale che per ogni posizione della vite senza fine esso abbia il giusto valore per compensare l'errore in quel punto* [4].

Naturalmente il periodismo è un errore strumentale che negli equatoriali si verifica solo sull'asse orario dal momento che l'asse di declinazione è soggetto solo ed ad eventuali piccole correzioni durante l'inseguimento siderale.

- *A cinghia*. Nella meccanica del moto si ricorre ai sistemi a cinghia quando è richiesta elasticità di trasmissione e quando la distanza dei due assi è elevata. La trasmissione a cinghia ha ormai quasi completamente soppiantato l'omologo sistema a catena in quanto rispetto a questo presenta minore attrito e maggiore aderenza ed elasticità, assenza di punti morti, silenziosità assoluta, e per quanto nella movimentazione dei telescopi non ricorra alcuna delle condizioni suddette, tuttavia in non pochi casi può prestarsi a diversi utilizzi.

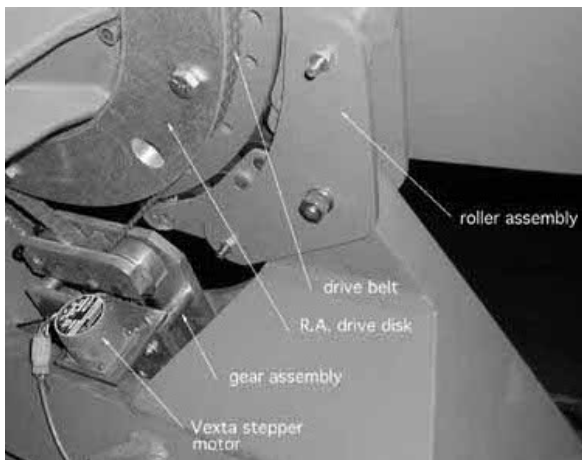
Può essere proficuamente usata nella trasmissione del moto dal motore alla vite senza fine annullando, con pulegge di riduzione e grazie alla sua elasticità, i residui *scatti* d'avanzamento di un motore passo-passo; inoltre, se adoperata per la movimentazione dell'asse orario, elimina il problema del periodismo della vite senza fine, anche se, oltre una certa dimensione strumentale, pone seri problemi d'utilizzo. In conseguenza, i motivi per cui si ricorre alla scelta di questo tipo di trasmissione possono essere soltanto due: a) evitare di costruire una corona dentata di notevoli dimensioni e la corrispondente vite senza fine; b) abolire il periodismo; c) operare una riduzione del moto senza ricorrere al sistema degli ingranaggi.

Considerando (nel nostro caso) le bassissime velocità in gioco il profilo della cinghia può essere a geometria piana o dentata, meglio se di notevole larghezza oltreché di un certo spessore; l'essenziale, nel caso di cinghia piana, è che essa non fuoriesca dalla sede durante il lavoro e che il materiale sia di ottima qualità per non sostituire la cinghia con continuità. Chiaramente va perso uno dei pregi della cinghia, l'elasticità, ma questa è la parte che nel nostro caso rileva meno, anzi attraverso rulli di spinta va fatto il possibile per tenerla in tensione nel punto morto, là dove essa non è soggetta al lavoro, cioè alla trazione. Un'interessante applicazione della trasmissione a cinghia, opera di R. W. Smith, è mostrata nell'immagine al centro in questa



▲ Periodismo della vite senza fine. In ascissa sono riportati i tempi in secondi, in ordinata la deviazione dei pixel per l'ascensione retta; fonte sites.google.com/site/gaobservatory/

