

OLTRE LA FISICA *NORMALE*
INTERPRETAZIONI ALTERNATIVE
E TEORIE NON STANDARD
NELLA FISICA MODERNA

a cura di

Isabella Tassani

WANTED



NEITHER DEAD NOR ALIVE

Isonomia Epistemologica

Isonomia – Epistemologica

Volume 3

OLTRE LA FISICA NORMALE

**INTERPRETAZIONI ALTERNATIVE E TEORIE NON STANDARD NELLA FISICA MODERNA
PER IL 75-ESIMO COMPLEANNO DI FRANCO SELLERI**

Volume 1
Il realismo scientifico di Evandro Agazzi
Mario Alai (a cura di)

Volume 2
Complessità e riduzionismo
Vincenzo Fano, Enrico Giannetto, Giulia Giannini, Pierluigi Graziani (a cura di)

Volume 3
Oltre la fisica normale
Isabella Tassani (a cura di)

ISONOMIA - Epistemologica Series Editor
Gino Tarozzi

gino.tarozzi@uniurb.it

OLTRE LA FISICA NORMALE

**INTERPRETAZIONI ALTERNATIVE E TEORIE NON STANDARD NELLA FISICA MODERNA
PER IL 75-ESIMO COMPLEANNO DI FRANCO SELLERI**

A cura di

Isabella Tassani

© ISONOMIA – Epistemologica
All rights reserved.

ISSN 2037-4348

Scientific Director: Gino Tarozzi
Managing Director: Pierluigi Graziani
Department of Foundation of Sciences
P.za della Repubblica, 13 – 61029 Urbino (PU)

<http://isonomia.uniurb.it/>

Design by massimosangoi@gmail.com

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form, or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without prior permission, in writing, from the publisher.

Sommario

GINO TAROZZI, ISABELLA TASSANI <i>Introduzione</i>	7
ALESSANDRO AFRIAT <i>La topologica</i>	13
GENNARO AULETTA <i>Features, not waves!</i>	19
STEFANO BORDONI <i>Widening the boundaries of classical physics: from Einstein's 1909 paper back to late nineteenth-century theoretical physics</i>	25
MARCO BUZZONI <i>Kuhn: l'esperimento mentale fra scienza normale e scienza rivoluzionaria</i>	53
CLAUDIO CALOSI, VINCENZO FANO <i>Di due analoghi dilemmi: forza di gravità e correlazioni a distanza</i>	69
ALBERTO CAPPI <i>Cosmologia standard e oltre</i>	95
GIOVANNI MACCHIA <i>Quasar, redshift e controversie: l'espansione dell'universo è da rivedere?</i>	115
FABIO MINAZZI <i>La questione epistemologica del realismo nel programma di ricerca di Franco Selleri</i>	181
ARCANGELO ROSSI <i>La scienza tra normalità e rivoluzione</i>	209
GINO TAROZZI <i>Oltre la fisica normale. Realtà della funzione d'onda e delle proprietà fisiche prevedibili nell'interpretazione di Selleri della meccanica quantistica</i>	223

Introduzione

Nonostante il suo grande potere predittivo e la vastità del suo campo di applicazione, la meccanica quantistica nella sua formulazione *standard*, meglio nota come “interpretazione ortodossa”, contiene una vera e propria rinuncia a quelle esigenze esplicative che caratterizzano ogni autentica teoria scientifica, rinuncia che è stata sintetizzata dall’affermazione di Feynman, secondo la quale «è tutto assolutamente misterioso e più ci riflettiamo più ci appare misterioso».

Nel corso della sua straordinaria opera scientifica Franco Selleri si è sempre opposto a questa rinuncia alla comprensione della struttura della realtà fisica, mostrando i limiti e le conclusioni paradossali cui conduceva l’idea largamente condivisa che la meccanica quantistica, così come altre teorie della fisica del ‘900 su cui egli ha in un secondo tempo concentrato le sue ricerche e analisi critiche, rappresentassero, per dirla con Popper, “la fine della strada in fisica”.

