



**Zagadnienia
Filozoficzne
w Nauce**

**Zagadnienia
Filozoficzne
w Nauce**

© Copernicus Center Press, 2015

Kolegium redakcyjne:

Redaktor Naczelny: dr hab. Paweł Jan Polak

Zastępca Redaktora Naczelnego: dr. hab. Janusz Mączka

Redaktor Honorowy: prof. dr hab. Michał Heller

Sekretarz redakcji: Piotr Urbańczyk

Redaktorzy prowadzący: Janusz Mączka, Łukasz Kwiatek, Piotr Urbańczyk

Projekt okładki: Mariusz Banachowicz

Adiustacja i korekta: Artur Figarski

Redakcja techniczna: Artur Figarski

Projekt typograficzny: Mirosław Krzyszkowski

Skład: MELES-DESIGN

ISSN 0867-8286 (wyd. papierowe)

ISSN 2451-0602 (wyd. online)

Nakład: 500 egz.

Adres redakcji:

Zagadnienia Filozoficzne w Nauce

Wydział Filozoficzny UPJPII

ul. Kanoniczna 9

31-002 Kraków

e-mail: zagadnienia@upjp2.edu.pl

<http://zfn.edu.pl/>



**Copernicus
Center**
PRESS

Wydawca:

Copernicus Center Press Sp. z o.o.

Pl. Szczepański 8, 31-011 Kraków

tel. (+48) 12 430 63 00

e-mail: marketing@ccpress.pl

www.ccpress.pl

Zagadnienia Filozoficzne w Nauce

LIX ■ 2015

WSTĘP		5
ARTYKUŁY		
Claus Kiefer	Does time exist in quantum gravity?	7
Leszek M. Sokołowski	Granice fizyki w kosmologii	25
Andrzej Fuliński	Słabe łamanie ergodyczności vs. determinizm	83
Barbara Petelenz	Pozytywizm, racjonalizm i ... romantyzm Marii Skłodowskiej Curie	101
Jerzy A. Janik	Fakty fizyki na tle przymiarek filozofii	125
Andrzej Staruszkiewicz	Społeczne skutki powstania fizyki współczesnej	139
RECENZJE		
Janusz Mączka	Romantyczna nauka	149
Łukasz Sadłocha	Approaching the emergent conception of life	157

Wstęp

W obecnym, 59 numerze „Zagadnień Filozoficznych w Nauce”, czytelnik znajdzie artykuły, które były uprzednio prezentowane w formie referatów podczas posiedzeń Komisji Polskiej Akademii Umiejętności. Do 2012 roku istniały w PAU dwie różne komisje podejmujące tematykę filozoficzną: Komisja *Fides et Ratio*, kierowana przez ks. prof. Michała Hellera oraz Komisja Filozofii Nauk Przyrodniczych, kierowana przez prof. Jerzego Janika. Po niespodziewanej śmierci prof. J. Janika, obydwie komisje połączyły się, przyjmując nazwę Komisja Filozofii Nauk. Komisja ta kontynuuje zgłębianie tematyki podejmowanej przez poprzednie Komisje.

Obszar zainteresowań wszystkich tych komisji jest bliski profilowi naukowemu „Zagadnień”. Uzasadnia to decyzję publikowania wybranych referatów, będących owocem prac wspomnianych komisji, w formie trzech numerów specjalnych „Zagadnień Filozoficznych w Nauce”.

Artykuły zamieszczone w niniejszym numerze nie odzwierciedlają chronologii wystąpień w PAU. Numer ten został zredagowany tematycznie i stanowi wybór wystąpień z różnych

okresów działania komisji. Obecny zestaw artykułów skupia się wokół tematyki filozofii fizyki. Poprzednie numery (57 i 58) poświęcone były zagadnieniom relacji nauki i religii oraz filozofii matematyki.

Opublikowany w obecnym numerze „Zagadnień” artykuł profesora Jerzego Janika został zredagowany po śmierci Autora na podstawie trzech krótkich, ale wzajemnie uzupełniających się esejów.

Publikowanie tych materiałów w „Zagadnieniach” jest możliwe dzięki życzliwości władz Polskiej Akademii Umiejętności, którym redakcja „Zagadnień Filozoficznych w Nauce” wyraża serdecznie podziękowanie.

Redakcja

Does time exist in quantum gravity?

Claus Kiefer

Institute for Theoretical Physics, University of Cologne

Abstract

Time is absolute in standard quantum theory and dynamical in general relativity. The combination of both theories into a theory of quantum gravity leads therefore to a “problem of time”. In my essay, I investigate those consequences for the concept of time that may be drawn without a detailed knowledge of quantum gravity. The only assumptions are the experimentally supported universality of the linear structure of quantum theory and the recovery of general relativity in the classical limit. Among the consequences are the fundamental timelessness of quantum gravity, the approximate nature of a semiclassical time, and the correlation of entropy with the size of the Universe.

Keywords

cosmology; arrow of time; entropy; quantum gravity

1. Time in Physics

On December 14, 1922, Albert Einstein delivered a speech to students and faculty members of Kyoto University in which he summarized how he created his theories of relativity (Einstein, 1982). As for the key idea in finding special relativity in 1905, he emphasized: “An analysis of the concept of time was my solution.” He was then able to complete his theory within five weeks.

An analysis of the concept of time may also be the key for the construction of a quantum theory of gravity. Such a hope is supported by the fact that a change of the fundamental equations in physics is often accompanied by a change in the notion of time. Let me briefly review the history of time in physics.

Before Newton, and thus before the advent of modern science, time was associated with periodic motion, notably the motion of the ‘Heavens’; time was largely considered ‘the measure of change’. It was Newton’s great achievement to invent the notion of an absolute and continuous time. Such a concept was needed for the formulation of his laws of mechanics and universal gravitation. Although Newton’s concepts of absolute space and absolute time were heavily criticized by some contemporaries as being unobservable, alternative relational formulations were only constructed after the advent of general relativity in the 20th century (Barbour, 1986).

In Einstein's theory of special relativity, time was unified with space to form a four-dimensional spacetime. But this "Minkowski spacetime" still constitutes an absolute background in the sense that there is no reaction of fields and matter – Minkowski spacetime provides only the rigid stage for their dynamics. Einstein considered this lack of back reaction as very unnatural.

Minkowski spacetime provides the background for relativistic quantum field theory and the Standard Model of particle physics. In the non-relativistic limit, it yields quantum mechanics with its absolute Newtonian time t . This is clearly seen in the Schrödinger equation,

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi. \quad (1)$$

It must also be noted that the presence of t occurs on the left-hand side of this equation together with the imaginary unit, i ; this fact will become important below. In relativistic quantum field theory, (1) is replaced by its functional version.

The Schrödinger equation (1) is, with respect to t , deterministic and time-reversal invariant. As was already emphasized by Wolfgang Pauli, the presence of both t and i are crucial for the probability interpretation of quantum mechanics, in particular for the conservation of probability in time.

But the story is not yet complete. It was Einstein's great insight to see that gravity is a manifestation of the geometry of spacetime; in fact, gravity is geometry. This led him to his general

theory of relativity, which he completed in 1915. Because of this identification, spacetime is no longer absolute, but dynamical. There is now a reaction of all matter and fields onto spacetime and even an interaction of spacetime with itself (as is e.g. the case in the dynamics of gravitational waves).

So, time is absolute in quantum theory, but dynamical in general relativity. What, then, happens if one seeks a unification of gravity with quantum theory or, more precisely, seeks an accommodation of gravity into the quantum framework? Obviously, time cannot be both absolute and relational; this dilemma is usually referred to as the “problem of time” (Isham, 1993; Kiefer, 2012; Kuchař, 1993; Anderson, 2012).

But does one really have to unify gravity with quantum theory into a theory of quantum gravity? In the next section, I shall give a concise summary of the main reasons for doing so. I shall then argue that one can draw important conclusions about the nature of time in quantum gravity without detailed knowledge of the full theory; in fact, all that is needed is the semiclassical limit – general relativity. I shall then describe the approximate nature of any time parameter and clarify the relevance of these limitations for the interpretation of quantum theory itself. I shall finally show how the direction of time can be understood in a theory which is fundamentally timeless.

2. The Disappearance of Time

The main arguments in favour of quantizing gravity have to do with the universality of both quantum theory and gravity. The universality of quantum theory is encoded in the apparent universality of the superposition principle, which has passed all experimental tests so far (Joos, et al., 2003; Schlosshauer, 2007). There is, of course, no guarantee that this principle will not eventually break down. However, I shall make the conservative assumption, in accordance with all existing experiments, that the superposition principle does hold universally. Arbitrary linear combinations of physical quantum state do again lead to a physical quantum state; in general, the resulting quantum states describe highly entangled quantum systems. If the superposition principle holds universally, it holds in particular for the gravitational field.

The universality of the gravitational field is a consequence of its geometric nature: it couples equally to all forms of energy. It thus interacts with all quantum states of matter, suggesting that it is itself described by a quantum state. This is not a logical argument, though, but an argument of naturalness (Albers, et al., 2008).

A further argument for the quantization of gravity is the incompleteness of general relativity. Under very general assumptions, one can prove singularity theorems that force us to conclude that time must come to an end in regions such as the big bang and the interior of black holes. This is, of course,

only possible because time in general relativity is dynamical. The hope, then, is that quantum gravity will be able to deal with these situations.

It is generally argued that quantum-gravity effects can only be seen at a remote scale – the Planck scale, which originates from the combination of the three fundamental constants c (speed of light), G (gravitational constant), and \hbar (quantum of action). The Planck length, for example, is given by

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.62 \times 10^{-35} \text{ m}, \quad (2)$$

and is thus much smaller than any length scale that can be probed by the Large Hadron Collider (LHC).

This argument is, however, misleading. One may certainly expect that quantum effects of gravity are always important at the Planck scale. But they are not restricted to this scale a priori. The superposition principle allows the formation of non-trivial gravitational quantum states at any scale. Why, then, is such a state not observed? The situation is analogous to quantum mechanics and the non-observability of states such as a Schrödinger-cat state. And the reason why such states are not found is the same: decoherence (Joos, et al., 2003; Schlosshauer, 2007). The interaction of a quantum system with its ubiquitous environment (that is, with inaccessible degrees of freedom) will usually lead to its classical appearance, except for micro- or mesoscopic situations. The process of decoherence is founded on the standard

quantum formalism, and it has been tested in many experiments (Schlosshauer, 2007).

The emergence of classical behaviour through decoherence also holds for most states of the gravitational field. But there may be situations where the quantum nature of gravity is visible – even far away from the Planck scale. We shall encounter such a situation in quantum cosmology. It is directly related to the concept of time in quantum gravity.

Due to the absence of a background structure, the construction of a quantum theory of gravity is difficult and has not yet been accomplished. Approaches are usually divided into two classes. The more conservative class is the direct quantization of general relativity; path-integral quantization and canonical quantum gravity belong to it. The second class starts from the assumption that a consistent theory of quantum gravity can only be achieved within a unified quantum theory of all interactions; superstring theory is the prominent (and probably unique) example for this class.

In this essay, I want to put forward the view that the concept of time in quantum gravity can be discussed without having the final theory at one's disposal; the experimentally tested part of physics together with the above universality assumptions suffice.

The arguments are similar in spirit to the ones that led Erwin Schrödinger in 1926 to his famous equation (1). Motivated by Louis de Broglie's suggestion of the wave nature of matter, Schrödinger tried to find a wave equation which yields the equa-

tions of classical mechanics in an appropriate limit, in analogy to the recovery of geometric optics as a limit to the fundamental wave optics. To achieve this, Schrödinger put classical mechanics into the Hamilton–Jacobi form, from which the desired wave equation could be easily guessed (Schrödinger, 1926).

The same steps can be followed for gravity. One starts by casting Einstein’s field equations into Hamilton–Jacobi form. This was already done by Asher Peres (1962). The wave equation behind the gravitational Hamilton–Jacobi equation is then nothing but the Wheeler–DeWitt equation, which was derived by John Wheeler (1968) and Bryce DeWitt (1967) from the canonical formalism. It is of the form

$$\hat{H}_{\text{tot}}\Psi = 0, \quad (3)$$

where here \hat{H}_{tot} denotes the full Hamilton operator for gravity plus matter. The wave functional Ψ depends on the *three-dimensional* metric plus all nongravitational fields.¹

The Wheeler–DeWitt equation (3) may or may not hold at the fundamental Planck scale (2). But as long as quantum theory is universally valid, it will hold at least as an approximate equation for scales much bigger than l_p . In this sense, it is the most reliable equation of quantum gravity, even if it is not the most fundamental one.

¹ There also exist the so-called diffeomorphism constraints, which state that Ψ is independent of the choice of spatial coordinates, see e.g. (Kiefer, 2012) for details.

The wave function Ψ in the Wheeler–DeWitt equation (3) does not contain any time parameter t . Although at first glance surprising, this is a straightforward consequence of the quantum formalism. In classical mechanics, the trajectory of a particle consists of positions q in time, $q(t)$. In quantum mechanics, only probability amplitudes for those positions remain. Because time t is external, the wave function in (1) depends on both q and t , but not on any $q(t)$. In gravity, three-dimensional space is analogous to q , and the classical spacetime corresponds to $q(t)$. Therefore, upon quantization, spacetime vanishes in the same manner as the trajectory $q(t)$ vanishes. But as there is no absolute time in general relativity, only space remains, and one is left with (3).

We can thus draw the conclusion that quantum gravity is timeless solely from the validity of the Einstein equations at large scales and the assumed universality of quantum theory. Our conclusion is independent of additional modifications at the Planck scale, such as the discrete features that are predicted from loop quantum gravity and string theory. The latter two approaches do, however, lead to additional modifications in the concept of space (Kiefer, 2012). The AdS/CFT correspondence in string theory, for example, suggests that laws including gravity in three spatial dimensions is equivalent to laws excluding gravity in two spatial dimensions. It has even been claimed that gravity thus is an illusion (Maldacena, 2005).

3. Time Regained

In August 1931, Neville Mott submitted a remarkable paper to the Cambridge Philosophical Society (Mott, 1931). He discussed the collision of an alpha-particle with an atom. The remarkable thing is that he considered the time independent Schrödinger equation of the total system and used the state of the alpha-particle to *define* time and to derive a time-dependent Schrödinger equation for the atom alone. The total quantum state is of the form

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = \psi(\mathbf{r}, \mathbf{R})e^{i\mathbf{k}\mathbf{R}}, \quad (4)$$

where \mathbf{r} and \mathbf{R} refer to the atom and the alpha-particle, respectively. The time t is then defined from the exponential in (4) through a directional derivative,

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t} \propto i\mathbf{k} \cdot \nabla_{\mathbf{R}}. \quad (5)$$

This leads to the time-dependent Schrödinger equation for the atom. Such a viewpoint of time as a concept derived from a fundamental timeless equation is rarely adopted in quantum mechanics. It is, however, the key step to understanding the emergence of time from the timeless Wheeler–DeWitt equation (3). While the alpha-particle in Mott’s example corresponds to the gravitational part, the atom corresponds to the non-gravitational degrees of freedom. The time t of the

Schrödinger equation (1) is then *defined* by a directional derivative similar to (5). Various derivations of such a “semiclassical time” have been given in the literature (reviewed e.g. in (Kiefer, 2012)), but the general idea is always the same. Time emerges from the separation into two different subsystems: one subsystem (here: the gravitational part) defines the time with respect to which the other subsystem (here: the nongravitational part) evolves.² Time is thus only an approximate concept. A closer investigation of this approximation scheme then reveals the presence of quantum-gravitational correction terms (Kiefer and Singh, 1991). Such terms can in principle be observed in the anisotropy spectrum of the Cosmic Microwave Background radiation (Kiefer and Krämer, 2012).

I have remarked above that the Hilbert-space structure of quantum theory is related to the probability interpretation, and that the latter seems to be tied to the presence of t . In the light of the fundamental absence of t , one may speculate that the Hilbert-space structure, too, is an approximate structure and that different mathematical structures are needed for full quantum gravity.

I have also remarked above that the time t in the Schrödinger equation (1) occurs together with the imaginary unit i . The quantum-mechanical wave functions are thus complex, which is an essential feature for the probability interpretation. Since the

² More precisely, some of the gravitational degrees of freedom can also remain quantum, while some of the non-gravitational variables can be macroscopic and enter the definition of time.

Wheeler–DeWitt equation is real, the complex numbers emerge together with the time t (Barbour, 1993; Kiefer, 1993). Has this not been put in by hand through the i in the form (4)? Not really. One can start with superpositions of complex wave functions of the form (4), which together give a real quantum state. But now, again, decoherence comes into play. Irrelevant degrees of freedom distinguish the complex components from each other, making them dynamically independent (Joos, et al., 2003). In a sense, time is “measured” by such irrelevant degrees of freedom (gravitational waves, tiny density fluctuations). Some time ago, I estimated the magnitude of this effect for a simple cosmological model (Kiefer, 1992) and found that the interference terms between the complex components can be as small as

$$\exp\left(-\frac{\pi mc^2}{128\hbar H_0}\right) \sim \exp(-10^{43}) \quad (6)$$

where H_0 is the Hubble constant and m the mass of a scalar field, and some standard values for the parameters have been chosen. This gives further support for the recovery of time as a viable semiclassical concept.

There are, of course, situations where the recovery of semiclassical time breaks down. They can be found through a study of the full Wheeler–DeWitt equation (3). One can, for example, study the behaviour of wave packets. Semiclassical time is only a viable approximation if the packets follow the classical trajectory without significant spreading. One may certainly expect that a breakdown of the semiclassical limit occurs at the

Planck scale (2). But there are other situations, too. One occurs for a classically recollapsing universe and is described in the next section. Other cases follow from models with fancy singularities at large scales. The “big brake”, for example, corresponds to a universe which classically comes to an abrupt halt with infinite deceleration, leading to a singularity at large scale factor. The corresponding quantum model is discussed in (Kamenshchik, Kiefer and Sandhöfer, 2007). If the wave packet approaches the classical singularity, the wave function will necessarily go to zero there. The time t then loses its meaning, and all classical evolution comes to an end before the singularity is reached. One might even speculate that not only time, but also space disappears (Damour and Nicolai, 2008).

The ideas presented here are also relevant to the interpretation of quantum theory itself. They strongly suggest, for example, that the Copenhagen interpretation is not applicable in this domain. The reason is the absence of a classical spacetime at the most fundamental level, which in the Copenhagen interpretation is assumed to exist from the outset. In quantum gravity, the world is fundamentally timeless and does not contain classical parts. Classical appearance only emerges for subsystems through the process of decoherence – with limitations dictated by the solution of the full quantum equations.

4. The Direction of Time

A fundamental open problem in physics is the origin of irreversibility in the Universe, the recovery of the arrow of time (Zeh, 2007). It is sometimes speculated that this can only be achieved from a theory of quantum gravity. But can statements about the direction of time be made if the theory is fundamentally timeless?

The answer is yes. The clue is, again, the semiclassical nature of the time parameter t . As we have seen in the last section, t is defined via fundamental gravitational degrees of freedom. The important point is that the Wheeler–DeWitt equation (3) is *asymmetric* with respect to the scale factor that describes the size of the Universe in a given state. It assumes a simple form for a small universe, but a complicated form for a large universe. For small scale factor, there is only a minor interaction between most of the degrees of freedom. The equation then allows the formulation of a simple initial condition (Zeh, 2007): the absence of quantum entanglement between global degrees of freedom (such as the scale factor) and local ones (such as gravitational waves or density perturbations). The local variables serve as an irrelevant environment in the sense of decoherence.

Absence of entanglement means that the full quantum state is a product state. Tracing out the environment then has no effect; the state of the global variables remains pure. There is then a vanishing entropy (as defined by the reduced density matrix) connected with them; all information is contained in the system

itself. The situation changes with increasing scale factor; the entanglement grows and the entropy for the global variables increases, too. As soon as the semiclassical approximation is valid, this growth also holds with respect to t ; it is inherited from the full equation. The direction of time is thus defined by the direction of increasing entanglement. In this sense, the expansion of the Universe is a tautology.

There are interesting consequences for a classically recollapsing universe (Kiefer, Zeh, 1995). In order to produce the correct classical limit, the wave function of the quantum universe must go to zero for large scale factors. Since the quantum theory cannot distinguish between the different ends of a classical trajectory (such ends would be the big bang and the big crunch), the wave function must consist of many quasi-classical components with entropies that increase in the direction of a larger universe; one could then never observe a recollapsing universe. In the region of the classical turning point, all components have to interfere destructively in order to fulfill the final boundary condition of the wave function going to zero. This is a drastic example of the relevance of the superposition principle far away from the Planck scale – with possible dramatic consequences for the fate of our Universe: the classical evolution would come to an end in the future. Such a quantum end could occur also in dark-energy models that do not recollapse (Kamenshchik, Kiefer and Sandhöfer, 2007).

Let me finally emphasize again that all the consequences presented in this essay result from a very conservative starting

point: the assumed universality of quantum theory and its superposition principle. Unless this assumption breaks down, these consequences should hold in every consistent quantum theory of gravity. We are able to understand from the fundamental picture of a timeless world both the emergence and the limit of our usual concept of time, at least in principle.

Acknowledgements

I am most grateful to the Polish Academy of Arts and Sciences, and in particular Michael Heller, for inviting me to give a talk on the nature of time. This contribution is a slightly revised version of my essay with the same title, which in 2009 received a second prize in the The Nature of Time essay context organized by the Foundational Questions Institute (www.fqxi.org). I thank Marcel Reginatto and H.-Dieter Zeh for their comments on an earlier version of this essay.

References

- Albers, M., Kiefer, C., Reginatto, M., 2008. Measurement analysis and quantum gravity. *Physical Review D*, 78, p. 064051.
- Anderson, E., 2012. Problem of time in quantum gravity. *Annalen der Physik*, 524, pp. 757–786.
- Barbour, J.B., 1986. Leibnizian time, Machian dynamics, and quantum gravity. In: R. Penrose and C.J. Isham, eds., *Quantum concepts in space and time*. Oxford: Oxford University Press, pp. 236–246.
- Barbour, J.B., 1993. Time and complex numbers in canonical quantum gravity. *Physical Review D*, 47, pp. 5422–5429.
- Damour, T., Nicolai, H., 2008. Symmetries, singularities and the deemergence of space. *International Journal of Modern Physics D*, 17, pp. 525–531.
- DeWitt, B.S., 1967. Quantum theory of gravity. I. The canonical theory. *Physical Review*, 160, pp. 1113–1148.
- Einstein, A., 1982. How I created the theory of relativity. Translated by Y.A. Ono. *Physics Today*, August, pp. 45–47.
- Isham, C.J., 1993. Canonical quantum gravity and the problem of time. In: L.A. Ibort and M.A. Rodríguez, eds., *Integrable systems, quantum groups, and quantum field theory*, Dordrecht: Kluwer, pp. 157–287.
- Joos, E., Zeh, H.D., Kiefer, C., Giulini, D., Kupsch, J., and Stamatescu, I.-O., 2003. *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory*. 2nd ed. Berlin: Springer.
- Kamenshchik, A.Y., Kiefer, C., Sandhöfer, B., 2007. Quantum cosmology with a big-brake singularity. *Physical Review D*, 76, p. 064032.
- Kiefer, C., 1992. Decoherence in quantum electrodynamics and quantum gravity. *Physical Review D*, 46, pp. 1658–1670.
- Kiefer, C., 1993. Topology, decoherence, and semiclassical gravity. *Physical Review D*, 47, pp. 5414–5421.
- Kiefer, C. 2012. *Quantum gravity*. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press.

- Kiefer C., Krämer, M., 2012. Can effects of quantum gravity be observed in the cosmic microwave background? *International Journal of Modern Physics D*, 21, p. 1241001.
- Kiefer, C., Singh, T.P., 1991. Quantum gravitational correction terms to the functional Schrödinger equation. *Physical Review D*, 44, pp. 1067–1076.
- Kiefer, C., Zeh, H.D., 1995. Arrow of time in a recollapsing quantum universe. *Physical Review D*, 51, pp. 4145–4153.
- Kuchař, K.V., 1993. Time and interpretations of quantum gravity. In: G. Kunstatter, D. Vincent, and J. Williams, eds., *Proceedings of the 4th Canadian Conference on General Relativity and Relativistic Astrophysics*. Singapore: World Scientific, pp. 211–314.
- Maldacena, J., 2005. The illusion of gravity. *Scientific American*, November, pp. 56–63.
- Mott, N.F., 1931. On the theory of excitation by collision with heavy particles. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 27, pp. 553–560.
- Peres, A., 1962. On Cauchy's problem in general relativity—II. *Nuovo Cimento*, XXVI, pp. 53–62.
- Schlosshauer, M., 2007. *Decoherence and the quantum-to-classical transition*. Berlin: Springer.
- Schrödinger, E., 1926. Quantisierung als Eigenwertproblem II. *Annalen der Physik*, 384, pp. 489–527.
- Wheeler, J.A., 1968. Superspace and the nature of quantum geometrodynamics. In: C.M. DeWitt and Wheeler, eds. *Battelle rencontres*, New York: Benjamin, pp. 242–307.
- Zeh, H.D., 2007. *The physical basis of the direction of time*. 5th ed. Berlin: Springer.

Granice fizyki w kosmologii

Leszek M. Sokołowski

Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Jagiellońskiego
oraz Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych

Limits of physics in cosmology

Abstract

The message is that physics has an „outward bound” of scientific inquiry in the field of cosmology. I present it in the historical development. Physics and astronomy, developing since the seventeenth century, inherited from the early Greek philosophers the conception that the Universe as a whole is invariable. In nineteenth century this conception in conjunction with the conception of eternity of the Universe (being a philosophical conclusion from the conservation laws of mass and energy) gave rise to contradictions with other laws of physics indicating that cosmology is not a branch of physics since the notion of the Universe is not a physical one. Cosmology returned to physics as its important branch due to the advent of general relativity theory and the discovery of the cosmic microwave background radiation.

Modern cosmology generates fundamental problems creating real limits to inquiries in physics viewed as an empirical science. The very notion of the Universe shows that the scientific method reaches there limits of its applicability. Does „to exist” mean „to

be observed by someone”? Should the definition of the Universe be based on a current physical theory, e.g. on Einstein’s general relativity, giving rise to a kind of mathematical instability? Is the fashionable concept of the „multiverse” a physical one or is a purely metaphysical notion in a scientific disguise? If the Universe is unique (as we believe), is it meaningful to describe it in the framework of physics, which by its method always assumes that the number of objects it describes, is unlimited?

Apart from these permanent philosophical problems there are concrete urgent problems generated by cosmology: the nature of dark matter and dark energy. These two species of „substance” appear only in cosmology and do not fit the laboratory physics; contrary to the three centuries long tradition of modern science, now cosmology inspires physics in a troublesome way. A separate class of limits to physics is generated by the theorem in general relativity that the Universe emerged from an initial curvature singularity of the spacetime. At the singularity the whole scientific inquiry breaks down. Cosmology of the very early Universe suggests that in its evolution two specific epochs took place, that of quantum gravity and an inflationary epoch. The underlying them two physical theories are incomplete and seem to be inherently untestable. Furthermore, the experimentally verifiable physics cannot explain the origin of the initial conditions determining properties of the Universe which emerged from the singularity.

Keywords

physical cosmology, the notion of the Universe, dark matter and dark energy, falsifiability of quantum gravity, origin of the Universe.

1. Wstęp

Często powtarza się tezę, iż poznanie fizyczne ma rozmaite granice¹, gdy jednak przyjrzeć się jej dokładniej, a zwłaszcza kontekstowi, w jakim jest wygłaszana, to okazuje się, że nie oznacza ona tego, co literalnie głosi. Nie oznacza ona bowiem, że napotkaliśmy, lub napotkamy w przyszłości, nieprzekraczalne granice naszego pojmowania materialnego świata, które na zawsze zawęzą wiedzę o nim, lecz raczej jest ona optymistycznym stwierdzeniem, że gdy tylko na drodze poznawania go natkniemy się na przeszkodę, to uzbrojeni w dotychczasową wiedzę, mocą abstrakcyjnego myślenia i wyrafinowanych technik eksperymentalnych pokonamy ją i jeszcze silniejsi pójdziemy dalej. Granicą, o której najczęściej jest mowa i którą przekroczymy ku własnej chwale i pożytkowi, jest granica zjawisk mikroskopowych – procesy fizyczne rozgrywające się w skali Plancka. Eksperymentalnie procesy te są nam niedostępne i wielu fizyków twierdzi, że nigdy ich nie wytworzymy, tym niemniej jeszcze więcej badaczy jest przekonanych, że procesy te zostawiają ślady widoczne przy dużo niższych energiach i na dużo większych odległościach. Niczym granice państwowe, granice poznawcze są przekraczalne. W moim przekonaniu granica donioślejsza i bliższa naszej obecnej wiedzy fizycznej tkwi w kosmologii, czyli w poznawaniu tego, co największe. Nie pró-

¹ Jest to spisany tekst referatu wygłoszonego 24 lutego 2014 roku na posiedzeniu Komisji Filozofii Nauk Polskiej Akademii Umiejętności.

bując ustalić, czy jest to granica absolutnie nieprzekraczalna, chcę pokazać, że w przeszłości kosmologia zawsze stawiała przeszkody poznaniu naukowemu, a obecnie mnoży te przeszkody i czyni je skrajnie trudnymi do pokonania.

Zacznę zatem od historii. Fizyka wyszła z kosmologii i obecnie do niej wróciła, przejmując cały balast jej problemów konceptualnych. Kosmologia narodziła się w VI wieku p.n.e. w poglądach jońskich filozofów przyrody i w tym czasie była faktycznie całą nauką i całą filozofią. Wszechświat to był Kosmos – ogół tego, co istnieje, a zarazem był to zbiór bytów materialnych harmonijnie uporządkowanych, był ładem. W tej idei ładu, organizującego świat, można dopatrzeć się załączka koncepcji powszechnych praw przyrody, w tym praw fizyki. Do nas dotarły jedynie strzępy pism tych wczesnych filozofów, nie wiemy więc jak uzasadniali swoje przekonanie o istnieniu tego ładu, jednak na podstawie tych tekstów, które dotrwały do dziś, możemy przypuszczać, iż nie podawali oni argumentów, które możnaby uznać za zasadne (przy ówczesnym poziomie wiedzy). Wydaje się raczej, że ich quasi-religijna wiara w istnienie powszechnego ładu była koniecznym warunkiem wstępnym uzyskania jakiegokolwiek wiedzy o świecie. Wiedzy zdobywanej wyłącznie na drodze intelektualnych dociekań, bowiem idea eksperymentu naukowego wychodzącego poza powszechne doświadczenie ogółu ludzi jeszcze nie powstała. Ten ład ukryty za rojowiskiem pozornie chaotycznych zjawisk i wydarzeń miał być ponadto niezmienny – bez wiary w stałość ładu każdy filozof utonąłby w morzu zmiennych zjawisk. Filozofia, czyli ko-

smologia, czyli fizyka, trwała w tej wszechogarniającej i mętnej formie aż do Arystotelesa, który wprowadził do niej porządek, rozdzielając ją na wiedzę o organizmach żywych, czyli zoologię i botanikę, wiedzę o ciałach nieożywionych, czyli fizykę, oraz kosmologię, czyli wiedzę o ciałach niebieskich, zawartą w systemie geocentrycznym. Tak pojęta kosmologia podlegała prawom fizyki translunarnej i przedstawiała świat absolutnie niezmienny. Tezę o niezmienności świata pozaziemskiego przyjęło nowożytne przyrodznawstwo.

