

La Natura è naturale?

Paolo Ciafaloni

INFN sez. di Lecce e

Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi" Università del Salento

Il metodo scientifico discrimina le idee buone da quelle sbagliate, ma non dà alcuna ricetta per stabilire quali siano le idee da vagliare; d'altra parte non è ovviamente possibile sottoporre a verifica sperimentale tutte le idee. In questo articolo descrivo come il concetto di simmetria sia stato il *leitmotiv* che ha guidato la ricerca di una teoria fondamentale nella fisica delle particelle del XX secolo. Inoltre discuto di un criterio molto in voga negli ultimi anni, quello della naturalezza, utile per selezionare le teorie che appaiono più promettenti. Tale criterio fino ad oggi non ha prodotto però risultati utili.

Prologo

La fisica delle alte energie, che si propone l'ambizioso obiettivo di studiare i componenti fondamentali della materia e le interazioni fra questi componenti, vive da qualche anno un momento storico piuttosto critico. Da un lato infatti il quadro teorico (vedi riquadro) è ben consolidato e descrive bene i dati sperimentali. Tale quadro comprende il cosiddetto Modello Standard, che descrive le interazioni elettromagnetiche, deboli e forti col formalismo della Teoria quantistica dei campi, e la teoria della Relatività Generale che descrive le interazioni di gravità. È corretto affermare che *tutte le osservazioni fatte in natura e tutti gli esperimenti di laboratorio effettuati fino ad oggi sono riconducibili al quadro teorico appena descritto*.

La parola "teoria" in fisica

In fisica la parola "teoria" ha un significato un po' diverso da quello che si adotta nel linguaggio comune, ad esempio quando si dice "ha ragione in teoria, ma in pratica no" oppure "è solo una teoria", intendendo una supposizione poco suffragata dai fatti. In fisica una teoria è un insieme di enunciati, solitamente formulati nel linguaggio della matematica, che ambiscono a descrivere una collezione quanto più ampia di fenomeni naturali, sotto forma di osservazioni e/o esperimenti di laboratorio. È tipico di una teoria formulare *predizioni* (vedi riquadro più avanti). Nel confronto fra predizioni teoriche e dati sperimentali....

*to**. D'altra parte però il Quadro Teorico risulta incompleto, e ci sono fondati motivi di ritenere che il Modello Standard sia in realtà un'approssimazione di una teoria più generale, che d'ora in poi chiamerò Teoria Fondamentale, capace di descrivere non solo i fenomeni ad oggi osservati, ma di predire (vedi riquadro) nuovi fenomeni, oltre a spiegare i misteri insoluti di materia oscura ed energia oscura[†]. In questo articolo ipotizzo dunque che una teoria fondamentale esista. Ci possiamo porre la domanda: in mancanza di chiare indicazioni dagli esperimenti di laborato-

*Fa eccezione il "caso Materia Oscura", che riguarda osservazioni di tipo astrofisico, vedi articolo di Marco Cirelli su questo stesso numero di Ithaca.

[†]Vedi il mio articolo "La più grande cantonata di Einstein" sul numero X di Ithaca.

rio, com'è attualmente il caso, come ci possiamo orientare per elaborare teorie promettenti da sottomettere al vaglio sperimentale? Come vedremo, nella fisica del XX secolo si sono fatti strada due criteri: le simmetrie e la naturalezza. Ma solo il primo ad oggi è stato fertile e ha prodotto nuove teorie.

Le simmetrie nella fisica del ventesimo secolo

Quando Albert Einstein nel 1905 elabora la teoria della relatività ristretta, pone al centro il seguente postulato:

"Le leggi della fisica sono le stesse per due osservatori che si muovono con velocità relativa costante"

Tale postulato, aggiungendo il fatto osservazionale che la velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento, definisce in sostanza la teoria della relatività speciale in maniera univoca.