Tale carattere antiesplicativo e di radicale rinuncia epistemologica da parte della teoria quantistica *standard* si è tradotto in primo luogo nell’abbandono del principio di causalità, come è stato sottolineato molto efficacemente da Selleri, in *Quantum Paradoxes and Physical Reality* (1990), con riferimento alla legge quantistica del decadimento radioattivo, che definisce una vita media per una data classe di particelle atomiche, ma non spiega il perché del differente comportamento individuale di ciascuna particella appartenente a questa classe:

La fisica attuale non fornisce una comprensione di queste cause e accetta infatti una filosofia acausale: ogni decadimento è un processo spontaneo e non ammette una spiegazione causale. La questione della differente vita individuale di simili sistemi instabili, come i neutroni, secondo questa linea di pensiero rimarrà per sempre senza una risposta e dovrebbe essere pertanto considerata come una questione “non scientifica”.

Nato a Bologna il 9 ottobre del 1936, Franco Selleri ha compiuto i suoi studi presso l’Università della sua città, l’antica e celebre *Alma Mater*

studiorum, con scienziati da lui definiti “indimenticabili”: il chimico Giovanni Battista Bonino, il matematico, e fisico matematico, Antonio Pignedoli e il fisico Giampietro Puppi. Nel 1958 si è laureato in Fisica *cum laude* e, solo un anno dopo, è diventato borsista all’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN).

Il primo articolo della sua lunga carriera scientifica riguarda una delle sue idee originali, l’*one-pion exchange model* per i processi anelastici ad alta energia in fisica delle particelle. Il notevole successo di questo modello gli ha aperto la strada a diverse esperienze internazionali: borsista al CERN di Ginevra (1959-61), *collaborateur étranger* a Saclay (Francia, 1962/63), *research associate* alla Cornell University (USA, 1963/65), ecc. Nel 1966 Selleri torna in Italia, prima a Bologna e poi, dal 1968 come docente e direttore di ricerca dell’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (I.N.F.N.) al Dipartimento di Fisica dell’Università di Bari, dove dal 1980 è stato chiamato come professore ordinario di Fisica teorica.

Risale ai tardi anni ‘60 l’elaborazione e lo sviluppo della sua prospettiva critica nei confronti delle teorie fondamentali della fisica moderna, in particolar modo della teoria delle particelle elementari e della meccanica quantistica, che verrà ben presto a configurarsi uno dei principali elementi caratterizzanti del suo programma di ricerca.

Nel corso della sua intensa e infaticabile attività scientifica, Selleri è entrato in proficuo contatto con molti grandi fisici e filosofi della scienza, ma quelli che ritiene lo abbiano più significativamente influenzato sono stati Louis de Broglie, John Bell e Karl Popper.

Egli ha molto apprezzato l’idea di de Broglie che la funzione d’onda della meccanica quantistica dovrebbe descrivere oggettivamente onde reali che si propagano nello spazio ordinario. Perciò egli è arrivato a ritenere che la teoria quantistica, considerata così “misteriosa”, per riprendere le parole di Feynman, potrebbe essere riformulata in modo tale da apparire comprensibile anche a un normale essere umano pensante. Con la sua ipotesi delle onde vuote, più tardi definite “onde quantistiche”, Selleri può essere considerato a pieno diritto un originale continuatore dell’opera di de Broglie, che in una lettera a Franco Selleri (11 aprile 1969), individuò in tale nuova prospettiva

un importante tentativo volto a ottenere un’interpretazione della meccanica ondulatoria più soddisfacente di quella che viene attualmente adottata e una conferma delle idee che mi avevano guidato nel momento in cui avevo proposto nel 1923-24 le concezioni di base della meccanica ondulatoria,

che rispetto alla teoria dell'onda pilota presenta, come rileva sempre de Broglie nella stessa lettera, la possibilità di un appello all'evidenza sperimentale:

L'esperienza che lei propone per provare l'esistenza dell'onda sarà di estremo interesse per provare l'esistenza di quest'onda debolissima (*très faible*) che trasporta le particelle [...].

