

Ritmi frenetici

Le misure di tempo e la sincronizzazione nella fisica agli acceleratori

di David Alesini

Gli acceleratori di particelle sono stati e sono tuttora tra i più potenti strumenti di investigazione scientifica nell'ambito della ricerca in fisica fondamentale e fisica applicata e trovano oggi giorno applicazione nei più svariati campi della medicina, sicurezza, tomografia e trattamento di materiali. Sono macchine elettromagnetiche estremamente complesse, che consentono di accelerare particelle di vario tipo (elettroni, protoni, ioni) portandole a energie elevatissime (fino ai TeV) e velocità prossime a quella della luce. Le richieste in termini di sincronizzazione dei vari dispositivi acceleranti e la loro stabilità sono stati oggetto di decenni di ricerca e sviluppo e rappresentano oggi la frontiera in questo campo tecnologico. Per comprendere quali sono tali richieste è importante capire in che modo vengono accelerate le particelle. Il processo di accelerazione può avvenire seguendo una traiettoria lineare

(quello che accade in un cosiddetto LINAC), in cui le particelle passano una sola volta attraverso i dispositivi acceleranti, oppure seguendo traiettorie circolari, in cui le particelle passano milioni di volte al secondo attraverso gli stessi dispositivi di accelerazione, guadagnando progressivamente energia. Nella prima tipologia rientrano, ad esempio, i LINAC di elettroni utilizzati nei FEL (*Free Electron Laser*), che consentono la generazione di impulsi laser nei raggi X molto intensi e ultracorti, fino alla scala dei femtosecondi (cioè impulsi di un milionesimo di miliardesimo di secondo, $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), rendendo possibili analisi molecolari che fino a pochi decenni fa erano considerate inimmaginabili. Tra gli acceleratori circolari citiamo i collisori, nei quali due fasci di particelle circolano in direzioni opposte all'interno di due anelli e, collidendo in un punto, consentono ad esempio di ricreare



a.
Il Large Hadron Collider (LHC), il più grande e potente acceleratore di particelle al mondo, situato al CERN vicino a Ginevra. LHC fa collidere protoni (e nuclei pesanti) circolanti in due anelli di 27 km a energie fino a 14 TeV, ricreando condizioni simili a quelle dell'universo primordiale, per studiare le particelle fondamentali e le leggi della fisica. Grazie a questa straordinaria macchina si è scoperto il bosone di Higgs.

densità di energia paragonabili a quelle dei primi istanti di vita dell'universo. È stato proprio grazie a tali macchine, come il Large Hadron Collider (LHC), che è stato possibile scoprire il bosone di Higgs.

In entrambi i casi i pacchetti di particelle sono accelerati con l'utilizzo di strutture metalliche in rame o superconduttive, chiamate cavità a radiofrequenza (RF), all'interno delle quali è confinato un campo elettrico oscillante, sincronizzato con il passaggio delle particelle, che fornisce energia a ogni passaggio. Tali campi hanno tipicamente frequenze che vanno dalle decine di MHz ai GHz, ovvero compiono dalle decine di milioni a vari miliardi di oscillazioni in un secondo.

