

Da Arthur C. Clarke al Sistema globale di localizzazione

Emilio Matricciani Politecnico di Milano

Con questo contributo, tratto da una lezione pubblica del ciclo di conferenze “Telecomunicazioni oggi”, si propone una breve, ma intensa, storia dei satelliti di telecomunicazione, dai satelliti geostazionari di Arthur C. Clarke, a quelli del GPS

L'articolo riassume la “lezione” informativa-divulgativa che da alcuni anni rivolgo alle ultime classi dei licei milanesi per raccontare la breve (su scala storica), ma intensa, storia dei satelliti di telecomunicazione. Alla pubblicazione dell'articolo “icona” di Clarke del 1945, seguono gli anni 1950, pieni di attività, entusiasmo ed esperimenti, soprattutto negli USA per impulso di Pierce (Laboratori Bell), che chiudono nel 1965 un periodo pionieristico con la messa in orbita del primo satellite geostazionario. Dopo questo periodo irripetibile, si sviluppano moltissimi altri satelliti per applicazioni anche diverse dalle telecomunicazioni, quali il telerilevamento delle risorse terrestri, le previsioni meteorologiche e il sistema globale di localizzazione (GPS). In Italia, dagli anni 1970, si sperimentano nuove frequenze con i satelliti Sirio e Italsat, per l'impulso di Francesco Carassa, professore e rettore del Politecnico di Milano. Poiché, per dirla con Galileo, chi non conosce la matematica si aggira vanamente per un oscuro labirinto, il contributo affronta in modo puntuale alcuni temi di fisica legati alle orbite con semplici equazioni ed esempi.

Quattro pagine per riassumere il futuro

Nell'ottobre del 1945 su una rivista tecnica popolare inglese si può leggere un articolo di sole quattro pagine [1] di un giovane impiegato della RAF, non ancora laureato¹, Arthur Charles Clarke (1917-2008), in cui l'autore propone ai lettori (soprattutto ingegneri della radio e televisione, diletanti appassionati del fai-da-te) di lanciare nello spazio, con razzi più potenti di quelli allora sviluppati dai tedeschi, tre ripetitori radio e di inserirli in un'orbita posta nel piano equatoriale, a 36.000 km di altezza, un'idea quasi fantascientifica per i tempi. In questa particolare orbita i satelliti appaiono fissi (geostazionari) a un osservatore terrestre. Il giovane autore, membro dell'Associazione Astronomica Britannica, appassionato di spazio e della nascente Astronautica, aveva già scritto alcuni brevi racconti di fantascienza, attività alla quale si dedicherà con notevole successo e creatività, e per la quale è notissimo al grande pubblico perché autore, tra l'altro, della storia dalla quale è stato tratto il film di Stanley Kubrick *Odissea 2001 nello spazio* (1968).

L'articolo dell'ottobre 1945 è in realtà preceduto da una breve lettera nel febbraio dello stesso anno e da un breve testo distribuito in forma privata nel maggio seguente [2]². A questi lavori, soprattutto all'articolo di ottobre, si fa ora risalire l'inizio della storia dei satelliti artificiali per telecomunicazioni, tanto che l'orbita geostazionaria oggi è anche chiamata *orbita di Clarke*.

L'idea di usare questa particolare e unica orbita non è soltanto di Clarke, era già stata proposta da altri, come lui stesso ricorda più volte nei suoi scritti [2]. È il suo articolo, però, a suscitare un certo interesse in coloro che alla fine della Seconda guerra mondiale possiedono una nuova tecnologia (radar,

¹ Si laurea in fisica e matematica soltanto nel 1948 al King's College.

² È una raccolta degli articoli tecnici più significativi, incluso, naturalmente, quello del 1945.

potenti generatori di microonde, vaste reti di telecomunicazione) e importanti forze aeree e navali dislocate in tutto il globo. Qualcosa di simile era già accaduto con l'invenzione del telegrafo senza fili, le cui applicazioni Marconi aveva proposto prima al Governo italiano, che le ignorò, e poi al Governo inglese, che ne apprezzò subito l'importanza per la Marina, tanto che le attività di sviluppo furono condotte nel Regno Unito, non nel Regno d'Italia. Sia nel breve testo diffuso privatamente, sia nell'articolo, Clarke discute i vantaggi dell'orbita geostazionaria, ne evidenzia l'utilità per le telecomunicazioni e l'osservazione della Terra, e propone scelte tecnologiche e di architettura di sistema per risolvere alcuni problemi, allora già chiari nella sua mente. Per essere concreti, la discussione verte sui vantaggi ottenibili dal diffondere i segnali televisivi dai satelliti invece che dai ripetitori terrestri, molti anche per un piccolo paese come il Regno Unito, e la possibilità di trasmettere la televisione anche attraverso l'Atlantico, cosa allora impossibile con i cavi coassiali sottomarini, buoni soltanto per telefonare.

Naturalmente, c'è il problema di come fornire la velocità minima di 8 km/s (Figura 1) a un razzo perché percorra un'orbita inerziale (ossia in caduta libera) intorno alla Terra, e poi l'energia meccanica totale per arrivare all'orbita geostazionaria. Gli unici razzi che potevano essere disponibili, finita finalmente la guerra, erano i razzi tedeschi che piovevano su Londra, alimentati da carburanti chimici. Una stima tedesca prevedeva di raggiungere la potenza di lancio necessaria per porre un oggetto in orbita geostazionaria soltanto dopo 50-100 anni.

Nell'orbita geostazionaria sarà possibile costruire una stazione spaziale sulla quale gli astronauti potranno condurre studi di astronomia, esperimenti di fisica e sviluppare la meteorolo-

gia. Per le telecomunicazioni basteranno tre satelliti, disposti a 120° (Figura 2), per coprire il globo terrestre visibile dall'orbita, posti ad esempio alle longitudini di 30°E , 150°E , 90°O , una giostra spaziale con tre seggiolini, il cui numero è aumentabile a dismisura. Le frequenze di lavoro possono essere quelle dei radar appena sviluppati, da 50 MHz fino ad arrivare, in un futuro non lontano, a 100 GHz, perché a queste frequenze è possibile concentrare la potenza irradiata con le grandi antenne paraboliche usate per i radar durante la guerra, su superfici geografiche relativamente piccole, mediante fasci stretti (figura 3), e questa potenza dovrebbe essere sufficiente per attraversare l'atmosfera. Nonostante la grande lunghezza del collegamento, le potenze dei trasmettitori potranno anche essere più piccole di quelle dei ripetitori terrestri, e si potranno anche collegare tra loro i satelliti per far comunicare stazioni agli antipodi.