Il postulato della relatività speciale non è una novità in se, tanto che, seppure in forma diversa, era stato osservato da Galileo nel suo "Dialogo sopra i due massimi sistemi" del 1632. La novità qui è *metodologica*: il postulato viene assunto a priori e posto come pilastro fondante della teoria. In altre parole la teoria viene costruita non tanto e non solo in base a fatti osservazionali (che pure sono importanti, quali la menzionata costanza della velocità della luce), ma in base a quella che modernamente viene chiamata una simmetria. Simmetria fa rima con invarianza: ad esempio una circonferenza disegnata su un foglio conserva la stessa forma se si ruota il foglio intorno al centro della circonferenza. In fisica le simmetrie sono un po' più astratte: riguardano l'invarianza in forma delle equazioni che descrivono le leggi fisiche quando si agisce una data trasformazione. Modernamente il postulato della relatività speciale viene chiamato "simmetria spazio-temporale" in quanto entrano in gioco le trasformazioni di coordinate spaziotemporali che connettono il sistema di riferimento dei due laboratori in velocità relativa costante, e che sono dette trasformazioni di Lorentz.

L'approccio metodologico di Einstein ha avuto un grande impatto sulla fisica del ventesimo

Predizioni in fisica

Le predizioni in fisica non riguardano necessariamente il futuro. Piuttosto, esse forniscono un protocollo per esprimere relazioni matematiche fra quantità misurabili. Ad esempio, vicino al suolo terrestre, una predizione potrebbe essere 'Se faccio cadere un corpo esso accelera, in assenza di attriti, con accelerazione pari a 9.8 metri al secondo per secondo.' Con l'avvento della Meccanica Quantistica le predizioni sono diventate probabilistiche: vengono fornite le probabilità per i possibili eventi di un dato esperimento.

secolo, e in particolare sullo studio delle interazioni fondamentali fra particelle elementari. Alle simmetrie spaziotemporali si sono affiancate simmetrie di tipo diverso, con trasformazioni che agiscono sulle proprietà intrinseche delle particelle elementari quali ad esempio la carica elettrica; anche in questo caso per simmetria si intende "invarianza delle equazioni sotto un certo gruppo di trasformazioni". Alcune di queste simmetrie, come ad esempio le "simmetrie di gauge non abeliane" (cita Yang Mills) vennero inizialmente considerate come curiosità matematiche, salvo poi essere inglobate con successo nel Modello Standard. Altri concetti, come quello di simmetria "nascosta", cioè simmetria delle interazioni che non viene però rispettata dagli stati fisici, hanno prodotto l'idea del meccanismo di Higgs, scoperto al CERN nel 2012 e per il quale è stato assegnato un **premio Nobel**. Il Modello Standard stesso è sostanzialmente determinato una volta che si elenchino le sue simmetrie e le proprietà delle particelle su cui le simmetrie agiscono, aggiungendo il requisito di coerenza matematica.

Si può concludere quindi che il cammino del concetto di 'simmetria' come linea guida per formulare nuove teorie fisiche sia stato di enorme successo nel corso del XX secolo.

Naturalezza

A partire dagli anni '60, e cioè in coincidenza con la nascita del Modello Standard, è emerso

un criterio differente dalle simmetrie, anche se non totalmente indipendente, come vedremo: la naturalezza. Per capire cosa significhi questa parola (naturalness in inglese) nel contesto della fisica delle interazioni fondamentali, consideriamo ad esempio l'elettrone e il suo corrispettivo nel mondo dell'antimateria, il positrone. Da un punto di vista sperimentale, elettrone e positrone hanno la stessa massa, a meno dell'incertezza di misura (vedi [Review of Particle Physics](#)):

$$\frac{|m - \bar{m}|}{m} < 8 \times 10^{-9} \quad (1)$$

Le masse di elettrone (m) e positrone (\bar{m}) sono quindi identiche a meno di qualche parte su un miliardo. Ora, se tali masse fossero, nella teoria che li descrive, due parametri fisici totalmente indipendenti, allora dovremmo considerare come una straordinaria coincidenza il fatto che siano così incredibilmente vicini. O, detto con parole diverse, dovremmo considerare tale situazione come "non naturale". Sarebbe da considerarsi invece come "naturale" una situazione in cui, essendo le masse di positrone ed elettrone due numeri dimensionati dello stesso ordine, la differenza relativa fra le masse fosse un numero di ordine 1.