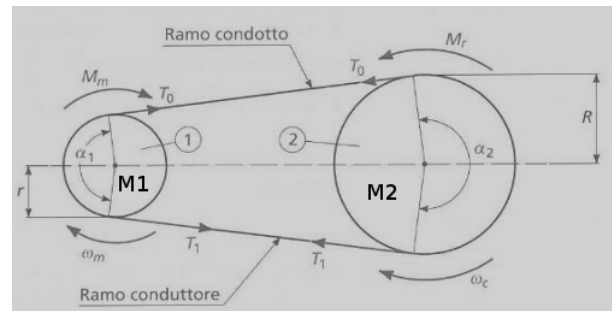
- ▼ Modalità di trasmissione del moto orario: in alto a corona dentata e vite senza fine; al centro a cinghia; in basso a rulli frizionati



pagina, e può essere vista in ogni particolare costruttivo al sito dell'autore: [14]. In questo caso un disco d'acciaio ruota su una serie di cuscinetti posti su supporti oscillanti, mentre solidale ad esso vi è un altro disco (ruota condotta) avvolto dalla cinghia tenuta in tensione da due rulli in prossimità della ruota conduttrice. Dato l'altissimo rapporto di riduzione, l'autore ha potuto fare uso di un piccolo motore passo-passo, ed il tutto dà l'idea dell'affidabilità e della funzionalità.

A livello amatoriale per strumenti medio-piccoli si sono sviluppate varianti della versione a cinghia. In questi casi la cinghia, aderente ad un arco di disco, è messa in moto non da una puleggia, bensì da un supporto parallelepipedale (in pratica un dado fatto scorrere da sinistra a destra su una vite senza fine: essendo

- ▼ Schema di trasmissione a cinghia piatta su pulegge; fonte Edizioni Calderini, [3]

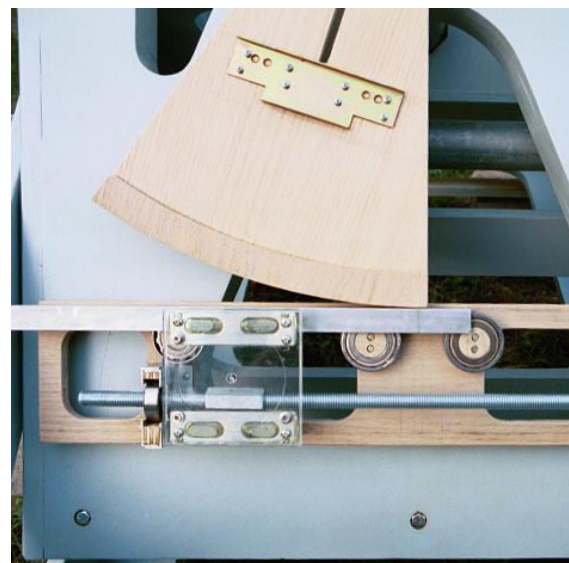


la cinghia aderente al disco lo strumento ruota. Non si abolisce il periodismo perché il dado entro cui scorre la vite senza fine anche se a filetti lavora come una sorta di corona dentata incontrando le stesse problematiche già descritte, eliminando ogni vantaggio di questa modalità di trasmissione del moto, si semplifica solo la costruzione. Il trasferimento del moto può essere anche a frizione come nell'immagine a pagina ??).

Per il calcolo della potenza motrice necessaria in un sistema di trasmissione a cinghia si veda il sito citato in bibliografia [5].

- **A rulli.** Con il trascinamento a rulli si evita il periodismo della vite senza fine. Il sistema di trasmissione è un'applicazione dei *rotismi a frizione* ed è costituito da due corpi solidi, generalmente di forma cilindrica, che si trasmettono il moto mediante contatto sfruttando l'aderenza (l'attrito) presente sulla superficie delle rispettive geometrie. È in sostanza lo stesso principio della trasmissione ad ingranaggi con denti dritti od elicoidali in cui la ruota conduttrice di minore diametro trasmette il moto alla ruota condotta, soltanto che, essendo le due ruote costantemente sempre sotto lavoro, l'assenza di denti evita i punti morti e così il sistema non è affetto da periodismo.

