

A Propensity-Based Account of the Arrow of Time in Quantum Mechanics

Seyed Mahdi Mohammadi¹  | Alireza Mansouri²  

1. PhD Candidate, Department of Philosophy of Science, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: m.mohammadi1229@iau.ac.ir.
2. Corresponding Author, Associate Professor, Philosophy of Science and Technology Department, Institute for Humanities and Cultural Studies, Tehran, Iran. E-mail: mansouri@ihcs.ac.ir.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 25 November 2025

Received in revised form 05
January 2026

Accepted 07 January 2026

Published online 14 July 2026

Keywords:

Arrow of Time, Objective
Modality, Objective
Probability, Propensity
Interpretation, Temporal
Asymmetry.

ABSTRACT

Background: This paper examines the arrow of time within the context of quantum mechanics focusing on Karl Popper's propensity interpretation of probability. Traditional accounts of temporal asymmetry often rely on special boundary conditions such as the Past Hypothesis or on reductive mechanisms like decoherence.

Objective: The aim is to show that objective propensities, understood as intrinsic dispositional properties of quantum systems, can independently ground temporal direction without appealing to external assumptions or initial state asymmetries.

Methods: The analysis adopts Popper's propensity framework, treating probabilities as real, ontological features of physical systems. These propensities are assumed to possess inherent asymmetry and directionality, which guide quantum processes, including wave function collapse.

Results: The study argues that propensities not only determine the likelihood of future events but also actively direct the evolution of quantum states. This built in directionality generates an objective, microscopic arrow of time. Unlike reductionist or decoherence based accounts, this approach does not depend on supplementary postulates such as the Past Hypothesis.

Conclusion: The paper concludes that temporal orientation arises naturally from the intrinsic probabilistic structure and dynamics of quantum systems. This propensity-based account is compatible with non-reductive metaphysical models, including the Growing Block theory, and provides a self-contained explanation of the direction of time.

Cite this article: Mohammadi, M. & Mansouri, A. (2026). A Propensity-Based Account of the Arrow of Time in Quantum Mechanics. *Journal of Philosophical Investigations*, 20 (55), 303-322. <https://doi.org/10.22034/jpiut.2026.70365.4352>



© The Author(s).

Publisher: University of Tabriz.

Extended Abstract

Introduction

The arrow of time remains one of the fundamental puzzles in physics. Unlike dynamical equations, which are time symmetric, observable processes such as measurement and entropy increase are irreversible and proceed from the past to the future (Albert, 2000, 123; Bacciagaluppi, 2007).

To explain this asymmetry and account for the arrow of time, several theoretical attempts have been

made. Among them, explanations based on wave function collapse and decoherence attempt to account for the asymmetry internally, relying on the structure of the theory itself. However, the standard formalism of quantum mechanics faces challenges in explaining the arrow of time. Wave function collapse is tied to measurement, preventing an account of the arrow of time that is based solely on the theory itself and independent of the observer. Likewise, spontaneous collapse models such as GRW attempt to overcome this limitation by introducing random collapses, but the predicted collapse rates are too low in practice to account for macroscopic irreversibility (Ghirardi et al., 1986). Consequently, despite their modifications, GRW frameworks still rely on external assumptions to explain the arrow of time (Dorato & Esfeld, 2010; Loewer, 2007).

Moreover, decoherence which arises from the interaction of a quantum system with its environment and consequently leads to the loss of quantum superpositions can itself be regarded as an asymmetric and time directed process. However, it can still be described within the unitary and time symmetric evolution of the Schrödinger equation. Thus, decoherence alone yields no definite outcomes and cannot be considered a complete explanation of temporal directionality.

Given the limitations of these approaches in incorporating asymmetry into the ontology of quantum mechanics, many of them appeal to the Past Hypothesis, which assumes a low entropy initial state (Albert, 2000, 162; Loewer, 2007). This reliance on external boundary conditions motivates the search for a fully internal, theory-based account of temporal direction. In this context, Popper's propensity interpretation of probability offers a view of quantum mechanics that grounds temporal orientation in objective propensities. Within this framework, time-asymmetric propensities govern quantum phenomena.

1. Propensities as Temporally Asymmetric Features

The propensity interpretation regards probabilities as objective tendencies of physical systems rather than as epistemic measures of ignorance (Gillies, 2000; Popper, 1959). Propensities assign weights to possible outcomes prior to their realization and guide the transition from superpositions to actualized events (Popper, 1982, 941-942, 943-944). They are inherently future-oriented, referring to unrealized possibilities (Belnap, 2007). The guidance of wave function collapse by intrinsically time asymmetric propensities makes it possible to account for the arrow of time without appealing to external assumptions.

Since time asymmetric propensities are expressed at the quantum level within the quantum state itself (Popper, 1982, 204). They provide an internal basis for temporal direction. In this view directionality arises from the propensities themselves, eliminating the need for external assumptions.

To explain the intrinsic directionality at the quantum level, we examine the relationship between quantum indeterminacy and the open future.

2. Quantum Indeterminacy and the Growing Block Universe

Propensities are indeterminate and oriented toward the future. Accordingly, they align with the intrinsic indeterminacy of quantum mechanics, where superpositions encompass a range of probabilities. From this arises the openness and indeterminacy of the future (Belnap, 2000; Miller 1995).

This view is consistent with the growing block model of the universe, in which the future remains open and indeterminate. Within this framework, propensities function as causal mechanisms through which possibilities are actualized, thereby expanding the block of reality (Belnap et al., 2001, 177, 185, 187).

Thus, the intrinsic indeterminacy of physical systems aligns with the openness of the future of reality providing a mechanism for temporal growth. This perspective shows that propensities at the quantum level not only offer an ontological basis for temporal asymmetry but also provide an intra-theoretical explanation of the arrow of time. thereby expanding the block of reality (Belnap et al., 2001, 170, 177, 185, 187).

3. Temporal Directionality in Light of Quantum Propensities

The propensity interpretation framework provides an ontological basis for temporal asymmetry. In this framework, the arrow of time is not an emergent entropic feature but is embedded at the quantum level within the ontological structure of quantum theory. Popper argued that the second law of thermodynamics and the increase of entropy, although describing a statistical arrow of time, cannot by themselves account for the fundamental direction of time (Weinert, 2023). The propensity interpretation can bridge this explanatory gap.

In the propensity view, the intrinsic tendencies of a system encompass the increase of entropy from low probability possible states to higher probability ones, thereby providing a basis for thermodynamic irreversibility. This perspective also redefines the very notion of probability. The Born rule is not a predictive convention but a quantification of propensities within the quantum state (Popper, 1982, 121, 13, 2007). Consequently, the probabilistic structure of quantum mechanics reflects objective indeterminacy and stands in contrast to the epistemic stance of the Copenhagen interpretation.

Popper's propensity interpretation, due to its affinity with the non-Humean view of laws and its emphasis on time asymmetric tendencies, is capable of explaining the arrow of time within quantum mechanics itself. Moreover, since propensities are present at all levels of reality and can account for the increase of entropy, this interpretation can offer an objective and unified account of temporal orientation across the quantum, thermodynamic, and macroscopic domains.

Conclusion

In the propensity view, temporal orientation at the quantum level is explained in terms of quantum dynamics and the way processes are guided. In this manner, the need for external assumptions such as the Past Hypothesis, the role of the observer, or environmental conditions is eliminated. By situating temporal direction within the probabilistic and dispositional structure of quantum mechanics, this framework establishes a connection between quantum indeterminacy, macroscopic irreversibility, and the ontology of time. Consequently, in the propensity view, the arrow of time is not something imposed from outside but an intrinsic feature arising from the dynamics of quantum systems.



