

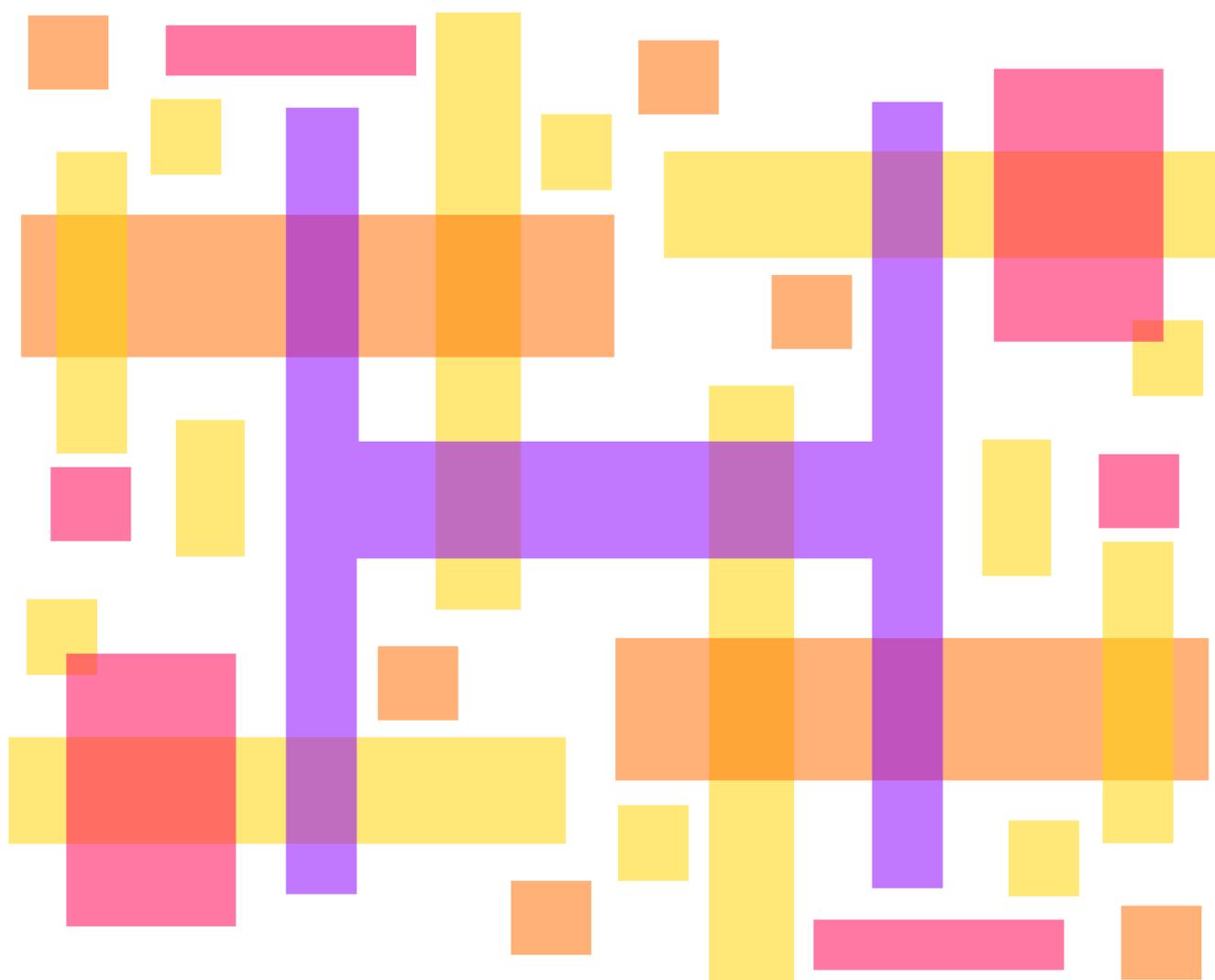
Numero I  
Anno 2013

  
DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E FISICA  
"Ennio De Giorgi"

  
UNIVERSITÀ  
DEL SALENTO

Viaggio nella Scienza

# Ithaca



**Il bosone di Higgs**

---

## **Ithaca: Viaggio nella Scienza**

---

Una pubblicazione del Dipartimento di Matematica e Fisica “Ennio de Giorgi” dell’Università del Salento.

Registrazione presso il Tribunale di Lecce n. 6 del 30 Aprile 2013.

Direttore Responsabile  
**Luigi Spedicato**

Ideatore  
**Giampaolo Co’**

Comitato di Redazione  
**Marco Anni,**  
**Rocco Chirivì,**  
**Maria Luisa De Giorgi,**  
**Luigi Martina,**  
**Giuseppe Maruccio,**  
**Marco Mazzeo,**  
**Francesco Paparella,**  
**Carlo Sempi.**

Segreteria di Redazione  
**Daniela Dell’Anna.**

© 2013 Dipartimento di Matematica e Fisica “*Ennio de Giorgi*”.

© 2013 per i singoli articoli dei rispettivi autori.

Il materiale di questa pubblicazione può essere riprodotto nei limiti stabiliti dalla licenza  
“*Creative Commons Attribuzione – Condividi allo stesso modo 3.0 Italia*” (CC BY-SA 3.0 IT).

Per il testo della licenza: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/it/deed.it>

**Ithaca: Viaggio nella Scienza**

è disponibile sul sito:

<http://ithaca.unisalento.it/>

Scriveteci all’indirizzo:

[ithaca@unisalento.it](mailto:ithaca@unisalento.it)

---

# Ithaca

## Viaggio nella Scienza

---

I 2013

Editoriale

**3** Ithaca all'orizzonte

**5** In questo numero

**7** Il bosone di Higgs  
Paolo Ciafaloni

**15** La scoperta del bosone di Higgs  
Aleandro Nisati

**23** LHC dopo il bosone di Higgs  
Edoardo Gorini

**27** ATLAS: un esperimento al CERN di Ginevra  
Andrea Ventura

**31** Esperimenti a LHC come motori di innovazione  
Gabriele Chiodini

- 41** Sociologia e psicologia nella fisica sperimentale  
**John Hauptman**
- 51** La condanna dell'Aquila: cattiva giustizia, cattiva  
scienza o negligenza?  
**Francesco Paparella**
- La lezione mancata**
- 63** La legge di reciprocità quadratica  
**Rocco Chirivì**

# Ithaca all'orizzonte

*Quando si inizia un cammino non è tanto importante la meta, quanto il percorso.*

Paulo Coelho.

---

**I**thaca è la metafora della meta agognata, infine raggiunta, ma è il viaggio il vero protagonista del poema. Vogliamo proporre un viaggio nella scienza, ma anche con la scienza. Un viaggio non tanto mirato ad affascinare e conquistare nuovi viaggiatori, ma pensato per chi ha già deciso di viaggiare, ma non lo fa di professione.

Il lettore a cui ci rivolgiamo è interessato alla scienza, ha una certa familiarità con le discipline scientifiche, e desidera approfondire le proprie conoscenze andando oltre ciò che viene presentato nei giornali, anche senza dover raggiungere un alto livello di professionalità. La nostra ambizione è quella di pubblicare articoli che siano un ponte tra la letteratura di divulgazione e quella degli esperti del settore.

Noi pensiamo che la scienza sia un prodotto cumulativo dell'intelletto umano, e quindi una componente fondamentale della cultura. In questa visione presenteremo non solo aspetti tecnici delle tematiche scientifiche, ma anche risvolti storici, sociologici, ed, eventualmente, psicologici.

Pensiamo di strutturare la rivista in modo da proporre in ogni numero un tema guida. Attorno a questo tema intendiamo chiedere di volta in volta a diversi colleghi di intervenire per descri-

verne i vari aspetti sopra menzionati. In aggiunta agli articoli dedicati al tema principale, potranno apparire, di volta in volta, anche altri articoli non strettamente legati al tema in discussione.

La rivista nasce da un'iniziativa del Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi" dell'Università del Salento e, per questo motivo, i temi che verranno trattati verteranno soprattutto su queste due discipline scientifiche, anche se non c'è alcuna preclusione nei confronti di altre discipline.

Ringraziamo, sin d'ora, tutti gli autori che, senza alcun compenso, ci hanno aiutato, e ci aiuteranno, a sviluppare questo progetto, e ci auguriamo che il nostro lavoro possa essere di aiuto e stimolo per tante persone interessate alla scienza.

Il comitato di redazione.

Marco Anni,  
Rocco Chirivì,  
Giampaolo Co',  
Maria Luisa De Giorgi,  
Luigi Martina,  
Giuseppe Maruccio,  
Marco Mazzeo,  
Francesco Paparella,  
Carlo Sempi,  
Luigi Spedicato.



---

# In questo numero

---

L'identificazione al Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra di una particella che ha tutte le caratteristiche del bosone di Higgs è, probabilmente, l'evento scientifico che in quest'ultimo anno ha avuto la maggiore copertura mediatica. Abbiamo pensato di dedicare la maggior parte degli articoli al bosone di Higgs, chiarendone l'importanza nell'ambito della teoria che descrive il mondo delle particelle elementari, e prendendo la sua identificazione come esempio e pretesto per descrivere il mondo della fisica sperimentale delle particelle elementari, nel suo ruolo dominante nella ricerca fondamentale, nell'aspetto delle ricadute culturali e tecnologiche sulla società, e anche nell'aspetto psico-sociologico della sua organizzazione.

L'articolo di Paolo Ciafaloni chiarisce l'importanza ed il ruolo del bosone di Higgs nell'ambito della più accreditata, e verificata, teoria che descrive la fisica delle particelle elementari: il Modello Standard delle Particelle Elementari. Gli esperimenti che hanno identificato il bosone di Higgs ed i risultati ottenuti sono presentati nell'articolo da Aleandro Nisati. Anche se l'identificazione del bosone di Higgs era l'obiettivo principale di LHC, la ricerca che si può svolgere utilizzando questo strumento non si esaurisce con questa scoperta. Le nuove prospettive di ricerca da effettuare a LHC sono presentate nell'articolo di Edoardo Gorini.

Ci sono altri tre articoli legati alla fisica sperimentale delle particelle elementari. L'articolo di Andrea Ventura descrive l'universo tecnologico ed organizzativo del CERN di Ginevra, di LHC e degli esperimenti collegati. L'articolo di

Gabriele Chiodini parla del rapporto tra scienza di base e società, e presenta alcune delle ricadute tecnologiche che la costruzione di LHC e dei rivelatori ad esso collegati hanno prodotto. Infine l'articolo di John Hauptmann fornisce uno spaccato psico-sociologico dell'ambiente della fisica sperimentale delle alte energie.

Gli altri due articoli che completano questo primo numero riguardano temi abbastanza distanti dalla fisica delle particelle elementari. Nel primo articolo, Francesco Paparella analizza la sentenza del tribunale dell'Aquila contro i componenti della Commissione Grandi Rischi con l'occhio dello scienziato che non giudica, ma che analizza sotto il profilo della validità scientifica le motivazioni della sentenza.

Conclude il numero un articolo che è pensato come una lezione universitaria che spesso non viene presentata per mancanza di tempo. Pensiamo di fare una rubrica di articoli di questo tipo, definiti come *lezioni mancate*, e l'articolo di Rocco Chirivì sulla legge di reciprocità quadratica, ha l'onore di inaugurarla.

Buona lettura,  
il comitato di redazione.

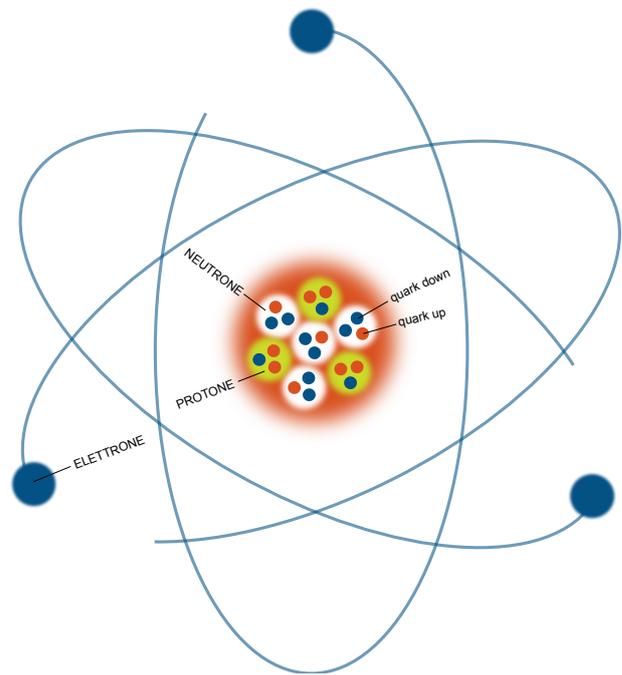


# Il bosone di Higgs

**Paolo Ciafaloni** Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Lecce.

**I**l 4 luglio 2012, in un affollatissimo Auditorium del CERN a Ginevra, veniva annunciata la scoperta di una particella con le “caratteristiche del bosone di Higgs” e con massa pari a circa 125 volte la massa del protone. I media di tutto il mondo hanno dato ampio risalto alla notizia. Ma che cos'è il bosone di Higgs? E perché è tanto importante?

Per capire la rilevanza del bosone di Higgs occorre tuffarsi nel mondo delle particelle elementari, di quelle particelle cioè che allo stato attuale delle conoscenze si pensa siano indivisibili. Schematicamente, gli atomi che costituiscono la materia sono composti da un nucleo molto pesante attorno a cui girano elettroni leggeri. Il nucleo è poi diviso in neutroni e protoni che a loro volta sono composti da particelle chiamate *quark* (vedi fig. 1). Il Modello Standard descrive le particelle elementari come l'elettrone e i quark e le forze di tipo fondamentale (cioè non riconducibili ad altre forze note) in un quadro organico e matematicamente coerente. Sono state finora osservate in natura quattro tipi di forze (ma i fisici preferiscono chiamarle interazioni): l'interazione elettromagnetica e quella gravitazionale che tutti conosciamo perché hanno effetti sul mondo macroscopico, e altre due interazioni confinate al mondo nucleare e subnucleare: l'interazione nucleare forte, che tiene insieme i quark nei neutroni e nei protoni, ed i protoni ed i neutroni nel nucleo atomico, e l'interazione nucleare debole, responsabile, fra le altre cose, di alcuni tipi di decadimenti radioattivi. Il Modello Standard



**Figura 1:** L'atomo.

non descrive la gravità, perché essa è trascurabile negli esperimenti condotti agli acceleratori di particelle e perché, al momento, non esiste una descrizione che unisca gravità e meccanica quantistica e che consenta un confronto con l'esperimento. Le particelle elementari di materia, suddivise nelle famiglie di leptoni e quark, sono fermioni ed interagiscono fra loro scambiandosi i mediatori delle interazioni, che sono, a loro volta particelle, ma di tipo bosonico: il fotone  $\gamma$  (interazioni elettromagnetiche), i bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$  (interazioni deboli), ed i gluoni  $g$  (interazioni forti). In fig. 2 sono rappresentate le particelle descritte dal Modello Standard. È da notare che tra le particelle di materia, solo i quark sono sen-

## Fermioni e bosoni

Nel mondo microscopico, descritto dalla meccanica quantistica, tutte le particelle hanno un momento angolare intrinseco che assume valori interi o semi-interi di una costante fondamentale della natura, detta di Plank:  $\hbar = 1.05457266(33) \times 10^{-34}$  J s. Le particelle con spin-semintero sono soggette al principio di esclusione di Pauli, *due fermioni identici non possono stare sullo stesso stato energetico*, e questo implica che sistemi di fermioni identici seguano una particolare statistica detta di Fermi-Dirac, da cui il nome di fermioni. Al contrario, le particelle con spin intero, zero incluso, non sono soggette al principio di esclusione, e sono detti bosoni, dato che sistemi di particelle identiche seguono una statistica denominata di Bose-Einstein.

## Particelle Elementari

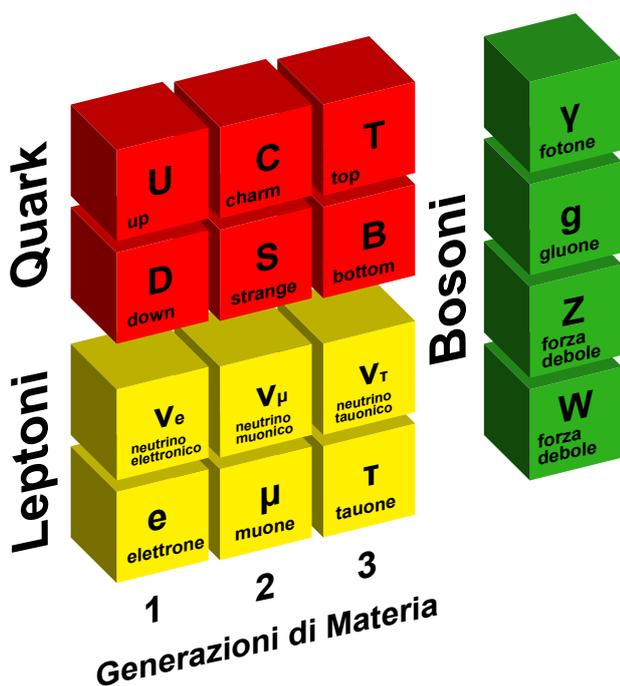


Figura 2: Le particelle del Modello Standard.

sibili all'interazione forte, mentre non lo sono i leptoni. D'altra parte i neutrini non sono sensibili nemmeno all'interazione elettromagnetica, non possedendo carica elettrica. La materia ordinaria, quella che conosciamo, è formata solo dalla prima generazione di particelle, cioè quark  $u$  e  $d$ , elettroni, e neutrini elettronici. Qui sulla terra, le altre due generazioni di particelle elementari vengono prodotte solo in esperimenti di laboratorio.

Per finire, va detto che, nel Modello Standard, le interazioni tra le particelle elementari sono caratterizzate da un alto grado di simmetria, che nel linguaggio della teoria dei campi viene espressa come "simmetria di gauge  $SU(3) \otimes SU(2)$

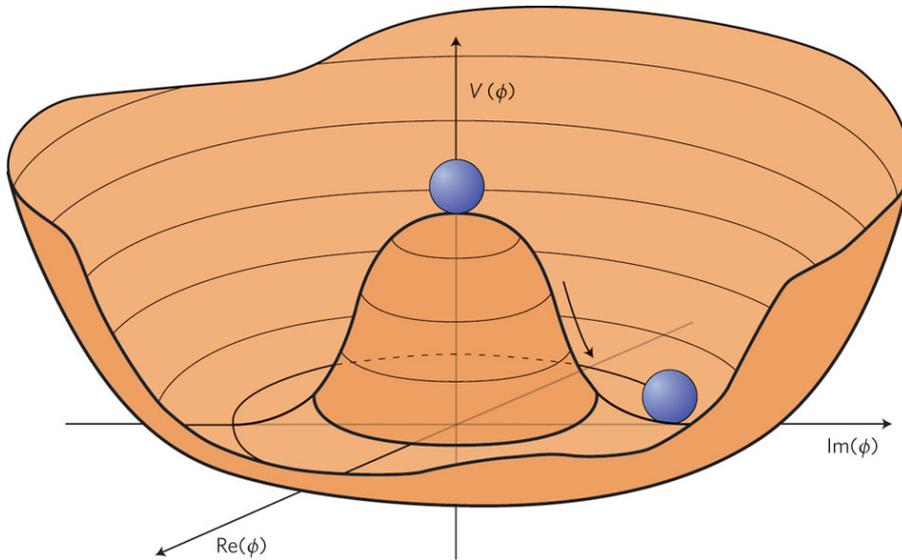
$\otimes U(1)''$ . La presenza di tre gruppi di simmetria è strettamente legata al fatto che le interazioni fondamentali descritte dal Modello Standard siano tre, elettromagnetica, debole e forte. Torneremo in seguito sul problema della simmetria.



Figura 3: Confronto fra predizioni del Modello Standard e quantità misurate dal LEP.

## I successi del Modello Standard e il problema delle masse.

Il Modello Standard descrive correttamente i fenomeni fisici fino alle scale di energia più elevate e alle distanze più piccole mai esplorate dall'uo-



**Figura 4:** Forma del potenziale  $V(\varphi)$  che compare nella lagrangiana Eq. (1).

mo: energie di circa 200 GeV che corrispondono a distanze di circa  $10^{-18}$ m. La fig. 3 ben rappresenta il successo del Modello Standard nel confronto fra teoria ed esperimento. Nella colonna di sinistra compaiono una serie di quantità misurate al Large Electron Positron collider (LEP), l'acceleratore che, al CERN, ha preceduto l'odierno LHC. Nella seconda colonna compaiono i valori delle misure sperimentali, e in quella successiva i valori ottenuti dal Modello Standard. Infine nell'ultima colonna a destra compare la differenza fra esperimento e previsione teorica del Modello Standard in unità di deviazioni standard  $\sigma$ . L'accordo fra teoria ed esperimento è eccellente, al livello del *per mille*, che corrisponde alla precisione necessaria per verificare le previsioni quantistiche della teoria.

Il successo del Modello Standard nasconde un paradosso. In questo modello, le interazioni tra le varie particelle godono di un alto grado di simmetria, la simmetria di gauge  $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ . Questa simmetria sarebbe perfettamente conservata se *tutte* le particelle che interagiscono fossero prive di massa. Questa affermazione non è conciliabile con l'osservazione che quark e leptoni hanno masse, a riposo, diverse da zero, e anche molto diverse tra loro: ad esempio un quark top pesa circa 350000 volte di più dell'elettrone.

Il modo di uscire da questa, apparente, contraddizione si chiama *rottura spontanea della simmetria*, ed è l'argomento del prossimo paragrafo.

## Rottura spontanea della simmetria

Come spiegato nel riquadro, la lagrangiana  $\mathcal{L}$  è un operatore scalare, invariante per trasformazioni di Lorentz e contiene tutte le informazioni necessarie per descrivere le interazioni tra le varie particelle. Il successo del Modello Standard è strettamente legato alle proprietà di simmetria di gauge della lagrangiana che, come già detto, sarebbero conservate in caso di massa nulla di tutte le particelle interagenti. Il problema è quindi quello di mantenere le simmetrie di gauge della lagrangiana, e fare in modo che queste si conservino anche se le particelle che interagiscono acquisiscono massa. Senza presentare globalmente il modello di Higgs, e la teoria di Salam-Weinberg, faremo due esempi per chiarire la procedura della rottura spontanea della simmetria.

### Rottura di simmetria globale

L'esempio più semplice di rottura spontanea è quello che considera un campo scalare complesso  $\varphi(x)$ , la cui lagrangiana  $\mathcal{L}$  può essere scritta come (vedi il riquadro "La teoria dei campi"):

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= \partial_\mu \varphi^* \partial^\mu \varphi - V(\varphi) \\ V(\varphi) &= \lambda(\varphi^* \varphi)^2 - \mu^2(\varphi^* \varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

Nell'equazione precedente è sottintesa una somma sugli indici ripetuti, e la metrica è tale che  $\partial_\mu \partial^\mu = \partial_0 \partial_0 - \sum_{i=1}^3 \partial_i \partial_i$ . Abbiamo indicato con

## La teoria dei campi

Il formalismo teorico che descrive i fenomeni che avvengono alle energie raggiunte dall'acceleratore LHC del CERN è quello della teoria dei campi. Questo formalismo concilia relatività ristretta e meccanica quantistica, e descrive la creazione e l'annichilazione di particelle. Nella teoria dei campi ad ogni particella viene associato un campo, che è un operatore definito in ogni punto dello spazio-tempo, e crea e distrugge le particelle ad esso associate. I campi, in interazione tra loro, sono descritti da una quantità scalare, invariante per trasformazioni di Lorentz, la lagrangiana,  $\mathcal{L}$ , la cui evoluzione spazio-temporale è determinata dalle equazioni di Eulero-Lagrange, che per un campo  $\varphi(x)$  e coordinate spazio-temporali  $x = (x_0 = t, x_1, x_2, x_3)$  può essere scritta come

$$\frac{\delta \mathcal{L}(\varphi, \partial_\mu \varphi)}{\delta \varphi} = \frac{\partial}{\partial x^\mu} \frac{\delta \mathcal{L}(\varphi, \partial_\mu \varphi)}{\delta (\partial_\mu \varphi)}$$

dove  $\mu = 0, 1, 2, 3$ , e si intende una somma sugli indici ripetuti. Utilizzando gli operatori di campo è possibile poi costruire le ampiezze di probabilità, i cui moduli quadri rappresentano le probabilità che l'evento studiato possa avvenire. Ad esempio, per descrivere l'urto di un elettrone contro il nucleo di un atomo, si parte dalla lagrangiana dell'Elettrodinamica Quantistica (QED), che descrive l'interazione tra i campi elettromagnetici dell'elettrone e del nucleo atomico, e si ricava la probabilità che l'elettrone dopo l'urto sia deviato di un certo angolo  $\theta$  rispetto alla traiettoria iniziale. Quindi, in teoria dei campi, la conoscenza delle lagrangiane è il punto di partenza per ricavare i valori di quantità che possono essere confrontate con l'esperimento.

In una lagrangiana si distinguono principalmente il termine cinetico, di tipo derivativo, il termine di massa, quadratico nei campi, e il termine di interazione. Ad esempio, per un campo scalare  $\varphi(x)$ , invariante per trasformazioni di Lorentz, possiamo scrivere la lagrangiana come

$$\mathcal{L} = \partial_\mu \varphi \partial^\mu \varphi - M^2(\varphi)^2 + \lambda(\varphi)^4$$

nella quale il primo termine è quello cinetico, il secondo quello di massa, ed è moltiplicato per un parametro  $M^2$  la cui radice quadrata viene identificata con la massa della particella descritta dal campo, e il terzo termine è quello di interazione, in questo caso autointerazione, moltiplicato dal parametro  $\lambda$  che determina l'intensità dell'interazione.

0 l'indice temporale e con  $i$  gli indici spaziali. Il potenziale  $V(\varphi)$  dipende da due parametri  $\lambda$  e  $\mu^2$  definiti positivi. La lagrangiana (1) è simmetrica sotto una trasformazione U(1) globale. Questo vuol dire che l'espressione di  $\mathcal{L}$  non cambia sotto la trasformazione

$$\varphi(x) \rightarrow e^{i\theta} \varphi(x) \quad (2)$$

dove  $\theta$  è una costante.

Il potenziale  $V(\varphi)$  acquisisce il suo valore minimo quando  $(\varphi^* \varphi) = \mu^2/2\lambda \equiv v^2$ . I valori di  $\varphi(x)$  che soddisfano questa condizione sono connessi fra loro dalla trasformazione U(1) globale (2). Il minimo di  $V(\varphi)$  corrisponde al livello di energia più bassa, identificato con lo stato di vuoto,

che denoteremo con  $|0\rangle$ . Questo significa che ci troviamo in una situazione, detta degenerata, nella quale ad un valore di energia corrisponde più di uno stato fisico, in questo caso addirittura un numero infinito di stati. Il sistema fisico seleziona soltanto uno dei possibili minimi che soddisfano  $|\varphi| = v$ , vedi fig. 4, rompendo così la simmetria U(1). È questo il significato di "rottura spontanea": la lagrangiana che descrive il sistema continua ad essere simmetrica sotto la trasformazione U(1) globale, mentre lo stato di minima energia non lo è più. In natura esistono molti esempi di rottura spontanea di simmetria; forse il più noto è quello dei materiali ferromagnetici che sono descritti da una interazione invariante per rotazione e tuttavia acquisiscono nello stato

fondamentale un allineamento non nullo degli spin, cioè una magnetizzazione  $M$  diversa da zero, in una data direzione.

Per via della simmetria  $U(1)$ , siamo liberi di scegliere lo stato di minima energia attorno al quale sviluppare le “piccole perturbazioni” lungo l’asse reale. In altri termini, possiamo scrivere il campo che contiene perturbazioni come

$$\varphi(x) = v + \sigma(x) + i\chi(x) \quad (3)$$

dove le perturbazioni  $\sigma(x)$  e  $\chi(x)$  inducono “piccole oscillazioni” del campo ma il loro valor medio rispetto allo stato di vuoto è nullo, ovvero  $\langle 0 | \varphi | 0 \rangle = v$ . Utilizzando l’espressione del campo (3) nell’espressione della lagrangiana (1) otteniamo:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma + \partial_\mu \chi \partial^\mu \chi - 4\lambda v^2 \sigma^2 \\ & - \lambda(\sigma^2 + \chi^2)^2 - 2v\sigma(\sigma^2 + \chi^2) \end{aligned} \quad (4)$$

Nell’espressione della lagrangiana i due campi della perturbazione si comportano come fossero campi che descrivono nuove particelle, in analogia a quanto avveniva con il campo  $\varphi$ . I primi due termini della lagrangiana rappresentano termini cinematici; si ha poi un termine di massa, che dipende dal quadrato di  $\sigma$ , e poi termini di interazione. Dato che i campi sono scalari le particelle hanno spin zero e sono quindi bosoni. Il campo  $\sigma$ , che acquisisce una massa  $M_H^2 = 4\lambda v^2$ , rappresenta il bosone di Higgs. L’altro bosone,  $\chi$ , è presente solo nei termini di interazione, ha massa nulla, e viene chiamato bosone di Goldstone.

## Rottura della simmetria locale

L’esempio presentato sopra mostra come la rottura spontanea della simmetria generi una particella, detta di Higgs, che acquisisce massa, e un’altra, detta di Goldstone, che ha il ruolo di far interagire tra loro i vari campi. Nell’esempio precedente, le due particelle erano entrambi scalari, con spin nullo, nella realtà fisica i bosoni che mediano le interazioni elettromagnetiche e deboli sono bosoni vettoriali, cioè con spin uno. Per ottenere bosoni vettoriali è necessario passare dalla simmetria globale, presentata sopra, ad una simmetria di gauge locale, ovvero bisogna considerare la fase  $\theta$  della simmetria  $U(1)$

non più costante, ma dipendente dal punto dello spazio-tempo  $x$ .

La lagrangiana (1) non è più simmetrica per trasformazioni locali  $U(1)$ ,  $\varphi(x) \rightarrow e^{i\theta(x)}\varphi(x)$ : infatti il termine cinetico  $\partial_\mu \varphi^* \partial^\mu \varphi$  perde la sua invarianza. Per riscrivere una lagrangiana invariante sotto trasformazioni locali di gauge introduciamo un campo vettoriale  $A_\mu$  di massa nulla, dove  $\mu$  caratterizza le quattro componenti del campo, e definiamo un nuovo tipo di derivata, detta covariante,  $D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu$ . In queste trasformazioni abbiamo costruito  $A_\mu$  in modo che si trasformi sotto  $U(1)$  come:

$$A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) - \frac{1}{e} \partial_\mu \theta(x) . \quad (5)$$

Per costruzione, il termine  $D_\mu \varphi(x)$  si trasforma sotto  $U(1)$  locale come  $D_\mu \varphi(x) \rightarrow e^{i\theta(x)} D_\mu \varphi(x)$ , e, quindi, un termine  $D_\mu \varphi^* D^\mu \varphi$  è invariante. Per completare la struttura della nuova lagrangiana bisogna aggiungere un termine cinetico per il campo vettore  $A_\mu$ . A questo scopo definiamo

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu ,$$

che inserito nella lagrangiana ci permette di scrivere l’espressione

$$\mathcal{L} = -F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + D_\mu \varphi^* D^\mu \varphi - V(\varphi) , \quad (6)$$

dove il termine di potenziale è dato da

$$V(\varphi) = \lambda(\varphi^* \varphi)^2 - \mu^2(\varphi) . \quad (7)$$

In sintesi, la lagrangiana (6) è invariante sotto una simmetria di gauge  $U(1)$  tale che

$$\begin{aligned} \varphi(x) & \rightarrow e^{i\theta(x)} \varphi(x) \\ A_\mu(x) & \rightarrow A_\mu(x) - \frac{1}{e} \partial_\mu \theta(x) . \end{aligned}$$

Considerazioni analoghe a quelle presentate per la simmetria globale portano a concludere che anche in questo caso si ha un numero infinito di stati degeneri ad energia minima. Questo avviene per tutti gli stati  $|0\rangle$  tali che  $\langle 0 | A_\mu | 0 \rangle = 0$ , e  $|\langle 0 | \varphi | 0 \rangle| = v \equiv \sqrt{\mu^2/2\lambda} \neq 0$ .