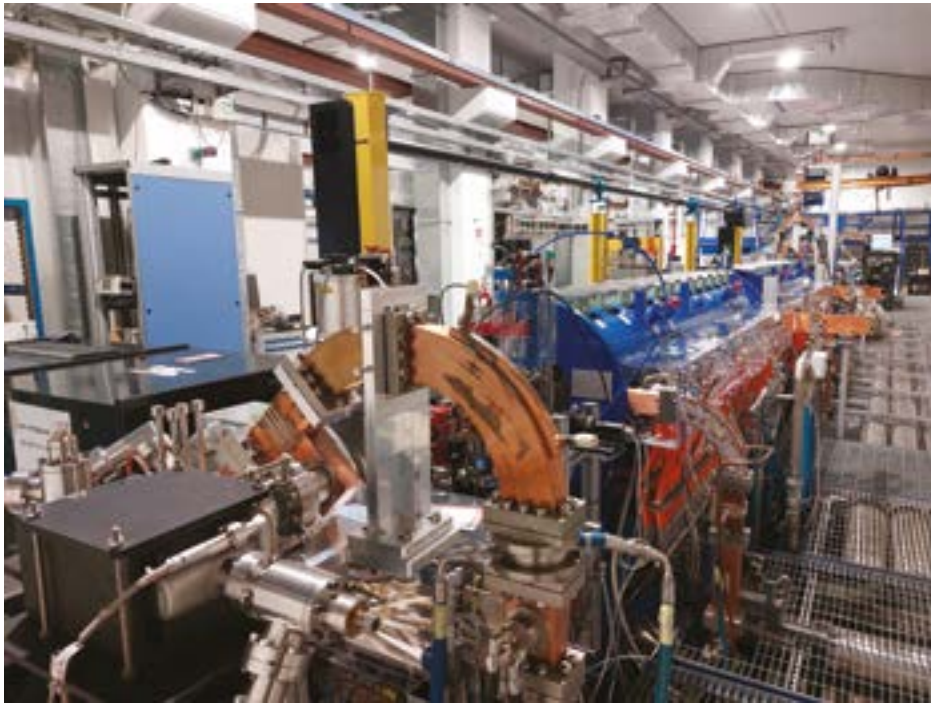
Le esigenze di sincronizzazione e stabilità dei vari dispositivi acceleranti nascono proprio da questa modalità di accelerazione. Poiché, infatti, la singola oscillazione del campo elettrico ha un periodo che può arrivare al di sotto del miliardesimo di secondo (nanosecondo, $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$), tutti i vari sistemi acceleranti devono essere tra loro sincronizzati e stabili con precisione ben al di sotto di questo periodo di radiofrequenza, in modo da mantenere il fascio di particelle sempre "in fase" con il campo accelerante, garantendo stabilità di energia. Immaginando di suddividere il periodo di radiofrequenza in 360 gradi si parla di "stabilità di fase" e questa deve essere ben al di sotto del grado.

I diversi tipi di acceleratori (lineari, circolari, collisori, macchine di luce di sincrotrone) hanno, tuttavia, esigenze di stabilità differenti. Nei LINAC impiegati nei FEL, ad esempio, il fascio di elettroni arriva all'energia finale in centinaia di metri attraversando decine o centinaia di dispositivi acceleranti, alimentati da altrettante sorgenti a radiofrequenza che

operano tipicamente a qualche GHz. Tutte queste sorgenti devono, pertanto, essere sincronizzate e stabili con precisione ben al di sotto del picosecondo ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). Non solo. Per poter aumentare la corrente di picco del singolo pacchetto di particelle, necessaria per l'operazione del FEL stesso, si utilizzano sistemi di compressione longitudinale realizzati con opportuna manipolazione della distribuzione di energia all'interno del pacchetto stesso. Questa è ottenuta attraverso i campi acceleranti che devono avere stabilità di sincronizzazione al livello di poche decine di femtosecondi. Nei collisori, invece, in cui i due fasci di particelle circolano in direzioni opposte, in due anelli, e collidono in un punto centinaia di milioni di volte al secondo, la sincronizzazione delle cavità acceleranti dei due anelli è direttamente collegata alle oscillazioni in energia del singolo pacchetto e alla stabilità dei fasci collidenti nel punto di interazione. Una variazione del punto di collisione può infatti portare non solo a una perdita di efficienza (ovvero di "luminosità"), ma anche a instabilità del fascio di particelle e a un aumento dei segnali di fondo nei rivelatori. Le radiofrequenze dei due anelli non devono pertanto essere solo perfettamente "agganciate" tra di loro per evitare che i pacchetti collidenti scivolino progressivamente, giro per giro, andando fuori collisione, ma devono avere sincronizzazione e stabilità ben al di sotto della frazione di grado, che tradotto in tempo nel caso di LHC, con cavità che operano a ca. 400 MHz, significa poche decine di picosecondi. Negli acceleratori di particelle, le esigenze di sincronizzazione non si fermano soltanto alle strutture acceleranti ma anche alla sincronizzazione tra acceleratore e utenti. Nel caso di un collisore, ad esempio, un sistema di "trigger hardware" (detto