2. Kosmologia w XIX wieku

W pierwszej połowie XIX wieku nauki przyrodnicze, przede wszystkim fizyka i astronomia, były na tyle już rozwinięte, że problem kosmologii jako nauki o Wszechświecie jako całości powrócił. Sytuacja była konceptualnie dość zagmatwana. Z jednej strony większość przyrodników wyznawała pogląd (do dziś spotykany), iż świat materialny dzieli się na trzy obszary: mikroświat obiektów małych, czyli komórek, molekuł i atomów (wówczas hipotetycznych), makroświat obiektów dostrzeganych wokół nas gołym okiem oraz megaświat gwiazd, ich gromad i ewentualnych obiektów jeszcze większych oraz gigantycznych przestrzeni przez nie zajmowanych i procesów tam zachodzących. (Terminologia wtedy stosowana była inna, lecz to nie ma tu znaczenia). Temu zdroworozsądkowemu podziałowi, odpowiadającemu możliwościom percepcyjnym ludzkich

zmysłów, towarzyszyło przekonanie, że opis każdego z tych światów wymaga odrębnych teorii naukowych i że teorie odnoszące się do jednego świata słabo pasują do pozostałych.

Z drugiej strony fizycy coraz śmielej lansowali tezę o fizycznej jedności tych trzech warstw Wszechświata. Mocnym argumentem za nią było odkrycie przez Josepha Fraunhofera w 1814 r. linii absorpcyjnych w widmie optycznym Słońca, które później zidentyfikowano jako linie absorpcyjne rozmaitych pierwiastków w atmosferze słonecznej, dzięki czemu stwierdzono, że nasza gwiazda składa się z tych samych pierwiastków, które mamy na Ziemi (interesujące jest, że hel najpierw wykryto metodą spektroskopową w 1868 r. na Słońcu – stąd jego nazwa – a dopiero w 1895 r. znaleziono go w minerałach ziemskich, bowiem w powietrzu jest go bardzo mało). Analiza widm pobliskich gwiazd pokazała później, że również gwiazdy zbudowane są z tych samych pierwiastków. Obserwacje astronomii optycznej wykroczyły daleko poza układ planetyarny Słońca i objęły olbrzymią ilość gwiazd grupujących się w rozmaite skupiska. To gigantyczne zbiorowisko materii, którego ziemski świat stanowił tylko drobną cząstkę, Alexander von Humboldt nazwał „Wszechświatem” (*universum*), a wiedzę o nim – „kosmologią”.

Fizycy zaczęli się zastanawiać, czy Wszechświat da się opisać prawami fizyki. Już Newton uznał, że siłą spajającą Wszechświat, czyli odpowiedzialną za jego budowę, jest grawitacja i teza ta jest w pełni akceptowana przez obecną fizykę, bowiem większe obiekty astronomiczne są elektrycznie obojętne. Ten

Wszechświat rządzony siłą newtonowskiej grawitacji miał być wieczny i niezmienny. Wieczność wynikała ze świeżo odkrytych praw zachowania. W chemii ustalono prawo zachowania masy: w dowolnej reakcji chemicznej suma mas reagentów przed i po reakcji jest taka sama. Fizycy stwierdzili zachowanie energii we wszystkich znanych procesach fizycznych: całkowita energia jest niezmienna, mogą się jedynie zmieniać formy, jakie przybiera (kinetyczna, chemiczna itp.). Gdyby więc Wszechświat miał początek lub koniec, to materia (masa) i energia powstawałyby z niczego lub w nicość się obracały, wbrew prawom zachowania. Sama wieczność Wszechświata nie implikowała jeszcze jego niezmienności, lecz obserwacje astronomiczne nie sugerowały na czym ta zmienność miałaby polegać. Tu poglądy filozoficzne zdecydowanie przeważyły nad ubogimi i niekonkluzyjnymi faktami empirycznymi. Przejęta od greckich filozofów przyrody wiara w niezmienny ład przyrody, a przez to w niezmienną strukturę Wszechświata, umocniła się i została powszechnie w XIX wieku uznana. Doprowadziła ona do kryzysu w kosmologii.

W owej epoce uważano, że możliwe są tylko dwa modele Wszechświata. Są one znane, więc omówię je zwięźle.

1. „Wszechświat wyspowy”: Wszechświat jest rojowiskiem gwiazd, które tworzą chmurę o olbrzymim, lecz skończonym promieniu, znajdującą się w przestrzeni euklidesowej, czyli chmura ta otoczona jest nieskończoną pustą przestrzenią. Ten rój gwiazd jest grawitacyjnie związany, czyli całkowita jego ener-

gia, będąca sumą energii kinetycznych poszczególnych gwiazd i ich energii potencjalnych (ujemnych) wzajemnych oddziaływań grawitacyjnych jest ujemna. Gwiazdy nie mogą być nieruchome, bowiem siły grawitacyjne ściągnęłyby je ku sobie, powodując zapaść (kolaps) całej chmury. Gwiazdy muszą obiegać lokalne środki ciężkości i globalne centrum. W owej epoce obserwowano jedynie powolne ruchy nielicznych gwiazd. Na ten zarzut można odpowiedzieć, że przypadkowo pobliskie gwiazdy mają małe prędkości względem Słońca, a dalekie gwiazdy są zbyt odległe, by dało się zmierzyć ich prędkości.

Tu jednak pojawiała się daleko większa trudność. Takie rojowisko poruszających się gwiazd nie może istnieć dowolnie długo, bowiem zachodzi w nim zjawisko „parowania” gwiazd, analogiczne do parowania kropli wody w powietrzu. Całkowita energia roju gwiazd jest stała, natomiast energie poszczególnych gwiazd są zmienne w czasie, bowiem każda porusza się w zmiennym potencjale grawitacyjnym zależnym od położenia pozostałych gwiazd. Zderzenia gwiazd są rzadkie, natomiast dość często mijają się w niewielkiej (względnie) odległości i wtedy oddziaływanie grawitacyjne takiej pary może powodować przekaz energii kinetycznej od jednej gwiazdy do drugiej. W niektórych zbliżeniach jedna gwiazda może pobrać tak dużą energię od drugiej, że jej prędkość przekroczy drugą prędkość kosmiczną całej chmury i gwiazda ta ucieknie z roju. Druga gwiazda utraci tyle energii kinetycznej, że będzie stopniowo zbliżać się do centrum. Zatem najszybsze gwiazdy, mające dodatnią energię, będą rozpraszać się do nieskończoności w prze-

strzeni, a pozostałe, o ujemnej energii (z coraz większym modulem), będą skupiać się w centrum. Innymi słowy, część gwiazd stanie się swobodna i rozbiegnie się w przestrzeni, a pozostałe skolapsują w jedną wielką bryłę. Według mechaniki wielu ciał jest to proces niezmiernie powolny i „wyparowanie” gromady gwiazd trwa wiele miliardów lat – dużo dłużej niż wiek Wszechświata określony w kosmologii relatywistycznej – lecz czas jego zachodzenia jest bez znaczenia: jeżeli Wszechświat istnieje nieskończenie długo, to obecnie nie może być takim rojem gwiazd. „Wszechświat wyspowy” należy odrzucić.

2. Wszechświat jednorodny nieskończony. Newton zauważył, że gdyby punktowe gwiazdy o jednakowej masie umieścić dokładnie w węzłach nieskończonej sieci sześcienniej, to ich wzajemne siły przyciągania równoważyłyby się i taka sieć gwiazdowa byłaby nieruchoma. Jest to jednak konstrukcja niestabilna i niewielkie nawet przesunięcie jednej gwiazdy lub zmiana jej masy spowodowałyby, że siły ciężenia przestałyby się równoważyć i sieć ta zawaliłaby się jak domek z kart.

Bardziej obiecująca jest hipoteza, że kosmiczna materia jest ciągła jak ciecz lub gaz i że wypełnia całą nieskończoną przestrzeń ze stałą gęstością. Taki ośrodek jest jednorodny i izotropowy. Wprawdzie w XIX w. obserwacje tego nie potwierdzały (faktycznie były tak skromne, że niczego w tej kwestii nie rozstrzygały), lecz można było przypuszczać, że tak właśnie rozmieszczona jest kosmiczna materia. Ten model wywrócił się na dwu nieprzezwycięzalnych trudnościach.

A. Paradoks Olbersa

W 1610 r. astronom niemiecki Johannes Kepler zauważył, iż gdyby jednakowe gwiazdy były równomiernie rozłożone w przestrzeni aż do nieskończonych odległości, to łącznie docierałyby od nich do nas nieskończona ilość światła. Nie rozwinął tej myśli, bowiem w tym czasie był to problem zupełnie abstrakcyjny. Ponownie pojawił się w 1721 r. w liście angielskiego astronoma Edmunda Halleya (tego od komety) i w XVIII wieku zainteresował niektórych astronomów, lecz dopiero niemiecki popularyzator astronomii Heinrich Olbers rozpropagował go nadając mu w 1823 r. prostą i efektowną postać pytania: „dlaczego nocne niebo jest ciemne?”. Załóżmy, że gwiazdy są rozmieszczone równomiernie w całej przestrzeni i że każda emituje w jednostce czasu tyle samo światła (założenie to jest nieistotne, jedynie upraszcza rachunki bez zmiany wyniku). Ilość światła docierającego do nas od gwiazdy odległej o r maleje z odległością jak $1/r^2$, za to pole powierzchni cienkiej warstwy sferycznej o promieniu r rośnie jak r^2 , a tym samym liczba gwiazd znajdujących się w tej warstwie też rośnie jak r^2 . Zatem ilość dochodzącego do nas światła z każdej warstwy jest taka sama, niezależnie od tego, czy warstwa jest blisko (i jest więc mała), czy też jest daleko i zawiera wiele gwiazd. Skoro takich warstw jest nieskończenie wiele (bo gwiazdy wypełniają całą przestrzeń), to na Ziemię winno padać światło o nieskończonej mocy. Oczywiście tak nie jest.

Argumentowano, że gwiazdy nie są punktowe i widać je jako małe tarcze na niebie, zatem gwiazdy bliższe przysła-

niąją nam dalsze i światło dalekich gwiazd nie dociera do nas. Oznacza to, że w którąkolwiek stronę spojrzeć, nasz wzrok trafi w tarczę jakiejś gwiazdy i każdy kawałek nieba winien świecić tak jasno jak Słońce. Tarczę Słońca widać z Ziemi pod kątem pół stopnia, co oznacza, że całą sferę niebieską można pokryć za pomocą 180 000 tarcz słonecznych, a zatem z całego nieba winna do nas docierać (w dzień i w nocy) ilość promieniowania 180 000 razy większa niż ze Słońca. Oczywiście tak nie jest.

Wysuwano rozmaite hipotezy, lecz astronomia XIX wieku nie była w stanie z paradoksem Olbersa sobie poradzić. Wieczny, nieskończony i niezmienny Wszechświat musiał nas oślepić.

B. Paradoks grawitacyjny Seeliger

W latach 1894–96 niemieccy badacze, astronom Hugo von Seeliger i matematyk Karl Neumann, zauważyli, że w nieskończonym, jednorodnym i wiecznym Wszechświecie prawo powszechnego ciężenia prowadzi do sprzeczności. Rzeczywiście, w jednorodnym izotropowym nieskończonym ośrodku żaden punkt i żaden kierunek nie jest wyróżniony, zatem w każdym punkcie siła grawitacyjna działająca na dowolną cząstkę ze strony całego nieskończonego ośrodka musi zniknąć, $\mathbf{F} = \mathbf{0}$, bo- wiem tylko wektor $\mathbf{0}$ nie wyróżnia żadnego kierunku. Siła grawitacyjna jest gradientem potencjału, $\mathbf{F} = \text{grad } U$ i jeżeli siła wszędzie znika, to $U = \text{const}$. Prawo powszechnego ciężenia jest podstawowym rozwiązaniem fundamentalnego dla newtonowskiej teorii grawitacji równania Poissona dla potencjału,

$$\Delta U = 4\pi G\rho,$$

gdzie ρ jest gęstością masy ośrodka, a G jest stałą grawitacyjną Newtona. Jeżeli potencjał jest stały, to $\rho = 0$ – nie ma materii. Dla $\rho = \text{const} > 0$ istnieje rozwiązanie matematycznie poprawne, $U \sim r^2$, lecz jest ono jawnie niefizyczne: siła grawitacyjna działająca na cząstkę w danym miejscu zależy – co do wartości i kierunku – od wyboru początku układu współrzędnych, czyli punktu $r = 0$.

Tego problemu w ramach newtonowskiej teorii grawitacji rozwiązać nie można. Czasami w literaturze o paradoksie grawitacyjnym można przeczytać, że jego powodem jest fałszywe założenie o statyczności Wszechświata (obecnie wiemy, że Wszechświat ewoluuje). Tak nie jest: w teorii Newtona ruchy materii nie grają roli i siła grawitacyjna w danym miejscu zależy tylko od rozmieszczenia mas w tej samej chwili, czyli propaguje się z nieskończoną prędkością. Gdyby nieskończony jednorodny ośrodek ewoluował i gęstość masy była funkcją czasu, $\rho = \rho(t)$ (ale nie przestrzeni), to mielibyśmy ten sam paradoks.

Wniosek z paradoksu grawitacyjnego

Prawo powszechnego ciężenia *nie* jest powszechne – stosuje się (i jest dobrze sprawdzone) tylko dla skończonych (w przestrzeni) skupisk materii, czyli mających skończoną całkowitą masę. Ten warunek wyznacza granicę fizyki klasycznej. Jednorodny nieskończony ośrodek jest za tą granicą i nie da się go opisać w ramach tej fizyki.

Pod koniec XIX wieku wyciągnięto stąd ostatecznie wniosek, że Wszechświat nie jest obiektem fizycznym i nie stosują się do niego prawa fizyki. Fizyka stosuje się do poszczególnych agregatów materii, mniejszych lub większych, lecz nie do „wszystkiego, co istnieje”. Wszechświat to pojęcie filozoficzne, nie fizyczne.

3. Powstanie kosmologii relatywistycznej

Zmiana tej sytuacji wymagała odejścia od fizyki newtonowskiej. Zanim do tego doszło, na początku XX wieku podjęto ostatnią próbę zastosowania tej fizyki do nieskończonego Wszechświata. Dokonał tego szwedzki astronom, Carl Charlier (1862–1934), proponując w 1908 r. koncepcję „Wszechświata hierarchicznego”, którą rozwinął w 1922 r. Paradoxy Olbersa i Seeligera biorą się stąd, że zakładamy stałą gęstość materii w nieskończonej przestrzeni. Charlier zaproponował, by zrezygnować z tej stałości. Weźmy kulę o środku w Słońcu i promieniu sięgającym do pasa Kuipera (zbiorowisko drobniejszych ciał niebieskich tworzące z grubsza granicę Układu Słonecznego) i obliczmy średnią gęstość materii w tej kuli (dominujący wkład do niej daje oczywiście Słońce). Porównajmy tę gęstość z gęstością materii zawartej w kuli o środku w Słońcu i promieniu 100 lat świetlnych (znajduje się w niej ponad sto tysięcy gwiazd); gęstość w niej będzie mniejsza niż w Układzie Słonecznym. Następnie weźmy kulę o promieniu równym promieniowi Drogi

Mlecznej, ok. 50 000 lat świetlnych; zawarta jest w niej cała Galaktyka. Ponieważ Droga Mleczna to cienki dysk leżący w płaszczyźnie równikowej tej kuli, gęstość materii w niej jest mniejsza niż w poprzedniej kuli. Według Charliera ten proces można ciągnąć *ad infinitum*, im większy jest obszar przestrzeni, tym mniejsza jest gęstość masy zawartej w nim materii. W granicy nieskończenie wielkich obszarów, gęstość kosmicznej materii zmierza do zera. Charlier wykazał, że we wszechświecie z taką hierarchią gęstości materii oba paradoksy znikają.

Model hierarchiczny nie przyjął się, bowiem pojawił się zarazem za wcześnie i za późno. Pojawił się za wcześnie, bowiem w tamtej epoce miał zbyt słabe oparcie obserwacyjne: malenie gęstości można było stwierdzić tylko w odniesieniu do pierwszych dwu kul, a o budowie, rozmiarach i masie Drogi Mlecznej wiedziano zbyt mało, by twierdzić, że jej gęstość jest odpowiednio mniejsza. Teza, że następne, coraz większe kule tworzą ciąg o malejącej gęstości, była czystą spekulacją teoretyczną, bez szans na weryfikację w obserwacjach. Charlier wystąpił też za późno: zanim astronomowie zdołali zapoznać się i oswoić z jego pomysłem, pojawiła się idea nieporównanie potężniejsza i ogólniejsza – ogólna teoria względności Einsteina. Warto natomiast podkreślić, że idea Charliera, wymagająca nieskończonego ciągu coraz większych obszarów Kosmosu, fundamentalnie wykraczała poza empiryczne granice fizyki. Wszechświat, aby stać się obiektem fizycznym podległym prawom fizyki, musiał stać się konstrukcją czysto matematyczną, czyli faktycznie metafizyczną.

Przełomem była ogólna teoria względności, która w jednoznaczny sposób uwolniła się od wszystkich problemów kosmologii nierelatywistycznej i dylematów modelu Charliera. Oto kilka najważniejszych punktów historii kosmologii relatywistycznej.

1915 – pod koniec tego roku Einstein znajduje równania pola grawitacyjnego i tym samym kończy formułowanie podstaw nowej teorii; w następnym roku publikuje obszerny artykuł przedstawiający OTW. Grawitacja nie jest wyrażona siłą (wektorem), lecz krzywizną czasoprzestrzeni (tensorem), zatem znika problem wyróżnionego kierunku w jednorodnym izotropowym ośrodku.

1917 – Einstein stosuje OTW do opisu całego Wszechświata widząc, że ta teoria pokonuje bez trudu przeszkody, na których wywróciła się grawitacja newtonowska. Kosmologia wraca do fizyki. Einstein utożsamia matematycznie Wszechświat z pewnym rozwiązaniem równań pola grawitacyjnego. Wybiera to rozwiązanie nie w oparciu o obserwacje astronomiczne, lecz kierując się jego prostotą: materia i przestrzeń są jednorodne i izotropowe. Einstein bez wahania wpisuje się w dostojną tradycję filozoficzną traktowania Wszechświata jako niezmiennego. To nie jest jednak łatwe i wymaga modyfikacji równań pola: należy wprowadzić do nich dodatkowy człon – *człon kosmologiczny* – zawierający dowolny parametr, *stałą kosmologiczną*. Fizycznie modyfikacja ta nie ma (w tamtej epoce) żadnego uzasadnienia i sama nazwa wskazuje, że spowodowana jest filozoficznie pojmowaną kosmologią.

1922–1924 – Aleksander Friedmann wykazuje, że czasoprzestrzeń z jednorodnym i izotropowym rozmieszczeniem materii muszą ewoluować w czasie nawet w obecności członu kosmologicznego. Einstein krytykuje Friedmanna, potem krytykę odwołuje, chyba nie za bardzo wie jakie zająć stanowisko wobec jego wyników. Ta chwiejność sprawia, że wyniki te znikają z pola widzenia badaczy.

1927 – Georges Lemaître niezależnie odkrywa modele Friedmanna i wyprowadza w nich prawo Lemaître’a–Hubble’a rozszerzania się Wszechświata. Jego praca opublikowana w mało znanym lokalnym czasopiśmie zostaje przeoczona i na kilkadziesiąt lat traci pierwszeństwo.

1929 – Edwin Hubble ogłasza wyniki obserwacji galaktyk (głównie innych badaczy) i propaguje zjawisko powszechnej ucieczki galaktyk (tzw. prawo Hubble’a, zwane obecnie prawem Lemaître’a–Hubble’a).

Po 1930 – Einstein uznaje ogłoszoną przez Hubble’a powszechną ucieczkę galaktyk i odrzuca swój statyczny model Wszechświata. Jest to koniec trwającej 25 wieków wiary w niezmiennosc Wszechświata. W konsekwencji Einstein usuwa człon kosmologiczny ze swoich równań ($\Lambda = 0$). Stała kosmologiczna jednak nie ginie, lecz zostaje wyparta na dalekie peryferie fizyki, skąd powróci triumfalnie w latach siedemdziesiątych do samego centrum fizyki fundamentalnej.

Wydarzenia tych pierwszych kilkunastu lat istnienia OTW prowadzą do ważnego wniosku: *Wszechświat jest obiektem fizycznym i fizyka stosuje się do niego jako całości. Skoro tak,*

to wszystkie jego własności są ustalane przez fizykę i nie mogą być deklarowane poza nią w postaci założeń filozoficznych. Wszechświat podlega prawom fizyki, a nie ustala je dla siebie. Jego ewolucja wynika z tych praw i nie może być postulowana a priori.

W latach trzydziestych XX wieku kosmologia relatywistyczna napotkała silny opór wielu fizyków przeciwko nieuniknionej osobliwości pierwotnej w modelach Friedmanna, implikującej, że Wszechświat miał początek w skończonej przeszłości. Wynikał on głównie z wiary w absolutną słuszność prawa zachowania energii, które zostałyby złamane w procesie wyłaniania się Wszechświata z tej osobliwości. Dopiero później uświadomiono sobie, że zachowanie energii nie jest aksjomatem fizyki, lecz twierdzeniem, które należy odrębnie dowieść w każdej teorii fizycznej uważanej za prawdziwą. W OTW na ogół, również poza rozwiązaniami kosmologicznymi, prawa zachowania energii udowodnić nie można, co jest poważnym problemem tej teorii i przedmiotem nadal trwających intensywnych badań. Zatem w kwestii praw zachowania fizyka napotkała swoje granice (przejsiowe lub nieprzekraczalne) najpierw na terenie kosmologii.

Do złej reputacji kosmologii przyczynił się sam Hubble, w owym czasie bardzo głośny astronom, swoimi pomiarami stałej Hubble'a, obciążonymi olbrzymimi błędami systematycznymi, których uparczywie nie dostrzegał. Z jego pomiarów wynikał wiek Wszechświata, liczony od pierwotnej osobliwości, mniejszy od wieku Ziemi; wydaje się, że Hubble'owi ta sprzeczność nie przeszkadzała.

W latach 1946–53 znany amerykański fizyk jądrowy George Gamow (uciekinier z Rosji), rozważał wraz ze współpracownikami ważną konsekwencję istnienia pierwotnej osobliwości w modelach Friedmanna. Skoro tuż po wyłonieniu się z tej osobliwości Wszechświat był bardzo skurczony, to wypełniająca go materia była bardzo ściśnięta, zatem bardzo gorąca, zatem tworzyła gorącą plazmę cząstek elementarnych, zatem zachodziły w niej reakcje termojądrowe syntezy jąder analogiczne do syntezy wodoru w hel w gwiazdach. Gamow był przekonany, że w ten sposób powstały wszystkie obecnie istniejące pierwiastki chemiczne. Pomysły Gamowa, pomimo intensywnego propagowania, nie przekonały ogółu fizyków i nie zainteresowały astronomów – kosmologia oparta na modelach Friedmanna miała kiepską reputację i uchodziła za *science fiction*, a nie za dział empirycznie weryfikowalnej nauki – wywołały natomiast silną reakcję przeciwników zgromadzonych wokół głośnego astronoma angielskiego Freda Hoyle’a (1915–2001). Opisywaną przez Lemaître’a ewolucję Wszechświata wyłaniającego się z pierwotnej osobliwości określił w 1949 r. Hoyle szyderczo jako „big bang” („wielkie bum”); nie przewidział, że dwadzieścia lat później ta drwiąca nazwa stanie się poważnym i powszechnie używanym terminem naukowym. Dla Hoyle’a idea Wielkiego Wybuchu była pseudonauką, religijnym kreacjonizmem wyrażonym w języku naukowym. W 1948 r. przeciwstawił kosmologii friedmannowskiej model *wszechświata stacjonarnego*: wiecznego i niezmiennego, lecz nie statycznego. Był to wszechświat-rzeka: wiecznie płynąca ze stałą prędkością,

obserwator na brzegu widzi, że jedne krople przepływają koło niego, inne, takie same, nadpływają i tak stale bez zmian. Tymi kroplami były galaktyki rozbiegające się zgodnie z prawem Le-maitre'a–Hubble'a. Tak jak w przypadku rzeki trzeba założyć, że ma ona wiecznie działające ze stałą wydajnością źródło, tak trzeba było wyjaśnić skąd się biorą galaktyki, skoro oddalają się i gęstość materii spada. Pomysł Hoyle'a i współpracowników był zaskakujący: istnieje swoiste „pole kreacji”, które kreuje cząstki elementarne, z których powstają atomy, a te następnie grupują się w gwiazdy i galaktyki; to wszystko zachodzi dokładnie w takim tempie, by ściśle skompensować ubytek materii wskutek rozszerzania się Wszechświata. Ten model ma dwie fundamentalne słabości. Po pierwsze, nigdy nie udało się skonstruować na gruncie fizyki kwantowej mechanizmu kreacji materii; trzeba było założyć *ad hoc* kreację bez zachowania energii. Tempo tej kreacji musi być tak małe, że jest całkowicie poza zasięgiem eksperymentu (pół wieku temu i dzisiaj), jest więc to idea nieempiryczna. Po drugie, ponieważ nie jesteśmy w wyróżnionym miejscu we Wszechświecie (Hoyle zgadzał się z tym), to bardzo odległy obserwator powinien widzieć ucieczkę galaktyk z tą samą prędkością jaką my mierzymy, zatem tempo tej kreacji winno wszędzie być takie samo i dopasowane do tej prędkości ucieczki. Model stacjonarnego świata opiera się na postulatcie, że procesy fizyczne zachodzące „tu i teraz” są skorelowane (wywołane?) z procesami zachodzącymi „daleko stąd i w przeszłości”. Przypomina to koncepcję Ernsta Macha (1838–1916), iż masy ciał wokół nas są wynikiem oddziaływania tych

ciał z dalekimi galaktykami. Podobnie jak ta idea Macha, pomysł Hoyle'a korelacji zjawisk na odległościach kosmologicznych jest niezgodny z całą fizyką, która zakłada, że możemy badać lokalne zjawiska fizyczne bez uwzględniania tego, co dzieje się bardzo daleko stąd (bo tego, co dzieje się w odległych miejscach, nie możemy kontrolować).

Postawa Hoyle'a jako naukowca była kontrowersyjna. Nigdy nie wycofał się z koncepcji wszechświata stacjonarnego, mimo że kosmologia Friedmanna okazała się prawdziwsza, bowiem potwierdzają ją dwa ważne fakty: istnienie promieniowania reliktowego oraz pierwotna nukleosynteza najlżejszych pierwiastków – z nimi model Hoyle'a ma fundamentalne trudności. Hoyle zwalczał kosmologię Friedmanna–Lemaître'a, bowiem uważał ją za pseudonaukowy kreacjonizm. Moim zdaniem to stacjonarny model wszechświata jest konstrukcją pseudonaukową: dla ratowania wieczności i niezmienności Wszechświata wprowadza dwie nieweryfikowalne empirycznie hipotezy niezgodne z istniejącą fizyką.

Trzeba przyznać, że opór Hoyle'a miał jeden pozytywny skutek. Sprzeciwiając się idei Gamowa powstania pierwiastków w pierwotnej nukleosyntezie, wysunął hipotezę, a następnie w latach 1954–57 opracował (wraz z Williamem Fowlerem, Margaret Burbidge i Geoffreyem Burbidgem) teorię nukleosyn-tezy pierwiastków w ciężkich gwiazdach, która (z pewnymi modyfikacjami i uzupełnieniami) jest obecnie powszechnie przyjęta. Jednak idea Gamowa okazała się, ze znacznymi zmianami, też poprawna: deuter, hel i lit powstały w pierwotnej nukleosyn-

tezie w plazmie wczesnego Wszechświata. W astrofizyce często tak bywa, że określony wynik nie jest osiągnięty na teoretycznie najprostszej drodze.

Jak widzimy, kosmologia, zarówno Friedmanna–Lemaître’a jak i Hoyle’a, przypiera fizykę do granic poznania.

Drugi i definitywny przełom, wprowadzający kosmologię jako naukę empiryczną do fizyki, nastąpił w 1965 r. Miało wtedy miejsce odkrycie, które nastąpiło we właściwym czasie (świat naukowy dojrzał do jego akceptacji) i którego dokonali właściwi ludzie (tzn. Amerykanie): odkryto promieniowanie reliktowe, czyli elektromagnetyczny relikտ epoki, gdy wczesny Wszechświat był wypełniony plazmą swobodnych elektronów i protonów. To odkrycie, jedno z najważniejszych w XX wieku, natychmiast uczyniło kosmologię pełnoprawnym i ważnym działem fizyki. W ciągu paru następnych lat opracowano Standardowy Model Kosmologiczny opisujący historię Wszechświata od drobnego ułamka sekundy po Wielkim Wybuchu do chwili obecnej (w miarę dobrze znamy ery wczesnego Wszechświata do momentu rekombinacji – powstania neutralnego wodoru z plazmy swobodnych protonów i elektronów, późniejsze epoki znamy gorzej); ten model, stale uzupełniany różnymi szczegółami, do 1999 r. nie wymagał większej korekty.

4. Co to jest Wszechświat i jaką fizyką go opisywać?

Definitywne wejście kosmologii w obręb fizyki pół wieku temu nie oznaczało, że jej problemy graniczne zniknęły, lub że zostały z niej usunięte, przeciwnie, stały się odtąd problemami fizyki jako takiej i tym samym nabrały znaczenia. Są to problemy albo nierozstrzygalne, albo trudne do rozwiązania, toteż większość fizyków, mających podejście pozytywistyczne („zajmujemy się jakimś problemem, gdy jest realna szansa na jego rozwiązanie”) woli je odłożyć, lecz nie unieważnić.