Anche in questo caso scegliamo uno stato di minima energia attorno al quale trattiamo perturbativamente piccole oscillazioni, descritte dalla (3). Inserendo questa espressione di  $\varphi$  nella lagrangiana (6) possiamo scrivere la lagrangiana

come

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \partial_\mu\sigma\partial^\mu\sigma + \partial_\mu\chi\partial^\mu\chi \\ & + e^2v^2A_\mu A^\mu - 4\lambda v^2\sigma^2 + \mathcal{H}(A_\mu, \chi, \sigma)\end{aligned}\quad (8)$$

dove il termine  $\mathcal{H}$  contiene le interazioni fra i campi  $A_\mu$ ,  $\chi$  e  $\sigma$ , che omettiamo per brevità ma che sono facilmente ricavabili dalla (6). In analogia al caso della rottura di U(1) globale, si può identificare nell'espressione (8) un bosone di Higgs  $\sigma$  con massa  $\sqrt{4\lambda v^2}$  ed uno di Goldstone con massa nulla. L'espressione (8) mostra che anche il campo vettore  $A_\mu$  **ha acquisito una massa** pari a  $\sqrt{e^2v^2}$ , data dal termine  $e^2v^2A_\mu A^\mu$ .

È opportuno fare alcune considerazioni riguardanti la rottura della simmetria di gauge. È possibile dare massa al campo vettoriale  $A_\mu$  aggiungendo nella lagrangiana iniziale (6) un termine  $m^2A_\mu A^\mu$  che rompe la simmetria di gauge, dato che la trasformazione (5) non lascia invariati termini di massa del tipo  $m^2A_\mu A^\mu$ . Questo modo di rompere la simmetria, detto *rottura esplicita*, distrugge le buone proprietà matematiche della teoria, in particolare la rinormalizzabilità, ovvero la proprietà che permette di evitare le divergenze (cioè la comparsa di valori infiniti quando si sommano le serie che determinano la probabilità di alcuni processi elementari). Queste proprietà matematiche sono invece preservate se la rottura della simmetria non è *esplicita*, ma *spontanea*, rottura che si ottiene con il meccanismo che abbiamo descritto.

A questo punto si pone la domanda di come sia possibile che nella lagrangiana (8) appaia un termine tipo  $m^2A_\mu A^\mu$  che, almeno apparentemente, ne distrugge la simmetria di gauge che invece possedeva la lagrangiana iniziale (6). In realtà, un termine di massa per  $A_\mu$  è presente *in nuce* nella (6), sotto forma di interazioni quartiche del tipo  $\varphi^* A_\mu A^\mu \varphi$  che provengono dai termini di derivata covariante  $D_\mu\varphi^* D^\mu\varphi$ . Quando la simmetria U(1) si rompe spontaneamente il campo  $\varphi$  acquisisce un valore di aspettazione non nullo  $\langle\varphi\rangle = v$  e i termini di interazione quartici contengono  $\langle\varphi^*\rangle A_\mu A^\mu \langle\varphi\rangle = e^2v^2A_\mu A^\mu$ . Le parti di  $e^2v^2A_\mu A^\mu$  che rompono la simmetria di gauge sono cancellate da altri termini contenuti in  $\mathcal{H}$  della (8).

È questa l'essenza della rottura spontanea di

simmetria: la lagrangiana continua ad essere simmetrica per trasformazioni di gauge locali U(1), ma gli stati fisici, ed in particolare lo stato di minima energia, il vuoto, non lo sono. Il meccanismo di rottura spontanea della simmetria fa acquisire una massa al campo vettoriale  $A_\mu$ , senza che le buone proprietà della teoria, sia nel confronto con l'esperimento che nella coerenza matematica (rinormalizzabilità) vengano alterate.

## Rottura Spontanea della Simmetria e Modello Standard

Il Modello Standard delle interazioni fondamentali è notevolmente più complesso rispetto al modello qui descritto. Il gruppo di simmetria è più complicato, tanto per cominciare, ed agisce in maniera più complessa sui vari campi del Modello standard stesso. Nel modello che descrivo qui manca un meccanismo per dare massa ai fermioni, e così via.

Tuttavia le idee di base sono quelle descritte in questo articolo, ed è impressionante come un'idea in fondo tanto semplice abbia così tanto successo in un settore ricchissimo dal punto di vista fenomenologico come quello della fisica delle particelle.

## Conclusioni

La realtà non è completamente simmetrica, e se lo fosse sarebbe probabilmente molto noiosa. La natura si diverte a mettere un certo grado di simmetria nelle equazioni, per poi rompere la simmetria stessa in maniera tenue e controllata. Il bosone di Higgs è il messaggero di tale rottura, detta spontanea, e genera le masse per tutte le particelle elementari. Come ultimo "pezzo" mancante del Modello Standard la sua scoperta è di vitale importanza. Non sappiamo con assoluta certezza se la particella annunciata il 4 luglio sia il bosone di Higgs; ulteriori investigazioni al Large Hadron Collider (LHC) del CERN saranno necessarie per chiarirlo. Se si confermasse che la particella in questione ha tutte le proprietà del bosone di Higgs del Modello Standard, il Modello stesso sarebbe caratterizzato da un grado di completezza, coerenza matematica e compatibilità coi dati sperimentali veramente impressionanti.

ti. Ma molti fatti sperimentali resterebbero da chiarire (Materia Oscura ed Energia Oscura ad esempio) e diversi motivi di insoddisfazione dal punto di vista teorico permarrrebbero (problema della gerarchia, eccessivo numero di parametri, quantizzazione della carica per menzionarne alcuni). Se invece il futuro di LHC mostrasse che la particella scoperta non è, malgrado le apparenze, il bosone di Higgs, la sorpresa sarebbe grande e probabilmente una nuova era si aprirebbe nella Fisica delle Particelle.



*Desidero ringraziare Giampaolo Co' per la sua attenta revisione del manoscritto e per i suoi preziosi consigli. Questo articolo è dedicato a mio padre Marcello.*



**Paolo Ciafaloni:** è nato a Pisa nel 1965. Si è laureato a Pisa nel 1991. È attualmente ricercatore presso la sezione di Lecce dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Si occupa di fenomenologia delle interazioni deboli e di Materia Oscura.



---

# La scoperta del bosone di Higgs

**Aleandro Nisati**

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - sezione Roma 1

---

**Q**uattro Luglio 2012. Questa data segna una tappa fondamentale nella comprensione della natura del nostro universo. Al CERN di Ginevra è annunciata la scoperta di una nuova particella, candidata ad essere il bosone di Higgs previsto dal Modello Standard delle particelle elementari e delle loro interazioni. Alla base di questo straordinario successo c'è lo sforzo di oltre seimila scienziati impegnati in due esperimenti estremamente sofisticati, e la macchina acceleratrice con la più elevata energia mai realizzata finora, lo strumento di ricerca più avanzato ad oggi costruito dall'uomo: il Large Hadron Collider.

Il modello teorico attuale delle particelle elementari, i cui fondamenti poggiano su un vasto insieme di risultati sperimentali e di elaborazioni teoriche, va sotto il nome di *Modello Standard*. In questo modello gli elementi fondamentali della materia sono organizzati in due gruppi, ciascuno costituito da tre coppie di particelle: i *quark* (*up* e *down*, *charm* e *strange*, *top* e *bottom* (o *beauty*)) ed i *leptoni* (*elettrone* e *neutrino-e*, *muone* e *neutrino-mu*, *tau* e *neutrino-tau*). Per ciascuna di queste particelle esiste la corrispondente *antiparticella* (particella di antimateria). Le antiparticelle sono raggruppate in modo del tutto simile alle par-

ticelle. A partire da questi oggetti elementari si può "costruire" la struttura della materia a noi nota, in modo analogo a quanto succede con gli atomi che si organizzano a formare molecole. Così come due atomi di idrogeno ed uno di ossigeno si combinano a formare una molecola d'acqua, due *quark up* ed uno *down* si combinano a formare un protone, mentre un *quark up* e due *down* danno luogo ad un neutrone. I *quark* sono soggetti all'interazione *elettromagnetica* (in quanto dotati di carica elettrica) ed alle interazioni nucleari *forte* e *debole*. In meccanica quantistica, che costituisce la base del Modello Standard, le interazioni fisiche tra due particelle sono trasmesse (o mediate) attraverso una classe di quattro tipi di particelle (in questa discussione ignoriamo volutamente l'interazione gravitazionale), denominati  $\gamma$ ,  $W^\pm$ ,  $Z^0$  e  $g$ . Il fotone,  $\gamma$ , è il mediatore dell'interazione elettromagnetica, mentre i bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$  sono i mediatori dell'interazione nucleare debole (esempio: il decadimento beta del neutrone). I gluoni  $g$ , sono i mediatori dell'interazione nucleare forte (esempio: la forza che tiene insieme i *quark* a formare il protone o il neutrone), e ve ne sono di otto tipi. L'appartenenza di una particella alla famiglia dei fermioni o dei bosoni dipende unicamente da una proprietà quantistica denominata *spin*. Oggetti con *spin* semintero sono fermioni (seguono cioè la statistica di Fermi-Dirac), mentre i bosoni sono caratterizzati dall'aver *spin* intero (compreso lo zero, e seguono la statistica di Bose-

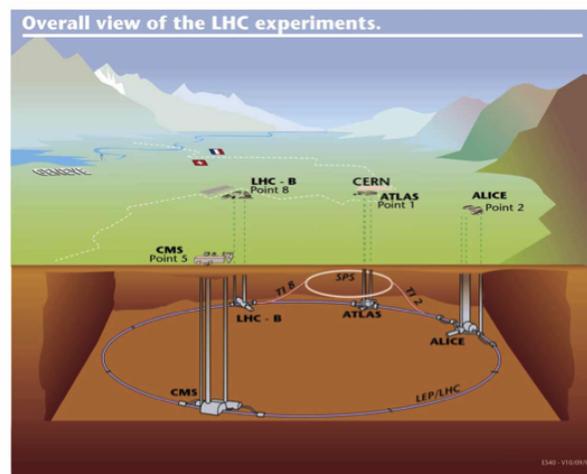
Einstein). I bosoni  $\gamma$ ,  $W^\pm$ ,  $Z^0$  e  $g$  hanno spin 1 (per questa ragione sono anche denominati bosoni vettori), mentre i *quark* hanno spin 1/2. Un Modello Standard costituito solo da fermioni e bosoni vettori prevede che tutte queste particelle, ed in particolare i bosoni  $W^\pm$ ,  $Z^0$ , siano privi di massa, in forte contrasto con i dati sperimentali sulla base dei quali i bosoni  $W^\pm$ ,  $Z^0$ , hanno una massa di 80-90 giga-elettronvolt (GeV; la massa del protone è di circa 1 GeV). Questo problema è superato con l'introduzione di un nuovo campo di forze, detto campo di Higgs. L'interazione di questo campo con quelli associati ai bosoni  $W^\pm$ ,  $Z^0$  (meccanismo di Higgs) conferisce massa a questi stessi bosoni rispettando le proprietà di invarianza della teoria, e porta alla comparsa di una nuova particella, di spin nullo: il bosone di Higgs. Questa è l'unica particella con spin 0 del Modello Standard, la cui massa  $m_H$  non è, comunque, prevista. Misure indirette ottenute da esperimenti di bassa energia hanno indicato valori dell'ordine del centinaio di GeV per questa particella.

Le prime formulazioni del meccanismo di Higgs risalgono al 1964 ad opera dei fisici teorici P.W. Higgs, F. Englert, R. Brout, G.S. Guralnik, C.R. Hagen e T. Kibble. Le formulazioni proposte da questi scienziati sono state ispirate soprattutto da lavori sulla superconduttività di P.W. Anderson, Y. Nambu e dell'italiano Jona Lasinio.

Il bosone di Higgs può essere prodotto in collisioni di particelle. Ad ogni modo, data la massa attesa e le modeste sezioni d'urto di produzione previste, sono necessari acceleratori di grande energia e alta luminosità istantanea. Ricerche dirette effettuate al collisore Large Electron Positron (LEP), che ha realizzato collisioni tra elettroni ed antielettroni del CERN, hanno consentito di porre il limite  $m_H > 114$  GeV.

## Il Large Hadron Collider

Il Large Hadron Collider (LHC) è un acceleratore di particelle inaugurato nell'Ottobre del 2008 al CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) di Ginevra. Il collisore LHC si trova in un tunnel circolare lungo 27 km, posto a circa 100 m sotto la superficie terrestre, a cavallo del confine franco-svizzero, tra la catena montuosa del Giura ed il lago Lemano. Il tunnel fu costruito



**Figura 1:** Il Large Hadron Collider è collocato in un tunnel circolare sotterraneo ad una profondità di circa 100 metri. Lungo l'anello sono disposti quattro apparati sperimentali realizzati per lo studio delle collisioni che si producono tra i protoni accelerati da questa macchina.

negli anni '80 del secolo scorso, per ospitare un altro acceleratore: il LEP (Large Electron Positron collider) che, realizzando collisioni tra elettroni e positroni fino ad un'energia di circa 209 GeV nel centro di massa, ha permesso studi di alta precisione del Modello Standard. In LHC, protoni con energia di 450 GeV sono stati accelerati fino a raggiungere un'energia di 4 TeV (2012). Facendo circolare nella macchina acceleratrice fasci contrapposti, si sono realizzate collisioni con energia nel centro di massa fino a 8 TeV. L'energia di progetto del Large Hadron Collider è 14 TeV. I protoni di ciascun fascio sono organizzati in 1404 pacchetti, i *bunch*, distanti tra loro circa 15 m; il progetto prevede la possibilità di raddoppiare i *bunch* portando la separazione a circa 7.5 m. Ogni *bunch* contiene circa  $1.5 \times 10^{11}$  protoni in uno spazio di 7.6 cm lungo la direzione del fascio, e con dimensioni trasversali dell'ordine di alcune decine di micrometri, appena le dimensioni di un capello umano sottile.

I fasci accelerati dai campi elettrici, prodotti in opportune cavità a radiofrequenza, sono mantenuti su un'orbita circolare da 1232 magneti dipolari lunghi ognuno circa 15 m e capaci di produrre all'interno della camera a vuoto dove viaggiano i fasci un campo magnetico fino a 8 Tesla (più di centomila volte il campo magnetico terrestre) prodotto da bobine superconduttrici capaci di contenere una corrente di circa 10 kA. Per



**Figura 2:** Per mantenere i protoni su un'orbita circolare prestabilita, i due fasci di protoni circolanti in senso opposto sono curvati da dipoli magnetici superconduttori disposti lungo l'anello. In quattro punti prestabiliti questi fasci vengono fatti incontrare e collidere.

poter funzionare correttamente, queste bobine sono mantenute ad una temperatura di 1.9 K da un imponente sistema di criogenia. Va fatto notare che la temperatura dello spazio intergalattico è di circa 3.3 K.

Quattro esperimenti sono posti lungo l'anello, a studiare le collisioni prodotte dall'acceleratore: due esperimenti disegnati per gli studi più generali (ATLAS e CMS), uno dedicato allo studio della produzione di particelle con *quark beauty* (LHCb) ed infine un esperimento dedicato allo studio di collisioni di ioni pesanti (ALICE – LHC può essere utilizzato per realizzare anche collisioni tra nuclei pesanti, come quelli del piombo). Durante le fasi operative del 2012, LHC ha prodotto in media 400 milioni di collisioni tra protoni per secondo, ad una energia nel centro di massa 8 TeV. Sono stati raccolti dagli esperimenti ATLAS e CMS i dati più interessanti relativi ad un campione di 1 milione di miliardi di collisioni. Infine, un campione 4 volte più piccolo è stato prodotto nel 2011, con collisioni a 7 TeV. Questi dati costituiscono il campione su cui è stata condotta la ricerca del bosone di Higgs.

## Gli esperimenti ATLAS e CMS

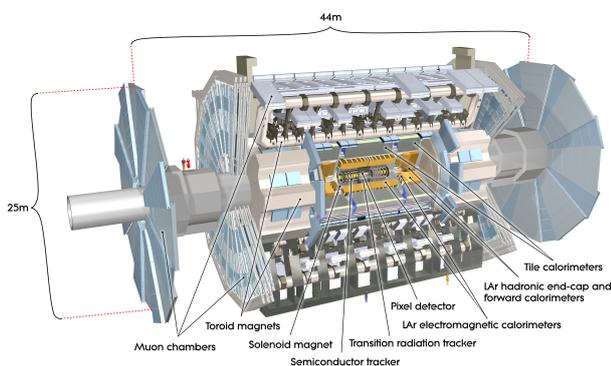
Con una lunghezza complessiva di circa 44 metri, un diametro di 25 metri ed una massa di circa 7.000 tonnellate, il rivelatore ATLAS è il più grande apparato sperimentale mai realizzato. CMS

invece si presenta come un rivelatore più compatto, con una lunghezza di 22 metri ed un diametro di 15 metri. Al contrario, la sua massa complessiva è di circa 14.500 tonnellate. A ciascuno di questi due esperimenti collaborano attualmente circa 3.000 fisici. La struttura di base di questi apparati sperimentali è molto simile, ed è caratteristica dei moderni esperimenti presso gli acceleratori di particelle. In prossimità del punto di collisione tra protoni, sia ATLAS che CMS dispongono di un rivelatore centrale (*Inner Detector*) per la misura delle particelle elettricamente cariche che si producono in seguito all'urto. Questo rivelatore, di forma cilindrica, con una lunghezza di circa 6 metri e con un diametro di poco più di 2 metri, è immerso in un campo magnetico solenoide di intensità 2 T per ATLAS e 3.8 T per CMS (il magnete di questo apparato è il più grande solenoide superconduttore mai costruito). La curvatura delle traiettorie delle particelle cariche misurata con questo strumento permette di risalire alla quantità di moto da queste posseduta. Mentre la scelta tecnologica per l'*Inner Detector* di CMS è andata nella direzione di un apparato basato unicamente su tecnologie a semiconduttore (*silicon microstrip* e *pixel*), ATLAS ha limitato questo tipo di dispositivi alla parte più interna del rivelatore, utilizzando per la parte più esterna tubi a deriva di piccolo diametro.

Attorno all'*Inner Detector* è disposto il calorimetro. In ATLAS questo apparato contiene al suo interno anche il solenoide centrale, mentre nel caso di CMS questo apparato si trova all'interno di questo magnete di grandi dimensioni. Il calorimetro è organizzato in un primo strato, quello più interno, detto calorimetro elettromagnetico, dedicato alla misura dei fotoni, degli elettroni e dei positroni che si producono nella collisione dei fasci e che vengono assorbiti quando attraversano questo dispositivo. Di seguito a questo troviamo il calorimetro adronico, con la duplice funzione di misurare l'energia posseduta dagli adroni e di impedirne la propagazione nella parte esterna dell'intero apparato tramite l'assorbimento grazie ai materiali di cui è costituito. Le soluzioni tecnologiche adottate da ATLAS e CMS, soprattutto per quello che riguarda il calorimetro elettromagnetico, sono radicalmente diverse. In ATLAS si è optato per un calorimetro

eterogeneo costituito da strati di piombo ed argon liquido (mantenuto ad una temperatura di 89 K da un apposito criostato), mentre in CMS si è preferito un calorimetro omogeneo basato su cristalli di tungstato di piombo che, oltre all'elevata precisione di misura necessaria, consente anche la necessaria compattezza richiesta dal solenoide centrale dell'esperimento.

La parte più esterna di ATLAS e CMS è costituita da rivelatori per l'identificazione e la misura della quantità di moto dei muoni, che rappresentano le uniche particelle cariche in grado di attraversare l'intero apparato senza essere assorbite. In ATLAS questo sistema è basato su un insieme di tre magneti superconduttori toroidali in aria, uno disposto al centro e due di lato posti all'interno del primo, a coprire il più possibile la regione attorno al punto nominale di collisione tra i fasci. Questi magneti producono un campo magnetico di circa 0.5 – 1 Tesla, ed al loro interno ed intorno ad essi sono disposti dei rivelatori a gas caratterizzati da una elevata precisione di misura della traiettoria descritta dal muone che li attraversa, meno di 100  $\mu\text{m}$  per ogni punto ricostruito. Questo complesso sistema, organizzato in tre stazioni di misura, realizza lo spettrometro per muoni di ATLAS, e consente la misura di muoni di 50 GeV di impulso con una risoluzione di circa 1.5 GeV. Questa misura è ulteriormente migliorata combinandola con quella effettuata per la stessa particella dallo spettrometro interno. Una figura schematica dell'apparato sperimentale ATLAS è visibile in figura 3.



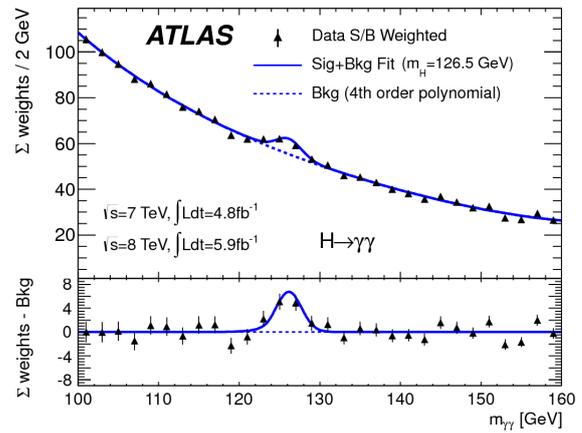
**Figura 3:** Struttura interna dell'apparato sperimentale ATLAS, che ne mostra i principali componenti. Le dimensioni complessive del rivelatore sono 25 m in diametro e 44 m in lunghezza. La massa totale è approssimativamente di 7000 tonnellate.

L'approccio adottato da CMS è complementare: le stazioni di misura sono quattro, anch'esse basate su rivelatori a deriva, e sono interposte all'interno ed all'esterno del giogo di ritorno in ferro del grande solenoide centrale. L'identificazione del muone viene compiuta grazie a queste stazioni di misura, e la sua ricostruzione è effettuata combinando le misure che queste forniscono con quelle dello spettrometro centrale che, grazie all'elevata intensità del campo magnetico presente al suo interno, misura un muone di 50 GeV di impulso con una risoluzione di circa 0.5 GeV. È opportuno ricordare che sia per lo spettrometro per muoni di CMS che per quello di ATLAS si usano rivelatori denominati RPC (*Resistive Plate Chambers*), ideati e sviluppati dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Questi rivelatori svolgono un ruolo di primaria importanza per il sistema di trigger di entrambi gli esperimenti, necessario ad un primo e rapido riconoscimento "in tempo reale" degli eventi di interesse, i cui dati sono memorizzati in supporti permanenti (dischi rigidi e/o nastri magnetici).

## La scoperta del bosone di Higgs

Il bosone di Higgs previsto dal Modello Standard decade in coppie di fermioni o bosoni elementari (nei casi in cui questo è cinematicamente permesso). La probabilità con cui il decadimento avviene è direttamente legata all'accoppiamento di queste particelle con il bosone stesso, ed a sua volta questo è proporzionale alla massa dei fermioni o al quadrato della massa dei bosoni vettori  $W$  e  $Z$ . Come conseguenza, il bosone di Higgs decade prevalentemente in coppie *beauty-antibeauty* per masse fino a circa 130 GeV. A partire da questo valore in poi, i decadimenti in coppie di bosoni  $WW$  e  $ZZ$  diventano dominanti. Nella regione di massa tra 110 e 150 GeV un altro canale di decadimento di grande importanza è quello costituito da una coppia tau-antitau ( $\tau^+\tau^-$ ). Ad ogni modo è fondamentale anche tenere conto di quali stati finali possono essere ricostruiti sperimentalmente in modo completo ed accurato, e di quali offrono la più bassa contaminazione da fondo fisico. Il fondo fisico è rappresentato da processi noti, descritti dal Modello Standard, la cui ricostruzione simula, e quindi disturba, quella degli eventi di segnale di

cui si è alla ricerca. Tra tutti questi, due sono i canali più interessanti per la ricerca del bosone di Higgs a bassa massa: il decadimento  $H \rightarrow \gamma\gamma$  ed il decadimento  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4$  leptoni (per leptone intendiamo qui l'elettrone/antielettrone o il muone/antimuone). Il primo è un decadimento raro (è previsto che circa lo 0.2% dei bosoni di Higgs di 120 GeV di massa decadano in due fotoni) la cui frequenza, combinata con l'eccezionale risoluzione in massa che è possibile raggiungere con stati di due fotoni, fa di questo canale il processo più interessante nella regione di massa attorno a 120 GeV. Sebbene il processo  $H \rightarrow ZZ^*$  abbia un rapporto di diramazione di circa un fattore 5-20 volte più grande di quello in due fotoni, la sua ricostruzione nel canale a quattro leptoni riduce questo rapporto di un fattore circa 300. Tuttavia questo canale offre una contaminazione da fondo fisico molto bassa (con un rapporto di circa 1), contrariamente a quello del processo  $H \rightarrow \gamma\gamma$  (caratterizzato da un rapporto dell'ordine di 0.01). Per masse del bosone di Higgs superiori a 180 GeV il decadimento  $H \rightarrow ZZ^*$  rappresenta il processo più importante fino a masse di circa 700 GeV. Il decadimento  $H \rightarrow b\bar{b}$ , sebbene più frequente nella regione a bassa massa, oltre ad esibire una risoluzione più modesta di quella caratteristica dei due canali già descritti, è limitato dalla grande produzione di getti adronici che possono essere scambiati come oggetti che originano da *quark* (o *antiquark*) *beauty*. Questo rende a tutt'oggi possibile la ricerca diretta del bosone di Higgs solo nei processi di produzione associata, quelli cioè in cui questo scalare è prodotto in associazione (cioè nello stesso evento) per esempio ad un bosone vettore ( $W$  o  $Z$ ) o ad una coppia *top-antitop*. Infine, il canale  $H \rightarrow W^+W^-$ : sebbene esso sia caratterizzato da una frequenza di produzione elevata, la sua ricostruzione sperimentale nei canali leptonici (che hanno il miglior rapporto segnale/fondo) non permette la misura della massa invariante a causa dei due neutrini presenti in questi stati finali (che non possono essere misurati individualmente, ma solo nella componente trasversa della quantità di moto associata a questa coppia). Tuttavia le misure tramite questo canale rimangono un capitolo fondamentale per la ricerca e lo studio del bosone di Higgs, in quanto permettono di osservare un ulteriore processo



**Figura 4:** Distribuzione della massa invariante  $m_{\gamma\gamma}$  nell'analisi del decadimento  $H \rightarrow \gamma\gamma$  ottenuta con i dati dell'esperimento ATLAS raccolti nel 2011 (energia nel centro di massa 7 TeV) e nella prima parte del 2012 (energia nel centro di massa 8 TeV). I dati (triangoli con barre di errore – ove visibili) sono interpolati da una funzione di Bernstein del quarto ordine (linea blu punteggiata) e da questa stessa funzione più un segnale rappresentato da una funzione simile ad una gaussiana con valor medio fissato a  $m = 126.5$  GeV (linea blu continua). In basso è possibile vedere la stessa distribuzione sottraendo ai dati ed alle due curve l'interpolazione con la funzione di Bernstein.

indipendente che contribuisce a identificare la natura della particella che lo produce. Simili conclusioni possono essere tratte per il canale  $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ .

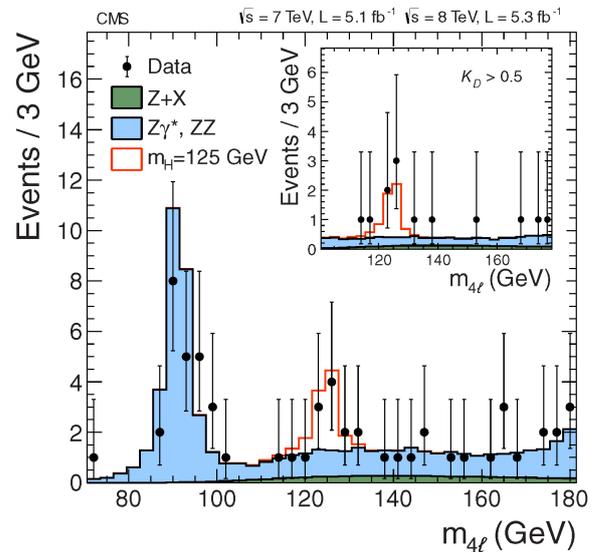
La ricostruzione dei canali a grande risoluzione di massa è concettualmente semplice: si tratta di misurare l'impulso nello spazio di fotoni e leptoni ( $e^\pm$  e  $\mu^\pm$ ) e di combinare tra loro la coppia di fotoni (o il quartetto di leptoni) secondo semplici e ben note relazioni di cinematica relativistica, allo scopo di ricostruire la massa invariante. In figura 4 si mostra la distribuzione della massa invariante  $m_{\gamma\gamma}$  della coppia  $\gamma\gamma$  in eventi selezionati con la richiesta di due fotoni con alto impulso trasverso, misurata con l'esperimento ATLAS.

Come è possibile notare, questa distribuzione presenta un andamento che, nell'intervallo da 100 a 150 GeV, decresce rapidamente al crescere del valore della massa invariante, tranne in una piccola regione di massa attorno a 126 GeV. È possibile descrivere con una curva continua e monotona decrescente l'andamento di questa distribuzione in funzione di  $m_{\gamma\gamma}$ , tranne appunto in questa regione. Questa funzione descrive

l'andamento della distribuzione di  $m_{\gamma\gamma}$  prodotta da processi descritti dal Modello Standard, che rappresentano il fondo fisico. La discrepanza visibile in questa regione tra i dati osservati e il livello atteso da quanto misurato subito prima e subito dopo di essa, può essere imputata 1) ad una fluttuazione statistica del fondo che da sola può spiegare questa anomalia, oppure 2) alla presenza di una nuova risonanza con massa intorno a 126 GeV. La probabilità che si verifichi la fluttuazione ipotizzata in 1) è stata calcolata e risulta essere  $1.7 \times 10^{-9}$ , ovvero 5.9 deviazioni standard. Si ritiene nella comunità dei fisici delle particelle elementari che un fenomeno sia imputabile alla manifestazione di un nuovo processo fisico quando la probabilità che esso sia spiegabile come fluttuazione statistica di processi già noti sia uguale o più piccola di  $3 \times 10^{-7}$  (equivalente a 5 deviazioni standard). Questo ci permette di concludere che siamo in presenza di una risonanza fisica, per la quale un buon candidato è proprio il bosone di Higgs. L'inserto in basso presente nella figura 4 mostra la distribuzione dei dati avendo sottratto il fondo fisico atteso. In questo modo è possibile evidenziare in modo esplicito l'eccesso di eventi collocato intorno a 126 GeV. L'esperimento CMS ha fornito risultati del tutto simili a quelli qui presentati.

Uno studio molto simile è stato compiuto selezionando eventi con quattro leptoni di alto impulso trasverso, la cui massa invariante ottenuta con i dati raccolti con l'apparato CMS è mostrata in figura 5.