تبیین پیکان زمان بر اساس گرایش‌های عینی در مکانیک کوانتومی

سید مهدی محمدی^۱ | علیرضا منصوری^۲ ✉

۱. دانشجوی دکتری فلسفه علم، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: m.mohammadi1229@iau.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه پژوهشی فلسفه علم، پژوهشکده مطالعات فلسفی و تاریخ علم، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی. تهران، ایران. رایانامه:

mansouri@ihcs.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف این مقاله بررسی پیکان زمان در مکانیک کوانتومی بر اساس تعبیر گرایشی پوپر است و نشان دادن این که چگونه گرایش‌های عینی، به عنوان ویژگی‌های ذاتی و جهت‌دار سیستم‌های کوانتومی، می‌توانند تبیینی مستقل از شرایط اولیه یا فرضیات بیرونی برای جهت‌مندی زمان ارائه دهند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴	روش پژوهش: پژوهش حاضر با اتکا به تحلیل مفهومی و نظری، تعبیر گرایشی احتمال را در بستر دینامیک کوانتومی بررسی کرده و نقش گرایش‌های عینی را در هدایت فرایندهایی نظیر تقلیل تابع موج و شکل‌دهی به عدم‌تعیین کوانتومی تبیین می‌کند.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵	یافته‌ها: یافته‌ها نشان می‌دهد که گرایش‌های عینی نه تنها احتمال رویدادهای آینده را تعیین می‌کنند، بلکه با ماهیت نامتقارن خود، مسیر تحول سیستم‌های کوانتومی و جهت‌گیری زمانی آنان را نیز هدایت می‌نمایند. این رویکرد، برخلاف نظریه‌های مبتنی بر تقلیل یا ناهمدوسی، نیاز به فرضیه‌هایی مانند «فرضیه گذشته» را برطرف می‌سازد و با مدل «جهان بلوکی در حال رشد» سازگاری دارد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷	نتیجه‌گیری: نتیجه‌گیری مقاله آن است که جهت زمان در نهایت از ساختار عینی احتمالات و دینامیک درونی سیستم‌های کوانتومی ناشی می‌شود. گرایش‌های کوانتومی، به عنوان ویژگی‌هایی واقعی و جهت‌دار، بنیانی خودبسنده برای پدیداری پیکان زمان فراهم می‌آورند.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۴	کلیدواژه‌ها: احتمال عینی، امکان عینی، پیکان زمان، تعبیر گرایشی احتمال، جهت‌مندی زمان.

استناد: محمدی، سید مهدی و منصوری، علیرضا (۱۴۰۵). تبیین پیکان زمان بر اساس گرایش‌های عینی در مکانیک کوانتومی، پژوهش‌های فلسفی، ۲۰ (۵۵)، ۳۲۲-

<https://doi.org/10.22034/jpiut.2026.70365.4352> ۳۰۳



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

مسئله پیکان زمان^۱ و عدم تقارن مشاهده‌شده میان گذشته و آینده از مسائل بنیادین و دیرپای فلسفه فیزیک به شمار می‌رود. این در حالی است که فرمالیسم بیشتر نظریه‌های بنیادین فیزیکی، مانند مکانیک نیوتنی، نسبت خاص و حتی معادله شرودینگر، نسبت به زمان متقارن هستند. یعنی اگر در معادلات این نظریه‌ها، زمان معکوس شود و t به $-t$ تبدیل شود، معادلات بدون تغییر باقی می‌ماند. به عبارت دیگر این معادله‌ها نسبت به معکوس زمانی ناوردا هستند، اما در تجربیات فیزیکی با فرایندهای برگشت ناپذیری روبرو هستیم که نسبت به زمان نامتقارن هستند. این تنش میان تقارن زمانی نظریات و عدم تقارن زمانی^۲ تجربه‌شده، پژوهش‌های گسترده‌ای را در پی داشته و رویکردهای متعددی برای تبیین منشأ این عدم تقارن پیشنهاد شده‌اند (آلبرت، ۲۰۰۰، ۲۳؛ بلنپ، ۲۰۰۷، ۵۹۶؛ کالندر، ۲۰۰۴، ۶۳۰؛ پوپر، ۱۹۸۲، ۹۴؛ وینر، ۲۰۲۳، ۱۶۹).

بخشی از این تلاش‌ها به مکانیک کوانتومی معطوف بوده است. در این چارچوب، پدیده‌هایی نظیر تقلیل تابع موج^۳، ناهم‌دوسی^۴، نظریه‌های تقلیل خودبه‌خودی^۵ (مانند GRW^۶) و تعبیر متفاوت از وضعیت کوانتومی به‌عنوان کاندیداهایی برای توضیح پیکان زمان مطرح شده‌اند (آلبرت، ۲۰۰۰، ۱۵۲؛ باسیاگالوی، ۲۰۰۷؛ چن، ۲۰۲۱؛ دورتو و اسفلد، ۲۰۱۰، ۴۸).

با وجود این، این رویکردها اغلب برای تبیین جهت‌مندی زمان^۸ به مفروضاتی فراتر از نظریه، مانند «فرضیه گذشته»^۹ یا شرایط اولیه خاص، متکی‌اند. این اتکا به عناصر بیرون‌نظری موجب می‌شود که نتوان جهت زمان را به‌عنوان ویژگی‌ای ذاتی و درون‌زای دینامیک کوانتومی فهم کرد (آلبرت، ۲۰۰۰، ۱۶۲).

در این میان، تعبیر گرایشی پوپر^{۱۰} از احتمال، که آن را به‌مثابه «گرایش‌های عینی» و نامتعیین سیستم‌های فیزیکی به تحقق نتایج خاص در آینده در نظر می‌گیرد، چشم‌اندازی نو برای تبیین پیکان زمان فراهم می‌آورد (میلر، ۱۹۹۵؛ پوپر، ۱۹۵۹). بر اساس این دیدگاه، گرایش‌ها نه تنها ویژگی‌هایی مستقل از ناظر^{۱۱} هستند، بلکه ذاتاً به آینده معطوف‌اند و این ماهیت جهت‌دار، می‌تواند مبنایی برای توضیح عدم تقارن زمانی باشد (بلنپ، ۲۰۰۷، ۵۹۵). گرچه این ایده به‌طور پراکنده در ادبیات مطرح شده، ابعاد دقیق کارکرد گرایش‌ها در فرایندهای کوانتومی، و ظرفیت آن‌ها برای تبیین خودبسنده جهت‌مندی زمان، تاکنون به‌طور نظام‌مند بررسی نشده است.

این مقاله بر آن است تا این خلأ نظری را با ارائه تحلیلی منسجم از نقش گرایش‌های عینی^{۱۲} در دینامیک کوانتومی و ارتباط آن با پیکان زمان پر کند. به‌طور خاص، این پژوهش این فرضیه را پی می‌گیرد که گرایش‌های نامتقارن زمانی^{۱۳}، به‌عنوان

^۱Arrow of Time^۲Temporal Symmetry^۳Temporal Asymmetry^۴Wave Function Collapse^۵Decoherence^۶Spontaneous Collapse Theories^۷Ghirardi-Rimini-Weber^۸Temporal Directionality^۹Past Hypothesis^{۱۰}Popper's Propensity Interpretation^{۱۱}Observer^{۱۲}Objective Propensities^{۱۳}Temporally Asymmetric Propensities

ویژگی‌هایی ذاتی و غیرقابل فروکاست از سیستم‌های کوانتومی، می‌توانند جهت‌گیری زمانی فرایندهایی مانند تقلیل تابع موج را هدایت کنند و از این رهگذر، مبنایی درون‌نظری برای تبیین جهت زمان فراهم آورند. این تبیین، مستقل از شرایط اولیه و فرضیه گذشته^۱ و در هماهنگی با مدل «جهان بلوکی در حال رشد» ارائه می‌شود (بلنپ، ۲۰۰۷، ۵۹۵). در این مدل امکان‌های آینده هنوز تحقق پیدا نکرده‌اند و آینده باز است اما گذشته کاملاً قطعی شده است. به عبارت دیگر، آینده مجموعه‌ای از امکان‌های در حال تحقق است که با تحقق این امکان‌ها مانند درختی در حال رشد گسترش پیدا می‌کند. در این دیدگاه گذشته و حال به عنوان تنه یک درخت در نظر گرفته می‌شود که با بالفعل شدن امکان‌های بالقوه در زمان حال رشد می‌کند (ساویت، ۲۰۲۱).

برای بررسی این مسئله، ساختار مقاله به صورت زیر تنظیم شده است: در بخش دوم نشان داده می‌شود که چرا رویکردهای مبتنی بر تقلیل تابع موج یا ناهمدوسی، برای تبیین پیکان زمان به مفروضات بیرونی وابسته‌اند. بخش سوم به معرفی و تبیین فلسفی و فیزیکی تعبیر گرایشی پوپر و مفهوم گرانش‌های عینی می‌پردازد. در بخش چهارم نقش این گرایش‌ها در ایجاد جهت‌مندی فرایندهای کوانتومی تحلیل می‌شود و استدلال می‌شود که جهت زمان می‌تواند برآمده از ساختار گرایشی سیستم‌های کوانتومی باشد. در نهایت، بخش پنجم مقاله را جمع‌بندی کرده و پیامدهای نظری این رویکرد را بررسی می‌کند.