È evidente che per ottenere un'efficiente trasmissione del moto bisogna assolutamente evitare che le due ruote slittino, assicurare cioè che abbiano una completa aderenza ed il massimo dell'attrito che si ottiene in questo caso applicando sui rulli tutta la spinta gravitazionale che lo strumento possiede, non essendo possibile ricorrere per le montature alla soluzione generalmente adottata per le piccole trasmissioni, di avvolgere il rullo con gomma per agevolarne l'aderenza. Si applica il rapporto di ri-



- ▲ Trascinamento a frizione su settore circolare di D. Harbor

Sulla trasmissione del moto

• *Vite senza fine e corona dentata.* La vite senza fine conduttrice (vedi immagine a pagina 12) deriva il nome dal fatto che la sua rotazione ha lo scopo di trasmettere il movimento alla corona dentata (*ruota condotta*), e il suo passo può essere a uno o più principi, ossia la corona dentata può *ingranare* uno o due filetti alla volta.

Il rapporto corona dentata-vite senza fine è in funzione del numero dei denti della corona, generalmente 359 nelle corone del moto orario, e dell'angolo di inclinazione del filetto della vite: i due organi di trasmissioni debbono essere meccanicamente compatibili. In sostanza ad ogni giro della vite senza fine la ruota condotta effettua una rotazione pari al numero di filetti (principi) della vite: la vite senza fine non presenta i denti, bensì i filetti. I denti della corona dentata, realizzata generalmente in bronzo, sono sempre dritti e non elicoidali, necessità quest'ultima che ricorre solo quando serva disporre della reversibilità del moto (dalla corona dentata alla vite senza fine), il che non interessa nel caso delle montature. La vite senza fine è realizzata in acciaio della migliore qualità per via dell'alto coefficiente d'attrito e della resistenza che incontra durante la rotazione, e con tale accoppiamento è possibile trasferire il moto con elevato rapporto tra assi a 90°. Il rapporto di riduzione si calcola tenendo conto della velocità angolare e del numero dei denti della vite senza fine e dei filetti soggetti a lavoro, ed è espresso, attraverso alcuni passaggi, dalla relazione:

$$\tau = \frac{n_p}{z} \quad (1)$$

dove τ esprime il rapporto, n_p rappresenta il numero dei principi della vite senza fine, e z il numero dei denti della corona dentata.

• *Pulegge e cinghie piate.* Una cinghia è un organo di trasmissione del moto che collega due pulegge innestate sui relativi alberi, uno che trasmette il moto ed uno che lo riceve. Il rapporto di trasmissione (immagine nella pagina precedente) che si ha utilizzando pulegge di diverso diametro è espresso dall'equazione

$$\tau = \frac{D}{d} \quad (2)$$

intendendo per D il diametro della puleggia condotta e per d il diametro di quella conduttrice.

Le proprietà meccaniche di una trasmissione ad ingranaggi (ruota conduttrice e ruota condotta) si trasferiscono alla trasmissione a cinghie tramite puleggia, con la rilevante differenza (vedi immagine a pagina ??) che in una trasmissione a cinghia il momento angolare del motore della puleggia conduttrice chiamata M_1 ha ovvio senso concorde con quello della velocità della puleggia condotta che chiameremo M_2 : una parte della cinghia, il ramo più teso, si chiama *ramo conduttore*, l'altro ramo *ramo condotto*. Dette T_1 e T_2 rispettivamente le tensioni del ramo più teso e di quello meno teso, per l'equilibrio di rotazione della puleggia motrice sarà:

$$M = (T_1 - T_2)r \quad (3)$$

dove r è il raggio della puleggia conduttrice.

La forza F_p che potrebbe far slittare la cinghia dalla periferia della puleggia è espressa da

$$F_p = T_1 - T_2 \quad (4)$$

caso teorico date, si ripete ancora, le basse velocità in gioco e dato che lo slittamento è impedito dall'aderenza della cinghia alla puleggia che coincide, nel caso di cinghie piate, con l'attrito.