In questa figura è possibile osservare tre componenti fondamentali. La prima è rappresentata dal picco dovuto a decadimenti rari del bosone Z in quattro leptoni, e quindi con massa invariante intorno alla massa di questa particella, circa 91 GeV. La seconda componente è rappresentata dalla produzione eventi  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\text{-leptoni}$ , che domina il contributo atteso nella regione di massa  $m_Z - 2m_Z$ . Con atteso s'intende il contributo che ci aspettiamo in questa regione dalla teoria, ignorando il contributo del bosone di Higgs con massa all'interno di questo intervallo di valori. Di nuovo, i dati mostrano chiaramente la presenza di un contributo aggiuntivo collocato intorno al valore di massa di 125 GeV. Questo contributo è confrontato con quanto previsto dalla teoria includendo quanto previsto per un bosone

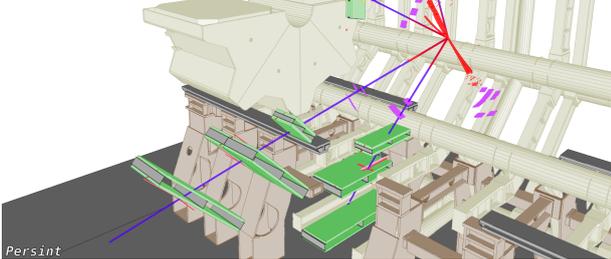


**Figura 5:** Distribuzione della massa invariante  $m_{4l}$  nell'analisi  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4$  leptoni ottenuta con i dati dell'esperimento CMS raccolti nel 2011 (energia nel centro di massa 7 TeV) e nella prima parte del 2012 (energia nel centro di massa 8 TeV). I dati rappresentati da cerchi neri con barre di errore sono confrontati con le previsioni della teoria, rappresentate dall'istogramma di color celeste. L'istogramma rappresentato dalla linea rossa mostra per lo stesso campione di dati la previsione della teoria per un bosone di Higgs di massa  $m_H = 125$  GeV, sovrapposto alle previsioni del fondo fisico. L'inserto all'interno della figura mostra la regione nella quale si evidenzia l'eccesso per un'analisi dei dati più selettiva.

di Higgs con massa 125 GeV. La probabilità che questo eccesso di eventi sia causato da una fluttuazione statistica del fondo è circa  $1.3 \times 10^{-9}$ , ben oltre 3 deviazioni standard. La figura mostra la ricostruzione grafica al computer di un evento con quattro muoni che ha superato i criteri di selezione per processi  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\text{-leptoni}$ . Risultati del tutto analoghi sono stati mostrati dall'esperimento ATLAS. In figura 6 è mostrato un evento candidato  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\text{-muoni}$ .

I risultati raccolti con l'analisi dei dati per i due processi qui discussi ci permettono di formulare due importanti conclusioni:

1. sia nel canale  $H \rightarrow \gamma\gamma$  che nel canale  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\text{-leptoni}$  si osserva un eccesso di eventi in una stretta regione di massa, la stessa per entrambi i canali (attorno a  $m_H = 125\text{-}126$  GeV);



**Figura 6:** Ricostruzione grafica di un evento con quattro muoni che ha superato i criteri di selezione per processi  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\text{-muoni}$ . I muoni sono identificati dai rivelatori dello spettrometro esterno (evidenziati dal colore verde) e ricostruiti usando le misure di questo spettrometro e di quello interno basato sul solenoide centrale, fino a ricostruire le tracce appartenenti a queste particelle evidenziate dalle linee di color viola. Queste tracce vengono combinate a determinare la massa invariante.

2. tale eccesso non può essere spiegato da una fluttuazione statistica del fondo fisico: siamo quindi in presenza di una nuova risonanza, compatibile con il bosone di Higgs previsto dal Modello Standard.

Le analisi dei dati presentate da ATLAS e CMS sono state completate dallo studio nel canale  $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ ; anche questo studio ha mostrato un eccesso di eventi spiegabile dalla produzione di un bosone di Higgs di massa compatibile con quanto trovato nei due canali principali. La collaborazione CMS ha aggiunto anche i risultati nel canale  $H \rightarrow \tau^+\tau^-$  e  $H \rightarrow b\bar{b}$ , sebbene non ci sia sensibilità di rilievo in questi processi con i dati disponibili al momento in cui questi risultati sono stati pubblicati (Luglio 2012).

**Trovato il bosone di Higgs, abbiamo completato le nostre ricerche?** Questa è la domanda che ora ci si pone e alla quale, spesso, si tende a dare una risposta affermativa. Tuttavia questo è profondamente scorretto. Con i dati disponibili al momento della stesura di questo articolo (corrispondenti al primo run di LHC), possiamo stabilire con grande confidenza che siamo in presenza di una particella che si comporta proprio come un bosone di Higgs. Qualora questo sia il

bosone di Higgs previsto dal Modello Standard è tutta un'altra questione. Il Modello Standard, una volta assegnata la massa a questa particella, è in grado di prevedere con precisione le proprietà fisiche di questa particella: in particolare i valori dei suoi accoppiamenti con le particelle fondamentali. Lo spin è imposto dal modello ( $s=0$ ). Questi accoppiamenti sono sensibili alla presenza in natura di fermioni o bosoni elementari non previsti dalla teoria standard (ma da altri tipi di teorie), e che quindi acquisterebbero valori che si discosterebbero da quelli attesi. Di conseguenza, la misura accurata di come questo bosone interagisce con le altre particelle elementari note è non solo di fondamentale importanza per stabilirne la natura, ma soprattutto rappresenta una finestra, un passaggio verso un universo a noi tuttora sconosciuto.

Per confermare o escludere le previsioni del Modello Standard occorreranno molti più dati di quelli ad oggi disponibili, e probabilmente sarà importante approvare un'estensione del progetto LHC con la quale potremo raccogliere una maggiore quantità di dati (ad energie della macchina prossime a quella di progetto) che consentiranno misure di straordinaria precisione e che potranno far chiarezza sulla natura di questo bosone, fino ad indicare la strada da percorrere in fisica delle particelle nei decenni a seguire.



**Aleandro Nisati:** Laureato all'Università di Roma La Sapienza nel 1987, è primo ricercatore presso la sezione di Roma dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Ha collaborato a vari esperimenti di Fisica di alte energie al CERN, tra i quali UA1, WA92 e L3. Ha partecipato alla progettazione e alla realizzazione dell'esperimento ATLAS a LHC lavorando particolarmente al trigger muonico di alto livello e al coordinamento delle analisi di fisica finalizzate alla ricerca del bosone di Higgs.



---

# LHC dopo il bosone di Higgs

**Edoardo Gorini**

*Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi" - Università del Salento;  
INFN - Sezione di Lecce.*

---

**L**a scoperta del bosone di Higgs non esaurisce le ricerche pianificate all'acceleratore LHC. Ad esempio, la ricerca di particelle supersimmetriche è una delle attività più importanti a cui si dedicherà LHC nel prossimo futuro.

Il Large Hadron Collider (LHC), insieme agli esperimenti che vi operano (ATLAS, CMS, ALICE e LHCb), è una delle più grandi imprese scientifiche mai realizzate dall'uomo. Uno dei motivi principali per cui i fisici delle particelle l'hanno ideato, progettato e costruito è stato quello di risolvere l'enigma dell'origine delle masse di tutte le particelle elementari, ossia cercare il famoso Bosone di Higgs. Il 4 luglio del 2012 i fisici di ATLAS, insieme a quelli di CMS, hanno annunciato al mondo di aver scoperto l'esistenza di una particella che gli somiglia (un bosone) e che ha una massa di 125 GeV circa, più di 130 volte la massa di un protone. Dopo alcuni mesi da quella data sappiamo che quasi sicuramente questa particella ha spin 0 e parità positiva, quindi è quello che stavamo cercando, cioè una particella cosiddetta scalare. L'abbiamo identificata in diversi modi di decadimento e ne abbiamo misurato, seppur con scarsa precisione, l'intensità di produzione e le probabilità di decadimento. A questo punto possiamo dire con certezza che essa è proprio il Bosone di Higgs cercato, che completa finalmente lo zoo delle particelle elemen-

tari previste dal Modello Standard di Glashow-Weinberg-Salam. Allora abbiamo finito? Poiché l'anello mancante del Modello Standard è stato trovato, non c'è più niente da capire? Possiamo considerarci soddisfatti così? No! Perché in realtà anche il Modello Standard delle particelle elementari probabilmente fornisce solo una interpretazione approssimativa di come davvero è fatto l'universo.

In questi ultimi 50 anni abbiamo studiato con grande accuratezza tanti fenomeni previsti dal Modello Standard e di cui esso ci ha predetto con elevatissima precisione il valore delle grandezze rilevanti. Ma non abbiamo in realtà capito perché il mondo è fatto proprio così. Il Modello Standard ha alcuni difetti. Il primo è che non ci dice quali sono le masse delle diverse particelle; possiamo conoscere queste masse solo misurandole in esperimenti adatti e non abbiamo comunque nessuna spiegazione del perché abbiamo, per esempio, masse di diversi ordini di grandezza differenti tra loro: il muone pesa 200 volte più dell'elettrone ed il leptone tau 3400 volte di più! Le masse dei quark variano fra le poche centinaia di MeV dei quark up/down fino agli oltre 170 GeV del quark top. Ognuna delle masse di queste particelle entra nel modello come parametro libero e quindi sconosciuto a priori.

Non abbiamo alcuna idea del perché ci siano tante famiglie di particelle: l'elettrone, il neutrino dell'elettrone, il quark up ed il down formano

la prima famiglia. Basterebbe solo questa famiglia ed il modello funzionerebbe lo stesso. Perché ci sono tre famiglie (sappiamo che sono tre dalle misure effettuate negli anni '90 con l'acceleratore LEP, il precursore dell'LHC)? E perché proprio tre e non due, cinque o quarantaquattro?

Perché c'è più materia che antimateria nell'universo? Per ogni particella noi sappiamo che esiste un'antiparticella uguale in tutto ad essa tranne nell'aver alcuni numeri quantici (come la carica elettrica) opposti. Le nostre equazioni ci dicono inoltre che c'è simmetria fra materia e antimateria e che al momento del Big Bang sono state prodotte quantità uguali di materia ed antimateria nell'universo. E allora perché dobbiamo andare a cercare l'antimateria col lumicino nell'universo e noi siamo fatti solo di materia? E ancora: visto che se si fa incontrare la materia con l'antimateria si ottengono lampi di luce, cioè dei fotoni, potremmo ipotizzare che materia e antimateria si siano annichilate tanto tempo fa, per cui dovremmo avere ora un universo fatto solo di luce. Perché non è così?

E infine: cosa sono le particelle di materia oscura che gli astrofisici ci dicono che debbono esistere perché ne vedono gli effetti a larga scala nelle galassie ed in generale nell'universo? Noi non siamo ancora riusciti a trovare e misurare questa materia oscura, neanche nei più sofisticati esperimenti finora progettati. Sappiamo che solo un quarto dell'universo è fatto di materia e solo un quinto della materia è fatto di quark e leptoni, mentre non sappiamo niente del resto.

Dunque non abbiamo proprio la minima idea di come dare risposta a questi interrogativi? No! In realtà c'è un mucchio di idee sul perché succedano tutte queste cose. I fisici teorici negli ultimi 50 anni hanno infatti partorito un gran numero di teorie che potrebbero spiegare alcune o tutte queste cose. Il compito degli sperimentali, come il sottoscritto, è quello di verificare quale di queste eleganti, complicate e spesso astruse teorie possa rappresentare davvero il mondo in cui viviamo e spiegarci tutto quello che il Modello Standard non spiega.

Fra le teorie più accreditate da gran parte dei fisici teorici di tutto il mondo c'è la Supersimmetria, il cui nome viene spesso abbreviato in SUSY (SUperSYmmetry). La SUSY è una simmetria della natura che mette in relazione due tipi

di particelle: i fermioni, a spin semintero, ed i bosoni, a spin intero<sup>1</sup>.

Una conseguenza di questa teoria, e quella più evidente, è che ogni tipo di particella che conosciamo ha uno o più superpartner che condividono tutte le proprietà di questa tranne una: se la particella è un fermione il suo superpartner è un bosone, e viceversa. Poiché le particelle di materia (come i quark e l'elettrone) sono fermioni, mentre le particelle mediatrici delle forze (come il fotone, il  $W^\pm$  e lo  $Z^0$ ) sono bosoni, la SUSY unifica i due tipi di particelle, rendendo indistinguibile la materia dai mediatori delle forze.

Il nostro mondo è fatto sia di fermioni che di bosoni ma nessuno di loro è superpartner di una delle particelle conosciute. Il problema è che se la SUSY fosse una simmetria esatta in natura, noi avremmo già dovuto scoprire tutte le superparticelle (anche chiamate sparticelle) perché queste dovrebbero avere esattamente la stessa massa delle particelle elementari che conosciamo.

Quindi, avremmo identificato degli atomi formati da selettroni e sprotoni formati da squark. Questi superatomi si sarebbero comportati in modo molto, molto, differente dagli atomi che conosciamo, visto che gli spin dei loro costituenti sarebbero differenti, interi non semi-interi. Allora la chimica sarebbe stata completamente diversa da quella che conosciamo. Poiché così non è, possiamo dire che la simmetria è "nascosta" o "rotta" e, almeno alle energie a noi accessibili, non è una simmetria "esatta" della natura.

Quello che si può ipotizzare, e la matematica lo conferma, è che ci sia qualche meccanismo attraverso il quale le sparticelle acquistano una massa molto più grande delle particelle standard, e che noi non siamo ancora riusciti ad osservarle perché non abbiamo la tecnologia per arrivare a produrre collisioni che forniscano l'energia sufficiente a crearle abbastanza frequentemente nei nostri esperimenti. La scala di energie a cui ci si aspetta di trovare le sparticelle è intorno al TeV, che è proprio l'energia che hanno i costituenti dei protoni accelerati ad LHC. Se questo è vero,

<sup>1</sup>Tutte le moderne teorie quantistiche di campo sono formulate in modo che le equazioni che le descrivono siano simmetriche rispetto ad una serie di trasformazioni delle coordinate e dei campi. Un esempio è la simmetria per il cambio di segno delle coordinate spaziali (simmetria di parità).

significa che ci aspettiamo di osservarle a breve con i nostri grandi apparati come ATLAS e CMS!

Il problema è che i meccanismi ed i parametri liberi di questa teoria sono ancora largamente sconosciuti e solamente ipotizzati, per cui la ricerca di questa fisica è estremamente complessa perché dobbiamo, in sostanza, cercare a tappeto in uno spazio di parametri estremamente grande. Inoltre la probabilità di produrre sparticelle è estremamente piccola e lo diventa sempre di più quanto maggiore è la loro massa.

Le motivazioni per avere fiducia in modelli di tipo SUSY è che questi risolverebbero alcuni, se non tutti, i problemi insiti nel Modello Standard così com'è. La Supersimmetria spiegherebbe il mistero delle masse delle particelle, fornirebbe dei validissimi candidati per la materia oscura, unificherebbe tre delle forze fondamentali della natura (elettromagnetica, debole e forte) e risolverebbe quello che viene chiamato problema della gerarchia, cioè l'enorme differenza (16 ordini di grandezza) nella scala di massa delle forze elettrodeboli (la massa dei bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$ ) e nucleari, e quella della forza gravitazionale (massa di Planck).

A LHC stiamo cercando incessantemente di verificare l'esistenza di particelle supersimmetriche attraverso analisi che sono basate su alcune particolari tipologie di eventi. Una di queste è la presenza di uno sbilanciamento di energia. Questo è il classico segnale lasciato da eventi in cui sono state prodotte particelle neutre che interagiscono molto debolmente con la materia, come ad esempio i neutrini, ed è, in particolare, il metodo con cui i neutrini sono stati scoperti. Se fosse verificata una legge di conservazione di una quantità detta R-Parità, che richiede la produzione associata di sparticelle ed antiparticelle, allora ci dovrebbero essere, nello stato finale di decadimento, delle sparticelle neutre più o meno pesanti che contribuirebbero allo sbilanciamento di energia da noi osservato. Queste particelle (anche denominate Lightest Supersymmetric Particles, LSP) sarebbero le migliori candidate per spiegare l'origine della materia oscura.

In ATLAS (e CMS) si cercano eventi in cui ci sia molta energia mancante, nei quali siano prodotti tanti getti energetici di particelle, generati dai quark prodotti dalle collisioni, e nei quali, spesso, ci sia anche la presenza di particelle leggere come

elettroni e muoni. Queste caratteristiche ci aiutano a selezionare questi rari eventi dal gigantesco fondo di eventi prodotti nell'interazione dei protoni. Dopo più di due anni di presa dati siamo riusciti soltanto ad escludere alcune delle regioni dello spazio dei parametri ipotizzati dalla SUSY, ma la strada è ancora lunga e la Supersimmetria potrebbe essere ancora dietro l'angolo.

Il Large Hadron Collider è dunque lo strumento che potrebbe dare, attraverso le scoperte che ci aspettiamo ancora di fare, una risposta per la costruzione di una nuova teoria che ci consenta di rispondere a queste domande. Già nel 2015 ricominceremo a prendere dati quasi all'energia di progetto di LHC (13 invece di 14 TeV) e forse riusciremo a scoprire finalmente qualche sparticella o, perché no, potremmo invece capire che qualche altra teoria, come quella della esistenza di altre dimensioni oltre quelle conosciute, è proprio quella giusta per svelare i misteri della natura che ancora ci sono ignoti.



**Edoardo Gorini:** è nato a Napoli dove si è laureato in Fisica ed ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Fisica nel 1988. È Professore Associato di Fisica Sperimentale dal 1999 all'Università del Salento dove insegna Fisica ai Collisori, Analisi Statistica dei Dati e Laboratorio V. Svolge la sua attività di ricerca nell'ambito della Fisica Sperimentale delle Particelle Elementari agli Acceleratori con il Gruppo I dell'INFN. Ha partecipato a diversi esperimenti di Fisica delle Alte Energie (NA10, CHARM II e ATLAS al CERN di Ginevra, E771 al Fermilab di Chicago, KLOE ai LNF di Frascati) e a diversi Test Beams al CERN. È attualmente il responsabile per Lecce dell'esperimento ATLAS all'acceleratore LHC del CERN. È coautore di più di 350 pubblicazioni su riviste internazionali.



---

# ATLAS: un esperimento al CERN di Ginevra

**Andrea Ventura**

*Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi", e INFN - Sezione di Lecce.*

---

**U**na collaborazione di 3000 scienziati per uno degli esperimenti di Fisica delle Particelle più grandi del mondo.

Dai primi passi mossi all'inizio dello scorso secolo nella ricerca dei meccanismi che governano i costituenti fondamentali della materia e le loro interazioni, la Fisica delle Particelle Elementari ha subito fino ad oggi un'evoluzione del tutto straordinaria, superiore per molti aspetti a quella avvenuta in molti altri settori della scienza moderna. Sul piano sperimentale, in particolare, i risvolti che delineano la portata di questo epocale cambiamento hanno implicazioni non soltanto nel contesto squisitamente scientifico della fisica particellare, ma conducono anche a considerazioni su vari ambiti della conoscenza e dell'esperienza, aprendo così la strada a sempre più avvincenti sfide di carattere tecnologico, ma anche umano e sociale. Se fino a pochi decenni fa le più mirabili scoperte della fisica subnucleare si erano dimostrate possibili grazie a strumentazioni di laboratorio certamente all'avanguardia, ma con costi tutto sommato sostenibili dal bilancio scientifico di una singola nazione, e coinvolgendo un numero ristretto di scienziati, per quanto di eccellente ed irripetibile levatura, col passare del tempo sono cresciute enormemente le richieste in termini di risorse umane, tecnologiche e quindi finanziarie, necessarie a completare il quadro delle conoscenze man mano acquisite.

Dopo una lunga serie di esperimenti che si sono tenuti, e continuano a svolgersi, in alcuni dei più rinomati laboratori di tutto il mondo, grazie al lavoro di generazioni e generazioni di fisici, oggi la più grande impresa di ogni tempo nello studio sperimentale delle interazioni fondamentali si trova al CERN di Ginevra ed è costituita dal Large Hadron Collider (LHC) e dai suoi quattro esperimenti principali (ATLAS, CMS, ALICE e LHCb).

L'acceleratore LHC è collocato in un tunnel sotterraneo della lunghezza di quasi 27 km, al confine tra il territorio svizzero e quello francese. È lo stesso tunnel che fu inizialmente impiegato per ospitare il Large Electron-Positron Collider (LEP), l'acceleratore  $e^+e^-$  entrato in funzione nel 1989, e che, in poco più di un decennio di presa dati, ha consentito una serie straordinaria di test di precisione del Modello Standard, tra cui la misura della massa dei bosoni Z e W, e la determinazione del numero di famiglie di neutrini leggeri, fino a sfiorare nel 2000, senza successo, la possibilità di dare evidenza sperimentale dell'esistenza del bosone di Higgs attorno a una massa di 114 GeV. Progettato per accelerare protoni all'energia nel centro di massa di 14 TeV, LHC ha subito circa tre anni di ritardo rispetto all'avvio previsto nel 2005, per poi ricevere una brusca interruzione di oltre un anno quando, nel settembre 2008, un grave incidente causò una copiosa fuga di gas, compromettendo il funzionamento dei tubi a vuoto e di alcuni dei circa

1700 magneti superconduttori in lega di niobio e titanio, per i quali il sistema criogenico basato su elio liquido superfluido deve operare alla temperatura di appena 1.9 K.

Alla ripresa delle attività, LHC ha stabilito nel 2010 il record della massima energia mai raggiunta presso acceleratori di particelle (7 TeV), fino ad allora appartenente al Tevatron, migliorandolo nel 2012 (8 TeV) con una crescente luminosità istantanea, il cui valore più elevato finora ottenuto ( $7.73 \cdot 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) è solo di poco inferiore ai  $10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  previsti dal progetto. La presa dati protone-protone si è ultimata lo scorso 17 dicembre, con una luminosità integrata complessiva di circa  $25 \text{fb}^{-1}$ , una considerevole mole di dati che ha permesso agli esperimenti collegati di effettuare tantissime misure della fisica nota e di estendere notevolmente molti limiti di esclusione alla ricerca di nuovi scenari, fino a culminare con la scoperta di una nuova particella a 125 GeV compatibile con l'attesissimo bosone di Higgs.

A beneficiare dei dati fin qui raccolti sono stati soprattutto ATLAS e CMS, i due esperimenti *general-purpose* di LHC, costruiti per interessarsi ad un ampio spettro di canali di fisica, mentre i programmi di ALICE e LHCb si sono maggiormente concentrati in settori più specifici: la fisica degli ioni pesanti e le proprietà dei mesoni B, rispettivamente. Nel caso di ATLAS, le imponenti dimensioni dell'apparato sperimentale (oltre due volte quelle della Cappella Sistina) o anche il numero elevatissimo di canali di elettronica ad esso connessi (qualcosa come cento milioni) o la lunghezza complessiva dei cavi impiegati (oltre 3000 km), suggeriscono solo una parte dell'immenso sforzo profuso per produrre risultati di fisica in questo campo. Il *modus operandi* dell'intera Collaborazione ATLAS, un vero e proprio esercito di 3000 persone tra fisici, ingegneri e tecnici, è esso stesso un aspetto determinante che può dare l'idea di come attualmente si sia evoluta la ricerca sperimentale nel settore della fisica particellare. La Collaborazione si articola e si organizza in base a regolamenti e procedure ormai collaudati da due decenni, attraverso appositi comitati, sia eletti che nominati, che assicurano lo svolgimento ottimale di tutte le attività previste nelle varie fasi dell'esperimento, dalla formazione dei gruppi di lavoro fino alla pubblicazione dei risultati delle analisi. A colla-

borare ad ATLAS vi sono circa 180 università e istituti di ricerca da una quarantina di paesi di tutto il mondo: ci sono ricercatori e professori di tutte le età, ma anche studenti, dottorandi e post-doc, i quali dedicano la maggior parte del proprio tempo per contribuire al successo dell'esperimento in base alle loro conoscenze e alle loro capacità, cooperando senza distinzione di condizione sociale, politica o religiosa. Al di là dei ruoli e delle competenze ogni membro della Collaborazione è tenuto a svolgere del lavoro di servizio, opportunamente definito e certificato, necessario al funzionamento di qualche parte dell'esperimento. Tale lavoro deve essere svolto per un determinato periodo nella fase di ingresso nella Collaborazione al fine di potersi qualificare ed ottenere così il diritto di firmare gli articoli tecnici e scientifici di ATLAS e, successivamente, in modalità più o meno continuativa nel tempo a seconda del tipo di attività ed in base ad un ben definito sistema di crediti.

Oltre ai periodici incontri plenari, il CERN ospita quotidianamente gran parte delle riunioni relative agli esperimenti e alle sue varie componenti. Per ottimizzare la logistica di una collaborazione così vasta, la partecipazione di tutti i membri coinvolti in ogni attività è consentita da collegamenti in videoconferenza tramite un apposito sistema di connessione, ed anzi, una grossa parte delle riunioni avviene solo per via telematica, tipicamente fissando orari nella parte centrale della giornata, il più possibile vantaggiosi per tutti i fusi orari dalla costa pacifica americana al Giappone e all'Australia. La comunicazione interna è resa efficiente anche grazie all'impiego di mailing list e di sharepoint, organizzati centralmente e continuamente mantenuti ed aggiornati. Dove possibile, alcune delle attività dei turni necessari al funzionamento dell'apparato durante la fase di presa dati sono rese possibili anche in remoto da tutte le sedi attraverso l'abilitazione di postazioni-computer autorizzate tramite connessione protetta.

I risultati ottenuti e i documenti prodotti dai membri della Collaborazione si possono suddividere in due categorie: quelli privati e quelli pubblici. La documentazione privata può essere visionata solo all'interno di ATLAS, e normalmente viene scritta e rilasciata su un sistema dedicato (CDS, CERN Document Server) per fina-



**Figura 1:** Alcune delle persone che partecipano alla collaborazione ATLAS, ad una riunione tenutasi a Copenhagen nel maggio 2012.

lità tecniche, di servizio o di supporto. Qualora necessario o richiesto dagli autori, un documento privato può essere sottoposto ad una procedura di revisione interna (tramite esperti/responsabili opportunamente selezionati), dopo la quale può essere approvato e reso pubblico: è questo il caso, ad esempio, dei talk o dei poster da presentare presso conferenze internazionali, su invito o tramite sottomissione di abstract, e dell'eventuale preparazione degli atti di convegno. La documentazione pubblica, una volta approvata, può essere proposta per la pubblicazione su riviste internazionali a nome di tutta la Collaborazione: in tal caso sono previste ulteriori fasi di controllo interno a cura di comitati editoriali e di revisione, dopo le quali finalmente può avvenire l'invio della bozza di articolo ad una rivista scientifica specializzata, seguito dal normale processo di referaggio in vista della pubblicazione finale. In questo modo, con riferimento all'ultimo biennio 2010-2012, ben duecento lavori sono stati pubblicati sulle più importanti riviste internazionali del settore, come pure sulle prestigiose *Nature* e *Science*, ottenendo ciascun articolo una media di 3-4 citazioni al mese.

Dal punto di vista finanziario il contributo italiano all'esperimento e, più in generale, a LHC si aggira attorno al 12%, ma ancor più rilevante è l'apporto in termini di risorse umane: infatti, oltre alle numerose responsabilità in ATLAS assegnate a nostri connazionali, negli ultimi quattro anni, fino allo scorso 28 febbraio, è stata italiana la portavoce dell'esperimento (Fabiola Gianotti), e analogamente sono italiani i portavoce (attualmente in carica o uscenti) degli altri esperimenti LHC, come pure il direttore per la Ricerca e le Tecnologie d'Informazione del CERN (Sergio

Bertolucci).

I ricercatori del Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento e della Sezione di Lecce dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare prendono parte ad ATLAS da ormai moltissimo tempo (a partire già dalla metà degli anni 1990), con impegni assai vari dalla progettazione, realizzazione e messa a punto di rivelatori, allo sviluppo e mantenimento di software per la ricostruzione online e offline dell'esperimento, occupandosi di numerosi ambiti sia di servizio (dal trigger ai programmi di ricostruzione degli eventi) che prettamente legati alle analisi di fisica (nel quadro del Modello Standard e oltre).

---

**Andrea Ventura:** Si è laureato a Lecce nel 1999 con una tesi sul monitoraggio on-line dell'esperimento KLOE presso l'acceleratore DAΦNE a Frascati, e ha conseguito nel 2003 il dottorato in fisica con uno studio su alcuni decadimenti rari dei kaoni carichi presso lo stesso esperimento. Dal 2004 fa parte della collaborazione ATLAS presso LHC del CERN, contribuendo prevalentemente al trigger dei muoni dell'esperimento e a numerosi studi mirati alla scoperta della supersimmetria, dapprima in qualità di assegnista di ricerca e, dal 2007, come ricercatore dell'Università del Salento.



---

# Esperimenti a LHC come motori di innovazione

**Gabriele Chiodini**

*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Lecce*

---

**L**a scoperta del bosone di Higgs, in particolare, e la ricerca scientifica, in generale, sono un motore vitale della modernità e della competitività globale. I ricercatori che hanno ideato e costruito gli esperimenti a LHC hanno dovuto inventare e sviluppare nuove tecnologie per perseguire gli ambiziosi scopi di fisica fondamentale che si prefiggevano. Molte di queste innovazioni hanno avuto delle ricadute tecnologiche concrete e delle applicazioni immediate nella nostra società.

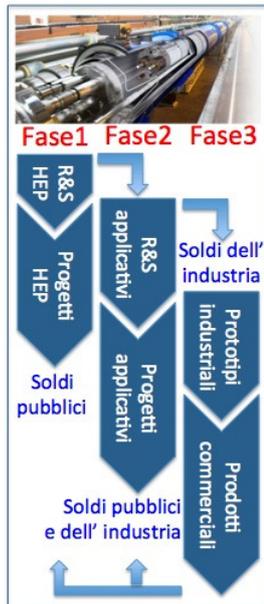
Gli strumenti complessi e sofisticati della fisica delle particelle sono ricche fonti di concetti nuovi e di tecnologie innovative che vanno a beneficio di varie discipline della ricerca ed, in un secondo tempo, producono applicazioni con un impatto significativo nell'economia, nell'industria e nella società.

Scienza di base e applicata vanno di pari passo, basandosi l'una sull'altra, e stimolandosi a vicenda. Il sostegno pubblico è decisivo per favorire questa alchimia delicata. La prosperità ed il futuro della società dipende da questo.

Il Large Hadron Collider (LHC) del CERN è il più potente acceleratore di particelle mai realizzato [1]. Il CERN è nato nel 1954, dopo la seconda Guerra Mondiale, ed oggi garantisce la condivisione di risorse e di sapere scientifico tra

i 20 Stati Membri Europei e favorisce collaborazioni con scienziati da tutto il mondo. A LHC si fa ricerca pura per capire come è fatto l'universo, e stupefacenti innovazioni tecnologiche sono state necessarie per la sua costruzione e per il suo funzionamento.

Il progetto LHC nasce agli inizi degli anni novanta come risposta europea al progetto concorrente statunitense Superconducting Super Collider (SSC) che doveva essere costruito in Texas in un nuovo tunnel da 87 km e con una energia nel centro di massa di 20 TeV. LHC aveva a disposizione il vecchio tunnel del Large Electron-Positron collider (LEP) al CERN di Ginevra, di "soli" 27 km, e puntava a raggiungere un'energia nel centro di massa di 14 TeV. Quindi, LHC all'inizio appariva uno strumento meno potente del suo competitore, ma più sostenibile da un punto di vista economico con un costo di circa 4.4 miliardi di dollari, contro i 12 miliardi stimati per SSC agli inizi degli anni '90. La necessità di costruire un nuovo acceleratore in un tunnel esistente richiese la progettazione di magneti più potenti di quelli allora esistenti per poter mantenere la traiettoria di un fascio di protoni di energia molto alta in una geometria pre-definita. Il gruppo di lavoro di LHC affrontò questa sfida ideando dipoli magneti superconduttori innovativi e compatti, con un campo nominale di 8 T e operanti a 1.8°K, una temperatura inferiore a quella della radiazione cosmica di fondo. In questo modo si riuscì a raggiungere un'energia



**Figura 1:** Il diagramma schematizza le fasi e le sorgenti di finanziamento che rendono possibile il trasferimento tecnologico all'industria delle innovazioni tecniche della Fisica delle Alte Energie (HEP) [2].

superiore alla metà di quella di SSC, ed una luminosità nominale nelle zone di interazione di circa  $10^{34}$  protoni al  $\text{cm}^2$  per secondo, ben un ordine di grandezza superiore a quella prevista per SSC.