۱. مکانیک کوانتومی و پیکان زمان

در تلاش برای تبیین پیکان زمان، مکانیک کوانتومی جایگاهی متمایز یافته است؛ زیرا برخی فرایندهای کوانتومی، برخلاف معادلات متقارن زمانی نظریه‌های بنیادین فیزیک، واجد عدم تقارن زمانی‌اند. از جمله این فرایندها، تقلیل تابع موج و ناهمدوسی مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. بسیاری از رویکردهای پیشنهادی کوشیده‌اند با تمرکز بر این فرایندها، پیکان زمان را به مثابه پیامد مستقیم دینامیک کوانتومی تبیین کنند (آلبرت، ۲۰۰۰، ۱۴۸؛ باسیاگالوبی، ۲۰۰۷؛ بوهم، ۱۹۹۹).

با این حال، همچنان پرسش بنیادین پابرجاست: آیا فرایندهایی مانند تقلیل یا ناهمدوسی، می‌توانند به‌تنهایی مبنایی درون‌نظری برای تبیین جهت‌مندی زمان فراهم کنند؟ بخش حاضر با بررسی دو فرایند تقلیل تابع موج و ناهمدوسی، محدودیت‌های آن‌ها را در تحقق این هدف روشن می‌سازد.

۱-۱. فرایندهای تقلیل تابع موج و ناهمدوسی

یکی از کانونی‌ترین ویژگی‌های مکانیک کوانتومی، گذار از حالت برهم‌نهی^۲ به وضعیت متعین پس از اندازه‌گیری^۳ است؛ فرایندی که به عنوان تقلیل تابع موج شناخته می‌شود. در این گذار، تابع موج که حاوی طیفی از امکان‌های هم‌بود است، به یکی از حالت‌های خاص فرو می‌کاهد. برخلاف معادله شرودینگر که تحول یکنانه^۴ و متقارن زمانی دارد، این فرایند برگشت‌ناپذیر و جهت‌مند تلقی می‌شود و از همین رو، برخی آن را مبنایی برای پیکان زمان دانسته‌اند (آلبرت، ۲۰۰۰، ۱۴۴، ۱۴۲).

با وجود این، یک نقد مهم آن است که در مکانیک کوانتومی استاندارد، تقلیل تابع موج به عنوان یک فرایند فیزیکی درون‌نظری تعریف نشده است، بلکه تنها هنگام مداخله ناظر یا ابزار اندازه‌گیری ظاهر می‌شود. این وابستگی به عوامل بیرونی، تبیین

^۱ فرضیه گذشته یک فرض بیرونی و اضافی برای تبیین پیکان زمان است که براساس آن جهان در لحظات اولیه از آنروپی بسیار پایینی برخوردار بوده است. در واقع براساس این فرض بیرونی شرایط اولیه‌ای خارج از خود نظریه در نظر گرفته می‌شود تا بتوانیم جهت‌مندی زمان را تبیین کنیم. به عبارت دیگر، این شرط اولیه برای تبیین پیکان زمان ضروری است و تنها براساس قوانین دینامیکی نمی‌توانیم جهت‌مندی زمان را تبیین کنیم.

^۲Growing Block Universe

^۳Superposition

^۴Measurement

^۵Unitary Evolution

جهت‌مندی زمان را از دل دینامیک نظریه دشوار می‌سازد. از این‌رو، نظریه‌هایی چون GRW تلاش کرده‌اند تقلیل را به‌صورت فرآیندی خودبه‌خودی و عینی وارد ساختار دینامیکی نظریه کنند (گیراردی و باسی، ۲۰۰۲؛ گیراردی و همکاران، ۱۹۸۶). با این حال، همچنان مشخص نیست که آیا این تقلیل‌های تصادفی با نرخ پایین، به‌تنهایی برای تبیین جهت‌گیری زمانی در مقیاس ماکروسکوپی کفایت می‌کنند یا نه (آلبرت، ۲۰۰۰، ۱۴۹، ۱۵۶).

در کنار این، پدیده ناهمدوسی نیز به‌عنوان سازوکار دیگری برای درک گذار از حالت کوانتومی به کلاسیکی مطرح شده است. ناهمدوسی حاصل برهم‌کنش سیستم کوانتومی با محیط اطراف است و موجب از بین رفتن همبستگی‌های کوانتومی^۱ میان مؤلفه‌های تابع موج می‌شود. این فرایند نیز نامتقارن زمانی به‌نظر می‌رسد و ممکن است نقشی در شکل‌گیری رفتار جهت‌دار زمانی ایفا کند. با این حال، ناهمدوسی در چارچوب تحول یکانی و متقارن شرودینگر قابل توصیف است و خود به تحقق یک نتیجه مشخص نمی‌انجامد. بنابراین، نمی‌توان آن را تقلیل واقعی تلقی کرد (باسیاگالوی، ۲۰۰۷، ۱۰۵۱؛ زه، ۲۰۰۷، ۱۴۷).

در مجموع، گرچه تقلیل و ناهمدوسی هریک نشانگر نوعی جهت‌مندی در رفتار کوانتومی‌اند، اما تبیین کامل و مستقلی برای پیکان زمان ارائه نمی‌کنند. تقلیل به ناظر یا فرضیات بیرونی وابسته است و ناهمدوسی بدون تحقق نهایی، تنها روند آماری از بین رفتن همبستگی‌ها را توضیح می‌دهد. از این‌رو، بررسی رویکردهای جایگزین که بتوانند جهت زمان را به‌مثابه ویژگی ذاتی و مستقل نظریه تبیین کنند، ضرورت می‌یابد.

۱-۲. محدودیت‌های رویکردهای تقلیلی و نقش تعیین‌کننده فرضیه گذشته

همان‌گونه که در بخش پیشین دیدیم، فرایندهایی نظیر تقلیل تابع موج یا ناهمدوسی، هرچند واجد عدم تقارن زمانی‌اند، به‌تنهایی برای تبیین کامل پیکان زمان کفایت نمی‌کنند. در این بخش به یکی دیگر از مهم‌ترین دلایل این ناکفایتی می‌پردازیم، یعنی وابستگی آن‌ها به مفروضات بیرون‌نظری برای تعیین جهت خاص زمان. در این میان، فرضیه گذشته نقشی کلیدی ایفا می‌کند. فرضیه گذشته، که خاستگاه آن به مباحث آماری در مکانیک کلاسیک بازمی‌گردد، بیان می‌کند که جهان در زمان آغازین خود در وضعیتی با آنتروپی بسیار پایین قرار داشته است.

این فرض به‌عنوان یک شرط اولیه نامتقارن^۲، جهت خاصی برای فرایندهای طبیعی (از جمله تقلیل‌های کوانتومی یا افزایش آنتروپی) تعیین می‌کند. به بیان دیگر، اگر چنین فرضی در کار نباشد، حتی در نظریه‌هایی مانند GRW که تقلیل تابع موج را به‌صورت فرایندی تصادفی و نامتقارن زمانی در دل دینامیک نظریه وارد کرده‌اند، همچنان مشخص نمی‌شود که چرا این فرایندها همواره در جهت آینده رخ می‌دهند، نه بالعکس (آلبرت، ۲۰۰۰، ۱۶۰، ۱۶۲؛ دورتو و اسفلد، ۲۰۱۰، ۴۸؛ لور، ۲۰۱۲، ۱۲۶).

مشکل اساسی آن است که خود دینامیک نظریه‌های تقلیلی (چه خطی مانند شرودینگر، چه غیرخطی مانند GRW) نمی‌تواند بدون یک قید اولیه خارجی، جهت زمانی را به‌صورت درون‌نظری تعیین کند. نرخ پایین وقوع تقلیل در GRW نیز باعث می‌شود که این فرایندها نتوانند به‌تنهایی ساختار زمانی کلان‌مقیاسی مانند جهت ترمودینامیکی زمان^۳ یا رفتار غیرقابل بازگشت سیستم‌های ماکروسکوپی را توضیح دهند (آلبرت، ۲۰۰۰، ۱۳۲، ۱۳۳، ۱۴۹، ۱۵۶، ۱۵۷، ۱۶۰، ۱۶۲؛ گیراردی و همکاران، ۱۹۸۶، ۴۷۲).