Selleri fu molto impressionato dalla scoperta della famosa diseguaglianza di Bell, che discrimina a livello empirico tra la teoria quantistica e tutte le descrizioni realistiche locali della natura, che per lui significava la possibilità di scegliere sperimentalmente tra differenti prospettive filosofiche; inutile dire che egli preferisce il realismo locale alla perfetta validità della teoria quantistica convenzionale, considerandosi insoddisfatto degli esperimenti realizzati finora, che ha criticato in diversi lavori mettendo in luce le ipotesi addizionali, tipicamente quantistiche, che vengono di solito introdotte sotto varie forme.

Alle ricerche sul problema dell'incompatibilità sia logica che empirica tra meccanica quantistica e realismo locale, e al duplice problema da una parte delle ipotesi in gioco nella dimostrazione del teorema di Bell, dall'altro del suo dominio di validità, Selleri ha dato un contributo che può essere difficilmente sopravvalutato nella fisica del '900; già nel 1974 il grande storico della scienza Max Jammer, nel suo classico *The Philosophy of Quantum Mechanics* (1974), metteva in rilievo come egli avesse da una parte dimostrato la forma più forte della diseguaglianza di Bell, dall'altro mostrato, in alcuni articoli scritti con V. Capasso e D. Fortunato, la possibilità di discriminare a livello empirico tra descrizione attraverso stati *entangled* e descrizione attraverso vettori di stato fattorizzabili, quest'ultima implicata dal realismo locale, anche rispetto ad altre osservabili, definite "osservabili sensibili".

Della filosofia popperiana, Selleri ha apprezzato e condiviso l'atteggiamento critico verso la fisica moderna, il suo realismo e razionalismo, piuttosto che la sua specifica teoria della conoscenza. E a sua volta le idee di Selleri sulla meccanica quantistica sono state altrettanto influenti sul grande filosofo viennese, che dopo aver sostenuto per molti anni un'interpretazione statistica strettamente corpuscolare, aderì poi pienamente all'interpretazione realistica della funzione d'onda:

Franco Selleri ha suggerito (continuando l'opera di Louis de Broglie) che possono esistere onde senza particelle [...]. Le conseguenze [*di tale possibilità*] sembrerebbero essere rivoluzionarie [...] esse stabilirebbero, in luogo del

carattere “complementare” di particelle e onde (ondicelle) l’interazione di due tipi di oggetti reali: onde e particelle.

Analogamente Popper fece propria la critica di Selleri e Tarozzi alla dimostrazione probabilistica di Clauser e Horne del teorema di Bell, critica che sembrava restringere alla sola classe delle teorie deterministiche locali di variabili nascoste l’ambito di validità di tale teorema, sembrando così aprire una prospettiva di riconciliazione tra meccanica quantistica e teorie probabilistiche locali:

F. Selleri e G. Tarozzi hanno trovato un modello che soddisfa la definizione di Bell di località ma non la definizione di località di Clauser e Horne (conosciuta anche come “condizione di fattorizzabilità”); questo sembra mostrare ancora una volta che Clauser e Horne non hanno soddisfatto la pretesa di universalità [*del teorema di Bell*].

Franco Selleri ha pubblicato, prevalentemente su prestigiose riviste internazionali, più di trecento articoli riguardanti principalmente la fisica delle particelle, i fondamenti della teoria quantistica e della relatività ma, anche se in misura minore, la storia e la filosofia della fisica. Infine, egli ha scritto molti libri, pubblicati presso editori europei e americani, che hanno generalmente ricevuto critiche molto positive. Riguardo a *Paradossi quantistici e realtà fisica*, un noto fisico americano ha scritto:

Il Professor Selleri è quasi unicamente qualificato come un vero scettico che, ciononostante, ha una profonda comprensione dell’Interpretazione di Copenaghen. Se si aggiunge a questo un’instancabile onestà intellettuale e un’imparzialità di fondo, ci si può rendere conto quanto sia speciale questo libro.

