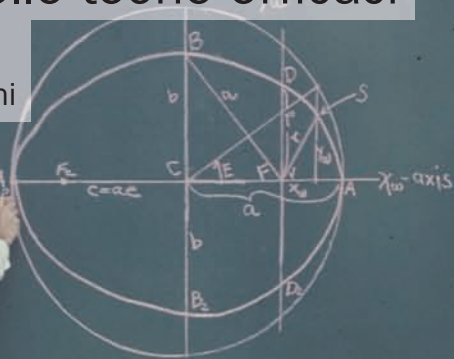


Su e giù per le scale

Il ruolo delle teorie efficaci

di Marco Ciuchini



$$\dot{M} = \sqrt{\mu} / a^{3/2} = h/k$$

$$\dot{E} = \sqrt{\mu} / r \sqrt{a}$$

$$r^2 \dot{V} = X_{\omega} \dot{Y}_{\omega} - X_{\omega} \dot{X}_{\omega} = \sqrt{\mu} p$$

$$\dot{r} r = X_{\omega} \dot{X}_{\omega} + X_{\omega} \dot{Y}_{\omega} = e Y_{\omega} \sqrt{\mu/p} = \sqrt{\mu} a \sin E$$

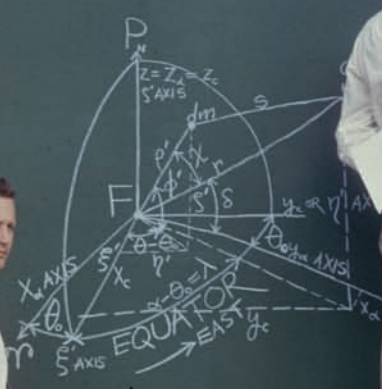
$$r \dot{X}_{\omega} = -Y_{\omega} \sqrt{\mu/p} = -\sqrt{\mu} a \cos E$$

$$r \dot{Y}_{\omega} = (X_{\omega} + e r) \sqrt{\mu/p}$$

$$Y_{\omega} = (\cos v + e) \sqrt{\mu/p}$$

$$r \dot{s} = \sqrt{\mu a (1 - e^2 \cos^2 E)}$$

$$\dot{s}^2 = \dot{X}_{\omega}^2 + \dot{Y}_{\omega}^2 = \dot{r}^2 + r^2 \dot{V}^2 = \mu (1 + 2e \cos v + e^2) / p$$



$$\dot{X}_f = \dot{X}_c - \omega Y_c$$

$$\dot{Y}_f = \dot{Y}_c + \omega X_c$$

$$\ddot{X}_f = \ddot{X}_c - 2\omega \dot{Y}_c - \omega^2 X_c$$

$$\ddot{Y}_f = \ddot{Y}_c + 2\omega \dot{X}_c - \omega^2 Y_c$$

$$s^2 = p^2 + r^2 - 2 p r \cos \chi$$

$$\Psi = \Phi + \frac{1}{2} \omega^2 (X_c^2 + Y_c^2) + 2\omega (X_c \dot{Y}_c - Y_c \dot{X}_c)$$

