

## Tu che sei un fisico - Episodio 4

### TITOLO

*Perché il tempo scorre in una direzione ben precisa?*

### SHOW NOTES

*Oggi parliamo di entropia, della freccia del tempo, e del perché l'universo evolve in una direzione ben precisa. E poi di giochi per familiarizzarsi con la fisica delle particelle, e imparare come funziona il mondo microscopico.*

*Per approfondire:*

- Particle Clicker: <https://particle-clicker.web.cern.ch/particle-clicker>
- Quak Card Dealer: <http://www.jicfus.jp/en/promotion/pr/quark-card-dealer>
- Bosemon: <https://sites.google.com/site/bosemongame/home>
- Particle builder: [https://zenodo.org/record/1341747#.XnJZ4S3Mz\\_9](https://zenodo.org/record/1341747#.XnJZ4S3Mz_9)
- Elementary particle cards: le carte  
[http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Netzwerk\\_Teilchenwelt/Downloads/Teilchensteckbriefe\\_engl.pdf](http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Downloads/Teilchensteckbriefe_engl.pdf)  
e le istruzioni (in inglese)  
[https://scoollab.web.cern.ch/sites/scoollab.web.cern.ch/files/documents/particle\\_cards\\_instructions\\_english.pdf](https://scoollab.web.cern.ch/sites/scoollab.web.cern.ch/files/documents/particle_cards_instructions_english.pdf)
- Subatomic:  
<https://www.geniusgames.org/products/subatomic-an-atom-building-game-2nd-edition>

*Mandami le tue domande a:*

*tucheseiunfisico@borborgimi.org*

*O anche su:*

*<http://www.twitter.com/tucheseiunfisi1>*

*<http://www.facebook.com/Tu-che-sei-un-fisico-103204041288333/>*

*<http://www.borborigmi.org/tu-che-sei-un-fisico>*

*Seguimi su:*

*<http://www.twitter.com/marcodelmastro>*

*<http://www.instagram.com/marcodelmastro>*



## SIGLA

Oggi parliamo di entropia, e del perché nell'universo il tempo scorre in una direzione ben precisa. E poi di giochi per familiarizzarsi con la fisica delle particelle, e per imparare come funziona il mondo microscopico.

### PERCHÉ IL TEMPO SCORRE IN UNA DIREZIONE BEN PRECISA?

La prima domanda di oggi viene da Antonio. Caro Antonio, devo ammettere che ho esitato molto prima di decidermi a rispondere alla tua domanda. Si tratta infatti di uno di quei quesiti ostici e complicati, che toccano aspetti della fisica che fanno un po' girare la testa, e per i quali, almeno in parte, non conosciamo la risposta.

Questo non vuol dire però che non si possa provare a rispondere. Pertanto... Antonio chiede:

- Tu che sei un fisico, potresti chiarire perché il tempo non esiste nelle equazioni della fisica fondamentale, ma poi appare quando consideriamo il degrado dell'energia? Dov'è il passaggio dalle particelle all'entropia?

Lasciamo per un attimo da parte la seconda parte della domanda, quella che introduce un parolone che dovremo spiegare, *entropia*. Concentriamoci all'inizio sulla primissima parte della domanda: Antonio dice che "il tempo non esiste nelle equazioni della fisica fondamentale". Cosa vuol dire?

Quando consideriamo sistemi semplici, ovvero sistemi composti da pochi elementi che interagiscono esclusivamente tra di loro, siamo in grado di descrivere il loro comportamento indipendentemente dalla direzione in cui facciamo avanzare il tempo. Se poi osserviamo una registrazione dell'evoluzione di questi sistemi semplici, non siamo capaci di dire dove stia il passato e dove stia il futuro.

Mi spiego meglio. Immaginate un tavolo da biliardo diciamo "ideale", senza attrito e i cui bordi permettono alle palle di rimbalzare senza assorbire nemmeno un po' della loro energia. Immaginiamo che su questo biliardo ci siano due palle, una rossa e una gialla. Qualcuno ha filmato il biliardo: il video inizia con le palle rossa e gialla a circa 10 centimetri di distanza tra di loro che si avvicinano, si scontrano, e poi si allontanano verso i bordi del tavolo. Per quanto mi sforzi, non sono in grado di dire se il video è stato girato esattamente come lo ho osservato, oppure se qualche burlone me lo sta facendo vedere al contrario! La palla rossa e quella gialla potrebbero benissimo essere arrivate dai bordi del tavolo, essersi scontrate ed essersi allontanate di circa 10 centimetri prima che l'operatore spegnesse la videocamera.

