

Sinfonia di particelle

Jitter e femtosecondi

di Alessandro Cianchi



a.
Un'orchestra è un modello di sincronizzazione. Il direttore è il *master clock* che allinea in tempo i vari strumenti. Anche in un acceleratore di particelle i vari dispositivi devono lavorare sincronizzati.

Immaginate un'orchestra. Una sinfonia è il risultato di tanti strumenti, ognuno dei quali segue la propria partitura, con un tempo ben definito. Quando il direttore fa un segno, attaccano le percussioni, a un altro gesto sono i fiati a essere coinvolti. Il risultato è piacevole grazie alla perfetta temporizzazione degli orchestrali.

In un acceleratore di particelle avviene lo stesso: ci sono tanti dispositivi e il risultato ci soddisfa solo se tutti sono sincronizzati per operare a un certo tempo. Non solo. Poiché tanti sono i pacchetti di particelle da accelerare, la ripetizione precisa della stessa partitura è fondamentale. Altrimenti ognuno fa storia a sé.

Il *jitter* è la fluttuazione temporale dell'evento che si discosta dal tempo aspettato. Mentre per un'orchestra siamo a livello di decine o centinaia di millisecondi, i nuovi acceleratori hanno delle richieste molto più stringenti, parliamo di femtosecondi. Vediamo innanzitutto di capire perché questa necessità.

Partiamo da un acceleratore del presente, con molto futuro, l'"acceleratore al plasma". Nelle macchine convenzionali le particelle sono accelerate tramite un'onda elettromagnetica a radiofrequenza. Con questa tecnologia si possono raggiungere

dei campi elettrici al massimo di circa cento milioni di volt in un metro, in banda X (circa 12 GHz) e solo in alcuni prototipi. Nell'accelerazione al plasma, si sfrutta il campo elettrico generato dalla separazione di carica, che viene prodotta in un plasma neutro. Ciò permette di ottenere dei campi di diversi ordini di grandezza superiori, diminuendo così proporzionalmente la lunghezza della macchina.

Per farlo serve un cosiddetto "*driver*": può essere un pacchetto di particelle cariche oppure un laser di alta potenza, dell'ordine di 10^{18} W/cm². Le particelle cariche, elettroni di solito, repellono gli altri elettroni del plasma, mentre gli ioni, molto più pesanti, rimangono nella loro posizione. Si forma una zona in cui sono presenti molte più cariche positive che negative. Nel caso del laser è la forza "ponderomotrice" della radiazione a separare le cariche, generando il campo elettrico che utilizziamo per accelerare il fascio, che chiamiamo "*witness*" e che arriva dopo il *driver*.

Il tempo che intercorre tra il *driver* e il *witness* è nell'ordine del picosecondo, ma siccome la perturbazione del plasma non è costante nel tempo, il *jitter* che si può tollerare tra il *driver* e il *witness* è dell'ordine della decina dei femtosecondi. Se fosse



b.
Lo European XFEL di DESY (Amburgo). Le macchine che pilotano queste sorgenti di luce hanno dei requisiti molto stringenti sulla qualità dei fasci di elettroni e soprattutto sulla sincronizzazione con sorgenti esterne, al livello di pochi femtosecondi.

più grande, il *witness* vedrebbe ogni volta un'intensità di campo differente, acquisendo dunque un'energia diversa. Il campo si chiama "campo scia", e come la scia delle auto nella Formula 1 dipende dalla posizione relativa tra chi dà la scia e chi la sfrutta, così in questo caso quanto campo accelerante sente il *witness* dipende dalla sua distanza dal *driver*.

In un laser a elettroni liberi (FEL) vengono prodotti degli impulsi di radiazione nei raggi X, dunque penetranti la materia, con durata di femtosecondi, che è un tempo scala proprio delle reazioni chimiche. Moltissimi esperimenti vengono condotti con una tecnica di *pump and probe*: si eccita un campione e poi si vede come reagisce nel tempo facendo arrivare la radiazione a diversi istanti temporali. La richiesta sul tempo di arrivo è dell'ordine dei femtosecondi.

Queste applicazioni ci richiedono di produrre e trasportare le nostre particelle con un tempo ben preciso e soprattutto di suonare la stessa partitura tutte le volte in modo uguale. Si potrebbe pensare che basti un orologio molto preciso, e che tutti i sistemi ricevano da questo il tempo una volta per tutte. In realtà, l'attuale tecnologia non ci permette di avere una stabilità al livello desiderato per più di qualche ora. È necessario distribuire a tutti i nostri orchestrali continuamente un segnale di sincronizzazione. I nostri sistemi sono un matrimonio tra ottica ed elettronica. Infatti, in molti casi usiamo dei segnali ottici prodotti da laser molto precisi e poi li recapitiamo ai vari strumenti con dei collegamenti in fibra ottica, stabilizzati in temperatura. La fibra ottica è immune dai disturbi elettromagnetici che sono propri di un ambiente tipo quello degli acceleratori. Abbiamo poi dei sistemi di *feedback* che evitano i *drift* lenti che si sviluppano con dinamiche di

minuti od ore. Sono fastidiosi ma si possono curare. Adesso che abbiamo distribuito a tutti il segnale del direttore d'orchestra e ognuno sa quando attaccare la sua parte, dobbiamo vedere, sul nostro fascio di particelle accelerato, se tutto è andato bene.

Ci sono vari sistemi, alcuni "parassiti", ovvero che non disturbano il fascio, utilizzando in qualche modo il campo elettrico che si muove insieme alle cariche, altri, invece, "distruttivi". Ne descriviamo uno del secondo tipo, molto utilizzato perché riesce a fornire un'immagine di come le particelle sono distribuite nel tempo: una TDS (*time-deflecting structure*). Si tratta di una struttura metallica, dove insieme al fascio di particelle da misurare arriva un'onda elettromagnetica. Il verso del campo elettrico è ortogonale alla direzione del fascio. Ed è un campo oscillante. Questo significa che la testa del pacchetto vede, ad esempio, una forza trasversale che lo devia in alto, il centro nessuna forza, la coda una forza che lo devia in basso. Dopo un tratto di deriva, le particelle giungono su una targhetta fluorescente, che emette della luce nella posizione in cui le cariche l'hanno intercettata. Vediamo un'immagine nel piano trasverso di com'è fatto il pacchetto di particelle in longitudinale. E se abbiamo due fasci, *driver* e *witness*, misuriamo due strutture, con una separazione che dipende dalla loro distanza. Ogni volta che la coppia arriva nel TDS abbiamo un'immagine e notiamo che sia la distanza tra *driver* e *witness*, sia la posizione di entrambi variano leggermente. È il *jitter*. Con i moderni sistemi possiamo misurare lunghezze temporali e *jitter* al livello del femtosecondo, che è la risoluzione richiesta.

Biografia

Alessandro Cianchi è professore ordinario in fisica sperimentale delle interazioni fondamentali e applicazioni nel dipartimento di fisica dell'università di Roma Tor Vergata. È responsabile della *beam instrumentation* nel progetto europeo EuPRAXIA.