

# Il casinò della fisica

## Tecniche di simulazione per l'analisi dei dati

di Luciano Pandola e Giada Petringa

La nascita di ogni esperimento di fisica moderna è preceduta da un periodo di progettazione, nel quale si determina l'equilibrio ottimale fra la sensibilità, le prestazioni e i costi. Gli esperimenti sono solitamente concepiti per cercare un tipo specifico di “segnale” (il bosone di Higgs, la materia oscura ecc.). Il rivelatore utilizzato deve perciò essere sensibile al segnale di interesse, ma allo stesso tempo ben protetto da altri tipi di eventi (il cosiddetto “fondo”) che potrebbero imitarlo. Data la complessità degli attuali esperimenti, gran parte di questo lavoro di progettazione deve essere fatto simulando con opportuni modelli la risposta del sistema nel suo complesso, sia a eventi di segnale che di fondo. È possibile in questo modo definire, per esempio, il tipo e le dimensioni dei rivelatori da utilizzare – per riconoscere meglio il segnale, oppure le schermature necessarie a sopprimere il fondo a un livello tollerabile. La simulazione è importante anche dopo che l'esperimento è stato costruito, quando si affronta l'analisi dei dati. Le simulazioni offrono infatti l'enorme vantaggio di poter “prevedere” la risposta del rivelatore al variare delle caratteristiche del segnale e

del fondo. Il confronto fra i dati reali e le simulazioni è un passaggio spesso obbligato per analizzare e interpretare i risultati di un esperimento.

Le simulazioni degli esperimenti sono un esempio particolare di problema che può essere affrontato mediante il cosiddetto “metodo Monte Carlo”. Si tratta di un approccio di tipo statistico, il cui ingrediente primario sono i numeri casuali. Il nome è stato coniato proprio traendo ispirazione dal famoso casinò di Monte Carlo, regno indiscusso della casualità. Il campo di applicazione del metodo Monte Carlo è molto vasto e include sistemi complessi, il cui comportamento è determinato dall'influenza reciproca di un gran numero di componenti elementari. Ne sono un esempio gli studi sul flusso del traffico veicolare, l'andamento del mercato finanziario o, per l'appunto, l'interazione di un fascio di particelle in un rivelatore. In pratica si utilizzano numeri casuali per simulare il comportamento delle unità elementari, così da predire il comportamento globale del sistema. Ripetendo molte volte l'intera procedura si può quindi determinare la risposta media del sistema. Il metodo Monte Carlo presuppone



a.  
La roulette del casinò di Monte Carlo, da cui trae il nome il “metodo Monte Carlo”, a rimarcare così il ruolo centrale ricoperto dai numeri casuali.



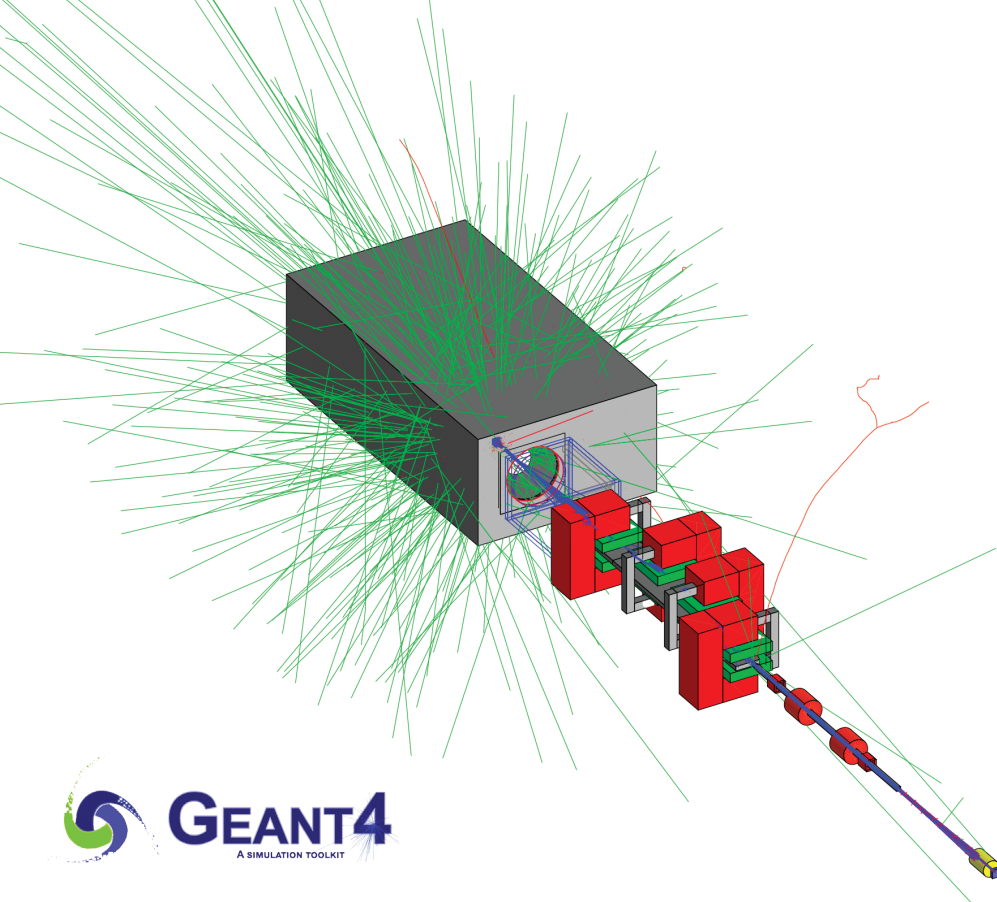
b.  
John von Neumann (1903-1957), nato in Ungheria ed emigrato negli Stati Uniti negli anni '30, è stato l'indiscusso padre fondatore, insieme a Stanislaw Ulam, del moderno utilizzo scientifico del metodo Monte Carlo.

