

# Scale di valori

## Costanti di natura ed estremi di principio

di Vincenzo Barone

*Citius, altius, fortius*: “Più veloce, più in alto, più forte”. Il motto dei giochi olimpici potrebbe essere anche quello della fisica. Nella ricerca sui costituenti elementari del mondo, infatti, è naturale cercare di spingersi al di là di ogni limite: costruendo, per esempio, acceleratori sempre più potenti, in grado di raggiungere energie sempre più elevate e di esplorare regioni di spazio sempre più piccole.

Come lo sport, anche la fisica delle particelle elementari ha il suo libro dei primati. Ma, a differenza dello sport, in fisica ci sono dei record che, per

principio, non potranno mai essere battuti. Uno di questi riguarda la velocità dei corpi. In Lhc i protoni viaggiano a una velocità altissima, inferiore a quella della luce nel vuoto (circa 300.000 chilometri al secondo) per appena 3 metri al secondo. Questa minuscola barriera non potrà mai essere del tutto infranta. La ragione di tale impossibilità sta nella teoria della relatività ristretta di Einstein, secondo la quale nessun oggetto di massa diversa da zero può raggiungere la velocità della luce nel vuoto (tradizionalmente indicata con  $c$ ), che è una costante fondamentale della natura.

La relatività ristretta, d'altra parte, non limita l'energia delle particelle. Questa può crescere indefinitamente, ma a ciò non corrisponde un aumento proporzionale della velocità. Se fra qualche decennio verrà realizzato il Very High Energy Lhc (Vhe-Lhc), un acceleratore capace di fornire ai protoni un'energia dieci volte superiore a quella di Lhc, la velocità di queste particelle crescerà di meno dello 0,000001% rispetto a quella attuale. Gli unici vincoli sull'energia sono quelli contingenti, dovuti alle dimensioni degli acceleratori e alla tecnologia su cui sono basati.

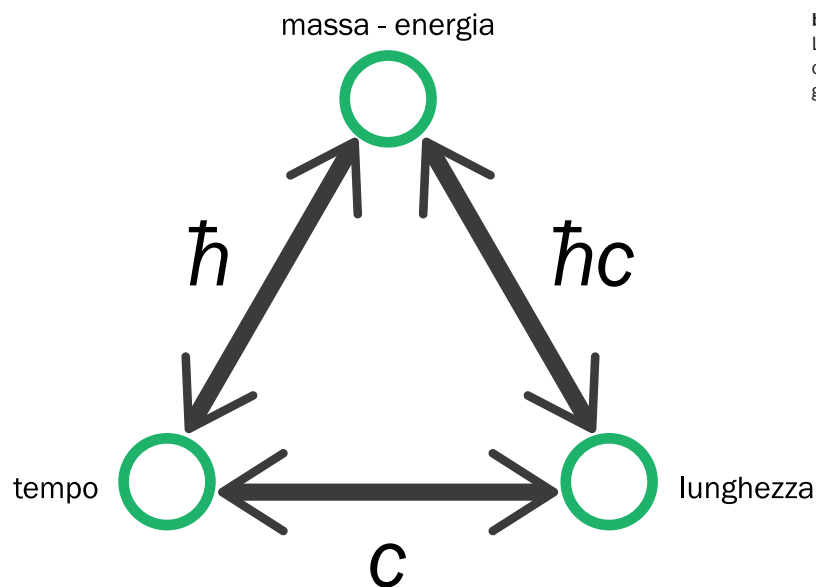


a.  
Usain Bolt detiene l'attuale record umano di velocità, circa 37,6 km/h. Il record naturale di velocità è invece fissato dalla relatività ristretta a 299.792,458 km/s ed è detenuto dalla luce e da tutte le particelle di massa nulla. Nessuna particella di massa diversa da zero può raggiungere questo limite.

Se la relatività pone un limite superiore al moto lineare, la meccanica quantistica pone un limite inferiore al moto oscillatorio. Essa prevede che il più piccolo quanto di oscillazione sia dato da un'altra costante fondamentale, la *costante di Planck*  $\hbar$  (si legge "acca tagliato"). Siamo abituati a pensare che il movimento più lento sia la quiete, che ovviamente non ha niente di speciale e non costituisce certo un primato. Ma la fisica quantistica contraddice questa idea del senso comune. A causa del principio di indeterminazione di Heisenberg, infatti, una particella non può stare ferma in un punto definito. Un oscillatore, per esempio, non è mai a riposo nella sua posizione di equilibrio e ha un'energia minima proporzionale a  $\hbar$ . Soffermiamoci ora su  $c$  e  $\hbar$ . La prima di queste due costanti,  $c$ , converte il tempo in spazio. Ecco perché le distanze celesti sono misurate in anni luce: quando diciamo, ad esempio, che la stella Proxima Centauri si trova a quattro anni luce dalla Terra, intendiamo dire che la sua distanza da noi è pari allo spazio percorso dalla luce in un tempo di quattro anni. La costante  $c$  converte anche l'energia in massa, secondo la famosa relazione di Einstein  $E = mc^2$ . Questo è il motivo per cui, se si vogliono produrre particelle molto pesanti (come il quark

