

LA GIROBUSSOLA

La girobussola è uno strumento direzionale che sfrutta le proprietà dei giroscopi per orientarsi lungo il meridiano vero. Rispetto alla tradizionale bussola magnetica è più efficiente in quanto la forza direttiva dell'elemento sensibile risulta anche 100 volte maggiore di quella dell'ago magnetico, inoltre la girobussola fornisce le prore e i rilevamenti veri che non necessitano quindi di eccessive correzioni.



Inoltre la girobussola permette di portare l'indicazione della rotta nei vari punti della timoneria della nave e di essere interfacciata con buona parte della strumentazione di bordo.

Sulle alette infatti si trovano le **ripetitrici di girobussola**, o semplicemente *ripetitrici*, che permettono di leggere i dati della rotta da posizioni remote e di effettuare delle misurazioni di rilevamenti o di azimut.



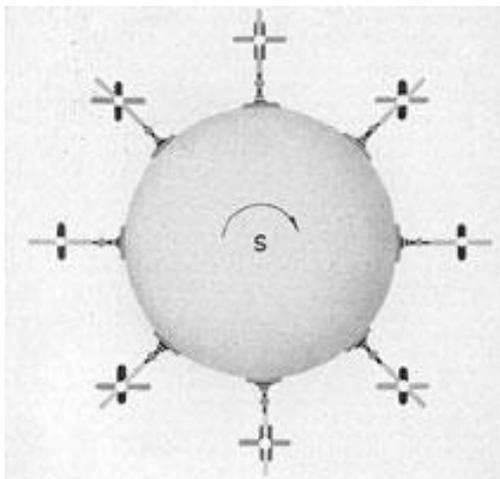
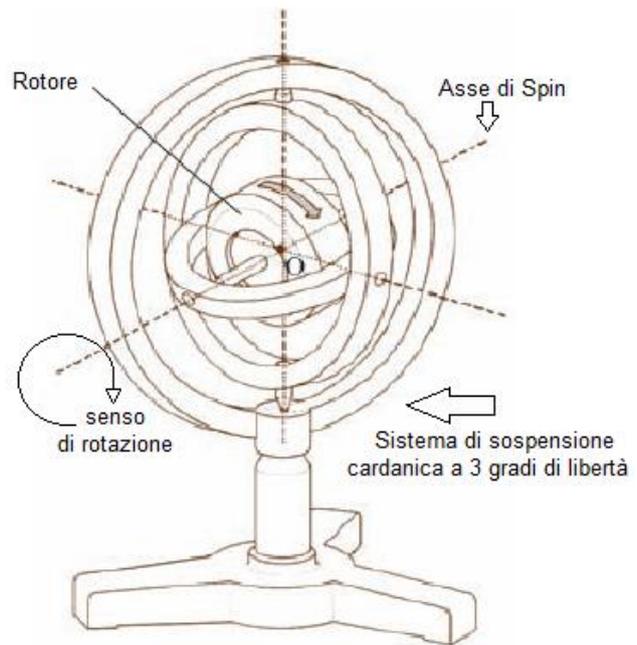
Le prime girobussole nascono agli inizi del '900 quando il tedesco Hermann Anschütz e l'americano Elmer Ambrose Sperry brevettarono i primi modelli funzionanti.

Da allora le girobussole si sono velocemente diffuse a bordo delle navi grazie alla loro affidabilità e, soprattutto dopo la Seconda Guerra Mondiale, quando vennero associate all'autopilota o *giropilota*, dispositivo in grado di far mantenere alla nave una data rotta.

Per meglio comprendere il funzionamento della girobussola bisogna richiamare le proprietà dei giroscopi.