Ci si dovrà assicurare, però, che queste frequenze attraversino real-

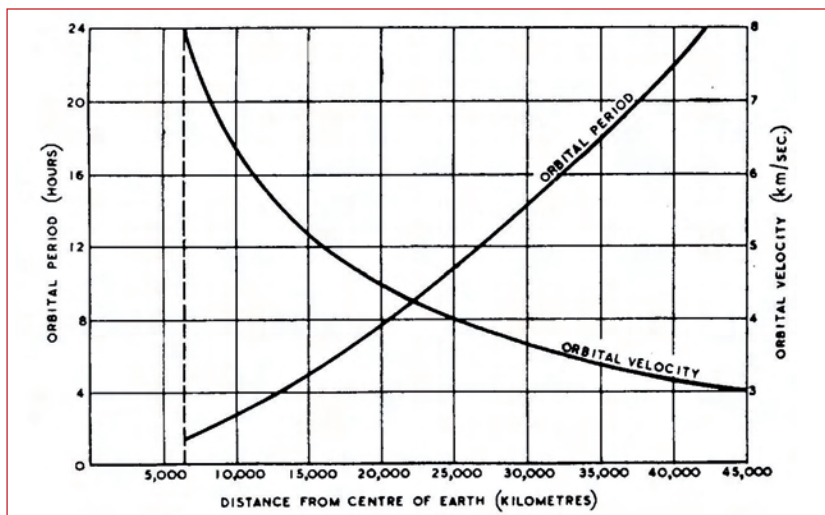


Figura 1

Periodo e velocità orbitali in funzione della distanza dal centro della Terra. È la figura 1 dell'articolo di Clarke [1]

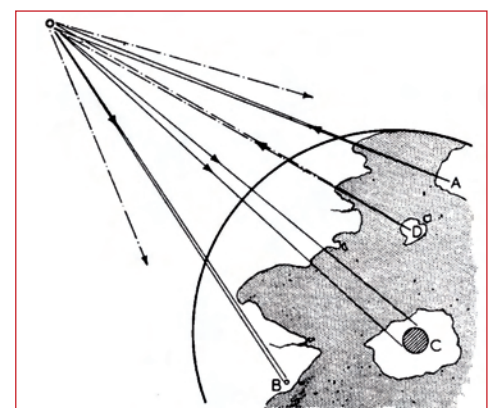


Figura 3

Trasmissione con antenne direttive per inviare i segnali verso aree geografiche di diverse dimensioni. È la figura 3 dell'articolo di Clarke [1]

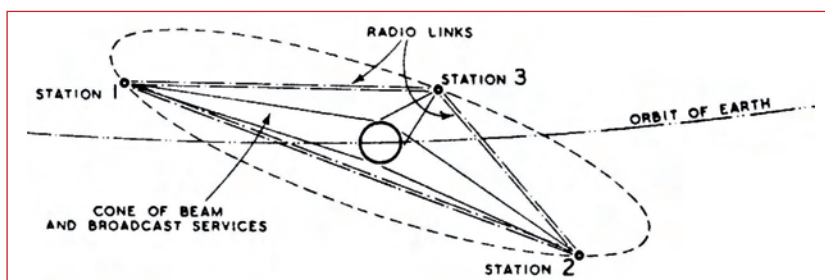


Figura 2

Tre satelliti nell'orbita geostazionaria a 120° di distanza. È la figura 2 dell'articolo di Clarke [1]

mente l'atmosfera, che non siano attenuate o riflesse, come avviene alle frequenze più basse a causa della ionosfera, fenomeno che aveva permesso a Marconi, contro ogni previsione degli scienziati dell'epoca (ignari della presenza della ionosfera, come Marconi) di trasmettere segnali attraverso l'Atlantico senza ripetitori. Clarke propone di investire la superficie dell'unico satellite già esistente, la Luna, con un fascio di radiazione elettromagnetica molto stretto e potente, trasmesso da un radar, e misurarne l'eco riflessa sulla Terra. Se si misura un'eco, vuol dire che l'atmosfera è trasparente a queste frequenze.

Per l'energia elettrica necessaria a far funzionare le apparecchiature a bordo della stazione spaziale, o dei satelliti (apparecchiature a valvole, il transistor sarà scoperto, più che inventato, nel 1948 [3]³), si possono escogitare varie soluzioni, e tra queste, anche una macchina a vapore, soluzione che oggi può far sorridere. C'è però anche la proposta di usare celle fotovoltaiche per convertire in elettricità parte dei circa 1.350 W/m² di potenza irradiata da Sole, disponibile alla distanza della Terra, una volta che queste saranno sviluppate. A causa delle eclissi durante gli equinozi (Figura 4), si dovranno imbarcare batterie elettriche da usare quando il Sole è nascosto dalla Terra. L'uso dell'energia nucleare gli sembra troppo pericolosa per un oggetto in orbita. L'articolo è un "riassunto" quasi puntuale dei futuri venti anni di sviluppo dei satelliti, e cinquanta per la stazione spaziale. La fisica sulla quale sono basati i calcoli di Clarke è la fisica di Galileo, Keplero e Newton.

La fisica di Galileo, Keplero e Newton

La teoria alla base dei calcoli di Clarke è la meccanica classica, fondata da Galileo, Keplero e Newton [4-6]⁴. La terza legge di Keplero mette in

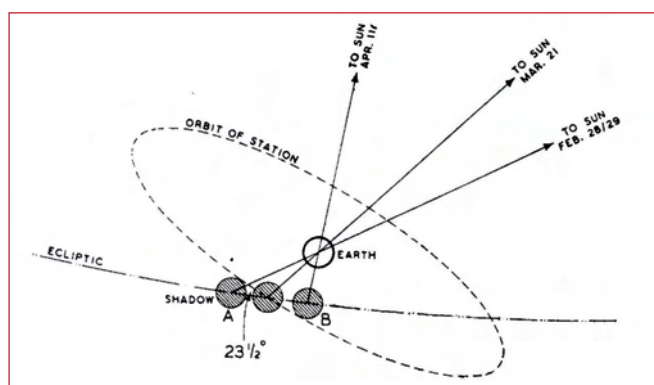


Figura 4
Il Sole è nascosto dalla Terra negli equinozi. È la figura 4 dell'articolo di Clarke [1]

relazione la dimensione del semiasse maggiore dell'orbita ellittica, o il raggio nel caso di orbita circolare, $\ell = R + H$, dove $R = 6378$ km è il raggio della Terra e H è l'altezza dalla superficie (dall'equatore, se nel piano equatoriale), e il periodo T di rivoluzione intorno alla Terra:

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{GM} \ell^3} \quad (1)$$

G è la costante universale di gravitazione, M è la massa della Terra. Se si calcola la distanza dal centro della Terra di un'orbita che ha periodo di rivoluzione uguale al giorno siderale, $T = 86164,1$ secondi, si trova $R + H = 42164,2$ km, ossia $H = 35786,2$ km (Figura 1, altezza spesso approssimata a 36.000 km). Le orbite che hanno questo periodo si dicono geosincrone, e soltanto nel piano equatoriale l'orbita, una sola, diventa geostazionaria.