Nel caso ora in esame, c'è una motivazione profonda per la "coincidenza" cui abbiamo accennato. In effetti l'uguaglianza delle masse di ognuna delle particelle di materia con la propria corrispettiva di antimateria è conseguenza di una simmetria detta CPT, che allo stato attuale delle conoscenze è una simmetria esatta della Natura. La simmetria CPT trasforma una data particella nella sua antiparticella, e di conseguenza connette le proprietà di materia e antimateria. Ne segue che le masse di particella e antiparticella sono uguali, mentre le cariche elettriche sono opposte. Possiamo concludere che l'uguaglianza della massa di elettrone e positrone non è né una "coincidenza" né un fatto "non naturale": è invece conseguenza di una simmetria osservata in Natura; si dice in tal caso che "la differenza fra le masse di particella e antiparticella è protetta dalla simmetria CPT". Esiste un'altra coincidenza numerica, questa volta priva di spiegazione nell'ambito del Modello Standard:

$$\frac{|q_p + q_e|}{|q_e|} < 10^{-21} \quad (2)$$

cioè i moduli delle cariche di elettrone (q_e) e protone (q_p) coincidono esattamente. Questa osservazione sperimentale, denominata "quantizzazione della carica", è uno dei motivi che puntano all'esistenza di una Teoria Fondamentale, all'interno della quale esista una simmetria che spieghi tale coincidenza. Ad esempio, nell'ambito delle teorie di grande unificazione, che riuniscono la descrizione delle tre interazioni fondamentali in un'unica interazione, la quantizzazione della carica trova una naturale spiegazione. Va però detto che, in questo come in altri casi di teorie che estendono la validità del Modello Standard e che sembrano promettenti, ad oggi non abbiamo nessun segnale sperimentale che confermi l'ipotesi di grande unificazione.

Come possiamo quantificare il grado di "naturalezza"? Consideriamo di nuovo la quantità definita in (1):

$$r(\bar{m}) \equiv \frac{|m - \bar{m}|}{m} \quad (3)$$

Considero qui r come funzione di \bar{m} in quanto suppongo di conoscere m ma di non aver nessuna informazione su \bar{m} . Una possibilità per definire il grado di fine tuning è quella di quantificare la sensibilità di r al valore di \bar{m} , cioè la variazione percentuale di r che corrisponde a una data variazione percentuale di \bar{m} :

$$FT \equiv \left| \frac{\bar{m}}{r(\bar{m})} \frac{\partial r(\bar{m})}{\partial \bar{m}} \right| = \frac{\bar{m}}{m - \bar{m}} \approx \frac{1}{r} \quad (4)$$

Ad esempio, richiedere $FT < 10$, che corrisponde a $r > 0.1$, ammonta a tollerare cancellazioni fra i valori di \bar{m} e m al più di un ordine di grandezza. Ovviamente il valore di FT "tollerabile" è del tutto soggettivo.

Fine tuning e bosone di Higgs

Nel Modello Standard esiste una scala fondamentale data dalla massa del bosone di Higgs, che dà massa a tutte le altre particelle elementari; tale scala è dell'ordine di 100 GeV (circa 100 volte la massa del protone). Nella teoria fondamentale dovrebbero comparire parametri fisici aggiuntivi

quali le masse di particelle non ancora scoperte perchè inaccessibili agli attuali acceleratori. Una teoria fondamentale dovrebbe aver un maggior potere esplicativo del Modello Standard, e in particolare ci si può aspettare che la massa del bosone di Higgs non sia un parametro libero, bensì derivato dai parametri di detta teoria.

Supponiamo quindi, ad esempio, che tale massa M_h sia combinazione di due parametri, M_1 e M_2 :

$$M_H^2 = M_1^2 - M_2^2 \quad (5)$$

Se le masse M_1 e M_2 sono molto più grandi di M_H , il valore di M_1 deve essere aggiustato per cancellare quasi esattamente quello di M_2 per produrre il valore molto più piccolo M_H . Ad esempio se M_1 vale circa 10^4 GeV, M_2 deve essere identico a M_1 a meno di una piccola differenza di circa 0.5 GeV, cioè i due parametri devono essere uguali a meno di una differenza relativa dello 0.005%! Questa situazione è detta di *fine tuning*, ovvero di 'aggiustamento fine': i parametri della teoria fondamentale devono essere finemente aggiustati per ottenere quelli del MS, e la teoria è detta 'non naturale'. Ovviamente, il confine tra teoria naturale e non naturale è del tutto arbitrario. In passato sono stati formulati criteri quantitativi per determinare il grado di *fine tuning* di una teoria. Ad esempio, ispirandoci a quanto visto per la massa del positrone, possiamo definire il parametro FT :

