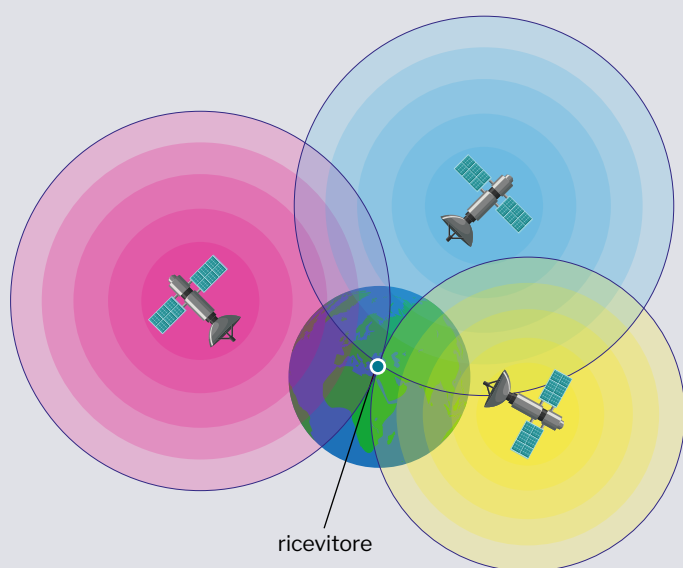


# You are here

## Come fanno GPS e Galileo a portarci a casa

di Luciano less



**a.** Schema della trilaterazione. Il ricevitore misura i tempi di arrivo dei tre segnali satellitari, da cui si ricavano i raggi delle tre sfere. La conoscenza delle coordinate dei tre satelliti, assieme a quella dei raggi, permette di ricavare le coordinate del punto di intersezione tra le tre sfere, che coincide con la posizione del ricevitore.

Il mio orologio segna le 17:15. Molto tardi. Avremmo già dovuto essere da tempo al rifugio, invece ci attendono ancora due, forse tre ore di cammino sul ghiacciaio. Per di più è calata la nebbia e non si intravede nessuna pista. Trent'anni fa un po' di ansia e preoccupazione sarebbero state inevitabili. Quando riusciremo ad arrivare, con queste condizioni meteo e su un terreno sconosciuto a tutti noi? Oggi, invece, estraggo dalla tasca il mio cellulare, apro l'app con la mappa su cui, a casa, avevo tracciato un buon percorso, attendo qualche secondo, ed ecco apparire il puntino blu che indica la mia posizione. Nessuna ansia. Legati in cordata, dobbiamo solo controllare che quel puntino si discosti poco dalla traccia sullo schermo. Dopo due ore, ecco apparire la sagoma del rifugio. È ora di cena e di un brindisi.

Ma cosa c'è dietro quel puntino blu che ci ha permesso di arrivare rapidamente e senza errori al rifugio? Come fa il nostro cellulare a guidarci in una città sconosciuta all'indirizzo desiderato? La risposta sta in tre elementi: orologi, satelliti e segnali radio. I sistemi di navigazione satellitare, indicati in gergo tecnico come GNSS (un acronimo per *global navigation satellite system*) sono certamente l'utilizzazione più diffusa di sistemi spaziali nella vita di tutti i giorni.

Sebbene gli odierni GNSS siano sofisticate realizzazioni tecnologiche, il loro principio di funzionamento è semplice. Supponiamo di avere sopra di noi tre satelliti dotati di tre orologi sincronizzati tra loro. Supponiamo poi che ciascuno di questi tre satelliti trasmetta in maniera sincrona, ad esempio allo scoccare di ogni secondo, un impulso radio e ci fornisca le sue coordinate spaziali  $(x, y, z)$  in quel momento. Facciamo poi un'assunzione alquanto irrealistica, cioè che l'orologio del mio cellulare sia sincronizzato con quello dei satelliti. I segnali radio provenienti dai tre satelliti arriveranno al mio cellulare in tempi diversi, che dipenderanno dalla loro distanza. I segnali radio si propagano con ottima approssimazione alla velocità della luce (300.000 km/s circa), quindi se, per esempio, un satellite dista 30.000 km, il segnale radio impiegherà 0,1 s per raggiungermi. Il ricevitore GNSS integrato nel mio cellulare annota i tempi di ricezione dei tre impulsi e le coordinate  $(x, y, z)$  di ciascun satellite. Siamo pronti a porci la domanda fondamentale: qual è il punto dello spazio (ossia quali sono le sue coordinate  $X, Y, Z$ ) per il quale i tempi di propagazione sono quelli misurati dal ricevitore? Il problema contiene tre incognite (le coordinate



b.  
Rappresentazione grafica della costellazione di satelliti Galileo (ESA).

X, Y, Z dell'utente) con tre misure a disposizione (i tempi di propagazione dei segnali radio dai tre satelliti all'utente), quindi la sua soluzione è non solo possibile, ma anche semplice.

Come mostra la fig. a, basterebbe solo applicare il teorema di Pitagora nella procedura chiamata di "trilaterazione".

Tuttavia, l'orologio interno al mio cellulare non è certamente sincronizzato con quello dei satelliti della costellazione. La determinazione della nuova incognita (la desincronizzazione, ossia la differenza tra il tempo dei satelliti e quello del mio orologio locale) richiede un quarto satellite. In questo modo, misurando un altro tempo di propagazione, non solo posso ottenere la mia posizione, ma posso anche sincronizzare il mio orologio con il tempo satellitare, a sua volta legato con ottima precisione al tempo civile diffuso dagli istituti metrologici nazionali.