La stazione spaziale proposta da Clarke è stata



Figura 5
Stazione spaziale internazionale. Orbita tra 278 km e 460 km di altezza. Completata, sarà grande come un campo di calcio

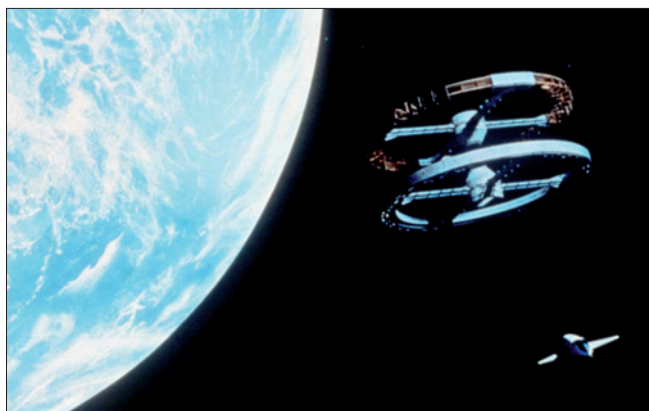


Figura 6
Stazione spaziale di transito verso la Luna del film 2001 Odissea nello spazio. Ruota su se stessa per generare una gravità pari a quella della Luna. Raggio della ruota: circa 1500 m, orbita a 322 km di altezza, con alcune parti ancora in costruzione (nella finzione cinematografica). In avvicinamento, la navetta passeggeri proveniente dalla Terra

realizzata, ma in una forma più rozza, non come quella che abbiamo visto in *2001 Odissea nello spazio*. Mentre quella reale (Figura 5) ha decisamente un aspetto che un *designer* forse non gradirebbe, quella del film è la “classica” stazione che ci aspettiamo (Figura 6). È una stazione di transito per i passeggeri e le navi spaziali in viaggio tra la Terra e la Luna. Per questo motivo ha anche lo scopo di adattare il corpo umano alla gravità lunare. Il suo raggio, r , è di 1.500 m, orbita a 322 km di altezza (compie una rivoluzione intorno alla Terra in circa 1,5 ore) e *ruota su se stessa* (moto circolare uniforme) per generare, nell’abitacolo che corre lungo la circonferenza, una gravità artificiale pari a quella presente sulla superficie lunare, dove l’accelerazione, a_L , è di $1,62 \text{ m/s}^2$, invece di $9,8 \text{ m/s}^2$ (Figura 7). La velocità tangenziale v è quindi di $49,3 \text{ m/s}$ ($a_L = v^2/r$) e di conseguenza il periodo di rotazione è di

191,2 s, ossia poco più di 3 minuti. Il walzer di Strauss, *Sul bel Danubio blu*, che ne accompagna, nel film, la lenta rotazione, accentua la sua eleganza e “classicità”. Clarke sa che non si può distinguere un’accelerazione costante prodotta da un moto circolare uniforme (in cui le masse sono accelerate verso il centro di rotazione) da un campo gravitazionale costante, come aveva affermato Einstein qualche decennio prima.

La stazione internazionale oggi esistente si trova a circa la stessa altezza, ma non ruota su se stessa. Di conseguenza provoca assenza di peso (Figura 8) e danni fisici conseguenti a una lunga permanenza in assenza di peso. Sulla nave spaziale *Discovery* (Figura 9) di *2001 Odissea nello spazio*, diretta verso Giove, c’è una zona con gravità artificiale terrestre, dove è possibile mantenersi in forma (Figura 10).

La velocità di lancio minima, 8 km/s, necessaria



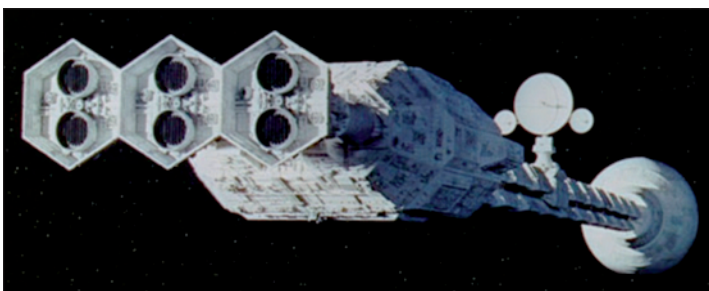
Figura 7

Sulla stazione spaziale di *2001 Odissea nello spazio* c’è la gravità (lunare), si sta comodamente seduti al bar a bere e a chiacchierare, in attesa della nave diretta verso la Luna o la Terra



Figura 8

Sulla stazione spaziale internazionale c’è assenza di peso ed è impossibile stare seduti (senza cinture) o bere da un bicchiere



3 Un libro da leggere per rendersi conto di quante invenzioni e scoperte, che hanno segnato lo sviluppo del XX secolo, sono state prodotte in un laboratorio industriale, con un “campus” in cui c’era più libertà di un campus universitario, e una visione dell’attività di ricerca scientifica e tecnologica che mancano oggi a molti manager, a parecchi accademici e a qualche rettore in carriera.

4 Il primo è un bellissimo libro che racconta le vicende che hanno portato l’umanità a capire com’è fatto il cielo. Anche se l’autore è un po’ prevenuto nei confronti di Galileo (per i suoi rapporti con Keplero, però oggi smentito dalla ricerca storica più recente, si legga [6]), il libro è una lettura obbligata per chiunque voglia rendersi conto della fatica, dei passi falsi, degli assurdi (a posteriori) labirinti percorsi, anche da coloro che oggi, a ragione, riteniamo geni. Il secondo, invece, è un libro breve, sintetico ma pieno di informazioni e riflessioni su Galileo e i suoi scritti, una lettura obbligata per chi voglia avvicinare per la prima volta, in modo non scolastico, Galileo e la sua opera. Dello stesso autore è consigliabile leggere anche *Galileo e i Gesuiti. Miti letterari e retorica della scienza*, Milano, Vita e Pensiero, 2000.



Figura 10

Sulla *Discovery* di *2001 Odissea nello spazio* è possibile tenersi in forma in una grande centrifuga. Diametro 12 metri, genera la gravità terrestre compiendo un giro ogni 5 secondi

Figura 9

La nave spaziale *Discovery* di *2001 Odissea nello spazio* con i suoi potenti motori (spenti nel lungo tragitto inerziale verso Giove) e la potente antenna parabolica puntata verso la Terra

per mettere in orbita un satellite dalla superficie della Terra, può essere determinata con il metodo che Newton aveva usato per calcolare di quanto la Luna cade verso la Terra in 1 secondo (da 1,2 a 1,6 mm, in base alla distanza).