sia la generazione di numeri casuali sia l'iterazione di una stessa procedura: si coniuga perciò perfettamente con le caratteristiche dei computer, che sono progettati per eseguire velocemente calcoli ripetitivi.

Tuttavia, le idee alla base del metodo sono dovute al conte Georges-Louis Leclerc de Buffon (1777) e a Pierre Simon Laplace (1786), in anticipo di secoli rispetto all'invenzione dei computer. Le applicazioni ebbero poi un balzo in avanti a partire dal secondo dopoguerra, grazie a Stanislaw Ulam e John Von Neumann, che sfruttarono i primi proto-computer legati allo sviluppo delle prime armi termonucleari.

L'applicazione più comune del metodo Monte Carlo nell'ambito della fisica particellare consiste nella simulazione del passaggio di radiazione attraverso la materia, per poter prevedere la risposta dei rivelatori. Negli ultimi decenni sono stati sviluppati diversi software adatti allo scopo: partendo da quelli pionieristici, limitati a un ambito specifico, si è lentamente arrivati a progetti più ampi, concepiti per rispondere a molte esigenze differenti. I programmi ad oggi disponibili differiscono soprattutto per i modelli di fisica adottati per simulare le singole interazioni. Uno dei presupposti del metodo Monte Carlo è infatti quello di saper descrivere il comportamento di ciascuna delle unità elementari che compongono il sistema, ossia, nel caso specifico, le interazioni di una data particella con il mezzo attraversato. "Regole di comportamento" leggermente diverse di queste unità possono portare a differenze più o meno visibili nei risultati per l'intero sistema. Talvolta, le "regole di comportamento" delle particelle elementari non

sono note con precisione e si è costretti a ricorrere all'uso di modelli fenomenologici o teorici, che impongono delle approssimazioni o semplificazioni: questo è il caso soprattutto per gli adroni, ossia per quelle particelle formate da quark e soggette all'interazione di tipo nucleare forte. In alcuni casi, i modelli non sono descritti mediante formulazioni analitiche, ma si basano su dati sperimentali, che vengono riportati in forma tabulata. Questo approccio è inevitabilmente limitato alle sole applicazioni per le quali sono disponibili dati precisi e affidabili. La simulazione si sviluppa "tracciando" particelle nel mezzo di interesse (per esempio, un apparato sperimentale): si parte da una particella primaria, che ha una certa energia e una certa direzione, e se ne segue l'evoluzione all'interno dei vari elementi che compongono il sistema. La particella è soggetta a interazioni successive con il mezzo, ciascuna descritta da ben precise "regole di comportamento". Ognuna di queste interazioni produce una variazione sia dell'energia che della traiettoria e può causare l'emissione di nuove particelle, che vengono dette secondarie. La procedura di tracciamento continua in modo iterativo, finché la particella primaria e tutte le eventuali secondarie vengono assorbite oppure fuoriescono dai confini del volume simulato (il cosiddetto "volume mondo"). Poiché il metodo Monte Carlo è fondato su un approccio statistico, è necessario che la procedura venga ripetuta molte volte: si traccia cioè un gran numero di particelle primarie (insieme a tutte le eventuali secondarie), in modo da determinare l'evoluzione media di tutto il sistema. La precisione della simulazione è tanto migliore, quanto