prefisso	simbolo	fattore moltiplicativo	potenza di 10
yotta	Y	1 000 000 000 000 000 000 000 000 000	+24
zetta	Z	1 000 000 000 000 000 000 000 000	+21
exa	E	1 000 000 000 000 000 000 000	+18
peta	P	1 000 000 000 000 000 000	+15
tera	T	1 000 000 000 000 000	+12
giga	G	1 000 000 000	+9
mega	M	1 000 000	+6
chilo	k	1 000	+3
etto	h	100	+2
deca	da	10	+1
	u	1	0
deci	d	0,1	-1
centi	c	0,01	-2
milli	m	0,001	-3
micro	μ	0,000 001	-6
nano	n	0,000 000 001	-9
pico	p	0,000 000 000 001	-12
femto	f	0,000 000 000 000 001	-15
atto	a	0,000 000 000 000 000 001	-18
zepto	z	0,000 000 000 000 000 000 001	-21
yocto	y	0,000 000 000 000 000 000 000 001	-24

b. La clessidra dei prefissi.



c.

L'acceleratore lineare di elettroni SPARC, in operazione presso i Laboratori Nazionali di Frascati (LNF) dell'INFN. Questa straordinaria macchina consente di generare pacchetti di particelle di altissima qualità, in termini di distribuzione energetica e densità, permettendo esperimenti pionieristici di accelerazione al plasma e di generazione di radiazione coerente (*Free Electron Laser*).

trigger di primo livello) seleziona in tempo reale se una collisione ha prodotto eventi interessanti o meno, riducendo la frequenza delle collisioni effettivamente "registrate" di un fattore circa 1000. Al fine di ricostruire il corretto istante in cui è avvenuta una collisione da "salvare", questo sistema deve pertanto essere sincronizzato con l'acceleratore al meglio di frazioni del tempo di attraversamento tra i pacchetti collidenti. Nel caso di LHC parliamo ad esempio di meno di 100 picosecondi. Analogamente negli esperimenti di dinamica molecolare (*pump-probe*) con luce di sincrotrone o FEL, impulsi laser esterni (*pump*) eccitano un campione che poi è analizzato dall'impulso di raggi X (*probe*) emesso dall'acceleratore. La sincronizzazione reciproca in questi casi si deve spingere fino a qualche decina di femtosecondi.

Tutti questi livelli di sincronizzazione si basano su un sistema concettualmente semplice ma tecnicamente critico. Tutto parte da un oscillatore centrale (*master*

oscillator) ultra-stabile, che oscilla a una frequenza che può variare dalle decine alle centinaia di MHz e che rappresenta il riferimento assoluto del tempo di tutta la macchina e relativi esperimenti. Questo orologio (*clock*) è quindi distribuito attraverso cavi o fibre ottiche stabilizzate che non introducono rumore o sfasamenti ai vari sistemi, che quindi si agganciano, si sincronizzano a questo riferimento con, ad esempio, quelli che chiamiamo sistemi elettronici ad aggancio di fase (PLL).

La sincronizzazione negli acceleratori di particelle rappresenta oggi una delle sfide tecnologiche più sofisticate e decisive: dalla precisione dei campi a radiofrequenza fino al perfetto allineamento temporale con esperimenti esterni. La capacità di controllare il tempo con accuratezza estrema, fino a pochi femtosecondi, è ciò che permette a queste macchine straordinarie di spingersi sempre oltre, aprendo nuove frontiere nella ricerca scientifica e nelle sue applicazioni.

Biografia

David Alesini lavora da oltre 25 anni nell'ambito degli acceleratori di particelle presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN ed è attualmente coordinatore del Comitato Nazionale INFN-Acceleratori.