Se s'imprime al proiettile dell'esperimento di Galileo una velocità orizzontale sempre più grande (Figura 11), si raggiunge una velocità minima v_0 che fa proseguire il proiettile lungo un'orbita chiusa (circolare) intorno alla Terra, indefinitamente, supponendo nullo l'attrito dell'atmosfera e la Terra liscia.

Il ragionamento è molto semplice⁵, e diretto. Allo spostamento orizzontale, prodotto dal moto rettilineo uniforme, perché il proiettile non è soggetto a forze orizzontali (Galileo), si somma uno spostamento verticale a causa del moto rettilineo uniformemente accelerato diretto verso il centro della Terra (ancora Galileo). Il proiettile, sparato da A (Figura 12), dopo 1 secondo, ad esempio, non si troverà in B, ma in C perché nel frattempo è caduto di h metri. La sua traiettoria è il segmento curvilineo che va da A a C.

Sulla superficie della Terra l'intensità della forza di gravità è data da:

$$F = mg = \frac{GMm}{R^2} \quad (2)$$

Quindi l'accelerazione di gravità è uguale a $g = GM/R^2$. La distanza verticale percorsa in 1 secondo (caduta del proiettile, figura 12) è dunque pari a:

$$h = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2}\frac{GM}{R^2} = 4,9 \text{ m} \quad (3)$$

Il proiettile non toccherà la superficie se dopo 1 secondo $h \geq 4,9 \text{ m}$.

Consideriamo la distanza orizzontale (asse x) che il proiettile percorrerebbe nel suo moto rettilineo uniforme in 1 secondo. Essa ci dà numericamente anche la velocità v_0 . Applicando il teorema di Pitagora e la (3) troviamo:

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{(R+h)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh + h^2} \approx \\ &\approx \sqrt{2Rh} = \sqrt{2R \frac{1}{2} \frac{GM}{R^2}} = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \\ &= \sqrt{Rg} = \sqrt{6378 \times 10^3 \times 9,8} = v_0 = 7905 \text{ m} \end{aligned} \quad (4)$$

perché $h^2 \ll 2hR$. Di conseguenza $v_0 = 7,905 \text{ km/s}$, valore che Clarke approssima a 8 km/s.

Che cosa succede se la velocità aumenta? Una nave spaziale può fuggire dalla Terra? Si tratta di stabilire la velocità minima con cui far partire un razzo, di massa $m \ll M$, per andare, ad esempio, sulla Luna, su Marte o nei pressi di Giove, come per la *Discovery*. È la *velocità di fuga* dalla Terra, v_f . Supponiamo di lanciare un razzo secondo la ver-

ticale locale⁶, e di trascurare la presenza dell'atmosfera e l'influenza della forza di gravità di altri corpi celesti. Ponendo l'origine dell'asse (r) nel centro della Terra, e ricordando che l'accelerazione è la derivata seconda dello spostamento rispetto al tempo, $a = d^2r/dt^2$, possiamo scrivere la seconda legge di Newton, $F = ma$, come:

$$m \frac{d^2r}{dt^2} = - \frac{GMm}{r^2} \quad (5)$$

Ora, la velocità è la derivata prima dello spostamento, $v = dr/dt$, per cui, moltiplicando e dividendo per dr si ha:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{dr}{dt} \frac{dv}{dr} = v \frac{dv}{dr} \quad (6)$$

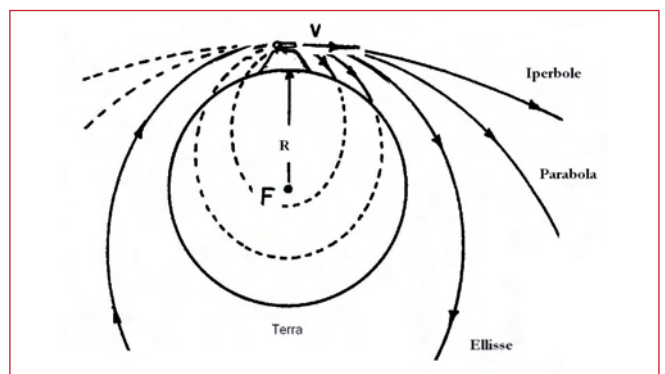


Figura 11

Lancio di un proiettile (razzo) dalla superficie della Terra.

Per $0 < v < \sqrt{GM/R}$ le orbite sono ellissi che intercettano la Terra.

Per $\sqrt{GM/R} \leq v < \sqrt{2GM/R}$ le orbite sono cerchi o ellissi che non intercettano la Terra.

Per $v = \sqrt{2GM/R}$ l'orbita è una parabola.

Per $v > \sqrt{2GM/R}$ l'orbita è un ramo di iperbole

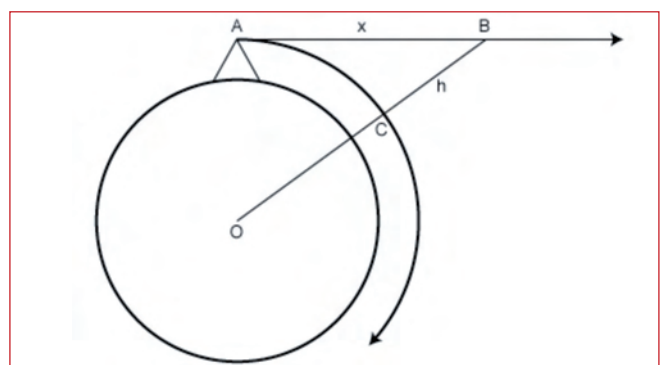


Figura 12

Allo spostamento orizzontale del moto rettilineo uniforme, da A a B, si somma uno spostamento verticale del moto rettilineo uniformemente accelerato, da B a C. Il proiettile, sparato da A, dopo 1 secondo non si troverà in B, ma in C perché nel frattempo è caduto di h metri verso il centro della Terra O (la lunghezza del segmento OC è in pratica uguale al raggio della Terra R)

La (6) permette di eliminare il tempo e la (5) diventa:

$$v \frac{dv}{dr} = -\frac{GM}{r^2} \quad (7)$$

La (7) si risolve *separando* le variabili

$$v dv = -GM \frac{dr}{r^2} \quad (8)$$

Ora basta integrare i due membri:

$$\frac{v^2}{2} = \frac{GM}{r} + C \quad (9)$$

La costante d'integrazione C si determina imponendo la condizione iniziale sulla velocità: $v = v_f$ per $r = R$, ossia $C = v_f^2/2 - GM/R$. Pertanto la soluzione è data da:

$$\frac{v^2}{2} = \frac{GM}{r} + \frac{v_f^2}{2} - \frac{GM}{R} \quad (10)$$

Perché la nave spaziale non torni indietro, basta che la velocità a distanza infinita (molto grande, in pratica) sia $v \geq 0$. Se fosse negativa, la nave ricadrebbe verso la Terra. Di conseguenza, ponendo $v = 0$ nella (10) troviamo:

$$r = \frac{GM}{\frac{GM}{R} - \frac{v_f^2}{2}} \quad (11)$$

Nella (11), $r \rightarrow \infty$ soltanto se il denominatore si annulla, ossia se lanciamo alla velocità minima ($GM = 398.600,44 \text{ km}^3/\text{s}^2$):

$$v_f = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = 11,180 \text{ km/s} \quad (12)$$