c.  
Immagine della simulazione Geant4 della linea di trasporto Elimed (Eli-Beamlines Medical and multidisciplinary application) installata a Eli-Beamlines (Praga, vd. in Asimmetrie n. 12 p. 34, ndr). La linea serve al trasporto dei fasci di particelle cariche prodotte dall'interazione di un laser di alta potenza su un bersaglio sottile. Il progetto è stato verificato e ottimizzato anche mediante simulazioni Monte Carlo.

più è grande il numero di particelle primarie tracciate. La natura intrinsecamente probabilistica della fisica quantistica fa sì che ogni ripetizione avrà un'evoluzione diversa, pur partendo sempre dalle stesse condizioni iniziali: le interazioni delle particelle con il mezzo avverranno generalmente in posizioni differenti e producendo effetti differenti. Così si può determinare, ad esempio, la risposta dei moderni complessi rivelatori di Lhc, ma anche la propagazione dei raggi cosmici nella Galassia.

Uno dei programmi Monte Carlo che negli ultimi anni si è affermato nella comunità dei fisici per la simulazione Monte Carlo dell'interazione fra radiazione e materia si chiama Geant4. Si tratta di un software *open source*, sviluppato da una collaborazione internazionale che include l'Infn. La prima versione è stata rilasciata nel 1998, ma Geant4 continua tuttora a essere aggiornato con regolarità al fine di migliorarne sempre più la precisione, l'affidabilità e le prestazioni. Geant4 è una sorta di "cassetta degli attrezzi" (un "*toolkit*") che contiene tutti gli strumenti necessari per simulare un rivelatore reale: gestione dei volumi e dei materiali, modelli di fisica, generazione e tracciamento di particelle, recupero delle informazioni da salvare. Agli utenti spetta il compito di scegliere dalla "cassetta" gli strumenti più adatti al proprio scopo specifico e poi utilizzarli. La precisione e la flessibilità di Geant4 lo rendono un prodotto affermato in diversi ambiti: dalla fisica delle alte energie alla fisica nucleare, fisica spaziale e astrofisica particellare.

Negli ultimi anni, poi, si è sempre più diffusa l'applicazione del metodo Monte Carlo nel campo della fisica medica. Le moderne tecniche diagnostiche, la radioterapia, l'*imaging* in medicina nucleare (vd. p. 39, ndr), così come la descrizione del danno biologico, si sono avvalse con successo di software nati originariamente per simulare esperimenti di fisica. Ciò ha permesso di risolvere problemi complessi che erano prima

affidati a calcoli analitici, spesso soggetti a errori o notevoli approssimazioni. Tra questi c'è il calcolo della dose, quantità fondamentale in radioterapia, che racchiude sia gli aspetti fisici legati alle caratteristiche delle radiazioni adottate (energia, tipo di particella) sia le caratteristiche biologiche inerenti la risposta di uno specifico tessuto alla radiazione. Esiste anche un'intera branca di Geant4 dedicata alla simulazione del danno biologico indotto da radiazioni ionizzanti, chiamata Geant4-Dna. Questa estensione del software è continuamente aggiornata da un gruppo di ricercatori che comprende fisici, informatici e biologi, così da poter migliorare sempre più i piani di trattamento dei pazienti soggetti alla radioterapia.

#### Biografia

**Luciano Pandola** è un ricercatore Infn presso i Laboratori Nazionali del Sud di Catania. Si è occupato di simulazioni Monte Carlo e di analisi dati nell'ambito di esperimenti di astrofisica particellare e di ricerca di eventi rari. È membro della collaborazione Geant4 dal 2002.

**Giada Petringa** è un'assegnista di ricerca presso i Laboratori Nazionali del Sud di Catania. Membro della collaborazione Geant4 si occupa di simulazioni Monte Carlo applicate alla fisica medica e alla modellistica radiobiologica.

#### Link sul web

<http://geant4.org>

<http://www.mathisinthair.org/wp/2015/10/i-metodi-monte-carlo-prima-parte/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2019.27.6