Selleri è stato ed è tuttora membro del comitato scientifico di molte riviste internazionali, quali *Foundations of Physics Letters*, *Fundamental Theories of Physics*, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, e *Apeiron*, svolgendo la funzione di *referee*, tra le quali *Foundations of Physics*, *Physics Letters*, *Journal of Physics*, *Europhysics Letters* e *Nuovo Cimento*. Fa parte di molte istituzioni e società scientifiche, come la Società Italiana di Fisica (S.I.F.), l’*American Physical Society*, la Società Italiana di Logica e Filosofia della Scienza (S.I.L.F.S.), la *New York Academy of Sciences*, la *Fondation Louis de Broglie* di Parigi, la *Gdanskie Towarzystwo Naukowe* e il Centro interuniversitario di ricerca in Filosofia e Fondamenti della Fisica (C.I.R.F.I.S.) degli atenei di Bologna, dell’Insubria, del Salento e di Urbino.

Negli anni recenti, ha stabilito l’esistenza di una, a suo parere, inaccettabile discontinuità tra qualunque ragionevole descrizione dei sistemi

di riferimento accelerati e la descrizione relativistica dei sistemi di riferimento inerziali. Ha suggerito come si possa superare la precedente difficoltà distinguendo il gruppo di trasformazioni di Lorentz da altre trasformazioni che implicano un ritorno alla nozione di simultaneità assoluta.

Come curatori di questo numero speciale di *Isonomia* siamo onorati di fare omaggio a Franco Selleri come amico e collega speciale, sia per la sua passione instancabile e la sua profonda conoscenza dei fondamenti delle teorie della fisica contemporanea che ha generosamente profuso nel cercare risposte alle fondamentali questioni concettuali aperte, sia e forse ancor più per la prospettiva perennemente critica che egli ha sempre seguito con particolare rigore ed estrema determinazione per raggiungere questo scopo.

Siamo certi di esprimere anche il pensiero dei colleghi che hanno contribuito a questo numero della rivista, augurandogli ancora molti anni di un'altrettanto eccellente creatività scientifica.

Gino Tarozzi e Isabella Tassani,
Dipartimento di Scienze di Base e Fondamenti
Università di Urbino *Carlo Bo*

La topologica

Alessandro Afriat
Université de Bretagne Occidentale
alexander.afriat@univ-brest.fr

1. L'effetto Aharonov-Bohm

Viene esposto un aspetto rivoluzionario della topologica (o topo-logica), logica scaturita verso fine Novecento dagli alti misteri della fisica.

Una funzione d'onda è divisa in due fasci, i quali, avendo rinchiuso una regione (semplicemente connessa) ω contenente un solenoide, vengono fatti interferire su uno schermo. La funzione d'onda avvolgente è sensibile all'elettromagnetismo eventualmente rinchiuso nella misura in cui il potenziale¹ elettromagnetico A , una uno-forma, contribuisce una fase

$$\exp i \oint_{\partial\omega} A$$

alla funzione d'onda lungo il bordo $\partial\omega$ e quindi alla figura d'interferenza sullo schermo. L'elettromagnetismo su ω è legato alla circolazione intorno al bordo dal teorema

$$(1) \quad C = \oint_{\partial\omega} A = \iint_{\omega} dA$$

¹ Per "potenziale" intendo solo *primitiva*: il potenziale della due-forma elettromagnetica $F = dA$ è la sua primitiva $A \leftrightarrow (\mathbf{A}, \varphi)$, il potenziale della due-forma magnetica $\mathbf{B} = d\mathbf{A}$ è la sua primitiva \mathbf{A} , il potenziale della uno-forma elettrica $*\mathbf{E} = d\varphi$ è la sua primitiva φ (il duale di Hodge * essendo preso in tre dimensioni), il potenziale della tre-forma $\rho = d\mathbf{E}$ è la sua primitiva \mathbf{E} .