$$\omega = \dot{\theta}_0$$

$$X_x = X_f \cos \theta_0 - Y_f \sin \theta_0$$

$$Y_x = X_f \sin \theta_0 + Y_f \cos \theta_0$$

$$X_f = X_x \cos \theta_0 + Y_x \sin \theta_0$$

$$Y_f = -X_x \sin \theta_0 + Y_x \cos \theta_0$$

$$q = a(1 - e)$$

$$FA = F_2 A_2$$

$$p = a(1 - e^2)$$

$$b = a(1 - e^2)^{1/2}$$

$$c = ae = CF = CE$$

$$\mu = m_1 + m_2$$

$$n = \frac{2\pi}{P} = k \sqrt{\mu} a^{-3/2}$$

$$M = n(t - T) - M_0 + n(t - t_0)$$

$$M = E - e \sin E$$

$$r = \frac{p}{1 + e \cos v} = a(1 - e \cos^2 v)$$

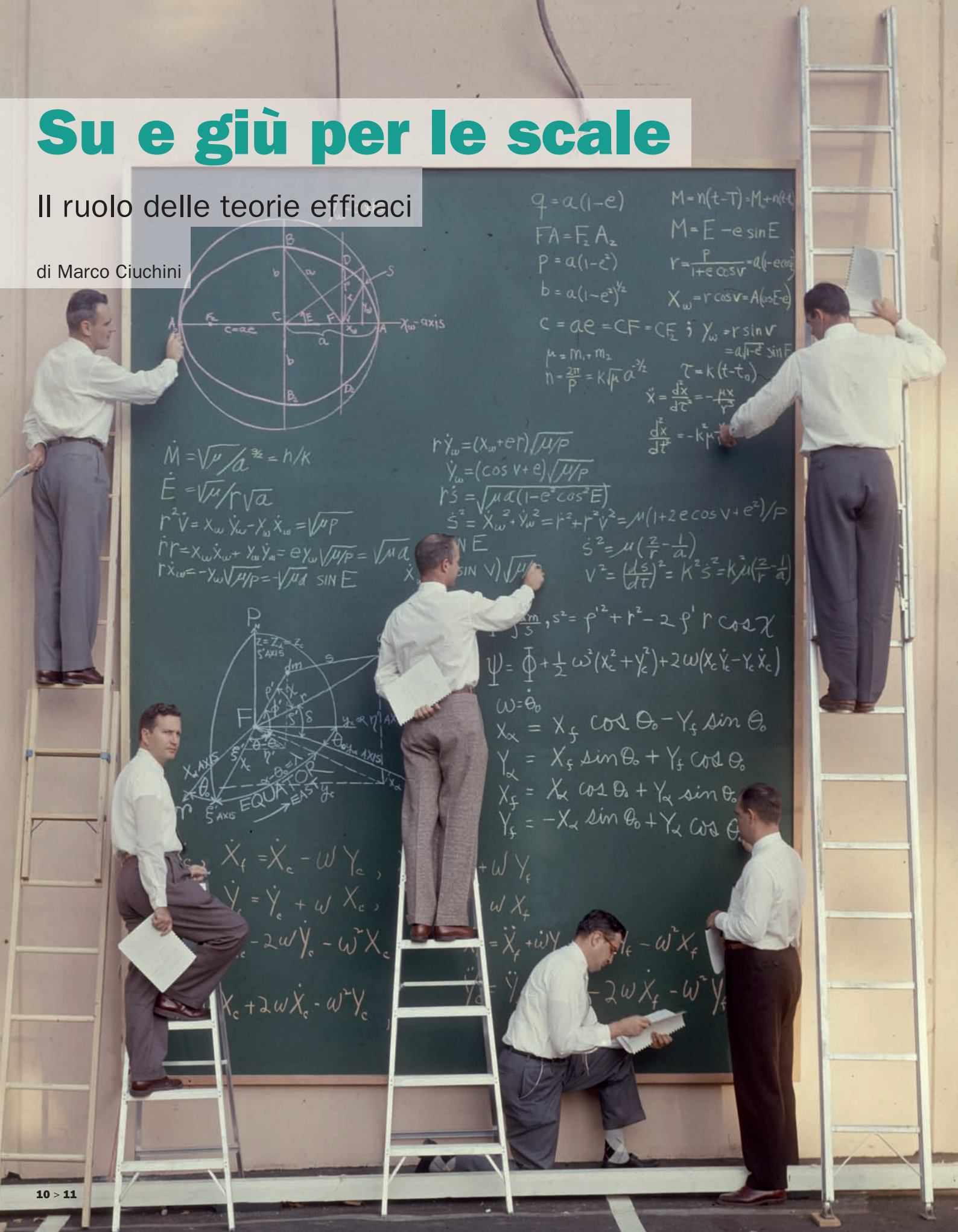
$$X_{\omega} = r \cos v = A(\cos E - e)$$

$$Y_{\omega} = r \sin v = a \sqrt{1 - e^2} \sin E$$

$$\tau = k(t - t_0)$$

$$\ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{\mu x}{r^3}$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -k \mu \frac{x}{r^3}$$