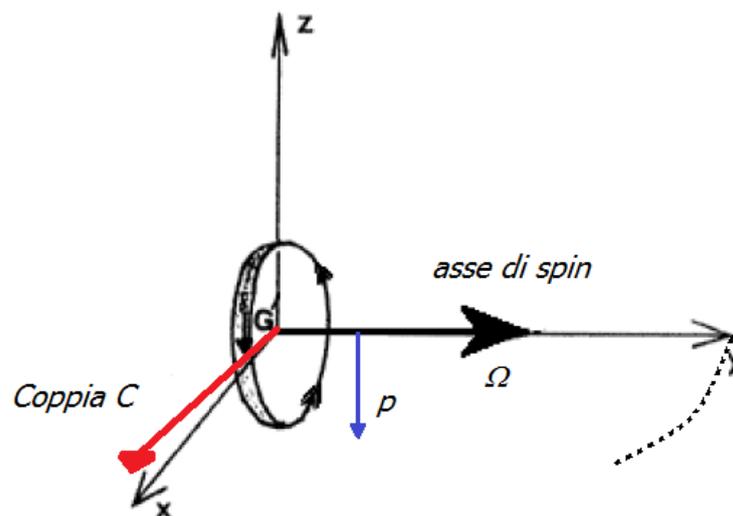
In fisica si definisce *giroscopio* un corpo che ruota ad elevata velocità intorno ad un proprio asse, che viene detto *asse di spin*.

La principale caratteristica del giroscopio è l'*inerzia giroscopica*, ossia la capacità di mantenere inalterato l'orientamento dell'asse di rotazione, rispetto ad un riferimento inerziale. Questo fa sì che un osservatore posto sulla superficie terrestre vedrà l'asse del giroscopio compiere una rotazione ogni 24 ore, puntando sempre nella stessa direzione rispetto alle stelle fisse. E ciò nonostante il moto di rotazione della Terra.



Il giroscopio ha però altre proprietà che lo portano a non rispondere sempre alle regole della meccanica comune. Se per esempio si applica un peso p ad un punto dell'asse di rotazione ci si aspetterebbe che il giroscopio si abbatta, invece accade che questo si mette a ruotare sul piano in cui si trova il suo asse di spin, fenomeno noto come **precessione** del giroscopio. Tale movimento nasce in conseguenza della creazione di una *coppia abbattente* C che tenderebbe a far ruotare verso il basso

l'asse di spin, in realtà a causa della proprietà del *parallelismo delle rotazioni* accade che il vettore che rappresenta la *velocità di rotazione* Ω si sposta per raggiungere il vettore che rappresenta la coppia C .

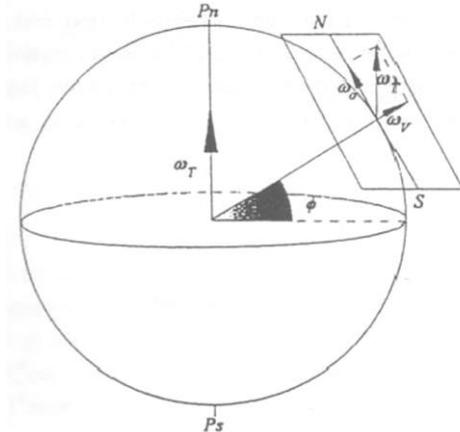


Questo movimento è chiamato **precessione libera**. L'asse del girostato, sollecitato dalla coppia generata dalla massa pendolare, reagisce ruotando sul piano perpendicolare a quello su cui è esercitata la coppia stessa. Una cosa simile avviene se invece di una forza si applica al giroscopio una rotazione intorno all'asse Z, per esempio. Si vedrà nascere un movimento di precessione che porterebbe l'asse di spin a sollevarsi nel *piano yz*; in questo caso si parla di **precessione forzata**. Evidentemente lo stesso risultato si potrebbe ottenere immaginando di applicare una rotazione intorno all'asse x: l'asse di spin si muoverebbe nel *piano xz* per sovrapporsi alla rotazione intorno ad x.

In effetti il nostro pianeta ruota in senso antiorario intorno all'asse polare e tale rotazione può essere rappresentata da un vettore ω applicato al centro della Terra e rivolto verso il Polo Nord.