^۱Quantum Correlations

^۲Asymmetric Initial Condition

^۳Thermodynamic Arrow of Time

از سوی دیگر، ناهمدوسی نیز با آنکه روندی جهت‌دار است، اما به دلیل تکیه‌اش بر تعامل سیستم با محیط، خود به عنوان بخشی از دینامیک نظریه تلقی نمی‌شود و نیازمند شرایط اولیه خاصی است تا همواره به تقلیل تابع موج در جهت آینده بینجامد. این وابستگی به مفروضات برون نظری، انسجام نظری و تبیین‌پذیری درونی این رویکردها را تضعیف می‌کند. در نتیجه، مسئله همچنان باقی می‌ماند: چرا گذار از امکان به فعلیت، همواره در یک جهت خاص از زمان رخ می‌دهد؟ و این در حالی است که قوانین بنیادی فیزیک (به جز موارد معدود) نسبت به معکوس زمانی نامتقارن نیستند (پوپر، ۱۹۵۶، ۵۳۸؛ پرایس، ۱۹۹۶، ۳، ۴۲).

به همین دلیل، نیاز به رویکردی وجود دارد که بتواند منشأ جهت‌مندی زمان را از درون ساختار نظریه استخراج کند، بی‌آنکه به شرایط اولیه خاص یا مفروضات آماری کلاسیک وابسته باشد. در بخش بعد، تعبیر گرایشی پوپر معرفی خواهد شد که با تأکید بر «گرایش‌های عینی و زمان‌مند» سیستم‌های فیزیکی، تلاشی برای پاسخ به این پرسش بنیادین از درون نظریه کوانتومی ارائه می‌دهد.

۲. تعبیر گرایشی: احتمال، امکان و جهت‌مندی زمان

بررسی انتقادی رویکردهای پیشین نشان داد که تبیین جهت‌مندی زمان در چارچوب مکانیک کوانتومی، مادامی که وابسته به شرایط اولیه یا فرضیه‌های بیرونی باشد، نمی‌تواند تصویری درون‌سازمان‌یافته و خودبسنده از پیکان زمان ارائه دهد. بنابراین، ضرورت دارد رویکردی بررسی شود که از دل ساختار نظریه کوانتومی و مستقل از ملاحظات آماری کلاسیک، بتواند توضیحی عینی برای ظهور جهت زمان عرضه کند.

در این زمینه، تعبیر گرایشی احتمال که در میانه قرن بیستم توسط کارل پوپر مطرح شد، چشم‌اندازی نو برای تبیین درون نظری جهت زمان فراهم می‌کند. تعبیر گرایشی پوپر از احتمال بر مبنای گرایش‌های عینی، تعبیری عینی از احتمال ارایه می‌دهد. در این دیدگاه گرایش‌ها ویژگی‌های واقعی خود سیستم فیزیکی هستند که تحقق امکان‌های سیستم را هدایت می‌کنند. بر این اساس ویژگی‌های فیزیکی مانند نیرو، مفهوم میدان و رسانایی الکتریکی گرایش‌های فیزیکی هستند. این گرایش‌ها به علت ساختار سیستم فیزیکی دربرگیرنده امکان‌هایی هستند و تحقق هر کدام از این امکان‌ها براساس واقعیت فیزیکی و شرایط تجربی سیستم است. هر کدام از این امکان‌ها وزن معینی از احتمال را دربردارند. لذا تعبیر گرایشی پوپر از احتمالات مبتنی بر امکان‌های خود سیستم فیزیکی و احتمال تحقق هر یک از این امکان‌های واقعی است. بنابراین با تعبیری عینی از احتمال روبرو هستیم. این تعبیر، مبتنی بر دیدگاه واقع‌گرایی علمی است. به طوری که خود پوپر بیان می‌کند که واقع‌گرایی پیام اصلی این دیدگاه است و این تعبیر از احتمالات با عینیت‌گرایی و واقع‌گرایی علمی در تناظر است (پوپر، ۱۹۵۹، ۳۱؛ ۱۹۸۲، ۱۸۰۹۴). این تعبیر، برخلاف برداشت‌های کلاسیک یا ذهن‌گرایانه از احتمال، بر وجود گرایش‌های عینی و زمان‌مند در سیستم‌های فیزیکی تأکید دارد؛ ویژگی‌هایی که به طور بالقوه رفتار آینده سیستم را جهت‌دهی می‌کنند. از منظر این رویکرد، احتمال صرفاً بیانگر عدم آگاهی ما نیست، بلکه نشان‌دهنده تمایلات ذاتی یک سیستم برای تحقق برخی پیامدها در آینده است (پوپر، ۱۹۸۲، ۸، ۲۸، ۸۸، ۱۰۹، ۱۸۶). در ادامه، به تبیین این دیدگاه و بررسی بنیادهای مفهومی و هستی‌شناختی آن پرداخته می‌شود.

۲-۱. گرایش‌ها به عنوان ویژگی‌های عینی سیستم‌های فیزیکی

در قلب تعبیر گرایشی، این پیش‌فرض نهفته است که احتمال یک ویژگی فیزیکی عینی است؛ نه صرفاً ابزار آماری یا معرفتی. پوپر در آثار خود تأکید می‌کند که سیستم‌های فیزیکی، تحت شرایط مشخص، دارای تمایلاتی معین برای تحقق برخی نتایج

ممکن هستند. این تمایلات که به آن‌ها «گرایش» گفته می‌شود، همانند دیگر ویژگی‌های فیزیکی مانند جرم یا بار الکتریکی، بخشی از ساختار واقعی و مستقل از ناظر سیستم محسوب می‌شوند (پوپر، ۱۹۵۹، ۳۱، ۳۸؛ ۱۹۸۲، ۸۸؛ سوارز، ۲۰۰۷، ۴۲۰). گرایش‌ها به‌صورت بالقوه، امکان‌های آینده را در خود نهفته دارند و با رخداد یک رویداد خاص، یکی از این امکان‌ها به فعلیت می‌رسد. بنابراین، فرایند گذار از حالت امکانی به حالت بالفعل، در چارچوب این تعبیر، به‌واسطه گرایش‌های عینی جهت‌دهی می‌شود. به عبارت دیگر، گرایش‌ها زمینه‌ساز تحقق آینده‌اند و این ویژگی آن‌ها را از مدل‌های آماری صرف یا تعبیر ذهنی متمایز می‌سازد (بونزه، ۱۹۷۶؛ ۱۹۸۱؛ فترز، ۱۹۸۱؛ پوپر، ۱۹۵۹؛ ۱۹۸۲، ۲۰۴).

این تلقی از احتمال به‌ویژه با عدم تعین بنیادی در مکانیک کوانتومی هم‌راستا است. در حالی که برخی تفسیرها احتمال را به چهل ما نسبت می‌دهند، تعبیر گرایشی، آن را بخشی از ساختار هستی‌شناختی جهان می‌داند. از این منظر، عدم تعین کوانتومی نه یک نقیصه معرفتی، بلکه بازتابی از طبیعت واقعی سیستم‌هاست، و گرایش‌ها ابزار مناسب برای توصیف این عدم تعین هستند (میلر، ۱۹۹۵؛ پوپر، ۱۹۵۹).

در بخش‌های بعد، نشان داده خواهد شد که چگونه همین گرایش‌های عینی، به‌واسطه نامتقارن بودن ذاتی‌شان نسبت به زمان، می‌توانند مبنایی نظری برای تبیین پیکان زمان در سطح کوانتومی فراهم آورند.

۲-۲. گرایش‌ها به‌عنوان معیاری عینی از پتانسیل یا امکان برای تحقق پیامدهای آینده

پس از آنکه روشن شد گرایش‌ها بخشی از ویژگی‌های عینی سیستم‌های فیزیکی‌اند، پرسش بعدی آن است که نقش این ویژگی‌ها در تعیین مسیر آینده چیست؟ تعبیر گرایشی، پاسخ به این پرسش را در نسبت میان «گرایش» و «امکان» جستجو می‌کند. در این چارچوب، گرایش‌ها نه صرفاً احتمال‌های عددی، بلکه پتانسیل‌های واقعی برای فعلیت‌یافتن امکان‌های خاص در آینده هستند (بلنپ، ۲۰۰۷).