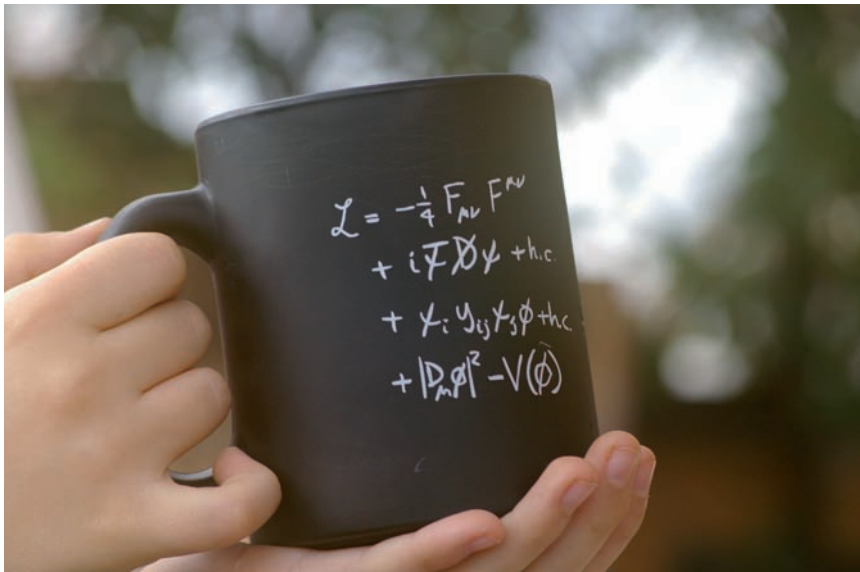


La fisica è caratterizzata dalla presenza di *scale*: scale di distanza, energia, tempo, velocità o qualunque altra grandezza fisica, scale fondamentali o relative a un problema specifico. Fenomeni fisici interessanti avvengono a scale molto diverse: gli ammassi di galassie si scontrano su distanze tipiche di 10^{22} metri, mentre l'urto di due quark in Lhc avviene in una regione di 10^{-19} metri. Se un fenomeno fisico dipendesse allo stesso modo da quello che avviene a tutte le scale, la sua descrizione sarebbe veramente molto problematica. Vale fortunatamente (con qualche notevole eccezione) la separazione delle scale: in generale, i fenomeni fisici che avvengono a una certa scala non sono influenzati dai dettagli della fisica associata a scale molto diverse e in molti casi le quantità fisiche rilevanti cambiano passando da una scala all'altra. Per questo, in presenza di più scale, è conveniente utilizzare una teoria non esatta, che però coglie la fisica rilevante a una data scala e la descrive nella maniera più appropriata. È quella che i fisici chiamano una *teoria efficace*, in contrapposizione alla *teoria fondamentale*, idealmente valida a tutte le scale.

Supponiamo, ad esempio, di voler calcolare la traiettoria di una palla su un tavolo da biliardo. Crediamo di avere a disposizione una teoria fondamentale, la meccanica relativistica basata sulla teoria della relatività ristretta di Einstein. Potremmo certamente usarla, ma di solito non lo facciamo: perché? Perché nel problema ci sono due scale molto diverse: la velocità tipica della palla, diciamo di circa 1 m/s, e la velocità della luce $c = 3 \times 10^9$ m/s, che è una costante fondamentale della teoria. È più conveniente introdurre una teoria approssimata, costruita considerando la velocità della palla come una perturbazione del caso limite che si ottiene considerando infinita la velocità della luce. La teoria efficace che si costruisce prendendo la prima correzione al caso limite non è altro che la meccanica newtoniana (classica), proprio quella che si studia a scuola, dal momento che, pur essendo approssimata, è la più appropriata e conveniente per descrivere oggetti in moto con velocità molto più piccole di quella della luce, ovvero tutti quelli di cui abbiamo esperienza diretta.

Nel contesto della fisica delle particelle elementari (relativistica e quantistica), tutte le scale fisiche sono riconducibili a scale di energia (per questo i fisici delle particelle usano ovunque i multipli dell'elettronvolt). La teoria fondamentale deve dunque descrivere la fisica a tutte le energie includendo tutte le particelle elementari esistenti, comprese quelle che ancora non abbiamo scoperto! Le

