

# Sincronizziamo gli orologi

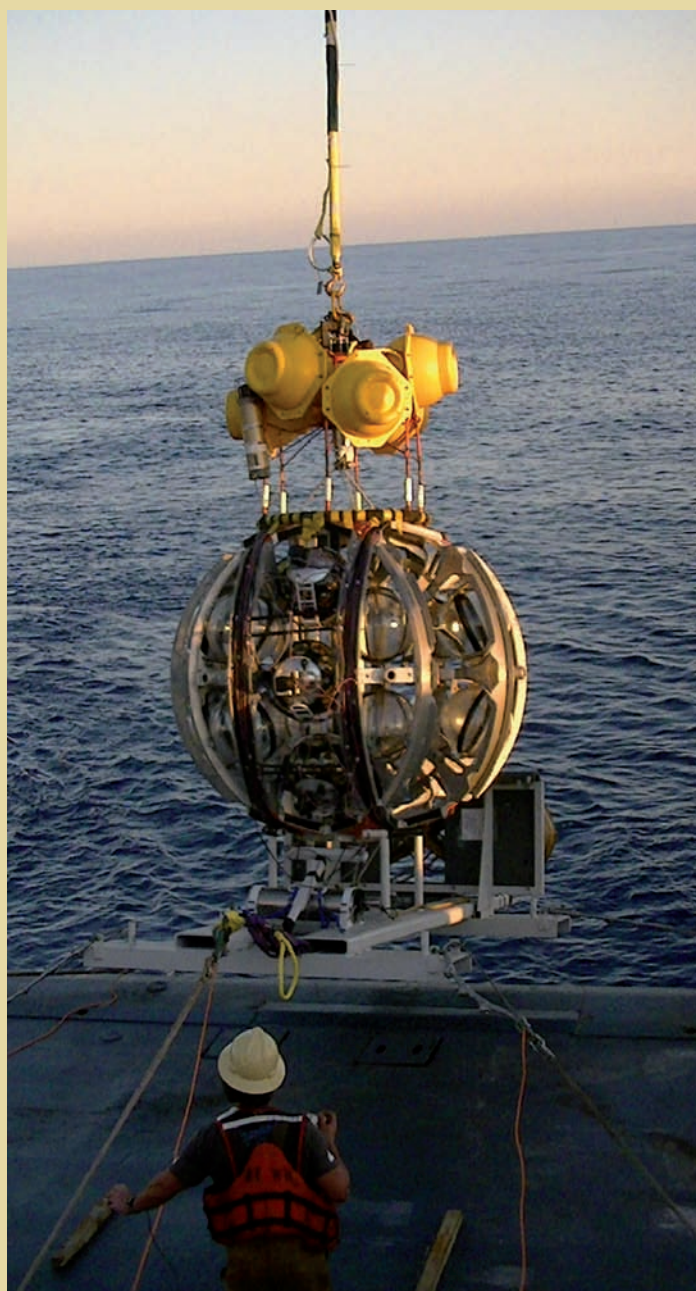
## Tecniche di allineamento temporale

di Maximiliano Sioli

Molti esperimenti di fisica richiedono una misura precisa del tempo. Anche in un esperimento semplice – per esempio quello del piano inclinato di Galileo (vd. p. 48, ndr) – gli orologi che misurano il tempo associato al passaggio di una sfera dalla partenza fino al traguardo devono essere *sincroni* (cioè le “lancette” devono muoversi senza anticipare né ritardare rispetto a un orologio di riferimento) e *in fase* (cioè devono battere l’ora tutti allo stesso istante), per poter correttamente misurare il moto della sfera. Negli esperimenti di fisica delle particelle tutti gli “orologi” installati nei componenti elettronici degli esperimenti devono essere sincroni e in fase, con una precisione di frazioni di miliardesimi di secondo. Ciò è fondamentale per poter correlare i dati che arrivano dai sottosistemi del rivelatore e che vanno associati allo stesso evento fisico (nel gergo dei fisici si dice che i segnali sono *in coincidenza temporale*). Anziché installare un orologio atomico su ogni parte del rivelatore (che sarebbe un’operazione troppo complessa e immensamente costosa) i fisici utilizzano spesso un unico preciso orologio di riferimento (il *master clock*) e una rete di cavi elettrici o fibre ottiche calibrate, su cui viaggiano segnali ottici ed elettrici utilizzati per sincronizzare e mettere in fase tutti i componenti elettronici dell’esperimento.