La fisica fondamentale, quella che descrive sistemi semplici, modella fenomeni che diciamo essere *reversibili* nel tempo, ovvero fenomeni che sono descritti dalle stesse equazioni

qualunque sia il verso dell'evoluzione temporale che decidiamo di considerare. Questo vale tanto per la fisica classica, quella che descrive il moto delle palle su un tavolo da biliardo ideale, quanto per la fisica delle particelle (con una serie di avvertenze su cui oggi sorvoleremo). La probabilità che abbiamo di produrre un bosone di Higgs scontrando due bosoni Z è la stessa che quella abbiamo di produrre due bosoni Z facendo disintegrare un bosone di Higgs. I calcoli che prevedono questa probabilità sono gli stessi, solo lo scorrere del tempo nelle equazioni è invertito. Prima che me lo chiediate, sì, la stessa cosa vale per la meccanica quantistica, che, per quanto spesso controintuitiva, rispetta in tutto e per tutto questa simmetria temporale.

La fisica fondamentale funziona molto bene, dunque, sia a livello classico sia quando consideriamo le particelle elementari. Tuttavia l'universo è pieno di fenomeni che sono chiaramente *irreversibili*. Un processo *irreversibile* è un fenomeno che avviene in modo pressoché esclusivo in una direzione specifica dello scorrere tempo.

Torniamo al nostro tavolo da biliardo. Immaginiamo adesso di avere non solo due palle, ma tutte le 15 palle colorate e anche la palla bianca. Qualcuno ha di nuovo girato un video, che inizia con le palle colorate disposte in un triangolo ordinato da un lato del tavolo, e la palla bianca dal lato opposto. Nel video, la palla bianca si muove verso il triangolo di palle colorate, le colpisce disintegrando il triangolo e facendo sparpagliare tutte le palle sulla tavola da biliardo. Qualcuno di voi avrebbe qualche dubbio rispetto alla direzione del tempo del video? Non credo proprio! Se vi mostrassi il video al contrario, partendo cioè dalle palle sparpagliate che si muovono per ritrovarsi perfettamente ordinate in un triangolo, con la palla bianca che si allontana infine per fermarsi all'estremo opposto del tavolo, non avreste dubbi che io vi stia mostrando il video al contrario.

Qual'è allora la differenza tra questa seconda situazione, e la prima in cui guardavamo il video con due sole palle che si scontravano? La fisica che governa le collisioni tra le palle del biliardo è forse diversa nei due casi? No. Ma allora perché nel secondo caso sembra esserci una "freccia del tempo" ben precisa? Perché la "spaccata" delle palle da biliardo è un processo *irreversibile*?

Alla fine dell'800, l'occupazione principale dei fisici era quella di comprendere il funzionamento delle macchine a vapore, e di ottimizzarne il funzionamento e il rendimento. È in quel periodo che termini come "calore", "temperatura" ed "energia" sono entrati nel linguaggio della fisica, dando vita ad una sua branca fondamentale: la termodinamica. Proprio nell'ambito della termodinamica, un fisico austriaco di nome Ludwig Boltzmann nel 1877 formula la seconda legge della termodinamica, forse il principio fisico più importante per comprendere perché l'universo sembra evolvere in una direzione particolare. La seconda legge della termodinamica dice che "l'entropia in un sistema isolato rimane costante o aumenta col passare del tempo". Siamo finalmente arrivati al punto in cui dobbiamo spiegare che cos'è *l'entropia*. Per farlo ci faremo aiutare proprio da Boltzmann.

Quando formulò la sua versione del secondo principio della termodinamica, Boltzmann cercava di spiegare le leggi che governano gli scambi di calore e le variazioni di temperatura, volume e pressione nelle macchine a vapore in termini di una teoria atomica. Se era il vapore acqueo che spingeva i cilindri delle macchine a vapore, allora doveva essere possibile descriverne il funzionamento pensandolo come un gas composto da un gran numero di molecole che interagiscono tra di loro, più o meno come palle da biliardo microscopiche. Boltzmann concluse che quella quantità che lui ed i colleghi chiamavano *entropia*, e che il secondo principio della termodinamica ci dice aumenti inesorabilmente, misurava in effetti il *numero delle possibili disposizioni microscopiche degli atomi che formano un corpo che ci appaiono indistinguibili da un punto di vista macroscopico*.

Questo è un concetto complesso, per cui devo dedicargli un po' di tempo. Torniamo al nostro tavolo da biliardo. Quanti modi esistono per disporre le 15 palle da biliardo in un triangolo perfetto pronto per una spaccata? Uno soltanto. Quanti modi indistinguibili esistono invece per sparpagliare a caso le palle da biliardo sul tavolo, dopo una spaccata? Innumerevoli! Per questa ragione, Boltzmann direbbe che il tavolo da biliardo *dopo la spaccata* è uno stato di *grande entropia*: è cioè in una condizione che ha un numero enorme di stati equivalenti e indistinguibili. Anche se muovo un po' le palle sul tavolo, la condizione rimarrà di fatto invariata, e sostanzialmente molto *disordinata*. Le palle *ordinate* in un bel triangolo *prima della spaccata*, invece, sono molto sensibili a ogni cambiamento: siccome esiste un solo modo per formare il triangolo, lo spostamento anche minimo di un palla ne distrugge l'ordine.