teorie efficaci, d'altro canto, come già detto, possono essere convenientemente utilizzate per descrivere processi di bassa energia. Già, ma bassa rispetto a che cosa? Esistono scale di energia associate alle interazioni fondamentali: la *scala delle interazioni forti*, di circa 1 GeV; la *scala di Fermi*, dell'ordine di 100 GeV, associata alla massa dei bosoni W e Z, mediatori delle interazioni deboli; la *scala di Planck*, pari a 10^{19} GeV, associata alla costante di gravitazione universale. Ogni volta che trattiamo processi con energie tipiche molto più piccole di una di queste scale fondamentali (ma ne esistono anche altre, ad esempio quelle delle masse dei fermioni pesanti), possiamo definire una teoria efficace ottenuta, analogamente all'esempio della meccanica classica e relativistica, come perturbazione al caso limite in cui consideriamo infinita l'energia della scala alta della teoria. Questa teoria conterrà solo le particelle rilevanti alla scala dei processi considerati, mentre in generale le particelle più pesanti si *disaccoppiano*. Inoltre, se conosciamo anche la teoria alla scala alta, siamo in grado di calcolare le correzioni al caso limite con precisione arbitrariamente alta. Ma anche se la teoria alla scala alta non è nota, la teoria efficace può essere molto utile: ci consente infatti di parametrizzare la nostra ignoranza in termini di un numero finito di costanti e in modo tale da rispettare le proprietà note della fisica alla scala bassa. La teoria di riferimento per la fisica delle particelle, il modello standard, ad oggi è in accordo con tutti i fenomeni osservati. È una teoria fondamentale oppure è la prima approssimazione di una teoria efficace, valida alle energie raggiunte dai nostri acceleratori, diciamo alla scala di Fermi (anche se Lhc ha iniziato a esplorare la scala del TeV, 10 volte più grande)? Il modello standard non contiene la gravità (perché finora non siamo stati capaci di includerla!), quindi qualcosa deve certamente cambiare alla scala di Planck, dove l'interazione gravitazionale non è più trascurabile. È quindi naturale pensare al modello standard come a una teoria efficace che si ottiene considerando infinita la massa di Planck. Tuttavia ci sono diverse ragioni teoriche e osservative (una per tutte, la materia oscura) per ritenere che possa esistere una scala di energia intermedia tra la scala di Fermi e la scala di Planck, associata alla massa di nuove particelle pesanti. Questa scala, chiamata *scala della nuova fisica*, e queste particelle non incluse nel modello standard sono la nuova fisica che stiamo cercando.



a.
Sulla tazza è raffigurata l'equazione che descrive il modello standard.

Il problema della scala di nuova fisica è che pensiamo esista, ma non sappiamo dire con certezza quanto valga: se dovesse essere più piccola dell'energia raggiungibile in Lhc, le nuove particelle saranno osservate presto e potremo verificare se e con quale delle estensioni del modello standard che sono state pensate negli ultimi quarant'anni (anche qui, una per tutte, la supersimmetria) risulteranno compatibili.

Trovata la teoria della nuova fisica, il modello standard continuerà a valere come teoria efficace per i processi alla scala di Fermi e in più saremo in grado di calcolare le correzioni dovute alle nuove particelle. Se invece non dovessimo riuscire a produrre nuove particelle, aspettando di avere un acceleratore con energia maggiore (vd. p. 19, ndr), possiamo cercare di vedere se ci sono deviazioni dalle previsioni del modello standard indotte da nuove particelle pesanti. Infatti, il principio di indeterminazione di Heisenberg ci dice che le particelle danno un contributo, chiamato *virtuale*, ai processi fisici a una certa energia, anche se sono troppo pesanti per essere prodotte. In questo gioco, la teoria efficace può essere utilizzata in due modi: con un approccio dalla scala alta verso la scala bassa, nel

quale si tenta di "indovinare" la teoria alla scala di nuova fisica, basandosi tipicamente su nuove simmetrie, e con questa si calcolano le correzioni alla teoria efficace "modello standard", oppure nella direzione opposta, dal basso verso l'alto, usando i dati sperimentali per cercare di identificare le possibili correzioni al modello standard nella speranza che questa informazione ci conduca alla nuova teoria.

Qual è il metodo più utile? Il modello standard è stato costruito negli anni '60 usando entrambi gli approcci: si basa su una simmetria, che però è stata identificata grazie a una teoria efficace, chiamata *teoria V-A*, che si usava negli anni precedenti per descrivere le interazioni deboli. Viceversa, il meccanismo di Higgs per la rottura spontanea della simmetria, che pure è un ingrediente indispensabile per costruire un modello realistico, è stato introdotto senza un vero stimolo osservativo, per analogia con problemi di fisica della materia condensata e solo oggi, dopo la scoperta del bosone di Higgs, iniziamo a utilizzare teorie efficaci per descrivere i suoi accoppiamenti. L'esperienza dunque ci dice che la ricerca della nuova fisica va condotta con tutti i metodi a nostra disposizione!

Biografia

Marco Ciuchini è un fisico teorico, dirigente di ricerca e direttore della sezione di Roma Tre dell'Infn. Si occupa di fenomenologia delle particelle elementari e ha lavorato prevalentemente su argomenti di fisica del sapore dei quark.

Link sul web

http://en.wikipedia.org/wiki/Effective_field_theory

<http://www.preposterousuniverse.com/blog/2013/06/20/how-quantum-field-theory-becomes-effective/>

<http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-851-effective-field-theory-spring-2013/>