Tale vettore ammette due componenti:

- una per meridiano $\omega_1 = \omega \cdot \cos\phi$
- una per parallelo $\omega_2 = \omega \cdot \sin\phi$

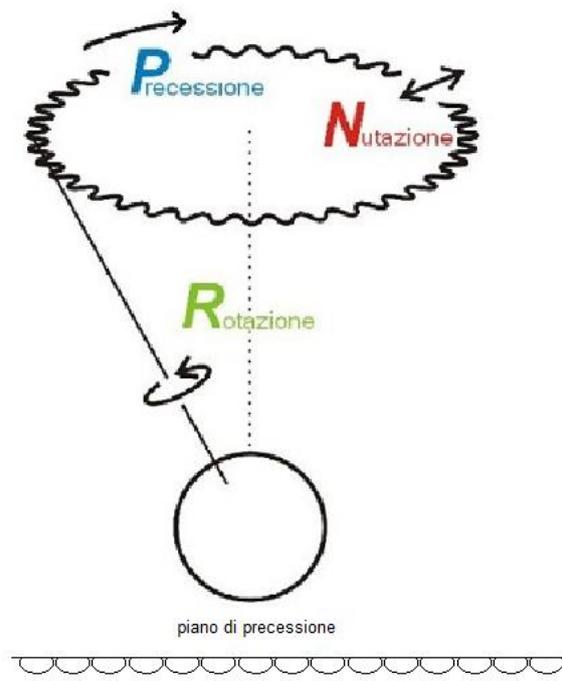


La prima componente ω_1 è utilizzata per l'orientamento del giroscopio, mentre la seconda ω_2 è responsabile del moto in azimut degli astri. Annullando in qualche modo la rotazione ω_2 si "costringerà" il giroscopio ad orientarsi lungo la linea del meridiano sovrapponendosi alla componente ω_1 della rotazione terrestre.

Da quanto ora descritto è nata l'idea di provocare una precessione dell'asse di spin del giroscopio in modo da portarlo a sovrapporsi al meridiano geografico che rappresenta la direzione Nord-Sud.

Il moto di precessione non è l'unico movimento provocato dalla coppia abbattente generata dal pesetto, in effetti accade anche che l'asse di spin ubbidisce subito all'azione della coppia abbattente di momento C inclinandosi lievemente sullo stesso piano della coppia, ma non appena ha iniziato questo movimento subisce l'azione di richiamo che riporta l'asse sul piano del moto di precessione. Per effetto di queste coppie un estremo dell'asse di spin descrive un piccolo arco volgente la concavità verso il piano di precessione.

Questo moto è detto di **nutazione** ed è un moto di oscillazione dell'asse di rotazione del giroscopio, che si manifesta in combinazione con il moto di precessione.



Il moto è dovuto al fatto che il momento angolare della precessione si somma a quello della rotazione: perciò il momento angolare risultante non è esattamente diretto lungo l'asse di

simmetria dell'oggetto rotante; ciò provoca un'oscillazione di tale asse nella direzione trasversale al moto di precessione e, in conseguenza di questo, anche una lieve variazione periodica della velocità angolare di precessione. L'ampiezza della nutazione è proporzionale al rapporto tra la velocità angolare di precessione e quella di rotazione.

La nutazione si osserva ad esempio nel moto della trottola: man mano che essa rallenta la sua rotazione il suo asse oscilla via via più marcatamente, finché la trottola cade.

Il moto di nutazione si osserva anche per i pianeti, tra cui la Terra, in combinazione con la precessione degli equinozi. I moti di precessione e nutazione terrestre sono causati dalla forza di marea esercitata dal Sole e dalla Luna. Questi moti non sono perfettamente regolari, perché la Luna e il Sole non si trovano sempre nello stesso piano e si muovono l'una rispetto all'altro, causando una variazione continua della forza agente sulla Terra.