Fu chiaro fin dall'inizio che tali scelte progettuali portavano con sé altissimi rischi per l'acceleratore e gli esperimenti. Una perdita incontrollata della superconduttività dei magneti, a seguito dell'elevata densità di energia immagazzinata, avrebbe comportato un'esplosione, come avvenne nell'incidente del 2008. La costruzione di LHC imponeva, inoltre, sfide tecnologiche innovative. I rivelatori, l'elettronica e tutta la componentistica avrebbero dovuto resistere ad un livello di radiazioni senza precedenti. Per poter ricostruire eventi contenenti interazioni multiple i rivelatori dovevano avere una granularità elevatissima ed impiegare complessi sistemi hardware per selezionare gli eventi interessanti e ridurre la quantità dei dati da salvare. Infine, un sistema distribuito delle risorse di calcolo e di immagazzinamento dati, impiegando sofisticatissimi software sviluppati ed usati da migliaia di ricercatori sparsi nel mondo, era necessario per poter compiere analisi di fisica in tempi ragionevoli.

Il CERN affrontò l'impresa impostando una

precisa strategia con le industrie della comunità europea agendo come *General Contractor* dell'acceleratore e di parti importanti degli esperimenti. Per ogni aspetto riguardante l'acceleratore e i rivelatori, questo fu fatto in due fasi separate. Nella prima fase fu definito lo schema concettuale (Conceptual Design Report), e nella fase successiva furono specificati i dettagli tecnici (Technical Design Report). I prodotti sono stati suddivisi in due categorie: standard ed innovativi. I prodotti standard (ad esempio alimentatori, trasformatori e sistemi criogenici) erano disponibili sul mercato ed erano di intera responsabilità delle ditte aggiudicatesi l'appalto. I prodotti innovativi, quelli di massima innovazione tecnologica e strategici, sono stati progettati esclusivamente per il CERN, il quale, per ridurre rischi e costi, ha acquistato direttamente le componenti e si è assunto la responsabilità della realizzazione e dell'integrazione nel sistema finale.

Circa 6400 industrie hanno avuto commesse per LHC ed i suoi esperimenti, e, successivamente, hanno registrato un aumento delle loro vendite. Per ogni euro ottenuto dal CERN, tali industrie hanno prodotto tre euro di commesse nuove di cui il 75% fuori dall'ambito di Fisica delle Particelle come: energia solare, industria elettrica, trasporti, computer e telecomunicazioni. Inoltre, hanno ridotto i costi di produzione ed innovato le procedure di qualificazione. Per l'industria italiana il bilancio meramente monetario è stato positivo: per ogni euro di fondi pubblici investito nel progetto LHC le nostre industrie hanno ricevuto un euro e mezzo di commesse, ma ciò che deve far riflettere sono le ricadute a posteriori che potranno essere valutate solo a lungo termine.

Dal 2000 al 2009 al CERN sono stati registrati 163 casi di trasferimento tecnologico di cui il 90% connessi a LHC, e uniformemente distribuiti sui quattro domini tecnologici di LHC: acceleratori, rivelatori, elettronica ed informatica. Durante la costruzione dell'acceleratore, i progetti trasferiti all'industria sono stati circa 22 all'anno, riducendosi, per ovvie ragioni, a circa 9 all'anno terminata la costruzione. Tutta la ricerca innova, ma mai come quella prodotta dalla realizzazione di LHC e dai suoi esperimenti.

In questo articolo illustrerò alcune delle ricadute tecnologiche in quattro specifici ambiti: ap-

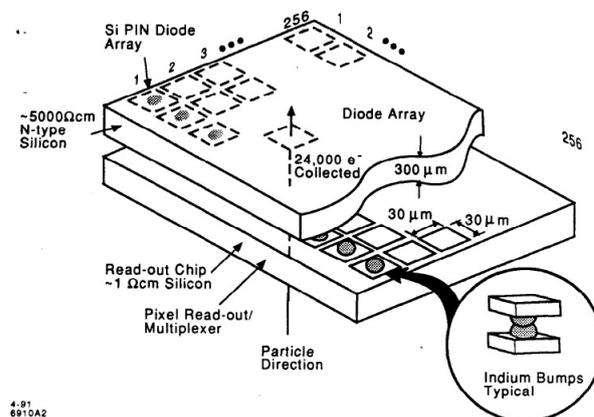
plicazioni mediche, strumentazione, tecnologie eco-compatibili e tecnologia informatica.

## Applicazioni mediche

La fisica nucleare fin dalla sua nascita ha avuto dirette ricadute nella diagnostica medica, e negli ultimi decenni anche nelle tecniche terapeutiche per la cura dei tumori. Le tecniche diagnostiche di medicina nucleare, le tomografie di vario tipo come la PET (tomografia a emissione di positroni), la SPECT (tomografia computerizzata a emissione di singolo fotone), la CT (tomografia computerizzata), sono basate sulla rivelazione di fotoni. Per avere un'immagine sempre più precisa, magari a tre dimensioni, degli organi e dei tessuti in esame, sono necessari rivelatori che riescano ad identificare il punto di emissione, o di diffusione, del fotone con sempre maggior precisione. Questa richiesta si scontra con la necessità di minimizzare la dose di radiazione assorbita dal paziente. Queste due necessità contrastanti spingono a progettare e costruire rivelatori di fotoni di sensibilità sempre maggiore e ad alta segmentazione spaziale. In questo campo, le innovazioni tecnologiche legate a LHC sono moltissime, e quindi mi limiterò a descriverne solo alcune piuttosto significative ed emblematiche.

### Rivelatori a pixel ibridi di silicio

Il rivelatore a pixel ibrido di silicio è stato interamente ideato e realizzato per gli esperimenti ad LHC. Esso rappresenta l'evoluzione naturale del rivelatore a strisce di silicio ottenuto segmentando tali strisce trasversalmente per ottenere una matrice di diodi. Una precisa ricostruzione dei vertici primari e di decadimento delle particelle richiede il posizionamento dei tracciatori a pochi centimetri dalla zona di interazione. Ad LHC il flusso di particelle è così intenso che solo un tracciatore a pixel ibridi di silicio è in grado di separare le tracce vicine prodotte da particelle cariche e anche di resistere alla radiazione. I rivelatori ibridi a pixel, diversamente dai cosiddetti monolitici come i chip CMOS delle fotocamere digitali, permettono di ottimizzare il sensore ed il chip in modo indipendente, richiedendo, però, una speciale tecnica di inter-connesione ad alta densità



**Figura 2:** Rappresentazione schematica di un rivelatore a pixel ibridi costituito da una matrice di celle di elettronica (chip di lettura) e una matrice di diodi semiconduttori (sensore al silicio) interconnessi per bump-bonding con indio mediante la tecnica di Flip-Chip [3].

mutuata dall'industria ma miniaturizzata di due ordini di grandezza.

Questo tipo di rivelatori è subito apparso molto ambizioso e necessitava di soluzioni tecnologiche avanzate che non erano allora disponibili. È composto da circa 65 milioni di diodi al silicio (pixel) grandi  $50 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$  che sono interconnessi (bump-bonding) con altrettanti canali di elettronica implementati in un chip di lettura in tecnologia CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) a larghissima scala di integrazione. Ogni pixel è dotato di un amplificatore di carica veloce, un sample-and-hold analogico ed un discriminatore di conferma. Infine, una sofisticata architettura digitale permette l'estrazione dei dati utili con una velocità senza precedenti, questo grazie alla organizzazione a colonne della lettura dei pixel e al trasferimento dei dati dei soli pixel colpiti (sparse-read-out).

Rivelatori simili ma più semplici sono impiegati per ricostruire immagini estese in diverse applicazioni: indagini cristallografiche di proteine presso sorgenti di luce di sincrotrone, radiografie di materiali presso sorgenti a spallazione di neutroni ed in campo medico.

Sui pixel ibridi denominati Medipix e Timepix si basa una nuova invenzione del CERN denominata Dosimetro Quantistico (Quantum Dosimetry). Essa comprende un algoritmo, un software ed una apparecchiatura portatile, dotata di chiave USB, in grado di determinare dose e composizione della radiazione ambientale. Il Quantum

## Elettronica del "Day After"

Lo sviluppo di elettronica resistente ad altissime dosi di radiazione è stato sempre dominio della ricerca militare, la quale ha potuto contare su notevoli finanziamenti per almeno un cinquantennio in vari paesi che avevano sviluppato armanenti nucleari. Agli inizi degli anni '90 erano disponibili diverse tecnologie elettroniche resistenti a dosi di radiazione dell'ordine di qualche Mrad ma con un livello di affidabilità molto basso, costi elevati e regole circuitali molto rigide. Il chip di lettura dei rivelatori a pixel ibridi deve resistere a dosi totali di radiazione di decine di Mrad. Questa necessità ha stimolato il gruppo di progettisti del CERN a sviluppare con successo metodologie per realizzare chip di elettronica ultra resistenti alla radiazione [4]. È stata implementata la tecnologia CMOS a larghissima scala di integrazione messa a disposizione da IBM grazie ad un accordo. In questa tecnologia lo spessore del biossido di silicio sottostante il gate dei transistor è così sottile ( $\sim 5$  nm) che, per effetto tunnel, l'accumulo di carica positiva nel canale, causato dalla radiazione ionizzante, diffonde rapidamente senza produrre spostamenti significativi della soglia. Rimaneva il problema dell'elevato spessore del biossido tra dispositivi che a seguito dell'irraggiamento produceva un aumento della corrente di leakage tra drain e source. Questi effetti sono stati eliminati impiegando transistor con il source circondato dal drain (enclosed layout transistor) ed anelli di guardia per isolare dispositivi vicini. I chip sviluppati seguendo queste regole funzionano senza difficoltà fino a dosi di centinaia di Mrad.

Dosimetry si basa sulla separazione dei diversi costituenti delle radiazioni, come elettroni, fotoni, particelle alfa, neutroni, ioni, muoni, e così via. Questa tecnologia è utilizzata per misurare la radiazione nella caverna dell'esperimento ATLAS e potrebbe avere interessanti risvolti commerciali nel futuro.

### Fotomoltiplicatori a stato solido

Tradizionalmente, la rivelazione di singoli fotoni si effettua mediante un fotomoltiplicatore. Ad esempio, nella PET i fotomoltiplicatori sono accoppiati otticamente a cristalli di scintillazione. Nel fotomoltiplicatore il fotone che incide sul catodo produce un fotoelettrone che viene poi moltiplicato mediante una struttura a dinodi posti nel vuoto, generando così un impulso di corrente in un circuito esterno. Il fotomoltiplicatore è un oggetto costoso, delicato, ha bisogno di alta tensione per funzionare e non è adatto a lavorare in campo magnetico, come in prossimità di una risonanza magnetica nucleare. Per tali ragioni, da molto tempo si cerca di rimpiazzarlo con un dispositivo a stato solido.

Fotodiodi semiconduttori sensibili alla luce sono da tempo utilizzati nella fisica delle alte energie per leggere segnali da fibre scintillanti, poiché

i grandi campi magnetici o lo spazio a disposizione impediscono l'uso di dispositivi sotto-vuoto. Un semplice fotodiodo, denominato pin-diode, è formato da uno strato di semiconduttore intrinseco a sandwich tra due strati drogati p e n. Un miglioramento rispetto a questa configurazione di base è stato il fotodiodo a valanga (APD), ove l'applicazione di una tensione di polarizzazione produce una regione con un grande campo ( $150$  kV/cm o più) in cui gli elettroni liberi generano elettroni secondari ed il segnale risulta amplificato. Questa tecnica ha il vantaggio di moltiplicare solo gli elettroni liberi generati in superficie dalla luce di scintillazione, mentre quelli generati nel diodo dall'attraversamento di particelle ionizzanti non sono amplificati. La tecnica è stata perfezionata ulteriormente all'inizio degli anni '90 riducendo notevolmente lo spessore dello strato di fotoconversione (struttura "reverse"). I cristalli scintillanti, che vengono utilizzati per la registrazione di energia elettromagnetica, sono uno dei grandi spin-off di successo della fisica delle particelle.

Lo sviluppo e l'ottimizzazione degli APD sono stati fortemente stimolati dalla realizzazione del calorimetro elettromagnetico omogeneo di CMS, il quale necessitava di circa 130000 sensori estremamente sensibili, resistenti alla radiazione, non

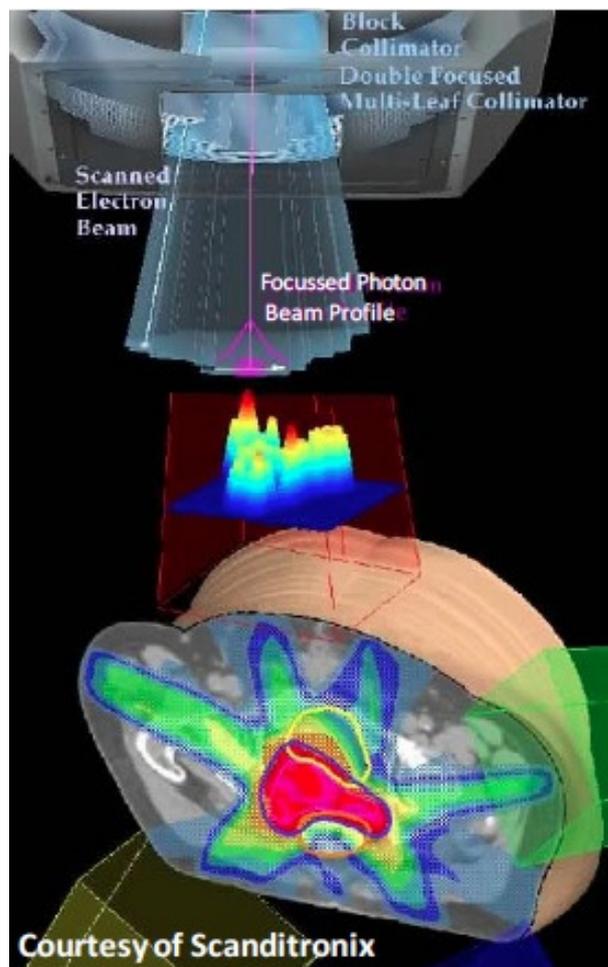
ingombranti e funzionanti in campo magnetico, per poter rilevare in modo lineare e stabile la luce di scintillazione dei nuovi e promettenti cristalli di tungstato di piombo. In questa fase di ricerca sono stati sviluppati due metodi di produzione degli APD (crescita epitassiale e diffusione) e due regimi di funzionamento (proporzionale e Geiger) [5]. Nel regime Geiger il campo elettrico è così intenso che la moltiplicazione a valanga si trasforma in una vera e propria scarica. Il dispositivo è denominato Silicon-Photomultiplier (Si-Pm) e grazie alla sua altissima sensibilità è il candidato ideale per sostituire i fotomoltiplicatori nella diagnostica PET.

## Strumentazione

La costruzione ed il funzionamento di apparecchiature complesse come gli acceleratori ed i rivelatori di particelle di grandi dimensioni, devono avvenire garantendo la sicurezza delle persone e la conservazione delle strutture. Inoltre, bisogna raggiungere la precisione richiesta dalle misure. Questi obiettivi richiedono un costante e distribuito monitoraggio e calibrazione di diverse quantità fisiche, come temperature, pressioni, tensioni elettriche, grado di purezza dei fluidi e così via. Reti estese ed integrate di sensori di ogni tipo e tecniche di monitoraggio multi-canale consentono un controllo di qualità e di intervento in tempo reale. Poiché la strumentazione e la sensoristica non erano disponibili sul mercato, oppure non erano adeguate alle necessità di LHC, nuove apparecchiature sono state inventate. A titolo di esempio riporto due dei tanti strumenti di misura inventati esplicitamente per LHC.

### Misura distribuita di temperature criogeniche con fibre

Cavi superconduttori sono comunemente utilizzati in impianti di grandi dimensioni, come ad esempio nelle centrali elettriche e negli acceleratori di particelle. Questi richiedono una temperatura di lavoro molto bassa e misure di temperatura da 1°K a 77 °K che sono possibili solo con sonde criogeniche molto costose. LHC ha sviluppato una nuova, semplice ed economica tecnologia per la misura di temperatura in un



**Figura 3:** La IMRT (Intensity Modulated Radio Therapy) è una tecnica moderna di radioterapia che consente di conformare la dose radiante all'immagine spaziale del tumore e modulare l'intensità su piccoli volumi. Focalizzando la dose sull'area tumorale si risparmia il tessuto sano circostante, con notevole riduzione dei danni collaterali del trattamento tradizionale. Un dosimetro bidimensionale è necessario per la preparazione del fascio, ed attualmente si impiega come materiale attivo il silicio. Molto più promettente è l'impiego di diamante sintetico di alta qualità depositato per CVD (deposizione chimica da fase di vapore a bassa pressione), sviluppato per monitorare i fasci di LHC e la radiazione assorbita dai rivelatori. L'impiego del diamante è di notevole interesse nel campo della clinica radioterapeutica (e quindi industriale e medica) grazie alle sue uniche proprietà: assorbimento della radiazione simile al corpo umano, elevata linearità, assenza di tossicità e resistenza alla radiazione senza precedenti [6].

ampia gamma (da 1°K a 1000°K) utilizzando un sensore costituito da una fibra ottica ed un analizzatore di spettro di luce. Una volta misurati i

parametri dello scattering stimolato di Brillouin all'interno della fibra ottica è possibile determinarne la temperatura, consentendo anche misure distribuite in sistemi di grandi dimensioni. I campi di applicazione di questa strumentazione sono molteplici: termometria criogenica a basso costo e monitoraggio-distribuito d'incendio, di perdite di olio in tubi e lungo le rive dei fiumi.

### Mappatura 3D del campo magnetico

Il controllo dei fasci in LHC e la misura di precisione dell'impulso delle particelle cariche negli esperimenti dipende in modo cruciale dalla misura e dalla verifica accurata dell'intensità dei campi magnetici prodotti. A tal scopo è stato ideato un dispositivo di calibrazione ad alta risoluzione per la misura del campo magnetico lungo tre assi. Tale dispositivo esegue una scansione completa attorno alla sfera unitaria, indipendentemente dal suo orientamento rispetto al campo magnetico, così da estrarre direzione e modulo del campo magnetico locale. Il sistema consente la calibrazione automatica e precisa dei sensori di Hall in un tempo molto breve, impossibile da ottenere con le sonde commerciali esistenti.

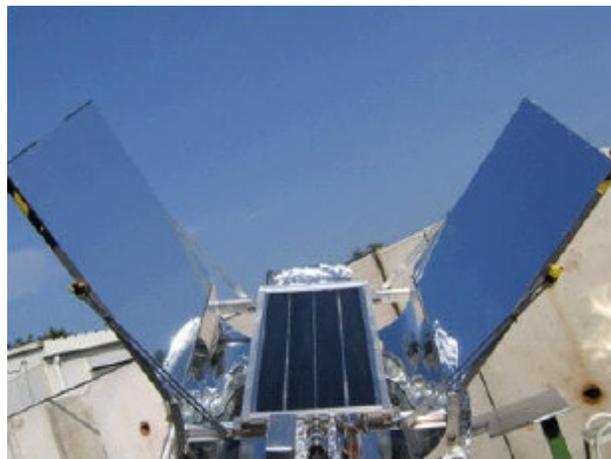
### Tecnologie eco-compatibili

LHC ed i suoi esperimenti per poter funzionare richiedono notevoli quantità di energia elettrica e di gas refrigeranti. La necessità di limitare il più possibile il consumo di energia e l'impiego di gas non ecologici ha stimolato diverse tecnologie amiche dell'ambiente con interessanti applicazioni industriali.

### Collettori solari avanzati

Il CERN ha sviluppato una nuova tecnologia per realizzare collettori solari avanzati che funzionano sia con luce solare diretta che con quella diffusa ed hanno elevate temperature di esercizio (fino a 450 °C). Tali dispositivi trovano impiego nella produzione di acqua calda, nel riscaldamento e raffreddamento di edifici, nella produzione di energia elettrica e nella desalinizzazione dell'acqua marina.

I collettori solari sono dispositivi utilizzati per assorbire e trasferire l'energia solare in un fluido



**Figura 4:** Un'immagine del collettore solare ad ultra-alto vuoto a schermo piatto realizzato al CERN impiegando diverse tecniche sviluppate per LHC e pienamente commercializzato (ad esempio l'impianto di 1200 metri quadri realizzato all'aeroporto di Ginevra).

di immagazzinamento. Tradizionalmente sono costituiti da tubi (o piastre annerite) di assorbimento inseriti in un contenitore chiuso frontalmente da una finestra trasparente. Per ridurre le dispersioni termiche ed incrementare la temperatura di utilizzo, senza ricorrere a specchi concentratori, spesso si realizzano sistemi sotto-vuoto, così da eliminare le perdite dovute alla convezione e conduzione molecolare dell'aria.

Il CERN ha creato collettori solari altamente competitivi e più promettenti di quelli esistenti grazie all'impiego delle tecniche di ultra-alto vuoto sviluppate per LHC, come, ad esempio, il pompaggio continuo di gas ottenuto con rivestimenti a film sottile di Getter non evaporabili (NEG). Questi rivestimenti, prodotti attraverso la tecnica di sputtering, possono recuperare la loro reattività chimica (cioè la funzione di pompaggio) mediante riscaldamento a partire da temperature di 180 °C. I NEG sono stati caratterizzati con 20 diversi tipi di materiali e trovano moltissime applicazioni in pompe innovative, in tubi catodici, in componentistica da vuoto di ogni tipo nella microelettronica e nell'isolamento termico sotto-vuoto a bassa ed alta temperatura.

### Unità criogenica a risparmio energetico

Durante lo sviluppo del progetto LHC sono stati necessari molti test con magneti superconduttori. Al fine di ridurre i costi è stata sviluppata una

nuova configurazione per il raffreddamento dei magneti superconduttori costituita da due parti: il criostato ed il recipiente di recupero. Quando si verifica una perdita di superconduttività ed un conseguente rapido aumento della resistenza e della temperatura, nel criostato la pressione aumenta e l'elio liquido viene spinto rapidamente nel recipiente di recupero dove viene immagazzinato per un uso successivo. Quando il cosiddetto "quench" del magnete è finito, la pressione nel criostato scende, la differenza di livello idrostatico tra i vasi e la caduta di pressione fanno rifluire l'elio liquido nel criostato e si riavvia il raffreddamento. In questo modo si riduce il periodo di recupero di un fattore tre e si possono risparmiare fino a 7,5 kg di elio per quench, con notevoli vantaggi economici.

### **Sistema di raffreddamento integrato a CO<sub>2</sub> bi-fase**

Un sistema di raffreddamento innovativo a fase liquida e gassosa di CO<sub>2</sub> è stato sviluppato al CERN sia per il tracciante a silici dell'esperimento LHCb (studio del quark b) a LHC, sia per l'esperimento AMS (Anti-Matter-Search) posto sulla stazione spaziale internazionale. Il sistema è costituito da un accumulatore per il liquido di raffreddamento, integrato con uno scambiatore interno di calore, controllato da un semplice riscaldatore posto nell'accumulatore. Questo schema integrato di raffreddamento è facile da utilizzare, molto economico e impiega un gas poco costoso ed ecologico. Esso trova molte applicazioni in apparecchiature hi-tech ed in tecnologie pulite.

### **Tecnologie informatiche**

Le tecnologie informatiche hanno reso possibile la gestione, a diversi livelli e fasi, di una sistema complesso senza precedenti quale è quello costituito da LHC, dai suoi rivelatori e anche dalla comunità internazionale di scienziati coinvolta. In questo ambito LHC non solo ha creato nuove tecnologie ma addirittura ha creato nuovi paradigmi, quali il calcolo distribuito ed il tele-lavoro. Sono numerose le innovazioni legate al cosiddetto campo dell'*Information Technology* (IT) scaturite dalla costruzione e dal funzionamento di LHC

e dei suoi rivelatori. Vorrei però menzionarne solo alcune che hanno la caratteristica comune di essere necessarie per il successo del programma di fisica di LHC e nel contempo hanno un impatto significativo in altri campi scientifici e sociali: i software di simulazione, i database ed il calcolo distribuito GRID.

### **Geant4**

La collaborazione internazionale di fisici e scienziati informatici denominata Geant4 ([7]) ha sviluppato un toolkit software basato sul linguaggio object-oriented C++ per la simulazione del passaggio di particelle attraverso i rivelatori. Oltre alla fisica delle alte energie, nucleare e degli acceleratori, Geant4 trova applicazione negli studi in medicina e nella scienza dello spazio dove è necessario simulare con precisione le interazioni primarie e secondarie tra radiazione e apparato sperimentale. Il rapporto aperto e di collaborazione tra il team di sviluppo e le sue utenze ha portato ad un trasferimento di tecnologia bidirezionale. Infatti gli utenti, in settori anche diversi dalla fisica delle particelle, hanno contribuito attivamente allo sviluppo del software menzionato.

Geant4 oramai riveste un ruolo leader nella progettazione di esperimenti e macchinari, nello sviluppo di programmi di ricostruzione fornendo i dati grezzi simulati, nonché nella comprensione dell'influenza dei processi di background e degli effetti della radiazione sui dispositivi elettronici. In particolare Geant4 possiede un set esteso di modelli di interazioni elettromagnetiche e adroniche e può essere utilizzato per affrontare una vasta gamma di applicazioni mediche per la radioterapia (fotoni), per la brachiterapia (sorgenti radioattive), per la adroterapia (adroni carichi) e per la terapia a cattura di neutroni del boro.

### **Database**

Grazie al progetto Openlab del CERN che vede la collaborazione con diverse case produttrici di software, è stato possibile avere a disposizione hardware, software e prodotti di rete innovativi ancor prima della loro commercializzazione. Openlab è stato un banco di prova ideale per la valutazione e l'integrazione di nuove tecnologie

## GRID e CLOUD a confronto

Cloud e Grid computing [9] sono i principali esempi di architetture di calcolo distribuito, entrambi utilizzati per risparmiare calcolo massimizzando le risorse esistenti. Al CERN sono in corso esperimenti pilota per sostituire la Grid con la Cloud, nella speranza di rendere il calcolo distribuito più "user-friendly", sfruttare le nuove potenzialità offerte dal mercato e magari risparmiare in risorse e costi di gestione. La Cloud infatti nasconde i veri processi necessari per svolgere il lavoro richiesto dall'utente, permettendo all'utente di usufruire di vari servizi senza investire nell'architettura sottostante.

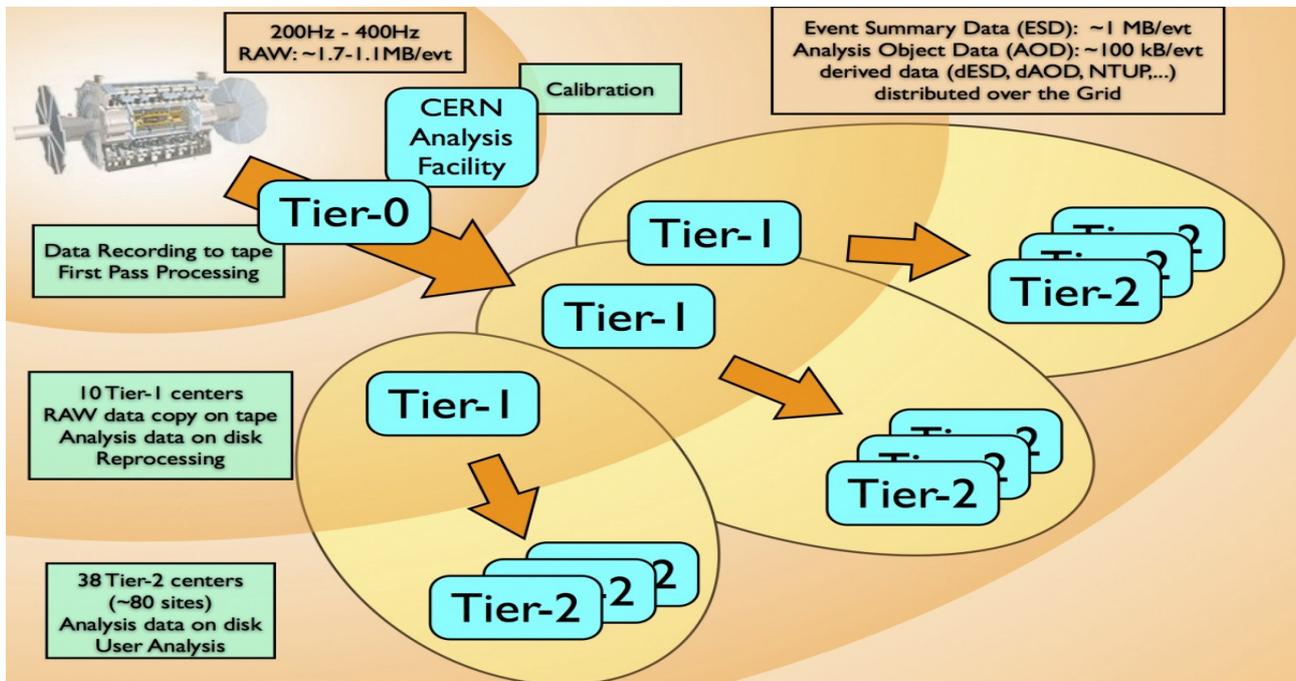
Il Grid computing è un modello decentrato di risorse in cui la computazione potrebbe verificarsi su diversi domini, mentre il Cloud computing è un modello centralizzato. La griglia è un insieme di computer che è di proprietà di più parti che stanno in più posizioni e sono collegati tra loro in modo che gli utenti possano condividere la potenza combinata delle risorse. La Cloud è un insieme di computer solitamente di proprietà di un unico soggetto. Esempi di griglie sono: WLCG e FutureGrid. Esempi di Cloud sono: Amazon Web Services e Google App Engine, ed esempi di servizi della Cloud sono: Dropbox, Gmail, Facebook, Youtube e Rapidshare. In un grid computing il numero di Virtual Machine (o istanze di lavoro) non può superare il numero di server fisici. Questo sistema si presta bene per lavori separabili in numerose piccole porzioni parallele, esose di risorse di calcolo ed eseguite su più macchine con un server di controllo che si occuperà prevalentemente di gestire l'ordine temporale dei lavori. Nel Cloud computing, invece, il numero di Virtual Machine supera sempre il numero di server fisici, quindi su una macchina girano contemporaneamente numerose piccole istanze e quindi non è possibile concepire un meccanismo di ordinamento temporale delle stesse.

e servizi, grazie alla realizzazione di soluzioni d'avanguardia su larga scala che si renderanno utili nel mercato tradizionale. Ad esempio il colosso Oracle è stato in grado di sviluppare prodotti migliori grazie alla collaborazione Openlab. Oracle ha indubbiamente aiutato il CERN a disporre della miglior tecnologia esistente per la gestione dei database e, a sua volta, il CERN ha aiutato Oracle a migliorare i suoi prodotti nel settore pubblico, nella sanità, nell'istruzione e nell'industria. LHC ed i suoi esperimenti usano una varietà immensa di database: costanti di calibrazione, configurazioni hardware e geometriche degli apparati, gestione di conferenze e turni, e così via.

### Grid

Senza la griglia (Grid [8]) i progressi scientifici della fisica delle alte energie negli ultimi decenni non sarebbero stati possibili. La collaborazione del Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) è stata fondata nel 2002 per fornire l'enorme potenza di calcolo necessaria agli esperimenti di LHC. La griglia è un modo per legare tutte le risorse

insieme e farle sembrare come un'unica risorsa. Essa differisce da un cloud pubblico, in cui i dati ed i mezzi di calcolo sono in genere alloggiati in uno o qualche data center gestiti centralmente con utenti che si connettono a tali risorse. La griglia è composta da oltre 170 centri di calcolo in 36 paesi, e questo la rende la più grande rete di calcolo scientifico in tutto il mondo. È costruita su tre livelli: il Tier-0, che si trova al CERN, con una capacità di calcolo di circa 68.000 core, cioè circa un terzo della capacità totale della Grid. Il Tier-0 è collegato con i centri Tier-1, che sono in genere gli istituti di ricerca regionali, normalmente uno per nazione, e ognuno di questi ultimi è collegato con una serie di centri di calcolo Tier-2, per lo più situati nelle università. La larghezza di banda utilizzata è impressionante. Infatti la connessione tra il centro Tier-0 ed i centri Tier-1 è garantita per un flusso continuo di dati tra 1,5 e 2 Gbyte/s con un flusso mondiale di dati relativi a LHC tra i 7,5 e i 10 Gbyte/s. Nella presa dati del 2011 e del 2012 il solo esperimento ATLAS ha generato circa sei petabyte di dati grezzi ed una quantità analoga di dati derivati.