Weźmy najbardziej oczywisty problem: co właściwie jest dziedziną kosmologii? Co to jest Wszechświat? Astronom podaje definicję czysto operacyjną przez wyliczenie obiektów badanych:

„Wszechświat, Kosmos, to układ wszystkich obiektów astronomicznych, materii rozproszonej i pól fizycznych wraz z czasoprzestrzenią, którą wypełniają” (Jaroszyński, 2005).

Definicje fizyków są trochę zróżnicowane.

„Wszechświat jest największym zbiorem obiektów (zdarzeń), do których można zastosować prawa fizyki w sposób spójny i sensowny” (Bondi, 1961).

„W kosmologii staramy się badać świat jako całość i nie ograniczać się do jego zamkniętych podukładów, takich jak laboratorium, Ziemia, Układ Słoneczny itd.” (Sexl i Urbantke, 1983).

„Wszechświat oznacza wszystko to, co istnieje w sensie fizycznym” (Ellis, 2006, s. 1183–1285).

Najnowszy podręcznik kosmologii relatywistycznej formuluje ją następująco: „Fizyczny Wszechświat jest największym zbiorem obiektów fizycznych, które są lokalnie powiązane kauzalnie ze sobą wraz z obszarem czasoprzestrzeni dostępnej nam obserwacjami astronomicznymi” (Ellis, Maartens i MacCallum, 2012).

Wszystkie te definicje zawierają niejasne punkty. „Wszystko, co istnieje”? Czy „istnieć” znaczy „być postrzeganym (przez przyrząd pomiarowy lub istotę inteligentną, np. nas na Ziemi)”? Gdyby te dwa pojęcia utożsamić, to istnienie byłoby zrelatywizowane do obserwatora opisującego Wszechświat. Tak być nie może, bo wiemy, że dla obserwatorów z Ziemi istnieją obszary fundamentalnie niedostępne. Nie zobaczymy wnętrza żadnej czarnej dziury, wiemy też, że w czasoprzestrzeniach mających sens kosmologiczny istnieją *horyzonty kosmologiczne* wynikające z faktu, że wszelkie niosące energię sygnały rozchodzą się z prędkością nie większą od prędkości światła c . Nawet w obrębie szczególnej teorii względności nie każdy obserwator (żyjący nieskończenie długo) może otrzymać sygnał z dowolnego punktu czasoprzestrzeni Minkowskiego, ani też do dowolnego punktu wysłać sygnał – dotyczy to np. obserwatora poruszającego się ruchem hiperbolicznym (obserwator ten ma stałe przyspieszenie w każdym chwilowym inercjalnym układzie spoczynkowym). Sądzę, że obecnie przyjęty jest pogląd (niejawnie wyrażony w ostatniej definicji), iż jakiś obiekt

fizycznie istnieje, jeżeli oddziałuje (lub może oddziałać) lokalnie z jakimś innym obiektem fizycznym, który z kolei może być obserwowany przez nas; ten łańcuch pośredników może być dowolnie długi, byle skończony. To brzmi rozsądnie, lecz niektórzy fizycy zajmujący się matematyczną OTW idą dalej.

„Wszechświat to maksymalne rozszerzenie analityczne pewnego rozwiązania równań Einsteina należącego do klasy czasoprzestrzeni kosmologicznych” (Hawking i Ellis, 1973).

Ta definicja jest zrelatywizowana do aktualnie przyjmowanej teorii fizycznej – OTW – i wykracza poza empirię nadając byt fizyczny pewnej konstrukcji matematycznej. Jeżeli ją przyjmujemy, to musimy zaakceptować jej trzy ważne konsekwencje.

1. Pewna część Wszechświata jest pryncypialnie niedostępna wszelkim obserwacjom. Przykładu dostarczają czarne dziury (abstrahuję tu od faktu, że świat, w którym żyjemy, jest różny od czarnej dziury). Weźmy najprostszą, niewirującą czarną dziurę Schwarzschilda. Zakładamy, że każda cywilizacja uprawiająca naukę żyje nad horyzontem zdarzeń, w obszarze zewnętrznym. Maksymalne rozszerzenie analityczne tej dziury przedstawia czasoprzestrzeń złożoną z obszaru pod horyzontem w przeszłości (ograniczonego osobliwością „białej dziury”) i z tego obszaru cywilizacja ta może dostawać sygnały przechodzące przez przeszły horyzont, następnie z obszaru zewnętrznego oraz obszaru pod horyzontem przyszłości zakrywającego (dla obserwatora w obszarze zewnętrznym) osobliwość czarnej dziury w przyszłości. Z obszaru wewnętrznego pod horyzontem przy-

szłości obserwator nie dostanie żadnego sygnału (pomijam hipotetyczne zjawiska kwantowe tunelowania pod horyzontem), czyli nie wie co tam się dzieje, lecz przynajmniej wie o jego istnieniu, bowiem ciała wrzucone do czarnej dziury nigdy nie wracają. Ponadto rozszerzenie analityczne prowadzi do zaskakującego wyniku: czasoprzestrzeń zawiera drugi obszar zewnętrzny, całkowicie symetryczny do pierwszego, znajdujący się „po drugiej stronie” obszarów wewnętrznych. Drugi obszar zewnętrzny nie ma żadnej łączności kauzalnej (sygnałami nie szybszymi od światła) z pierwszym, zatem jest empirycznie niewykrywalny – jego istnienie nie ma żadnego wpływu na zjawiska fizyczne w pierwszym obszarze i jest aktem wiary w sprawczą moc matematyki.

W przypadku naładowanej elektrycznie czarnej dziury (czasoprzestrzeń Reissnera–Nordströma) i dziury wirującej (czasoprzestrzeń Kerra) maksymalne rozszerzenie analityczne zawiera nieskończenie wiele obszarów zewnętrznych i wewnętrznych.

2. Fizyczne istnienie innych obszarów zewnętrznych w maksymalnym rozszerzeniu analitycznym danego rozwiązania budzi wątpliwość nie tylko ze względu na brak powiązania kauzalnego z nimi. (Być może fizyka kwantowa dostarczy takiego związku). W przypadku czarnych dziur te rozszerzenia analityczne są niestabilne ze względu na ich ładunek i moment pędu. Weźmy wieczną czarną dziurę (nie powstała w wyniku kolapsu gwiazdy), która nie ma ładunku i nie wiruje; tworzy ona czasoprzestrzeń Schwarzschilda z dwoma obszarami zewnętrznymi

i dwoma wewnętrznymi. Wprowadźmy do niej jeden elektron. W wyniku powstanie naładowana czarna dziura, która od neutralnej różni się fizycznie tym, że w obszarze zewnętrznym występuje znikomo słabe pole elektryczne, natomiast matematycznie różni się od niej zasadniczo: ma nieskończenie wiele obszarów zewnętrznych, wewnętrznych i osobliwości, które są odmienne od dwu osobliwości Schwarzschilda. Trudno uwierzyć, że wprowadzenie ładunku jednego elektronu do czarnej dziury o masie ciężkiej gwiazdy tak drastycznie zmieni jej czasoprzestrzeń. Tak samo jest w przypadku wirującej czarnej dziury: dla dowolnie małego momentu pędu dostajemy rozszerzenie analityczne Kerr'a, a w granicy znikającego krętu ta czasoprzestrzeń skokowo przekształca się w czasoprzestrzeń Schwarzschilda. To zapewne niefizyczne „przejście fazowe” jest spowodowane tym, że konstrukcja rozszerzenia analitycznego jest odmienna w obecności ładunku elektrycznego i gdy go nie ma; podobnie jest w sytuacji różnego od zera momentu pędu i bez niego.

Wydaje się, że Hawking i Ellis (i wielu innych) przykładają nadmierną wagę do ścisłych rozwiązań. W przyrodzie ścisłe rozwiązania równań fizyki zdarzają się rzadko, jeśli w ogóle. Proste rozwiązanie równań Maxwella, takie jak płaska monochromatyczna fala elektromagnetyczna, jest tylko idealizacją sytuacji realnej i nie obserwujemy jej; takiej fali nie sposób dokładnie wytworzyć i w obszarze (teoretycznie nieskończonym) gdzie miałyby się propagować, zawsze są jakieś słabe pola od rozmaitych odległych źródeł. Rzeczywistość jest zawsze bardziej

złożona. Aby uniknąć nieporozumień, należy odróżniać ściśle prawa fizyki (ściśle równania) od ścisłych rozwiązań. Prawa fizyki, przynajmniej w dobrych (a nie tylko „efektywnych”) teoriach uważamy za ściśle, np. za ściśle uważamy równania Maxwella elektrodynamiki klasycznej (ta ścisłość jest ograniczona istnieniem teorii nadrzędnej – elektrodynamiki kwantowej) i na ich podstawie twierdzimy, że masa spoczynkowa fotonu jest dokładnie równa zero, a nie, że jest tylko tak mała, że jej nie możemy zmierzyć. Przez ściśle rozwiązanie równań rozumiemy dokładne ich rozwiązanie, które jest nam dostępne, bowiem spełnia uproszczone warunki brzegowe i początkowe i to najczęściej takie, że mogą przybliżać te realistyczne warunki zachodzące w rzeczywistym świecie. W tym sensie takie rozwiązanie ściśle jest przybliżeniem rzeczywistości. Innymi słowy, sytuacja rzeczywista jest też opisana rozwiązaniem dokładnym, lecz odpowiadające mu warunki początkowe i brzegowe są tak skomplikowane, że rozwiązania tego nie znamy i nie znajdziemy, bo jest zbyt złożone. Mówiąc zatem, że rzeczywistość opisujemy w sposób przybliżony, mamy na myśli przybliżony opis warunków początkowych i brzegowych i wynikający z tego przybliżenia wybór dokładnego rozwiązania, a nie konstrukcję przybliżonego rozwiązania równań. (Inna rzecz, że równania fizyki są przeważnie tak skomplikowane, iż w wielu procesach decydujemy się na uproszczenie równań i posługujemy się rozwiązaniami dokładnymi równań uproszczonych, które tym samym są rozwiązaniami przybliżonymi równań dokładnych). Z tą sytuacją mamy niemal zawsze do czynienia w OTW. Pole

Schwarzschilda jest ścisłym rozwiązaniem równań Einsteina przy założeniu, że pole to jest wytworzone przez idealnie kulistą i dokładnie nieruchomą gwiazdę i poza nią nie ma żadnej innej materii. Pole to jest bardzo dobrym przybliżeniem, tym niemniej tylko przybliżeniem, rzeczywistego pola w Układzie Słonecznym (zawierającym planety i mnóstwo ciał drobniejszych). Czasoprzestrzeń Robertsona–Walkera i konkretne rozwiązania w postaci modeli Friedmanna są ścisłe, a zarazem są tylko przybliżeniem rzeczywistego Wszechświata. Rozwiązanie ściśle opisujące Wszechświat, biorące pod uwagę położenia i ruchy wszystkich gwiazd, planet, obłoków gazu i pyłu i wszelkich innych ciał materialnych, jest tak skomplikowane, że nigdy go nie poznamy. To bardzo szczęśliwa dla nas okoliczność, że to nieznanne rozwiązanie daje się dobrze przybliżyć prostymi modelami Friedmanna. To, że kosmologia ze swej istoty operuje przybliżonym opisem Wszechświata, notorycznie uchodzi uwagi w dyskusjach o jej podstawach.

Wracając do powyższej definicji Wszechświata nasuwa się pytanie: czy maksymalne rozszerzenie analityczne rozwiązania opisującego rzeczywisty Wszechświat daje się dobrze przybliżyć modelami Friedmanna? Przykład czarnej dziury Schwarzschilda oraz wolno wirującej lub słabo naładowanej czarnej dziury pokazuje, że tak być nie musi. Ta definicja może zatem prowadzić do fałszywego opisu Wszechświata.

3. Akceptujemy ideę, że definicja Wszechświata nie jest empiryczna, lecz jest pewną (elegancką) konstrukcją w ramach ak-

tualnie uznawanej teorii grawitacji. Jeżeli OTW zostanie zastąpiona teorią bardziej uniwersalną, np. kwantową teorią grawitacji, to odpowiednio zmieni się też ta definicja i podpadający pod nią obiekt będzie zapewne znacznie różnić się od tego, co obejmuje definicja Hawkinga i Ellisa. Czegoś takiego normalnie w fizyce nie było. Dla przykładu: atom według mechaniki kwantowej ma właściwości istotnie różne od hipotetycznego atomu, o którym mówiła kinetyczna teoria gazów w połowie XIX wieku, jednak w obu przypadkach chodzi o ten sam obiekt materialny, o którym dziś wiemy nieporównanie więcej niż półtora wieku temu. Zachodzi obawa, że Wszechświat ponownie staje się konstrukcją intelektualną, luźno związaną z rzeczywistością (a co to jest rzeczywistość?), że fizycy-teoretycy usiłują coś wmówić w świat realny, niczym politycy w wyborców.

Czy zatem należy odrzucić definicję Hawkinga i Ellisa i przyjąć którąś z poprzednich, czy też trzymać się jej i stale pamiętać o powyższych zastrzeżeniach, by nie wyprowadziła nas na manowce? To jest problem otwarty.

Definicja H–E przez swój radykalizm ujawnia z całą mocą dwie kwestie, które są obecne w pozostałych definicjach Wszechświata, lecz są tam mniej eksponowane, lub wręcz ukryte. Po pierwsze, pewna część Wszechświata może nam być pryncypialnie niedostępna empirycznie: nie dostaniemy z niej żadnego sygnału fizycznego, ani nie możemy do niej żadnego sygnału wysłać. Zdając sobie z tego sprawę, niektórzy badacze już dość dawno temu wprowadzili pojęcie *Metagalaktyki* – jest

to ta część całego Wszechświata, która jest nam aktualnie dostępna empirycznie (eksperymentem i obserwacją). *Wszystkie prawa fizyki i teorie Wszechświata testujemy w Metagalaktyce, a nie w całym Wszechświecie*. Metagalaktyka rośnie wraz z postępem wiedzy fizycznej:

- do końca XVI wieku był nią tylko Układ Słoneczny,
- do końca XVIII wieku rozrosła się o pobliskie gwiazdy,
- na początku XX wieku objęła niemal całą Drogę Mleczną,
- obecnie sięga aż po powierzchnię ostatniego rozproszenia, na której powstało promieniowanie reliktowe docierające teraz do Ziemi (faktycznie sięga w przeszłość aż do epoki pierwotnej nukleosyntezy).

Wielu fizyków uważa, że wychodzenie (konceptualne) poza Metagalaktykę nie ma sensu i dostarcza wiedzy pozornej. Ta kwestia jest doniosła, bowiem modna w pewnych kręgach teoria strun implikuje koncepcję *wiełoświata* i nią się głównie zajmuje, mimo że tworzące wiełoświat „podwszechświaty” podlegają odmiennym prawom fizyki i nie wchodzą w żadne oddziaływania z naszym podwszechświatem, zatem ich istnienie jest dla Metagalaktyki zupełnie obojętne i na odwrót, wiedzy o tych podwszechświatach zawartej w teorii strun nigdy nie zweryfikujemy, jest więc to metafizyka bez transcendencji.

Po drugie, według OTW jest nieskończenie wiele matematycznych wszechświatów, czyli rozwiązań równań pola o cha-

rakterze kosmologicznym, a tylko jeden z nich istnieje fizycznie. Tak samo jest w innych teoriach grawitacji i zapewne tak będzie też w hipotetycznej teorii kwantowej grawitacji. Teoria jest więc ogromnie nadmiarowa, a więc nieadekwatna do rzeczywistości. To jest stara idea: skoro Wszechświat jest jeden, to konieczna jest teoria, która dopuszcza tylko jeden jego stan – ten, który jest realizowany w przyrodzie. Tylko taka teoria będzie adekwatna do tego, co opisuje. Takiej teorii nie ma i najprawdopodobniej nigdy nie będzie. Rzecz w tym, że całe przyrodoznawstwo opiera się na założeniu, że liczba obiektów opisywanych przez jakąkolwiek teorię nie jest z góry ograniczona. Z fizyki jądrowej wynika, że liczba pierwiastków chemicznych mających trwałe izotopy jest ograniczona, natomiast liczba atomów każdego z nich jest nieograniczona. Teoria wszechświatów ma tylko jeden desygnat. Jak budować teorię dla jednego obiektu? Uczni, którzy chcieliby się podjąć tego zadania, musieliby cofnąć się epistemologicznie przed całe nowożytne przyrodoznawstwo, przed Galileusza i zapewne przed Kopernika, czyli zacząć całkowicie od początku, od zera. Można się w tym dopatrzeć dalekiej analogii do teologii, która też ma tylko jeden desygnat – Boga. A jednocześnie poszukiwana teoria Wszechświata musiałaby jakoś nawiązywać do fizyki takiej, jaką teraz znamy. Jest to psychologicznie i intelektualnie niemożliwe. (Warto wspomnieć, że w ostatnich dziesięcioleciach parę razy odzywały się głosy: „kłopoty z teorią unifikującą wszystkie oddziaływania, w tym grawitację, i jednolicie opisującą całą materię biorą się stąd, że fizyka poszła w niewłaściwą stronę. Trzeba fizykę

zbudować na nowo od podstaw”. Oczywiście takie próby szybko kończyły się niepowodzeniem).

Wnioskujemy stąd, że osiągnęliśmy granicę stosowalności metody naukowej w fizyce: traktuje ona Wszechświat jak inne obiekty fizyczne, tymczasem on jest jedyny.

5. Kłopoty kosmologii fizycznej

W poprzednim rozdziale zobaczyliśmy, że kosmologia generuje fundamentalne problemy epistemologiczne. Kosmologowie (fizycy i astronomowie) przechodzą nad nimi do porządku dziennego stosując wspomnianą na początku poprzedniego rozdziału metodologiczną zasadę „problem dostrzegamy wtedy, gdy dysponujemy narzędziami do rozwiązania go” i badają Wszechświat jak każdy inny obiekt astronomiczny (bierne obserwacje dominują nad czynnym eksperymentem). Jednak ta minimalistyczna, pozytywistyczna postawa nie chroni przed kolejnym ciągiem problemów poznawczych, w odróżnieniu od tamtych wymagających pilnego rozwiązania.

Z założenia opisujemy geometrię Wszechświata pewnym matematycznym modelem kosmologicznym, czyli obserwacyjnie umotywowanym ścisłym (w sensie podanym poprzednio) rozwiązaniem równań Einsteina i w czasoprzestrzeni tego modelu stosujemy (na tyle prawomocnie, na ile potrafimy) wiarygodne prawa fizyki (przede wszystkim dotyczące cząstek elementarnych) i wyciągamy najdalej idące ich konsekwencje.

Okazuje się, że konstruowanie w ten sposób opisu Wszechświata wymaga wprowadzenia nowej fizyki motywowanej tylko tym celem. Poszukiwania tej nowej fizyki idą w dwu głównych kierunkach.

Problem ciemnej materii

Obserwacje ruchów wirowych wielu galaktyk spiralnych wskazują, że ich całkowita masa jest blisko 10 razy większa od sumarycznej masy wszystkich gwiazd (czyli tego, co świeci). Większość tej niewidocznej materii nie może tworzyć obiektów znanych astronomii Układu Słonecznego i obszarów pobliskich: planet i planetoid, obłoków gazu i pyłu oraz skolapsowanych gwiazd. W tym niewidocznym składniku galaktyk dominuje *ciemna materia*², która nie jest zbudowana z nukleonów. Co więcej, ta ciemna materia winna występować nie tylko w obrębie galaktyk. Od kilkudziesięciu lat wiadomo, że gromady galaktyk nie są obiektami związanymi grawitacyjnie, jeżeli masy ich galaktyk są równe sumarycznej masie ich gwiazd. Innymi słowy, gromada takich „lekkich” galaktyk ma całkowitą energię dodatnią, zatem jest przypadkowym skupiskiem tych galaktyk, które przypadkowo spotkały się i za jakiś czas (mierzony w miliardach lat) rozbiegną się, każda w swoją stronę. Gromad jest jednak zbyt wiele i są zbyt wyraźne, by przypuszczać, że są

² Ta nazwa jest kalką z języka angielskiego (*dark matter*). Zgodnie z tradycją polskiej terminologii naukowej winno być *materia ciemna*.

przygodnymi zagęszczeniami roju galaktyk. Gromady stają się grawitacyjnie związane (ujemna energia grawitacyjna oddziaływań między nimi przeważa nad energią kinetyczną), jeżeli mają odpowiednio większą masę. Ciemna materia w galaktykach poprawia sytuację, lecz to jeszcze nie wystarczy, masa całej gromady musi być ok. pięć razy większa od sumy mas galaktyk z ciemną materią. Przypuszcza się dość powszechnie, że tę brakującą masę stanowi gaz ciemnej materii wypełniający obszar całej gromady pomiędzy galaktykami, jest więc go dużo więcej niż w samych galaktykach.

Kosmologowie przyjęli zyczliwie koncepcję ciemnej materii, bowiem pomaga ona wyjaśnić jak w pierwotnej jednorodnej plazmie wczesnego Wszechświata powstały gwiazdy i galaktyki. Jeżeli już na tych wczesnych etapach ewolucji istniały obszary zagęszczonej ciemnej materii, to jej siły grawitacyjne ściągały zwykłą materię (nukleony) do tych obszarów i przyspieszały jej kondensację w protogwiazdy.

Ale czym jest ciemna materia? Jedyna sensowna hipoteza głosi, że są to trwałe cząstki z masą spoczynkową, które oddziałują tylko grawitacyjnie i słabo, i które obecnie są nierelatywistyczne. Kłopot w tym, że takie cząstki zupełnie nie pasują do Standardowego Modelu Cząstek: nie ma w nim miejsca dla nich i trzeba go rozszerzyć specjalnie dla ich przyjęcia, co psuje jego spójność. Laboratoryjnie nie mamy jak dotąd żadnego sygnału istnienia takich cząstek.

Hipoteza istnienia ciemnej materii stawia relację fizyki do astronomii w nowej sytuacji. Jedynie u samego zarania nauki

nowożytnej, na początku powstawania fizyki, astronomia ją inspirowała. Galileusz, Kepler i Newton tworzyli podwaliny fizyki ziemskiej opierając się na obserwacjach astronomicznych. Było to w pełni zasadne: zjawiska astronomiczne na ogół przebiegają w układach dobrze izolowanych od otoczenia, zatem zjawiska te nie są zakłócanie przez wpływy zewnętrzne, a pierwsi fizycy nie potrafili izolować w laboratorium badanego obiektu od otoczenia. Gdy fizyka trochę okrzepla, przez następne trzysta lat rozwijała się autonomicznie, bazując na laboratorium, a astronomia była biernym konsumentem jej osiągnięć (mechanika nieba, potem spektroskopia i modele astrofizyczne). Od lat osiemdziesiątych XX wieku astronomia ponownie, teraz poprzez kosmologię, inspirowała fizykę fundamentalną. Inspiracja ta nie ogranicza się do kwestii ciemnej materii. Jak zauważył czterdzieści lat temu Jakow Zeldowicz, Wielki Wybuch był gigantycznym akceleratorem, który wprawdzie działał tylko przez ułamek sekundy, lecz przez tę krótką chwilę przyspieszył cząstki elementarne do energii daleko większych niż ziemskie akceleratory, więc kosmologia ma do zaoferowania fizyce cząstek dużo więcej: ustalenie liczby rodzajów neutrin, górna granica masy fotonu itp.

Problem ciemnej energii

W 1999 r. pojawiło się doniesienie dwu niezależnych grup badawczych, które zatrzęsło (a przynajmniej wydaje się, że zatrzęsło) Standardowym Modelem Kosmologicznym, czyli opisem fizyki Wszechświata w ramach czasoprzestrzennego modelu

Friedmanna. Nie wdając się w omawianie złożonych szczegółów, na co nie ma tu miejsca, można powiedzieć, że obserwacje (obecnie) ponad 500 supernowych typu Ia interpretuje się jako *przyspieszoną* ewolucję (ekspansję) Wszechświata. Według Modelu Standardowego Wszechświat wypełniony jest zwykłą materią (znaną z laboratorium) oraz ciemną materią, a te dwie wywołują *spowalniającą*, a nie przyspieszającą ekspansję przestrzeni. Ostrożnie należy powiedzieć, że obserwacje te są niezgodne z Modelem Standardowym, lecz powód niezgodności nie jest pewny. Nie jest dowiedzione, że jest to skutek akceleracji kosmicznej ekspansji – taka interpretacja może być błędna. Jesienią 2011 roku, po przyznaniu szefom obu grup Nagrody Nobla z fizyki „za odkrycie przyspieszonej ekspansji Wszechświata” pojawiły się głosy poważnych fizyków, że była to nagroda przedwczesna, bowiem coś odkryto, ale nie jest jasne co.

Wyjaśnieniem rozbieżności pomiędzy obserwacjami supernowych typu Ia, a przewidywaniami Standardowego Modelu Kosmologicznego, alternatywnym do przyspieszonej ekspansji kosmicznej, są efekty rozchodzenia się światła w przestrzeni nierównomiernie zakrzywionej wskutek niejednorodnego rozmieszczenia materii. Teza, że ewolucja przyspiesza, opiera się na założeniu, że żyjemy w świecie opisanym płaskim modelem Friedmanna, czyli że ignorujemy niejednorodności materii. Jak duże mogą być skutki tych niejednorodności? Jak mówiłem poprzednio, realny Wszechświat jest opisany ścisłym rozwiązaniem równań Einsteina, ale dla tak skomplikowanych warunków brzegowych i początkowych, że nigdy tego rozwiązania nie

poznamy i zamiast niego posługujemy się rozwiązaniem Friedmanna, które jest przybliżeniem w tym sensie, że jest rozwiązaniem ścisłym dla warunków uproszczonych. Przybliżeniem tego nieznanego rozwiązania lepszym niż model Friedmanna byłoby rozwiązanie otrzymane w wyniku wyśredniowania rzeczywistego rozmieszczenia materii. Ponieważ równania Einsteina są nieliniowe, nie jest jasne jak wykonywać w nich operację średniowania; problem jest tak złożony, że nie mogę nic więcej o nim tu powiedzieć. Dwie grupy badaczy otrzymały sprzeczne wyniki: jedna grupa twierdzi, że istniejące niejednorodności wystarczą, by imitować akcelerację doskonale jednorodnego świata, druga utrzymuje, że te niejednorodności są zbyt małe, by taki efekt uzyskać. Musimy poczekać na rozstrzygnięcie tego sporu.

Dodajmy, że Andrzej Kasiński z Warszawy wykazał, iż w prostym niejednorodnym modelu kosmologicznym, takim jak wszechświat Lemaître'a, niejednorodności materii imitują przyspieszoną ekspansję modelu Friedmanna (Kasiński, 2014).

Jeżeli przybliżenie modelem Friedmanna jest dobre i akceleracja jest efektem rzeczywistym, to możemy ją wyjaśniać na trzy sposoby.

1. Stała kosmologiczna Λ

Jak wiemy, Einstein wprowadził człon kosmologiczny ze stałą Λ do równań pola po to, by uzyskać *statyczny* model Wszechświata i gdy obserwacje jednoznacznie wskazały, że Wszechświat ewoluje, odrzucił ten człon bez żalu. W latach siedemdziesiątych

XX wieku zorientowano się, że powszechnie uznawana za poprawną metoda konstruowania równań pola grawitacyjnego, daje równania Einsteina z tym członem, zatem stała Λ jest uniwersalną stałą przyrody wbudowaną w nasz świat. Jeżeli obserwacje w Układzie Słonecznym i kosmologiczne wskazują – jak wtedy sądzono – że $\Lambda = 0$, to nie wystarczy przyjąć tego do wiadomości, jak Einstein, lecz trzeba uzasadnić z zasad pierwszych dlaczego ta stała znika. Stała kosmologiczna jeła straszyc w samym centrum fizyki. Podejmowane przez ponad dwie dekady przez najwybitniejszych fizyków próby wykazania, że musi być $\Lambda = 0$ zakończyły się fiaskiem. W głośnym artykule przeglądowym Steven Weinberg napisał w 1989 r. „Problem stałej kosmologicznej to najważniejszy problem fizyki fundamentalnej” (Weinberg, 1989). W równaniach Einsteina dodatnia stała kosmologiczna działa jak materia ze stałą gęstością energii i z równym jej (co do modułu) ujemnym ciśnieniem. Dodatkowo ciśnienie dodaje się do gęstości energii i spowalnia rozszerzanie się Wszechświata, natomiast ujemne ciśnienie działa jak siła odpychająca i przyspiesza ekspansję, zatem najprostsze wyjaśnienie pociemnienia setek supernowych w czasoprzestrzeni Friedmanna to istnienie dodatniej stałej kosmologicznej. Na tej podstawie powstał fenomenologiczny *konkordantny model kosmologiczny Λ CDM*, który zakłada istnienie nierelatywistycznej ciemnej materii w galaktykach i ich gromadach oraz odpowiednio dopasowaną stałą kosmologiczną. Model ten dobrze pasuje do wszystkich obserwacji. Potwierdziły go najnowsze obserwacje wykonane przez satelitę Planck Euro-

pejskiej Agencji Przestrzeni Kosmicznej (ESA), który mierzył anizotropię multipolową promieniowania relikтового (CMB), opublikowane w marcu 2013³. Ich konkluzja jest wyraźna:

„To the extremely high accuracy the power spectrum of CMB is compatible with the predictions of the Λ CDM cosmology... There is no strong evidence that the dark energy is anything other than a cosmological constant”. (arXiv:1303.5076) (To ostatnie zdanie ukazuje, że techniczny żargon rozumiany literalnie brzmi śmiesznie).