top o il bosone di Higgs), bisogna studiare collisioni che avvengono ad alte energie. La costante di Planck  $\hbar$ , invece, converte il tempo, o meglio le frequenze, in energia. Se moltiplichiamo fra loro le due costanti, otteniamo una quantità,  $\hbar c$ , tipica delle teorie che sono sia quantistiche sia relativistiche. Teorie di questo tipo sono quelle che descrivono le interazioni nel mondo delle particelle elementari. La quantità  $\hbar c$  converte l'energia in lunghezza. Raggiungere energie elevate significa esplorare regioni di spazio molto piccole: una particella si comporta, infatti, come una sonda, il cui potere di risoluzione è tanto più grande quanto più alta è la sua energia. Per esempio, un elettrone o un fotone di 100 GeV permettono di sondare una regione di spazio dell'ordine dei  $10^{-17}$  metri. Gli acceleratori di particelle sono dunque anche potentissimi microscopi! Oltre a quelle che abbiamo menzionato, c'è in fisica una terza costante universale, la *costante di Newton*  $G$ , che compare nella legge di gravità. Avere a disposizione tre costanti ha un'importante conseguenza, legata al fatto che anche le grandezze fisiche fondamentali (massa-energia, lunghezza, tempo) sono tre. Se  $\hbar$  e  $c$  permettono di convertire ognuna di queste grandezze in un'altra, mettendo assieme tutte e tre le

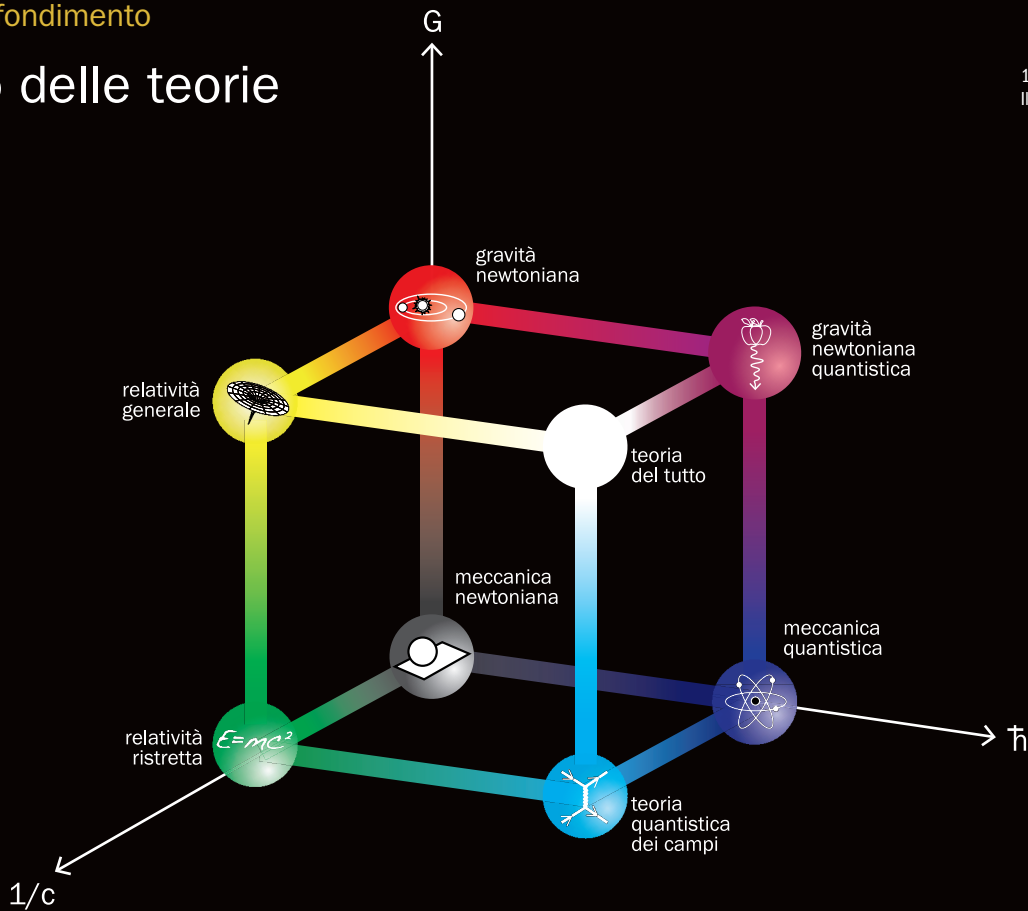
costanti otteniamo altrettante scale naturali del mondo. Combinando opportunamente  $\hbar$ ,  $c$  e  $G$  possiamo, per esempio, costruire una lunghezza, detta *lunghezza di Planck*, che vale  $10^{-35}$  metri. È questa la distanza spaziale alla quale la forza di gravità – che nel mondo ordinario è debolissima – diventa intensa quanto le altre tre forze fondamentali della natura (la forza elettromagnetica, la forza forte e la forza debole). Per avere un'idea della piccolezza di questa distanza, si pensi che se dilatassimo lo spazio in modo tale da far diventare gli atomi grandi quanto una galassia, la lunghezza di Planck corrisponderebbe più o meno al diametro di una capocchia di spillo. Per esplorare una regione di spazio delle dimensioni di  $10^{-35}$  metri è necessario raggiungere energie dell'ordine di  $10^{19}$  GeV, l'*energia di Planck*, un milione di miliardi di volte superiore alle energie degli attuali acceleratori (e presumibilmente ben al di là delle possibilità di quelli futuri). Ma una condizione così estrema si è verificata almeno una volta in natura: circa 14 miliardi di anni fa, all'inizio della storia dell'universo, ad appena  $10^{-43}$  secondi (*tempo di Planck*) dal Big Bang. A quell'epoca, l'universo era straordinariamente denso e aveva una temperatura di  $10^{23}$  gradi,