**Figura 5:** Il Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) degli esperimenti di LHC. In alto a sinistra il rivelatore dell'esperimento ATLAS produce dati grezzi (digitalizzati o RAW) organizzati in eventi ad un ritmo di 200-400 Hz di dimensioni di 1.1-1.7 MB per evento. L'evento contiene tutte le informazioni necessarie a ricostruire i segnali elettrici indotti nelle parti attive del rivelatore al passaggio delle particelle prodotte nelle collisioni primarie tra protoni accelerati, al fine di studiare le interazioni fondamentali della natura. I dati grezzi in tempo reale vengono poi ridotti in dati strumentali, denominati Event Summary Data (ESD), contenenti coordinate spazio-temporali, tracce ed energia delle particelle. A loro volta gli ESD vengono ridotti in dati fisici, denominati Analysis Object Data (AOD), contenenti direzione ed energia di particelle cariche, di fotoni e di adroni. I dati RAW, ESD e AOD vengono copiati in tempo reale dal Tier-0, situato al CERN, nei centri regionali, denominati Tier-1, che a loro volta li duplicano, in parte, nei vari Tier-2 per le analisi di fisica, condotte su un insieme ridotto di dati derivati (D3PD). Oltre alla ricostruzione dei dati dei rivelatori, sulla griglia si producono anche dati simulati mediante ciò che la teoria fondamentale prevede nel rivelatore. I dati simulati sono quelli che impiegano gran parte delle risorse di calcolo e disco.

Oggi la Grid è in grado di sostenere un traffico di dati settimanale di circa 1.5 petabyte su una topologia complessa di centri Tier. La facilità d'accesso a grandi volumi di dati è stata fondamentale per utilizzare al meglio il potenziale di fisica degli esperimenti di LHC. Il volume dei dati è particolarmente elevato perché gli esperimenti dispongono di circa 100 milioni di canali di lettura. Inoltre, LHC ha fornito dei record di luminosità senza precedenti nel 2012, causando una sovrapposizione di collisioni protone-protone per evento (pile-up) oltre il livello di progetto della macchina.

Per i primi due anni l'infrastruttura di grid computing ha gestito 15-20 petabyte di dati ogni anno. Quest'anno il CERN prevede di produrre fino a 30 petabyte di dati. Da questa prima esperienza di successo si stanno già traendo le

conclusioni e ad esempio, si pensa di cambiare i modelli di calcolo per richiedere meno copie dei dati in tutto il mondo e per ridurre i byte necessari a memorizzare un evento. Si stanno valutando tecniche di collocamento dati più dinamiche, si sta estendendo l'uso di tecniche di accesso remoto, e si stanno impiegando unità di elaborazione specializzate (originariamente sviluppate per la grafica al computer) e processi *multi-threading*.

## Limiti del modello attuale

Fino alla fine degli anni '90 la struttura e l'organizzazione del lavoro di ricerca nella fisica delle alte energie imponeva lo sviluppo di soluzioni innovative a vari problemi, soluzioni che venivano ideate e realizzate all'interno della stessa comunità dei ricercatori. Per questo motivo i fisi-

ci delle alte energie primeggiavano in moltissimi campi: le ampie collaborazioni internazionali richiedevano scambio di informazioni in tempo reale, era necessario sviluppare tecniche avanzate di software e di elaborazione massiva di dati, utilizzare elettronica a larghissima scala di integrazione, e molto altro. Questo carattere di avanguardia e di frontiera, ma anche un po' d'élite, si sta perdendo, anche se questo fatto non è sempre avvertito in modo cosciente.

La ragione di questo cambiamento è dovuta al fatto che, oggi, i tempi per progettare, costruire ed esplorare la fisica di un esperimento sono di gran lunga maggiori di quelli dell'evoluzione delle tecnologie nella società. Si pensi allo sviluppo delle tecnologie informatiche e della rete di comunicazioni (ad esempio e-cloud e telecomunicazioni wire-less).

Per meglio chiarire questo aspetto, è utile ricordare che gli esperimenti a LHC hanno congelato gran parte della tecnologia utilizzata agli inizi degli anni 2000 per poter costruire l'acceleratore ed i rivelatori, ed essere pronti a raccogliere dati nel 2010. Se la fase progettuale e costruttiva è stata molto lunga rispetto al passato, al contrario, l'analisi accurata dei dati, con la conseguente scoperta del bosone di Higgs, è stata estremamente rapida. Questo grazie ad una tecnologia non disponibile nel 2000, la grid computing, e ad una innovativa organizzazione del lavoro, che ha portato alla certificazione completa e scrupolosa dei componenti di LHC e dei rivelatori.

La velocità di innovazione tecnologica e di organizzazione del lavoro, presente attualmente nella nostra società globalizzata, impone alla fisica delle alte energie un cambio di passo, in parte già messo in moto.



- [1] AA.VV.: "The Large Hadron Collider. Conceptual Design" CERN/AC-95-05 (LHC) (October 20, 1995).
- [2] JEAN-MARIE LE GOFF: The impact of CERN on high tech industry developments. Focus: The construction of the LHC. In: *Workshop: Research infrastructures for industrial innovation European Commission*. Brussels, (October 20, 2011).
- [3] M. WRIGHT, J. MILLAUD, AND D. NYGREN: A pixel Unit-Cell Targeting 16 ns Resolution and Radiation Hardness in a Column Read-Out Particle Vertex Detector. In: *Proceedings of the Third International Conference on*

*Advanced Technology and Particle Physics* Como, Italy, (June 22-26, 1992).

- [4] P. JARRON: Radiation tolerant electronics for the LHC experiments. In: *Proceedings of the 4th Workshop Electronics for LHC experiments*. Rome, Italy, (September 21-25, 1998).
- [5] D. RENKER: "Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems.", *Nucl. Instrum. and Meth.* **A567** (2006), 48-56..
- [6] M. BRUZZI, C. DE ANGELIS, M. SCARINGELLA, C. TALAMONTI, D. VISCOMI, M. BUCCIOLINI: "Zero-bias operation of polycrystalline chemically vapour deposited diamond films for Intensity Modulated Radiation Therapy", *Diamond and Related Materials* **20** (2011), 84-92.
- [7] S. AGOSTINELLI ET AL.: "Geant4 - a simulation toolkit", *Nucl. Instrum. and Meth.* **A506** (2003), 250-303.  
J. ALLISON ET AL.: "Geant4 developments and applications", *IEEE Transactions on Nuclear Science* **53 No. 1** (2006), 270-278.
- [8] AA.VV.: "LHC Computing Grid: Technical Design Report", CERN-LHCC-2005-024 (20 June 2005).  
AA.VV.: "LHC e la Big Science come modello: Computing Grid: Technical Design Report" CERN-LHCC-2005-024 (20 June 2005).
- [9] <http://www.networkworld.com/news/2012/071112-higgs-boson-cloud-computing-260827.html>  
<http://www.brighthub.com/environment/green-computing/articles/68785.aspx>

---

**Gabriele Chiodini:** Nato a Bergamo nel 1967. Si è laureato a Milano nel 1995 con una tesi sui rivelatori a pixel al silicio per ATLAS a LHC e nel 1998 ha conseguito il PhD con uno studio sperimentale sulla turbolenza nei plasmi. Dal 1999 al 2002 è stato ricercatore al Fermi National Accelerator Laboratory di Chicago dove ha lavorato alla proposta dell'esperimento BTeV e all'analisi dei dati dell'esperimento FOCUS. Dal 2003 è ricercatore presso la sezione INFN di Lecce dove è inserito nel gruppo di lavoro della collaborazione ATLAS a LHC. Attualmente si interessa dello sviluppo dei rivelatori a diamante che potrebbero essere utilizzati nella nuova configurazione di LHC. È membro della commissione scientifica nazionale tecnologica INFN e responsabile nazionale dell'esperimento DIAMOND PIXEL.

---

# Sociologia e psicologia nella fisica sperimentale

**John Hauptman**

*Department of Physics and Astronomy, Iowa State University*

---

**L**a costruzione di un grande rivelatore o strumento coinvolge non solo la Fisica e l'Ingegneria, ma anche complesse relazioni tra persone e loro ego, finanziamenti e competizioni per averli, eventi casuali, e l'assegnazione, o la non-assegnazione, di riconoscimenti e premi. Userò il genere maschile in questa presentazione perché sembra sia questo genere a causare la maggior parte dei problemi. È improbabile che ci siano cure.

La comunità dei fisici delle alte energie non è grande, almeno se confrontata con la comunità degli astrofisici o con quella dei fisici della materia condensata, ed è addirittura minuscola nei confronti di molte comunità culturali, nazionali e politiche. Tuttavia, è una comunità unica in molti aspetti, che rompe con tradizioni e regole che altre comunità seguono ancora. Tuttavia, in molti aspetti, i fisici sono umani come tutti, e con le stesse debolezze.

C'è un libro meraviglioso che tratta queste tematiche: la costruzione del satellite COBE che ha misurato con grande precisione la radiazione cosmica di fondo. L'autore è l'attuale project leader, John C. Mather, che ha concepito, progettato, costruito e gestito questo progetto di circa un miliardo di dollari dall'inizio alla fine [1]. Il suo libro comprende tutto quanto è scritto qui, inclusi quegli eventi casuali che accadono inaspettatamente, siano positivi oppure no. A lui è

**T**he building of a large detector or instrument involves not only the physics and engineering, but the complex interplay of people and their egos, funding and competition for it, random events, and the allocation, or misallocation, of awards and recognitions. I will use the masculine gender in this discussion since this seems to be where most problems occur. Cures are unlikely.

The community of high energy physicists is not large, at least not compared to the astronomy or condensed matter physics communities, and it is tiny compared to most cultural, national and political communities. Nevertheless, it is a unique community in many ways, breaking with tradition and rules that other communities still follow. In most respects, however, physicists are just as human as everyone else, and with all the same failings.

There is a gem of a book about all of these issues: the building of the COBE satellite that measured with high precision the cosmic black-body background radiation. The author is the actual project leader, John C. Mather, who conceived, designed, built, and managed this billion dollar project from start to finish[1]. His book encompasses all that is written here, including those random events that unexpectedly happen, either beneficial or not. He was awarded the No-

stato assegnato il premio Nobel nel 2006.

Ci sono vari libri riguardanti personalismi sul posto di lavoro, sotto la categoria generica di *come lavorare con persone difficili*, e uno riguardante proprio la fisica delle alte energie [2].

La gente, in generale, vede i fisici come persone diverse, e i fisici *sono* differenti in molte, e ovvie, maniere: più intelligenti, più analitici, più critici, più impegnati nel lavoro, e spesso con un sofisticato ed eccellente sense of humor. Può essere una combinazione di due effetti: il primo è un filtro che seleziona la gente che ambisce ad una carriera scientifica. Il secondo deriva dal rigoroso corso di esperienze che si fanno lavorando in fisica, quello che si impara diventando un buon fisico: l'essere critico, analitico ecc..

L'ego umano è essenziale nel nostro essere, come messo in evidenza da quegli sfortunati che non hanno un ego normale. La normalità è positiva, ma certa gente (normalmente nell'arena politica dove denaro e potere sono beni di scambio) è guidata dal proprio ego fino ad un alto grado di distruttività. Questo succede anche nel mondo dei fisici.

## Scoprire ciò che non c'è

La ricerca di un segnale fisico, come Higgs, SUSY o il pompon, è un processo molto psicologico, al di là della fisica. Ci si deve sforzare per rimanere scettici. Molto tempo fa, quando ero studente, un post-doc stava analizzando degli eventi nella camera a bolle nel canale  $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ p + \pi^+ \pi^-$ . In precedenza, la "separazione  $A_2$ " era stata misurata in un esperimento, e centinaia di considerazioni teoriche erano state pubblicate sul perché le risonanze non dovevano avere necessariamente una forma tipo Breit-Wigner<sup>1</sup> (la separazione  $A_2$  assomigliava a due gobbe di cammello). Questo post-doc passò quasi un anno intero, lavorando sere e fine settimana, facendo tagli e selezioni di dati, e finalmente mostrò il suo lavoro al gruppo: la  $A_2$  era separata, non fortemente, ma separata. C'era però un problema: tutti i suoi arditi tagli e selezioni avevano ridotto la statistica dell'insieme di eventi di un fattore 10, conseguentemente il significato statistico della separazione era molto debole. Tuttavia, lui rivendicò vittoria, ma nessuno nel gruppo ci credette. Proseguendo nel lavoro,

ble Prize in 2006.

There are numerous books on personalities in the work place, some under the general category "how to work with difficult people", and one about the high energy physics workplace itself [2].

People generally see physicists as different, and physicists *are* different in many obvious ways: smarter, more analytical, more critical, harder working, and often times with sophisticated and excellent humor. It may be a combination of two effects: the first is a selection bias that certain people pursue scientific careers. The other derives from the rigorous course of experiences in physics, those things you learn while becoming a good physicist: be critical, be analytical, etc.

Human ego is essential to our being human, as evidenced by those unfortunates lacking a normal ego. Normal is good, but some people (usually in the political arena where money and power are the commodities) are driven by ego to a destructive degree. This happens also in the physics world.

## Discovering what isn't there

Searching for a physics signal, like the Higgs or SUSY or the pompon, is a very psychological process, apart from the physics. One must force oneself to remain skeptical. Long ago when I was a student, a post-doc was analyzing bubble chamber events in the  $\pi^+ p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^+$  channel. Earlier, the "split  $A_2$ " had been reported in a counter experiment and hundreds of theoretical speculations were published on why resonances do not have to be Breit-Wigners, after all. (The split  $A_2$  looked like a double-humped camel.) He spent nearly a full year, working evenings and weekends, making cuts and selections and finally showed his work to the group: the  $A_2$  was split, not dramatically, but split. One problem: all of his funny cuts and selections had reduced the sample of events by a factor of 10, so the statistical significance of the split was very weak. Nevertheless, he claimed victory. Nobody in the group believed it. By and by, Stan Flatté in the Alvarez group did a similar analysis: the  $A_2$  was a perfect Breit-Wigner.

Stan Flatté del gruppo di Alvarez<sup>2</sup> fece un'analisi simile: la  $A_2$  era una perfetta Breit-Wigner.

A PEP<sup>3</sup> negli anni '70, il mesone composto dai quark  $s$  e  $c$ , allora chiamato  $F^*$ , era fortemente ricercato, ed era l'obiettivo della tesi di uno studente di dottorato. Trovò un picco nella massa invariante del sistema  $K^- \pi^+$ , e lavorò duramente per ridurre il fondo e aumentare il segnale del  $F^*$ . Alla fine ottenne un bellissimo picco sopra il fondo. Anche qui però c'era un problema: la sezione d'urto superava il limite dell'unitarietà.

In entrambi i casi, il fisico giovane, ambizioso, duro lavoratore era riuscito, attraverso una serie di tagli tortuosi e selezioni di dati ad innalzare il desiderato "segnale" e ridurre il "fondo". Mark Twain disse una volta "Ci sono bugie, dannate bugie, e statistica". Si può dire "Dammi un migliaio di numeri casuali e dimostrerò qualsiasi cosa". Lo studente di dottorato fu perdonato e, oggi, sta ancora facendo fisica. Da allora, il post-doc non fu più rivisto nel mondo della fisica.

Il bisogno umano di trovare quello che ci si aspetta, di verificare ciò in cui si crede e le proprie opinioni, è evidente ovunque, negli affari, in amore, e anche in fisica.

- 1 La tipica distribuzione statistica che descrive la densità di probabilità di avere una particella di massa  $M$  all'energia  $E$  nel centro di massa e con vita media  $\tau = 1/\Gamma$  è  $f(E) = C/[(E - M)^2 + M^2\Gamma^2]$  e presenta un grafico a campana con un picco in  $E = M$
- 2 Luis Alvarez (1911-1988) premio Nobel nel 1968 per le sue ricerche sulle particelle elementari. È stato per lungo tempo il direttore del Lawrence Berkeley National Laboratory (USA).
- 3 Positron-Electron-Proton allo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) di Stanford (USA).

## Creatività e tradizionalismo

Nella sua sempre giocosa maniera Einstein una volta disse "La creatività è l'intelligenza che si sta divertendo".

Luis Alvarez disse che i migliori esperimenti sono quelli appena possibili. Conoscere il confine di ciò che è possibile e, altrettanto importante, come arrivarci, richiede un'ampia conoscenza di scienza, tecnologia, ingegneria e la capacità di gestire le risorse umane e finanziarie per poterci arrivare. Queste necessità non sono ovvie, e diversi livelli di creatività sono necessari per poter completare l'esperimento, non solo rivelatori migliori, ma anche nuove soluzioni ingegneristiche. Esempi di questo possono essere i meccanismi impulsivi criogenici e rapidi di una camera a bolle di idrogeno o le cluster timing chambers quasi

At PEP in the 1970s, the strange-charm meson, then called the  $F^*$ , was a prize to find, and searching for it was the thesis of one graduate student. He found a peak in the  $K^- \pi^+$  mass, and worked hard to reduce the background and enhance this  $F^*$  signal. In the end, he had a beautiful peak above background. One problem: the cross section for its production exceeded the unitary bound.

In both of these cases, the young eager hard working physicist had managed, through a series of torturous cuts and selections, to enhance the sought-after "signal" and reduce the "background". Mark Twain once said "There are lies, damned lies, and statistics." We can say, "Give me one-thousand random numbers and I will prove anything." The graduate student was forgiven and is doing physics today. The post-doc has not been seen in the physics world since.

The human need to find what you are expecting, to validate your beliefs and opinions, is evident everywhere, in business, in love, and in physics.

## Creativity and conservatism

In his always playful manner, Einstein once said "Creativity is intelligence having fun".

Luis Alvarez said that the best experiments are those that are "just barely possible". Knowing the edge of the possible and how to get there requires a broad knowledge of science, technology, engineering, and the marshaling of the necessary human and financial resources to get there. These requirements are not obvious, and several levels of creativity may be necessary to achieve the experiment, not just better detectors but likely new engineering solutions. Examples of this might be the cryogenic and rapid pulsing mechanics of a hydrogen bubble chamber, or the nearly massless cluster timing chambers at INFN, Lecce.

prive di massa dell'INFN a Lecce.

Feynmann una volta descrisse la sua fisica creativa come "immaginazione in una giacca attillata" intendendo che si può anche avere un'idea di ampio respiro, ma non bisogna violare nulla di quanto è attualmente noto. Questo implica la domanda se tutto ciò che oggi viene considerato compreso sia anche corretto. Un modo migliore per esprimere il concetto è che nessuna nuova idea può contraddire un (corretto) esperimento.

Mi sembra che la creatività di un individuo aumenti grandemente se è in qualche modo ignorante. Non affermo questo in maniera negativa, ma spesso gli esperti sono i meno creativi perché sanno cosa aspettarsi nel loro campo, ne conoscono i confini e sanno che non c'è nulla al di fuori di essi. Una persona mediamente ignorante non è cosciente dei confini e delle regole e, quindi, può farsi domande "stupide".

Bob Sutton nel suo libro *Idee pazze che funzionano* argomenta che ci sono molte opportunità dovute all'ignoranza o all'ingenuità nei processi innovativi, e quando si affrontano problemi nuovi non è una buona idea studiare quello che hanno fatto gli altri, ma è meglio domandare ai non-esperti le loro idee.

Basandomi sulle mie osservazioni molto limitate, i fisici più intelligenti che ho conosciuto sembrava non avessero (quasi) mai nuove idee. Capivano istantaneamente una nuova idea, ma raramente generavano nuove idee. Mi chiedo se eliminassero le loro nuove idee come irrealizzabili.

## Persone senza difetti

Nella normale routine della fisica sperimentale, ci sono compiti e lavori che devono essere svolti. All'inizio un gruppo di persone appassionate sale entusiasticamente a bordo e comincia a lavorare. Altri stanno indietro, non sono coinvolti in alcun lavoro preferendo offrire consigli, fare osservazioni, ma senza affrontare alcun problema. In questo modo, questa gente senza difetti non compie mai un singolo errore, neppure piccolo.

Al contrario quelli che fanno molto lavoro, normalmente fanno alcuni errori. Quando arriva il momento di scegliere i capi dei gruppi, quelli che hanno fatto errori hanno i loro detrattori e vengo-

Feynman once described doing creative physics as "imagination in a tight straitjacket" by which he meant that you can have far-ranging ideas but you must not violate anything presently known. Well, that just begs the question whether what is presently understood is correct. A better way to put it is that no new idea can contradict a (correct) experiment.

It seems to me that creativity in an individual is greatly enhanced if that individual is somewhat ignorant. I don't mean this negatively, but often experts in a field are the least creative since they know what to expect, they know the exact boundaries, and know for sure there is nothing beyond them. A mildly ignorant person is not aware of either the boundaries or the rules and, therefore, able to ask "stupid" questions.

Bob Sutton in his book "Weird Ideas That Work" argues that there are many virtues of ignorance and naivetè in the innovation process, and that when faced with a new problem it is not a good idea to study what others have done, but to ask non-experts for their ideas.

Based on my highly limited observations, the most intelligent physicists I have known seemed to (almost) never have a new idea. They would comprehend a new idea instantly, but seldom generated new ideas of their own. I wondered if they rejected their own new ideas as unworkable.

## The person without a blemish

In the normal course of experimental physics, there are tasks and work to be done. In the beginning, eager and good people enthusiastically come on board to start working. Others stand back, do not become involved in any actual work, preferring to offer advice, make observations, but never take on an actual problem. In this way, these people 'without a blemish' never make a single mistake, however small.

In contrast, those who actually do a lot of work have, normally, made a few mistakes. When it comes time to choose leaders for groups, those with mistakes have their detractors and are

no scartati. La persona senza difetti è promossa, e in alcuni casi comanda quelli che fanno realmente il lavoro. La persona senza difetti vuole comandare, non lavorare.

Una personalità analoga ambisce a diventare l'aiutante del capo. Essere d'aiuto al capo può, a volte, permettere di sembrare un capo, e questo è il punto. Per una persona appena competente, questo tipo di leadership è facile, richiede solo di inviare messaggi elettronici per annunciare i prossimi incontri, e, a volte, in questi incontri fare il giro del tavolo invitando quelli che svolgono veramente il lavoro a "riferire del loro lavoro".

Ho visto questo gioco finire tragicamente per alcuni giovani. Essi entusiaticamente cominciarono a fare il lavoro sporco in un esperimento, facendo pochi e minuscoli errori, solo per scoprire che alla fine del gioco venivano ignorati, mentre quelli senza difetti erano promossi.

Durante il difficile periodo della costruzione del PEP4 TPC<sup>1</sup>, uno studente di dottorato identificò sei livelli del progetto:

1. entusiasmo selvaggio,
2. disillusione,
3. confusione totale,
4. ricerca del colpevole,
5. punizione dell'innocente,
6. promozione di chi non ha partecipato.

Questo studente è stato uno dei primi entusiasti lavoratori che hanno notato che qualcuno riusciva ad evitare di lavorare, facendo invece da "cheerleader" oppure da organizzatore di riunioni. C'è qualche esagerazione in quanto ho descritto, ma questo è un fenomeno reale che ho visto accadere in vari esperimenti.

<sup>1</sup> TPC sta per *Time Projection Chamber*: un dispositivo di misura negli esperimenti di particelle elementari, inventato da D. R. Nygren a SLAC nel 1974 e sviluppato successivamente per tutti i rivelatori di moderna concezione.

## Produzione di drammi

Una volta, in un piccolo esperimento, un giovane era incaricato del software di acquisizione dati, e, in almeno due occasioni, annunciò in una riunione del gruppo che il software aveva un problema e non funzionava, e quindi bloccò l'acquisizione dei dati dell'esperimento. Chiaramente nella stanza si produsse una certa tensione, si fecero domande e vennero date risposte di scarso effetto. Procedendo, nella riunione successiva il

passed over. The person without a blemish is promoted, and in some cases given leadership over those who are actually working. The person without a blemish wants to lead, not to work.

A similar personality seeks to become a helper for the leader. Being helpful to a group leader may sometimes allow you to appear leader-like, and that's the point. For the barely competent person, this kind of 'leadership' is easy, only requiring that you can send out emails announcing the next meeting and, some times at these meetings, going around the table asking those actually working to "report on you work."

I have seen this play out tragically for some young people who enthusiastically started at the beginning doing the hard dirty work, making a few small mistakes, only to find that in the end-game they are ignored, while those without a blemish are promoted.

During the difficult construction period of the PEP4 TPC, one graduate student identified the six stages of a project:

1. wild enthusiasm,
2. disillusionment,
3. total confusion,
4. search for the guilty,
5. punishment of the innocent,
6. promotion of the non-participants.

This graduate student was one of the first enthusiastic workers who noticed that some managed to avoid work, instead acting as a "cheerleader" or a meeting organizer. There is some exaggeration here, but this is a real effect I have seen on a few experiments.

## Generation of drama

Once on a small experiment, a young person was in charge of the data-taking software and, on at least two occasions, announced at a group meeting that the software had a bug and would not run which, of course, stops the experiment. Clearly, a certain amount of tension is generated in the room. Questions are asked, helpless answers are given. By and by, at the next meeting, the young person announces that the bug has

giovane annunciò che il problema era stato individuato e risolto, tutto funziona, e ci fu a bordo un nuovo piccolo eroe.

Lo studente specifico che ho in mente era particolarmente goffo in questo gioco. Dopo un paio di volte, nessuno gli faceva più caso. Ma ho visto degli autentici maestri di questa arte annunciare crisi nei finanziamenti, crisi di tipo politico o di personale che avrebbero potuto fare grande danno all'esperimento. Procedendo con il lavoro, questi problemi vengono risolti, l'esperimento sopravvive e noi abbiamo un altro piccolo eroe.

Ognuno di noi vuole essere necessario ed amato, anche da adulto, o almeno vuole l'attenzione per il considerevole ruolo che ha svolto nell'esperimento. La maggior parte della "produzione di drammi" è innocua e, ovviamente, produce ottimo materiale per futuro divertimento.

## Casi mentali: esplosioni e sabotaggi

L'ansia è una caratteristica umana molto potente, probabilmente inserita nei nostri geni fin dai tempi in cui eravamo cacciatori. Ho visto un uomo adulto infuriarsi prima di un seminario di 10 minuti ad una riunione dell'American Physical Society, letteralmente tempestando i corridoi e gridando che pinco pallino aveva "fatto un enorme casino con tutto e distrutto l'esperimento".

In un altro esperimento, un fisico ambizioso (ma poco competente) voleva essere nominato co-responsabile di un piccolo esperimento. Questo non successe. Quindi, piano piano in un periodo di mesi, organizzò un sabotaggio del lavoro del responsabile trattenendo risultati software (ottenuti da altre persone, non da lui) e parlando male dell'esperimento con i membri di un esperimento concorrente.

In entrambi i casi, ci si può aspettare che questi comportamenti siano accompagnati da altri comportamenti inappropriati, e questo è il caso con questi due.

## "Sono il capo"

Queste persone non dicono ad alta voce che sono i capi, ma lo affermano con le loro azioni. C'è

been found and fixed, all is well, and we have new minor "hero" on board.

The particular student I am thinking about was highly clumsy at it. After a couple of these, nobody paid any more attention. But I have seen true masters of the art, announcing a crisis in funding, or a crisis in political issues, or personnel issues, that would do great damage to the experiment. By and by, these problems are solved, the experiment survives, and we have a new minor hero on board.

Everybody wants to be needed and loved, even adults, or at least they want some attention paid to the valuable role he plays in the experiment. Most of the "drama generation" is harmless and, in obvious cases, provides wonderful grist for future amusements.

## Mental cases: explosions and sabotage

Anxiety is a powerful human emotion, probably built into our genes from hunter-gatherer times. I have seen grown men go ballistic before a scheduled 10-minute talk at an APS meeting, literally storming the hallways screaming that so-and-so has "made a complete mess of everything and destroyed the experiment."

On another experiment, an ambitious (but barely competent) physicist wanted to be named co-spokesperson of a small experiment. This was not to be. So, quietly over a period of months, he set out to sabotage the work of the spokesperson by withholding software results (done by others, not him) and bad-mouthing the experiment to members of a competing experiment.

In both cases, you can expect that these behaviors are accompanied by other inappropriate behaviors, and such is the case for these two.

## "I am the boss"

These people do not actually say out loud that they are the boss, but they say it by their actions.

una certa sovrapposizione con le persone-senza-difetti ma il futuro-capo lavora, anche tanto, ma è accompagnato da un messaggio subliminale, io sono la persona incaricata e devo guidare l'esperimento. C'è bisogno di un certo talento, o almeno un po' di ironia per liberarsi di questo. Una persona che conosco ha girato per sei esperimenti negli ultimi dieci anni, in ognuno di questi cercando un ruolo da leader, ma quando questo non arrivava passava ad un altro esperimento, o cercava di costruirne uno da solo. Questo non garantisce successo in fisica, anche se può sembrare una vita interessante.

## Maya Angelou

La acclamata poetessa Maya Angelou disse una volta "Ho imparato che la gente dimenticherà quello che hai detto, dimenticherà quello che hai fatto, ma non dimenticherà mai come li hai fatti sentire." Questa è un'affermazione profonda e vera. Nel comandare un gruppo, grande o piccolo che sia, una regola fondamentale è che tu non offenda i sentimenti di nessuno.

Un commerciante chiamato Dale Carnegie scrisse un best-seller durante la Grande Depressione intitolato "Come trattare gli altri e farseli amici" (1936) e vendette mezzo milione di copie il primo anno. Ad esempio, la prima parte si intitola "Tecniche fondamentali per gestire la gente", e nelle sue 300 pagine ci sono numerose dritte e suggerimenti per trovare il modo di interagire con la gente. Molti anni fa, quando ero giovane e stupido, iniziai a leggere questo libro e dopo 30 pagine lo gettai via e conclusi che era una collezione di istruzioni di come mentire alla gente, dire loro che sono in gamba quando sono incompetenti, importanti quando sono inutili. Molti anni dopo, quando divenni più saggio, lessi il libro intero. Contiene molto buon senso. Essenzialmente, il libro è una litania di tutti i fallimenti e le fragilità dell'ego umano accompagnato da istruzioni dettagliate su come evitarle o come non esserne feriti. A titolo di esempio sul come trovare il consenso della gente nel capitolo "I segreti di Socrate", Carnegie scrive "*Parlando con la gente, ... comincia a mettere in evidenza e continua ad evindenziare le cose sulle quali siete d'accordo. ...*

There is some overlap with the person-without-a-blemish, except that the wanna-be-future-boss does actual work, even a lot of work, but it is accompanied by the sub-message, I am in charge and I am the one who should be leading the experiment. It takes actual talent, or at least a quick wit, to pull this off. One person I know has jumped around on more than six experiments in the past ten years, in each case seeking a leadership role, but when this was not forthcoming, he would move off to another experiment, or try to start one of his own. This does not guarantee a successful life in physic, although it might be an interesting life.

## Maya Angelou

The acclaimed poet, Maya Angelou, once said "I've learned that people will forget what you said, people will forget what you did, but people will never forget how you made them feel." This is a profound statement, and perfectly true of human nature. In leading a group, either large or small, a fundamental rule is that you should not hurt anyone's feelings.

An American salesman named Dale Carnegie wrote a best selling book during the Great Depression titled "How to Win Friends and Influence People" (1936) that sold a half-million copies within its first year. The first part is titled "Fundamental Techniques in Handling People", for example, and within the book's 300 pages are numerous tips and suggestions for getting your own way with people. Many years ago, when I was young and stupid, I started to read this book and after 30 pages threw it down and concluded it was merely a set of instructions on how to lie to people, to tell them they are good when they are incompetent, to praise them as valuable when they are useless. Many years later when I was no longer so stupid, I read the whole book. It contained a lot of human wisdom. In essence, the book gives hundreds of tips on how to avoid hurting anyone's feelings, to foster and maintain good relations with everybody. It is also a litany of all the human ego failings and frailties and how to avoid each one. As an example of getting one's way with people, in the section titled THE SECRET OF SOCRATES, Carnegie writes "In talking

*Fai in modo che l'altra persona dica Sì, sin dall'inizio". Carnegie sostiene che strappare una risposta No da una persona sia un errore e sarà "un grande ostacolo da superare" perché il suo orgoglio gli chiederà di rimanere coerente con se stesso: non potrà cambiare il suo "no" in un "sì".*

## Gente meravigliosa

George Trilling quando si trovava di fronte ad un'affermazione totalmente sbagliata diceva gentilmente "Questo non lo capisco". Diceva onestamente: non aveva capito! Quando ero un giovane studente feci un ragionamento riguardo a qualcosa di ormai dimenticato. George, con un piccolo sorriso, disse "Questo non lo capisco". Continuai a spiegarmi, un po' più lentamente con parole leggermente differenti. C'era un errore. Per quanto sappia, egli non ha mai ferito i sentimenti di nessuno riguardo ad alcun argomento, e oggi è uno dei fisici più ammirati al mondo.