Model jest fenomenologiczny, tzn. w miarę prosto i spójnie opisuje obserwacje bez wnikania głębiej w naturę fizyczną zachodzących zjawisk. Astronomom to najczęściej wystarcza, natomiast fizykom nie podoba się, że stała kosmologiczna musi być starannie dopasowana. Jeżeli tę dopasowaną wartość Λ przeliczyć na gęstość energii, to dostaje się liczbę co do rzędu wielkości równą gęstości energii materii nukleonowej i ta zbieżność jest zdumiewająca, bowiem pierwsza liczba jest stała, a gęstość energii materii maleje z czasem i obie wielkości winny być całkowicie niezależne. To jest *problem koincydencji*. Jeżeli dwie niezależne wielkości są (w przybliżeniu) równe, to żyjemy w wyróżnionej epoce. Dlaczego? Z tym problemem można od biedy jakoś się uporać, istotniejsza jest inna trudność: należy z zasad pierwszych fizyki wyliczyć tę dopasowaną wartość Λ . Powszechnie uważa się, że w fizyce fundamentalnej mamy

³ Jednocześnie opublikowano 29 obszernych artykułów o pracy tego satelity.

trzy niezależne stałe przyrody: stałą Plancka h , oznaczającą, że wszelka materia ma naturę kwantową, prędkość światła c , bowiem materia jest relatywistyczna oraz stałą Newtona G , bowiem wszelka materia oddziałuje grawitacyjnie. Z nich można zbudować każdą wielkość wymiarową. W przypadku stałej kosmologicznej otrzymuje się z nich liczbę o ponad 120 rzędów wielkości większą od obserwacyjnie dopasowanej wartości Λ ; jak powtarzają wszyscy piszący o tym problemie, jest to trudny do pobicia rekord rozbieżności pomiędzy teorią a doświadczeniem (obserwacją). Co więcej, jeżeli zbudowana w czasoprzestrzeni Minkowskiego kwantowa teoria pola stosuje się też (choć w przybliżeniu) w zakrzywionej czasoprzestrzeni Friedmanna, to istniejące pola kwantowe dają do Λ wkłady dużo większe niż ta wartość dopasowana i w wyliczeniu tej wartości te wkłady muszą się wzajemnie dokładnie kasować. To jest problem *subtelnego zestrojenia*. Wydaje się, że o ile podejmowane do 1999 r. zadanie wykazania z zasad pierwszych, że $\Lambda = 0$ jest skrajnie trudne (i nikt mu nie podołał), to wykazanie po tej dacie, iż Λ ma taką wartość, jaką sugerują obserwacje, jest jeszcze trudniejsze.

2. Ciemna energia

Aby uniknąć problemu koincydencji, a przede wszystkim beznadziejnych prób dokładnego wyliczenia stałej kosmologicznej, wysunięto hipotezę, że wiodącym składnikiem kosmicznej materii, odpowiedzialnym za przyspieszoną ewolucję, jest *ciemna energia* – nowy, *niekorpuskularny* rodzaj materii, która

ewoluuje dynamicznie. Ta hipotetyczna forma materii, zwana też *kwintesencją* nie pasuje do Modelu Standardowego Cząstek jeszcze bardziej niż ciemna materia. W ciągu parunastu lat pojawiło się kilkaset prac zawierających najbardziej fantastyczne hipotezy, takie jak fantomy oraz gaz Czapłygina. Mam wrażenie, iż wielu autorów uznało, że w kosmologii można zrezygnować z twardych rygorów nauk empirycznych i ulecieć w zwiewną krainę ułudy, a jedynym kryterium wartości artykułu jest to, czy da się go opublikować. Z kolei dziwaczne formy dynamicznej ciemnej energii generują dziwaczne osobliwości końca Wszechświata.

W ten sposób 95% materii Wszechświata stanowi ciemna energia (dominuje) oraz ciemna materia; zaledwie 5% to zwykła materia zbudowana z nukleonów i elektronów. Te dwie egzotyczne formy materii sugerują swoje istnienie wyłącznie poprzez kosmologię, bowiem fizyka laboratoryjna (doświadczenie i teoria) ich nie potrzebuje i są dla niej nader kłopotliwe. Zwłaszcza ciemna energia opiera się na wątej bazie niejednoznacznej interpretacji obserwacji supernowych Ia.

3. Modyfikacje ogólnej teorii względności

Najmniej popularna, lecz również reprezentowana przez kilkaset publikacji, jest modyfikacja dynamiki OTW. Odrzucamy ideę, że akceleracja Wszechświata jest skutkiem odpychającej grawitacji ciemnej energii i przypuszczamy, że jest ona wynikiem zmienionej dynamiki grawitacji zwykłej materii (i materii ciemnej). Taka hipoteza jest możliwa, bowiem fizyka zjawisk

grawitacyjnych jest jedynym działem fizyki, w którym jest nie- skończona liczba teorii, znanych i potencjalnych. Ta wyjątko- wość bierze się stąd, iż zakres eksperymentów, jakie możemy wykonywać z grawitacją, jest wbrew pozorom nader wąski, za- kres obserwacji (astronomicznych) jest nieco szerszy, lecz też bardzo skromny; by to sobie uświadomić, wystarczy porównać to ze zbiorem zjawisk elektromagnetycznych, jakie potrafimy wytwarzać i w pełni kontrolować. W rezultacie ten ubogi ze- staw danych empirycznych można opisać za pomocą wielu teo- rii. Sytuacja jest dość paradoksalna, bowiem zjawiska grawi- tacyjne opisuje ogólna teoria względności, którą Lew Landau uznał za „najpiękniejszą teorię fizyki” i która bez wątpienia jest najwspanialszym dziełem intelektu ludzkiego. Rzecz w tym, że teoria ta jest podatna na rozmaite modyfikacje. Jest kanoniczna, czyli jest najprostsza w swojej konceptualnej i matematycznej wyrafinowanej złożoności (i niczego z niej odjąć nie można), a przez to daje się obudowywać przeróżnymi dodatkami i kom- plikacjami, które psują jej niezwykle piękno i które można sku- tecznie wyeliminować tylko przez porównanie z ekspery- mentem – a tego brakuje.

Pierwszą modyfikację zaproponował już w 1918 r. wybitny matematyk Hermann Weyl, a potem innym poszło gładko. Kom- plikacje idą we wszystkich możliwych do wyobrażenia kierun- kach i zawsze – bez wyjątku – są to „wariacje na temat OTW”, bez teorii Einsteina żadna jej konkurentka nie powstałaby. We wszystkich dostępnych eksperymentach i obserwacjach OTW wypada najlepiej, lecz to za mało, by pozostać jedyną. Sytuację

komplikuje fakt, że ubóstwo danych empirycznych powoduje, iż interpretacja fizyczna wielu alternatywnych teorii grawitacji jest niejednoznaczna i nie można ich w oparciu o te dane sfałsyfikować. Z drugiej strony, w tym nieskończonym zbiorze teorii grawitacji OTW jest wyróżniona nie tylko historycznie i nie tylko swoją kanoniczną prostotą; rzecz jest bardzo skomplikowana i nie mogę nic więcej tutaj powiedzieć⁴.

Powstaje naturalne pytanie: po co odwoływać się do alternatywnych teorii grawitacji z ich słabościami i cieszyć się, że niektóre z nich dają pojedyncze rozwiązania (które mogą być wyjątkowe, a zatem niestabilne) imitujące przyspieszoną ewolucję Wszechświata, zamiast założyć, że akceleracja jest sterowana w ramach OTW jakąś nieznaną formą materii (np. ciemną energią)? Rzec w tym, że o materii eksperymentalnie wiemy dużo, a ciemna energia musi być egzotycznym polem klasycznym, nie pasującym do Modelu Standardowego Cząstek i łamiącym fundamentalny dogmat współczesnej fizyki głoszący, iż wszelkie pola materii są skwantowane. Pole grawitacyjne jest klasyczne i nie jest jasne, czy należy je kwantować, jest niezależne od Modelu Standardowego i znamy je empirycznie na tyle słabo, że dopuszczamy rozważanie teorii alternatywnych do OTW. Alternatywna teoria grawitacji jest dla fizyki ideą bardziej konserwatywną niż ciemna energia. W tej chwili kosmologia jest głównym odbiorcą alternatywnych teorii grawitacji.

⁴ Czytelnika bardziej zainteresowanego odsyłam do dwu spośród moich prac na ten temat (Magnano i Sokołowski, 1994; Sokołowski, 2007).

6. Problem początku Wszechświata

Opisane w poprzednim rozdziale kłopoty kosmologii dotyczą opisu Wszechświata takiego, jaki jest dzisiaj: czy jest on wypełniony formą materii nieznaną fizyce laboratoryjnej. Kosmologia ze swej istoty jest opisem nie tylko świata dzisiejszego, lecz jest też *kosmogonią* – historią Wszechświata, obejmującą jego narodziny, jak to przewiduje OTW. Standardowy model Friedmanna głosi, że ewolucja zaczyna się od *początkowej osobliwości czasoprzestrzeni* (Big Bang – Wielki Wybuch). Osobliwość ta jest osobliwością krzywizny: czasoprzestrzeń ma brzeg będący trójwymiarową hiperpowierzchnią, na której krzywizna czasoprzestrzeni jest nieskończona, czyli działają tam nieskończone siły pływowe rozrywające każde, nawet najmniejsze ciało, na kawałki. W osobliwości załamuje się samo pojęcie czasoprzestrzeni, czyli areny, na której rozgrywają się wszystkie zjawiska fizyczne. Z tego powodu model Friedmanna przez kilkadziesiąt lat budził opory fizyków: sądzono, że ta osobliwość jest sztucznym wytworem wysokiej symetrii rozmieszczenia materii; gdyby realistycznie założyć nierównomierne rozmieszczenie materii, to osobliwość zniknie i „na początku” (cokolwiek by to miało znaczyć) materia miała wysoką, lecz skończoną gęstość. Dopiero w latach 1968–70 Stephen Hawking i Roger Penrose udowodnili ciąg twierdzeń o osobliwościach, które można krótko streścić: *czasoprzestrzeń spełniająca fizycznie realistyczne warunki zawiera gdzieś osobliwość*. Osobliwości nie są wytworem wysokiej symetrii, są pospo-

lite, to czasoprzestrzenie bez osobliwości są nietypowe i rzadkie. W osobliwości kończy się regularna czasoprzestrzeń, a tym samym nasza zdolność opisu procesów fizycznych. To, co się dzieje w osobliwości, jest poza naszym zasięgiem. *Osobliwość czasoprzestrzeni stanowi kres poznania naukowego*. OTW jest pierwszą i jak dotąd jedyną teorią naukową, z której wynikają jej własne granice, które stają się nieprzekraczalną granicą nauki jako takiej. Żeby nie było nieporozumień: hydrodynamika i termodynamika fenomenologiczna mają granicę wyznaczoną warunkiem, że dotyczą ciągłej materii w makroskopowej ilości, tak że jej atomistyczna natura jest niezauważalna. Lecz granica ta jest na nie nałożona z zewnątrz i teorie te nie wytwarzają jej same z siebie, tzn. nie wynika z nich, że mikroskopowe porcje materii mają naturę korpuskularną i kwantową. Podobnie, teorie nierelatywistyczne są wewnętrznie spójne dla dowolnie dużych prędkości i nie sugerują potrzeby modyfikacji przy relatywistycznych prędkościach. Istnienie osobliwości czasoprzestrzeni nie jest postulowane poza OTW, lecz jest wynikiem jej dynamiki.

Oprócz samej osobliwości, niedostępnej poznaniu, mamy problemy z procesami, które zachodziły tuż po Wielkim Wybuchu. Przedstawiam je kolejno cofając się w czasie.

1. Era Wielkiej Unifikacji

Była krótka, przypuszcza się, że zaczęła się około 10^{-42} s po Wielkim Wybuchu i trwała do około 10^{-34} s po nim. W tej erze zapewne obowiązywały hipotetyczne teorie Wielkiej Unifikacji (GUT) oddziaływań fundamentalnych (bez grawitacji). Przypuszczalnie zaszły wtedy dwa ważne procesy: *bariogeneza* i *inflacja*. Bariogeneza to proces, w którym powstało więcej materii niż antymaterii. Materia i antymateria mają symetryczne własności i gdyby we wczesnym Wszechświecie powstały w dokładnie równych ilościach, to potem zanihilowałyby się bez reszty w promieniowanie i dzisiaj Wszechświat składałby się tylko z fotonów, nie byłoby gwiazd i planet. Tu interesuje nas inflacja kosmiczna.

Przypuszcza się, że w tej erze miała miejsce *epoka inflacyjna: krótki okres bardzo szybkiego (eksponencjalnego) rozszerzania się Wszechświata*. Pierwotnie (Alan Guth, 1981) inflacja miała tłumaczyć dlaczego Wszechświat jest bardzo szczególny – dlaczego pasuje do niego przestrzennie płaski model Friedmanna, czyli wyjątkowy model w nieskończonym zbiorze czasoprzestrzeni Friedmanna. To się nie udało. Obecnie hipoteza inflacji jest atrakcyjna, bowiem generuje zaburzenia rozmieszczenia materii konieczne do powstania galaktyk. Wiara w to, że inflacja miała miejsce, opiera się na kwantowej teorii pola w czasoprzestrzeni płaskiej. Kłopot w tym, że do dziś nie udało się skonstruować przekonującego modelu kosmicznej inflacji. Zwykle zakłada się, że szybka ekspansja Wszechświata napę-

dzana była energią specyficznego, postulowanego wyłącznie do tego celu, kwantowego *pola inflatonowego*. Podobnie jak ciemna materia i ciemna energia, inflaton nie mieści się w Modelu Standardowym Cząstek i stanowi kolejną hipotetyczną formę materii narzucaną fizyce przez kosmologię. Inflaton, by spełnić swoją rolę, musi mieć specyficzne własności, których nie sposób uzasadnić niezależnie od tego celu. Po przeszło trzydziestu latach intensywnych badań nie udało się skonstruować standardowego modelu ewolucji inflacyjnej, który w przybliżeniu opisywałby postulowane cechy hipotetycznej epoki inflacyjnej. Fundamentalny kłopot tkwi w tym, że model inflacji usiłuje się zbudować w ramach kwantowej teorii pola poza wiarygodnym zakresem jej stosowalności. Kwantowa teoria pola dobrze działa w czasoprzestrzeni Minkowskiego. W erze Wielkiej Unifikacji krzywizna czasoprzestrzeni była duża, niestety stworzenie kwantowej teorii pola w silnych polach grawitacyjnych napotkało zasadnicze problemy conceptualne i teoria ta pozostała w załączku. W rezultacie dynamikę kwantowego dylatonu rozpatruje się faktycznie w płaskiej czasoprzestrzeni wierząc, że silna krzywizna nie wprowadza istotnych zmian jakościowych. Ponieważ nie potrafimy wytwarzać silnych i szybko zmiennych pól grawitacyjnych, wiara ta jest i jeszcze długo będzie niefalsyfikowalna. Zapewne z tego powodu wiara w to, że epoka inflacyjna miała miejsce, jest dość rozpowszechniona i tylko nieliczni ją kwestionują.

W trakcie redagowania tego artykułu historia dopisała nowy rozdział badań inflacji. W marcu 2014 roku zespół badawczy

BICEP2 ogłosił wyniki badań polaryzacji promieniowania relikowego wskazujące na istnienie pierwotnych fal grawitacyjnych, które powstały pod koniec epoki inflacyjnej, gdy pole inflatonowe rozpadało się na zwykłe cząstki elementarne. Sukces był podwójny: w promieniowaniu relikowym „zobaczono” fale grawitacyjne (których ziemskie laboratoria od dziesięcioleci bezskutecznie poszukują), a ich obecność potwierdziła istnienie kosmicznej inflacji. Dwa miesiące później inny zespół amerykański przeanalizował te obserwacje i uznał, że rzekomy ślad fal grawitacyjnych w promieniowaniu relikowym znacznie prościej jest wyjaśnić procesami fizycznymi zachodzącymi w Drodze Mlecznej. Na ostateczne rozstrzygnięcie, czy grupa BICEPa2 odkryła coś ważnego, czy też popełniła fatalną dla siebie pomyłkę, trzeba będzie poczekać kilka miesięcy; w każdym razie zarzuty wobec interpretacji „inflacja i fale grawitacyjne” są na tyle mocne, iż stanowczy głos zabrał Paul Steinhardt, jeden z autorów tzw. „nowego modelu inflacyjnego” (1982). Cytuję:

„Niektórzy zwolennicy teorii inflacji kosmicznej, którzy świętowali odkrycie BICEPa2, nadal twierdzą, że teoria ta jest słuszna niezależnie od tego, czy pierwotne fale grawitacyjne zostały wykryte, czy nie... Ich uzasadnienie jest alarmujące: koncepcja inflacji jest tak giętka, że jest odporna na wszelkie testy eksperymentalne i obserwacyjne. Po pierwsze dlatego, że inflacja jest napędzana hipotetycznym polem inflatonowym, któremu można przypisać takie własności, by pasowały do każdego wyniku empirycznego. Po drugie dlatego, że inflacja nie kończy się

wytworzeniem jednolitego wszechświata, lecz w nieunikniony sposób prowadzi do wieloświata (*multiverse*) złożonego z nieskończonej liczby pęcherzyków (podwszechświatów), z których każdy ma inne własności fizyczne i kosmologiczne. To, co obserwujemy, stanowi tylko fragment jednego pęcherzyka w całym wieloświecie. Gdy się przebiega wszystkie te pęcherzyki, to wszystko, co może zdarzyć się fizycznie, faktycznie zdarza się w nieskończenie wielu pęcherzykach. Żaden eksperyment nie może wykluczyć teorii, która dopuszcza wszystkie możliwe wyniki... Jasno widać, że paradygmat inflacyjny jest fundamentalnie nieweryfikowalny, a zatem naukowo bezwartościowy” (Steinhardt, 2014, s. 9).

Dla jasności warto dodać, że Steinhardt po latach pracy nad modelem inflacyjnym zmienił radykalnie poglądy i ta porażka tego modelu jest mu na rękę, jednak jego zarzuty pozostają w mocy niezależnie od jego przekonań naukowych⁵.

⁵ Uwaga dodana w korekcie. Na przełomie 2014 i 2015 roku podejrzenia wielu badaczy okazały się słuszne. Nieznaczną polaryzację promieniowania relikтового nie trzeba wyjaśniać działaniem pierwotnych fal grawitacyjnych powstałych w epoce inflacyjnej, znacznie prościej wyjaśnia się ją procesami astrofizycznymi w Drodze Mlecznej. Nie po raz pierwszy i zapewne nie po raz ostatni ważne odkrycie w astronomii pozagalaktycznej okazuje się wytworem błędów systematycznych w obserwacjach lub nadinterpretacji obserwacji.

2. Era kwantowej grawitacji

Jeżeli Wszechświat wyłonił się z pierwotnej osobliwości (Wielkiego Wybuchu), to bezpośrednio potem energia i gęstość materii były dowolnie duże (praktycznie nieskończone), a wówczas nie obowiązywały znane nam prawa fizyki, lecz dominowały zjawiska hipotetycznej kwantowej grawitacji (QG). Pogląd ten opiera się na dwu hipotezach:

- 1) ponieważ grawitacja jest uniwersalnym oddziaływaniem wszelkiej materii i materia ma naturę kwantową, to również *grawitacja ma naturę kwantową*,
- 2) zjawiska QG są istotne dla cząstek elementarnych mających energie rzędu 10^{19}GeV i odległych od siebie o 10^{-33}cm , a to było możliwe tuż po Wielkim Wybuchu.

Druga hipoteza wywodzi się z fundamentalnej roli przypisywanej tzw. skali Plancka, zbudowanej z uniwersalnych stałych przyrody, \hbar , c i G , która do znanej nam fizyki zupełnie nie pasuje. Pierwsza hipoteza brzmi bardzo przekonująco i jest szeroko akceptowana, chociaż ostatnio są badacze kwestionujący ją (zwolennicy *emergentnej koncepcji grawitacji*).

Myśl, że oddziaływanie grawitacyjne ma naturę kwantową, podobnie jak elektromagnetyczne, pierwszy wyraził Einstein w 1918 r., w latach trzydziestych podjął ją Mark Bronsztejn w ZSRR (zamordowany na rozkaz Stalina), a pod koniec lat czterdziestych systematyczne badania w tym kierunku roz-

począł Paul Dirac. W ślad za nimi poszli niemal wszyscy najwybitniejsi fizycy zajmujący się oddziaływaniami fundamentalnymi. Bez cienia przesady można stwierdzić, że skonstruowanie kwantowej teorii grawitacji (zwanej krócej „kwantową grawitacją”) jest najbardziej ambitnym i najtrudniejszym zadaniem naukowym w dziejach ludzkości. Po prawie 70 latach wysiłków dużej grupy wielkich umysłów wyniki są mizerne, teoria ta w najlepszym razie jest w stadium załączkowym. Niepowodzenie to ma dwie przyczyny. Po pierwsze, nie znamy empirycznie żadnych zjawisk QG, nie mamy pojęcia na czym się oprzeć i czego się spodziewać, nie mamy więc żadnego zasadnego punktu startowego. Dla porównania: po opracowaniu szczególnej teorii względności Einstein uznał, że skoro zjawiska elektromagnetyczne mają naturę relatywistyczną, to podobnie musi być z grawitacją. Nie znał zjawisk, w których hipotetyczna relatywistyczna teoria grawitacji prowadzi do odstępstw od prawa powszechnego ciężenia, zwrócił natomiast uwagę na powszechnie znany i w fizyce nierelatywistycznej zupełnie przygodny fakt równości masy bezwładnej i ładunku grawitacyjnego wszystkich ciał. Niczym analogicznym przy konstrukcji teorii QG nie dysponujemy. Po drugie, przy formułowaniu tej teorii napotykamy olbrzymie, właściwie nie do pokonania, trudności konceptualne. Nie mogę ich tu omawiać, powiem tylko, że jeżeli teoria ta powstanie, to w niczym nie będzie przypominać elektrodynamiki kwantowej.

Dochodzimy do pesymistycznego wniosku: jeżeli druga hipoteza jest prawdziwa i zjawiska QG występują tylko w pobliżu

osobliwości krzywizny czasoprzestrzeni (Wielkiego Wybuchu oraz czarnych dziur) i nie dają bezpośrednich konsekwencji w obrębie dostępnych nam (obecnie) zjawisk, to zjawisk tych nigdy nie wytworzymy w laboratorium i nigdy nie sprawdzimy poprawności teorii, której tak usilnie poszukujemy. Skoro o nieznannej jeszcze teorii kwantowej grawitacji mamy wiedzę negatywną – że nie będzie bezpośrednio weryfikowalna, a tylko poprzez dalekie konsekwencje niesprzeczna z pozostałą fizyką – to czy wysiłki na jej skonstruowanie mają sens?

Powyższe pytanie sygnalizuje szerszy i fundamentalny problem: jaki jest status poznawczy teorii naukowej? Na stawiany często przez ludzi spoza środowiska naukowego zarzut, że teoria to tylko spekulacja umysłowa, zwykle oderwana od rzeczywistości, pewien myśliciel stwierdził, iż „nie ma nic lepszego i praktyczniejszego od dobrej teorii”. W naukach przyrodniczych, zwłaszcza w fizyce, teoria wyraża w niewielkiej liczbie twierdzeń (zatem dających się ogarnąć umysłem) wiedzę o skończonej liczbie znanych faktów i o nieskończonej liczbie faktów (zdarzeń) potencjalnych. Mówiąc językiem komputerowym: teoria to plik spakowany nieskończenie gęsto. Użyteczność teorii dotyczy przede wszystkim faktów potencjalnych, które – gdy o ich potencjalnym istnieniu dowiemy się z tej teorii – są nam dostępne empirycznie; w ten sposób teoria generuje technikę. Kładę nacisk na dostępność empiryczną, przynajmniej w zasadzie, tego nieskończonego zbioru faktów opisywanego teorią; bez niej teoria staje się w najlepszym razie katalogiem faktów znanych. Jeżeli zjawiska kwantowej grawitacji nigdy nie

będą nam dostępne empirycznie, to teoria QG będzie radykalnie różnić się rangą poznawczą od pozostałych teorii fizyki; nawet jeżeli wprowadzi systematyczny porządek do cząstek materii i ich oddziaływań, to jako swoisty „katalog” będzie zawsze konwencją podatną na zakwestionowanie.

Aby jaśniej omawiać ten i podobne problemy generowane głównie przez kosmologię, autorzy wspomnianego już nowego podręcznika kosmologii relatywistycznej (Ellis, Maartens i MacCallum, 2012) wprowadzili pojęcie *Horyzontu Fizyki*: *jest to koncepcja metodologiczna, która oddziela tę wiedzę fizyczną, którą zdobywamy i testujemy w laboratoriach ziemskich i kosmicznych, od spekulatywnej wiedzy teoretycznej, której nigdy nie sprawdzimy bezpośrednio w laboratoriach*. Sens tego rozróżnienia ilustruje przykład. Wyobraźmy sobie, że z jakichś powodów nie jesteśmy w stanie wykonać żadnych eksperymentów, w których ujawniają się efekty relatywistyczne: nie wykonujemy pomiarów typu eksperymentu Michelsona-Morleya, nie mierzymy energii relatywistycznych elektronów, nie mamy systemu GPS itd. Mamy natomiast mechanikę kwantową i Einstein formułuje szczególną teorię względności i wykazuje, że w połączeniu z teorią kwantów przewiduje ona istnienie antycząstek i znajdujemy pozyton. Czy to wystarczyłoby, żebyśmy uwierzyli w słuszność STW? *Horyzont Fizyki ogranicza naszą znajomość praw fizyki rządzących wczesną ewolucją Wszechświata*. Możemy jedynie badać konsekwencje hipotetycznych praw obowiązujących w erze kwantowej grawitacji i (przypuszczalnie) w erze Wielkiej Unifikacji i poszukiwać śladów tych konsekwencji w dzisiejszym świecie.

Zajrzyjmy za Horyzont Fizyki, by zorientować się, jakie interesujące pytania możemy postawić, na które obecnie odpowiedzi nie znamy i wątpliwe, byśmy kiedykolwiek mieli je poznać.

Istnienie pierwotnej osobliwości wynika z klasycznej (niekwantowej) OTW. Gdy fizycznie interpretujemy tę geometryczną osobliwość, dostajemy Wielki Wybuch, a on sugeruje zjawiska kwantowej grawitacji. Czy efekty QG eliminują samą osobliwość? Nie wiemy.

Czy Wszechświat w ogóle miał początek? Nie wiemy.

Czy proces rozszerzania się Wszechświata jest jednorazowy, jak przewiduje model standardowy Friedmanna, czy powtarza się? Nie wiemy.

Kłopoty z pierwotną osobliwością i z teorią kwantowej grawitacji sprawiły, że powstało wiele spekulatywnych modeli, w których Wszechświat nie miał jednoznacznego początku, lecz wyłonił się z czegoś innego. Wszystkie oparte są nie na sprawdzonych teoriach fizycznych, lecz na wątpliwych hipotezach i spekulatywnych teoriach będących w stanie załączkowym, bez odwołania się do faktów empirycznych, których nie potrafimy wyjaśnić w ramach wiarygodnej fizyki (bo takich faktów nie znamy). Nie mając poparcia ani w faktach, ani w opinii krytycznych ekspertów, autorzy owych modeli usiłują je umocnić propagandowo prezentując je szerokiej publiczności w książkach popularno(pseudo)naukowych.

I wreszcie problem czysto filozoficzny: co jest lepsze – by Wszechświat miał początek, czy wieczne istnienie?

7. Problem warunków początkowych

Na zakończenie trzeba dodać, że za Horyzontem Fizyki znajdują się również warunki początkowe Wszechświata. Niezależnie od tego, czy Wszechświat miał początek (Wielki Wybuch lub coś podobnego), czy powstał z innej formy, pytamy: jakie były jego warunki początkowe na końcu ery Wielkiej Unifikacji? Warunki te były kluczowe, bowiem w ramach sprawdzonej fizyki, na której opiera się Standardowy Model Kosmologiczny (ewentualnie uzupełniony koniecznymi modyfikacjami), określiły przebieg ewolucji wraz ze wszystkimi jego własnościami – to, że jest wielki, stary i przestrzennie (niemal) płaski oraz parametrami (stosunek liczby fotonów promieniowania reliktowego do liczby nukleonów). Niestety te warunki początkowe są ukryte za Horyzontem Fizyki, bowiem nie da się ich zbadać eksperymentalnie, gdyż Wszechświat jest jeden.

Nie ma sensu mówić o „prawach ustalających warunki początkowe dla Wszechświata”, bowiem rzecz dotyczy tylko jednego obiektu całego Wszechświata. W przeciwnym razie wracamy do hipotetycznej teorii całego Wszechświata, która ze swej konstrukcji ma tylko jeden opisywany obiekt i przypisuje mu tylko jeden możliwy stan, a jak mówiłem, teoria taka nie ma szans powstać. W sumie: *fizyka eksperymentalnie weryfikowalna nie może wyjaśnić natury początkowego stanu Wszechświata.*

Na pytanie: dlaczego ewolucja Wszechświata przebiega według specyficznego modelu Friedmanna (lub mu podobnego),

schoro inne procesy ewolucyjne są (chyba?) równie zgodne z prawami fizyki? odpowiedzi nie ma, a jak ktoś ją wymyśli, to nie da się jej sprawdzić empirycznie.

W ostatnim zdaniu dodam, że z punktu widzenia tego, o czym tu mówiłem, teoria strun posługując się kosmologią, wywraca całą fizykę fundamentalną, ale to odrębna kwestia.

Podziękowanie

Autor wyraża wdzięczność Fundacji Johna Templetona za wsparcie finansowe tego artykułu.

Bibliografia

- Bondi, H., 1961. *Cosmology*. 2nd ed. Cambridge: University Press.
- Ellis, G.F.R., 2006. Issues in the Philosophy of Cosmology. W: J. Butterfield, J. Earman, eds., *Handbook in philosophy of physics*, Dordrecht: Elsevier [arXiv:astro-ph/0602280].
- Ellis, G.F.R., Maartens, R., MacCallum, M., 2012. *Relativistic cosmology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hawking, W., Ellis, G.F.R., 1973. *The large scale structure of space-time*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jaroszyński, M., 2005. *Wielka Encyklopedia PWN*, t. 30. Warszawa: PWN.
- Krasiński, A., 2014. Accelerating expansion or inhomogeneity? A comparison of the Λ CDM and Lemaître–Tolman models. *Physical Review D*, 89, 023520 [arXiv:1309.4368].
- Magnano, G., Sokołowski, L.M., 1994. Physical equivalence between Nonlinear Gravity Theories and a general-relativistic

- self-gravitating scalar field. *Physical Review D*, 50, s. 5039–5059 [gr-qc/9312008].
- Sexl, R.U., Urbantke, K., 1983. *Gravitation und Kosmologie*. 2. Aufl. Mannheim: Bibliograf. Inst.
- Sokołowski, L.M., 2007. Metric gravity theories and cosmology: I. Physical interpretation and viability. *Classical and Quantum Gravity*, 24, s. 3391–3411 [gr-qc/0702097].
- Steinhardt, P., 2014. Big Bang blunder bursts the multiverse bubble. *Nature*, 510, 5 June.
- Weinberg, S., 1989. The cosmological constant problem. *Reviews of Modern Physics*, 61, s. 1–23.

Słabe łamanie ergodyczności vs. determinizm

Andrzej Fuliński

Polska Akademia Umiejętności

Instytut Fizyki UJ

Weak ergodicity breaking vs. determinism of physical processes

Abstract

All physical processes are deterministic *de iure*. Physicists speak about different types of determinism of physical processes, depending on the degree with which their course can be anticipated. Usually, the course of ergodic processes can be predicted with less certainty than the non-ergodic ones, the latter being integrable.