$$FT \equiv \max \left| \frac{a_i}{M_H^2} \frac{\partial M_H^2}{\partial a_i} \right| \quad (6)$$

dove gli a_i sono i vari parametri della teoria fondamentale. Una teoria con $FT < 10$ necessita di un'aggiustamento dei parametri di non più del 10%, una con $FT < 100$ dell' 1% e così via. Nel caso dell'equazione (5) ad esempio, la richiesta di un fine tuning minore di 100 comporta che le scale M_1 e M_2 debbano essere minori di circa 1 TeV. Questo ragionamento è, in sostanza, quello che ha portato i fisici nel settore delle teorie fondamentali a ritenere che la scala di nuova fisica dovesse essere accessibile al Large Hadron Collider (LHC), che opera al CERN ed esplora appunto la scala di energia del TeV. Tale speranza però ad oggi è rimasta delusa, in quanto a LHC si è scoperto il bosone di Higgs ma nessun tipo di nuove particelle corrispondenti alle masse

M_1, M_2 menzionate.

Naturalità e correzioni quantistiche

Anche una volta che la relazione fra i parametri della teoria fondamentale e quelli del MS, esemplificata dalla (5), possa essere considerata 'naturale', problemi possono sorgere a causa delle correzioni quantistiche a tale relazione. Per comprendere questo punto possiamo considerare il caso dell'elettrone. L'energia del campo elettromagnetico generato dalla carica dell'elettrone contribuisce alla sua massa secondo la celebrata formula $m = E/c^2$. Un calcolo di tale contributo fornisce il valore $m_e \approx \frac{e^2}{4\pi a}$ dove a è il raggio dell'elettrone, e la sua carica e m_e la sua massa. Tuttavia inserendo i valori misurati di carica e massa otteniamo $a \approx 10^{-12}$ cm, che è un valore impossibilmente grande, 2 ordini di grandezza più grande del raggio nucleare e 5 ordini di grandezza più grande del limite dato dagli odierni esperimenti $a < 10^{-17}$ cm! In realtà però non abbiamo tenuto conto delle correzioni a questo risultato dato dalla (ignota) fisica a scale molto piccole: la fisica delle distanze x molto piccole $x < a$, regno della meccanica quantistica, produce una correzione al valore della massa dell'elettrone tale che possiamo scrivere:

$$m_e = m_e^0(a) + \frac{e^2}{4\pi a} \quad (7)$$

per cui la massa fisica m_e dell'elettrone è data dal contributo 'classico' dovuto al campo di Coulomb più un contributo 'bare' m_e^0 generato dalla fisica ignota a scale minori di a^\ddagger . Tuttavia a questo punto si pone il problema di 'naturalità': Per produrre il valore misurato di m_e e dato il raggio misurato $a \sim 10^{-17}$ cm, occorre che la dipendenza di m_e^0 da a sia aggiustata finemente per produrre enormi cancellazioni.

Esiste tuttavia una alternativa al fine tuning menzionato; questa alternativa è stata scelta dalla natura in questo caso. Il punto è che la Meccanica Quantistica Relativistica introduce contributi aggiuntivi rispetto a quello del campo coulomb-

[‡]Per via del principio di indeterminazione di Heisenberg, scale minori di a corrispondono ad energie maggiori di $\Lambda \equiv 1/a$.

biano fin qui discusso. Ad esempio, un fotone può formare una coppia elettrone-positrone che poi si annichila di nuovo in un fotone, alterando il campo elettromagnetico. Il risultato è che la dipendenza del contributo del campo elettromagnetico alla massa dell'elettrone non è più lineare nel cutoff $\Lambda = 1/a$ bensì logaritmica, cosicché possiamo scrivere:

$$m_e = m_e^0 + \delta m_e = m_e^0 \left(1 - \frac{3e^2}{8\pi^2} \log(m_e a) \right) \quad (8)$$

Siccome la dipendenza logaritmica è molto più debole di una dipendenza lineare inversa, l'esigenza di *fine tuning* scompare. Ad esempio, anche prendendo un valore estremamente piccolo $a = 10^{-31}$ cm, la correzione δm_e è solamente il 20% circa di m_e^0 .