Questa è la velocità di fuga dalla Terra⁷. Tra la (4) e la (12) c'è soltanto un fattore $\sqrt{2}$. Riassumendo: per $v_o \leq v < v_f$ le orbite sono *chiuse*, ossia sono cerchi o ellissi (è la prima legge di Keplero), il centro della Terra occupa il fuoco *vicino*, ossia il satellite è lanciato nei pressi del *perigeo*. Per $v = v_f$ l'orbita è una *parabola*. Per $v > v_f$ l'orbita è un ramo di *iperbole* (Figura 11). La velocità di fuga è anche la velocità minima con cui un oggetto proveniente dallo spazio profondo (ma basta che provenga dalla Luna, come per Apollo 11, nel 1969) precipita sulla superficie della Terra.

Se nella (8) si reintroduce il tempo, si può trovare il legame tra la distanza percorsa, $\rho = r - R$, e il

tempo T , necessario per percorrerla:

$$T^2 = \frac{2}{9} \frac{\rho^3}{GM} \quad (13)$$

vale a dire, la terza legge di Keplero, applicata in questo caso a una sezione conica degenera. Se $\rho = 400.000 \text{ km}$ (Terra-Luna), trascurando l'attrazione della Luna nell'ultimo tratto, $T = 52,5$ ore.

Che cosa succede se si lancia con $v < v_o$ m/s? In questo caso il razzo intercetta la Terra (Figura 11). Le orbite sono sempre chiuse, sono ellissi il cui fuoco *lontano* è occupato dal centro della Terra, contrariamente a quanto accade per i satelliti. La transizione tra i due tipi di orbite si ha quando $v = v_o$ (i due fuochi collasano nel centro dell'orbita circolare, il centro della Terra), ossia per l'orbita circolare più bassa.

Se l'orbita è chiusa, allora Galileo aveva sbagliato! Il moto del suo proiettile non poteva essere parabolico, avrebbe raggiunto la velocità di fuga e abbandonato la Terra. Galileo era, e rimane, un genio, e la sua era soltanto un'ottima approssimazione. Matematicamente⁸ si vede subito.

Prendiamo un'ellisse con il semiasse maggiore secondo l'asse y ($a < b$, fuochi sull'asse y , come nella figura 11) e risolviamo l'equazione canonica nel I quadrante:

$$y = b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (14)$$

Supponiamo che il proiettile sia sparato dal vertice $(0, b) = (0, R)$ con velocità orizzontale

$$0 < v \leq \sqrt{GM/R}.$$

Per distanze orizzontali tali che $x \ll a$, si ha pure $\varepsilon = (x/a)^2 \ll 1$. Ora si sa che, se $\varepsilon \ll 1$, la radice si approssima

$$\sqrt{1 - \varepsilon} \approx 1 - \frac{\varepsilon}{2}, \text{ quindi:}$$

$$y = b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \approx b \left(1 - \frac{x^2}{2a^2} \right) = -\frac{R}{2a^2} x^2 + R \quad (15)$$

È l'equazione di una parabola con concavità verso il basso, è la parabola di Galileo! La spiegazione fisica è immediata: ipotizzare $x \ll a$, significa considerare una distanza molto piccola, entro la quale la forza di gravità è con buona ap-

⁵ La semplicità è una caratteristica tipica delle leggi fondamentali della fisica e delle relazioni matematiche che ne derivano.

⁶ In realtà, il risultato finale è indipendente dall'angolo di lancio, se il razzo non intercetta il terreno.

⁷ Dalla (12) si può calcolare la velocità di fuga per altri corpi celesti. La velocità di fuga dal Sistema solare coincide in pratica con la velocità di fuga dal Sole alla distanza della Terra. Contrariamente alla Luna, la Terra ha

un'atmosfera perché, oltre a un potente campo magnetico, la sua velocità di fuga è maggiore della velocità media di agitazione delle molecole dei gas atmosferici.

⁸ Le equazioni raccontano spesso storie molto interessanti, e sono state da sempre gli strumenti più efficaci per "comprimere" i dati, più dei metodi che ci danno i file .zip! Con le sue ellissi, Keplero "comprime" i tantissimi dati raccolti da Tycho Brahe (1546–1601) sulle orbite dei pianeti allora noti.

prossimazione sempre parallela a se stessa. È assente la curvatura della Terra. Se Galileo avesse creduto alle ellissi di Keplero, avrebbe potuto calcolare i parametri della sua ellisse⁹ dalla (15) e forse anticipare Newton.

Un rapido sviluppo

Contrariamente alla previsione di tempi molto lunghi per gli sviluppi dei razzi, venti anni dopo l'articolo di Clarke c'è già in orbita un satellite geostazionario per le telecomunicazioni commerciali, e poi verranno i collegamenti tra satelliti, le antenne molto direttive, i pannelli solari molto grandi, le apparecchiature elettroniche e i calcolatori che neppure Clarke poteva immaginare. La corsa allo spazio è stata molto rapida, accelerata soprattutto dalla rivalità tra gli USA e l'URSS.

Dopo lo Sputnik (1957), il primo satellite artificiale in orbita intorno alla Terra, lanciato dall'URSS, la corsa allo spazio è stata molto serrata, soprattutto da parte degli USA. Per merito di John Robinson Pierce (1910–2002) dei Laboratori Bell [3], si sviluppano varie soluzioni sperimentali, dal satellite passivo *Echo*, una piccola luna artificiale (Figura 13), al primo satellite *Telstar* (che attua la prima trasmissione televisiva dal vivo, dagli USA alla Francia), al *Syncom*, che trasmette le Olimpiadi di Tokio in diretta (1964), e finalmente al primo satellite geostazionario *Early Bird* (1965), con il quale inizia l'era delle telecomunicazioni commerciali, anche con la nascita dell'Intelsat (*International Telecommunications Satellite Organization*). Da allora i satelliti sono diventati tantissimi e l'orbita di Clarke è molto affollata da satelliti per telecomunicazioni, dati, previsioni meteorologiche. E tanti altri satelliti orbitano più in basso, adibiti a molte altre missioni: telerilevamento delle risorse terrestri, controllo del territorio, navigazione, localizzazione (GPS).