Un giroscopio semplice non potrebbe funzionare da bussola. L'ingrediente aggiuntivo necessario è l'*attrito*; per ottenerlo si cerca di generare una coppia resistente frenando il rotore immergendolo in un liquido viscoso provocando così l'orientamento progressivo dell'asse stesso in senso nord-sud, unica disposizione in cui l'asse non subisce più alcuna forza poiché rappresenta la posizione di massima stabilità.

Un sistema meccanico o elettromeccanico rileva quindi la posizione dell'asse e la ripete su pannelli indicatori posti nella plancia di comando, ossia le ripetitrici.

Dunque la girobussola è essenzialmente un giroscopio con *due gradi di libertà*, cioè vincolato al piano orizzontale, che per effetto delle proprietà della precessione forzata, della sovrapposizione delle rotazioni e dell'*inerzia giroscopica*, ovvero la proprietà di mantenere inalterato l'orientamento del proprio asse di rotazione (*asse di spin*), si orienta lungo il meridiano vero.

Il rotore del giroscopio è mantenuto ininterrottamente in rotazione da un motore elettrico o da un motore ad aria compressa. A questo proposito giova ricordare che una girobussola è una struttura elettromeccanica abbastanza complessa, per altro sistemata a bordo della nave che è soggetta a forti e variabili oscillazioni durante la navigazione.

Un giroscopio di discrete dimensioni e dotato di elevata velocità angolare possiede una notevole coppia direttiva, ma evidenti limitazioni tecniche impongono dei compromessi. Infatti le girobussole ideate da Sperry e Anschutz adottavano soluzioni differenti: la Sperry adotta grossi giroscopi che ruotano con velocità angolari non elevate, mentre la Anschutz adotta giroscopi più piccoli ma con elevatissime velocità angolari.

Le oscillazioni e le relative sollecitazioni cui è soggetto lo scafo di una nave durante la navigazione hanno portato ad adottare dei vincoli elastici per gli elementi sensibili delle girobussole tradizionali, creando una sorta di *pendolo giroscopico*.

Molta attenzione è dunque posta nella realizzazione dell'impianto gyro, un tale impianto è costituito da una **Girobussola madre** (una volta di notevoli dimensioni) ubicata in un locale apposito detto appunto *locale gyro* posizionato il più vicino possibile al baricentro della nave.

Soluzione che risulta ancora praticabile sulle navi passeggeri e su quelle militari, ma di meno su quelle mercantili che generalmente si ritrovano un cassero poppiero che ospita la plancia, gli alloggi ed i locali di servizio, quindi lontani dal baricentro dello scafo.

Dalla girobussola madre si diramano tutti i collegamenti per le ripetitrici e gli altri strumenti ad essa asserviti. Durante gli anni la struttura delle girobussole si è evoluta e le sue dimensioni si sono via via ridotte. Anche il numero dei giroscopi si è ridotto, arrivando ad avere un solo giroscopio come nel caso della Sperry SR.



5 chili ed un motore elettrico lo fa ruotare a migliaia di giri al minuto.

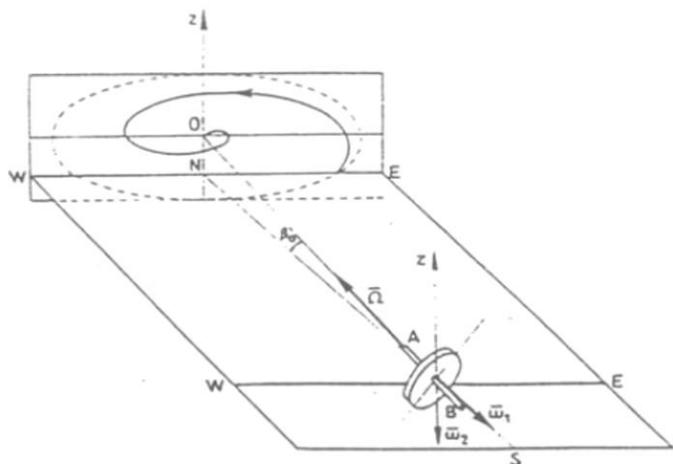
Il complesso del rotore e del motore costituisce l'elemento sensibile che risulta collegato alla rosa dei venti mediante l'elemento "fantasma", che comprende anche una ruota dentata e dispositivi di sostegno in maniera da renderla indipendente. Quando la nave altera il suo corso il fantasma si muove con esso, ma il sistema giroscopico continua a punta verso nord. Così il fantasma e l'elemento sensibile non sono più allineati. Questa mancanza di allineamento è usata dal fantasma per inviare un segnale al suo motore di azionamento, che muove il fantasma affinché torni allineato in fase con il rotore. Tale movimento del fantasma può essere sia di parecchi gradi o solo una frazione di grado. Ogni movimento del fantasma invia impulsi elettrici alle ripetitrici e viene adoperato per attivare e controllare il funzionamento del giropilota.