È letteralmente vero che il maggior numero di gente meravigliosa io ho conosciuto sono fisici. In generale, i fisici sono interessanti, hanno buoni amici, fanno un lavoro che eccita loro e la gente che lavoro con loro, e quando si ritirano dall'insegnamento e dal laboratorio, continuano a fare ricerca. Pochi altri gruppi di gente hanno queste caratteristiche.

I fisici spesso capiscono gli aspetti della natura umana meglio della maggioranza della gente. Per esempio, Dave Nygren ascolterà sempre una persona fino alla fine, perché chi parla saprà quello che vuole dire solo dopo averlo detto. Questo è più che gentilezza, è il rendersi conto che per articolare un pensiero complesso e terminare un discorso, è necessario completare la presentazione di quel discorso.

Quando osservo il mondo della fisica delle alte energie, è veramente stupefacente quanto talento sia incluso nella progettazione, nel disegno, nella costruzione e condizione di un esperimento. Sono sicuro che un simile ammontare di talento sia presente anche nella fisica teorica delle alte energie, ma questa storia (e le sue debolezze) do-

with people, ... begin by emphasizing and keep on emphasizing the things on which you agree. ... Get the other person saying 'Yes, yes' at the outset." Carnegie argues that if you elicit a 'no' response from a person, this is a mistake and it will be a "most difficult handicap to overcome" because his pride will demand he remain consistent with himself: he cannot change his 'no' to a 'yes'.

## Wonderful people

George Trilling, when faced with an assertion that is totally wrong, would kindly say "I don't understand that". He spoke honestly: he did not understand it! As a very young student, I was making an argument about something long forgotten, and with a small smile he said "I don't understand that." I proceeded to explain again, a little more slowly and with slightly different words. That was a mistake. To my knowledge, he never hurt anyone's feelings, ever, over any issue and he is today one of the physics world's most admired physicists.

It is literally true that the largest number of the most wonderful people I have known are physicists. In general, physicists are interesting, have good friends, do work that excites them and those who work with them, and when they retire from teaching or from a lab, they continue to work in research. Few other groups have these traits.

Physicists often understand aspects of human nature better than most. For example, Dave Nygren will always hear a person out to the end, because a person will only know what he wants to say after he says it. This is more than just politeness, but a realization that articulating a complex thought and completing the argument, it is necessary to complete the articulation of that argument.

When I look over the world of high energy physics, it is truly astounding how much experimental talent goes into the conception, design, building and running of experiments. I am sure a similar amount of talent is displayed in theoretical high energy physics, but that story (and its weaknesses) should be told by a theorist. Which brings us to a question Leon Lederman once

vrebbe essere raccontata da un teorico. E questo ci porta ad una domanda che una volta fece Leon Ledermann "Perché non è possibile avere un appuntamento con un teorico il Mercoledì? Perché questo gli rovina due fine settimana." Stavamo facendo un esperimento al Meson Lab attorno al 1976, e Don Stork ed io arrivammo al dormitorio di Aspen East circa alle 4 di notte, dopo un volo *red-eye*<sup>1</sup> da Los Angeles e dopo avere passato qualche ora allo strumento. Stavamo farfugliando su qualche argomento, senza renderci conto che eravamo nel mezzo della notte. Una porta si apre in fondo al corridoio e un piccolo uomo in camicia da notte, pantofole e berretto da notte esce e dice "Non potreste fare silenzio! Qui c'è gente che cerca di dormire!" Noi entrammo in punta di piedi nelle nostre stanze, silenziosi come topolini. Il giorno dopo c'era un seminario *Wine and Cheese*<sup>2</sup>, e, mentre sorseggiavo del caffè per tenermi sveglio, lo stesso tipo mi compare accanto e dice "Mi spiace per la scorsa notte ...". "Oh, spiace a me, noi non c'eravamo accorti." lo interrompo. La conversazione era terminata, nient'altro da dirci. A questo punto lui dice "Cosa state facendo a Fermilab?" Io dico "Stiamo facendo un esperimento al Meson Lab." Ancora la conversazione muore. Per essere gentile penso che devo dire qualche cosa, quindi domando "Cosa sta facendo lei al Fermilab?" Lui risponde "Sono un turista." Le parole che lampeggiarono silenziosamente nella mia mente non possono essere riferite, ma sono approssimativamente "Lavoro tutto il santo giorno all'Università di California a Los Angeles, prendo un volo red-eye, lavoro metà della notte, ingurgito caffè per stare sveglio e questo è un turista!" Ma facendo di nuovo la persona educata, comincio a farfugliare "Oh, molto bello. Fermilab ha una piscina, campi da tennis, puoi incontrare amici, veramente bello ..." e stavo continuando su questa strada, le sue sopracciglia si aggrottano e lui dice "Io lavoro mooolto duramente, faccio tutti quei caalcoli". Soltanto a questo punto scopro che aveva detto "teorico"<sup>3</sup>. A quei tempi Fermilab aveva una vera campana da mucche per annunciare l'inizio del seminario, e suonò proprio in quel momento dandomi un'opportunità per fuggire. Non ho mai più rivisto quel signore da allora, ma gli devo delle scuse.

1 Sono chiamati *red-eye* i voli che partono dalla costa ovest degli Stati Uniti nella notte e sono diretti alla costa est. Per

asked "Why is it impossible to make an appointment with a theorist on a Wednesday? Because that would ruin two weekends." We were doing an experiment in the Meson Lab circa 1976, and Don Stork and I had arrived at Aspen East dorm about 4 am after the red-eye from Los Angeles and spending a few hours at the beam. We were jabbering away about something, unaware that it was in the middle of the night. A door opens down the hallway and a small man in a night gown, slippers and a beanie cap steps out and says "Can't you be quiet! Thome people are trying to get thome thleep here!" We tiptoed to our rooms, silent as mice. There was a Wine and Cheese seminar the next day and, while I was glugging coffee to stay awake, the same guy appears right at my side and says "I am so sorry about last night ..." and I interrupt "Oh, I'm so sorry, we just weren't paying attention." The conversation dies down, nothing more to say. So, he says "What are you doing at Fermilab?" I said "We're doing an experiment in the Meson Lab." Again, the conversation dies down. To be polite, I figure I've got to say something, so I ask "What are you doing at Fermilab?" He says, "I'm a tourist." The words that flashed silently through my mind cannot be printed, but are approximated by "I work all day at UCLA, take the red-eye flight, work half the night, glug coffee to stay awake, and this guy's a tourist!" So, being polite again, I start to babble "Oh, that's nice. Fermilab has a swimming pool, tennis courts, you see a few friends, that's really nice ..." and as I am going on like this, his brow develops deep lines and he says "I work very ha-a-ard, I do all these calcula-a-ations." Only then did I realize he said "theorist." In those days, Fermilab had a genuine cow bell to announce the beginning of the seminar, and it bonged just then giving me an opportunity to escape. I haven't see this gentleman since, but I owe him an apology.

chi viaggia in questo modo la notte è molto corta, per questo gli occhi sono rossi. Tutti coloro che hanno viaggiato dagli Stati Uniti all'Europa hanno provato questa sensazione. (NdT)

- 2 Sono chiamati *Wine and Cheese* dei seminari dove si offre anche un piccolo buffet. (NdT)
- 3 In inglese la parola *tourist* per turista può essere facilmente confusa con *theorist* per persona che fa Fisica Teorica. (NdT)



[1] JOHN C. MATHER: *The very First Light: The True Inside Story of the Scientific Journey Back to the Dawn of the Universe*, Basic Books, 2nd ed. (1996 and 2009).

[2] SHARON TRAWEEK: *Beamtimes and Lifetimes: The World of High Energy Physicists*, Harvard University Press (1992).



**John Hauptman:** Fisico sperimentale delle alte energie, ha iniziato a lavorare con il gruppo del Bevatrone e ha svolto il lavoro per la sua laurea in fisica nella progettazione del magnete; la tesi di dottorato è sulla fisica della camera a bolle (tutore Trilling); post-doc sulla Time Projection Chamber; ultimamente il calorimetro 4th Concept e dual-readout. È professore all'Università statale dell'Iowa e associato al laboratorio Ames del USDoE (Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti).

**John Hauptman:** Experimental high energy physicist, started working on the Bevatron crew and magnet design as a physics major; PhD in bubble chamber physics (GH Trilling); post-doc on the Time Projection Chamber (HK Ticho, DR Nygren); lately 4th Concept and dual-readout calorimetry (R Wigmans). He is a professor at Iowa State University and an associate of the Ames Laboratory, USDoE.

---

# La condanna dell'Aquila: cattiva giustizia, cattiva scienza o negligenza?

**Francesco Paparella**

Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi" - Università del Salento

---

**I**l 6 aprile 2009 la città dell'Aquila subì un devastante terremoto. Il 22 ottobre 2012 il Tribunale dell'Aquila ha condannato i componenti della Commissione Grandi Rischi a sei anni di reclusione per aver mancato ai loro doveri di valutazione, previsione e prevenzione del rischio perché fornirono *"al Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, all'assessore alla Protezione Civile della Regione Abruzzo, al sindaco di L'Aquila ed alla cittadinanza aquilana informazioni incomplete, imprecise e contraddittorie sulla natura, sulle cause, sulla pericolosità e sui futuri sviluppi dell'attività sismica"* [1].

Appena emessa, la condanna è stata da più parti interpretata come una sanzione contro l'incapacità di un gruppo di scienziati nel prevedere qualcosa di intrinsecamente imprevedibile: l'occorrenza di un terremoto. Il clamore in campo internazionale è stato enorme. Persino la prestigiosa rivista *Nature*, pur riconoscendo che l'accusa non era quella di non aver previsto il terremoto, intitolava in questo modo un editoriale del 23

ottobre: *"Il disprezzo del sistema Italia per i propri scienziati è reso palese dalla sentenza di colpevolezza dell'Aquila"* [2]. In un testo insolitamente duro per una rivista scientifica, l'editoriale pronostica *"effetti intimidatori sull'abilità degli scienziati di fornire valutazioni pubbliche del rischio"*.

Tuttavia, queste valutazioni a caldo sono state formulate senza aver potuto leggere le motivazioni della sentenza (depositate il successivo 18 gennaio). Si tratta davvero di un'oscurantista condanna alla scienza? E i membri della Commissione Grandi Rischi hanno avuto in quell'occasione un comportamento degno di valenti luminari, o piuttosto di mediocri cultori della materia, se non addirittura di uomini negligenti? Ed infine: i terremoti si possono prevedere?

## Faglie, terremoti e sequenze sismiche

La solida crosta rocciosa che avvolge il nostro pianeta non è un guscio monolitico, rigido ed immutabile, ma è costituita da una moltitudine di frammenti (detti placche) mosse dai lenti moti convettivi del sottostante mantello. Questi movimenti creano forti tensioni meccaniche all'interno delle rocce, che in alcuni aree si frat-

turano. I geologi chiamano *faglia* una superficie di frattura all'interno della crosta terrestre.

Le faglie hanno una distribuzione spaziale assai complicata. In Figura 1 sono riportate le principali faglie note in prossimità della città dell'Aquila. Già a questa scala lo scenario non appare semplice. Se fosse possibile visualizzare in tre dimensioni tutte le superfici dove le rocce presentano una discontinuità meccanica, includendo anche quelle che non raggiungono la superficie, si otterrebbe una immagine vagamente simile a quella di una lastra di vetro frantumata. Questo genere di complessità non è una peculiarità dei dintorni dell'Aquila, ma è una caratteristica comune delle zone sismiche, che sono generalmente attraversate da un *sistema di faglie*.

Un terremoto avviene quando, in risposta alle tensioni presenti all'interno del suolo, la roccia cede improvvisamente e si sposta. Tipicamente questo succede in corrispondenza di una faglia preesistente. Più raramente è il terremoto stesso che crea una nuova faglia. La rottura non è istantanea, ma si propaga, molto rapidamente, da una *regione di nucleazione* alle regioni circostanti. L'energia potenziale immagazzinata nelle rocce e rilasciata dal processo di rottura si propaga nella crosta terrestre sotto forma di onde. L'estensione della superficie interessata dalla rottura e l'ammontare dello spostamento reciproco delle rocce attraverso la faglia sono i due fattori principali che determinano l'intensità del terremoto. I terremoti maggiori (quali, ad esempio, quello del 26 dicembre del 2004 che ha causato lo *tsunami* nell'Oceano Indiano, o quello del 11 marzo 2011 che ha innescato l'incidente nucleare di Fukushima) producono superfici di rottura che si estendono per migliaia di chilometri quadrati. I terremoti più piccoli, difficilmente rilevabili anche dai sismografi più sofisticati, interessano superfici di qualche decina di metri quadrati. In ogni caso, la regione di nucleazione della rottura è piuttosto piccola, come testimonia il fatto che è generalmente possibile identificare un punto di origine della propagazione ondosa: l'*ipocentro*.

In un'area sismica il numero di terremoti  $N$  di magnitudine superiore a  $M$  che avviene in un certo intervallo di tempo è dato con buona approssimazione dalla legge di

Gutenberg-Richter:

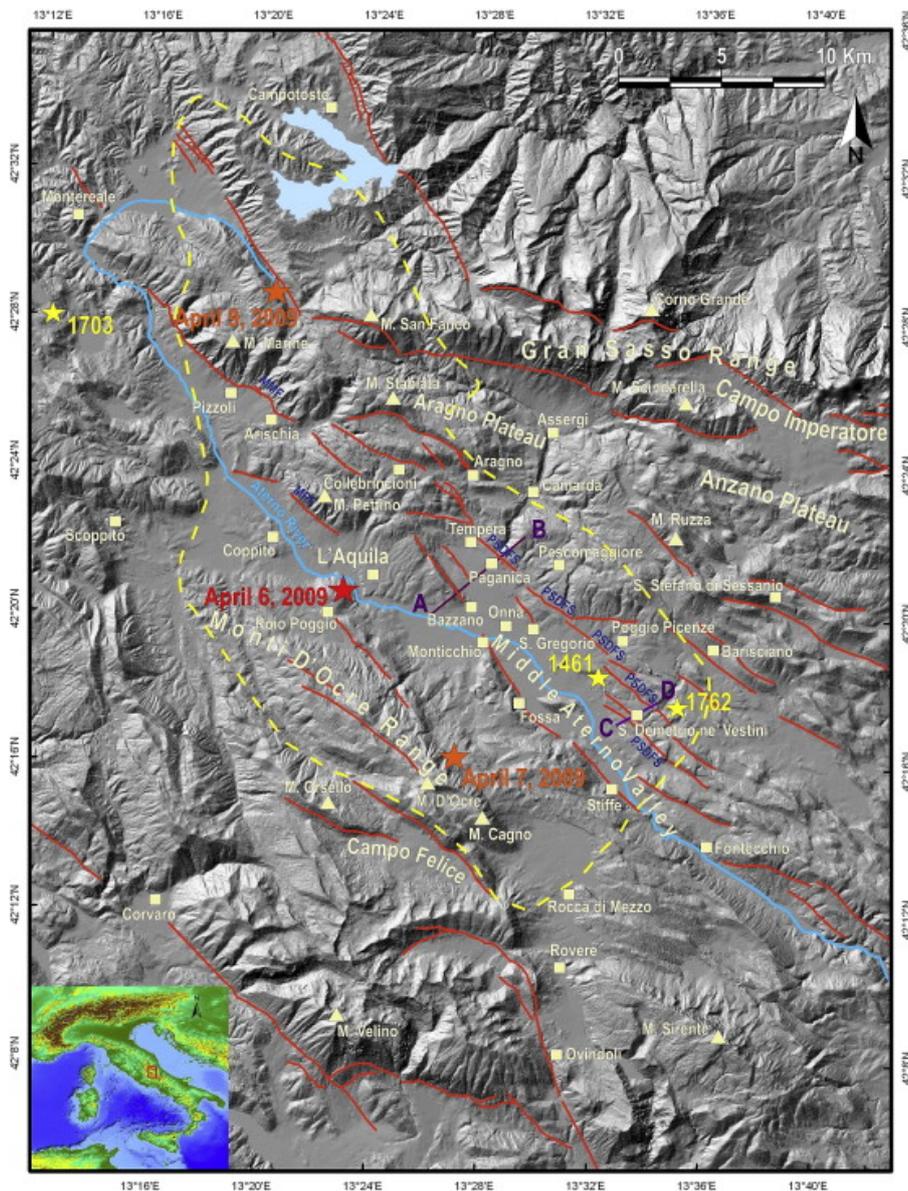
$$N = 10^{a-bM} \quad (1)$$

dove  $a$  e  $b$  sono delle costanti positive che devono essere tarate sperimentalmente per ciascuna zona sismica. Poiché in molti casi il valore di  $b$  è vicino ad uno, si ha, come regola indicativa, che il numero di terremoti di magnitudo maggiore a  $M+1$  è dieci volte inferiore al numero di terremoti di magnitudo maggiore di  $M$ . In altre parole, la terra non trema solo con scosse devastanti: nelle aree sismiche la stragrande maggioranza dei terremoti è impercettibile, o appena percettibile, e non produce conseguenze degne di nota.

La legge di Gutenberg-Richter non è l'unica statistica importante nella descrizione dei fenomeni sismici. Almeno altrettanto importante è l'osservazione che i terremoti non sono omogeneamente distribuiti nel tempo. Essi tendono ad aggregarsi, alternando periodi di intensa attività sismica a periodi di relativa quiete. In particolare, su scale di tempo di giorni o di mesi è generalmente possibile identificare delle *sequenze sismiche*, ovvero sporadici intervalli di tempo durante i quali il numero di terremoti (e spesso anche la loro intensità) è notevolmente superiore a quanto si registra, nella medesima zona, in condizioni ordinarie. In italiano la locuzione *sciame sismico* è usata talvolta come sinonimo di sequenza sismica, mentre a volte indica una successione di eventi sismici che si susseguono in un'area ed un arco di tempo ancor più ristretti di quelli di una sequenza sismica. Le possibili ambiguità insite in simili distinzioni non sembrano aver mai scoraggiato chi ne fa uso.

Quando all'interno di una sequenza sismica si può riconoscere un singolo terremoto di intensità superiore agli altri, esso viene detto *scossa principale* (*main shock* in inglese). Quelli che avvengono dopo di esso sono detti *repliche* (*aftershocks*), o, con linguaggio improprio, *scosse di assestamento*, e quelli che lo precedono sono detti *precursori* (*foreshocks*). È da sottolineare che una sicura identificazione dei precursori e delle repliche può avvenire solo al termine della sequenza sismica.

Conformemente alla legge di Gutenberg-Richter, quasi tutte le sequenze sismiche si esauriscono senza produrre sismi di intensità pericolosa. Raramente si osservano casi in cui la scossa

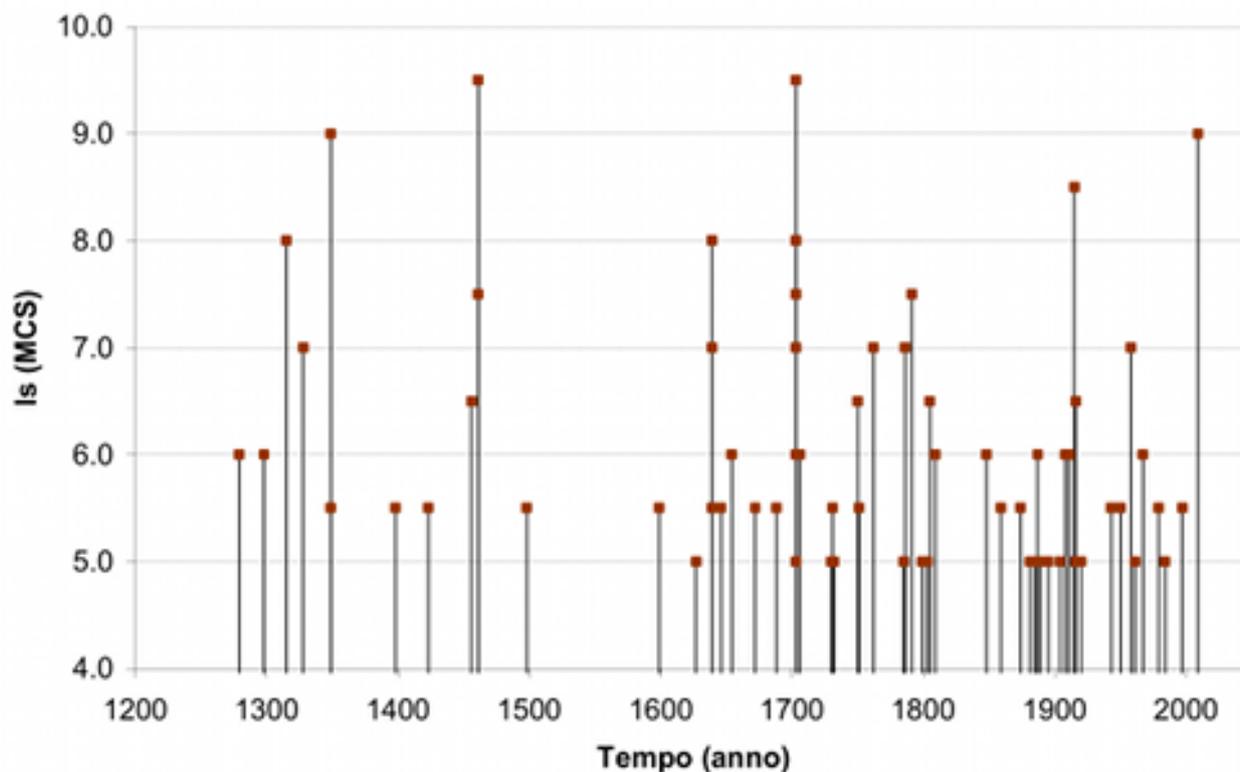


**Figura 1:** Principali faglie note nella zona dell'Aquila (linee rosse). Le stelle gialle indicano l'epicentro di terremoti storici. L'area all'interno del tratteggio giallo è quella interessata dalla sequenza sismica della primavera del 2009, le cui scosse principali sono localizzate dalle stelle rosse. Tratto da A.M.Blumetti et al., *Quaternary International*, (2013), **288**, 183–194.

principale è la prima della sequenza e non ci sono precursori. Questo è successo, per esempio, per il terremoto di Haiti del 2010. Il caso di una singola scossa forte non inserita all'interno di una sequenza sismica è, invece, del tutto eccezionale.

Questa fenomenologia è coerente con l'idea che ogni scossa che avviene in un sistema di faglie aumenti la probabilità che si produca un'altra scossa nella stessa area in tempi brevi (ore o giorni). I modelli matematici che descrivono questo genere di correlazioni sono noti come *modelli epidemici*: una faglia soggetta a terremoto è come un ammalato che contagia gli individui circostanti, i quali, se sviluppano la malattia, contribuiscono ad espandere ulteriormente l'epidemia, che si manifesta sotto forma di sequenza sismica.

Su scale di tempo molto più lunghe di quelle delle sequenze sismiche, un'area sismica può essere caratterizzata dal cosiddetto *tempo di ritorno* di un terremoto di intensità data. Questo concetto è illustrato, per la zona dell'Aquila, dalla figura 2. Negli ultimi ottocento anni sono documentati altri tre sismi di intensità pari o superiore a quello del 6 aprile 2009. Quindi in media intercorrono pochi secoli tra un grande terremoto ed il successivo. Una analisi statistica un po' più raffinata del mero conteggio degli eventi è stata effettuata dai consulenti del tribunale, in una perizia citata nelle motivazioni della sentenza [1]. Ma anche in questo caso si ottiene che il tempo atteso tra un evento come quello del 6 aprile ed il successivo è di 325 anni. La perizia cita altri studi che riportano un tempo di ritorno di 475



**Figura 2:** Terremoti storicamente documentati che hanno coinvolto la città dell'Aquila. Intensità in gradi della scala Mercalli-Cancani-Sieberg. Tratto dalle motivazioni della sentenza [1].

anni, e li ritiene errati per eccesso.

Ovviamente il tempo di ritorno, quale che sia, è da intendersi come dato medio. I terremoti non sono eventi periodici, altrimenti sarebbe molto facile prevederli, come succede, per esempio, per il ritorno di alcune comete. Tuttavia il sistema non è nemmeno tanto aleatorio quanto un insieme di sorteggi indipendenti. Il continuo accumulo di tensione nelle rocce soggette a spinte rende assai poco probabile, o del tutto inverosimile, che fra due forti scosse possano passare tempi assai più lunghi del tempo di ritorno. In altre parole, se scommettere su di un numero che è in ritardo nelle estrazioni del lotto non è una strategia vincente, nel caso dei terremoti non è sbagliato, anzi è la base sulla quale si costruiscono alcuni metodi per valutare la probabilità di terremoti nel medio termine. Ad esempio, nelle conclusioni di un articolo scientifico del 1995 [3] si legge *“La probabilità di occorrenza di un terremoto superficiale di magnitudo  $M \geq 5.9$  in Italia appare alta nel futuro prossimo solo in poche aree: il sud-est della Sicilia, l'Aquilano, Naso-Capo d'Orlando, ed il Forlivese.”*. In quello stesso studio, di cui il primo autore è

l'imputato prof. Boschi, per *“futuro prossimo”* si intendevano i successivi 20 anni, e per *“alta probabilità”* si intendevano probabilità superiori al 50%.

## Predizioni e previsioni, pericolo e rischio

Il 21 aprile 2009, in seguito al disastroso terremoto dell'Aquila, l'allora capo del Dipartimento della Protezione Civile, Guido Bertolaso, incaricò una commissione scientifica internazionale di redigere un documento sulla possibilità di previsione a breve termine dei terremoti. Dopo circa due anni di lavoro la commissione ha prodotto un lavoro di rassegna ampio, dettagliato ma leggibilissimo, dal titolo *“Previsione Operativa dei Terremoti: Stato delle Conoscenze e Linee Guida per l'Utilizzo”*, poi pubblicato sulla prestigiosa rivista *Annals of Geophysics* [4].

Ma se i terremoti non possono essere previsti, per quale motivo chiedere una consulenza sul tema ad una commissione internazionale?

L'apparente contraddizione si risolve dipanando una ambiguità linguistica che non è mai stata sufficientemente sottolineata nel dibattito pubblico, ma che è chiarissima agli addetti ai lavori. Esistono due modi di farsi domande riguardo al futuro: in un caso ci si chiede quali eventi accadranno e quali no, nell'altro ci si chiede qual è la probabilità che si verifichino gli eventi possibili. Per esempio, in seguito al lancio di una moneta, potremmo chiederci se uscirà testa o croce. Oppure potremmo chiederci qual è la probabilità che esca ciascuna faccia. Il primo tipo di previsione, sebbene possibile in linea di principio, è sostanzialmente impossibile da ottenere, salvo, forse, in situazioni di laboratorio perfettamente controllate. Il secondo tipo di previsione è assai più agevole: una volta appurato che la moneta è un disco di metallo omogeneo e privo di manomissioni, la previsione che ciascuna faccia ha il 50% di probabilità di uscire è facile da formulare ed è particolarmente affidabile.

Nella letteratura sismologica internazionale si usa normalmente il termine *prediction* (*predizione*) per indicare una affermazione deterministica riguardo al verificarsi o meno di un terremoto di intensità specificata in una ben delimitata regione di tempo e di spazio. Si usa invece il termine *forecast* (*previsione*) quando si cerca di valutare la probabilità di un simile evento. La scelta del gergo è poco felice, tanto più che in molti altri campi si usa il termine "previsioni" per indicare affermazioni deterministiche (per esempio in meteorologia). Tuttavia, è sufficiente spiegare l'uso dei termini per rendere chiara la distinzione.

Seguendo questa terminologia, la predizione dei terremoti è impossibile. Sebbene il fenomeno sia in linea di principio deterministico, come nel caso del lancio di una moneta, la ridotta estensione della regione di nucleazione e la difficoltà di misurare con sufficiente dettaglio lo stato della crosta terrestre rende praticamente impossibile una predizione: spesso non si conosce nemmeno l'esatta localizzazione di tutte le faglie, ma per una predizione sarebbe necessario anche quantificare la tensione presente nelle rocce e le loro proprietà meccaniche. Il rapporto della commissione internazionale si sofferma lungamente sulla predicibilità ([4] §II.B), ed esamina uno ad uno la lunga serie di indicatori proposti quali precursori diagnostici dei terremoti (per esem-

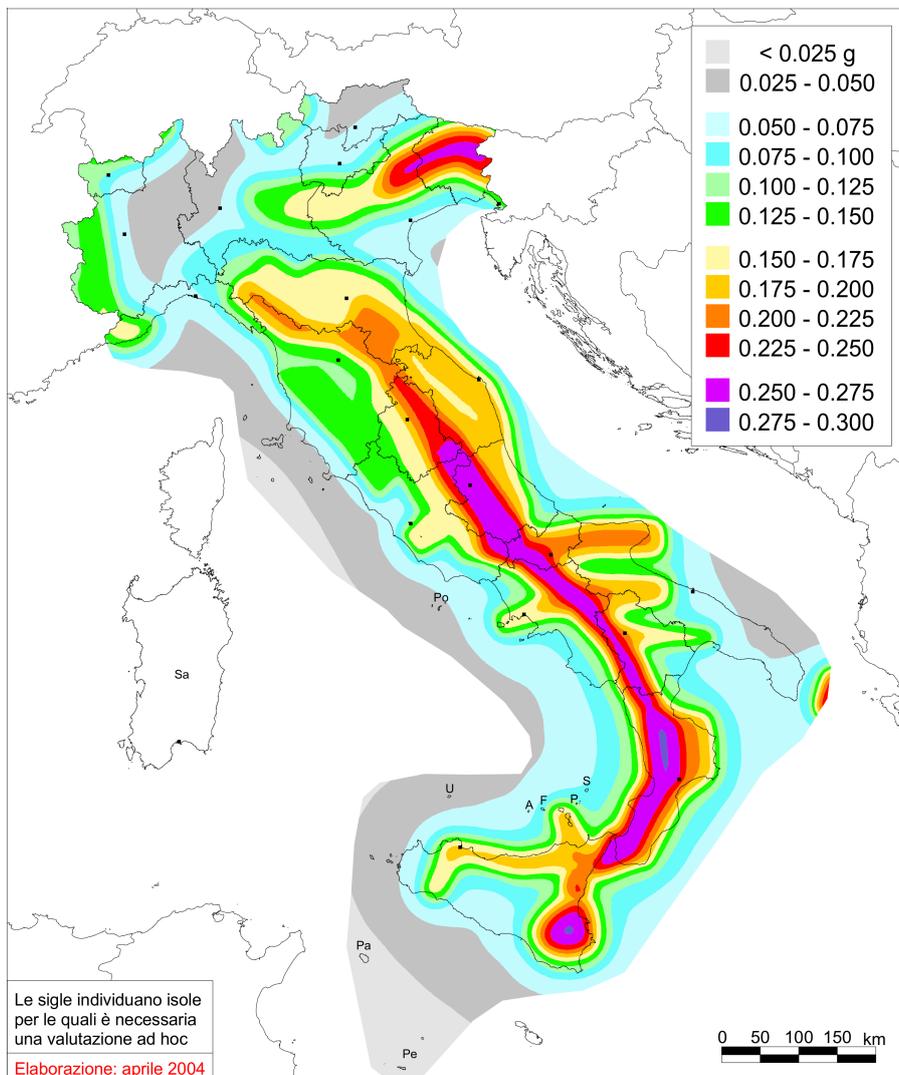
pio l'emissione di gas radon) per poi concludere mestamente che nessuno è sufficientemente affidabile da produrre previsioni di una qualche utilità.