Nel frattempo si sono susseguiti molti esperimenti di radiopropagazione per verificare quali guasti l'atmosfera provoca alle onde elettromagnetiche ad alta frequenza, esperimenti a volte anche curiosi, come la dispersione ad alta quota di micro aghi metallici [7] per realizzare un collegamento radio in *troposcatter*¹⁰, l'utilizzo della Luna per riflettere i segnali, come nel Moon Relay (Figura 14), come già aveva scritto Clarke. I primi studi, già negli anni 1940, indicano le idrometeore (pioggia, neve, grandine, nebbia) come



Figura 13

Echo (1960). È un pallone di diametro 31 m, in poliestere rivestito di alluminio, un satellite passivo che riflette segnali a 960 MHz e 2,390 GHz. A bordo c'è un'apparecchiatura attiva soltanto per la telemetria (controllo del satellite). Perigeo: 966 km. Apogeo: 2157 km, Inclinazione: 48°. Periodo 2 h



Figura 14

Fotografia di una portaerei, inviata da Honolulu (Hawaii) a Washington, D.C., attraverso un segnale riflesso dalla Luna, 28 gennaio 1960. Il 24 luglio 1954 una portante radio a 200 MHz, modulata dalla voce, era stata riflessa dalla Luna

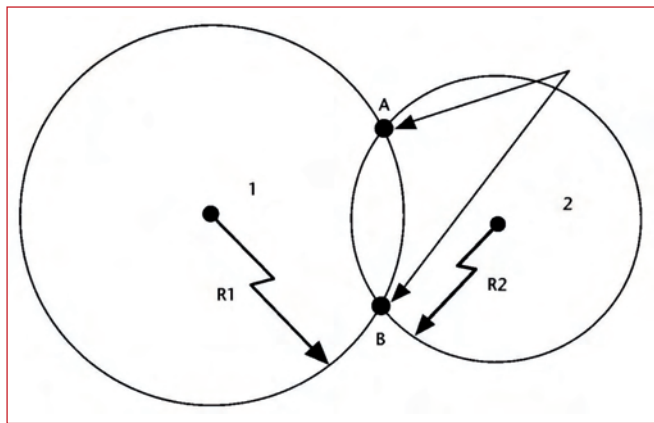
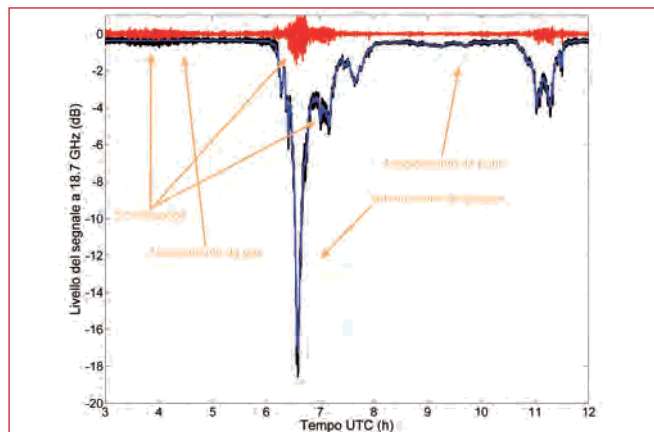


Figura 15

Stazione spaziale sperimentale del Politecnico di Milano e dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), Spino d'Adda (Cremona). In primo piano sono visibili i radiometri, appena dietro, a destra, le antenne paraboliche per gli esperimenti di comunicazione e propagazione e, sulla torre, l'antenna del radar meteorologico

▼ **Figura 16**

Livello (in decibel) della potenza del segnale ricevuto a 18.7 GHz dal satellite Italsat, Spino d'Adda, 8 luglio 1996. Angolo di elevazione del collegamento: 37,8°. dB significa ricevere una potenza 10 volte più piccola di quella che si riceverebbe in assenza di atmosfera, dB, 100 volte più piccola

▲ **Figura 17**

La localizzazione basata su un solo faro acustico dà infinite posizioni possibili sulla circonferenza; due fari acustici danno soltanto due posizioni possibili, A e B (ambiguità)

9 La legge del moto dà la relazione tra le coordinate $y = -g/(2v^2)x^2 + R$ per cui il semiasse minore è dato da $a = v\sqrt{R/g} = v\sqrt{R^3/(GM)}$. Se, ad esempio, $v = 0,5$ km/s, $a = 403,4$ km. È verificato che $x \ll a$ perché in 1 secondo il proiettile percorre 500 m, distanza alla quale è già caduto di 4,9 m. Se è sparato da un'altezza inferiore a 4,9 m, questo valore è trascurabile rispetto a R nella (15), dopo 500 m ha già toccato il terreno (supposto pianeggiante). L'eccentricità dell'ellisse è data da $e = \sqrt{b^2 - a^2} / b = \sqrt{1 - v^2 R / (GM)} = 0,997\,9978$, in pratica una parabola.

10 Un incubo per la nascente radioastronomia, per le possibili riflessioni dei segnali e interferenze, e presto, per fortuna, abbandonato.

11 Il fenomeno è continuo e si manifesta con una certa intensità soltanto quando la lunghezza d'onda nell'acqua, $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{81}$, è comparabile con le dimensioni delle gocce, essendo λ_0 la lunghezza d'onda nel vuoto e 81 il valore della costante dielettrica relativa dell'acqua (il diametro di una goccia d'acqua può raggiungere i 10 mm).

12 [9] è una raccolta degli articoli più significativi, dai primi ponti radio degli anni 1950, nei laboratori della Magneti Marelli, ai satelliti degli anni 1960-1980, alle fibre ottiche degli anni 1990.

13 Il libro racconta una storia personale, umana, ma anche tecnica, delle vicende del satellite Sirio.

causa di forti attenuazioni delle onde elettromagnetiche a frequenze superiori a 10 GHz¹¹, così che dagli anni 1960 si fanno i primi esperimenti di radiopropagazione in collegamenti satellitari.

Dagli USA l'interesse per i satelliti arriva anche in Europa (e in Giappone) dove nasce (1975) l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e poco dopo varie agenzie spaziali nazionali, tra cui l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) nel 1988.

In Italia, è soprattutto Francesco Carassa (1922-2006), professore di Comunicazioni elettriche al Politecnico di Milano [8-9]¹², a proporre al CNR di condurre esperimenti di comunicazione e di propagazione a 12 e 18 GHz con un satellite geostazionario nazionale, il Sirio. Il Politecnico di Milano e il CNR sono in prima fila in questa vicenda, anche mediante la costruzione e la gestione della stazione spaziale di Spino d'Adda (Figura 15), nei pressi di Milano. Le vicende che portarono al lancio del Sirio (1977) sono tipiche del nostro Paese, purtroppo, e sono state narrate da Carassa in un bel libro [10]¹³. Con il Sirio, la comunità nazionale, industriale e accademica, acquisisce una notevole esperienza in un settore in piena espansione, seguita negli anni 1980 e 1990 dall'attività sperimentale condotta con il satellite Italsat a frequenze più alte (18,7-39,6 e 49,5 GHz). Gli esperimenti di propagazione con il satellite Italsat (Figura 16) sono ancora coordinati dal Politecnico, in particolare da Aldo Paraboni (1940-2011), professore di Antenne e propagazione, che in precedenza aveva seguito tutta la gestione, nuova per l'università, dei dati sperimentali del Sirio raccolti nelle stazioni della Telespazio del Fucino e del Lario (Pian di Spagna, Lago di Como), e di Spino d'Adda.