Una grande entropia corrisponde dunque ad una configurazione disordinata di un sistema formato da molte componenti, mentre una piccola entropia ad una configurazione molto ordinata delle stesse componenti. Occhio che nei termini "ordinato" e "disordinato" non c'è valutazione di merito: non sto dicendo che uno è meglio dell'altro! Dal punto di vista di Boltzmann, uno stato disordinato è semplicemente uno stato per cui una variazione *microscopica* non cambia sostanzialmente l'aspetto *macroscopico* del sistema. Quando riordinate la vostra stanza, anche il minimo spostamento di un oggetto ne cambia a tal punto l'aspetto globale da essere visibile. In una stanza disordinata, con libri e vestiti sparpagliati un po' ovunque, spostare un calzino dal letto alla scrivania non cambia invece in maniera sostanziale il caos che regna.

Nella sua domanda Antonio parla di "degrado dell'energia" (vi ricordo che chiedeva infatti: "*perché il tempo appare quando consideriamo il degrado dell'energia?*"). Questa frase mi fa un po' rabbrivire, e bisogna allora che mettiamo d'accordo su cosa voglia dire *degrado*. L'energia è infatti una quantità che si conserva, e dunque la parola "degrado" non deve essere pensata in termini di "consumo". Le leggi della termodinamica valgono per sistemi isolati, e, se consideriamo come sistema isolato l'universo intero, nulla va perso, compresa l'energia. Quello che succede piuttosto è che l'universo si muove, seguendo il secondo principio della termodinamica, da uno stato iniziale molto ordinato, a bassa entropia per dirla con Boltzmann, verso uno stato disordinato, ovvero ad alta entropia. E, in uno stato disordinato, l'energia è più difficile da utilizzare. Non è sparita, ma si è semplicemente trasformata in forme meno facili (o persino impossibili) da sfruttare.

Arriviamo quindi alla parte finale della nostra discussione: l'esistenza di una freccia del tempo nell'universo. Essa è dovuta a due ragioni.

La prima ragione è appunto la seconda legge della termodinamica, di cui abbiamo appena parlato. I sistemi formati da molte componenti evolvono verso stati ad alta entropia, ovvero più disordinati, perché questi sono infinitamente più probabili di configurazioni ordinate a bassa entropia. L'universo in cui viviamo è certamente un sistema formato da molte componenti, visto che tutto è composto da innumerevoli particelle elementari in dialogo tra di loro.

C'è però una seconda ragione, più sottile e cruciale, e solitamente meno discussa. La seconda legge della termodinamica da sola non basta infatti a definire la freccia del tempo. Occorre anche dire che l'universo in cui viviamo è *iniziato in uno stato di bassissima entropia*. È la combinazione di questo stato iniziale con la seconda legge, che provoca quell'evoluzione temporale che osserviamo, e, se volete, che genera l'*esistenza stessa del tempo*.

Se l'universo fosse iniziato in una situazione di equilibrio perfetto, con gli atomi e le particelle sparpagliate in modo molto disordinato come una tavola da biliardo dopo la spaccata, non ci sarebbe nessuna freccia del tempo, nessuna evoluzione, nessuna memoria. A dirla tutta, non ci saremmo probabilmente nemmeno noi, qui a discutere della freccia del tempo. E perché l'universo in cui viviamo, in cui vale la seconda legge della termodinamica, ha avuto inizio in una condizione di bassissima entropia, ovvero in uno stato ordinatissimo? Non ne abbiamo alcuna idea.

## **GIOCARE CON LE PARTICELLE**

Dopo aver affrontato un tema così complesso come quello dell'entropia, mi sembra giusto bilanciare rispondendo a una domanda un po' più leggera. Marco mi chiede:

- Tu che sei un fisico, sai dirmi se esistono degli strumenti per giocare con le particelle, che permettano di costruire qualcosa dicendoti eventualmente dove sbagli? Tipo quello che tu fai con i mattoncini LEGO...

Marco prosegue poi chiedendo:

- Se la natura è formata da "mattoncini" che combinati formano cose, perché vengono create solo determinate combinazioni e non altre? Esiste qualche principio che regola queste unioni?