Nel limite di massa nulla dell'elettrone, la teoria acquisisce un nuovo tipo di simmetria: la simmetria chirale[§]. È questo il motivo per cui la massa dell'elettrone non ha correzioni proporzionali a $\Lambda = 1/a$: sia il termine 'bare' m_0 che le correzioni quantistiche devono scomparire nel caso di massa 'bare' nulla, perchè in questo limite la massa dell'elettrone è esattamente nulla. È per questo motivo che l'espressione per m_e assume la forma data dalla (8). Si dice in questo caso che la simmetria chirale 'protegge' la massa dell'elettrone da grosse correzioni quantistiche. 't Hooft [1] eleva questa situazione a un *principio di naturalezza*: una quantità in natura dovrebbe essere piccola solo se la teoria acquisisce una simmetria in più quando questa quantità tende a zero.

Nel Modello Standard delle particelle l'unica massa a non essere protetta da una simmetria nel senso appena menzionato è la massa del bosone di Higgs, che riveste particolare importanza in quanto tale bosone è responsabile delle masse di tutte le altre particelle elementari. Non sappiamo quale possa essere la teoria 'fondamentale' sottostante al MS, però conosciamo di sicuro una scala alla quale effetti di nuova fisica devono essere importanti: la scala di Planck. Alla scala di Planck gli effetti quantistici diventano importanti per l'interazione di gravità, ma non sappiamo quale teoria possa descrivere tali effetti: i due pilastri della fisica del ventesimo secolo, cioè la

[§]La simmetria chirale, descritta ad esempio a questo [link](#), distingue fra particelle destrorse e sinistrorse.

teoria della relatività che descrive la gravità e la meccanica quantistica sono in effetti incompatibili, dando predizioni diverse[¶]. La massa di Planck vale circa 10^{19} GeV, per cui nella teoria fondamentale compare un parametro adimensionale estremamente piccolo: $M_H^2/M_P^2 \approx 10^{-34}$. Tale gerarchia di masse, poichè le intensità delle interazioni sono inversamente proporzionali alle masse al quadrato, può essere parafrasata in una analoga gerarchia fra la costante di Newton G_N , che descrive la forza di gravità, e la costante di Fermi G_F , che descrive le interazioni nucleari deboli:

$$\frac{G_F \hbar^2}{G_N c^2} = 1.74 \times 10^{33} \quad (9)$$

Risulta difficile capire in definitiva, come mai l'interazione di gravità sia così incredibilmente debole rispetto alle altre interazioni^{||}. Inoltre, anche una volta che la gerarchia sia stabilita, resta il problema delle correzioni quantistiche. In mancanza di una simmetria che 'protegga' la massa (quadra) dell'Higgs, quest'ultima riceve correzioni quantistiche che divergono quadraticamente con la massa di cutoff, cioè con la massa di nuova fisica che possiamo supporre per il momento essere la massa di Planck. Tale correzioni si possono calcolare con l'ausilio del diagramma di Feynman di figura 1a, e vale:

$$M_H^2 = (M_H^0)^2 + \delta M_H^2; \quad \delta M_H^2 = \frac{3G_F m_t^2}{\sqrt{2}\pi^2} \Lambda^2 \quad (10)$$

Se interpretiamo la scala di cutoff Λ come la scala di Planck, queste correzioni quantistiche danno luogo ad enormi cancellazioni a causa della grande gerarchia fra la scala di Planck stessa e la massa dell'Higgs.

Naturalmente non è detto che non ci siano altre scale intermedie fra la scala di massa dell'Higgs (scala di Fermi) e la scala di Planck. Ad esempio ad una scala di $M_{GUT} \sim 10^{16}$ GeV le tre costanti di accoppiamento nucleare forte, nucleare

[¶]Esistono esempi di soluzione a questa problematica, ad esempio la [teoria di stringa](#). Tale teoria però ad oggi non fornisce nessuna predizione per gli attuali esperimenti.

^{||}L'interazione di gravità ha effetti grandi nel mondo macroscopico perché è additiva: un oggetto grande provoca una forte interazione, risultante dalla gravità di tutte le piccole parti di cui è composto. Per contrasto, nel caso delle interazioni elettromagnetiche cariche positive e negative si annichilano dando effetti residui normalmente molto piccoli.