L'attività in questo settore continuerà nei prossimi anni, già dal 2013, con il satellite Alphasat dell'ESA, con l'esperimento europeo di propagazione progettato da Paraboni, che, in suo ricordo, prende il suo nome. Il Politecnico sarà in prima fila anche in questo esperimento, che coinvolgerà la NASA, interessata a installare apparecchiature riceventi presso il Campus Leonardo dell'Ateneo e a scambiare i preziosi dati raccolti.

Non ci si perde più

Su molte automobili è oggi montato un ricevitore del Sistema globale di localizzazione (GPS), un servizio disponibile grazie agli USA e ai suoi militari. Il principio di lavoro del GPS (la versione europea, Galileo, in corso di sviluppo, nasce già per usi civili) è molto semplice e può essere illustrato con questo esempio.

Si supponga di muoversi in barca nella laguna veneta, in una nebbia fittissima. In una posizione nota con precisione è presente un faro acustico,

che emette ogni minuto, con estrema precisione, una nota ben precisa. Sulla barca sono presenti un orologio perfettamente sincronizzato con quello del faro e un dispositivo che misura con precisione il tempo trascorso dall'ultimo minuto d'orologio. Da questa misura si può calcolare la distanza dal faro, sapendo, naturalmente, la velocità del suono nell'aria (a 0 °C, circa 330 m/s). Questa misura, però, può solo dare un'indicazione ambigua perché la barca può trovarsi in un punto qualsiasi della circonferenza di raggio R_1 (figura 17). Per eliminare in parte l'ambiguità, è necessario un altro faro acustico, che trasmetta una sua nota particolare. Il ricevitore distingue i due toni e dalla misura dei tempi calcola le due distanze e individua le posizioni A e B (Figura 17). Ora è chiaro che basta un terzo faro acustico per individuare finalmente la posizione della barca (Figura 18). In questo sistema è fondamentale che tutti gli orologi siano perfettamente sincronizzati, e sia nota la velocità del suono in ogni condizione. Se non è così, la stima delle distanze è errata, la posizione può essere una qualsiasi all'interno nel triangolo curvilineo che comprende la posizione vera A (Figura 19). Per eliminare questa incertezza è necessario un *quarto* faro acustico.

Il sistema si applica anche a tre satelliti e alle onde elettromagnetiche. Ora sui satelliti sono presenti orologi atomici estremamente stabili e sincronizzati, ma sui dispositivi commerciali gli orologi non sono né così stabili né perfettamente sincronizzati con quelli dei satelliti, per cui c'è un errore nella stima della posizione. A questo errore si sommano quelli dovuti ai ritardi introdotti dalla propagazione nell'atmosfera (ionosfera, vapore acqueo, nubi, pioggia), ritardi che il ricevitore trasforma in distanze aggiuntive inesistenti,

rendendo il sistema praticamente inutilizzabile, se non si facesse ricorso a un quarto satellite, e a complesse elaborazioni su stringhe di dati binari opportunamente trasmessi.

Il Sistema di localizzazione globale è formato da almeno 24 satelliti posti in orbite quasi circolari inclinate di 55° rispetto al piano equatoriale, distanti circa 26 600 km dal centro della Terra, con periodi di 11 ore 58 minuti (metà giorno siderale) e velocità di 3,9 km/s (dati ricavabili dalla figura 1, da confrontare con la velocità di un oggetto posto all'equatore, 0,465 km/s). I satelliti hanno a bordo orologi atomici al cesio molto precisi (errore di 1 nanosecondo/giorno, ossia 10^{-9} s/giorno)¹⁴.

Come appena ricordato, per determinare la propria posizione è necessario ricevere i segnali di quattro satelliti. Se gli orologi dei satelliti sono sincronizzati con gli orologi terrestri, e si conoscono gli istanti in cui i segnali sono partiti dai satelliti, allora è possibile determinare il ritardo e, conoscendo la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche (la velocità della luce), stabilire le distanze dei satelliti, le cui posizioni sono note con molta precisione, e dunque la posizione del ricevitore rispetto al centro della Terra, ossia le sue coordinate. C'è, però, ancora qualcosa da considerare.

Per molto tempo la *Teoria della relatività* di Albert Einstein (1879-1955) non ha cambiato la vita materiale degli esseri umani, anche se ha rivoluzionato la loro visione del mondo e la fisica. Soltanto oggi, dopo un secolo, si hanno le prime applicazioni tecnologiche su vasta scala basate sui suoi principi. Affinché non ci siano altri errori nella stima delle distanze, oltre a quelli già ricordati, è necessario tenere conto degli effetti previsti dalla *Teoria della relatività*.

La *Teoria generale* (1915) prevede che gli orologi

¹⁴ L'errore di 1 nanosecondo provoca un errore di 30 cm.

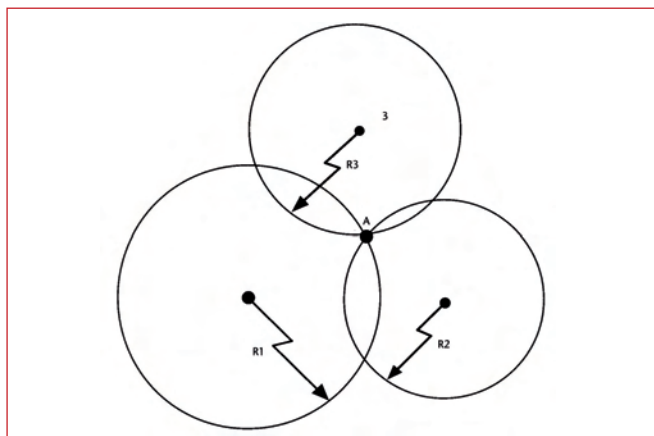


Figura 18
La localizzazione basata su tre fari acustici dà la posizione corretta A (nessuna ambiguità)

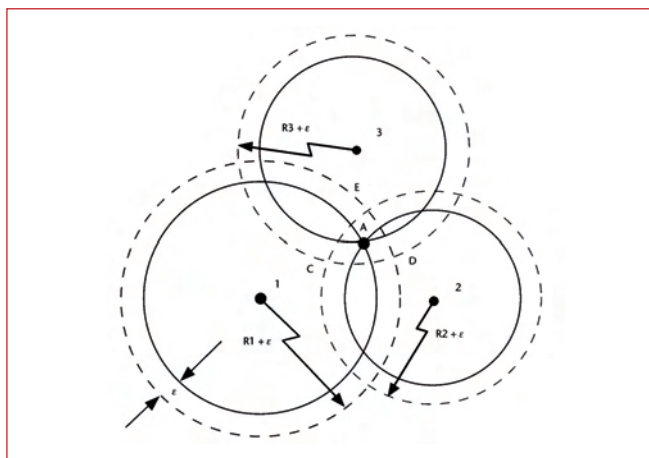


Figura 19
A causa dell'errore dovuto agli orologi non sincronizzati e poco precisi (e ad altre cause), è soltanto possibile individuare il triangolo curvilineo (linee tratteggiate) entro il quale si trova la vera posizione A

posti in un campo gravitazionale più intenso scandiscono il tempo più lentamente degli orologi posti in un campo gravitazionale meno intenso. Gli orologi atomici dei satelliti del GPS, a causa della gravità inferiore, sarebbero avanti di circa 45 900 nanosecondi in un giorno.