در واقع، آنچه یک سیستم را به‌سوی تحقق یکی از مسیرهای ممکن هدایت می‌کند، نه انتخاب تصادفی یا عامل بیرونی، بلکه وزن‌دهی درونی گرایش‌هاست. این تمایلات، در دل ساختار فیزیکی سیستم و شرایط آزمایشی آن نهفته‌اند و به‌مثابه راهنمای تحقق رویدادها عمل می‌کنند (تراخوویچ، ۲۰۱۹، ۱۲).

بنابراین، آینده در این دیدگاه نه قطعی و از پیش تعیین‌شده است، و نه کاملاً بی‌ساختار و تصادفی؛ بلکه مجموعه‌ای از امکان‌های باز است که برخی از آن‌ها، بر مبنای گرایش‌های حاضر، شانس بیشتری برای تحقق دارند (میلر، ۱۹۹۵، ۱۴۵؛ سوارز، ۲۰۲۵، ۹۴).

در ادامه، این ارتباط میان گرایش، امکان و آینده باز، با دقت بیشتری بررسی خواهد شد تا نشان داده شود چگونه می‌توان از این ساختار، بنیانی برای تبیین جهت‌داری زمان استنتاج کرد.

از منظر گرایشی، هرگاه احتمال معنا دارد، امکانی عینی در کار است، و احتمال، معیار کمی تحقق آن امکان به‌شمار می‌رود. این دیدگاه، برخلاف تلقی‌های ذهنی یا بسامدی از احتمال، جهان را نه صرفاً متشکل از واقعیت‌های بالفعل، بلکه آکنده از امکان‌های بالقوه عینی می‌بیند که گرایش‌ها بر آن‌ها دلالت دارند. در این چارچوب، «پیش از تحقق رویداد»، واقعیت در

^۱Propensity

^۲ بخشی از تفاسیر احتمال، تفاسیر معرفتی و ذهنی هستند. در این گونه از تفسیرها، احتمالات مبنایی ذهنی دارند که درجات اعتماد یا باور به یک گزاره را براساس عوامل گوناگون اندازه‌گیری می‌کند. در واقع در این دیدگاه احتمال به علت چهل ما از تمامی شرایط سیستم است. به عبارت دیگر در تفاسیر ذهنی، چهل ما نسبت به سیستم و تحقق یک گزاره مبنایی برای احتمال است. لذا در تقابل با دیدگاه‌های عینی از احتمال قرار می‌گیرند.

وضعیت‌های چندامکانی حضور دارد و تنها یکی از این امکان‌ها به واسطه سازوکار گرایشی به فعلیت می‌رسد (لومباردی و همکاران، ۲۰۲۲، ۳، ۱۰؛ پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰۳، ۲۰۴).

اهمیت این تلقی در آن است که گرایش‌ها صرفاً ابزار پیش‌بینی یا بیان شک ما نسبت به نتیجه نیستند، بلکه مکانیزم واقعی جهان برای گذار از امکان به فعلیت‌اند. برای نمونه، وقتی یک ذره رادیواکتیو ممکن است در لحظه‌ای خاص واپاشی کند، تعبیر گرایشی این امکان را صرفاً بر حسب عدم اطلاع یا جهل ما تحلیل نمی‌کند، بلکه آن را نشانگر تمایل عینی سیستم به وقوع آن رویداد می‌داند (پوپر، ۱۹۸۲، ۹۴، ۱۰۷).

از این حیث، گرایش‌ها با عدم تعین بنیادین مکانیک کوانتومی همخوان‌اند. زیرا در هر لحظه، سیستم کوانتومی در وضعیت برهم‌نهی قرار دارد که نشانگر حضور امکان‌های متعدد است. گرایش‌ها دقیقاً در این بستر عمل می‌کنند؛ آن‌ها نه فقط احتمال ریاضی، بلکه تمایلات واقعی برای تحقق یک پیامد خاص‌اند، تمایلاتی که با تحقق یکی از امکان‌ها، تحقق گذشته و شکل‌گیری آینده را رقم می‌زنند (پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰).

این درک از گرایش به عنوان پتانسیل عینی تحقق آینده باز، در بخش بعد با تحلیل عدم تقارن زمانی گرایش‌ها تکمیل خواهد شد؛ جایی که نشان داده می‌شود چرا گرایش‌ها همواره به‌سوی آینده معطوف‌اند و چگونه این ویژگی آن‌ها می‌تواند بنیان پیکان زمان را در سطح کوانتومی توضیح دهد.

۲-۳. سازوکار هدایت تقلیل تابع موج توسط گرایش‌ها

در این دیدگاه، گرایش‌ها فرایندهای کوانتومی مانند تقلیل تابع موج را هدایت می‌کنند و «مسیر تحقق را شکل می‌دهند» و می‌توانند پیکان زمان را در سطح کوانتومی تبیین کنند. گرایش‌ها، ویژگی‌های عینی و فیزیکی سیستم کوانتومی هستند، لذا تابع موج صرفاً یک ابزار ریاضی برای توصیف این گرایش‌ها نیست، بلکه بیانگر توزیعی از گرایش‌های احتمالاتی است که به هر امکان وزنی برای تحقق نسبت می‌دهد. همچنین پوپر قوانین مکانیک کوانتومی، به‌ویژه قاعده بورن^۱ را شاهدهی بر عینی بودن این احتمالات می‌داند. این قاعده احتمالاتی، احتمال هر نتیجه اندازه‌گیری در سیستم کوانتومی را بیان می‌کند و چگالی این احتمال را با مربع قدرمطلق تابع موج برابر می‌داند. طبق دیدگاه پوپر، وزن‌هایی که قاعده بورن به نتایج ممکن سیستم کوانتومی نسبت می‌دهد، بیانگر میزان گرایش ذاتی سیستم، برای تحقق هر کدام از آن نتایج ممکن هستند و این قاعده بیانگر شدت یک گرایش برای تحقق یک نتیجه بخصوص است.

هنگامی که یک سیستم کوانتومی با یک دستگاه اندازه‌گیری یا محیط اطراف خود برهم‌کنش می‌کند، این برهم‌کنش منجر به تغییر توزیع گرایش‌ها می‌شود. در این فرآیند، گرایش‌های عینی که تابع شرایط تجربی و شرایط کلی آزمایش هستند، یک امکان خاص را در جهت تحقق هدایت می‌کنند. گرایش‌ها مانند نیروهای فیزیکی هستند و هدایت آنها مسیر گذار از امکان به فعلیت را تعیین می‌کند. این مکانیسم کاملاً عینی و مستقل از ناظر است، زیرا تقلیل تابع موج یک رویداد فیزیکی است که مبتنی بر دینامیک سیستم است و به دلیل عمل مشاهده توسط یک ناظر آگاه نیست.

در واقع پوپر استدلال می‌کند که تقلیل تابع موج را می‌توان بدون دخالت ناظر یا آگاهی انسانی توضیح داد و این ایده را به‌عنوان پاسخی به مشکل اصلی در تعبیر کپنهاگی مطرح می‌کند که در آن، تقلیل تابع موج به عمل مشاهده وابسته است (پوپر، ۱۹۸۲). او تأکید می‌کند:

^۱Non-actualized possibilities

^۲Born Rule

اغلب ادعا می‌شود که با توجه به وضعیت نظریه کوانتومی، عین و سوژه دیگر نمی‌توانند به طور واضح از هم جدا شوند.... اما این آموزه کاملاً نادرست است. نظریه کوانتوم به اندازه هر نظریه دیگری می‌تواند عینی باشد (پوپر، ۱۹۸۲، ۱۱۹، ۱۲۰).

پوپر تقلیل تابع موج را به عنوان بخشی از یک فرآیند آماری عینی می‌بیند. او این مفهوم را با مثالی از زنجیره مارکوف^۱ یا پیاده‌روی تصادفی مقایسه می‌کند، جایی که «تقلیل بسته موج» تنها یک تغییر در توزیع احتمالاتی است که توسط گرایش‌های عینی و چیدمان آزمایش هدایت می‌شود، بدون نیاز به دخالت ناظر (پوپر، ۱۹۸۲، ۱۲۴).