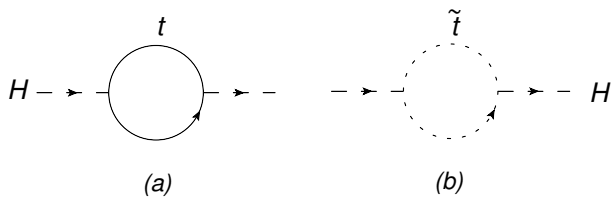


Figura 1:

debole ed elettromagnetica del MS si unificano, cioè assumono lo stesso valore. Questo potrebbe corrispondere ad una teoria fondamentale di Grande Unificazione delle interazioni, con nuova fisica alla scala di M_{GUT} . Tuttavia il problema della gerarchia non verrebbe risolto in quanto rimarrebbe l'enorme distanza fra la scala M_H e la scala di unificazione. Il problema del *fine tuning* può essere affrontato, come visto, introducendo una scala intermedia di 1-10 TeV. La soluzione più promettente emersa negli ultimi anni è quella della supersimmetria. Senza scendere nei dettagli, tale teoria prevede nuovi gradi di libertà ad una scala M_{SUSY} più grande di 100 GeV ma convenientemente non troppo grande per affrontare il problema del fine tuning. Ad esempio al quark top corrisponde una particella detta -super top (o stop per brevità) di massa M_{SUSY} . Top e stop sono particelle diverse dal punto di vista delle proprietà di trasformazione sotto rotazioni spaziali: il top è un fermione mentre lo stop è uno scalare. Corrispondentemente i loro contributi alla massa dell'Higgs (vedi figura 1) hanno segno opposto. I contributi non si cancellano esattamente perché le due particelle hanno masse diverse, ma si cancellerebbero nel caso di masse uguali. Abbiamo quindi un esempio di simmetria che 'protegge' la massa dell'Higgs. Difatti, indicando con \tilde{m}_t la massa dello stop, la correzione alla massa dell'Higgs risulta:

$$\delta M_H^2 = \frac{3G_F m_t^2}{\sqrt{2}\pi^2} \tilde{m}_t^2 \log \frac{\Lambda^2}{\tilde{m}_t^2} \quad (11)$$

e abbiamo quindi una situazione simile a quella della massa dell'elettrone. Naturalmente il problema del *fine tuning* rientra dalla finestra qualora le scale di massa M_{SUSY} , \tilde{m}_t siano molto grandi rispetto a M_H . Infatti nelle teorie supersimmetriche sussiste una relazione del tipo (5) nella quale M_1 e M_2 sono dell'ordine di M_{SUSY} . Inoltre per quanto riguarda le correzioni quantistiche la relazione (11) ripropone il problema del

fine tuning qualora $\tilde{m}_t^2 \gg M_H^2$. Quindi l'opzione supersimmetrica risolve il problema del fine tuning, e propone una teoria 'naturale' solo qualora le masse delle particelle supersimmetriche, di ordine M_{SUSY} , non siano molto superiori a un TeV, che è la scala di massa esplorata da LHC. Ad oggi però non è emersa nessuna 'nuova fisica', cioè nessuna nuova particella di nuovo tipo né effetti fisici diversi da quelli previsti dal MS.

Conclusioni

La comunità della fisica delle particelle vive a mio modo di vedere in questo momento una situazione piuttosto imbarazzante. Da un lato infatti i criteri di naturalezza che sembrerebbero indicare per la scala Λ che descrive fisica al di là del Modello Standard un valore vicino ad 1 TeV, con effetti fisici osservabili a LHC, sembrano non aver funzionato. Dall'altro lato se Λ è molto grande (superiore ai 10 TeV), nessun effetto fisico potrà essere osservato né agli attuali esperimenti a LHC né a esperimenti agli acceleratori che si prospettano nelle prossime decine di anni. In tal caso la Natura avrebbe scelto di essere non naturale e l'attesa per nuove scoperte potrebbe protrarsi molto a lungo.

In entrambi i casi pare che in questo momento storico il progresso teorico abbia rallentato nell'attesa di nuovi fenomeni, che potrebbero manifestarsi o negli esperimenti agli acceleratori quali LHC o negli esperimenti di astrofisica/cosmologia basati su esperimenti a terra o nei satelliti in orbita.



[1] Gerard 't Hooft. 'Naturalness, chiral symmetry, and spontaneous chiral symmetry breaking'. NATO Sci.Ser.B, 59:135, 1980.



Paolo Ciafaloni: è ricercatore in fisica teorica presso l'INFN e l'Università del Salento. Laureato a Pisa nel 1991, si occupa di fisica delle particelle e di cosmologia.