Il primo GNSS operativo è stato il Global Positioning System (GPS) americano: progettato dal Dipartimento della difesa a partire dal 1973, è diventato pienamente operativo nel 1993, con 24 satelliti (oggi più numerosi) attorno ai 20.000 km di quota. La precisione tipica per gli utenti civili era dell'ordine dei 100 metri a causa di un errore intenzionale nella posizione dei satelliti trasmessa agli utenti. Disattivata quella funzione, l'accuratezza è migliorata drasticamente. I moderni cellulari permettono di ottenere precisioni di pochi metri, mentre per applicazioni professionali, come quelle geodetiche o militari, l'errore può ridursi a pochi centimetri.

Alla fine degli anni '90 anche in Europa prese piede l'idea di sviluppare un sistema analogo, orientato però verso le applicazioni civili. Galileo, il sistema di navigazione satellitare dell'Unione europea e dall'Agenzia spaziale europea (ESA), diventato operativo nel 2016, offre prestazioni comparabili, ma con una maggiore trasparenza e standard di accuratezza ancora più elevati (attorno a un metro per gli utenti generici, molto meno per i servizi di precisione). Galileo si distingue anche per la qualità e stabilità dei suoi orologi atomici al rubidio e ai maser a idrogeno passivo, capaci di perdere al massimo un secondo dopo molti milioni di anni. È proprio questa stabilità a rendere possibile la sincronizzazione estremamente precisa di tutti gli orologi della costellazione, necessaria per la navigazione e per molte altre applicazioni scientifiche e industriali.

Ogni satellite GNSS porta a bordo più orologi atomici, la cui sincronizzazione è mantenuta costantemente da stazioni di terra che confrontano il tempo satellitare con le scale di tempo dei principali istituti metrologici. Gli orologi a bordo non servono solo a misurare la distanza con precisione, ma anche a calcolare con accuratezza le orbite dei satelliti stessi: errori di pochi miliardesimi di secondo si tradurrebbero in decine di metri di incertezza nel posizionamento a terra.

A queste scale di precisione, gli effetti della relatività non possono essere ignorati. I satelliti GNSS si muovono a circa 4 km/s a una quota di 20.000 km, dove il campo gravitazionale terrestre è più debole. Secondo la relatività generale, il tempo segnato da orologi scorre più velocemente dove la gravità è più debole, mentre la relatività ristretta prevede un rallentamento dovuto alla velocità. Sommando i due effetti, gli orologi a bordo dei satelliti guadagnerebbero circa 40 microsecondi al giorno rispetto a quelli sulla Terra. Se questa differenza



c.  
L'esperimento di congiunzione solare della missione Cassini (NASA/ESA/ASI) è stato effettuato nel luglio del 2002, quando la sonda si trovava oltre Giove e in viaggio verso Saturno, la sua destinazione finale. Orologi molto precisi all'antenna di terra e un sistema di telemisure all'avanguardia, capace di misurare la velocità della sonda con errori di tre millesimi di millimetro al secondo, hanno confermato la teoria di Einstein con precisione senza precedenti.

non fosse compensata, l'errore in posizione, dopo un solo giorno, diventerebbe addirittura di 10 km. In pratica, se gli effetti relativistici non fossero adeguatamente considerati, il sistema non funzionerebbe. Potremo dire che il sistema GPS americano è stata la prima applicazione "industriale" della teoria di Einstein.

La misura del tempo è altrettanto cruciale nella navigazione interplanetaria, esattamente come lo è stata per la navigazione marittima con il cronometro di Harrison dopo il 1761. Le sonde spaziali, infatti, non possono affidarsi ad un ancora inesistente "GPS marziano". La loro orbita nello spazio profondo è determinata dai centri di controllo terrestri grazie a misure dei tempi di propagazione, della frequenza di segnali radio inviati e ricevuti da una o più antenne terrestri. Misurando differenze di tempo e frequenza con orologi atomici molto stabili si possono stimare distanze di centinaia di milioni di chilometri con precisioni di pochi centimetri, e velocità di decine di chilometri al secondo a meno di qualche centesimo di millimetro al secondo.

Il tempo, quindi, non è solo una misura del nostro quotidiano, ma anche una delle chiavi per esplorare l'universo. Esperimenti scientifici nello spazio hanno sfruttato proprio la misura del tempo per mettere alla prova la relatività e la struttura stessa dello spaziotempo. Uno dei più noti è l'esperimento della missione Cassini, che nel 2002, mentre era in viaggio verso Saturno, misurò la variazione del ritardo di segnali radio quando il loro cammino passava vicino al Sole. La gravità, infatti, rallenta i tempi di transito della luce, in maniera tanto più pronunciata quanto più grande è la massa del corpo che la genera: un effetto previsto da Einstein e confermato dalla sonda Cassini con una precisione di una parte su cinquantamila.

Dalla cordata sul ghiacciaio alle sonde interplanetarie, il filo conduttore è lo stesso: orologi sempre più precisi che misurano lo scorrere del tempo e vengono continuamente sincronizzati tra loro, permettendo di orientarci nello spazio, esplorare l'ignoto e comprendere meglio le leggi che governano l'universo. Dietro quel puntino blu non c'è solo tecnologia, ma anche la capacità di misurare il tempo, una delle più sottili conquiste della conoscenza umana.

Se vi capiterà di seguire una traccia nella nebbia, pensateci: è il tempo, misurato con precisione, a indicarvi la strada.

#### Biografia

**Luciano Iess** insegna ingegneria aerospaziale presso Sapienza Università di Roma. Ha condotto esperimenti di geodesia e fisica fondamentale con diverse missioni di spazio profondo della NASA e dell'ESA. Ha ricevuto la medaglia Jean Dominique Cassini della European Geosciences Union e le Exceptional Public Service Medal ed Exceptional Scientific Achievement Medal della NASA.