Recent measurements of motions of single particles in composite systems, especially in living biological cells, show that such motions are, in most cases, breaking the Boltzmann's ergodic hypothesis. On the other hand, their trajectories are random, i.e., one cannot know *a priori* where the particle will be even in near future. This leads to conclusion that many existing in nature processes are nonergodic but not integrable, therefore predictable only in the mean, representing still other type of determinism.

Boltzmann hypothesis, ergodic theory, deterministic chaos, Brownian motion, anomalous diffusion, single-particle trajectory

Ergodyczność

Tak zwaną hipotezę ergodyczną wprowadził Boltzmann dla uzasadnienia termodynamiki poprzez mechanikę (dokładniej, poprzez równanie Boltzmann'a i twierdzenie H). Hipoteza ta jest uważana za podstawę mechaniki statystycznej i orzeka, że średniowanie stanu układu wzdłuż jego trajektorii w przestrzeni fazowej (średniowanie po czasie – równoważność rzeczywistego pomiaru) może być zastąpione przez średniowanie po odpowiednim zespole statystycznym¹:

$$\langle f[X(t)] \rangle_t = \langle f[X(t)] \rangle_{\text{ens}} . \quad (1)$$

Zaletą takiego sformułowania jest jego prostota: (a) nie wymaga spełnienia dodatkowych warunków, na przykład stacjonarności itp., (b) dla udowodnienia *nieergodyczności* wystarczy

¹ Boltzmann *de facto* używał średniowania po tak zwanej przestrzeni fazowej μ , czyli przestrzeni jedno-cząstkowej (trajektorie będące rozwiązaniami równań ruchu pojedynczych cząstek, np. równania Boltzmann'a), nie, jak się to robi w obecnej formalnej teorii ergodycznej, w tak zwanej przestrzeni γ , czyli przestrzeni opisującej cały makroskopowy układ (trajektorie będące rozwiązaniami równania Liouville'a).

złamanie równości (1) dla jednej obserwabli, (c) z punktu widzenia pomiaru jest to definicja operacyjna. Wadą jest to, że dla udowodnienia *ergodyczności* układu lub procesu konieczne byłoby wykazanie równości (1) dla *wszystkich* obserwabli $f[X(t)]$ układu dynamicznego (procesu) $X(t)$, co jest praktycznie niewykonalne. Nie da się zatem osiągnąć głównego celu Boltzmann – użycia metod statystycznych do opisu własności układów makroskopowych, w szczególności dla uzasadnienia zgodności termodynamiki z mechaniką.

Ponadto przy dokładniejszej analizie formalnej hipotezy ergodycznej (m.in. własności trajektorii układów dynamicznych w przestrzeni fazowej) okazuje się, że sformułowanie Boltzmann zawiera również inne wady. Spowodowało to powstanie całej nowej gałęzi fizyki matematycznej – teorii ergodycznej². Należy jednak wspomnieć, że warunki formalne wymagane dla stosowalności kolejnych twierdzeń teorii ergodycznej są spełnione tylko dla wąskiej klasy układów dynamicznych. Z kolei znana klasa układów na pewno nieergodycznych jest także wąska. Pozostaje cała obszerna klasa układów dynamicznych, o których nie można na pewno orzec, że są ergodyczne lub nieergodyczne.

² Kilka elementarnych informacji o współczesnej teorii ergodycznej i parę podstawowych twierdzeń jest podanych w „Dodatku” na końcu tego tekstu.

Anomalny ruch Browna

Do niedawna fizycy nie poświęcali wiele uwagi problemowi ergodyczności, tym bardziej, że zarówno termodynamika (zwłaszcza równowagowa) jak i fizyka statystyczna dobrze opisywały wszystkie obserwowane (w odpowiednich zakresach stosowności tych teorii) zjawiska fizyczne. Przyjmowano zatem, że dla układów makroskopowych hipoteza ergodyczna jest prawdziwa, nawet wtedy, gdy nie były spełnione wszystkie warunki formalne wymagane przez ogólną teorię. Dopiero z początkiem obecnego wieku pojawiły się przypuszczenia teoretyczne, związane z zaobserwowanym zjawiskiem tzw. anomalnej dyfuzji, a raczej anomalnego ruchu Browna³, że niektóre takie ruchy mogą nie spełniać warunku (1). Kilka lat temu przypuszczenia te uzyskały potwierdzenie doświadczalne w pomiarach ruchów pojedynczych molekuł wewnątrz żywych komórek i organelli biologicznych. Analiza zmierzonych pojedynczych trajektorii potwierdziła, że w niektórych przypadkach rzeczywiście równość (1) nie jest spełniona, czyli następuje w takich warunkach tak zwane słabe łamanie ergodyczności.

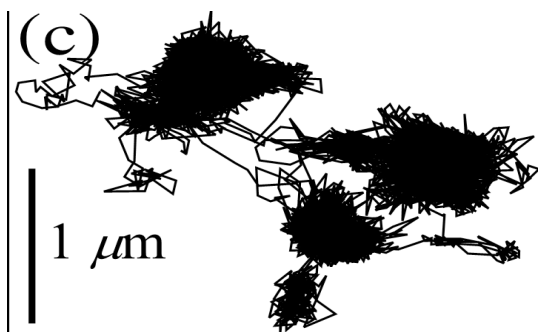
Komentarz: o silnej nieergodyczności mówimy, gdy w przestrzeni fazowej istnieją obszary o niezerowej mierze niedostępne dla trajektorii układu (zob. „Dodatek”), o słabej – gdy (prawie) cała przestrzeń fazowa jest (być może) dostępna dla trajektorii,

³ Dyfuzja makroskopowa to średni efekt ruchów Browna wielu dyfundujących cząsteczek. Dla normalnej dyfuzji średnia wartość $[x(t) - x(0)]^2$ jest proporcjonalna do t , dla anomalnej – do t^a , $0 < a < 2$.

ale zachodzi złamanie równości Boltzmann'a. Obserwowano to dotychczas na trajektoriach pojedynczych cząstek⁴, w procesach dyfuzji (ruchu Browna)⁵. Anomalny ruch Browna był w kilkunastu ostatnich latach obserwowany eksperymentalnie w wielu układach złożonych i/lub nieuporządkowanych: w szklach, komórkach i organellach biologicznych, ruchu cen na giełdach, itd.

Większość takich układów to układy nierównowagowe i niestacjonarne.

Na poniższym rysunku pokazują typowe zachowanie się cząstki w środowisku silnie nieuporządkowanym z „pułapkami”: zarejestrowano tutaj (Wong i in, 2004) 600-sekundową trajektorię cząstki o średnicy 250 nm poruszającą się w splecionej sieci F-aktyny:



⁴ Istnieją w literaturze wcześniejsze przypuszczenia, że słabe łamanie ergodyczności występuje też w szklach (zarówno ceramicznych jak metalicznych i spinowych).

⁵ Dyfuzja: makroskopowo typowy proces termodynamicznie nieodwracalny, mikroskopowo superpozycja ruchów wielu cząstek Browna. Ruch Browna: archetypowy proces stochastyczny – ruch cząstki pod wpływem szumu termicznego.

Widać wyraźnie charakterystyczny ruch błędzący z długimi przeskokami pomiędzy kolejnymi „pułapkami”, wewnątrz których cząstka wykonuje typowy ruch termiczny. Przypuszcza się, że podobny charakter mają ruchy w szklach. Ruch taki, jak wynika z teorii⁶, jest (słabo) nieergodyczny.

Kilka kolejnych przykładów (pominiemy modele teoretyczne i symulacje komputerowe):

1. ruch cząstek polimeru o długości 100–200 nm wstawionych sztucznie do żywych komórek rakowych (Gal i Weihls, 2010);
2. ruch kanału potasowego (białko o średnicy ok. 10 nm) w błonie komórkowej żywej komórki (Weigel et al., 2011);
3. ruch telomerów (długość kilkadziesiąt nm) wewnątrz jądra komórki rakowej (Kepten, Bronshtein i Garini, 2011).

Zaobserwowano, między innymi, że ruch telomerów jest dość silnie nieergodyczny, ruch kanału potasowego – nieergodyczny, ale po podaniu substancji (leków) wpływających na stan błony komórkowej staje się ergodyczny. Dalsze przykłady będą omówione w drugiej części tego tekstu.

⁶ Tzw. CTRW = *continuous time random walk*, jeden z rodzajów ruchu Browna.

Determinizm

Trzeba zacząć od tego, że fizycy przez determinizm rozumieją coś trochę innego niż filozofowie. Stwierdzenie „fizyka jest deterministyczna” lub, gdy się temu dokładniej przyjrzeć, „równania fizyki teoretycznej są deterministyczne” znaczy dla nas tylko tyle (i aż tyle), że rozwiązania tych równań (są to z reguły równania różniczkowe lub całkowe) są jednoznaczne. Innymi słowy, znając stan procesu w danej chwili czasu t_0 , znamy (możemy przepowiedzieć = wyliczyć) wszystkie stany późniejsze⁷, a także (poza procesami termodynamicznymi – ogólniej: zwiężającymi) wcześniejsze. Dla fizyka nie jest to więc *założenie* o naturze świata⁸, lecz tylko spostrzeżenie (stwierdzenie faktu empirycznego) dotyczące własności opisu świata *modo mathematico*. Założeniem jest tu to, że te równania opisują świat wystarczająco poprawnie i wystarczająco dokładnie, by można było na tej podstawie coś przewidywać. Założenie to jest oparte na empirycznym fakcie skutecznej opisywalności świata przez fizykę.

Ze względu na różnice w opisie świata przez kolejne teorie fizyczne można mówić o kilku typach determinizmu fizycznego, o czym pisałem kilkakrotnie w różnych kontekstach (Fuliński, 1993; Fuliński, 2005).

⁷ Równania mechaniki (każdej) zawierają w sobie symetrie, będące odbiciem symetrii obserwowanych w naszym Wszechświecie.

⁸ Jak to podają np. słowniki i encyklopedie filozoficzne.

„Do początku XX wieku najgłębszą znaną strukturą świata była mechanika Newtona. Obraz świata sugerowany przez nią mówi o determinizmie zarówno ontycznym jak i poznawczym: wszystkie zdarzenia tworzą łańcuchy przyczynowo-skutkowe, każde zjawisko jest całkowicie zdeterminowane swymi przyczynami. Znając przyczyny, znamy (możemy przewidzieć) skutki. Sądono, że duże przyczyny wywołują duże skutki, małe – małe skutki. Dlatego sądono również, że jeśli znamy przyczyny z niewielkim błędem, to przewidywania też będą obarczone małym błędem. W takim rozumowaniu ukryte jest założenie, że ruch jest stabilny” (Fuliński, 2005) (zob. niżej).

Jeszcze „silniejszy” determinizm pojawia się w niektórych interpretacjach ogólnej teorii względności (w mechanice relatywistycznej), sugerujących istnienie *świata-bloku*, w którym wszystkie zdarzenia, z naszego punktu widzenia zarówno przeszłe jak i przyszłe, współistnieją „jednocześnie”. Zwolennicy takiej interpretacji naszego świata sądzą, że to tylko nasza świadomość przemieszcza się jednokierunkowo pomiędzy różnymi punktami (tamże).

Mechanika kwantowa jest również deterministyczna. Równanie Schrödingera opisujące zachowanie się funkcji falowej $\psi(t)$, a więc głębszą rzeczywistość kwantową, to też równanie różniczkowe o jednoznacznych rozwiązaniach: zadanie (pomiar) stanu układu (procesu) $\psi(t_0)$ w chwili t_0 jednoznacznie wyznacza całą ewolucję $\psi(t)$ aż do chwili następnego pomiaru (obserwacji). Determinizm probabilistyczny, w *średniej*, pojawia się na poziomie *pomiaru* jakiejś wielkości fizycznej, gdy ze

względu na oddziaływanie układu z „obserwatorem” (urządzeniem pomiarowym) tracimy pełną kontrolę przy *przepowiadaniu wyników pomiaru* obserwabli kwantowych i możemy jedynie określić prawdopodobieństwo określonego wyniku pomiaru.

Termodynamika, która nie zawiera wszystkich symetrii mechaniki (jest to także związane z obserwowanymi własnościami naszego świata), jest deterministyczna tylko w przód w czasie: początkowy stan nierównowagowy determinuje końcowy stan stacjonarny, lecz stan końcowy, będący atraktorem w przestrzeni stanów, nie wyznacza jednoznacznie stanów przeszłych układu. Jest to więc determinizm jednokierunkowy.

Współcześnie zmieniała się też trochę interpretacja determinizmu mechaniki klasycznej ze względu na „odkrycie”⁹ rozwiązań niestabilnych (chaotycznych) równań mechaniki klasycznej. Historia zamkniętego świata rządzonego w pełni przez mechanikę klasyczną pozostaje raz na zawsze ustalona. Nie znaczy to jednak, że byłaby przewidywalna. Do przepowiedzenia zachowania się procesu chaotycznego trzeba by było znać stan początkowy z nieskończenie wielką dokładnością, gdyż początkowo sąsiednie trajektorie chaotyczne rozbiegają się wykładniczo, co powoduje, że błąd przewidywania kolejnych późniejszych (a także wcześniejszych) stanów też rośnie wykładniczo i bardzo szybko przekracza dokładność pomiaru. Podobnie jak w mechanice kwantowej, możemy przewidywać co najwyżej

⁹ O niestabilności trajektorii ruchu trzech ciał wiedział już Poincaré na początku XX wieku.

wyniki średnie. Z tego powodu nie da się przewidzieć na przykład, na podstawie znajomości własności atomów i molekuł chemicznych, jakie struktury biologiczne powstaną z nich w trakcie ewolucji.

Trochę podobna – praktycznie – jest sytuacja w procesach przebiegających w układach wielu ciał, zwłaszcza w procesach termodynamicznych. Musimy się tu uciec do metod statystycznych, tak ze względu na praktyczną niemożność wystarczająco dokładnego obliczenia ruchu wszystkich cząstek, jak i na obecność w trajektoriach poszczególnych cząstek fragmentów o charakterze chaotycznym¹⁰. Ponadto w układach makroskopowych nie interesujemy się – na ogół – wartościami energii, położeń, pędów itd. wszystkich cząstek, wystarcza znajomość parametrów fizycznych określających stan całego układu i/lub jego (makroskopowych) części, a więc odpowiednich wartości średnich. Istotnym problemem jest tu wybór odpowiednich rozkładów, z których oblicza się wartości średnie. W standardowej fizyce i termodynamice statystycznej takimi rozkładami są rozkłady (statystyki) Maxwella-Boltzmann, Bosego-Einsteina i Fermiego-Diraca i – bardziej ogólnie – uniwersalne zespoły statystyczne (zespoły Gibbsa). Metody te pozwalają na przewidywanie przyszłych (lecz nie zawsze przeszłych!) stanów makroskopowych, pomijając natomiast informację mikroskopową jako „nieinteresującą”. Jest to zatem *de facto* determinizm tylko „w średniej”.

¹⁰ Przepuszcza się (ściśle dowodów na razie nie ma), że to właśnie obecność stanów chaotycznych pozwala na zastąpienie szczegółów ruchu wszystkich cząstek przez procesy losowe i wielkości średnie.

Odmianą tej metody jest teoria procesów stochastycznych wprowadzona pierwotnie ponad sto lat temu przez Smoluchowskiego i Langevina dla opisu ruchów Browna. Tutaj oddziaływanie środowiska na badany układ (na przykład pojedynczą cząstkę) zastępuje się odpowiednio dobraną siłą losową. Również taki opis jest *deterministyczny* (jako opis): przy zadanym typie (rozkładzie prawdopodobieństwa) siły losowej możemy przewidzieć wartości średnie procesu (determinizm w średnich), a przy zadanej konkretnej realizacji (ciągu kolejnych wartości) siły całkowicie zdeterminowany jest ciąg wartości pojedynczego procesu (pełny determinizm). Pojawia się jednak pytanie, czy opis taki jest również *realistyczny* – czy uzyskane przewidywania będą zgodne z obserwowaną (mierzoną) rzeczywistością.

Procesy takie jak omawiany w poprzedniej części anomalny ruch Browna (mierzalny, obserwowalny bezpośrednio!) są deterministyczne w takim sensie, jak wszystkie procesy mechaniczne: znając wystarczająco dokładnie własności *całego* układu (poruszająca się cząstka i środowisko, w którym się porusza) w danej chwili czasu, możemy przewidzieć całą trajektorię cząstki. Mamy tu taki sam problem wielu ciał, jak w przejściu do mechaniki statystycznej. Natomiast, jeśli zastąpimy niemożliwie skomplikowany problem ruchu wielu ciał odpowiednią statystyką, w tym przypadku wszystkie oddziaływania cząstki Browna ze środowiskiem przez oddziaływanie jej z siłą losową, to musimy znać rozkład (gęstość) prawdopodobieństwa, z którego losowana jest wartość siły w danej chwili

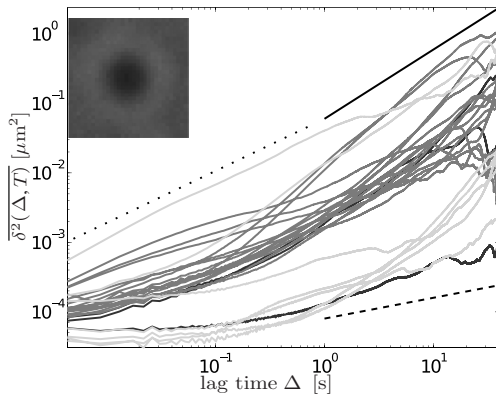
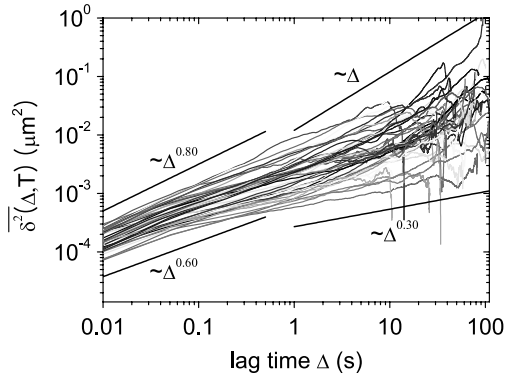
czasu¹¹. Możemy wtedy obliczyć wszystkie wartości średnie, opisujące zbiór takich trajektorii. Jeśli odpowiednio dobraliśmy statystykę wówczas zachowanie się pojedynczej trajektorii nie będzie się wiele różniło od własności średnich. Problem leży w terminie „odpowiednia statystyka”.

W szczególności, w żywych komórkach może być zupełnie inaczej – w układach (i) silnie poza stanem równowagi termodynamicznej, (ii) silnie złożonych i ewentualnie (iii) silnie nieuporządkowanych, lub o stopniu złożoności praktycznie równoważnym nieuporządkowaniu (uporządkowanie celowe typu zbiór organelli, procesów biochemicznych, biofizycznych itd.) nie znamy *a priori* żadnego uniwersalnego sposobu średniowania¹². Co gorsza, w przypadku ruchu (procesu) łamiącego (słabo) ergodyczność, nawet średniowanie *a posteriori*, czyli obliczenie średniej trajektorii, lub wartości charakterystyk uzyskanych ze średniowania po wszystkich zmierzonych lub wyliczonych (symulowanych) trajektoriach, daje wyniki, które nie opisują dobrze pojedynczych trajektorii: kolejne trajektorie (realizacje procesu losowego) zbyt silnie się od siebie różnią.

¹¹ W prostszych przypadkach dostatecznie dobrym przybliżeniem okazuje się tak zwany szum termiczny, czyli rozkład pędów Maxwella = rozkład Gaussa o szerokości wyznaczonej przez temperaturę środowiska.

¹² W takich układach, oprócz szumu termicznego, na ruch cząstek wpływają także zaburzenia – praktycznie losowe – pochodzące od przebiegających sąsiednich procesów.

Poniższe rysunki pokazują średnie wartości dyspersji $[x(t+\Delta) - x(t)]^2$ liczone wzdłuż trajektorii kilkudziesięciu granulek tłuszczu wewnątrzkomórkowego: w komórkach drożdży (Jeon i in., 2011) i w cytoplazmie żywych ludzkich komórek (w lewym górnym rogu obraz mikroskopowy jednej ze śledzonych granulek) (Leijnse i in., 2012):



Wykazano, że w tych procesach następuje złamanie równości Boltzmanna – pokazane na rysunkach średnie wzdłuż trajektorii są inne, niż wartości otrzymane przez średniowanie po wszystkich zmierzonych trajektoriach.

Jak się to ma do determinizmu? Jak powiedzieliśmy wyżej, *de iure* procesy są deterministyczne w tym sensie w jakim deterministyczne są wszystkie procesy (zjawiska, stany) dobrze rekonstruowane przez mechanikę klasyczną. Nie spełniają jednak determinizmu statystycznego, w średnich – realny proces jest źle opisany przez wartości średnie. Jest więc to coś nowego, co zauważyliśmy dopiero teraz, gdy możliwości eksperymentalne (dokładność pomiaru, odpowiednia aparatura) pozwoliły na śledzenie ruchu pojedynczych (co prawda dość dużych) cząstek w środowisku żywych komórek i wewnątrzkomórkowych organelli. Poza tym, są to procesy nieergodyczne. Standardowe procesy nieergodyczne są lepiej przewidywalne niż ergodyczne (zob. „Dodatek”), gdyż są to układy całkowalne (na przykład różne oscylatory). Tutaj mamy przypadek procesów nieergodycznych, które są mniej przewidywalne niż na przykład zwykła ergodyczna dyfuzja dobrze przewidywalna w średnich.

Na zakończenie warto dodać jeszcze jedną uwagę: determinizm, o którym tutaj była mowa, to determinizm opisu świata przez fizykę. Weryfikacja (falsyfikacja) empiryczna równań fizyki teoretycznej, czy to przez pomiar, czy przez obserwację, jest obciążona określonym błędem. Nie można więc zakładać, że rekonstrukcja świata poprzez teorie fizyki zawsze będzie deterministyczna, przynajmniej w takim sensie, jaki znamy dzisiaj. To właśnie próbowałem pokazać na wyżej omawianych przykładach.

Dodatek: teoria ergodyczna i silna ergodyczność

Matematycy to rodzaj Francuzów: mówisz coś do nich, a oni przekładają to na swój język i proszę: robi się z tego coś zupełnie innego (Goethe)

Twierdzenia teorii ergodycznej pozwalają na udowodnienie ergodyczności ciągłego układu dynamicznego bez konieczności udowadniania równości (1) dla każdej obserwabli $f(x)$. Podaję tu kilka definicji i przykładów.

Niech $T: X \rightarrow X$ będzie przekształceniem zachowującym miarę na przestrzeni mierzalnej (X, Σ, μ) , z $\mu(X) = 1$. Wtedy tak zdefiniowane T jest ergodyczne jeśli dla każdego E w Σ z $T^{-1}(E) = E$ albo $\mu(E) = 0$ albo $\mu(E) = 1$.

Ergodyczność ciągłego układu dynamicznego oznacza, że trajektorie tego układu „rozbiegają się” po przestrzeni fazowej. Własność przeciwna do ergodyczności to zupełna całkowalność.

Twierdzenie ergodyczne Birkhoffa (tak zwane silne twierdzenie ergodyczne): jeśli przekształcenie T jest ergodyczne i miara μ jest niezmiennicza, wówczas średnia czasowa jest równa średniej po przestrzeni (fazowej) prawie wszędzie.

Twierdzenie Birkhoffa-Khinchina (punktowe twierdzenie ergodyczne): niech f będzie mierzalne, T ergodyczne i zachowujące miarę. Wówczas, z prawdopodobieństwem 1,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f(T^k x) = E(f).$$

Twierdzenie Khinchina: jeśli

$$R(s) \equiv \langle f(X, t) f(X, t + s) \rangle \rightarrow 0 \text{ dla } s \rightarrow \infty,$$

to $X(t)$ jest ergodyczne.

Komentarz: powyższa definicja (oraz dowód tego twierdzenia) oznacza, że $R(s)$ nie jest funkcją czasu t , czyli, że funkcja autokorelacji $X(t)$ jest stacjonarna.

Twierdzenia tego typu pozwalają na udowodnienie ergodyczności układu dynamicznego bez konieczności udowadniania równości (1) dla każdej obserwabli $f(x)$. Praktycznie szczególnie przydatne jest twierdzenie Khinchina, gdyż względnie łatwo można stwierdzić, czy układ lub proces jest stacjonarny i ma zanikającą funkcją autokorelacyjną.

Udowodniono w ten sposób, między innymi, że ergodyczne (prawie zawsze, z prawdopodobieństwem 1) są w szczególności układy chaotyczne i układy mieszające, przy czym każdy układ *mieszający* jest *chaotyczny*, lecz nie na odwrót.

Podstawową cechą układów chaotycznych jest ich skrajna niestabilność. Trajektorie początkowo bliskie sobie (w przestrzeni fazowej) rozbiegają się wykładniczo, co powoduje, że dowolnie małe zaburzenie będzie szybko i silnie narastać.

Układ dynamiczny nazywamy mieszającym, gdy dla każdej pary A, B , mierzalnych podprzestrzeni w Σ , mamy

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu[(\varphi_t, A) \cap B] = \mu(A)\mu(B)$$

$[\mu(\Sigma) = 1, (\varphi_t, A) - \text{przekształcenie } A \text{ w czasie}]$.

Definicja ta mówi, że po dostatecznie długim czasie ułamek A zawarty w B jest równy ułaskowi (mierze) całego A w V (w przestrzeni fazowej).

Kwantowej wersji teorii ergodycznej nie będziemy tu omawiać, wspomnę tylko, że problemem tym zajmował się już von Neumann (von Neumann, 1929; por. Goldstein, i in., 2010).

Bibliografia

- Fuliński, A., 1993. O chaosie i przypadku, a także o determinizmie, redukcjonizmie i innych grzechach fizyków czyli o zmianach w obrazie świata widzianych okiem jednego z nich. *Znak*, XLV(456(5)), ss. 31–49.
- Fuliński, A., 2005. Determinizmy fizyki vs. wolna wola człowieka. *Nauka*, (1), ss. 67–74.
- Gal, N. i Weihs, D., 2010. Experimental evidence of strong anomalous diffusion in living cells. *Physical Review E*, 81(2), 020903.
- Goldstein, S., Lebowitz, J.L., Tumulka, R. i Zanghi, N., 2010. Long-time behavior of macroscopic quantum systems: commentary accompanying the english translation of John von Neumann's 1929 article on the quantum ergodic theorem. *The European Physical Journal H*, 35(2), ss. 173–200; arXiv: 1003.2129.
- Jeon, J.-H., Tejedor, V., Burov, S., Barkai, E., Selhuber-Unkel, C., Berg-Sørensen, K., Oddershede, L. i Metzler, R., 2011. In vivo

- anomalous diffusion and weak ergodicity breaking of lipid granules. *Physical Review Letters*, 106, 048103.1–048103.4.
- Kepten, E., Bronshtein, I. i Garini, Y., 2011. Ergodicity convergence test suggests telomere motion obeys fractional dynamics. *Physical Review E*, 83(4), 041919.
- Leijnse, N., Jeon, J.-H., Loft, S., Metzler, R. i Oddershede, L.B., 2012. Diffusion inside living human cells. *The European Physical Journal Special Topics*, 204(1), ss. 75–84.
- von Neumann, J., 1929. Beweis des Ergodensatzes und des H-theorems in der neuen Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 57(1–2), ss. 30–70 (tłum ang.: von Neumann, J., 2010. Proof of the ergodic theorem and the H-theorem in quantum mechanics. *The European Physical Journal H*, 35(2), ss. 201–237; arXiv:1003.2133v2).
- Weigel, A.V., Simon, B., Tamkun, M.M. i Krapf, D., 2011. Ergodic and nonergodic processes coexist in the plasma membrane as observed by single-molecule tracking. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(16), ss. 6438–6443.
- Wong, I.Y., Gardel, M.L., Reichman, D.R., Weeks, E.R., Valentine, M.T., Bausch, A.R. i Weitz, D.A., 2004. Anomalous diffusion probes microstructure dynamics of entangled F-actin networks. *Physical Review Letters*, 92(17), 178101.

Pozytywizm, racjonalizm i ... romantyzm Marii Skłodowskiej-Curie

Barbara Petelenz

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk

Marie Skłodowska-Curie and Her Positivism, Rationalism and... Romanticism

Abstract

The International Year of Chemistry (2011), intertwined with commemoration of the Nobel Prize in Chemistry awarded in 1911 to Marie Skłodowska-Curie, made me to ask about the philosophical background of this outstanding woman. The first factor which I could see was the positivism, launched by August Comte in France and developed a few decades later by his Polish followers. Another factor which seemed to me important was the interplay between the emotional (romantic) and intellectual (positivistic) attitudes among the Poles in the 19th century.

In her research, Marie Skłodowska-Curie used the positivistic, rationalistic method. This has led her (jointly with her husband

Pierre Curie) to elucidation of the radiation phenomena discovered by Henri Becquerel in 1896. The research initiated by the Curies (rewarded by the half of the Nobel Prize in Physics 1903) caused a subversion of the 19th century's views on the structure of Matter. The way to such spectacular results must have been paved not only by the positivistic intellectual discipline but also by a dose of romantic enchantment.

In the applicative terms, Marie Skłodowska-Curie became a pioneer of the evidence-based medicine. In moral terms, she represented a rare example of the practical altruism, inspired indirectly by Christianity, and directly by the Comte's "religion of Humanity".

Keywords

Marie Skłodowska-Curie, Nobel Prizes in Physics and Chemistry, Positivism, Rationalism, Idealism, Romanticism.

Wstęp

Z inicjatywy IUPAC i UNESCO rok 2011 jest obchodzony na świecie jako Międzynarodowy Rok Chemii (*Chem. Int.*, 2011), a zarazem jako Rok Marii Skłodowskiej-Curie. Ma to związek z setną rocznicą Nagrody Nobla z Chemii, przyznanej w roku 1911 „Marii Curie, z domu Skłodowskiej, za jej wybitny wkład do rozwoju chemii, którym było *odkrycie polonu i radu*,

wydzielenie metalicznego radu oraz badania nad tym niezwykłym pierwiastkiem". Była to druga Nagroda Nobla, jaką otrzymała Maria Skłodowska-Curie, a stanowiła ona wyraz uznania nie tylko dla pionierskich prac laureatki w stworzonej przez nią nowej dziedzinie chemii, ale też dla jej wkładu w powstanie i rozwój radioterapii nowotworów. Jednakże, z punktu widzenia filozofii nauk przyrodniczych, a także roli samej Marii Skłodowskiej-Curie, ważniejsza była Nagroda Nobla z fizyki, przyznana w roku 1903 trzem osobom: Antoine Henri Becquerelowi za odkrycie promieniotwórczości oraz Pierre'owi i Marii Curie za badania nad tym zjawiskiem. Ważniejsza, bo właśnie to odkrycie i te właśnie prace zapoczątkowały przełom pojęciowy, który zasadniczo zmienił ówczesne rozumienie struktury i własności materii.