La previsione dei terremoti, nell'accezione del gergo sismologico, è invece possibile. Come abbiamo accennato sopra parlando dei tempi di ritorno, è una attività nella quale i sismologi si esercitano regolarmente. Un esempio di previsione sismologica è riportato in figura 3. Da essa si evince, per esempio, che la probabilità che il terreno a Lecce vibri con accelerazioni maggiori di 0.075 g nell'arco di tempo fra il 2004 ed il 2054 è del 10% (dove  $g=9.8$  m/s<sup>2</sup> è l'accelerazione di gravità standard). Si tratta di una affermazione chiara e netta allo stesso modo del dire che una certa moneta ha facce equiprobabili. Ed in entrambi i casi è possibile valutare *a posteriori* la bontà della previsione confrontandola con ciò che è effettivamente successo.

Per esempio, in seguito ai terremoti verificatisi a cavallo fra le province di Ferrara e Modena nel maggio-giugno 2012, è stato suggerito che la mappa di figura 3 sottostimi la pericolosità di quelle aree. Al contrario, le accelerazioni misurate a L'Aquila nel 2009 sono perfettamente compatibili con quanto previsto dalla mappa. Le limitazioni della pur ottima mappa di pericolosità sismica nazionale derivano principalmente dalla incompleta catalogazione delle faglie nel territorio italiano ([4] p.354). Per inciso, è utile ricordare che la compilazione di mappe di pericolosità sismica in Italia è un obbligo di legge, ma lo stanziamento di fondi adeguati per la ricognizione geologica del territorio non sembra esserlo.

Previsioni quali quella di figura 3 sono dette *indipendenti dal tempo*: la previsione non cambia in funzione dello svolgersi degli eventi e rimane costante durante l'intero intervallo di tempo della sua validità. Questo approccio è utile, per esempio per scopi urbanistici, ma non esaurisce il ventaglio delle capacità dei sismologi.

Ma la probabilità di un terremoto, lo ribadiamo, non è indipendente dagli eventi sismici precedenti. Queste correlazioni si manifestano su molte scale di tempo. In particolare, nel corso di una sequenza sismica (che ha durate dell'ordine delle settimane o mesi), la probabilità che si verifichi un sisma intenso è di alcuni ordini



**Figura 3:** *Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale elaborata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). I colori indicano l'accelerazione massima di un suolo rigido con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. Tratto dal sito INGV di Milano [6].*

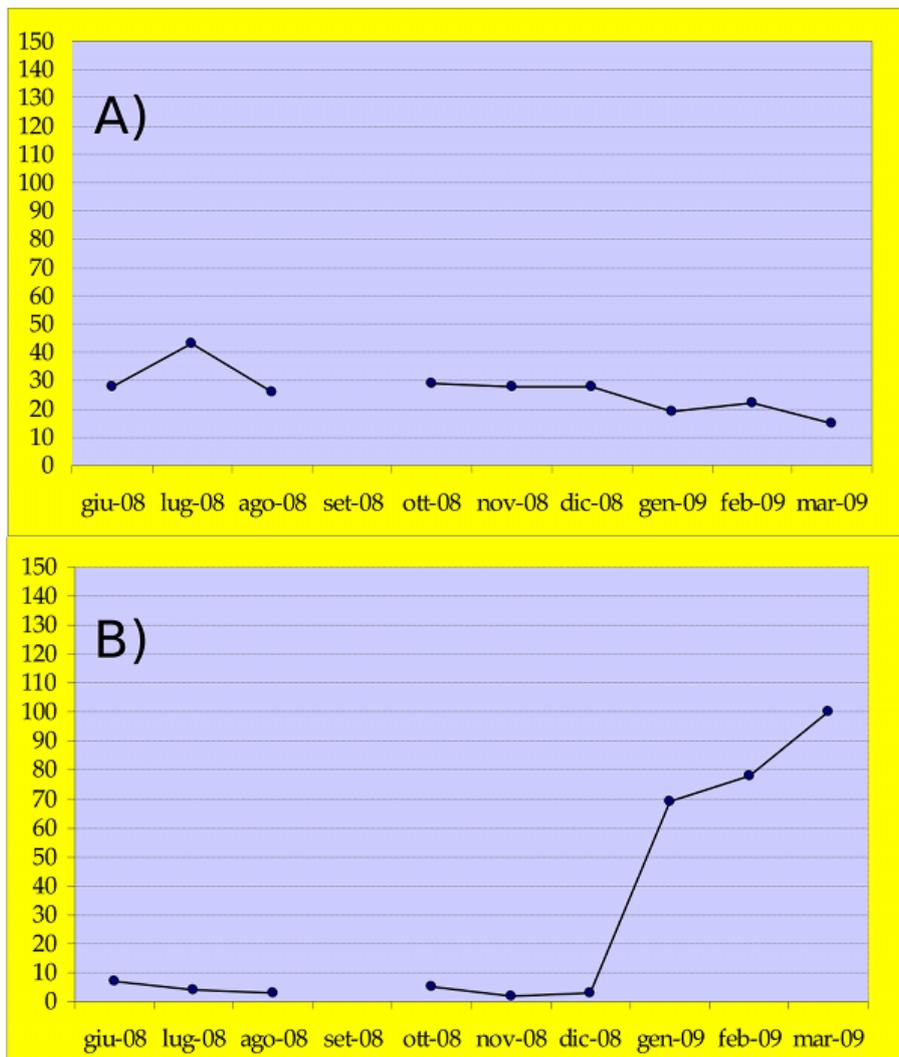
di grandezza maggiore della probabilità che il medesimo sisma si verifichi durante un arco di tempo di pari durata scelto a caso nell'arco di secoli. Un campo molto attivo nella ricerca sismologica consiste nell'usare modelli di tipo epidemico (a cui si accennava sopra) per correggere le probabilità valutate con modelli di previsione indipendenti dal tempo in funzione dell'evolversi dell'attività sismica. Alcuni di questi modelli sono utilizzati in modo operativo per scopi di protezione civile, per esempio in California. Nel caso dell'Aquila sono stati utilizzati solo in modo retrospettivo ([4] §II.D).

La principale raccomandazione finale della commissione internazionale al Dipartimento della Protezione Civile è stata quella di dotarsi di strumenti operativi di previsione dipendenti dal tempo, sostenuti da un adeguato programma di ricerca scientifica (cfr. [4] sez. IV). Tuttavia, anche senza un modello che permetta di quan-

tificare la probabilità di un forte terremoto, è indubitabile, sia sulla base delle osservazioni empiriche, sia sulla base di considerazioni teoriche, che la probabilità di tale evento aumenti considerevolmente in presenza di una sequenza sismica.

Infine, è utile soffermarsi brevemente sulla distinzione, nel gergo tecnico, fra *pericolo* (*hazard*) e *rischio* (*risk*). Il primo consiste nella probabilità che si verifichi un dato evento. Valutare il pericolo sismico si concretizza in una previsione dei terremoti (nell'accezione probabilistica del termine riportata sopra).

Il rischio è definito sulla base degli effetti di un sisma, e va quantificato come la probabilità di perdere un dato numero di vite umane, o di subire un certo ammontare di perdite economiche. È ovvio che la valutazione del rischio può essere fatta solo sulla base di una precedente valutazione del pericolo. È altrettanto ovvio che



**Figura 4:** Numero di sismi registrati mensilmente nei distretti sismici dei Monti della Laga, dei Monti Reatini e del Gran Sasso (A) e nel solo distretto dell'Aquila (B) dal Giugno 2008 al marzo 2009. Dati INGV.

dove il pericolo è trascurabile, anche il rischio è trascurabile. Non è vero il contrario. Per esempio esistono molti luoghi in Giappone dove il pericolo sismico è pari o superiore a quello dell'Aquila, ma il rischio è enormemente più basso: la qualità delle costruzioni antisismiche, la preparazione della popolazione e delle istituzioni a far fronte a simili eventi rende molto bassa la probabilità di subire gravi danni anche in presenza di scosse intense.

## La sentenza

A partire dal gennaio del 2009 il numero di sismi registrati nel distretto sismico dell'Aquila subì una brusca impennata sorpassando di molto i conteggi registrati nei distretti adiacenti, che possono essere presi come riferimento per valutare l'entità di una normale attività sismica di sotto-

fondo (figura 4). Si era quindi in presenza di una sequenza sismica.

Inoltre, alla fine di marzo, la sequenza registrò un'impennata nell'intensità dei sismi, con una scossa di magnitudo 4.1 e con ben tre scosse superiori a magnitudo 3 nella sola giornata del 30 marzo, producendo una situazione di comprensibile ansia e di diffusa incertezza nella popolazione.

Delle molte persone che a partire dal gennaio del 2009 hanno espresso opinioni, formulato predizioni o previsioni, suggerito linee di condotta riguardo alla sequenza sismica in atto all'Aquila, gli imputati nel processo conclusosi il 22 ottobre 2012 sono tutti e solo i membri della Commissione Grandi Rischi che si ritrovarono nella tristemente famosa riunione del 31 marzo 2009.

Uno dei massimi sismologi viventi, il prof. Thomas Jordan della University of Southern California (nonché primo autore del su menzionato rapporto sulla previsione operativa dei terremoti

ti) si esprime in questo modo sull'operato della Commissione Grandi Rischi:

*«In Italia le sequenze sismiche che non includono grandi terremoti sono molto più comuni di quelle che si rivelano essere dei precursori. Tuttavia, viste le statistiche sismiche, molti sismologi concorderebbero nel sostenere che la probabilità a breve termine di un grande terremoto vicino all'Aquila era più alta nelle settimane precedenti la scossa principale del 2009 che durante una tipica settimana di attività sismica quiescente. Al pubblico non sono state comunicate previsioni consistenti con queste conoscenze sismologiche, ed il bisogno di una narrativa migliore è stato di conseguenza riempito da predizioni dilettantesche piuttosto che da informazioni autorevoli». [7]*

In termini assai più drammatici, una analoga valutazione emerge dalla testimonianza del dott. Christian Del Pinto, un geofisico presente alla riunione del 31 marzo in qualità di sismologo della Protezione Civile:

**Del Pinto:** *«fu detto che era difficile che ci sarebbero stati eventi superiori a quattro, cioè come se il terremoto del giorno prima fosse ormai il massimo a cui... nel contesto diciamo sismico dello sciame il massimo che si poteva raggiungere o comunque si aspettavano eventi grossomodo intorno a quattro, ma non di certo più forti.».*

**Pubblico Ministero:** *Su che cosa dissentiva e perché dissentiva?*

**Del Pinto:** *«Su due cose, innanzitutto sul fatto che un'attività sismica di questo tipo fosse considerata normale, nel senso siamo in una zona sismica, quindi è normale che ci siano gli sciami, e non tutti gli sciami, questo è vero, poi evolvono in eventi come quello dell'Aquila, insomma. Però per quello che mi ricordo, siccome io lavoro in Protezione Civile e lavoro in Protezione Civile come gestore di una rete sismica regionale, realizzata tra l'altro con una convenzione tra Regione e INGV, nel momento in cui ho uno sciame anche molto più piccolo rispetto a quello lì che ha interessato L'Aquila nei mesi precedenti al 6 aprile, io in più di un'occasione diciamo ho buttato giù dal*

*letto il mio dirigente, per dire: "Guarda in questa zona c'è un momento in cui la sismicità ordinaria, io preferisco parlare di sismicità ordinaria, non normale, una sismicità ordinaria in questa area che magari non so mi tira fuori un terremoto ogni tre giorni, su una media sufficientemente lunga, una media temporale sufficientemente lunga, io adesso ho avuto una impennata nel senso ho avuto in poche ore trenta terremoti, per noi è un'anomalia. Quindi, io considerando una anomalia, non riesco a considerare normale uno sciame sismico, perché? Almeno per quello che ho avuto modo di studiare e di apprendere durante i miei studi universitari, uno sciame rappresenta comunque una deviazione dall'ordinarietà, non voglio usare la parola "Normale"». [1] p.99-100*

Sebbene il giudizio scientifico del prof. Jordan sull'operato della Commissione Grandi Rischi sia assai poco lusinghiero, egli si è più volte dichiarato contrario alla condanna (p.es. in [5]): fare della cattiva scienza non deve essere considerato un reato penale. Tanto più che molte altre persone (inclusi dei "dilettanti", e l'epiteto è perfino gentile) si esercitarono a suggerire informazioni di dubbia veridicità all'opinione pubblica.

Che cosa, dunque, renderebbe meritevoli gli imputati di una sanzione penale? Il giudice Billi è nettissimo nell'affermare che:

*«La "base di accusa" non consiste nella mancata previsione di un evento naturalistico (il terremoto) che non si può prevedere in senso deterministico o nella mancata promulgazione di uno stato di allarme: non si tratta di "processo alla scienza" ma di processo a sette funzionari pubblici, dotati di particolari competenze e conoscenze scientifiche, chiamati per tali ragioni a comporre una commissione statale, che, nel corso della riunione del 31.3.09, effettuavano una valutazione del rischio sismico in violazione delle regole di analisi, previsione e prevenzione disciplinate dalla legge». [1] p.183-184.*

Il giudice è di una chiarezza cristallina nel distinguere sempre tra la "previsione del terremoto" e la "previsione e valutazione del rischio", ovvero

distinguendo fra una *prediction* e una *risk forecast*, per usare il gergo sismologico a cui si faceva cenno poc'anzi. Si scopre, così, che la prima è sconosciuta alla legislazione italiana (oltre che impossibile), mentre la seconda è un compito esplicitamente ed obbligatoriamente assegnato dalla legge alla Commissione Grandi Rischi fin dalla legge 225/1992 e ribadito dalla legge 245/2006 e dal D.P.C.M. 23582/2006. Esiste, inoltre, un obbligo di informazione e di comunicazione (legge 150/2000) a cui la Commissione poteva adempiere, secondo il parere del giudice, o direttamente, o tramite la mediazione del Dipartimento della Protezione Civile.

Nelle motivazioni il dott. Billi si sofferma lungamente ([1] §4.2) nello spiegare che la condotta degli imputati è stata valutata *ex ante* (ossia confrontandola con le prescrizioni di legge) e non *ex post* ovvero sulla base del fatto che il terremoto si è effettivamente verificato. Per fare un paragone, se la guida di un automobilista è spericolata deve essere valutato sulla base del codice della strada, e non osservando se avviene o meno un incidente.

Che la vera materia del contendere sia la difformità della condotta della Commissione Grandi Rischi rispetto ai propri obblighi di legge, e non le opinioni e le abilità scientifiche degli imputati, è reso evidente da una delle strategie adottate dai difensori, i quali hanno sostenuto che la riunione del 31 marzo 2009 non fosse stata validamente convocata, e che si trattasse di una mera "*ricognizione di esperti*" non soggetta agli obblighi che la legge assegna alla Commissione. Se così fosse le opinioni espresse dagli individui riuniti all'Aquila il 31 marzo 2009 sarebbero state giuridicamente sullo stesso piano di quelle delle numerose altre persone (dilettanti e non) che si pronunciarono pubblicamente riguardo alla sequenza sismica in atto all'Aquila. Circa trenta pagine delle motivazioni della sentenza sono volte a dimostrare che la Commissione era stata validamente convocata ([1] §3.5).

Ma il giudice fa un'altra, decisiva, distinzione. Il giudizio di colpevolezza non si basa, e non può, a norma di legge, basarsi sulla difformità fra l'opinione scientifica dei membri della Commissione Grandi Rischi ed il resto della comunità scientifica. Bensì si basa sulla completezza, esaustività e non contraddittorietà di tale opinione.

Da questo punto di vista l'operato degli imputati appare assai carente. L'analisi della situazione, la valutazione e la previsione del rischio, e l'informazione offerta alle parti interessate ai fini della prevenzione del rischio stesso furono svolte in una singola riunione della durata di appena un'ora.

Lo prove documentali (verbale, bozza di verbale) riportano affermazioni ingiustificate: da un lato il prof. Barberi pose la domanda "*se nei terremoti del passato c'è testimonianza di sequenze sismiche che precedono forti terremoti*", dall'altro l'unica evasiva risposta fu quella del prof. Eva: "*la casistica è molto limitata, anche perché terremoti così piccoli non venivano registrati nel passato*". Ma in quella casistica limitata ricadono i terremoti dell'Aquila del 1461 e del 1703 per i quali le fonti storiche attestano inequivocabilmente che la scossa distruttiva era stata preceduta da scosse di minore entità. E questo doveva essere ben noto ai componenti della commissione, sia perché è ricordato nel volumetto divulgativo "*Tutto quello che dovete sapere sul terremoto*" edito dall'INGV e di cui il prof. Boschi è uno dei due autori, ma soprattutto perché era indicato nei documenti preparatori alla riunione "*Breve relazione tecnico-scientifica sull'attività sismica dell'aquilano*" redatta dall'INGV e "*Rapporto d'evento del 31.3.2009*" redatto dalla Protezione Civile.

Analogamente non venne portato alcun dato a sostegno dell'affermazione "*I periodi di ritorno sono nell'ordine di 2-3000 anni*" (prof. Boschi) anche se essa contraddice l'evidenza storica (qui riassunta in figura 2) che i partecipanti alla riunione passano sotto silenzio, insieme al già citato studio del prof. Boschi [3].

In sintonia con l'affermazione del prof. Barberi "*Questa sequenza sismica non preannuncia niente, ma focalizza di nuovo l'attenzione su una zona sismogenetica in cui prima o poi un grosso terremoto ci sarà*" il prof. Dolce, rispondendo ad una precisa domanda dell'assessore regionale Stati disse: "*i tecnici in fase di sopralluogo prestino attenzione, non tanto agli elementi strutturali che, quasi sicuramente non dovrebbero essere stati danneggiati, quanto alle strutture di completamento quali controsoffittature, rivestimenti, camini, cornicioni, balconi, aggetti etc.*". Perché parlare al passato ("*dovrebbero essere stati*") quando la sequenza sismica è ancora in atto, tanto più che lo stesso Dolce, nel suo libro

*“Proteggersi dal terremoto. Le moderne tecnologie e metodologie e la nuova normativa sismica”* aveva mostrato di essere perfettamente al corrente del fatto che la presenza di uno sciame sismico è da considerarsi un indice di aumentato pericolo? Ma, soprattutto, perché distogliere l’attenzione dagli elementi strutturali quando nel cosiddetto *“Rapporto Barberi”* (ovvero il *“Censimento di vulnerabilità degli edifici pubblici, strategici e speciali nelle regioni Abruzzo, Basilicata, Calabria, Campania, Molise, Puglia e Sicilia”*, Dipartimento della Protezione Civile, 1999) alla stesura del quale avevano partecipato anche i proff. Eva e Dolce, si evidenziava che all’Aquila esisteva un gran numero di edifici del tutto inadatti a sopportare eventi sismici?

Più in generale, la commissione cercò di dare l’impressione che non fosse verosimile un incremento dell’intensità dei sismi e che non ci fosse un aumentato pericolo: *“Escluderei che lo sciame sismico sia preliminare di eventi”, “Improbabile che ci sia a breve una scossa come quella del 1703, pur se non si può escludere in maniera assoluta”* (prof. Boschi); *“Gli sciame tendono ad avere la stessa magnitudo ed è molto improbabile che nello stesso sciame la magnitudo cresca”* (prof. Barberi). L’effetto netto fu quello di assicurare gli amministratori locali: *“Grazie per queste vostre affermazioni, che mi permettono di andare a assicurare la popolazione attraverso i media che incontreremo in conferenza stampa”* (assessore Stati).

Che questo fosse il tono della riunione emerge non solo dai verbali, ma anche dalle testimonianze. Il dott. Del Pinto ha ricordato una telefonata col suo diretto superiore:

*«dissi: “Qua si dice che si aspettano terremoti grossomodo simili a quelli che ci sono stati finora, perché sembrerebbe che in uno sciame non possano esserci molto probabilmente degli aumenti di magnitudo. Ma in realtà l’aumento di magnitudo già c’era stato, già si era passati il giorno prima, cioè se questa riunione fosse stata fatta... Dissi proprio così al mio dirigente: “Se questa riunione fosse stata fatta una settimana fa, si poteva fare lo stesso discorso in relazione alla magnitudo massima che aveva raggiunto un evento durante lo sciame, che era due ed otto, dopodiché ieri, cioè il 30 marzo c’è stato il quattro”. Io dissi proprio così: “Se*

*la prossima settimana c’è il cinque, noi che ne sappiamo?”»*[1] p.101

Qui si inserisce la seconda grave mancanza rilevata dalla corte nei confronti degli imputati, ovvero una insufficiente ed incompleta opera di informazione ([1] §3.6, §5.9).

Per esempio, se la commissione avesse ritenuto che l’assessore Stati avesse frainteso il senso della riunione (*“queste vostre affermazioni, che mi permettono di andare a assicurare la popolazione”*), correggerla sarebbe stato suo esplicito dovere.

Un altro punto importante è quello relativo al *“rilascio di energia”*. In una intervista televisiva, rilasciata poco prima della riunione, il prof. De Bernardinis affermò che il proseguire della sequenza sismica *“è una situazione favorevole perché è uno scarico di energia continuo”*. Dichiarazioni analoghe erano state fatte in precedenza anche dal dott. Bertolaso ed erano state ampiamente riportate dai mezzi di comunicazione nazionali e locali. È ben documentato che queste dichiarazioni ebbero un effetto tranquillizzante sulla popolazione dell’Aquila ([1] §4.3). Ma, rispondendo a dirette domande del Pubblico Ministero se ritenessero che la sequenza sismica rendesse la situazione più favorevole, gli altri imputati si sono espressi in questi termini: *“non è per nulla ovvio”* (prof. Barberi); *“è un fenomeno neutro, che non aumenta né fa diminuire la probabilità di una forte scossa”* (prof. Boschi); *“una evidente sciocchezza”* (prof. Eva); *“sarei saltato sulla sedia”* (dott. Selvaggi). Di queste valutazioni non vi è traccia nel verbale della riunione, e, secondo le testimonianze, la questione fu appena accennata e subito accantonata. In seguito la Commissione non fece alcun tentativo di correggere pubblicamente quella che fu senza dubbio una affermazione assai imprudente da parte del prof. De Bernardinis.

Riguardo agli obblighi di informazione il giudice Billi riconosce che la Commissione Grandi Rischi può limitarsi semplicemente a riferire al Dipartimento della Protezione Civile, ma nel caso dell’Aquila

*«per scelta mediatica, il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile affidò il compito informativo direttamente ai membri della Commissione Grandi Ri-*

*schi che se ne assunsero consapevolmente e volontariamente l'onere».*

Infatti:

*«La riunione venne tenuta praticamente a porte aperte proprio per scelta "mediatica" ispirata dal dott. Bertolaso e condivisa dagli stessi soggetti che presiedevano i lavori e dirigevano la discussione».*

*«Per amplificare gli effetti di tale canale comunicativo diretto, al termine della riunione, gli stessi Barberi e De Bernardinis, alla presenza del prof. Dolce e del prof. Calvi, partecipavano ad una conferenza stampa con il sindaco Cialente e l'assessore Stati».*

Per di più la Commissione non offrì al Dipartimento della Protezione Civile alcuna raccomandazione o suggerimento riguardo alla prevenzione del rischio o riguardo alle informazioni da comunicare al pubblico, evidentemente ritenendo compiuto il proprio compito.

Quest'ultimo punto rende assai facilmente difendibile la posizione del dott. Guido Bertolaso, capo del Dipartimento della Protezione Civile, ma non membro della Commissione Grandi Rischi, indagato di reato connesso dalla Procura della Repubblica dell'Aquila. Per esempio, riguardo alle dichiarazioni sullo "scarico di energia", Bertolaso ribatte: "Non c'è stato scienziato degno di tale nome, italiano o straniero, che mi abbia mai detto «Ma che stai dicendo?»". Che scienziati italiani o esteri omettano di correggere gli svarioni comunicativi della Protezione Civile è scusabile. Non lo è se l'omissione è compiuta dalla Commissione Grandi Rischi, che è stata costituita proprio per evitare tali passi falsi. Anche la famosa telefonata in cui Bertolaso parlò di "operazione mediatica" volta a "tranquillizzare la popolazione" è assai meno incriminante di quanto comunemente si ritenga. Non solo perché nella stessa telefonata egli redarguì aspramente l'assessore Stati per aver emanato un comunicato stampa contenente la frase "non sono previste altre scosse di terremoto" (una cosa giustamente definita "demenziale"), ma soprattutto perché nella lettera di convocazione della Commissione e nel comunicato stampa che annunciava la riunione, Bertolaso specificò che la Commissione era incaricata di "fornire ai cittadini abruzzesi tutte le informazioni disponibili alla comunità scientifica sull'attività sismica delle ultime setti-

mane". La Commissione aveva sia la possibilità che il dovere di dichiarare infondato l'auspicio di "tranquillizzare la popolazione" se l'avesse ritenuto tale. In effetti, le indagini sul ruolo del dott. Bertolaso si sono concluse con una richiesta di archiviazione pochi giorni dopo la pubblicazione delle motivazioni della sentenza.

La contraddizione di fondo nella condotta della Commissione Grandi Rischi fu quella di non aver mai sciolto l'ambiguità fra affermazioni (vere) che andavano intese in senso deterministico "i terremoti non si possono prevedere" e valutazioni del pericolo (scientificamente dubbie, ma non di per sé incriminanti) da intendersi in senso probabilistico "escluderei che lo sciame sia preliminare di eventi". Questa ambiguità, che pone sullo stesso piano i due distinti tipi di affermazione, produsse l'assurda situazione di una commissione che prevede che qualcosa di imprevedibile verosimilmente non si verificherà.

Un intero capitolo delle motivazioni della sentenza ([1] §6) è dedicato alla disamina di quello che sarebbe stato il comportamento alternativo lecito. Per quanto il linguaggio legale sia particolarmente prolisso, l'intero capitolo è sintetizzabile in due punti (i) gli imputati individualmente avevano molte più informazioni di quelle che sono state discusse il 31 marzo 2009, come si evince dalla lettura dei loro lavori scientifici e dalla documentazione preparatoria alla riunione; (ii) queste informazioni non sono state utilizzate nel valutare i rischi. La conclusione è chiara: se queste informazioni fossero state usate sarebbero state evitate tutte le contraddizioni e le dubbie affermazioni di cui abbiamo parlato prima, e sarebbe stato possibile arrivare ad una valutazione del rischio completa e coerente. Il giudice commenta che l'atteggiamento omissivo della Commissione "equivale alla morte del sapere" ([1] p.648).

Il resto delle motivazioni della sentenza ricostruisce penosamente il percorso del flusso di informazioni dalla Commissione Grandi Rischi alla popolazione, e di come queste informazioni abbiano influenzato le decisioni delle vittime, persuase, per esempio, di poter rimanere a dormire in casa la notte tra il 5 ed il 6 aprile 2012.

È ancora presto per valutare se il processo dell'Aquila avrà "effetti intimidatori" su coloro che in

futuro dovranno assumersi la responsabilità di fare valutazioni ufficiali del rischio, tanto più che questa è solo una sentenza di primo grado. Possiamo però osservare che l'atteggiamento della Protezione Civile è cambiato. In occasione delle sequenze sismiche del Pollino e della Garfagnana non è stato fatto alcun tentativo di "tranquillizzare la popolazione", semmai sono state allestite tendopoli per consentire di avere un letto poco confortevole, ma sicuro, a chi nutrivà dubbi sulla robustezza della propria casa. Anche in occasione dei terremoti in Emilia non è stato suggerito di abbandonare le tendopoli anche quando, dopo ben due forti scosse, ma con la sequenza sismica ancora in corso, l'intensa calura incentivava le persone a rientrare nelle proprie abitazioni.

Anche se a caro prezzo, la lezione sullo "scarico di energia" sembra essere stata appresa.



- [1] Sentenza 380/2012, depositata il 18/1/2013, Tribunale dell'Aquila. Disponibile in rete alla pagina <http://processoaquila.wordpress.com/trial-documentation/>
- [2] Disponibile in rete alla pagina <http://www.nature.com/news/shock-and-law-1.11643>
- [3] E. BOSCHI, P. GASPERINI, F. MULARGIA: "Forecasting Where Larger Crustal Earthquakes Are Likely to Occur in Italy in the Near Future", *Bulletin of the Seismological Society of America* **85** (1995), 1475–1482.

- [4] INTERNATIONAL COMMISSION ON EARTHQUAKE FORECASTING: "Operational Earthquake Forecasting: State of Knowledge and Guidelines for Utilization", *Annals of Geophysics* **54** (2011), 315-391. Bozza disponibile in rete alla pagina [http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione\\_sismologi.wp](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione_sismologi.wp)
- [5] Disponibile in rete alla pagina <http://www.nature.com/news/2011/110914/full/477264a.html>
- [6] [http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa\\_ps\\_apr04/italia.html](http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa_ps_apr04/italia.html)
- [7] T. H. JORDAN AND L. M. JONES: "Operational Earthquake Forecasting: Some Thoughts on Why and How", *Seismological Research Letters* **81** (2010), 571-574.



**Francesco Paparella:** Laureato in Fisica presso l'Università di Torino, ha conseguito un dottorato in Geofisica presso l'Università di Genova. È attualmente ricercatore in Fisica Matematica presso l'Università del Salento dove insegna Istituzioni di Fisica Matematica. Si occupa di meccanica dei fluidi (applicata alla geofisica) e di sistemi dinamici (applicati alla meccanica dei fluidi ed all'ecologia).

# La legge di reciprocità quadratica

*Symétrie est ce qu'on voit d'une vue*

Blaise Pascal

---

**Rocco Chirivì**

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

---

**L**a legge di reciprocità quadratica è stata congetturata da Eulero e Legendre e dimostrata in modo rigoroso da Gauss nella sua fondamentale opera *Disquisitiones Arithmeticae* (1798). Questo risultato, di cui Gauss ha dato ben otto diverse dimostrazioni e da lui chiamato "aureum theorema", permette, svelando una simmetria nascosta, di decidere quando un numero intero è un residuo quadratico modulo un numero primo.

Per illustrare l'importanza di tale problema consideriamo le equazioni di secondo grado nei numeri reali. La formula risolutiva di un'equazione quadratica  $ax^2 + bx + c = 0$ , nell'incognita  $x$ , era già nota, seppur solo per esempi e con limitazioni sul segno dei coefficienti  $a, b, c$ , ai matematici babilonesi intorno al 400 a.c. (vedi [1], anche per tutte le altre notizie storiche). Comunque, come consueto per l'antichità, le soluzioni negative venivano scartate. E, cosa più importante per ciò di cui vogliamo parlare qui, i problemi considerati avevano sempre soluzioni reali; cioè il discriminante  $\Delta \doteq b^2 - 4ac$  delle equazioni quadratiche, era sempre un numero positivo.

Dobbiamo aspettare il XVI secolo per un primo uso consapevole dei numeri complessi; ad esempio Cardano nell'*Ars magna* (1545) suggerisce, pur ammettendo trattarsi di "torture mentali", che le soluzioni di  $x^2 - 10x + 40 = 0$  siano  $5 + \sqrt{-15}$  e  $5 - \sqrt{-15}$ . Solo con l'estensione del campo dei numeri reali al campo dei numeri complessi è possibile scrivere la formula risolutiva dell'equazione generica di secondo grado sopra riportata. Le due radici sono  $(-b \pm \sqrt{\Delta})/2a$  e quindi, per valori di  $a, b, c$  che rendono negativo  $\Delta$ , si tratta di numeri complessi *non* reali.

Quest'estensione è infatti necessaria visto che non tutti i numeri reali ammettono radice quadrata: un numero reale ammette radice quadrata reale se e solo se è non negativo. Possiamo esprimere quanto appena detto in maniera equivalente come: l'insieme  $\mathbb{R}^{*2}$  dei numeri reali non nulli che sono quadrati di altri numeri reali coincide con l'insieme  $\mathbb{R}_{>0}$  dei numeri positivi.