In molti dei moderni esperimenti di astrofisica particellare (vd. Asimmetrie n. 15 pp. 11 e 15) si costruiscono apparati composti da rivelatori separati da distanze che vanno dal centinaio di metri al centinaio di chilometri. Questi rivelatori devono identificare gli eventi fisici di interesse, tracciando il passaggio di particelle che si muovono con velocità prossime a quelle della luce nel vuoto, in volumi di materia grandi fino a migliaia di chilometri cubi. Gli eventi si ricostruiscono misurando “in coincidenza” le particelle che investono i vari rivelatori dislocati nello spazio. È chiaro dunque come un’accurata e precisa ricostruzione dell’evento sia subordinata all’accuratezza e precisione del sistema di sincronizzazione di tutti i rivelatori dell’esperimento.

a.  
Calata a mare agli inizi del maggio del 2014 della seconda delle cento strutture che formeranno il telescopio sottomarino per neutrini Km3net, in costruzione negli abissi al largo della Sicilia a 3500 m di profondità.





Nei telescopî di neutrini le unit  di rivelazione sono costituite da decine di migliaia di sensori di luce disposti in stringhe verticali distanziate centinaia di metri nelle profondit  marine o sotto il ghiaccio. Negli osservatori di raggi cosmici, come ad esempio l'esperimento Auger in Argentina, le stazioni di rivelazione sono invece disposte su superfici di alcune migliaia di chilometri quadrati. Queste differenze incidono sulla scelta tecnologica utilizzata per confrontare i tempi registrati dai vari rivelatori. Nel primo caso, il segnale dell'orologio principale collegato al Gps viene ricevuto da una stazione di terra e trasportato fisicamente attraverso fibre ottiche in modo capillare in tutte le unit  di rivelazione (questo   necessario, perch  i segnali inviati dai satelliti Gps non si propagano n  sott'acqua n  sottoterra). Ciascuna unit  pu  essere cos  sincronizzata continuamente assegnando ad ogni segnale fisico identificato il *timestamp* (cio  il tempo al quale   stato acquisito il dato, scritto con un'opportuna codifica digitale), che verr  poi utilizzato in fase di ricostruzione dell'evento. Nel secondo caso, quello dei rivelatori in superficie, ciascuna unit  di rivelazione   dotata di un ricevitore Gps indipendente per la costruzione dell'informazione temporale. Con questi sistemi si riescono a sincronizzare le diverse parti dell'esperimento con accuratezze dell'ordine del miliardesimo di secondo (nanosecondo).

Accanto alla necessit  di allineare temporalmente diverse parti dello stesso esperimento,   spesso importante essere in grado di sincronizzare diversi esperimenti molto distanti tra loro.   questo il caso delle reti di rivelatori che ricercano le onde gravitazionali prodotte nel cosmo da grandi masse in accelerazione (vd. Asimmetrie n. 15 p. 30). La possibilit  di costruire reti di rivelatori fornisce un importante passo in avanti per questo settore di ricerca, perch    solo attraverso il confronto dei tempi di arrivo del fronte di un'onda gravitazionale che   possibile misurarne la direzione di provenienza. Questo   particolarmente rilevante per la rivelazione delle onde gravitazionali prodotte dalla fusione di due stelle di neutroni, in cui   necessario avere almeno tre siti distanti capaci di misurare ampiezza e polarizzazione dell'onda gravitazionale in arrivo. Mediante triangolazione   poi possibile ricostruire la direzione della sorgente con una buona accuratezza, anche con sincronizzazioni relative particolarmente modeste, dell'ordine del millesimo di secondo. Un esempio di questo tipo   rappresentato dalla rete Ligo-Virgo-Geo600, composta da due interferometri negli Usa, uno in Italia (vd. fig. b) nei pressi di Pisa e uno in Germania. I quattro rivelatori disposti a formare un quadrilatero che attraversa l'intero Atlantico forniscono una ridondanza di misura, qualora uno degli altri

**b.**  
Uno dei "bracci" del rivelatore di onde gravitazionali Virgo, a Cascina (Pisa).

fosse fuori acquisizione, contribuendo inoltre ad aumentare la precisione e l'accuratezza della misura sul segnale ricercato.