Postać Marii Skłodowskiej-Curie, jedynej kobiety wśród zaledwie czworga uczonych dwukrotnie wyróżnionych Nagrodą Nobla¹, jeszcze za życia obrosła legendą. Niestety, większość ludzi interesuje się jej osobistymi losami znacznie bardziej niż przedmiotem jej badań naukowych, a wśród kolejnych opracowań biograficznych, oprócz pozycji wartościowych (Curie,

¹ Inni dwukrotni laureaci to: Linus Pauling – Nagroda Nobla z chemii 1954 i Pokojowa Nagroda Nobla 1962, John Bardeen – Nagroda Nobla z fizyki 1956 (współlaureaci: William Bradford Shockley i Walter Houser Brattain) i Nagroda Nobla z fizyki 1972 (współlaureaci: Leon Neil Cooper i John Robert Schrieffer) oraz Frederick Sanger – Nagroda Nobla z chemii 1958 (indywidualnie) i Nagroda Nobla z chemii 1980 (współlaureaci: Paul Berg i Walter Gilbert). <http://www.nobel-prize.org> (dostęp 2015-09-07)

1972²; Giroud, 1987; Brian, 2006; Quinn, 1997) zdarzają się też dzieła nietrafione, powierzchowne. I oto paradoksalnie: właśnie książka, którą uważam za niedobłą (Goldsmith, 2006)³, spowodowała, że zaczęłam głębiej zastanawiać się nad filozofią Marii Skłodowskiej-Curie – wybitnej uczzonej⁴, a zarazem osoby znanej z heroicznych czynów⁵.

Pytanie o filozofię Marii Skłodowskiej rozumiem jako pytanie, po pierwsze: o zbiór czynników, które mogły kształtować jej etos, po drugie: o metodę jej pracy badawczej, po trzecie zaś: o sposób myślenia, jaki starała się przekazać swoim następcom. W każdym przypadku odpowiedź prowadzi do pozytywizmu, i to w obu jego przyjętych znaczeniach: filozofii nauki, sformułowanej we Francji na początku XIX wieku oraz specyficznego dla Polski porozbiorowej programu społecznego, znanego z literatury końca tego wieku.

² Jeśli nie zaznaczono inaczej, dane biograficzne pochodzą z tego źródła.

³ Książka dość naiwnie feministyczna, nie oddaje ducha epoki w realiach polskich; zawiera błędy rzeczowe w zakresie fizykochemii, a w wersji polskiej także błędy przekładu.

⁴ Miło jest nadmienić, że 21 maja 1909 roku, na wniosek Władysława Natansona, Maria Skłodowska-Curie została powołana przez Polską Akademię Umiejętności na członka czynnego zagranicznego. Za: (Hurwic, 1993).

⁵ Myślę tu o współtworzeniu Instytutu Radowego w Paryżu (od r. 1909) i w Warszawie (od r. 1932) oraz Pracowni Radiologicznej im. Mirosława Kernbauma przy Towarzystwie Naukowym Warszawskim (od r. 1913), a zwłaszcza o stworzeniu i prowadzeniu przyfrontowej służby radiologicznej w czasie I wojny światowej (lata 1914–18).

Pierwotnie tytuł mojego eseju miał brzmieć: *Pozytywizm, racjonalizm i idealizm Marii Skłodowskiej Curie*. Trzeci człon tytułu miał nawiązywać do sformułowań samej Marii, która uważała siebie za idealistkę, mając na myśli bezinteresowną, altruistyczną postawę społeczną oraz dążenie do doskonałości w działaniu⁶. Zdecydowałam się jednak zamienić „idealizm” na „romantyzm”, aby podkreślić, że widzę tu raczej nastawienie ideologiczne i emocjonalne, niż termin filozoficzny, który zresztą jest bardzo wieloznaczny⁷. Nastawienie to, głęboko zakorzenione w mentalności inteligencji polskiej (a więc i rodziny Skłodowskich), związane było z utratą niepodległości kraju pod koniec XVIII wieku oraz wieloletnim wysiłkiem w celu jej

⁶ Te cechy były podstawą ważnych przyjaźni Marii Skłodowskiej-Curie z Marią Rakowską w Warszawie, i z Marie Mattingly („Misy”) Meloney w Ameryce.

⁷ Różne definicje idealizmu:

„kierunek filozoficzny przeciwstawny materializmowi, zarówno w płaszczyźnie ontologicznej, jak i teoriopoznawczej” (WEP, 1962);

„wszystkie kierunki filozoficzne, według których podstawowa rzeczywistość to idee, świadomość, myśl, a świat realny to coś wtórnego, pochodnego” (Krajewski, 1996);

„1) uważa, że świat dostępny poznaniu zmysłowemu jest tylko częścią tego, co rzeczywiście istnieje i zakłada istnienie dostępnych rozumowi (nie zmysłom) bytów niematerialnych: obiektów matematycznych, praw logiki, sensów idealnych; 2) uważa, że istotą bytu jest to, iż stanowi podmiot, który urzeczywistnia się w formie myślącego ja” (Hartman, 2004);

„wszelki pogląd przypisujący rzeczywistości zasadniczo umysłową naturę jako przyczynę nośną” (dalej jeszcze: „idealizm absolutny”; „idealizm transcendentálny”) (Blackburn, 1994).

odzyskania. Ten idealizm/romantyzm stale towarzyszy trzeźwemu pozytywizmowi Marii Skłodowskiej-Curie, którego drugim biegunem zdaje się być jeszcze bardziej trzeźwy racjonalizm – znowu – w jednym (a może i kilku) ze swoich wielu znaczeń⁸. Jednak pozytywizm wyraźnie dominuje, bo także charakterystyczny dla Marii Skłodowskiej-Curie „idealistyczny” i czynny altruizm należy do pozytywizmu, będąc jego głównym wskazaniem moralnym.

Filozofia pozytywistyczna

Na potrzeby eseju streszczam tu filozofię pozytywną, sformułowaną przez Auguste’a Comte’a w pierwszej połowie XIX wieku. Jej założenia to odrzucenie metafizyki i teologii jako narzędzi interpretacyjnych, skupienie zainteresowań na faktach, uznanie postępu za wartość i porządku za jego konieczny wa-

⁸ Różne definicje racjonalizmu

„1) potocznie: przekonanie o sile i możliwościach poznawczych rozumu oraz o konieczności kierowania się nim w życiu.

2) w filozofii: 2.1) kierunek przeciwstawny empiryzmowi, upatrujący w rozumie naczelną źródło poznania i kryterium prawdy, uznający niezależność procesów poznawczych od doświadczenia, za wzór uznaje poznanie naukowe; 2.2) stanowisko przeciwstawne irracjonalizmowi, odmawiające uznania za prawdę treści niezrozumiałych lub arbitralnie podawanych do wierzenia” (WEP, 1962);

„każda filozofia przypisująca samodzielnie działającemu rozumowi dużą rolę w zdobywaniu i uzasadnianiu wiedzy (...) antyklerykalny humanizm przeciwstawiający się autorytetom” (Blackburn, 1994).

runek, oraz słynna klasyfikacja nauk, oddzielająca grupę nauk szczegółowych od grupy nauk abstrakcyjnych i porządkująca te ostatnie według hierarchii: matematyka → astronomia → fizyka → chemia → biologia → socjologia, gdzie stopień złożoności nauki rośnie w kierunku pokazanym przez strzałki, a stopień jej ogólności – w przeciwnym, przy czym wszystkie teorie mają dążyć do ostatecznego celu, jakim jest „nauka o Ludzkości” (Comte, 1993).

Pogląd uznający, że przedmiotem wiedzy są wyłącznie fakty, stał się później podstawą XX-wiecznego neopozytywizmu, którego dwa pozostałe składniki to: empiryzm, uznający doświadczenie za jedyne rzetelne źródło wiedzy o świecie, oraz fizykalizm, sprowadzający całą wiedzę o świecie do pojęć fizyki (Tatarkiewicz, 1995). Warto dodać, że neopozytywizm formułowali ludzie młodszy od Marii Skłodowskiej-Curie niemal o całe pokolenie.

Pozytywizm polski, praca u podstaw i epigoni romantyzmu

Pozytywizm na ziemiach polskich rozwinął się dopiero w drugiej połowie XIX wieku. Zespałał idee A. Comte’a z ideami J.S. Milla i H. Spencera, propagując „empiryczną, trzeźwą postawę wobec życia” (Tatarkiewicz, 1995, s. 176). Obok pozytywizmu jako filozofii, w zaborze rosyjskim powstał też program polityczno-społeczny o tej samej nazwie. Jego istotą była „praca

u podstaw”, czyli tworzenie bazy materialnej i edukacja, uznane za jedyne sensowne sposoby walki o zachowanie tożsamości narodowej. Była to zrozumiała, ostra reakcja na romantyczne lecz utopijne patriotyczne postawy Polaków, które doprowadziły do przegranych powstań rozpoczętych w roku 1830 i 1863.

Urodzona w roku 1867 Maria Skłodowska nie mogła w pozytywizmie nie być zanurzona. Jej rodzice, świątli pedagodzy, należeli do tego samego pokolenia, co twórcy polskiego pozytywizmu i, tak jak oni, mieszkali w Warszawie. Ojciec Marii, nauczyciel matematyki i fizyki, wychowanie młodzieży traktował jak misję, a o rozwój swych wybitnie uzdolnionych dzieci dbał szczególnie. Kulturalną atmosferę jego domu dopełniali bliscy krewni, którzy uprawiali nauki ścisłe i mieli w nich osiągnięcia. Do tych nauk Maria zawsze wykazywała największy talent i zamiłowanie, co jednak nie musi oznaczać, że miniona epoka romantyzmu na wrażliwą dziewczynę wpływu nie miała. Dalsi krewni brali przecież udział w tragicznych powstaniach, a znajomość wielkiej poezji polskiej była jednym z filarów kształtowanej przez dom postawy patriotycznej. Bo polski pozytywizm w swym drugim znaczeniu (tak samo jak romantyzm, od którego się odżegnywał!) uważał patriotyzm za wartość nadrzędną i tylko inne środki uznawał za właściwe do realizacji jego celów. Patriotyzm Marii Skłodowskiej do końca pozostał emocjonalnie gorący, a gdy tylko mogła – również czynny.

Studia Marii Skłodowskiej-Curie

Oprócz uczuć patriotycznych Maria Skłodowska wyniosła z domu rodzinnego rzetelne podstawy wszechstronnego wykształcenia. Nie dość zadowolona z zakresu wiedzy, jaką jej dało gimnazjum, po jego ukończeniu kontynuowała naukę, z konieczności samodzielnie⁹. Mając 20 lat czytała¹⁰ *Fizykę* Daniella (1887), *Socjologię* Spencera¹¹ oraz *Lekcje anatomii i fizjologii* Paula Berta¹², czyli dzieła reprezentujące trzy spośród sześciu nauk uznanych przez Comte'a za podstawowe. Jako czwartą nauką z tego spektrum zajęła się chemią¹³.

Wróciwszy do Warszawy, Maria Skłodowska uczestniczyła w zajęciach organizowanego przez pozytywistów Uniwersytetu Latającego (Hurwic, 1993), zaś miejscem jej studiów

⁹ Z przyczyn materialnych w latach 1886–89 Maria Skłodowska pracowała jako guwernantka w majątku Szczuki na Mazowszu.

¹⁰ Wg listu Marii Skłodowskiej do Henryki Pawlewskiej-Michałowskiej (Kabzińska et al., 1994).

¹¹ Herbert Spencer (czytany przez Marię po francusku). Prawdopodobnie chodzi o: *Introduction à la science sociale* (1884); wcześniejsze pozycje to: *La Sociologie descriptive* (1873), *Principes de sociologie* (1875).

¹² Zapewne chodzi o: *Лекции по зоологии (анатомия и физиология)*, Пер. Л.И. Симонова, Предисл. И.Р. Тарханова, СПб.: И.И. Билибин, 1882 (czytane przez Marię w przekładzie na język rosyjski).

¹³ Biografowie zwykle piszą o okresie po roku 1889. Jedno źródło (Kabzińska et al., 1994, przypis na s. 10) podaje, że w sąsiadującym ze Szczukami Krasińcu, w laboratorium inż. chemika J. Wortmana przy cukrowni, Maria Skłodowska pobrała pierwsze lekcje chemii praktycznej.

indywidualnych stało się Muzeum Przemysłu i Rolnictwa¹⁴, gdzie samodzielnie uczyła się fizyki doświadczalnej, a pod kierunkiem fachowców przeszła systematyczny kurs analizy chemicznej, jakościowej i ilościowej¹⁵. Wreszcie w Paryżu, na Sorbonie, ukończyła wyższe studia fizyczne, a następnie matematyczne – z własnego doświadczenia przekonana o zasadniczej wadze matematyki jako podstawowego narzędzia intelektualnego w naukach ścisłych.

Nauki ścisłe w Europie pod koniec XIX wieku

Druga połowa XIX wieku w Europie to okres dynamicznego rozwoju technicznego i gospodarczego, możliwego dzięki rozwojowi nauk przyrodniczych, zwłaszcza tak użytecznych jak mineralogia czy chemia (Kwiatkowski, 1962). Nauki ścisłe miały już wtedy swoją nowoczesną metodologię. Rozumiano dobrze potrzebę wykonywania dokładnych pomiarów według uniwersalnych wzorców¹⁶, a także tablicowania i systematyzacji przybywających szybko danych. W dziedzinie chemii, klasyfikacja jako metoda

¹⁴ Dyrektorem muzeum był wtedy Józef J. Boguski, kuzyn M. Skłodowskiej, w młodości – asystent D.I. Mendelejewa.

¹⁵ Pod kierunkiem prof. Napoleona Milicera (ucznia Roberta Bunse-
na) i jego asystenta Ludwika Kossakowskiego. Jak później podkreśla-
ła, kurs ten okazał się kluczowy dla jej pracy przy wydzielaniu radu
z rud uranowych.

¹⁶ Pierwszy wzorzec metra został ustanowiony w roku 1791, gram
został zdefiniowany po raz pierwszy w roku 1795, pierwszy między-
narodowy wzorzec kilograma ustanowiono w roku 1889.

okazała się szczególnie płodna od momentu opublikowania układu okresowego, który stał się nie tyle katalogiem znanych ówczesznie¹⁷ pierwiastków, co fundamentalnym (choć początkowo jedynie empirycznym i czasem zawodnym) narzędziem predykcyjnym.

Gdy Dmitrij Mendelejew ogłaszał swoją tablicę, pojęcie pierwiastka chemicznego było ogólnie przyjęte, a rozumiano je jako granicę rozkładu materii na substancje coraz prostsze jakościowo, sprawdzalną empirycznie. Natomiast pojęcie atomu jako granicy ilościowego podziału materii, choć sugerowane od starożytności, było wtedy jeszcze dyskutowane i wcale nie wszyscy je przyjmowali¹⁸. Alfred Daniell, autor wspomnianego *Podręcznika zasad fizyki*, je przyjmował, a nawet szedł dalej. Jako chemiczne argumenty za teorią atomistyczną przytacza on, sformułowane w XVIII wieku przez Antoine'a Lavoisiera, trzy prawa: stosunków stałych, stosunków wielokrotnych i równoważności chemicznej, a spośród argumentów fizycznych wylicza: ściśliwość i „dziurkowatość” materii oraz kinetyczną teorię gazów, przy czym podaje (niezbyt jeszcze dokładne liczbowo) oszacowanie rozmiarów atomów¹⁹. Wcześniej zaś tak komentuje

¹⁷ Mendelejew opublikował układ okresowy w roku 1869. Znano wtedy 64 spośród 90 naturalnie występujących pierwiastków.

¹⁸ Takie pojęcie pierwiastka wprowadził Robert Boyle w roku 1680, a podaną definicję atomu podał John Dalton w roku 1803. Za: (Hurwic, 1993, s. 22).

¹⁹ Z granicy rozciągłości warstwy roztworu mydlanego otrzymuje Daniell grubość warstwy rzędu 10^{-8} mm, czyli 0,01 nm. Przyjęta obecnie wartość dla promienia atomu wodoru wynosi 52,9 pm, a więc warstwa cząsteczek mydła powinna mieć grubość co najmniej 0,15 nm, czyli o rząd wyższą od szacowanej przez Daniella.

ówczesną teorię atomistyczną: „Wedle takiego poglądu, materya składa się z cząsteczek czyli atomów. Żadnego z tych atomów nie możemy podzielić, zapomocą środków, jakimi dzisiaj rozporządzamy, – a podział taki, gdyby stał się możebnym, zmieniłby prawdopodobnie nasze pojęcia o pozornie zasadniczej naturze pewnych własności materyi” (Daniell, 1887, s. 269–279). Przypuszczam, że po takiej lekturze młoda Maria Skłodowska była oswojona i z pojęciem atomu, i z jego ograniczeniami.

Filozofia/metoda pracy badawczej Marii Skłodowskiej-Curie

Pozytywizm w pracy badawczej Marii Skłodowskiej-Curie *zaczyna się od obserwowania faktów*, spośród których selekcjonuje ona te, które uważa za istotne. W pracy doktorskiej ma szczęście móc wybrać badanie zjawiska całkiem nieznanego (promieniotwórczość odkryto rok wcześniej), dzięki czemu zyskuje czas, bo nie musi studiować literatury przedmiotu. Wybrane zjawisko bada *systematycznie*²⁰, cierpliwie i wytrwale.

Zaczyna od ustalenia jego *cech mierzalnych*, którymi są zdolność do jonizacji powietrza i działanie na materiały światłoczułe. Jest bardzo *pragmatyczna*: jako główny przyrząd pomiarowy wykorzystuje aparat dostępny jej za darmo – skon-

²⁰ Tę systematyczność szczególnie podkreśla Józef Hurwic (1998, s. 71–73).

struowany przez jej męża i szwagra elektrometr z wagą piezoelektryczną²¹. Ale wybiera go *celowo*, bo już wie, że do pomiarów promieniotwórczości *metoda elektrometryczna jest bardziej dokładna niż metoda fotograficzna*.

Poszukiwania swe *zaczyna od systematycznego przebadania wszystkich* dostępnych jej minerałów *po to, by wyselekcjonować* te, które samoistnie wysyłają promieniowanie. *Stwierdza*, że są nimi tylko minerały uranu i toru. *Stwierdza*, że różnią się one tym, co dziś nazywamy aktywnością właściwą, czyli natężeniem wysyłanego promieniowania na jednostkę masy. Następnie *zauważa*, że wprawdzie promieniotwórczość związków uranu i toru jest *proporcjonalna* do ich masy, ale aktywność właściwa rudy uranowej jest wyższa niż czystego uranu, który jest dla niej *wzorcem roboczym*. *W celu weryfikacji wzorca* syntetyzuje sól uranu o składzie takim samym, jak w mineralu naturalnym²² i *stwierdza*, że minerał ma aktywność właściwą wyższą niż identyczny związek otrzymany syntetycznie. Kojarząc te fakty *stawia dwie hipotezy*: *że promieniotwórczość jest własnością atomową* pewnych pierwiastków oraz *że kopaliny uranowe muszą zawierać małą domieszkę nieznanego pierwiastka o szczególnie wysokiej aktywności właściwej*. *Nie zna* liczbowej wartości tej wielkości. *Nie zna* też względnej masy atomowej hipotetycznego pierwiastka, a więc *nie wie jeszcze*, które z pustych

²¹ Skonstruowali go Pierre i Jacques Curie. Natężenia prądów mierzonych przez Marię i Pierr'a Curie były rzędu 10^{-12} A.

²² Był to chalkolit (torbernit), minerał zawierający uwodniony fosforan miedziowo-uranylowy: $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot (8-12)\text{H}_2\text{O}$.

miejsc układu Mendelejewa zapęłni on, *jeśli istnieje*. Na podstawie *obserwowanej* promieniotwórczości *zakłada, że istnieje*. *Wierząc, że szuka domieszki, rozpoczyna systematyczną analizę chemiczną* odpadów rudy, z której przemysłowo wylugowano uran²³.

Schemat metody analitycznej można znaleźć w podręczniku Marii Skłodowskiej-Curie (1953), a opis pomiarów w jej pracy doktorskiej (1992). Tok analizy jakościowej zaczynał się od *rozpuszczenia* zubożonej blendy smolistej w kwasie. Otrzymany roztwór Maria *oddzielała* od części nierozpuszczalnej i *porównywała radioaktywność* fazy ciekłej i stałej. Składniki fazy ciekłej *rozdzielała klasycznie*, strącając ich trudnorozpuszczalne sole. Oddzieliwszy każdy z kolejnych osadów, *mierzyła jego promieniotwórczość*. *Stwierdziła, że część substancji radioaktywnej gromadzi się we frakcji siarczkowej, razem z bizmutem, a część we frakcji siarczanowej, razem z barem*. *Wnioskowała, że są to dwa różne pierwiastki*. Nadała im *nazwy*: polon i rad. Na podstawie *analogii* chemicznych zaproponowała miejsce odkrytych pierwiastków w układzie okresowym.

Trzecim etapem badań była *weryfikacja* wyników. W przypadku polonu, zarówno analiza wagowa, jak też analiza widma optycznego, okazały się niewykonalne z powodu zbyt małej ilości substancji. Natomiast, metodą sublimacji, udało się oddzielić siarczek polonu od siarczku bizmutu, co potwierdziły pomiary radiometryczne. W przypadku radu, pierwsze badania

²³ Związków uranu używano wtedy do barwienia szkła.

spektralne ujawniły jedną słabą, nieznaną dotąd, linię emisyjną. *W celu* dokładniejszego zbadania widma radu, Maria Skłodowska-Curie zagęszczała śladowe ilości jego soli metodą krystalizacji frakcjonowanej, oddzielając ją przy tym od soli baru, wymieniwszy przedtem anion siarczanowy na chlorkowy. Wydzielenie około 0,1 g czystego chlorku radu umożliwiło wiarygodną analizę spektralną oraz ilościową analizę wagową. Przez *porównanie z wzorcem* – chemicznie równoważną masą chlorku srebra – Maria Skłodowska-Curie *oznaczyła względny ciężar atomowy radu, definiując* w ten sposób jego *tożsamość*.

Przewrót w nauce po odkryciu promieniotwórczości

W roku 1903 Komitet Noblowski przyznawał trzem osobom nagrodę z fizyki za to, co około 20 lat wcześniej przewidywał ostrożnie Daniell w swoim podręczniku: podział atomu wprawdzie jeszcze nie stał się „możliwym”, ale już zauważono, że atomy mogą nie być wiecznotrwałe i niezmiennie, co dawniej uznawano za ich atrybut. Przewidywanie to wkrótce potwierdził Ernest Rutherford, który odkrył jądro atomowe i zjawisko transmutacji. Dzięki serii kolejnych odkryć z tej dziedziny²⁴, zaczęła się rodzić doświadczalna fizyka jądrowa, a fizyka teoretyczna weszła na następne piętro rozwoju.

²⁴ Pierwsze i najważniejsze z nich to odkrycia cząstek: elektronu, neutronu i pozytonu, oraz odkrycie reakcji jądrowych.

Niebawem przewrót pojęciowy nastąpił też w chemii. Dzięki odkryciu zjawiska izotopii, pierwiastki nie mogły już być uznawane za substancje jednoskładnikowe, najprostsze jakościowo. Z drugiej strony – istnienie izotopów pozwoliło wyjaśnić wyjątki od reguły w tablicy Mendelejewa (opartej pierwotnie na porównaniach względnych ciężarów atomowych), a przede wszystkim: oprzeć tę empiryczną klasyfikację na *obiektywnym kryterium* liczby porządkowej pierwiastka, *jednoznacznie teraz definiowanej* przez ładunek jego jądra.

Do jakościowej zmiany fundamentalnych pojęć doszła też zmiana wyobrażeń o skali wielkości fizycznych, co zaczęło się od momentu, gdy Pierre Curie zmierzył tempo wydzielania ciepła przez rad. Początkowo stała emisja tego ciepła wydawała się sprzeczna z przyjętą już wtedy zasadą zachowania energii. *Racjonalnym* wyjaśnieniem okazało się założenie, że jest to możliwe dzięki energii zgromadzonej „od zawsze” w atomach radu. Maria Skłodowska-Curie pisała, że ilość tej energii musi być „bardzo duża”²⁵. Tak duża, że w wykładzie Noblowskim Pierre Curie ostrzegał przed możliwym niebezpieczeństwem użycia radu w złych zamiarach, wyrażając jednak nadzieję, iż rad będzie raczej służyć ludzkości, niż stwarzać dla niej zagrożenia²⁶.

²⁵ W przeliczeniu na jednostkę masy, jest to energia około miliona razy większa niż typowa energia przemian chemicznych.

²⁶ Pierre Curie, *Nobel Lecture* 1903: „Można obawiać się także, iż w rękach zbrodniczych rad stanie się narzędziem bardzo niebezpiecznym i – w związku z tym – zastanawiać się, czy poznawanie tajemników Natury przynosi pożytek ludzkości, czy dojrzała ona do tego, by z nich korzystać, czy też, przeciwnie, ta wiedza jest dla niej szkodliwa.

Rad i „służba Ludzkości”

Odkryty w roku 1898 rad zaczął „służyć Ludzkości” już w roku 1901, kiedy to po raz pierwszy użyto go w terapii nowotworów²⁷. Była to dla odkrywców szansa na dorobienie się majątku, ale Maria i Pierre Curie zawsze bezinteresownie dzielili się z „Ludzkością” swym doświadczeniem i wiedzą na temat metody otrzymywania radu. *Idealistycznie* wierzyli, że tak jest słusznie.

Leczenie promieniotwórczością może mieć groźne skutki uboczne. Wiedząc o tym, Maria Skłodowska-Curie w swoim podręczniku poświęciła jeden rozdział biologicznemu działaniu promieni alfa, beta i gamma. Podkreśla tam, że *warunkiem racjonalnego stosowania radioterapii jest dokładna znajomość natężenia promieniowania*, po czym zaleca, by w zakładach leczniczych znajdowały się odpowiednie laboratoria pomiarowe. Metody pomiarowe dla tych laboratoriów były opracowywane w założonym w roku 1909 Instytucie Radowym w Paryżu. Warto dodać, że działalność tego Instytutu zaczęła się od rozwoju pracowni naukowych²⁸ oraz że tylko dzięki kontaktom z paryskimi laboratoriami, warszawski Instytut Radowy mógł

(...) Jestem z tych, którzy – tak jak Nobel – sądzą, iż ludzkość więcej dobra niż zła wyciągnie z nowych odkryć”. Za: (Curie, 1972).

²⁷ Uczynił to dr Henri Danlos. Obecnie medycyna nie stosuje już radu, ale stosuje wiele innych radionuklidów, w terapii, a także w diagnostyce.

²⁸ Instytut Curie rozwijał badania z zakresu fizyki i chemii, Instytut Pasteura – z biologii i medycyny.

w roku 1932 rozpocząć działalność od części klinicznej (odwrotnie niż w Paryżu). Było jednak oczywiste, że własne laboratoria fizyczne Warszawa mieć musi, toteż zorganizowano je i wyposażono najszybciej, jak się dało. Polscy profesorowie medycyny – uczniowie Marii Skłodowskiej-Curie (lub uczniowie jej uczniów) – do dzisiaj przypominają²⁹, jak bardzo podkreślała ona potrzebę badań fundamentalnych w medycynie. To było *racjonalne* i poskutkowało. Współczesna radioterapia jest już nie do pomyslenia bez fizyki medycznej.

„Praca u podstaw” we Francji

Maria Skłodowska-Curie lubiła uczyć, ale jako wychowanka pozytywistów uważała to także za swój *obowiązek*. W młodości, jeszcze na ziemiach polskich, zaangażowała się (bardzo altruistycznie i równie ryzykownie) w nauczanie wiejskich dzieci – oczywiście, z *idealistycznym* i patriotycznym celem podtrzymania ich polskości. W roku 1907 – krytycznie nastawiona do ówczesnych szkół francuskich³⁰ – poprowadziła oryginalne lekcje fizyki (Curie-Skłodowska, 2004) dla dzieci przyjaciół i dla

²⁹ Andrzej Kułakowski, b. dyrektor Centrum Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie, prezes Towarzystwa Marii Skłodowskiej-Curie w Hołdzie. Rozmowa bezpośrednia w Warszawie, 9 kwietnia 2010 roku.

³⁰ „Czasami mi się zdaje, że lepiej dzieci potopić aniżeli kształcić je w obecnych szkołach” (z listu Marii do jej siostry Heli).

własnej córki, gdzie w formie zabawy przekazywała im profesjonalne, *racjonalne* podejście do metod pracy badawczej³¹. Na wyższym poziomie, kształcąc przyszłe nauczycielki w École Normale Supérieure de Sèvres, jako pierwsza wprowadziła dla nich zajęcia z fizyki doświadczalnej oraz wykłady z rachunku różniczkowego i całkowego.

Do najbardziej dramatycznej „pracy u podstaw” zmusił Marię Curie rok 1914. Na samym początku wojny pisała do starszej córki: „Niech Fernand robi zadania z fizyki. Skoro nie możecie pracować dla Francji dnia dzisiejszego, pracujcie dla jej przyszłości. Niestety, wielu ludzi zabraknie po tej wojnie i trzeba ich będzie zastąpić. Uczcie się matematyki i fizyki, jak tylko możecie”³². Niewiele później siedemnastoletnia Irène Curie wraz z matką organizowała przyfrontową służbę radiologiczną, w której działały obie przez całe cztery lata. Również na początku wojny Maria Skłodowska-Curie (razem z Jeanem Perrinem) pisała do Paula Langevina, że jest Francji najbardziej potrzebny jako FIZYK. Uznał jej *racjonalne* argumenty³³.

³¹ „Trzeba dojść do tego, aby się nigdy nie mylić. Cała tajemnica polega na tym, żeby nie śpieszyć się zbytnio”. Za: (Curie-Skłodowska, 2004).

³² List Marii Curie z Paryża, 06.09.1914. Chodzi o Fernanda Chavannes, rówieśnika Ireny Curie (Skłodowska-Curie, 1978).

³³ Na potrzeby echolokacji okrętów podwodnych Paul Langevin skonstruował w czasie I wojny światowej sonar piezoelektryczny.

Idealizm czy romantyzm?