Il fantasma è composta da un'intelaiatura che comprende due coppie di serbatoi allineate per meridiano una ad Est ed una ad Ovest rispetto all'asse di rotazione del giostato. I serbatoi contengono mercurio per un peso di quasi 230 grammi e formano un sistema di vasi comunicanti a mezzo di tubicini.

Poiché il funzionamento della girobussola è legato alla rotazione terrestre, se il mezzo su cui è montata cambia direzione troppo rapidamente, il funzionamento ne è perturbato. Quando la rotta della nave è est o ovest l'errore è minimo, ma navigando in direzione nord l'asse di spin viene deviato leggermente a ovest del meridiano vero, mentre navigando verso sud la deviazione è verso est.

L'entità dell'errore dipende quindi dalla rotta della nave, ma anche dalla velocità e dalla latitudine. L'errore dovuto alla latitudine può essere corretto automaticamente da un meccanismo che sposta la linea di fede di una quantità pari all'errore, oppure può essere calcolato mediante l'uso di tabelle di correzione o di un calcolatore.

Prima di orientarsi lungo la direzione del meridiano vero l'asse del giroscopio compie delle oscillazioni descrivendo una spirale ellittica la cui ampiezza è via via decrescente. Il rapporto tra una semiampiezza e la successiva viene definito **fattore di smorzamento**, mentre si definisce **periodo di smorzamento T_s** il tempo necessario a compiere una semioscillazione. La girobussola si ritiene orientata quando l'angolo di deviazione δ risulta inferiore ad 1° .



Con le girobussole moderne l'impianto risulta tuttavia più semplice e meno ingombrante, come schematicamente mostrato in figura.

Queste moderne girobussole infatti non hanno parti in movimento, ma giroscopi a fibre ottiche (FOG - Fiber Optical Gyro) costituiti da circuiti percorsi da un raggio luminoso.

Sostanzialmente si tratta di sdoppiare un unico raggio luminoso in due diversi raggi, che viaggiano su un medesimo percorso ottico ad anello chiuso; ma in direzioni opposte: un raggio ruota in senso orario e l'altro in senso antiorario.



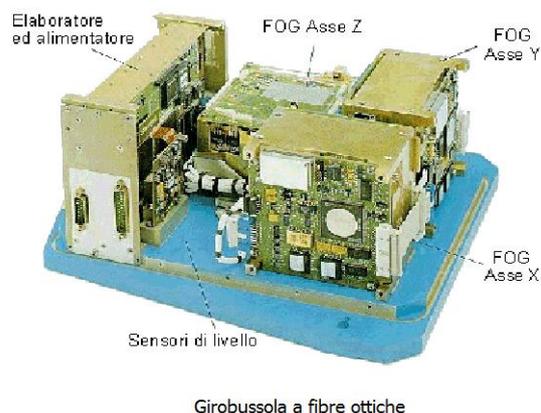
Nei giroscopi FOG (a fibre ottiche) i raggi scorrono dentro un fascio di fibre ottiche lungo anche 5 Km ed avvolte in spire del diametro di alcuni centimetri. Il fascio di luce viene diviso in due raggi da un apposito accoppiatore che ha anche il compito di ricombinare le onde di ritorno che hanno percorso il fascio di fibre ottiche in direzioni contrarie. La misura del segnale in uscita si effettua con un apposito fotodiodo, o altro sensore. Durante la propagazione la fase di un raggio laser cambia continuamente con la distanza L percorsa e precisamente di 2π radianti per ogni tratto pari alla lunghezza d'onda λ .