این دیدگاه با آزمایش دو شکاف بهتر توضیح داده می‌شود. در این آزمایش الگوهای تداخلی از باریکه‌ای از ذرات بر روی صفحه‌ای که بعد از دو شکاف قرار دارند، نمایان می‌شود که بیان کننده خاصیت موجی ذرات است. اگر سیستم را برای عبور باریکه‌ای از ذرات از هر کدام از این شکاف‌ها اندازه‌گیری کنیم، عمل اندازه‌گیری باعث تقلیل تابع موج می‌شود و حالت موجی ذرات از بین می‌رود. این آزمایش تبیین کننده دوگانگی موجی- ذره‌ای در سیستم‌های کوانتومی است. پوپر توضیح می‌دهد که ذره فقط از یکی از شکاف‌ها عبور می‌کند، اما گرایش‌های آن تحت تأثیر کل آرایش تجربی (شامل هر دو شکاف) قرار می‌گیرند. حضور هر دو شکاف ساختار گرایش‌های ذره را تغییر می‌دهد و توزیع احتمالاتی بر روی صفحه نمایش را تعیین می‌کند. بنابراین، «هدایت» به معنای تأثیر فیزیکی گرایش‌ها بر دینامیک سیستم است که منجر به تحقق یکی از نتایج ممکن می‌شود. این تأثیر، رابطه‌ای فیزیکی و مستقل از باورهای ذهنی است (پوپر، ۱۹۸۲، ۱۵۳؛ سوارز، ۲۰۲۵، ۱۵۳).

بنابر این، گرایش‌ها به عنوان تمایلات ذاتی و فیزیکی سیستم‌های کوانتومی عمل می‌کنند که فرآیندهای مانند تقلیل تابع موج را به شکلی عینی و مستقل از ناظر هدایت می‌کنند. این فرآیند، گذار از امکان به فعلیت را شکل می‌دهد و پیکان زمان در سطح کوانتومی را بر اساس دینامیک گرایشی آشکار می‌سازد.

۲-۴. ظهور پیکان زمان از گرایش‌ها و عدم تعین کوانتومی

به طور کلی عدم تعین (به ویژه در مکانیک کوانتومی) و گرایش‌ها ارتباط تنگاتنگی با یکدیگر دارند. به طوری که تعبیر گرایشی بدون نامتعین‌گرایی ناکافی است و نامتعین‌گرایی نیز بدون گرایش‌های ناکافی است و پذیرش هر کدام نیاز به پذیرش دیگری است (میلر، ۱۹۹۵).

همان‌طور که در بالا اشاره شد، «پیکان زمان به عنوان ویژگی عینی گرایش‌ها در سطح کوانتومی پدیدار می‌شود». تبیین این فرآیند به این شرح است:

نخست اینکه، گرایش‌ها به صورت ذاتی به آینده تعلق دارند و نقش وزن‌دهی به امکان‌های آینده را ایفا می‌کنند. از دیدگاه پوپر، احتمال در قالب گرایش‌های عینی، یک ویژگی فیزیکی است که وضعیت یک سیستم را نسبت به تحقق یک نتیجه خاص می‌سنجد (میلر، ۱۹۹۵؛ پوپر، ۱۹۵۹، ۳۶؛ ۱۹۸۲، ۸، ۲۰۴). به بیان دیگر، احتمال دیگر صرفاً بیانگر جهل ما نیست، بلکه به طور فیزیکی می‌گوید جهان در یک وضعیت مشخص، چه تمایلی به انجام دارد. جهت‌مندی فعلیت یافتن امکان‌ها در خود تعریف گرایش‌ها نهفته است، زیرا آنها ذاتاً آینده‌نگر هستند و جهت "شدن" در بافت آن‌ها قرار دارد.

علاوه بر این، فرآیند تقلیل تابع موج در مکانیک کوانتومی، گذار از «حالت مجموعه‌ای از امکان‌ها» (برهم‌نهی) به حالت تحقق یافتن یکی از امکان‌ها است. این فرآیند، یک فرآیند نامتقارن زمانی است، زیرا شاخه‌های متعدد و ممکن فضا-زمان که

^۱Markov Chain

در آینده وجود دارد را می‌بندد و یک مسیر مشخص را انتخاب می‌کند. در این چارچوب، هر تحقق، شاخه‌ای از فضا-زمان را که انتخاب شده است را تثبیت می‌کند و تعداد شاخه‌های باز را کاهش می‌دهد (بلنپ و همکاران، ۲۰۰۱، ۱۸۳، ۱۸۲، ۱۸۱). این کاهش شاخه‌های ممکن برای فضا-زمان، یک جهت‌مندی زمانی عینی را از مجموعه امکان‌ها به سمت مجموعه واقعیت‌های تحقق‌یافته ایجاد می‌کند.

همچنین، گرایش‌ها مبتنی بر احتمالات عینی بیان‌کننده عدم تعین ذاتی هستند. این نامتعین بودن خود منشأ جهت‌مندی زمان است؛ زیرا هر بار که یک گرایش به فعلیت در می‌آید، گذشته تثبیت و بسته می‌شود، در حالی که آینده باز و نامتعین باقی می‌ماند (بلنپ، ۲۰۰۷). این گذار یک‌سویه، پیکان زمان را در سطح بنیادی منعکس می‌کند.

بنابراین ظهور پیکان زمان وابسته به فرض خارجی نیست، بلکه نتیجه سازوکارهای درونی مکانیک کوانتومی و ساختار احتمالی نامتعین گرایش‌هاست.

۲-۵. عدم تقارن زمانی گرایش‌ها

گرایش‌ها در تعبیر پوپر تنها شاخص‌هایی کمی از احتمال نیستند، بلکه نشانگر تمایلات عینی سیستم برای گذار به امکان‌های خاص در آینده‌اند. در اینجا پرسش مهم‌تری مطرح می‌شود: چرا گرایش‌ها همواره به آینده اشاره دارند؟ پاسخ به این پرسش، ما را به ویژگی بنیادین دیگری از گرایش‌ها می‌رساند: نامتقارن بودن آن‌ها نسبت به زمان (اسفند، ۲۰۰۶، ۶۴).

برخلاف بسیاری از مفاهیم فیزیکی که در نظریه‌های بنیادین دارای تقارن زمانی‌اند، گرایش‌ها از اساس به آینده تعلق دارند. این ویژگی، نه صرفاً عرفی یا وابسته به تجربه انسانی از زمان، بلکه ناشی از ساختار هستی‌شناختی خود گرایش‌هاست. گرایش‌ها تنها در ارتباط با پیامدهایی معنا دارند که هنوز محقق نشده‌اند؛ یعنی امکان‌هایی که در آینده گشوده قرار دارند. در مقابل، گذشته ناحیه‌ای از واقعیت است که امکان‌هایش تحقق یافته و دیگر موضوع گرایش نیست. پوپر نیز بر این تمایز تأکید می‌ورزد:

ایده گرایش امکان‌های تحقق نیافته آینده را از تحقق‌های حال و گذشته متمایز می‌کند. این مفهوم

تمایز بین گذشته‌های بسته و آینده‌های باز را به همراه دارد..... می‌توان گفت نظریه‌ها در قالب گرایش‌ها

نسبت به زمان نامتقارن هستند (پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰۳).

این عدم تقارن زمانی، در هماهنگی کامل با ساختار نامتعین و برهم‌نهی‌وار نظریه کوانتومی است. سیستم‌های کوانتومی پیش از اندازه‌گیری در وضعیتی قرار دارند که در آن چندین امکان هنوز به فعلیت نرسیده‌اند. در چنین بستری، گرایش‌ها پدید می‌آیند و مسیر تحقق را شکل می‌دهند. پس از وقوع رویداد، این گرایش‌ها ناپدید می‌شوند، زیرا آینده به گذشته تبدیل شده و عدم تعین جای خود را به واقعیت قطعی داده است.

از این منظر، می‌توان گفت: گرایش‌ها تنها در جایی معنا دارند که آینده‌ای برای تحقق باقی باشد. همین ویژگی، آن‌ها را ذاتاً نامتقارن زمانی می‌سازد و امکان تبیین جهت‌مندی زمان را از دل ساختار خود آن‌ها فراهم می‌آورد (پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰۳).