Nie było moim celem szufladkowanie bogatej osobowości Marii Skłodowskiej-Curie, natomiast chciałam uwypuklić te wątki jej działalności, które ona sama uważała za najważniejsze. Jednymi z najważniejszych były: rzetelność, czyli dobra robota, oraz altruistyczna służba – ojczyźnie własnej, ojczyźnie męża i córek, wreszcie – Ludzkości. Ale, oprócz pozytywistycznego, wypracowanego poczucia obowiązku, Maria Skłodowska-Curie miała do swej głównej roboty – pracy naukowej – wrodzoną, emocjonalną, niemalże niezależną od woli, *romantyczną* motywację, o której sama tak napisała pod koniec życia:

Jestem z tych, którzy wierzą, iż Nauka jest czymś bardzo pięknym. Uczony jest w swoim laboratorium nie tylko jest technikiem, lecz również dzieckiem wpatrzonym w zjawiska przyrody, wzruszające jak pieśń czarodziejska. Nie powinniśmy sobie dać wmówić, że cały naukowy postęp sprowadza się do mechanizmów, maszyn i różnych kółek zębatych, które zresztą także nie są pozbawione swoistego piękna. Nie obawiam się, aby ukochaniu Nieznanego i żądzy Wielkiej Przygody miała grozić w dzisiejszych czasach zagłada. Najżywotniejszym ze wszystkiego, co widzę dokoła siebie, jest właśnie ta żądza i to ukochanie, nie dające się wykorzenić, a związane najściślej z ciekawością naukową³⁴.

³⁴ Pisane z Madrytu, z Kongresu „Przyszłość Kultury” w roku 1933. Za: (Curie, 1972).

Zakończenie

Setna rocznica Nagrody Nobla z chemii przyznanej w roku 1911 za odkrycie polonu i radu stała się inspiracją dla organizatorów obchodów Międzynarodowego Roku Chemii i Roku Marii Skłodowskiej-Curie. Zaletą imprez rocznicowych jest to, że dają one ludziom okazję do ponownego przemyślenia faktów, poglądów, tendencji. A dzisiejsze tendencje w nauce są zupełnie inne niż sto lat temu. Ogólnie, Ludzkość wie o wiele więcej niż wtedy, ale jednostkom jest coraz trudniej nadażać za postępem nauki, zaś w nadmiarze wiedzy szczegółowej coraz trudniej jest spojrzeć na naukę jako na całość i dojrzeć w niej rzeczy istotne. Możliwości techniczne uprawiania nauki są dzisiaj imponujące, ale jednocześnie pojawiło się groźne zjawisko ocen parametrycznych i przesadnego stosowania kryteriów utylitarnych, które pod pozorem obiektywizacji stają się narzędziem ograniczenia wolności badań oraz niebezpiecznego odciągania zainteresowań badaczy od istoty ich studiów ku doraźnym korzyściom i swoistemu targowisku próżności.

Dla osób tak pojmujących organizację nauki, Maria Skłodowska-Curie (która sama do organizacji nauki dała cenny wkład) może się okazać postacią bardzo niewygodną: ze swym altruizmem, bezinteresownością, autentyczną ciekawością naukową, rzeczowością i skromnością. Podobnie zresztą jak drugi patron Instytutu Radowego w Paryżu, Louis Pasteur, który uważał, że trzeba popierać bezinteresowność, bo jest ona pierwszym motorem postępu w teorii, który potem jest motorem postępów

w praktyce (za: Giroud, 1987, s. 57). Myślę, że właśnie dlatego warto Marię Skłodowską-Curie dzisiaj przypomnieć.

Podziękowania

Bardzo dziękuję Panu Profesorowi Jerzemu Janikowi za zaproszenie mnie na posiedzenia Komisji Filozofii Nauk Przyrodniczych Polskiej Akademii Umiejętności. Panu Profesorowi Andrzejowi Kułakowskiemu dziękuję za piękny i pomocny dar: monografię historii radu (Mould, 2007). Mojemu Mężowi, Profesorowi Piotrowi Petelenzowi – za cenne rozmowy i dyskusje.

Bibliografia

- Blackburn, S., 1994. *Oksfordzki słownik filozoficzny*. J. Woleński, red. naukowy. Przekład z angielskiego: C. Cieśliński et al., Warszawa: Książka i Wiedza.
- Brian, D., 2006. *Rodzina Curie*. Przekład z angielskiego: J. Hensel. Warszawa: Wydawnictwo Amber.
- Chemistry International (The news magazine of the IUPAC)*, 2011. Vol. 33, no.1.
- Comte, A., 1993. *Rozprawa o duchu filozofii pozytywnej*. Przekład z francuskiego: J.K. Wyd. 3. Kęty: Antyk (wyd. 1, 1936, Warszawa).
- Curie, E., 1972. *Maria Curie*. Przekład z francuskiego: H. Szyllerowa. Wyd. 13 (powojenne 5). Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.

- Daniell, A., 1887. *Podręcznik zasad fizyki*. Przekład z angielskiego: J.J. Boguski, Warszawa: T. Paprocki.
- Giroud, F., 1987. *Maria Skłodowska-Curie*. Przekład z francuskiego: J. Pałęcka. Warszawa: Państwowy Instytut Wydawniczy.
- Goldsmith, B., 2006. *Geniusz i obsesja*. Przekład z angielskiego: J. Szmolda. Wrocław: Wydawnictwo Dolnośląskie.
- Hartman, J., red., 2004. *Słownik filozofii*. Kraków: Wydawnictwo Zielona Sowa.
- Hurwic, J., 1993. *Maria Skłodowska Curie i promieniotwórczość*. Warszawa: Żak – Wydawnictwo Edukacyjne Zofii Dobkowskiej.
- Hurwic, J., 1998. Sylwetka naukowa Marii Skłodowskiej Curie. *Postępy Fizyki*, 49/2, s. 71–73.
- Krajewski, W., red., 1996. *Słownik pojęć filozoficznych*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe Scholar.
- Kwiatkowski, E., 1962. *Dzieje chemii i przemysłu chemicznego*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne.
- Mould, R.F., 2007. Radium history mosaic. *Nowotwory Journal of Oncology*, supplement.
- Quinn, S., 1997. *Życie Marii Curie*. Przekład z angielskiego: A. Soszyńska. Warszawa: Prószyński i S-ka.
- Skłodowska-Curie, M., 1925. *Jak powstał i jak się rozwija Instytut Radowy w Paryżu*. Warszawa: Komitet Daru Narodowego dla Marii Skłodowskiej-Curie. Za: B. Gwiazdowska, W. Bulski, A. Pruszyński, J. Tołwiński. *Historia Zakładu Fizyki Medycznej Centrum Onkologii w Warszawie*. http://fiz.coi.waw.pl/zfm_hist1.php
- Skłodowska-Curie, M., 1926. Główne tory współczesnych badań nad promieniotwórczością. Organizacja i działalność Instytutu Radowego w Paryżu. W: *Dwa odczyty Marii Skłodowskiej-Curie*, Warszawa: Komitet Daru Narodowego dla Marii Skłodowskiej-Curie 1926. Za: <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/zal99/janiszevska/p1.htm>.
- Skłodowska-Curie, M., 1953. *Promieniotwórczość*. Wyd. 2. Z pierwszego wydania francuskiego (Paryż, 1934) tłumaczył L. Wertenstein; uzupełnienia napisał A. Sołtan. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.

- Skłodowska-Curie, M., 1978. *Korespondencja Marii Skłodowskiej-Curie z córką Ireną: 1905-1934 wybór*. Przekład z francuskiego: K. Dolatowska. Warszawa: Państwowy Instytut Wydawniczy.
- Skłodowska-Curie, M., 1992. *Badanie ciał radioaktywnych [rozprawa przedstawiona Wydziałowi Matematyczno-Przyrodniczemu Uniwersytetu Paryskiego w celu uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych]; z przedmową, komentarzami i posłowiem Józefa Hurwica*. Polska Akademia Nauk. Wydział I Nauk Społecznych. Komitet Historii Nauki i Techniki. Warszawa: Instytut Kształcenia Ekonomicznego PTE [Polskiego Towarzystwa Ekonomicznego], 1992.
- Skłodowska-Curie, M., 1994. *Korespondencja Polska Marii Skłodowskiej-Curie 1881–1934*. Oprac. K. Kabzińska, M.H. Melewicz, J. Piskurewicz, J. Róziewicz. Warszawa: Instytut Historii Nauki PAN i Polskie Towarzystwo Chemiczne.
- Skłodowska-Curie, M., 2004. *Lekcje Marii Skłodowskiej-Curie – notatki Isabelle Chavannes z 1907 roku*. Przekład z francuskiego: M. Jarosiewicz. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.
- Tatarkiewicz, W., 1995. *Historia filozofii*. Wyd. 11, t. 3. Warszawa: PWN.
- Wielka Encyklopedia Powszechna*, 1962–69. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Wronkowski, Z., Towpik, E. *Instytut Radowy im. Marii Skłodowskiej-Curie w Warszawie. Rys historyczny*. <http://www.coi.waw.bip.finn.pl/?bipkod=/001/001>.

Fakty fizyki na tle przymiarek filozofii

Jerzy A. Janik

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk

Facts Physics on the Background of Philosophy

Abstract

This article is drafted on the basis of three complementary essays by Professor Jerzy Janik. The author takes a look at selected issues in the field of quantum mechanics – especially the problem of quantum superposition and supersymmetry – from perspective of great philosophical systems. The author draws attention to the fact that some of these issues reflect old philosophical problems (e.g., empiricism vs rationalism), and – in some cases – philosophical perspective may save interpretations of quantum mechanics from paradoxes.

Keywords

philosophy of physics, interpretations of quantum mechanics

W niniejszym artykule, zredagowanym na podstawie trzech wzajemnie się uzupełniających esejów profesora Janika, autor przygląda się wybranym zagadnieniom z dziedziny mechaniki kwantowej – zwłaszcza problemowi superpozycji kwantowej oraz supersymetrii, ze szczególnej perspektywy: problemów i zagadnień dyskutowanych w klasycznej filozofii. Autor zwraca uwagę na to, że w niektórych tych zagadnieniach odbijają się stare problemy filozoficzne (np. empiryzm vs racjonalizm), a spojrzenie z punktu widzenia wielkich systemów filozoficznych na inne z tych zagadnień może chronić przed popadaniem w paradoksy.

„Kot” Schrödingera. Esej o treści trochę naciąganej

Za chwilę wyjaśnię dlaczego słowo „kot” zaopatrzyłem w cudzysłów. Na razie chcę zacząć od informacji, że mechanika kwantowa – czyli obowiązująca teoria mikroświata, a może i nie tylko mikroświata – dopuszcza **JEST** obiektu w tzw. superpozycji stanów. Superpozycja stanów to coś w rodzaju sumy stanów, czyli sumy możliwości. Obiekt w superpozycji stanów **NIE JEST** w sytuacji jasno określonej, cóż bowiem to znaczy, że ma on trochę jednego stanu, trochę drugiego itd.? Niels Bohr odmawiał takiemu obiektowi prawa do istnienia. Z brakiem prawa do istnienia trudno się zgodzić fizykowski eksperymentującemu z takimi obiektami. Byłoby może pół biedy,

gdyby istniała jasna granica pomiędzy mikrofizyką a makrofizyką. Ale takiej granicy nie ma. Są i tacy fizycy, którzy cały wszechświat traktują jako obiekt podlegający opisowi mechaniki kwantowej. Można zatem oczekiwać, że superpozycje stanów pojawiają się w naszym codziennym, makroskopowym doświadczeniu.

Erwin Schrödinger wymyślił taką sytuację: weźmy materiał promieniotwórczy, który w umieszczonym obok liczniku Geigera powoduje wyładowanie (sygnał), średnio rzecz biorąc, jedno na godzinę. Sygnał wyzwala młotek, który rozbija ampulkę z trucizną. Wszystko znajduje się w zamkniętym pomieszczeniu. W nim umieszczamy kota. Po godzinie otwieramy pomieszczenie i jest 50% szans, że znajdziemy kota żywego i 50% szans, że kot będzie martwy. Jeżeli mechanika kwantowa stosuje się do tego układu, to w czasie tej godziny, gdy pomieszczenie było zamknięte, kot znajdował się superpozycji stanów martwy + żywy. Czy jakoś to odczuwał? Intuicja podpowiada nam, że nie. Kot w 50% żywy i w 50% martwy to bzdura, paradoks, niemożliwość. Zdrowy rozsądek szuka wyjaśnienia: może trzeba przyjąć, jak chcą niektórzy interpretatorzy mechaniki kwantowej, że superpozycja stanów nie jest sytuacją obiektu, lecz stanem wiedzy obserwatora (względnie stanem jego ignorancji). To na pewno jest prawdą, ale fizycy z uporem twierdzą, że jednak superpozycja stanów dotyczy obiektu.

Przyszło mi na myśl, że można by poszukać w naszej codziennej rzeczywistości sytuacji, która byłaby superpozycją stanów, albo przynajmniej superpozycją *per analogiam*. Oto

propozycja, poprzedzona krótkim wprowadzeniem, opartym głównie na rozważaniach Edyty Stein (1986, s. 42). Jak wiadomo, Edyta Stein była uczennicą Husserla – twórcy kierunku w filozofii zwanego fenomenologią. Otóż fenomenologia zajmuje się stanami świadomości (*Ich*) związanymi z jakimś przeżyciem (*Erlebnis*). Np. przeżyciem radości. Przeżywam radość konkretną – tę moją radość (*diese meine Freude*) spowodowaną otrzymaną wiadomością. Jednocześnie zdaję sobie sprawę, że mogę rozważać radość jako coś ogólnego (*Freude*). Tę ogólną radość Edyta Stein nazywa istotowością (*Wesenheit*). Pewnie trzeba powiedzieć, że każda konkretna radość partycypuje w tej (ogólnej) istotowości „radość”. Otóż przeżycia (*Erlebnisse*) mogą być proste – radość i nic więcej, ale i złożone. Edyta Stein wspomina przeżycie „gorzkiej słodyczy” (*Bittersüss*). Jeżeli przeżycie można nazwać stanem świadomości, to jest jasne, że możemy przeżywać superpozycje przeżyć – superpozycje stanów. Np. przeżywam myśli związane z przygotowaniem tego referatu. A jednocześnie mam jakieś zmartwienie. Superpozycja przeżyć.

Wróćmy do „kota” Schrödingera:

A może kot nie jest najlepszym obiektem? Może nie ma on pełnej świadomości swojego istnienia? Eugen Wigner uczynił krok nieco makabryczny (Davies, 1980, s. 132): zastąpmy kota człowiekiem – ochotnikiem! To jest teraz „kot” z tytułu tego eseju. Tu odrywam się od rozważań Wignera, moim zdaniem mało przekonujących, i przechodzę do moich własnych – trochę naciąganych.

Człowiek poddany temu makabrycznemu eksperymentowi niewątpliwie posiada świadomość swego istnienia (Husserlowskie *Ich*). Chcę spróbować poddać jego przeżycie (*Erlebnis*) analizie opartej na Husserlowskiej fenomenologii. Niewątpliwie brak mi kompetencji, więc to co napiszę, będzie w większym lub mniejszym stopniu naciągane. Wychodzę z zasadniczej dla fenomenologii tezy, że zjawiska (*phenomena, appearances*) objawiają się w świadomości (Stein, 1986, s. 42; Angeles, 1992, s. 226). Odstawiam na razie na bok mechanikę kwantową. Zjawiskiem, które zauważa świadomość poddanego eksperymentowi **JA**, niech będzie położenie młotka skierowanego na ampułkę z trucizną. Młotek w górze – życie, młotek w dole – śmierć. Jest dla mnie oczywiste, że **JA** poddanego eksperymentowi człowieka, czekając na ostateczny wyrok, przeżywa jednocześnie strach i nadzieję. Mam chyba prawo powiedzieć, że świadomość doznaje superpozycji: jestem żywy + jestem martwy.

Fakty fizyki a noumena

Niech będzie mi wolno posłużyć się określeniami sugerowanymi przez słownik filozoficzny (Angeles, 1992). **Noumenon** w sensie filozofii „klasycznej” to rzecz ujmowana jako obiekt przez nasz rozum, bez zaangażowania naszych zmysłów. Rzecz, która aktualnie istnieje obok postaci, która się nam objawia i do której odnosi się pojęcie **phenomenon**. Jeżeli dobrze rozumiem Kant „wyostrza” pojęcie **noumenon**,

traktując je jako rzeczywistość, która przekracza doświadczenie i całą racjonalną wiedzę. Rozum musi założyć jej istnienie, jako punkt wyjścia dla nauki (*science*) i filozofii. Rozum może wiedzieć o jej istnieniu, ale nie wie jakie to istnienie. Kant sądzi, że pochodzi ona od niezmysłowej intuicji.

Sprawa ta ma bezpośredni związek z aktualnym w czasach Kanta polemicznym sporem pomiędzy empiryzyzmem a racjonalizmem.

Wydaje mi się, że mechanika kwantowa dostarcza nam przykładów na takie Kantowskie **noumena**. Wspomnę w tym eseju o dwóch: jeden dotyczy tzw. superpozycji stanów traktowanych jako obiekt, a drugi tzw. redukcji pakietu falowego traktowanego jako niezrozumiałe zjawisko.

Mechanika kwantowa dostarcza informacji o stanie obiektu, będącego przedmiotem naszych badań, poprzez rozwiązanie równia Schrödingera. Znamienne jest, że rozwiązaniem tego równania jest coś w rodzaju sumy stanów (z odpowiednimi współczynnikami), czyli tzw. superpozycja stanów. Ontologiczny status obiektu w superpozycji stanów prowadził w przeszłości (i ma to miejsce nadal) do kontrowersji poglądów. Jak wspomniałem, Niels Bohr odmawiał obiektowi w superpozycji stanów statusu istnienia. John von Neumann interpretował ów status jako wiedzę obserwatora o obiekcie, czyli nie odnosił go do obiektu jako takiego. Zdaje się jednak, że nie da się uniknąć przypisania statusu superpozycji stanów samemu obiektowi, obok słusznej oczywiście tezy, że wiedza obserwatora jest w tym statusie również zawarta. Przyznajmy się,

że statusu superpozycji stanów nie rozumiemy! Jeżeli manipulacja równaniem Schrödingera jako działanie umysłu, prowadzi do pojęcia typu **noumenon** to, dla przypadku superpozycji stanów, należy zgodzić się z Kantem, że rozum może wiedzieć o jej istnieniu, ale nie wie jakie to istnienie. Jest to rzeczywistość, która przekracza doświadczenie i racjonalną wiedzę. Rozwiązanie równania Schrödingera dostarcza superpozycji stanów, których status ontologiczny jest niezrozumiały, jest jakąś Tajemnicą. W każdym razie, obiekt w tym tajemniczym statusie jest *in potentia* aktualizacji do dobrze określonego konkretnego stanu.

Gdy to zachodzi mamy do czynienia z aktem redukcji pakietu falowego. Stan układu (obiektu) po redukcji jest zrozumiały, nie jest już paradoksem jak kot Schrödingera żywy w 50% + martwy w 50%. Ale niezrozumiałe jest zajście redukcji pakietu – nie wynika ono ani z równania Schrödingera, ani w ogóle z formalizmu mechaniki kwantowej. Rozum stwierdza, że akt ten zaszedł, ale nie rozumie jak to nastąpiło. Zjawisko stanowi więc **noumenon** w sensie Kantowskim, jak mi się zdaje.

Niewątpliwie mechanika kwantowa, a raczej jej interpretacja, od lat sprawiająca kłopot tym, którzy badają jej podstawy, może dostarczyć innych jeszcze przykładów na Kantowskie **noumena**.

Empirycyzm contra racjonalizm. Czy spór nadal aktualny?

Żeby zacząć ten filozofujący esej od słów w rodzaju „już starożytni Grecy...”, przypomnę, że Platon eksponował rolę umysłu, który jest w stanie dotrzeć do wiecznych idealnych form, transcendentnych form wiedzy. Naturalne poznanie wymaga zaangażowania zmysłów.

Moim punktem wyjścia niech będzie jednak dopiero wiek XVII, w którym miał miejsce mocno angażujący filozofów spór pomiędzy empirycystami a racjonalistami. Empirycyści wyrażali pogląd, że doświadczenie zmysłowe jest jedynym źródłem wiedzy, a umysł nie może dostarczyć nam wiedzy o rzeczywistości bez tego doświadczenia. Racjoniści twierdzili, że rzeczywistość jest poznawalna niezależnie od doświadczenia: umysł jest zdolny poznać jakieś prawdy przed (*a priori*) doświadczeniem (Angeles, 1992). Klasycznymi empirycystami byli filozofowie angielscy Locke, Berkeley i Hume. Klasycznymi racjonalistami byli Descartes, Spinoza i Leibnitz. Empirycyści nie negowali, że umysł odgrywa istotną rolę w porządkowaniu faktów doświadczalnych. Racjoniści musieli chyba godzić się, że punktem wyjścia spekulacji umysłowych muszą być jakieś fakty zasadnicze wynikające z obserwacji.

Empirycyści odkrywali rzeczywistość opierając się na zasadzie przyczynowości. Wobec jednak niewątpliwej siły argumentów Hume'a kwestionujących pojęcie przyczyny, woleli raczej stosować zasadę racji dostatecznej, na przykład w sfor-

mułowaniu Leibniza: „Nic nie istnieje lub nie zdarza się bez racji istnienia lub zajścia”. Szukanie tej racji było drogą budowania gmachu wiedzy.

Racjoniści byli pod wrażeniem sukcesów matematyki we współczesnych im czasach. Sukcesy te eksponowały metodę dedukcji w dążeniu do prawdy (Law, 2002, s. 37–38, 66; Kim i Sosa, 1995, s. 430).

Budowanie gmachu wiedzy przez empirycystów odbywa się w oparciu o metodę indukcji. Przeszłe doświadczenia wywołują w nas pewność, że zdarzenie znów zajdzie. Któż mógłby wątpić, że słońce wejdzie jutro? Nieubłagany krytyk Hume ostrzega: Przeszłość nie daje gwarancji zejść w przyszłości.

W matematyce rolę tego rodzaju (indukcji „przyrodniczej”, indukcji niepełnej) przejmuje indukcja tzw. zupełna. Ale i w matematyce (jak dowiedziałem się od Profesora Andrzeja Schinzla (2011)) są twierdzenia, o których słuszności możemy (?) być przekonani w wyniku stwierdzenia tej słuszności w olbrzymiej liczbie przypadków, ale nie w wyniku dowodu.

Oto przykład:

Problem: Czy każda liczba parzysta większa od 2 jest sumą dwóch liczb pierwszych? Sprawdzono dla wszystkich liczb parzystych mniejszych od $6 \cdot 10^{16}$.

Pytanie zawarte w tytule tego eseju brzmi: czy spór pomiędzy empirycystami i racjonalistami jest nadal aktualny? Chcę odpowiedzieć na to pytanie odwołując się do fizyki. Muszę się jednak przyznać do niedostatecznej kompetencji w dziedzinie, którą dla ilustracji wybrałem. Chodzi o tak zwaną fizykę cząstek.

Powtarzam: moja wiedza w tej dziedzinie fizyki jest może większa niż laika, ale niedostateczna, by pisać czy mówić o tych sprawach z podniesionym czołem. Zwracam jednak uwagę, że esej ten nie jest esejem popularyzującym fizykę. Raczej jest to esej filozoficzny. A zatem *incipiam*:

Jak słyszę, fizycy cząstek (mam na myśli teoretyków) wybierają jedną z dwóch dróg: Niektórzy za punkt wyjścia biorą wymyśloną teorię, z niej wyprowadzają wnioski i zamierzają konfrontować je z doświadczeniem uzyskanym przy pomocy różnego rodzaju akceleratorów. Inni próbują wyprowadzić podstawową teorię porządkując obserwowane cząstki i ich oddziaływanie. Ci pierwsi bazują niemal wyłącznie na różnych wariantach tzw. teorii strun. Ci drudzy eksploatują konsekwencje tzw. Modelu Standardowego (Randall, 2005, s. 90, 93).

Nie czuję się na siłach przedstawić tu jakiś opis teorii strun. Mogę tylko powtórzyć za tymi, którzy w tej dziedzinie pracują, że w teorii tej punktowe cząstki zastąpione są strunami. W teorii tej podstawową rolę gra pewien nowy typ symetrii – tzw. supersymetria. Konsekwencją tej teorii jest jej wielowymiarowość, operuje ona dziesięcioma, czy nawet jedenastoma wymiarami.

Model Standardowy opiera się na grze sił (oddziaływań) pomiędzy sześcioma kwarkami, sześcioma leptonami, pięcioma bozonami i postulowanym szóstym bozonem Higgsa¹. Kwarki, leptony i bozony należą do grup cząstek, które w ciągu ubiegłego stulecia zostały sukcesywnie odkryte i zidentyfikowane.

¹ Obecnie eksperymentalnie potwierdzonym (przyp. redakcji).

Niektóre z nich są czułe na siły elektromagnetyczne, niektóre na jądrowe oddziaływanie tzw. silne, a niektóre na jądrowe oddziaływanie tzw. słabe. Model Standardowy ignoruje oddziaływanie grawitacyjne (Bryson, 2005, s. 206).

Teoria strun, czyli inaczej teoria supersymetrii, nie może się poszczycić żadnymi sukcesami w konfrontacji z doświadczeniem. Ciągłe jest rozwijana, różne jej warianty dają eleganckie obrazy świata, ale obrazy nie do sprawdzenia. Model Standardowy jest natomiast płodny w konsekwencje, gdy chodzi o poszukiwanie nowych cząstek, poszukiwanie niejednokrotnie uwieńczone sukcesem.

Zaangażowanie fizyków w eksploatację teorii strun wywołuje wśród specjalistów kontrowersyjne opinie. Pozwolę sobie przytoczyć dwie z nich. Oto opinia Andrzeja Staruszkiewicza:

Teoria strun nie wyjaśniła ani jednego faktu eksperymentalnego. Jeden z animatorów tej teorii powiedział, że teoria strun pozwala wszystko zrozumieć, chociaż nie pozwala niczego obliczyć. W tej wypowiedzi tkwi słuszna zasada, ale doprowadzona do absurdu. Czym zatem jest teoria strun? Moim zdaniem jest wynikiem stosowania zasady identyfikacji Einsteina i Diraca, ale bez niesłuchanie ważnego elementu, a mianowicie jednego konkretnego problemu, który stanowiłby nić Ariadny w nieskończenie rozległym świecie struktur matematycznych. Taką nicią Ariadny była dla Einsteina równość masy bezwładnej i ciężkiej (Staruszkiewicz, 2000).

A oto opinia Lisy Randall:

Teoria strun jest wspaniała, doprowadziła do cennych matematycznych i fizycznych wniosków i całkiem możliwe, że zawiera odpowiednie składniki ostatecznego opisu natury (...). Teorię strun, taką jak ją obecnie rozumiemy, dzieli od przewidywań opisujących nasz świat olbrzymia teoretyczna przepaść (...). Potrzeba nam dużo szczęścia, by udało się wysnuć wszystkie odpowiednie zasady fizyczne, które pozwolą na podanie przewidywań teorii strun pasujących do obserwacji (Bryson, 2005, s. 206).

Ta druga opinia jest mniej krytyczna niż pierwsza, ale nie ukrywa olbrzymiego dystansu, jaki dzieli teorię strun od weryfikowalnych faktów.

Chciałbym tu z całym naciskiem podkreślić, że celem tego eseju nie było zaznajomienie czytelnika z teoriami, względnie modelami, z dziedziny fizyki cząstek. Celem tym było natomiast zwrócenie uwagi na przeciwstawne tendencje występujące w tej części filozofii, która od wieków zajmowała się teorią poznania.

Przedstawiony tu rzut oka na bardzo aktualne sprawy nurtujące fizykę demaskuje stary jak świat problem: czy jedynym źródłem wiedzy jest doświadczenie zmysłowe (oczywiście wzbogacone porządkującą pracą umysłu), czy umysł, bazując na tylko podstawowych faktach konstruuje gmach wiedzy, który następnie poddaje się weryfikacji w doświadczeniu. Empiryzm *contra* racjonalizm.

Bibliografia

- Angeles, P.A., 1992. *The Harper Collins Dictionary – Philosophy*, 2nd ed., New York, NY: Harper Perennial.
- Bryson, B., 2005. *A short history of nearly everything*. Toronto: Doubleday.
- Davies, P., 1980. *Other worlds*. New York: Simon and Schuster.
- Janik, J.A., 2011. Postać a Rzeczywistość. W: *Ontologiczne aspekty fizyki*. Wyd. 2, Kraków: Polska Akademia Umiejętności.
- Kim, J., Sosa, E., red., 1995. *A Companion to Methaphysics*. Oxford (UK) – Cambridge (Mass): Blackwell.
- Law, S., 2002. *Philosophy*. London – New York – Melbourne – Munich – Delhi: Dorling Kindersley (DK).
- Randall, L., 2005. *Ukryte wymiary wszechświata*. Tłum. B. Bieniok, E.L. Łokas. Warszawa: Prószyński i S-ka.
- Schinzel, A., 2011. *O niektórych otwartych problemach teorii liczb*. J.A. Janik, red., *XVI Seminarium Nauka – Religia – Dzieje*, Kraków: Wydawnictwo UJ.
- Staruszkiewicz, A., 2000. *X Seminarium Nauka – Religia – Dzieje, Castel Gandolfo*, J.A. Janik, red. Kraków: Wydawnictwo UJ.
- Stein, E., 1986. *Endliches und ewiges Sein*. Freiburg – Basel – Wien: Herder.

Spoleczne skutki powstania fizyki współczesnej

Andrzej Staruszkiewicz

Cultural Impact of Modern Theoretical Physics

Abstract

The Author is of the opinion that cultural impact of modern theoretical physics is entirely negative. This is so because modern theoretical physics does not have a consistent view of the world. This is to be compared with the blessing of having a consistent and understandable view of the world, as given, for example, by the mediaeval astronomy and theology.

Keywords

history of ideas, mediaeval astronomy, modern theoretical physics.

Wstęp

Zarówno tytuł jak i temat tego wykładu są wynikiem dość długiej ewolucji. Pierwotnie miała to być moja kontrybucja do seminarium „Nauka – Religia – Dzieje”, które miało się odbyć pod patronatem Arcybiskupa Józefa Życińskiego. Przed-

wczesna śmierć Księdza Arcybiskupa miała ten skutek, że patronat nad seminarium objęła PAU, a ja sam nie mogłem wziąć w nim udziału z powodu choroby. Ostatecznie wygłosiłem, na prośbę prof. Janika, referat na posiedzeniu Komisji Filozofii Nauk Przyrodniczych PAU. Mam wrażenie, że niniejszy tekst odpowiada mniej więcej temu, co powiedziałem w PAU i co odzwierciedla moje obecne myślenie, które ulega przecież ewolucji, natomiast odbiega dość znacznie od moich pierwotnych planów, co musiało znaleźć odbicie także w tytule wykładu.