b.  
Le costanti fondamentali  $\hbar$  e  $c$  come fattori di conversione tra le grandezze fisiche fondamentali.

# Il cubo delle teorie

1.  
Il cubo delle teorie.



È possibile rappresentare l'insieme delle teorie della fisica fondamentale per mezzo di un artificio grafico, il cosiddetto *cubo delle teorie*, inventato da alcuni fisici russi nella prima metà del Novecento. L'idea è di riportare su tre assi perpendicolari le costanti universali  $\hbar$ ,  $c$  e  $G$  (ma per motivi che capiremo subito, si preferisce usare, invece della velocità della luce  $c$ , l'inverso  $1/c$ ). L'origine, lo "zero", di questa terna di assi corrisponde a valori nulli di  $\hbar$ ,  $1/c$  e  $G$ . Quando  $\hbar$ ,  $1/c$  e  $G$  valgono zero, si ha una teoria che non è quantistica, non è relativistica (perché  $1/c$  uguale a zero significa che la velocità della luce tende a infinito - il

limite della fisica classica) e non descrive fenomeni gravitazionali: si tratta semplicemente della meccanica newtoniana. I valori non nulli di almeno una delle tre costanti individuano i vertici di un cubo. Ognuno di questi vertici rappresenta una teoria fisica: per esempio, il vertice corrispondente a  $1/c$  e  $G$  uguali a zero e  $\hbar$  diverso da zero rappresenta la meccanica quantistica non relativistica. Il vertice che per il momento rimane misterioso è quello corrispondente a valori diversi da zero di tutte e tre le costanti: è collocata lì la *teoria del tutto*, la teoria quantistica e relativistica di tutte le forze della natura, compresa la gravità.

corrispondente a un'energia media dei suoi costituenti pari all'energia di Planck. La comprensione dell'universo primordiale al tempo di Planck o, equivalentemente, dell'universo attuale alla lunghezza di Planck, richiederebbe una teoria quantistica unificata delle quattro forze, che ancora non possediamo. Le scale naturali di Planck rappresentano dunque una frontiera di

cui si conosce a priori l'esistenza, ma che, per il momento, non siamo in grado di descrivere con le teorie a nostra disposizione. Uno dei tentativi più promettenti in questa direzione è basato sull'idea che gli enti fisici elementari non siano corpuscoli puntiformi, ma oggetti estesi di dimensioni proprio dell'ordine della lunghezza di Planck, o di poco superiori. Questi oggetti sarebbero

piccolissime corde vibranti, le *stringhe*, le cui oscillazioni quantizzate darebbero origine alle particelle conosciute. Se così fosse - ma manca tuttora una teoria completa e coerente delle stringhe - non avrebbe senso spingersi a scale spaziali inferiori alla lunghezza delle stringhe e la scala di Planck sarebbe non solo un confine teorico, ma un limite reale del mondo.

## Biografia

**Vincenzo Barone** insegna fisica teorica all'Università del Piemonte Orientale. La sua ricerca verte principalmente sulla fenomenologia delle interazioni forti. In ambito divulgativo, il suo ultimo lavoro è "L'ordine del mondo. Le simmetrie in fisica da Aristotele a Higgs" (Bollati Boringhieri, 2013).

## Link sul web

- [www.arxiv.org/pdf/physics/0110060.pdf](http://www.arxiv.org/pdf/physics/0110060.pdf)
- [www.mat.unimi.it/lezioniEnriques/2008/Enriques\\_Veneziano.pdf](http://www.mat.unimi.it/lezioniEnriques/2008/Enriques_Veneziano.pdf)
- [www.cjwainwright.co.uk/maths/physicscube/](http://www.cjwainwright.co.uk/maths/physicscube/)