di Stokes. Il campo elettromagnetico² $F = dA$ prodotto dal solenoide è circoscritto a una regione centrale $\lambda' \subset \omega$ circondata da una regione isolante $\lambda' = \omega - \lambda$ dove F è nullo ma non A . L'effetto Aharonov-Bohm³ 'completo' può essere considerato la sensibilità 'differenziale' o 'incrementale' della figura d'interferenza alle variazioni della corrente attraverso il solenoide⁴.

2. L'interpretazione topologica

L'interpretazione topologica⁵ dell'effetto Aharonov-Bohm può essere formulata come segue: Se A fosse chiusa su una regione ω semplicemente

² Possiamo pensare F come il campo puramente magnetico \mathbf{B} prodotto dalla densità di corrente $\mathbf{J} = d*\mathbf{B}$ nel solenoide.

³ Ehrenberg & Siday (1949), Aharonov & Bohm (1959).

⁴ Cf. Batterman (2003: 555): "Similarly, in the AB effect, it appears that we will need to refer to different nonseparable holonomy properties for each case in which there is a different flux running through the solenoid."

⁵ Qui "topologica" è un aggettivo e non una logica. Aharonov & Bohm (1959: 490): "in a field-free multiply-connected region of space, the physical properties of the system still depend on the potentials." Wu & Yang (1975: 3845): "The famous Bohm-Aharonov experiment [...] showed that in a multiply connected region where $f_{\mu\nu} = 0$ everywhere there are physical experiments for which the outcome depends on the loop integral [...] around an unshrinkable loop." (*Ibid.*: 3856): " $f_{\mu\nu}$ underdescribes electromagnetism because of the Bohm-Aharonov experiment which involves a doubly connected space region." Nash & Sen (1983: 301): "We [...] consider the consequence of assuming the field F to be identically zero in some region Ω . At first one may think that there will be no physically measurable electromagnetic effects in such a region Ω . This is not so, effects may arise if the topology of Ω is non-trivial, e.g. if Ω is not simply connected. [...] In terms of parallel transport one says that zero curvature does not imply trivial parallel transport if the region in which the curvature is zero is not simply connected. This underlies the fact that there is a sense in which the connection is a more fundamental object than the curvature, even though a connection is gauge dependent and not directly measurable." Ryder (1996: 101-4): "the Bohm-Aharonov effect owes its existence to the non-trivial topology of the vacuum [...]. The Bohm-Aharonov effect is the simplest illustration of the importance of topology in this branch of physics. [...] The relevant space in this problem is the space of the vacuum, i.e. the space outside the solenoid, and that space is not simply connected. [...] It is thus an essential condition for the Bohm-Aharonov effect to occur that the configuration space of the vacuum is not simply connected. [...] in other words, it is because the gauge group of electromagnetism, U_1 , is not simply connected that the Bohm-Aharonov effect is possible. [...] The configuration space of the Bohm-Aharonov experiment is the plane \mathbb{R}^2 [...] with a hole in, and this is, topologically, the direct product of the line \mathbb{R}^1 and the circle [...]. There is, nevertheless, a positive effect on the interference fringes. The mathematical reason for this is that the configuration space of the null field (vacuum) is the plane with a hole in [...]." Batterman (2003: 544): "We now have a $U(1)$ bundle over a nonsimply connected base space: $\mathbb{R}^2 - \{\text{origin}\}$. This fact is responsible for the AB effect." (*Ibid.*: 552-3): "most

connessa sarebbe anche esatta, e quindi esprimibile come gradiente $A = d\mu$ di una zero-forma μ ; il flusso

$$\oint_{\partial\omega} d\mu = \iint_{\omega} d^2\mu$$

attraverso il bordo $\partial\omega$ sarebbe quindi nullo, essendolo d^2 . Ma qui A è chiusa su λ' ; da $dA=0|_{\lambda'}$ non segue che A sia esatta, né che il flusso attraverso il bordo sia nullo: potrebbe esserlo oppure no.