Un discorso a parte merita la sincronizzazione di orologi su grandi distanze per misure di *tempi di volo*, cioè del tempo in cui una particella, con velocità prossima a quella della luce, percorre una distanza nota. È il caso della misura della velocità dei neutrini prodotti al Cern di Ginevra e rivelati dopo 730 km ai Laboratori del Gran Sasso dell'Infn. In questo caso specifico la misura, eseguita prima dall'esperimento Opera (vd. approfondimento) e successivamente anche da altri esperimenti del Gran Sasso (Icarus, Lvs e Borexino), è essa stessa il risultato sperimentale a cui si vuole pervenire, pertanto l'accuratezza nella calibrazione delle varie parti dell'esperimento deve essere estrema. Dell'intera catena di misure

temporali in cascata, sono particolarmente delicate quelle che collegano la sorgente con il Gps a Ginevra e il Gps al Gran Sasso con il rivelatore Opera. È stata recentemente sviluppata una tecnologia chiamata *White Rabbit*, che fornisce un protocollo per il trasferimento e la sincronizzazione di dati su distanze dell'ordine dei 10 km con accuratezze inferiori al nanosecondo. Un aspetto interessante di questa tecnologia è il suo carattere *open source* (vd. Asimmetrie n. 14 p. 37), grazie al quale si è andata costruendo una comunità molto attiva che ha permesso un lungo processo di calibrazione e correzione dei *bug*. È prevedibile che il monitoraggio continuo offerto da questa tecnologia possa far sì che essa possa essere scelta in futuro come parte integrante dei sistemi di temporizzazione dei vari esperimenti.

c.

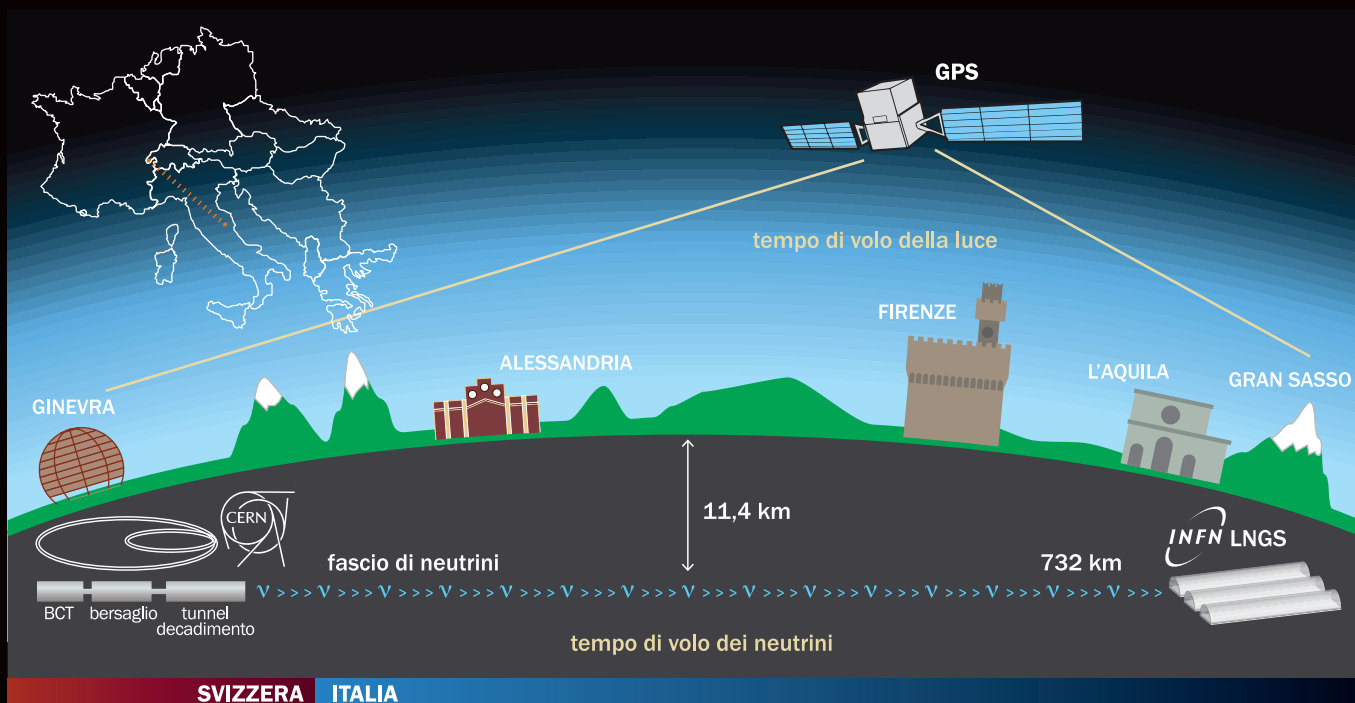
Il rivelatore Opera nella sala C dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Nelle regioni più scure sono collocati circa 150.000 "mattoni" di piombo e lastre fotografiche per la ricostruzione micrometrica delle interazioni dei neutrini.