Quando non c'è rotazione del giroscopio, i due percorsi ottici sono uguali e quindi le due onde sono in fase, per cui il segnale in uscita dall'accoppiatore risulta massimo; al contrario, il segnale è nullo quando le due onde sono sfasate di $\pm \pi$, ossia quando la differenza dei due percorsi è pari a mezza lunghezza d'onda ($\lambda/2$).

Nel caso in cui l'intero sistema ruota attorno ad un asse passante per O (**asse sensibile del giroscopio**) e con velocità angolare Ω ; in tal caso il percorso del raggio concorde con il verso di rotazione tende ad allungarsi, mentre quello dell'altro raggio tende ad accorciarsi per cui la differenza di fase Φ dei segnali che arrivano nel ricevitore non è più nulla.

Tuttavia un solo FOG non è in grado da solo di indicare la direzione del nord come nei normali giroscopi di tipo meccanico con sospensione cardanica; esso è soltanto in grado di misurare la componente della velocità angolare terrestre lungo il suo asse di sensibilità.

Per ottenere la funzione orientamento desiderata si montano tre giroscopi disposti lungo una terna di assi cartesiani X, Y e Z che può coincidere con i tre assi della nave; per definire il piano orizzontale si impiegano inoltre due sensori di livello. La tecnologia utilizzata è nota come **strapdown**, ossia con i giroscopi montati rigidamente su un piano fisso rispetto alla nave e non su un piano mantenuto costantemente orientato e parallelo rispetto ad un piano di riferimento come nella navigazione inerziale di tipo tradizionale.



A prescindere dal tipo di girobussola adottata il fatto che questa si trovi a bordo della nave comporta che sia soggetta a *deviazioni balistiche* – dovute ai moti di rollio e beccheggio della nave – e *deviazioni dinamiche* provocate dalla velocità e rotta della nave. La velocità della nave, infatti, si combina con la componente per meridiano della velocità di rotazione terrestre ω_1 dando origine alla *velocità assoluta* della nave rispetto alla quale viene ad orientarsi l'asse del giroscopio. Per tenere conto di ciò si utilizzano dei correttori automatici sia per la latitudine φ che per l'angolo di rotta R_v così come è anche possibile fare utilizzando la tavola 11 della raccolta di Tavole Nautiche dell'I.I.M. che sulla base appunto della latitudine, dell'angolo di rotta e della velocità della nave fornisce la correzione da applicare.

Tuttavia rimane un errore residuo della girobussola ε_g di cui bisogna tener conto e che va determinato osservando l'azimut del Sole all'istante del sorgere e del tramonto alle ripetitrici e confrontandolo con l'azimut calcolato sia mediante formula o col metodo dell'amplitudine, determinabile anche con l'impiego delle Tavola 17 delle Tavole Nautiche.

Determinato il valore dell'azimut vero Az_v lo si confronta con quello osservato Az_o e dalla differenza si ricava il valore dell'errore:

$$\varepsilon_g = Az_v - Az_o$$

Infine mediante la semplice relazione: $P_v = P_g + \varepsilon_g$ si ricava il valore dell'angolo di prora vera P_v .

Con lo stesso procedimento si può controllare il corretto funzionamento della bussola magnetica procedendo all'osservazione del sorgere o tramonto del Sole alla magnetica e poi applicando la relazione:

$$\varepsilon_m = Az_v - Az_m$$

e quindi: $P_v = P_m + \varepsilon_m$