L'esistenza della sorgente a cui è dovuto l'effetto è quindi esclusa da una topologia (A chiusa su una regione semplicemente connessa) ma non da un'altra.

Lo stesso vale per una regione semplicemente connessa tridimensionale Ω rinchiusa da un bordo bidimensionale $\partial\Omega$. Se la due-forma \mathbf{E} fosse chiusa su Ω sarebbe anche esatta, e pertanto esprimibile come rotore $\mathbf{E} = d\zeta$ di una uno-forma ζ ; il flusso

$$\iint_{\partial\Omega} d\zeta = \iiint_{\Omega} d^2\zeta$$

discussions of the AB effect very quickly idealize the solenoid to an infinite line in space or spacetime. The flux, in this idealization, just is the abstract topological property of having space or spacetime be nonsimply connected. [...] The issue is whether the idealizations — [...] and nonsimply connected space in the AB effect — do better explanatory work than some less idealized description. I believe that the idealized descriptions do, in fact, do a better job.” (*Ibid.*: 554): “It seems to me that for a full understanding of these anholonomies, one needs to appeal to the topology and geometry of the base space. [...] If we take seriously the idea that topological features of various spaces [...] can play an explanatory role [...]” Nota 29, stessa pagina: “it is most fruitful to treat the AB solenoid as an idealization that results in the multiple connectedness of the base space of a fiber bundle.” (*Ibid.*: 555): “The different cases are unified by the topological idealization of the solenoid as a string absent from spacetime which renders spacetime nonsimply connected. [...] This topological feature enables us to understand the common behaviour in different AB experiments [...]. [...] how can it possibly be the case that appeal to an idealization such as the AB solenoid as a line missing from spacetime, provides a better explanation of genuine physical phenomena than can a less idealized, more “realistic” account where one does not idealize so severely? [...] quite often [...] appeal to highly idealized models does, in fact, provide better explanations.” Martin (2003: 48): “in the case of non-trivial spatial topologies, the gauge-invariant interpretation runs into potential complications. [...] So-called holonomies [...] encode physically significant information about the global features of the gauge field.” Vedi anche Lyre (2001: S377-80), Nounou (2003), Lyre (2004: 659), Agricola & Friedrich (2010: 275).

attraverso il bordo sarebbe quindi nullo. Ma se la regione su cui \mathbf{E} è chiusa contiene un buco, il flusso attraverso la superficie rinchiudente potrebbe essere nullo oppure no.

E così in elettrostatica, dove il campo elettrico $\mathbf{E} = *d\varphi$ è (sostanzialmente) il gradiente del potenziale scalare φ . La divergenza nulla $d\mathbf{E}$ esprime la conservazione dell'elettricità laddove non viene creata, lontano dalle cariche che producono \mathbf{E} secondo l'equazione Maxwell-Poisson $d\mathbf{E} = d*d\varphi = \rho$, la tre-forma ρ essendo la densità di carica. Se la divergenza $d\mathbf{E}$ fosse nulla su tutto il volume Ω non ci sarebbe né produzione di elettricità né irraggiamento attraverso il bordo⁶. Ma una carica in Ω — diciamo in una regione $\Lambda \subset \Omega$ isolata da $\Lambda' = \Omega - \Lambda$ — impedirebbe la conservazione dell'elettricità su tutta la regione Ω .

Abbiamo lo stesso formalismo in gravitazione Newton-Poisson, dove φ è il potenziale gravitazionale, $d\varphi$ e \mathbf{E} rappresentano entrambi la forza gravitazionale, e ρ è la densità di massa. La gravità⁷ sarebbe pertanto un altro effetto topologico.