La risposta alla seconda domanda è semplice e complessa allo stesso tempo, e per oggi ci limiteremo alla parte semplice. Nell'universo in cui ci siamo trovati a vivere vigono delle leggi fondamentali, che permettono alle particelle elementari di interagire tra di loro e formare tutte le strutture microscopiche e macroscopiche che osserviamo. Perché proprio queste leggi e non altre? C'è qualcosa di necessario e obbligatorio nelle regole che la fisica descrive con le sue formule? Questa è la parte complessa della risposta, che da sola aprirebbe un vaso di Pandora di altre domande, e che dunque metteremo da parte per una prossima occasione. La parte semplice è invece quella che riguarda le regole.

Dando per scontato che esistano queste leggi naturali, e senza per adesso interrogarci sul perché esistano e perché proprio quelle, potrebbe essere interessante avere qualche strumento per familiarizzarci con loro, e iniziare ad impararle anche senza bisogno di diventare un fisico delle particelle. In questo periodo di confinamento casalingo, ho pensato allora di proporvi un paio di giochi che potrebbero anche rivelarsi delle risorse didattiche interessanti.

Il primo gioco si chiama *Particle Clicker*. È un videogioco che si gioca su un browser internet, e dunque vi metto il link nelle note dell'episodio. È stato realizzato nel 2014 nell'ambito del Webfest del CERN, che è un evento annuale organizzato dai Summer Student, ovvero dagli studenti universitari che ogni anno d'estate vengono a lavorare qualche settimana al CERN. Il CERN Summer Student Webfest è un *hackathon*, ovvero una maratona di programmazione per realizzare progetti informatici legati alla fisica e alla divulgazione.

Particle Clicker è quello che in gergo si chiama un "idle game", ovvero un gioco incrementale dove con il passare del tempo si accumulano risorse, risorse che possono essere spese per migliorarne la produzione, e guadagnarne ancora di più. Nel caso di Particle Clicker, le risorse sono i dati collezionati da un esperimento di fisica delle particelle come quelli del CERN, e i fondi per finanziare la ricerca. Con i dati si fanno nuove scoperte, mentre i fondi possono essere spesi per migliorare l'esperimento, aumentare l'energia o il numero delle collisioni dell'acceleratore, o anche reclutare studenti e post-doc che producano più dati. Lo scopo del gioco è arrivare a scoprire tutte le particelle elementari che conosciamo, ripercorrendo così tutta la storia della fisica delle particelle fino ad oggi. Per adesso *Particle Clicker* è solo in inglese, ma potrebbe valere lo sforzo!

Il secondo tipo di gioco che vi propongo ha invece proprio a che vedere con le famose "regole di combinazione" di cui chiedeva Marco. Immaginate un mazzo di carte, in cui ogni carta rappresenti una particella elementare, e delle regole del gioco che vi permettono di combinare le carte come succede in natura, formando particelle composte secondo le regole del Modello Standard. Si trovano in giro diversi giochi basati su questo concetto, alcuni con la possibilità di scaricare da internet il PDF delle carte e delle regole da stampare. Attenzione: anche qui quasi tutto è in inglese...

Una delle versioni che preferisco è *Quark Card Dealer*, realizzato da un istituto di ricerca giapponese. Le carte da gioco che rappresentano quark e adroni sono in stile manga: ogni quark è un personaggio, e la loro combinazione, quella che forma le particelle che chiamiamo adroni, una squadra di personaggi in classico atteggiamento da cartone animato giapponese. Con un principio simile è organizzato il mazzo di *Bosemon*, che è graficamente meno bello, ma ha delle regole un po' più sofisticate. Se volete imparare ancora di più, e magari usare questi mazzi di carte a scuole per un'attività didattica per i più grandi, scaricate e stampate le carte e le regole di *Particle Builder*, oppure le *Elementary Particle Cards*. *Particle Builder* è forse il gioco di carte stampabile più completo per familiarizzarsi un po' con le regole della fisica delle particelle, ma è anche il più complesso. Le *Elementary Particle Cards* sono carte ben fatte e professionali,

ottime per attività didattiche un po' più serie, magari adatte alle scuole superiori. Per tutti i mazzi stampabili trovate i link nelle note dell'episodio: fatemi sapere se vi piacciono!

*Infine, se l'idea di giocare con la fisica subatomica vi piace, e volete un vero e proprio gioco da tavolo che sia divertente in quanto gioco, al di là di quello che potete imparare, esiste qualcosa che potrebbe fare al caso vostro. Qualche anno fa i creatori di Genius Games hanno inventato e realizzato Subatomic, un gioco da tavolo basato su fisica nucleare e chimica, decisamente più raffinato delle versioni stampabili di cui vi parlavo prima. Non ho mai giocato a Subatomic, e non posso dunque darvi il mio giudizio personale, ma tutte le recensioni che ho letto sono molto positive. Come tutti i giochi in scatola professionali, Subatomic costa circa 40 dollari.*