In entrambi i casi trattati l'esposizione è ovviamente descrittiva. Si rinvia per l'approfondimento ai testi citati in bibliografia.

duzione espresso dall'equazione 2 nel riquadro 15, ma mentre nella trasmissione a cinghia il moto della puleggia condotta è nello stesso senso della puleggia motrice, in questo caso, come per gli ingranaggi, il senso di moto s'inverte. Per evitare lo slittamento si aumenta il numero dei rulli di trascinamento in modo che la forza motrice sia distribuita su due o magari tre punti della ruota condotta. In questo caso la sincronizzazione delle velocità potrebbe costituire un problema. Questa costruzione,

di cui è mostrata una variante amatoriale nella figura in basso nella pagina precedente, per quanto le tecniche (e le possibilità) lo permettano è di gran lunga da preferire, essa comunque ha senso solo su strumenti di una certa grandezza, da 600 mm di apertura in su.

Gli svantaggi risiedono nella realizzazione di un tale disco che deve essere di grosso diametro e – soprattutto – deve essere cementato e rettificato a regola d'arte facendo lievitare notevolmente la spesa e rendendola antieconomica rispetto ad una corona dentata di dimensioni minori. Tuttavia la rettifica può essere agevolmente aggirata con un artificio tanto banale quanto efficace, ponendo sotto la ruota condotta una striscia di acciaio di 1 mm di spessore, facilmente reperibile in commercio, che assicuri la sfericità della ruota condotta. La soluzione a rulli frizionati è stata adottata da molti telescopi come il Mayall che l'ha utilizzata per l'asse orario nella sua montatura a ferro di cavallo e il LBT che l'ha adottata per gli assi di declinazione.

• *Sistema misto.* Un sistema efficiente che unisce i vantaggi del trascinamento a rulli e a cinghia è stato ideato e realizzato da D. Britz, : [2, *The Spectrogram*].

Il sistema denominato *tractor drive*, si compone di un sistema totale di quattro pulegge: una (la più grande) solidale con l'asse orario, e le altre tre collocate su una piastra assieme al motore e suscettibili di traslazione orizzontale per la migliore aderenza della cinghia alla puleggia condotta.

In questo caso, come si nota dall'immagine, la diversità rispetto al tradizionale sistema di trasferimento del moto, sta nel fatto che la cinghia aderisce soltanto ad un modesto arco di circonferenza, ed il lavoro è trasferito dalla parte interna della cinghia a quella esterna. Si ottiene il vantaggio che in questa modalità il moto non è trasferito soltanto dalla puleggia, ma attraverso di essa che opera come se i rulli primario e secondario fossero coperti di gomma, quindi l'attrito risulta maggiore che nel trascinamento a rulli frizionati. Di questi rulli soltanto uno, quello in rosso nell'immagine, trasmette il moto: quello in grigio è un rullo servente che assicura la posizione della puleggia sull'arco di circonferenza, e l'altro in nero è il tendicinghia.

In questo caso il rapporto di riduzione immaginando la cinghia come uno strato di gomma interposto fra il rullo conduttore e il rullo condotto, e non come un elemento di trasmissione, non è più quello dell'equazione (2) espressa nel riquadro in questa pagina, in quanto nel calcolo bisogna considerare anche lo spessore della cinghia interposta le cui dimensioni possono essere di qualche millimetro, quindi non influenti, e considerare ancora che la stessa cinghia per metà opera sul rullo conduttore e per metà sul rullo condotto. La formula proposta da Britz,



▲ Trascinamento a cinghia *tractor drive* di D. Britz

coerentemente con la meccanica del moto, è

$$\tau = \frac{z_v}{z_n} + (2 \times (T - 2 \times E)) \quad (5)$$

dove z_v e z_n rappresentano rispettivamente il diametro esterno della ruota condotta e della ruota conduttrice, T rappresenta lo spessore della cinghia, ed E il fattore di compressione della cinghia che in questo caso è determinante.

Per i parametri d'impostazione della velocità del moto orario si rinvia all'articolo di J. B. Tatun *et al.* [15], specie per le velocità per oggetti bassi sull'orizzonte che subiscono l'effetto della rifrazione atmosferica.