La topologia della regione dove il 'potenziale' (A o \mathbf{E} per esempio) è chiuso appunto non ci dice molto: se la regione fosse semplicemente connessa, la conservazione sarebbe *generale* all'interno della superficie rinchiudente visto che non ci sarebbero buchi con sorgenti; e se nulla fosse creato all'interno del bordo, la radiazione totale che lo attraversa sarebbe nulla. Ma laddove la topologia *non* permette di escludere la presenza di buchi, nemmeno la presenza di sorgenti sarà esclusa; e una sorgente produrrebbe un flusso attraverso il bordo.

Una topologia non banale non può nemmeno escludere l'*assenza* di una sorgente. Né precisa la 'quantità' o 'intensità' della possibile sorgente (che ci direbbe l'intensità dell'effetto — il flusso attraverso il bordo). Quindi l'effetto Aharonov-Bohm completo, che possiamo considerare 'differenziale', non è particolarmente topologico, o almeno non più dell'elettrostatica o della gravitazione Newton-Poisson.

⁶ Al di là un fondo elettrico senza divergenza che potrebbe essere o non essere presente.

⁷ Cioè l'attrazione gravitazionale *totale* irradiata da una massa.

3. La topologica

Le implicazioni

$$([dA=0|_{\omega}] \& [\omega \text{ senza buchi}]) \Rightarrow [A \text{ esatta}] \Rightarrow \left[\oint_{\partial\omega} A = 0 \right]$$

non hanno nulla d'interessante, essendo consentite nelle logiche più classiche. Le implicazioni davvero rivoluzionarie, valide solo nella topologica, sono

$$([dA=0|_{\omega}] \& \neg[\omega \text{ senza buchi}]) \Rightarrow \neg[A \text{ esatta}] \Rightarrow \neg \left[\oint_{\partial\omega} A = 0 \right]$$

ossia

$$([dA=0|_{\omega}] \& [\omega \text{ non senza buchi}]) \Rightarrow [A \text{ non esatta}] \Rightarrow \left[\oint_{\partial\omega} A \neq 0 \right].$$

È qua che vediamo il vero passo in avanti rispetto alle vecchie logiche, ormai superate. Ma credo che la topologica ci dica soprattutto che *c'è uno yak in Piazza del Campo*⁸.

Riferimenti bibliografici

Agricola, I. e T. Friedrich (2010), *Vektoranalysis: Differentialformen in Analysis, Geometrie und Physik*, Vieweg+Teubner, Berlin.

Aharonov, Y. e D. Bohm (1959), "Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory" *Physical Review* 115, 485-91.

Batterman, R. W. (2003), "Falling cats, parallel parking and polarized light" *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 34, 527-57.

Brading, K. e E. Castellani (a cura di) (2003), *Symmetries in physics*, Cambridge University Press.

⁸ Ogni buco deve contenere un oggetto sorprendente – assioma della topologica. Ma lo yak (tale è la flessibilità della topologica) potrebbe anche trovarsi in λ o il solenoide in Piazza del Campo.

- Ehrenberg, W. e R. E. Siday (1949), "The refractive index in electron optics and the principles of dynamics" *Proceedings of the Physical Society B* 62, 8-21.
- Lyre, H. (2001), "The principles of gauging" *Philosophy of Science* 68, S371-81
- Lyre, H. (2004), "Holism and structuralism in U (1) gauge theory" *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 35, 643-70.
- Martin, C. (2003), "On continuous symmetries and the foundations of modern physics" pp. 29-60, in Brading & Castellani (2003).
- Nash, C. e S. Sen (1983), *Topology and geometry for physicists*, Academic Press, London
- Nounou, A. (2003), "A fourth way to the Aharonov-Bohm effect" pp. 174-99, in Brading & Castellani (2003).
- Ryder, L. (1996), *Quantum field theory*, Cambridge University Press.
- Wu, T. T. e C. N. Yang (1975), "Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of gauge fields" *Physical Review D* 12, 3845-57.