در بالا تأکید شد که گرایش‌ها دارای عدم تقارن ذاتی نسبت به زمان هستند و «از اساس به آینده تعلق دارند». این ویژگی کلیدی، مبنای تبیین پیکان زمان در این رویکرد است. این عدم تقارن یک فرض نیست، بلکه از ساختار درونی نظریه، مانند عدم تعین کوانتومی و ماهیت علیت، استخراج می‌شود. علاوه بر این برای تبیین دقیق‌تر این عدم تقارن به موارد ذیل اشاره می‌شود. نخست، علیت مبنای این عدم تقارن است. گرایش‌ها، بیانگر تمایلات علی هستند، و از آنجا که علیت ذاتاً نامتقارن است (علت بر معلول تقدم دارد)، گرایش‌ها نیز این عدم تقارن را در بر دارند (هامفریس، ۱۹۸۵). این واقعیت نشان می‌دهد که پیکان زمان نه صرفاً محصول شرایط اولیه یا آمار، بلکه بازتابی از ذات علی گرایش‌ها در طبیعت است.

همچنین عدم تقارن زمانی گرایش‌ها از تمایز هستی‌شناختی میان گذشته و آینده ناشی می‌شود. گذشته قلمرو وقایع تحقق‌یافته و تغییرناپذیر است، در حالی که آینده قلمرو امکان‌های باز و تحقق‌نیافته است. گرایش‌ها دقیقاً در این قلمرو آینده معنا پیدا می‌کنند، زیرا آن‌ها به امکان‌های آینده وزن می‌دهند و احتمال فعلیت یافتن آن‌ها را مشخص می‌کنند (بلنپ، ۲۰۰۷). این ایده در مدل‌هایی مانند «شاخه‌های فضا-زمانی احتمالی» نیز بسط داده شده است، جایی که آینده ساختاری شاخه‌دار دارد و گرایش‌ها به هر یک از این شاخه‌ها وزن می‌دهند و عدم تقارن زمانی را تثبیت می‌کنند.

علاوه بر این در سطح فیزیکی، فرآیند تقلیل تابع موج نمونه‌ای از نامتقارن بودن گرایش‌هاست. سیستم کوانتومی، مجموعه‌ای از امکان‌ها را در حالت برهم‌نهی در خود دارد که تنها در آینده می‌توانند به فعلیت برسند. فرآیند تقلیل، این امکان‌ها را به یک فعلیت تحقق‌یافته یکانی تبدیل می‌کند. این روند همواره از امکان به فعلیت است و هرگز معکوس نمی‌شود. اگرچه معادله شرودینگر نسبت به زمان متقارن است، اما گرایش‌ها این دینامیک را به شکلی نامتقارن هدایت می‌کنند، زیرا ذاتاً به آینده معطوف‌اند (پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰۴، ۱۸۶، ۱۴۱، ۲۰). به این ترتیب، برگشت‌ناپذیری مشاهده‌شده در فرآیندهای کوانتومی را می‌توان به‌عنوان پیامد مستقیم عدم تقارن ذاتی گرایش‌ها درک کرد.

مساله مهم دیگر این است که تعبیر گرایشی به‌تنهایی قادر به توجیه جهت زمان در ترمودینامیک نیز هست. پوپر استدلال می‌کند که قانون ترمودینامیک و افزایش آنتروپی به‌تنهایی نمی‌تواند جهت بنیادی زمان را توضیح دهد، هرچند افزایش آنتروپی یک پیکان آماری از زمان ارائه می‌دهد (وینرت، ۲۰۲۳، ۱۶۷). گرایش‌ها این شکاف را پر می‌کنند؛ افزایش آنتروپی صرفاً یک قانون آماری نیست بلکه نتیجه گرایش‌های ذاتی سامانه‌ها برای تحول از حالت‌های کم‌احتمال به حالت‌هایی با امکان‌های بیشتر است. این امر، زمینه‌ای عینی برای توضیح برگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی فراهم می‌آورد.

در نهایت، از مجموع این ملاحظات می‌توان نتیجه گرفت که عدم تقارن ذاتی گرایش‌ها یک ویژگی بنیادین واقعیت است. این ویژگی در سطح فلسفی از علیت، در سطح منطقی از تمایز گذشته و آینده، در سطح فیزیکی از فرآیندهای کوانتومی و در سطح کیهان‌شناختی از نوظهوری در جهان پشتیبانی می‌شود (هامفریس، ۱۹۸۵؛ بلنپ، ۲۰۰۷؛ پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰۳؛ سوارز، ۲۰۲۵؛ وینرت، ۲۰۲۳، ۱۶۹، ۱۶۸).

بر این اساس، پیکان زمان نه یک فرض متافیزیکی، بلکه برآمده از واقعیت عینی گرایش‌هاست که جهان را از گذشته بسته به سوی آینده باز هدایت می‌کنند. در بخش بعد، خواهیم دید که این جهت‌گیری زمانی گرایش‌ها، چگونه در تعامل با دینامیک کوانتومی، می‌تواند مبنایی برای شکل‌گیری پیکان زمان در سطح بنیادین نظریه فراهم کند.

۲-۶. سازگاری تعبیر گرایشی با مدل جهان بلوکی در حال رشد

مدل «جهان بلوکی در حال رشد» بر واقعیت هستی‌شناسانه گذشته‌ای بسته و ثابت، حال گذار و آینده‌ای باز و نامتحقق تأکید دارد. در این تصویر، زمان واقعاً «می‌گذرد»، زیرا جهان به‌طور پیوسته با تحقق رویدادهای جدید، «بزرگ‌تر» می‌شود. پرسش اساسی این است که سازوکار فیزیکی این گذار از امکان به فعلیت چیست و چرا ذاتاً جهت‌دار است. دیدگاه گرایشی پوپر پاسخی هستی‌شناسانه برای این پرسش فراهم می‌کند و سازوکار فیزیکی لازم برای «رشد» بلوک جهان را تبیین می‌کند. این همراهی در چند سطح کلیدی مشهود است.

از منظر هستی‌شناسی، گرایش‌ها به‌عنوان «امکان‌های واقعی» هستند و امکان‌های کوانتومی، مفاهیم انتزاعی یا معرفت‌شناختی نیستند، بلکه ویژگی‌های فیزیکی عینی سامانه‌ها هستند (پوپر، ۱۹۸۲، ۱۸۲، ۱۵۲، ۹۴). در این دیدگاه تابع موج

کوانتومی، نقشه‌ای واقعی از این گرایش‌هاست و قاعده بورن بیانگر شدت یک گرایش برای تحقق یک نتیجه خاص است (سوارز، ۲۰۰۷). پس «باز بودن آینده» در مدل جهان بلوکی به یک واقعیت فیزیکی تقلیل می‌یابد که گرایش‌ها هدایت کننده آن هستند. از منظر دینامیک، تحقق برگشت‌ناپذیر تحول یکانی شرودینگری، ساختار امکان‌های آینده را شکل می‌دهد، اما خود معادله نسبت به زمان متقارن است. آنچه عدم تقارن را پدید می‌آورد، فرآیند تحقق امکان‌ها است که توسط گرایش‌ها هدایت می‌شود. این گذار از امکان به فعلیت، همواره رو به آینده رخ می‌دهد. هنگامی که یکی از گرایش‌ها به فعلیت می‌رسد، گذشته تثبیت و «بسته» می‌شود و امکان بازگشت آن وجود ندارد (پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰۳، ۲۰۵). این فرآیند برگشت‌ناپذیر، همان سازوکاری است که «رشد» بلوک جهان را ممکن می‌سازد.