Per l'approfondimento delle tecniche di costruzione, oltre i siti citati, si segnalano –fra i tanti– quello di B. Lombardi [8], di B. Lula [9], di C. Wicks [18], dell'ARI [1], e specie quello dell'osservatorio Harpoint, in Austria, [12].

Bibliografia

- [1] ASTRONOMICAL RESEARCH INSTITUTE. "Astronomical Research Observatory". http://www.astro-research.org/observatory_directory.htm.
- [2] DAVID BRITZ. "A novel telescope drive: the tractor drive". In: *Society of Telescopy, Astronomy, and Radio; Spectrogram*, vol. 5, (2003), pp. 7 – 10. http://www.astronomiainumbria.org/advanced_internet_files/meccanica/Trascinamenti/spectrogram-05-2003.pdf.
- [3] EDIZIONI CALDERINI. "Trasmissione con cinghie".
- [4] GIANLUCA LI CAUSI. "Il PEC", luglio 2006. www.astronomiainumbria.org/advanced_internet_files/elettronica/otpt002.pdf.
- [5] NAZARENO CORIGLIANO. "Trasmissione con flessibili: le cinghie". ITIS Marconi, Bari. <http://nazarenocorigliano.interfree.it/CinghieTeoria.pdf>.
- [6] RUSSEL GENET, *et al.* "The Small Research Telescope Challenge", 2010. <http://www.eclipse-t.com/nas%20paper.pdf>.
- [7] ALBERT INGALLS (cur.). *Amateur Telescope Making*, vol. 1, 2, 3. Scientific American Inc., New York, 1966. Prefazione di Harlow Shapley.
- [8] BOB LOMBARDI. "Mechanical Design of Telescopes for the Amateur". <http://bossanova9.org/astro/ATM>.
- [9] BRIAN LULA. "Telescopes". www.heavensgloryobservatory.com/.
- [10] ENRICO F. MACCHIA, MASSIMO FIORUCCI. "La montatura altitude-altitude (alt-alt)". In: www.astronomiainumbria.org/publicazioni/OTPT001.pdf.
- [11] ENRICO MANFREDI. "Ruote dentate: perdite e rendimento". http://www.astronomiainumbria.org/_Meccanica.htm.
- [12] RUDOLF PRESSBERGER, *et al.* "Sternwarte Harpoint". <http://www.harpoint-observatory.com>.
- [13] E. H. RICHARDSON, AL. "Altitude-altitude (alt-alt) mounting for an 8-metre telescope". In: *SPIE, Advanced Technology Optical Telescopes, IV*, vol. 1236, (1990), pp. 897 – 903.
- [14] RANDY W. SMITH. "Construction of a 22 Inch Telescope", 2003. <http://home.earthlink.net/~indig>.
- [15] J. B. TATUN, N. N. HONKANEN, E. C. AXKKROYD. "A slow-motion crosshair drive for long-exposure photography of fast moving objects". In: *Journal of the British Astronomical Association*, vol. 97, (1987), pp. 90 – 95.
- [16] FRANK JANSE VAN VUUREN. "Design of a Hexapod Mount for a Radio Telescope", Marzo 2011. www.astronomiainumbria.org/advanced_internet_files/esapode/esapode.pdf.
- [17] S. VASILEVSKIS. "On the flexure of Fork-Mounted Telescopes". In: *Astronomical Journal*, vol. 67, no. 7.
- [18] CHARLIE WICKS. "Large german equatorial mount". <http://home.comcast.net/~charles.wicks/GEM.html>.
- [19] VITTORIO ZIGNOLI. "Calcolo pratico dell'accoppiamento vite senza fine con ruota elicoidale". In: *Atti e rassegna tecnica della società degli ingegneri e degli architetti*, vol. 6, no. 3, (1952), pp. 79 – 81. http://www.astronomiainumbria.org/advanced_internet_files/meccanica/Corona/Accoppiamento_Vsf_Corona.pdf.