La *Teoria speciale* (1905) prevede che gli orologi in movimento scandiscano il tempo più lentamente degli orologi fermi. Gli orologi in movimento alla velocità di circa 3,9 km/s (la velocità relativa rispetto agli orologi terrestri dipende dalla latitudine) sono indietro di circa 7 200 nanosecondi in un giorno. Per fare andare d'accordo gli orologi posti sui satelliti con quelli sulla Terra, il tempo dei primi è modificato per far scandire il tempo come quelli posti sulla Terra, anche quando sono in orbita. Prima del lancio gli orologi satellitari sono quindi più lenti di quelli terrestri (di circa $45.900 - 7.200 = 38.700$ nanosecondi/giorno) e soltanto in orbita sono in perfetto accordo. Senza questo accorgimento, il GPS darebbe la posizione con errori grandi, non con la precisione dell'ordine di 1 metro, o meno.

Riflessioni conclusive

L'era pionieristica dei satelliti è terminata da molto tempo. Le sfide che oggi ci attendono sono più legate alla complessità delle architetture e alla loro gestione. Però c'è ancora molto da fare, negli studi e negli sviluppi tecnologici, per superare la barriera intorno ai 60 GHz, banda molto attenuata dall'ossigeno presente nell'atmosfera, e sfruttare l'ampio spettro di frequenze disponibili a 80-100 GHz, anche, e forse soprattutto, per le comunicazioni con le sonde spaziali interplanetarie. L'impatto delle estreme attenuazioni prodotte dall'atmosfera a queste frequenze può essere molto ridotto se si usano stazioni ripetenti in orbita, questa volta non per segnali provenienti dalla Terra, ma da Marte [11, 12]. Naturalmente, come Clarke ci potrebbe ricordare, è sempre disponibile un satellite molto

grande, la Luna, senza atmosfera. La sua faccia nascosta sarebbe la posizione ideale sia per stabilire ponti radio con lo spazio profondo ad altissime frequenze, incluse quelle ottiche, sia per osservare lo spazio con grandi telescopi e radio telescopi, senza disturbi e interferenze. Tra 50 o 100 anni?

Carassa amava ripetere, quando gli si ricordava, con ammirazione, di essere il "padre" del Sirio, che lui, da solo, non avrebbe realizzato nulla, che era stato soltanto uno dei tanti. E a ragione, naturalmente. Un'impresa complessa come quella dei satelliti Sirio e Italsat, e dei tanti altri ora in orbita (o di qualunque grande avventura tecnologica o scientifica), è il risultato del lavoro, dell'inventiva di tantissimi, di tutta l'ingegneria, e non solo di questa. È necessario però ricordare che le forze gigantesche, indispensabili per portare a termine imprese di queste dimensioni, devono trovare, in un certo momento storico, quei pochi individui determinati, lungimiranti, quasi "visionari", per attivarsi, per trasformare una società. Senza questa spinta, queste forze non nascerebbero così facilmente.

Non è un caso che queste doti siano state riconosciute a Pierce, a Clarke, a Carassa, con il premio Marconi (*Marconi Fellowship*), il premio più importante al mondo nel settore delle telecomunicazioni: nel 1979 a Pierce (premio consegnato a Roma, dal Presidente della Repubblica Italiana, Sandro Pertini), nel 1982 a Clarke (Aia, Principe Claus dei Paesi Bassi), nel 1983 a Carassa (Ottawa, Governatore del Canada Edward Schreyer). Nessun altro italiano, attivo in Italia, ha ricevuto finora un premio di così alto prestigio nel settore delle telecomunicazioni.

Desidero ringraziare i colleghi Carlo Riva, ora in prima fila nell'esperimento Alphasat-Aldo in qualità di Investigatore principale, per avere elaborato i dati di attenuazione Italsat, e Michele D'Amico, per la fotografia della stazione di Spino d'Adda. Un ringraziamento speciale va a Lucia Matricciani, per avere disegnato alcune figure dell'articolo

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. C. Clarke: Extra-Terrestrial Relays. Can Rocket Stations Give World-Wide Radio Coverage?, *Wireless World*, ottobre 1945, pp. 305-308.
- [2] A. C. Clarke: *Ascent to Orbit. A scientific Autobiography. The technical Writings of Arthur C. Clarke*, New York, John Wiley & Sons, 1984.
- [3] J. Gertner: *The Idea Factory. Bell Labs and the Great Age of American Innovation*, New York, The Penguin Press, 2012.
- [4] A. Koestler: *I sonnambuli. Storia delle concezioni dell'universo*, Milano, Jaca Book, 2010.
- [5] A. Battistini: *Galileo*, Bologna, Il Mulino, 2011.
- [6] D. Wootton: *Galileo Watcher of the Skies*, New Haven, Yale University Press, 2010.
- [7] W. E. Morrow, F. Rogers: The West Ford Experiment, *Proceedings of the IEEE*, 1964, pp. 461-468.
- [8] G. Tartara, F. Rocca, A. Paraboni, E. Matricciani: Gli 80 anni di Francesco Carassa. Lo sviluppo dei satelliti italiani per telecomunicazioni, *AEI*, 2002, vol. 89, pp. 53-55.
- [9] F. Carassa: *Scritti scelti raccolti dai colleghi e dagli allievi in occasione del suo 80° compleanno*, Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica e Informazione, 2002.
- [10] F. Carassa: *Il sogno dei Gigahertz. Dal ponte radio Milano-Roma all'esperimento Sirio*, Pomezia, Sarin, 1985.
- [11] E. Matricciani: Deep-Space Communications with a 2-Hop Downlink with High Availability, *International Journal of Satellite Communication and Networking*, 2005, vol. 23, pp. 203-228.
- [12] E. Matricciani: An optimum design of deep-space downlinks affected by tropospheric attenuation, *International Journal of Satellite Communication and Networking*, 2009, vol. 27, pp. 312-329.