Possiamo anche studiare le equazioni di secondo grado sul campo dei numeri razionali: consideriamo, cioè, un'equazione  $ax^2 + bx + c = 0$  con  $a, b, c \in \mathbb{Q}$  e ci chiediamo quando abbia soluzioni razionali. Visto che  $\mathbb{Q}$  è un sottocampo di  $\mathbb{R}$ , l'equazione deve avere soluzioni reali; quindi  $\Delta > 0$ . Ovviamente questo è necessario ma non

sufficiente in quanto se abbiamo, ad esempio,  $\Delta = 2$  allora  $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$ . Infatti, per avere soluzioni razionali, dobbiamo chiedere che  $\Delta$  sia il quadrato di una frazione; devono esistere cioè  $e, f \in \mathbb{N}$ , con  $f > 0$ , per cui  $\Delta = (e/f)^2$ .

È invece ovvio che sul campo  $\mathbb{C}$  dei numeri complessi non vi è alcun problema: ogni equazione di secondo grado ammette due radici se contate con molteplicità.

Oltre ai campi  $\mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$  considerati sopra, esistono anche campi con un numero finito di elementi. Tali campi sono completamente classificati: per ogni numero primo  $p$  e intero positivo  $n$  esiste, a meno di isomorfismo, un solo campo con  $p^n$  elementi, esso viene indicato con  $\mathbb{F}_{p^n}$ .

I campi finiti sono di fondamentale importanza per la teoria dei numeri, la geometria algebrica e le applicazioni alla crittografia ma anche, ad esempio, per certi settori della fisica. Noi saremo interessanti in particolare ai campi  $\mathbb{F}_p$  (con  $p$  numero primo). È possibile realizzare  $\mathbb{F}_p$  come l'insieme  $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$  delle classi di resto degli interi modulo  $p$ . In quello che segue, con un lieve abuso di notazione, indicheremo la classe di un intero  $a$  modulo il primo  $p$  con lo stesso simbolo  $a$ . Così, ad esempio, abbiamo  $-19 = 2$  in  $\mathbb{F}_7$  in quanto  $-19$  e  $2$  hanno lo stesso resto quando divisi per  $7$ . Osserviamo anche che le operazioni in  $\mathbb{F}_p$  sono quelle dell'aritmetica modulare: la somma e il prodotto delle classi di  $a$  e  $b$  è, rispettivamente, la classe della somma e del prodotto di  $a$  e  $b$ .

Come abbiamo fatto per  $\mathbb{Q}$ ,  $\mathbb{R}$  e  $\mathbb{C}$ , è naturale ed, anzi, di grande importanza, studiare le equazioni di secondo grado nei campi finiti. Inoltre se il primo  $p$  non è  $2$  allora la formula risolutiva vista sopra continua ad essere valida e può essere dimostrata nello stesso modo che per  $\mathbb{R}$ .

Ad esempio, se consideriamo l'equazione  $x^2 - x + 5 = 0$  nel campo  $\mathbb{F}_7$ , abbiamo  $\Delta = -19 = 2$  e quindi, osservando che  $3^2 = 9 = 2$  in  $\mathbb{F}_7$ , otteniamo che le soluzioni sono  $(1 \pm \sqrt{2})/2 = (1 \pm 3)/2$ , cioè  $2$  e  $-1$ . Si noti che il simbolo  $\sqrt{2}$  significa "la classe di resto che ha per quadrato la classe di resto  $2$ ".

Consideriamo un ulteriore esempio sempre in  $\mathbb{F}_7$ : l'equazione  $x^2 - x + 3 = 0$  non ha alcuna soluzione in quanto  $\Delta = -11 = 3$  non ammette radice quadrata in  $\mathbb{F}_7$ . Infatti l'insieme  $\mathbb{F}_7^{*2}$  dei residui quadratici non nulli di  $\mathbb{F}_7$  è dato da

$(\pm 1)^2 = 1$ ,  $(\pm 2)^2 = 4 = -3$  e  $(\pm 3)^2 = 9 = 2$ ; in particolare  $3$  non è un quadrato modulo  $7$ .

Come si vede subito da questi esempi, per studiare le equazioni di secondo grado sui campi finiti  $\mathbb{F}_p$ , è necessario essere in grado di decidere quali siano i residui quadratici: diciamo che un intero  $q$  è un *residuo quadratico* modulo un primo  $p$  se esiste un intero  $a$  per cui  $q \equiv a^2 \pmod{p}$ . È ovvio che  $q$  è un residuo quadratico non nullo modulo  $p$  se e solo se  $q \in \mathbb{F}_p^{*2}$ . Capire se un intero  $q$  è un residuo quadratico è un problema per niente ovvio: ad esempio la classe di  $29$  è o meno un quadrato modulo il primo  $43$ ? Una possibile risposta elementare si ha calcolando tutti i possibili quadrati  $(\pm 1)^2, (\pm 2)^2, (\pm 3)^2, \dots$  modulo  $43$  e verificando se  $29$  appare in tale lista.

In questo problema  $q$  e  $p$  hanno ruoli molto diversi:  $q$  è una classe di resto modulo  $p$  o, in altri termini,  $q$  è considerato come elemento del campo finito  $\mathbb{F}_p$ . Nostro obiettivo in questo articolo è mostrare che invece, grazie alla legge di reciprocità quadratica, esiste una simmetria: per decidere se  $q$  è un quadrato modulo  $p$  si può, in maniera equivalente, studiare se  $p$  è un quadrato modulo  $q$ . Inoltre, questa simmetria ci permette di trovare una risposta efficiente al problema di decidere se un intero è o meno un residuo quadratico.

Ci toccherà però costruire un piccolo tratto di teoria per poter anche solo enunciare la legge di reciprocità quadratica. Ma, come succede spesso in matematica, la fatica compiuta sarà ampiamente ripagata dalla scoperta di quella che abbiamo chiamato simmetria nascosta.

Anche se posposte per facilità di lettura, abbiamo deciso di includere le dimostrazioni dei risultati che vedremo. È infatti solo studiando con grande attenzione le dimostrazioni che si può apprezzare la matematica. Quelle qui riportate sono poco più che traduzioni di ciò che può essere letto in "A course in arithmetic" di Jean-Pierre Serre [2].

Cominciamo definendo il *simbolo di Legendre*: dato un intero  $a$  definiamo

$$\left(\frac{a}{p}\right) \doteq \begin{cases} 0 & \text{se } a \text{ è divisibile per } p \\ 1 & \text{se } a \text{ è un residuo quadratico} \\ & \text{non nullo modulo } p \\ -1 & \text{se } a \text{ non è un residuo quadratico} \\ & \text{modulo } p. \end{cases}$$

Questo è equivalente a dire che  $\left(\frac{a}{p}\right) = 1$  se e solo se  $a \in \mathbb{F}_p^{*2}$ . Ad esempio: per quanto abbiamo visto su 2 e 3 in  $\mathbb{F}_7$ , si ha

$$\left(\frac{2}{7}\right) = 1 \quad \text{e} \quad \left(\frac{3}{7}\right) = -1.$$

La nostra prima osservazione è la seguente

**Proposizione 1** (Criterio di Eulero). *L'insieme  $\mathbb{F}_p^{*2}$  dei residui quadratici non nulli è il nucleo dell'omomorfismo*

$$\mathbb{F}_p^* \ni x \longmapsto x^{(p-1)/2} \in \{\pm 1\}$$

ed ha indice 2 in  $\mathbb{F}_p^*$ . In particolare

$$\left(\frac{x}{p}\right) = x^{(p-1)/2}$$

per ogni  $x \in \mathbb{F}_p^*$ .

Il criterio di Eulero ci dice che in  $\mathbb{F}_p^*$  ci sono tanti residui quadratici quanti non residui quadratici visto che  $\mathbb{F}_p^{*2}$  ha indice 2 in  $\mathbb{F}_p^*$ .

Grazie al criterio di Eulero possiamo calcolare  $\left(\frac{x}{p}\right)$  eseguendo la potenza  $x^{\frac{p-1}{2}}$  in  $\mathbb{F}_p$ . Ad esempio

$$\left(\frac{2}{7}\right) = 2^{\frac{7-1}{2}} = 2^3 = 8 = 1$$

e

$$\left(\frac{3}{7}\right) = 3^{\frac{7-1}{2}} = 3^3 = 27 = -1$$

in  $\mathbb{F}_7$ ; e questo concorda con quanto avevamo già visto. Ma il criterio di Eulero non è ancora abbastanza, ad esempio abbiamo

$$\left(\frac{29}{43}\right) = 29^{\frac{43-1}{2}} = 29^{21}$$

e questo è un calcolo non immediato.

Tale metodo, però, può essere applicato per decidere se  $-1$  è un quadrato modulo  $p$ . Infatti abbiamo subito

**Corollario 2.** *Per il simbolo di Legendre in  $-1$  si ha*

$$\left(\frac{-1}{p}\right) = (-1)^{(p-1)/2}$$

e quindi  $-1$  è un residuo quadratico modulo  $p$  se e solo se  $p$  è congruo ad 1 modulo 4.

Ad esempio, il primo 7 non è congruo ad 1 modulo 4 e quindi  $-1$  non è un quadrato modulo 7, infatti  $-1$  non compare nella lista dei quadrati visti sopra. Come altro esempio consideriamo il primo 13; visto che esso è congruo ad 1 modulo 4 sappiamo che  $-1$  è un quadrato in  $\mathbb{F}_{13}$ , ed infatti abbiamo  $5^2 = 25 = -1$ . Come conseguenza l'equazione  $x^2 + 1 = 0$  non ha alcuna soluzione in  $\mathbb{F}_7$  mentre ha le due soluzioni  $\pm 5$  in  $\mathbb{F}_{13}$ .

Il criterio di Eulero può essere usato per dimostrare il seguente risultato che ci dice quando 2 è un residuo quadratico modulo  $p$ .

**Corollario 3.** *Per il simbolo di Legendre in 2 si ha*

$$\left(\frac{2}{p}\right) = (-1)^{(p^2-1)/8}$$

e quindi 2 è un residuo quadratico modulo  $p$  se e solo se  $p$  è congruo ad 1 o a  $-1$  modulo 8.

Come esempio consideriamo il primo 17. Visto che 17 è congruo ad 1 modulo 8, 2 è un quadrato modulo 17; ed infatti  $6^2 = 36 = 2$  modulo 17.

Nei due casi di  $-1$  e 2 analizzati, il simbolo di Legendre dipende dall'appartenenza di  $p$  a certe classi modulo un altro intero  $N_{-1} \doteq 4$  per  $-1$  e  $N_2 \doteq 8$  per 2. Questo è vero in generale, non solo per  $-1$  e 2, ed è una conseguenza di quanto vedremo in seguito. Appare già qui un primo fenomeno di simmetria: il primo  $p$  da modulo diventa una classe modulo un altro intero per decidere se  $-1$  e 2 sono residui quadratici.

Come altra conseguenza del criterio di Eulero, abbiamo che il simbolo di Legendre è moltiplicativo, cioè

$$\left(\frac{xy}{p}\right) = \left(\frac{x}{p}\right) \left(\frac{y}{p}\right),$$

visto che la mappa  $x \longmapsto x^{(p-1)/2}$  è un omomorfismo.

Si noti che, mentre è chiaro che il prodotto di due residui quadratici è ancora un residuo quadratico e che il prodotto di un residuo quadratico e un non residuo quadratico è un non residuo quadratico, non è ovvio che il prodotto di due non quadrati sia un quadrato. Questo però segue da quanto provato: se  $x$  e  $y$  sono non residui quadratici allora

$$\left(\frac{xy}{p}\right) = \left(\frac{x}{p}\right) \left(\frac{y}{p}\right) = (-1) \cdot (-1) = 1,$$

cioè  $xy$  è un quadrato modulo  $p$ .

Dalla moltiplicatività di  $x \mapsto \left(\frac{x}{p}\right)$  segue che, per calcolare  $\left(\frac{n}{p}\right)$ , con  $n$  intero qualsiasi, basta fattorizzare  $n$  in primi, usando anche il fattore  $-1$  se  $n$  è negativo. Avendo già descritto come calcolare il simbolo di Legendre per  $-1$  e  $2$ , in problema del calcolo di  $\left(\frac{n}{p}\right)$  viene così ricondotto al calcolo di  $\left(\frac{q}{p}\right)$  con  $p$  e  $q$  primi dispari distinti.

Possiamo ora enunciare la legge di reciprocità quadratica; in particolare vediamo che il simbolo di Legendre ha una semplicissima, e inattesa, simmetria per lo scambio  $p \leftrightarrow q$ .

**Teorema 4** (Legge di reciprocità quadratica). *Se  $p$  e  $q$  sono primi dispari distinti allora*

$$\left(\frac{q}{p}\right)\left(\frac{p}{q}\right) = (-1)^{\frac{p-1}{2}\frac{q-1}{2}}.$$

Cioè

$$\left(\frac{p}{q}\right) = \left(\frac{q}{p}\right)$$

tranne nel caso in cui  $p$  e  $q$  sono entrambi congrui a  $-1$  modulo 4 in cui

$$\left(\frac{p}{q}\right) = -\left(\frac{q}{p}\right).$$

Ricaviamo che i due problemi:

- $q$  è o meno un quadrato modulo  $p$
- $p$  è o meno un quadrato modulo  $q$

hanno la stessa risposta tranne nel caso in cui  $p$  e  $q$  hanno entrambi resto  $-1$  per 4 in cui hanno risposta opposta. La legge di reciprocità è quindi un risultato altamente non banale che svela un elegante e sorprendente legame tra i due problemi.

Vediamo un esempio. Abbiamo già osservato che  $\left(\frac{3}{7}\right) = -1$ , cioè 3 non è un quadrato in  $\mathbb{F}_7$ ; inoltre  $\left(\frac{7}{3}\right) = \left(\frac{1}{3}\right) = 1$ . Quindi  $\left(\frac{3}{7}\right) = -\left(\frac{7}{3}\right)$  e infatti 3 e 7 sono entrambi congrui a  $-1$  modulo 4.

Un altro esempio. Per  $q = 7$  e  $p = 5$  si ha  $\left(\frac{5}{7}\right) = -1$  in quanto  $5 = -2$  non è in  $\mathbb{F}_7^{*2}$  e anche

$\left(\frac{7}{5}\right) = \left(\frac{2}{5}\right) = -1$  in quanto in  $\mathbb{F}_5^*$  solo  $\pm 1$  sono quadrati. Quindi in questo secondo esempio i due simboli di Legendre  $\left(\frac{5}{7}\right)$  e  $\left(\frac{7}{5}\right)$  sono uguali ed infatti 5 non è congruo a  $-1$  modulo 4.

La legge di reciprocità quadratica e il calcolo del simbolo di Legendre in 2 ci permettono di risolvere subito il problema che ci eravamo posti: 29 è un residuo quadratico modulo 43? Calcolando le classi di resto modulo 4 dei primi coinvolti abbiamo

$$\begin{aligned} \left(\frac{29}{43}\right) &= \left(\frac{43}{29}\right) = \left(\frac{14}{29}\right) = \left(\frac{2}{29}\right)\left(\frac{7}{29}\right) = \\ &= -\left(\frac{29}{7}\right) = -\left(\frac{1}{7}\right) = -1 \end{aligned}$$

e quindi 29 non è un quadrato modulo 43.

Con quanto visto è possibile discutere un'equazione di secondo grado  $ax^2 + bx + c = 0$  in un campo finito  $\mathbb{F}_p$ . Calcoliamo  $\Delta = b^2 - 4ac$  e, con la legge di reciprocità quadratica, come fatto sopra per 29 e 43, calcoliamo il simbolo di Legendre  $\left(\frac{\Delta}{p}\right)$ . Se otteniamo  $-1$ , cioè se  $\Delta$  non è un residuo quadratico modulo  $p$ , allora l'equazione non ha alcuna soluzione. Se invece otteniamo 1, cioè se  $\Delta$  è un residuo quadratico, allora l'equazione può essere risolta. Si noti però che la legge di reciprocità non ci permette di *calcolare* la radice quadrata di  $\Delta$  in  $\mathbb{F}_p$ , possiamo solo decidere se essa esiste o meno.

Come esempio di applicazione della legge di reciprocità quadratica possiamo risolvere un esercizio posto da Goro Shimura in [3]. Consideriamo il polinomio  $f(x) \doteq x^2 - 3$  e calcoliamone i valori in  $0, 1, 2, 3, \dots$ . Fattorizzandoli otteniamo

$$\begin{aligned} -3, -2, 1, 6 &= 2 \cdot 3, 13, 22 = 2 \cdot 11, \\ 33 &= 3 \cdot 11, 46 = 2 \cdot 23, 61, \dots \end{aligned}$$

Escludendo 2 e 3, i primi che appaiono in queste fattorizzazioni sono 11, 13, 23, 61,  $\dots$ . È possibile caratterizzare tali primi? E continuando a calcolare il polinomio  $f(x)$  e a fattorizzare i risultati, quali altri primi troveremo?

Osserviamo che un primo  $p$  diverso da 3 appare come fattore di  $f(n)$  con  $n \in \mathbb{N}$  se e solo se  $n^2 - 3 = f(n) \equiv 0 \pmod{p}$ ; questo è come dire che 3 è un quadrato modulo  $p$ . Allora  $p \neq 3$  appare nella lista dei primi che stiamo

considerando se e solo se  $\left(\frac{3}{p}\right) = 1$ . Ma la legge di reciprocità ci dice che, per un primo  $p$  dispari, si ha  $\left(\frac{3}{p}\right) = \left(\frac{p}{3}\right)$  se  $p \equiv 1 \pmod{4}$ , mentre  $\left(\frac{3}{p}\right) = -\left(\frac{p}{3}\right)$  se  $p \equiv -1 \pmod{4}$ . Inoltre, visto che  $p \neq 3$ , abbiamo  $\left(\frac{p}{3}\right) = \left(\frac{1}{3}\right) = 1$  se  $p \equiv 1 \pmod{3}$  mentre  $\left(\frac{p}{3}\right) = \left(\frac{-1}{3}\right) = -1$  se  $p \equiv -1 \pmod{3}$ . Mettendo insieme abbiamo

$$\left(\frac{3}{p}\right) = \begin{cases} 1 & \text{se } p \equiv \pm 1 \pmod{12} \\ -1 & \text{se } p \equiv \pm 5 \pmod{12} \end{cases}$$

Questo ci permette di concludere che i primi che compaiono nella lista sono tutti e soli quelli congrui a 1 o  $-1$  modulo 12.

Osserviamo, inoltre, che il calcolo del simbolo di Legendre in 3 ci dice che per decidere se 3 è un residuo quadratico modulo  $p$  basta controllare in che classe modulo  $N_3 \doteq 12$  sia il primo  $p$ . Proponiamo al lettore di dimostrare, usando quanto visto, che, analogamente ai casi 2 e 3, si può porre  $N_q \doteq 4q$  per ogni primo  $q$ .

Oltre alla legge di reciprocità quadratica qui presentata, esistono anche leggi di reciprocità superiore. Lo stesso Gauss, sempre in *Disquisitiones Arithmeticae*, ha enunciato la legge di reciprocità quartica mentre la legge di reciprocità cubica è dovuta al suo studente Eisenstein. Queste leggi sono poi confluite nella *teoria del corpo di classe*, in particolare nella *legge di reciprocità di Artin*, che tratta le estensioni dei numeri razionali con gruppo di Galois abeliano. Ancora oltre, lo studio del caso non abeliano è oggi al centro della ricerca in matematica con una rete di congetture e risultati parziali che formano il *programma di Langlands*.

Vediamo ora, come promesso, le dimostrazioni dei risultati proposti.

Ricordiamo alcuni fatti elementari di teoria dei campi. Per prima cosa ogni campo  $\mathbb{K}$  ammette una *chiusura algebrica*, cioè esiste un altro campo  $\overline{\mathbb{K}}$  che contiene  $\mathbb{K}$  e tale che ogni polinomio  $f(x)$  a coefficienti in  $\mathbb{K}$  ha una radice, cioè una soluzione di  $f(x) = 0$ , in  $\overline{\mathbb{K}}$ . Ad esempio la chiusura algebrica dei numeri reali è il campo dei numeri complessi. Indicheremo la chiusura algebrica di  $\mathbb{F}_p$  con  $\overline{\mathbb{F}}_p$ .

L'insieme  $\mathbb{F}_p^*$  delle classi di resto diverse da 0 è un gruppo di ordine  $p - 1$ ; quindi, in particolare,  $x^{p-1} = 1$  per ogni  $x \in \mathbb{F}_p^*$ . Non solo, come sottoinsieme di  $\overline{\mathbb{F}}_p$ ,  $\mathbb{F}_p^*$  è esattamente l'insieme degli  $x$  per cui  $x^{p-1} = 1$ .

Cominciamo dal criterio di Eulero.

*Dimostrazione della Proposizione 1.* Essendo  $\mathbb{F}_p^*$  un gruppo abeliano è chiaro che la mappa  $\varphi : x \mapsto x^{(p-1)/2}$  è un omomorfismo di  $\mathbb{F}_p^*$  in sé. Inoltre si ha  $(x^{(p-1)/2})^2 = x^{p-1} = 1$  in quanto  $\mathbb{F}_p^*$  ha ordine  $p - 1$ ; quindi  $x^{(p-1)/2}$  è una soluzione dell'equazione  $t^2 - 1 = 0$  nell'indeterminata  $t$ . Tale equazione ha per soluzioni  $\pm 1$  in ogni campo, quindi anche in  $\mathbb{F}_p$ . Questo prova che l'immagine di  $\varphi$  è contenuta in  $\{\pm 1\}$ .

Sia ora  $y \in \overline{\mathbb{F}}_p$  una radice quadrata di  $x$ . Allora  $x^{(p-1)/2} = y^{p-1}$  e, inoltre,  $y^{p-1} = 1$  se e solo se  $y \in \mathbb{F}_p$ , cioè se e solo se  $x$  ha una radice quadrata in  $\mathbb{F}_p$ . E questo è equivalente a  $x \in \mathbb{F}_p^{*2}$ . Abbiamo così provato che  $\mathbb{F}_p^{*2} = \text{Ker } \varphi$  e che  $\left(\frac{x}{p}\right) = x^{(p-1)/2}$ .

Osserviamo ora che l'omomorfismo  $\mathbb{F}_p^* \ni x \mapsto x^2 \in \mathbb{F}_p^*$  non è iniettivo in quanto  $(-1)^2 = 1$  e quindi esso non è neanche suriettivo. Visto che l'immagine di questo omomorfismo è  $\mathbb{F}_p^{*2}$  abbiamo provato che  $\text{Ker } \varphi = \mathbb{F}_p^{*2}$  è propriamente contenuto in  $\mathbb{F}_p^*$ . Allora  $\varphi$  è una mappa suriettiva (cioè  $-1$  viene raggiunto). Segue quindi che  $\text{Ker } \varphi$  ha indice 2 in  $\mathbb{F}_p^*$ , cioè metà elementi sono quadrati e metà non lo sono.  $\square$

Vediamo ora come il calcolo del simbolo di Legendre in 2 si ottenga dal criterio di Eulero.

*Dimostrazione del Corollario 3.* Sia  $\alpha$  una radice ottava primitiva dell'unità in  $\overline{\mathbb{F}}_p$  (cioè  $\alpha$  è una soluzione di  $t^8 - 1 = 0$  ma non è soluzione di  $t^4 - 1$ , in altre parole  $\alpha$  è soluzione di  $t^4 + 1$ ) e sia  $y \doteq \alpha + \alpha^{-1}$ . Abbiamo

$$y^2 = (\alpha + \alpha^{-1})^2 = \alpha^2 + 2 + \alpha^{-2} = 2,$$

dove abbiamo usato

$$\alpha^2 + \alpha^{-2} = \alpha^{-2}(\alpha^4 + 1) = 0.$$

Cioè  $y$  è una radice di 2 in  $\overline{\mathbb{F}}_p$ . Allora

$$\left(\frac{2}{p}\right) = 2^{(p-1)/2} = y^{p-1}.$$

Osserviamo ora che, avendo  $\mathbb{F}_p$  caratteristica  $p$  risulta,

$$y^p = (\alpha + \alpha^{-1})^p = \alpha^p + \alpha^{-p}.$$

Quindi, se  $p \equiv \pm 1 \pmod{8}$ , abbiamo

$$y^p = \alpha^p + \alpha^{-p} = \alpha + \alpha^{-1} = y,$$

da cui

$$\left(\frac{2}{p}\right) = y^{p-1} = 1.$$

Se, invece,  $p \equiv \pm 3 \pmod{8}$  abbiamo

$$y^p = \alpha^p + \alpha^{-p} = \alpha^3 + \alpha^{-3} = -(\alpha + \alpha^{-1}) = -y$$

dove abbiamo usato di nuovo  $\alpha^4 = -1$ . Concludiamo che

$$\left(\frac{2}{p}\right) = y^{p-1} = -1.$$

□

Nella dimostrazione della legge di reciprocità quadratica useremo due lemmi. Fissiamo  $p$  e  $q$  primi dispari distinti e sia  $\omega$  una radice primitiva  $q$ -esima dell'unità in  $\overline{\mathbb{F}}_p$ . Osserviamo che se  $x \in \mathbb{F}_q \simeq \mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$  allora  $\omega^x$  è ben definito; possiamo così considerare quella che si chiama *somma di Gauss*

$$y = \sum_{x \in \mathbb{F}_q} \left(\frac{x}{q}\right) \omega^x.$$

Ad esempio, visto che  $\mathbb{F}_7^{*2} = \{1, 2, -3 = 4\}$ , per  $q = 7$  si ha

$$y = \omega + \omega^2 - \omega^3 + \omega^4 - \omega^5 - \omega^6$$

dove  $\omega \in \overline{\mathbb{F}}_p$  è una radice settima primitiva dell'unità.

Nel seguente lemma vediamo che questa somma ci fornisce, a meno del segno, una radice quadrata di  $q$  in  $\overline{\mathbb{F}}_p$ .

**Lemma 5** (Lemma di Gauss). *Si ha  $y^2 = (-1)^{(q-1)/2} q$  in  $\overline{\mathbb{F}}_p$ .*

*Dimostrazione.* Abbiamo

$$\begin{aligned} y^2 &= \sum_{x,z \in \mathbb{F}_q} \left(\frac{xz}{q}\right) \omega^{x+z} \\ &= \sum_{u \in \mathbb{F}_q} \omega^u \left( \sum_{t \in \mathbb{F}_q} \left(\frac{t(u-t)}{q}\right) \right) \end{aligned}$$

Ora, se  $t \neq 0$ , allora

$$\begin{aligned} \left(\frac{t(u-t)}{q}\right) &= \left(\frac{-t^2}{q}\right) \left(\frac{1-ut^{-1}}{q}\right) \\ &= (-1)^{(q-1)/2} \left(\frac{1-ut^{-1}}{q}\right) \end{aligned}$$

dove abbiamo usato che

$$\left(\frac{-1}{q}\right) = (-1)^{(q-1)/2}.$$

Mentre, se  $t = 0$ , allora chiaramente

$$\left(\frac{t(u-t)}{q}\right) = 0.$$

Quindi abbiamo

$$y^2 = (-1)^{(q-1)/2} \sum_{u \in \mathbb{F}_q} A_u \omega^u$$

con

$$A_u = \sum_{t \in \mathbb{F}_q^*} \left(\frac{1-ut^{-1}}{q}\right).$$

Osserviamo ora che

$$A_0 = \sum_{t \in \mathbb{F}_q^*} \left(\frac{1}{q}\right) = q-1$$

in quanto  $\left(\frac{1}{q}\right) = 1$ . Se invece  $u \neq 0$  allora, al variare di  $t$  in  $\mathbb{F}_q^*$ , l'elemento  $1-ut^{-1}$  assume una ed una sola volta tutti i valori in  $\mathbb{F}_q \setminus \{1\}$ . Quindi, per  $u \neq 0$ , si ha

$$\begin{aligned} A_u &= \sum_{t \in \mathbb{F}_q^*} \left(\frac{1-ut^{-1}}{q}\right) \\ &= \sum_{s \in \mathbb{F}_q \setminus \{1\}} \left(\frac{s}{q}\right) \\ &= \sum_{s \in \mathbb{F}_q} \left(\frac{s}{q}\right) - \left(\frac{1}{q}\right) \\ &= -1 \end{aligned}$$

dove nell'ultima uguaglianza abbiamo usato che la somma indicata vale 0 in quanto  $\mathbb{F}_p^{*2}$  ha indice 2 in  $\mathbb{F}_p^*$ , cioè ci sono tanti quadrati quanti non quadrati.

Possiamo ora concludere la dimostrazione del lemma mettendo insieme quanto visto e notando che, essendo  $\omega$  una radice  $q$ -esima dell'unità, si

ha  $\sum_{u \in \mathbb{F}_q^*} \omega^u = \omega + \omega^2 + \dots + \omega^{q-1} = -1$

$$\begin{aligned} y^2 &= (-1)^{(q-1)/2} \sum_{u \in \mathbb{F}_q^*} A_u \omega^u \\ &= (-1)^{(q-1)/2} (q-1 - \sum_{u \in \mathbb{F}_q^*} \omega^u) \\ &= (-1)^{(q-1)/2} q. \end{aligned}$$

□

L'altro lemma di cui avremo bisogno è il seguente

**Lemma 6.** Si ha  $y^{p-1} = \left(\frac{p}{q}\right)$ .

*Dimostrazione.* Nei calcoli che seguono, basta osservare che  $\overline{\mathbb{F}}_p$  è un campo a caratteristica  $p$  e che  $p^{-1}$  è un quadrato modulo  $q$  se e solo se lo è  $p$ . Abbiamo

$$\begin{aligned} y^p &= \left(\sum_{x \in \mathbb{F}_q} \left(\frac{x}{q}\right) \omega^x\right)^p \\ &= \sum_{x \in \mathbb{F}_q} \left(\frac{x}{q}\right) \omega^{px} \\ &= \sum_{z \in \mathbb{F}_q} \left(\frac{zp^{-1}}{q}\right) \omega^z \\ &= \left(\frac{p}{q}\right) \sum_{z \in \mathbb{F}_q} \left(\frac{z}{q}\right) \omega^z \\ &= \left(\frac{p}{q}\right) y \end{aligned}$$

da cui la tesi visto che, per il lemma precedente,  $y$  è diverso da 0. □

Infine, possiamo ora vedere la dimostrazione della legge di reciprocità.

*Dimostrazione del Teorema 4.* Sia

$$y = \sum_{x \in \mathbb{F}_q} \left(\frac{x}{q}\right) \omega^x \in \overline{\mathbb{F}}_q$$

la somma di Gauss considerata sopra. Dal primo lemma sappiamo che

$$y^2 = (-1)^{(q-1)/2} q$$

e quindi

$$\left(\frac{(-1)^{(q-1)/2} q}{p}\right) = y^{p-1} = \left(\frac{p}{q}\right)$$

usando il secondo lemma. Per concludere basta ora osservare che

$$\begin{aligned} \left(\frac{(-1)^{(q-1)/2}}{p}\right) &= \left(\frac{-1}{p}\right)^{(q-1)/2} \\ &= \left((-1)^{(p-1)/2}\right)^{(q-1)/2} \\ &= (-1)^{\frac{q-1}{2} \frac{p-1}{2}} \end{aligned}$$

per l'espressione data del simbolo di Legendre in  $-1$ . □



- [1] MORRIS KLINE: *Storia del pensiero matematico*, Einaudi, Volumi 1 & 2 (1999).
- [2] JEAN-PIERRE SERRE: *A course in arithmetic*, Springer-Verlag (1973).
- [3] GORO SHIMURA: *The map of my life*, Springer-Verlag (2008).



**Rocco Chirivì:** Laureato in matematica all'università di Pisa e alla Scuola Normale Superiore. Ha conseguito il dottorato di ricerca presso la Scuola Normale Superiore. È stato ricercatore in Algebra alla Sapienza di Roma e all'università di Pisa. Da maggio 2012 è ricercatore presso il dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento. Si occupa di teoria delle rappresentazioni di algebre e gruppi di Lie.

**Numero I Anno 2013**

Viaggio nella Scienza

# Ithaca



---

**Il bosone di Higgs**

---