Dwa odnośniki

Pierwszym tekstem, który skłonił mnie do myślenia w kierunku, który dalej opiszę, jest przepiękna książka C.S. Lewisa *Odrzucony obraz* (1995). Podstawowa teza książki Lewisa jest taka, że średniowieczna kosmologia, Lewis nazywa ją Modelem, oparta na religii i astronomii Ptolemeusza, była dla ówczesnych ludzi wielkim dobrodziejstwem, źródłem wewnętrznego spokoju, zdomowienia i umiejscowienia w pewnej szerszej hierarchii struktur i bytów. Lewis stwierdza to *expressis verbis* (tamże, s. 25):

„Można by przypuszczać, że to piękno Modelu jest widoczne głównie dla nas, którzy już nie przyjmujemy go za prawdę i którym wolno na niego patrzeć – albo którzy jesteśmy zmuszeni nań patrzeć – jakby na dzieło sztuki. Ale ja wierzę, że tak nie jest. Uważam, że istnieją obfite dowody na to, iż da-

wał on głębokie zadowolenie, gdy jeszcze weń wierzono. Mam nadzieję przekonać czytelnika nie tylko, że ten Model wszechświata jest najwyższym średniowiecznym dziełem sztuki, lecz także, iż jest w pewnym sensie dziełem centralnym, tym, w którym najbardziej szczegółowe dzieła zostały osadzone, do którego stale nawiązywały, z którego czerpały wiele ze swojej siły”.

Drugim tekstem, który chcę przywołać jest mój wykład *Izaak Newton a Oświecenie francuskie* (2010, s. 33). Mam nadzieję, że nikt nie zechce posądzić mnie o chęć jakiegokolwiek zestawiania czy porównywania mojego wykładu z arcydziełem Lewisa. Chodzi mi wyłącznie o podobieństwo, na zasadzie kontrastu, głównych tez: Lewis opisuje błogosławione skutki społeczne *falszowej* kosmologii Średniowiecza, podczas gdy ja opisuję oplakane skutki społeczne *prawdziwej* kosmologii Newtona, prawdziwej oczywiście tak, jak prawdziwe są wszystkie poważne teorie naukowe. Zwracam uwagę, że przez społeczne skutki rozumiem wyłącznie skutki natury duchowej, skutki w dziedzinie techniki, technologii czy wytwórczości przemysłowej to zupełnie inna sprawa, która mnie tutaj nie interesuje.

Fizyka współczesna i jej społeczne skutki wśród laików

Powstanie fizyki współczesnej można zlokalizować w czasie przy pomocy czterech dat: rok 1900, w którym Max Planck odkrył kwant działania, lata 1905 i 1916, w których Albert Ein-

stein wprowadził szczególną i ogólną teorię względności oraz rok 1926, w którym Erwin Schrödinger nadał ostateczną i najbardziej użyteczną postać mechanice kwantowej. Mam wrażenie, że bezpośrednie społeczne skutki powstania mechaniki kwantowej są ograniczone do społeczności samych fizyków. Problemy naukowe i filozoficzne ujawnione przez mechanikę kwantową nie są dostępne laikom. Stąd ich bezpośrednie oddziaływanie społeczne jest niewielkie. Ślad tego oddziaływania można zobaczyć czasem w amerykańskich filmach, w których bohater zostaje poddany teleportacji. Innym śladem jest dość powszechne i fałszywe rozumienie zasady nieoznaczoności jako zasady głoszącej niepewność wszelkiej wiedzy o charakterze ilościowym. Natomiast społeczne skutki powstania obu teorii względności są ogromne i jednoznacznie negatywne. Jest to związane z fatalnym i mylącym słowem „względność” oraz brakiem głębszej kultury filozoficznej wśród ludzi formalnie wykształconych. Wielcy matematycy, np. Gauss, Riemann czy Cantor, zawsze dostrzegali istotną różnicę filozoficzną między geometrią euklidesową a arytmetyką. Ujmowali to mówiąc, że geometria euklidesowa zawiera pewien składnik aposterioryczny, podczas gdy arytmetyka jest czysto aprioryczna. Dla Gaussa, Riemanna czy Cantora powstanie obu teorii względności byłoby tylko potwierdzeniem ich intuicji. Tymczasem dla większości ludzi wykształconych powstanie obu teorii względności było podważeniem prawd uznawanych przez ponad dwa millenia za całkowicie pewne. Skoro prawdy geometrii okazały się niepewne, to coż jest pewne? Kultura umysłowa więk-

szości tzw. intelektualistów nie pozwala na racjonalne ustosunkowanie się do tego pytania. Do tego dochodzi trudna kwestia sposobu, w jaki prawdziwe są teorie naukowe oraz nadużywanie słowa „rewolucja” na określenie istotnych postępów naukowych. W fizyce nigdy nie ma żadnych rewolucji, tzn. odejścia od uznawania za naukową prawdę tego, co wcześniej za taką prawdę uznano, są tylko kolejne poszerzenia obszaru wiedzy, która może być uważana za pewną. Do tych poważnych skutków doszły mniej poważne, ale społecznie niezwykle szkodliwe skutki powszechnego nierozumienia przez laików słowa „względność”, które występuje w nazwach obu teorii. Hermann Weyl zatytułował swoją znakomitą książkę, która była pierwszym wykładem obu teorii względności *Raum – Zeit – Materie*. Vladimir Fock zatytułował swój doskonały podręcznik *Teoria prostranstwa, wriemieni i tiagotienija*. Jest to naukowo poprawne określenie treści ogólnej teorii względności. Niestety, w nauce panuje straszliwa inercja, której skutkiem jest to, że raz przyjętej nazwy, terminologii czy atrybucji nie sposób zmienić, nawet gdyby wybitni uczeni próbowali to zrobić. Obawiam się, że to fatalne słowo „względność” pozostanie z nami do końca świata, a wraz z nim idiotyczne skojarzenia z relatywizmem moralnym czy poznawczym, dla których teoria względności rzekomo stwarza uzasadnienie. Przypuszczam, choć chętnie przyznaję, że jest to tylko przypuszczenie, którego nigdy nie miałem czasu sprawdzić, bo nawet nie warto, że najbardziej monumentalne idiotyzmy współczesnej filozofii i socjologii, np. teza głoszona przez kanadyjskiego filozofa Iana Hackinga, że prawdy

naukowe są artefaktami społecznymi, wynikiem „negocjacji” między grupami uczonych, czy też teza głoszona przez odłam filozofów zwanych postmodernistami, że prawdy naukowe są jeszcze jedną formą „narracji”, to odległe pokłosie zamieszania umysłowego spowodowanego wśród laików przez obie teorie względności. (Gdy Einstein po raz pierwszy zjechał do Stanów Zjednoczonych, związek kobiet o nazwie Córy Rewolucji Amerykańskiej zgłosił formalny protest przeciw tej wizycie. Najwyraźniej te dzielne kobiety uznały, że Einstein głosi relatywizm moralny, z którym one, zupełnie słusznie, nie zgadzają się).

Fizyka współczesna i jej społeczne skutki wśród samych fizyków

Jak napisałem wcześniej, problemy naukowe i filozoficzne ujawnione przez mechanikę kwantową nie są dostępne dla laików i stąd ich bezpośrednie oddziaływanie na duchowość społeczeństwa jako całości jest niewielkie. Natomiast oddziaływanie tych samych problemów na społeczność fizyków jest ogromne i potencjalnie katastrofalne. Opisałem to w swoim wykładzie *Współczesny stan fizyki teoretycznej poważnym zagrożeniem cywilizacyjnym* (2001, s. 59), którego treść chciałbym tutaj uzupełnić. Odkrycie mechaniki kwantowej to jeden z największych triumfów ludzkiego ducha, triumf tego samego rzędu, co odkrycia Newtona. Niestety, jak opisałem to w ww. wykładzie, odkrycie to jest obarczone fatalną skazą: pozbawia nas spójnego wi-

dzenia rzeczywistości fizycznej i spójnej, zrozumiałej chociażby dla samych fizyków ontologii i kosmologii. C.S. Lewis w wyżej cytowanej książce opisuje błogosławione skutki społeczne, które daje *falszywa*, ale spójna i zrozumiała dla każdego ontologia i kosmologia. Jakąż więc klęską społeczną musi być to, że współcześni fizycy, przedstawiciele najstarszej i najdoskonalszej nauki, nauki która przez ponad 200 lat była niedoścignionym wzorem dla wszystkich innych nauk, utracili jasność i spójność widzenia? Klęska ta ma już teraz widoczne, wielorakie skutki, które opiszę w uzupełnieniu do tego, co napisałem w wyżej cytowanym wykładzie (tamże). Na początku XX wieku Lord Rutherford powiedział, że „wszelka nauka jest albo fizyką, albo zbieraniem znaczków”. Jest to piękny przykład pewności siebie, którą mieli fizycy 100 lat temu. Odnoszę wrażenie, że z tej spokojnej pewności siebie niewiele zostało. Zamiast niej jest chępliwość i reklamiarstwo, które demonstrują np. teoretycy strun, którzy w ciągu ostatnich 30. lat zdążyli ogłosić kilka rewolucji naukowych i stworzyć kilka „teorii wszystkiego”. Dodatkowo mam wrażenie, że tej utracie pewności siebie towarzyszy utrata instynktu samozachowawczego. Niektóre wypowiedzi teoretyków strun robią wrażenie, jak gdyby ich autorzy wypowiadali się w poczuciu całkowitej intelektualnej bezkarności, jaką zapewnia im hermetyczność ich nauki. To jest niebezpieczne złudzenie. Sam widziałem we wtorkowych wydaniach gazety „New York Times” artykuły pisane przez ludzi spoza branży, zwykłych dziennikarzy, którzy z nutą niedowierzania i ironii komentowali koncepty w rodzaju *Multiverse* lub *Boltzmann Brains*.

Ludzie nawet nieznający się na meritum spraw dość łatwo wyuczują to, co po angielsku nazywa się *insincerity*.

Szczególnie przykrym objawem utraty spójności widzenia spowodowanym przez powstanie mechaniki kwantowej jest zjawisko, które można by nazwać intelektualną dyspepsją, która dotknęła społeczność fizyków. Od powstania mechaniki kwantowej minęło ponad 80 lat. Jeżeli ten odcinek czasowy 80. lat dodamy do daty ukazania się *Principiów* Newtona (1687), to znajdziemy się w zupełnie innym świecie ukształtowanym przez ludzi takich jak Clairaut, Euler czy Lagrange, ludzi, którzy rozumiejąc doskonale zasady Newtona nadali im znacznie wygodniejszą formę analityczną i zastosowali z powodzeniem do zupełnie nowych zagadnień. Jeżeli tenże odcinek czasowy 80. lat dodamy do daty ukazania się *Traktatu o elektryczności i magnetyźmie* Maxwella (1873), to znajdziemy się w świecie, w którym teoria Maxwella jest podstawą wykształcenia każdego inżyniera elektryka, zasady jej stosowania nie budzą wątpliwości, a jej produktem ubocznym jest szczególna teoria względności. Tymczasem współczesne dyskusje o interpretacji i ontologii mechaniki kwantowej toczą się wokół problemów dostrzeżonych w latach 20. i 30. ubiegłego wieku. Smutnym przykładem takich problemów jest nieśczęsny „kot Schrödingera”.

Jeszcze raz o fizyce współczesnej i jej skutkach wśród laików

Fizyka klasyczna przez ponad 200 lat stanowiła niedościgniony wzór naukowej doskonałości, klarowności i pewności. Wzór ten był tak wysoki, że czasem nawet niebezpieczny dla nieudolnych imitatorów, takich jak August Comte, który chciał stworzyć socjologię jako fizykę społeczeństwa. Otóż istnienie wysokich i godnych naśladowania wzorów zwanych też ideałami jest niewątpliwie społecznie korzystne. Tymczasem fizyka współczesna przestała być takim wzorcem. Hermetyczność przedmiotu fizyki nie jest w stanie ukryć przed laikami faktu, że fizyka nie dysponuje spójną wizją świata, spójną ontologią i kosmologią. Każdy, kto przeczyta chociażby *Krótką historię czasu* Stephena Hawkinga zauważy to od razu. To stanowi pożałowania godną zachętę i usprawiedliwienie dla tych wszystkich, którzy wolą zamęt zamiast porządku, bałagan pojęciowy zamiast jasności, mnożenie hipotez zamiast odkrywania prawdy. Kartezjusz zauważył bardzo trafnie, że ludzie wolą snuć hipotezy o rzeczach trudnych, niż dochodzić do prawdy o rzeczach prostych. Przedmiotem fizyki są rzeczy najprostsze, niczego prostszego już nie ma. Skoro tu niemożliwa jest jasność, to dlaczego odmawiać sobie przyjemności bredzenia bez sensu o rzeczach trudnych?

Bibliografia

- Lewis, C.S., 1995. *Odrzucony obraz*. Tłum. W. Ostrowski. Kraków: Znak.
- Staruszkiewicz, A., 2001. Współczesny stan fizyki teoretycznej poważnym zagrożeniem cywilizacyjnym. *Prace Komisji Zagrożeń Cywilizacyjnych PAU*, t. IV. Wykład jest dostępny w Internecie pod tym samym tytułem.
- Staruszkiewicz, A., 2010. Izaak Newton a Oświecenie francuskie. *Foton*, wiosna. Wykład jest dostępny w Internecie pod tym samym tytułem.

Romantyczna nauka

Richard Holmes, *Wiek cudów. Jak odkrywano piękno i grozę nauki* (*Age of Wonder. How the Romantic Generation Discovered the Beauty and Terror of Science*), tłum. Ewa Morycińska-Dzius, Seria: Wiedza i Życie – Orbity Nauki, Prószyński i S-ka, Warszawa 2010, ss. 656.

Romantyzm kojarzy nam się bardziej z nurtem np. literackim, czy filozoficznym niż z nauką. Trudno wyobrazić sobie romantyczną fizykę czy matematykę. Zatem już na początku należy odrzucić pytanie: czy można uprawiać naukę w stylu romantycznym? Nie, tak się nie da. Nauka, w każdym okresie swojego rozwoju, opierała się na dobrze określonych metodach i to one w zasadniczym stopniu gwarantowały ludziom je stosującym określony sukces. Był jednak w historii nauki taki (dość krótki) okres, kiedy prze-

nikanie się myślenia naukowego i ducha romantycznego odcisnęło na kulturze niezatarte znamię. Owo przenikanie może wydawać się sformułowaniem trochę na wyrost (mając na uwadze częste podkreślanie odrębności między nauką a sztuką), ale autorowi książki *Wiek cudów*, Richardowi Holmesowi, udało się pokazać, że naukowemu myśleniu oraz wysiłkowi poety, muzyka, czy malarza towarzyszy bardzo zbliżony zamiar, jakim jest uzyskanie „twórczego efektu” swojej pracy. Z jednej strony umysł człowieka nauki potrafi usłyszeć „odpowiedź natury” na stawiane jej pytania i zamknąć ją w twórczym wyniku, ale z drugiej strony, wnikanie umysłu w te same lub podobne zakamarki przyrody owocuje w „duszy” człowieka, a potem w konkretnym dziele pięknym obrazem, niesamowitą symfonią, czy pełnym emocji wierszem. W tym twórczym działaniu

zawsze była obecna pasja, wytrwałość, przenikliwość i talent – cechy wyróżniające niewielu ludzi nauki i sztuki, wspinaczy na szczyt sukcesu i sławy.

Historycy sytuują okres naukowego romantyzmu na koniec XVIII i początek XIX wieku, ale R. Holmes określa dość wyraźnie lata, do których odnoszą się jego rozważania. Dokładniej – od roku 1768 (podróż dookoła świata Jamesa Cooka) do roku 1831 (wyprowadzenie Karola Darwina na Galapagos). Holmes wnikliwie śledzi ten okres, ale podkreśla, że bez pierwszej rewolucji naukowej (Newton, Hooke, Locke, Kartezjusz) okres ten nie mógłby się tak twórczo rozwinąć. Bez sceny stworzonej przez oświeceniowe myślenie nauka XVIII i XIX wieku ugrzęzłaby lub wręcz rozplynęła się w ideach gloryfikujących człowieka. Nie ma takiej epoki w historii nauki, w której obecna jest nauka, a nieprzestrzegane byłyby zasady jej uprawiania.

Książka Holmesa dobrze pokazuje, że twórczy ruch przełomu XVIII i XIX wieku, który wyrósł z oświeceniowego racjonalizmu, stał się na tyle mocny, iż w znacznym stopniu przekształcił oświeceniowe idee, wnosząc do pracy naukowej nowe elementy, głównie intensywność i ekscytację twórczą (por. s. 11). Przykładami ujawniającymi te nowości są podobnie, jak w przypadku rewolucji XVII wieku, konkretne postacie ze świata nauki, instytucje naukowe (Towarzystwo Królewskie w Londynie i Akademia Nauk w Paryżu) oraz różne ośrodki naukowe, zwłaszcza Niemiec i Włoch. Warto pamiętać, że ów ruch został w znaczącym stopniu zainspirowany odkryciami z astronomii i chemii. R. Holmes nie stawia sobie zadania, aby scharakteryzować cały ten okres pod kątem wszystkich ważkich wówczas kwestii naukowych, a nawet tworzących się wówczas nowych gałęzi nauki. Szuka cech,

które wyróżniają ten czas, pokazują, jak nauka oddziałuje z szeroko rozumianą sztuką, wręcz jak ją współtworzy.

Na polskim rynku wydawniczym książek o charakterze historyczno-naukowych opracowań tego okresu jest bardzo mało. Jeszcze mniej jest opracowań polskich autorów¹. Tym bardziej więc warto pochylić się nad omawianą pozycją. Spróbujmy wnikać w treść tej książki, omawiając wybrane fragmenty, które charakteryzują zamiar autora.

Sam układ książki zaprojektowany został w ten sposób, aby „emocje poznawcze” czytelnika rosły, aby był on wciągany w treści ważne, ciekawe, wręcz fascynujące. Swoje rozważania Holmes rozpoczyna od przedstawienia postaci Josepha Banksa (1743–

1820)². Podróżował on dookoła świata z Cookiem, a efektem tej podróży były opublikowane po powrocie sprawozdania z tej podróży³. Myślę, że to dobry wybór jeśli chodzi o postać wprowadzającą w ten okres, gdyż dobrze obrazuje oczekiwania i nastoje ówczesnego społeczeństwa. Banks wpisał się w te nastoje doskonale, urastając do rangi nieprzeciętnego człowieka nauki. Kolejnym efektem popularności Banksa stało się takie uznanie jego zasług, że w londyńskim środowisku naukowym (Towarzystwo Królewskie, RS) odegra on wiodącą rolę. Jego sprawozdania z wyprawy przez długi czas będą robiły takie wrażenie, że zyska sobie miano

² Ciekawe opracowanie życia i działalności Banksa: O’Brian, P. 1989. *Joseph Banks: A Life*. London: Harvill Press.

³ Spis wszystkich pism Banksa można znaleźć pod hasłem: The Papers of Sir Joseph Banks at the State Library of New South Wales (lub np. <http://www2.sl.nsw.gov.au/banks/>).

¹ Warto wskazać na ważne opracowanie związane z historią nauki polskiej. *Historia nauki polskiej*, t. 1–9, Warszawa: Ossolineum 1970–1986.

bohatera i człowieka, który w znaczący sposób wpisał się w rozwój nauki. Książka przedstawia kolejne etapy jego kariery naukowej. Tylko ta wyprawa zadecydowała o dalszych losach Banksa. Z dzisiejszego punktu widzenia może to nie jest wyjątkowe osiągnięcie, ale pozwoliło mu ono zostać prezesem RS. Wybór Banksa na to stanowisko był bardzo szczęśliwy. Okazał się on świetnym organizatorem, posiadającym dobrą intuicję do wyławiania naukowych talentów. Książka Holmesa w interesujący sposób ukazuje działalność Banksa.

Obok Banksa postacią wiodącą omawianej książki jest Wilhelm Herschel (astronom, ale i muzyk, 1738–1822). Właściciel z pochodzenia Niemiec, który dopiero w Anglii znalazł środowisko przyjazne jego oczekiwaniom i ambicjom. Niesamowita pracowitość, a zwłaszcza pomysłowość, pozwoliły mu osiągnąć

sukcesy w zakresie konstrukcji narzędzi obserwacyjnych. Co więcej, jego zapał w ich ulepszaniu pozwolił na odkrycie planety Uran (13 marca 1781). Herschel do końca życia nie przestał zmagać się z naukowymi problemami. Holmes przytacza wiele ciekawych szczegółów z życia Herschela, a zwłaszcza fascynujące okoliczności dokonywanych przez niego odkryć. Również ciekawym aspektem tej książki są próby uchwycenia bardzo osobistych, emocjonalnych i społecznych aspektów funkcjonowania opisywanych postaci. W przypadku Herschela możemy śledzić np. pasję badawczą, ale zarazem pewną umiejętność zmagania się z codziennością (pogoda i finanse). Nie można pominąć naukowych zasług do Caroline Herschel⁴.

⁴ Warto przeczytać np.: Lubbock, C.A., 1933. *The Herschel Chronicle: The Life-story of William Herschel and His Sister, Caroline Herschel*. CUP Archive.

Jej wkład w rozwój astronomii został w tej pozycji odpowiednio doceniony.

Kolejną postacią, która odgrywa w książce znaczącą rolę, jest Humphry Davy (1778–1829, fizyk i chemik). Wyjątkowa postać. Człowiek, który dość szybko został zauważony przez Banksa, ale który musiał udowodniać swoją naukowy i techniczny geniusz. Silnie oddziaływał on na angielską społeczność, ale – jak zauważa autor – jego inspirujące badania zawsze wymagały dalszej „kontynuacji”.

Powyższe przykłady stanowią tylko naukową część prezentowanej książki. Obecna jest w niej też część związana z literaturą, a zwłaszcza z poezją. Autor wydobyl z archiwów również poetyckie zaangażowania omawianych postaci. Holmes z dużym wyczuciem przytacza fragmenty poezji wynikające z „duchowego porywu” omawianych autów, np.

Daveya. W książce znajdujemy też ciekawe odniesienia do poezji: lord Byron, Samuel Taylor Coleridge, John Keats czy William Wordsworth i inni. Są to ciekawe świadectwa poetyckie, nawiązujące do różnych odkryć naukowych⁵. Postawiło to trudne zadanie przed tłumaczem. Polski przekład w tym zakresie wykazuje dość wyraźne braki.

Autor książki opisuje losy wielu postaci. W „poruszaniu” się po treści znacznie ułatwia „Słownik postaci występujących w książce”. Zachęca on również do sięgnięcia po inne pozycje.

Przy okazji warto zwrócić uwagę na pewne redakcyjne aspekty tej książki. Na początku wyłania się problem tytułu i pod-

⁵ Ciekawym przykładem podobnej literatury jest książka: Lewis, C.S., 1986. Odrzucony obraz. Wprowadzenie do literatury średniowiecznej i renesansowej (The Discarded Image: An Introduction to Medieval and Renaissance Literature, 1964). Tłum. W. Ostrowski. Warszawa: Pax.

tytułu. Angielski tytuł *Age of Wonder* jest istotnie trudny do przetłumaczenia tak, by oddać wszystkie jego znaczeniowe niuansy. W każdym razie chodzi w nim nie o cuda, jakie działy się w tym okresie, lecz o podkreślenie, że był to okres podziwu nad światem. Tę samą myśl rozwija podtytuł, co w polskim przekładzie zostało zupełnie zatracone. Porównanie z oryginałem przekonuje, że książka została okrojona, np. o ciekawe zdjęcia. Co więcej, ten brak pociągnął za sobą dalsze konsekwencje. Musiano z polskiego tłumaczenia usunąć pewne przypisy, przez co fragmenty tekstu stały się nieczytelne. Zapewne zadecydowały o tym racje finansowe, ale czytelnik na tym sporo stracił. Widać w książce pośpiech wydawniczy; na szczęście tylko pojedyncze zdania są niezrozumiałe. Co prawda, sama książka ma charakter popularnonaukowy, a tekst pisany jest stylem ese-

istycznym, nie zwalnia to jednak z wydawniczej staranności.

Angielska redakcja książki posiada wiele cennych zalet. Noty biograficzne omawianych bohaterów książki zasługują na uznanie. W polskim wydaniu brak jest biogramu postaci np. W. Herschela.

Na szczególną uwagę zasługuje bibliografia zamieszczona w książce. Obszerna, ciekawa i kompetentna. Historyk nauki zajmujący się tym okresem może z niej z korzystać. Dobrym zabiegiem było wskazanie bardziej szczegółowej literatury dotyczącej każdej opisywanej w książce postaci.

Moja ostatnia uwaga nie ma charakteru redakcyjnego, ale raczej merytoryczny. Autor nie zniekształca faktów, ale widzi je ze swojej perspektywy. Z konsekwencją Anglika widzi naukę angielską jako tę, która wygrywała w tym czasie każdą naukową debatę. Jeśli nawet innym coś się

udało, to tylko dlatego, że Anglicy trochę się spóźnili. Ta nieco skrajna wizja uprawiania historii nauki nie umniejsza wartości pracy, jaka została włożona w opracowanie i przedstawienie interesującego, ale złożonego okresu rozwoju nauki, w którym – to należy przyznać – nauka angielska odgrywała wyróżnioną rolę.

Przedostatnie zdanie tej książki brzmi: „potrzebne są trzy cnoty, wiążące się nierozwal-

nie z kulturą nauki: uczucie za-
chwytu, głęboka nadzieja, ale
równocześnie poszukująca wiara
w przyszłość naszego globu”
(s. 605). Ten ogólny wniosek ba-
dacz kultury romantycznej Ri-
chard Holmes zamienił (stronica
po stronicy) na ciekawą i w wielu
miejscach porywającą opowieść
o czasach wyjątkowego przenika-
nia się ludzkiego ducha z nauką.

Janusz Mączka

Approaching the emergent conception of life

Stanisław Zięba, *Życie. Koncepcja emergentystyczna* (ang. *Life: The Concept of Emergence*), PWN, Warszawa 2013, ss. 390.

Recently, the idea of emergence arouses a lot of interests of scholars in many fields of science. The reason behind this is – among other things – the development of research on nonlinear systems, the chaos theory and the complexity theory. Despite this fact, in the Polish literature one cannot find too many books on the topic in question. The most renowned publications are: post-conference publication *Structure and emergence* (2006) edited by Michał Heller and Janusz Mączka and *Between the reduction and emergence: The dispute over the place of the mind in the physical world*

(2009) by Robert Poczubut. *Life: The Concept of Emergence* by Stanisław Zięba is another book on this topic.

Stanisław Zięba has been conducting his research for many years. The area of his interests includes ecology and issues concerning living beings. In his ecological researches, he focuses on the history of ecology, the methodology of ecology and the humanistic ecology. In his research concerning living beings, his main subjects of interest are the nature, origin and the organization of life. He is the author of many books and articles in this field. Among the most important scientific publications are: *The Development of Mechanistic Conception of Life in the Twentieth Century French Literature* (1986), *Dilemmas of Environmental Safety* (1998), *Nature and Man in the Humanistic Ecology* (1998), *Forest Ecosystem like*

a Human Value (2002), *History of Ecological Thought* (2004), *Perspectives of Human Ecology* (2008).

His most recent book, *Life. The Concept of Emergence*, refers to the themes that have been raised in the already mentioned *The Development of Mechanistic Conception of Life in the Twentieth Century French Literature*, *Nature and Man in the Humanistic Ecology* and *Perspectives of Human Ecology*. Its title suggests that the concept of life is analyzed from the emergent point of view, which is somewhat misleading. While the problem of life is indeed the main theme of the book, the emergent approach is largely presented in the last chapter. The Author claims that in his next book he plans to address this topic in a more detailed manner. The reviewed book focuses rather on the paradigm shift in the approach to the study of the subject.

Since the approach of reductionism occurs to be insufficient for explaining the life, we need another approach, and emergentism seems to be a good candidate for this task.

The book consists of an introduction, five chapters, conclusions and extensive bibliography. In the introduction one can find general information about biotic complexes that exhibit specific nature – they have properties that are not reducible to the relational properties between their parts. There are also presented a number of problems which are unsolvable in terms of extreme reductionism. This lead to the exploration of new research programs, among which emergentism seems to be the most promising one.

The first chapter entitled “Life in the presence of assumed epistemological and methodological strategy” includes the reflection on the relationship between

science and the knowledge of life. It refers to the problems with the methodology of science and provides general historical perspective of the knowledge of life – from Aristotle to modern times. It also underlines the strong relationship between understanding of biotic systems and methodology of science. On the basis of these considerations, the Author decides to deal with emergent and interdisciplinary approach.

In the next chapter, “Life as structural and functional complex”, the Author reveals the current attempts to build a systemic and comprehensive view of the nature. He focuses on two categories: the system and the complex, which are fundamental in the context of the problem of life and forms of living. With regard to these categories such concepts as complexity, organization, order, disorder, coincidence and necessity are also discussed. According

to the Author, if one aims to analyze the concept of life in systemic and comprehensive manner, the category of coincidence (and, consequently, of determinism) should be discarded.

The third chapter, „Life as an interdisciplinary problem” presents the concept of life from the physical and biological point of view. It reveals that the choice of the physical and biological facts that are meant to explain life is still under question and their interpretation depends on the adopted vision of the world.

In the fourth chapter, “Life as a property of reduction element”, the Author describes paradigm shift from extreme reductionism to moderate reductionism. The latter allows not only for physical interactions, but also for biological ones.

The last chapter – “Life as an emergent property” – is devoted to the concept emergence

as a research strategy. Its application allows the explanation of distinctiveness of biotic structures, their properties and functions. The Author also describes different interpretations of the concept of emergence. In the conclusion, he announces his plan to develop his analysis in his further publications. The book ends with extensive bibliography.

The big advantage of the book is the usage of extensive bibliography, especially the French-language literature, which is rarely cited by scholars who deal with the idea of emergentism. Almost one half of the literature was published in the 21st Century. In each chapter the Author refers to researches in biology, physics and philosophy that are more or less related to the subject. Nevertheless, these works are cited without comprehensive pres-

entation of their backgrounds, which could be inconvenient for the reader who is unfamiliar with problem in question. The Author briefly comments on the views of scholars he refers to and rises his own philosophical questions leaving them unanswered. These questions appear throughout the whole book which shows that there is still a lot to be done in the discussed topic.

It can be said that the book fulfills its task to serve as an introduction to the analysis of life in terms of the concept of emergence. This analysis - according to the announcement of the Author - will be developed in more detail in his next book. Moreover, frequently cited literature helps the reader to delve into the issues of life and emergentism.

Łukasz Sadłocha