# Il volo dei neutrini

1.

Schema della misura effettuata dall'esperimento Opera. I due ricevitori Gps in common view permettono di misurare con la precisione richiesta i tempi del passaggio dei protoni in un punto della catena di acceleratori del Cern e il tempo di interazione dei neutrini nel rivelatore al Gran Sasso.



I neutrini del fascio Cngs (Cern Neutrinos to Gran Sasso) vengono prodotti al Cern inviando dei pacchetti di protoni contro un bersaglio di grafite e convogliando i prodotti di interazione all'interno di un tunnel di decadimento, che è sotto vuoto e lungo circa un chilometro. Tra questi prodotti di decadimento ci sono i neutrini muonici che procedono indisturbati verso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs) dell'Infn, dove l'esperimento Opera mira a identificare quanti neutrini oscillano, cioè si "trasformano" da muonici in tauonici lungo il percorso. Ma Opera è anche in grado di misurare il *tempo di volo*, ovvero l'intervallo temporale che intercorre tra la produzione e la rivelazione del neutrino, che è un'informazione importante per i fisici. Infatti, conoscendo la distanza percorsa, ottenuta anch'essa con misure di grande precisione, si risale poi alla velocità del neutrino. Non essendo noto il punto di produzione del neutrino all'interno del tubo di decadimento, la misura del tempo di volo viene effettuata prendendo come istante iniziale quello del passaggio del pacchetto di protoni, che ha dato origine al neutrino rivelato, in un punto prefissato posto prima del

bersaglio (nel Beam Current Transformer, Bct), e come istante finale quello in cui il neutrino ha interagito in un certo punto dell'apparato ai Lngs (il che accade molto raramente). Anche se non si può associare al neutrino rivelato il protone "genitore" all'interno del pacchetto, i pacchetti sono così compatti che si riesce a individuare l'istante iniziale con una precisione di pochi nanosecondi. Questa procedura assume che, dall'istante iniziale all'istante in cui viene prodotto il neutrino, i protoni e i loro prodotti di interazione viaggino alla velocità della luce. Essendo questo intervallo molto minore dell'intera durata del viaggio verso i Lngs, l'approssimazione è ampiamente giustificata. La misura si riduce quindi a collegare i tempi iniziale e finale con quelli di due ricevitori Gps posti rispettivamente all'esterno dei laboratori del Cern e dei Lngs. Questa operazione, tra le più delicate dell'intera procedura, è in parte svolta utilizzando la tecnologia White Rabbit e in parte mediante misure di calibrazione dei vari ritardi temporali introdotti dalla propagazione dei segnali all'interno del rivelatore. Per un altro aspetto determinante, il modo con cui vengono agganciati tra loro i due

segnali Gps, si è fatto uso della tecnica *common view*, in cui solo i segnali emessi dai satelliti visti simultaneamente da entrambi i siti vengono presi in considerazione. L'intera procedura ha consentito di misurare il tempo di volo con una precisione di qualche nanosecondo, un milione di volte inferiore rispetto alla durata dell'intero viaggio dei neutrini. Come è noto, nel settembre del 2011 la misura del tempo di volo dell'esperimento Opera aveva fornito un risultato anomalo, compatibile con una velocità di propagazione *superluminale* (più veloce della luce) per i neutrini, contraddicendo il limite imposto dalla teoria della relatività di Einstein. Nuove calibrazioni e ulteriori controlli effettuati sui ritardi di propagazione dei segnali di sincronizzazione temporale hanno però messo in luce due errori strumentali responsabili di questa anomalia e pochi mesi più tardi il risultato è stato smentito. Gli studi effettuati per capire l'anomalia, uniti ai risultati che nel frattempo pervenivano da altri esperimenti indipendenti, hanno definitivamente confermato l'errore ma, al contempo, hanno aperto nuove prospettive per misure temporali di altissima precisione a grandi distanze.

## Biografia

**Maximiliano Sioli** è professore di fisica sperimentale presso l'Università di Bologna. Si è occupato di fisica dei raggi cosmici e fisica del neutrino negli esperimenti Macro e Opera al Gran Sasso e attualmente si occupa di fisica agli acceleratori nell'esperimento Atlas di Lhc del Cern.

## Link sul web

<http://cern.ch/proj-cngs>

<http://www.ohwr.org/projects/white-rabbit>