همچنین علیت توأمان با عدم تعین و آینده‌نگر، دیدگاه گرایشی را با جهان بلوکی در حال رشد پیوند می‌زند. علیت در سطح کوانتومی به عنوان تمایل‌های عینی یک وضعیت کنونی برای تولید آینده‌های ممکن تعریف می‌شود (میلر، ۱۹۹۵). وضعیت فعلی، علت امکان‌سنجی آینده‌هاست، نه تعیین‌کننده قطعی آن‌ها. این دیدگاه علی و احتمالاتی نامتعیین، با آینده باز در مدل جهان بلوکی همخوان است، زیرا گرایش‌ها همان قوای علی هستند که تحقق آینده را به صورت نامتعیین هدایت می‌کنند. پرهیز از فرض اضافی این رویکرد، برای تبیین جهت زمان، نیازی به فرضیه‌های آماری مانند «فرضیه گذشته» در مکانیک آماری ندارد. جهت زمان، در اینجا، نتیجه طبیعی و ذاتی فرآیند تحقق گرایش‌هاست. گرایش‌ها، ذاتاً آینده‌نگر هستند و همین ویژگی بنیادی، جهت‌مندی را بدون نیاز به شرط مرزی^۱ و ویژه‌ای توضیح می‌دهد. یعنی با اتکا بر دیدگاه گرایشی، برای تبیین جهت‌مندی زمان، نیاز به شرایط اولیه‌ای مانند فرضیه گذشته و یا هر شرط بیرونی خارج از نظریه نداریم. بنابراین، دیدگاه گرایشی پوپر و مدل جهان بلوکی در حال رشد، نه تنها سازگارند، بلکه یکدیگر را تکمیل می‌کنند. تعبیر گرایشی، ابزار مفهومی و فیزیکی لازم را برای درک اینکه چگونه گذشته بسته می‌شود و آینده به طور مداوم و برگشت‌ناپذیر در حال گسترش است، فراهم می‌کند. این امر نشان می‌دهد که پیکان زمان در این چارچوب‌ها، امری عینی و ریشه‌دار در ساختار هستی است.

۲-۷. حفظ استقلال از «فرضیه گذشته» و شرایط اولیه

یکی از نقاط قوت رویکرد گرایشی به پیکان زمان، استقلال آن از شرایط اولیه خاص یا مفروضات آماری کلاسیک مانند «فرضیه گذشته» است. این رویکرد به جای وابستگی به یک وضعیت اولیه نامتقارن، جهت زمان را از ساختار هستی‌شناختی خود گرایش‌ها استخراج می‌کند.

در این تبیین، احتمال یک صفت عینی از موقعیت فیزیکی است که توصیف می‌کند یک آرایش تجربی (یا حالت فیزیکی سامانه) تا چه اندازه «گرایش» به تحقق یک نتیجه معین دارد (میلر، ۱۹۹۵؛ پوپر، ۱۹۵۹). این گرایش‌ها، نه صرفاً بازتابی از شرایط اولیه، بلکه ویژگی‌های ذاتی و نامتقارن خود سامانه هستند. این عدم تقارن از این واقعیت نشأت می‌گیرد که گرایش‌ها همواره به آینده اشاره دارند؛ آن‌ها امکان‌هایی را وزن‌دهی می‌کنند که هنوز به فعلیت نرسیده‌اند.

این ویژگی ذاتی، نیاز به یک شرط مرزی خارجی مانند فرضیه گذشته را مرتفع می‌سازد. به جای توضیح جهت زمان با فرض آغاز جهان در یک حالت بسیار منظم، جهت از خود فرآیند تبدیل امکان‌ها به فعلیت برمی‌خیزد. این فرآیند ذاتاً جهت‌دار است، زیرا همیشه از امکان‌های آینده به سوی تحقق در لحظه حال حرکت می‌کند و نه برعکس.

همچنین، گرایش‌ها در سطوح ماکروسکوپی نیز این استقلال را حفظ می‌کنند. در حالی که دیدگاه‌های آماری افزایش آنتروپی را به فرضیه گذشته وابسته می‌دانند، تعبیر گرایشی می‌تواند آن را پیامد طبیعی وزن‌دهی گرایش‌ها به وضعیت‌های با احتمال بالاتر بداند. از آنجا که بیشتر وضعیت‌های ممکن در مقیاس ماکروسکوپی نامنظم‌تر از وضعیت‌های اولیه هستند، تحقق تدریجی گرایش‌ها به سمت این حالت‌ها به‌طور طبیعی منجر به افزایش آنتروپی می‌شود. در این تفسیر، جهت‌مندی زمان در هر سطحی، از ساختار ذاتی گرایش‌ها سرچشمه می‌گیرد و نیازی به فروض اضافی ندارد (پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰۳، ۲۰۵؛ وینرت، ۲۰۲۳، ۱۷۰).

در نتیجه، منشأ اولیه جهت‌مندی در این رویکرد، یک فرض نیست، بلکه یک واقعیت هستی‌شناسانه است که در خود ساختار علی و احتمالاتی جهان نهفته است. گرایش‌ها، به‌عنوان نیروهای علی و جهت‌دار، دینامیک جهان را هدایت می‌کنند و پیکان زمان را بدون نیاز به هیچ‌گونه وابستگی به شرایط اولیه نامتقارن یا فرضیه‌های بیرونی، تبیین می‌نمایند.

۳. تبیین جهت‌مندی زمان در پرتو گرایش‌های کوانتومی

پس از نقد رویکردهای مبتنی بر تقلیل و ناهمدوسی و بررسی ظرفیت نظری تعبیر گرایشی، اکنون می‌توان به مسئله اصلی مقاله بازگشت: آیا می‌توان جهت‌مندی زمان را صرفاً از دل ساختار نظریه کوانتومی، و بدون ارجاع به مفروضات بیرونی، توضیح داد؟ پاسخ این مقاله آن است که چنین امکانی وجود دارد، به شرط آنکه گرایش‌ها را به‌مثابه ویژگی‌های بنیادی، عینی و زمان‌مند سیستم‌های کوانتومی در نظر گیریم.

۳-۱. گرایش‌های کوانتومی و جهت‌مندی زمان

در مکانیک کوانتومی، پیش از وقوع رویداد، سیستم در وضعیتی از امکان‌های برهم‌نهی شده قرار دارد. این امکان‌ها، به خودی خود فاقد ترجیح زمانی‌اند و معادله شرودینگر که تحول این حالت را توصیف می‌کند، نسبت به زمان متقارن است، اما همین چارچوب زمانی دگرگون می‌شود- هنگامی که امکان‌های موجود به فعلیت می‌رسند- لحظه‌ای که در تعبیر استاندارد با تقلیل تابع موج شناخته می‌شود. در این گذار از حالت نامتعیین به واقعیت متعین، «جهت‌مندی» پدیدار می‌شود: آینده باز به گذشته قطعی تبدیل می‌گردد (باسیاگالوبی، ۲۰۰۷؛ پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰۵، ۲۰۳).

آنچه تعبیر گرایشی عرضه می‌دارد، تبیینی متفاوت و درون‌نظری از همین فرایند است. در این دیدگاه، گذار از امکان به فعلیت نه یک اتفاق خودبه‌خودی و بیرونی، بلکه فرآیندی هدایت‌شده از سوی گرایش‌های عینی است. این گرایش‌ها، که از دل ویژگی‌های فیزیکی سیستم و شرایط آزمایشی آن برمی‌خیزند، به امکان‌ها وزن می‌دهند و مسیر تحقق آن‌ها را سامان می‌دهند. گرایش‌ها همواره به آینده‌ای باز اشاره دارند و هرگز به گذشته تثبیت‌شده معطوف نیستند. از این‌رو، فرایند تحقق یک امکان خاص در زمان، در اصل فرایند آشکار شدن جهت زمان است (میلر، ۱۹۹۵، ۱۲۷، ۱۴۵؛ وینرت، ۲۰۲۳، ۱۷۰، ۱۶۵).

بر اساس این تحلیل، جهت زمان دیگر وابسته به یک شرط اولیه مانند فرضیه گذشته یا به مداخله ناظر نیست، بلکه از رفتار درونی خود سیستم و ساختار نامتقارن گرایش‌ها ناشی می‌شود. زیرا گرایش‌ها، با جهت‌گیری ذاتی خود به‌سوی آینده، دینامیک گذار را به‌گونه‌ای سامان می‌دهند که تحقق، همواره در جهت خاصی از زمان صورت گیرد. به این معنا، پیکان زمان به‌عنوان ویژگی نوظهور از دل گرایش‌ها و عدم تعین کوانتومی پدیدار می‌شود، نه به‌عنوان شرطی افزوده بر نظریه (دورتو واسفلد، ۲۰۱۰؛ وینرت، ۲۰۲۳، ۱۶۵).

همچنین، این رویکرد با مدل «جهان بلوکی در حال رشد» کاملاً سازگار است. در این مدل، گذشته قلمروی تثبیت‌شده و بسته است، در حالی که آینده، حوزه‌ای گشوده از امکان‌هاست. گرایش‌ها دقیقاً در این مرز فعال می‌شوند: در گذار از امکان به واقعیت، گرایش‌ها فرایند رشد بلوک را هدایت می‌کنند و پیکان زمان را از درون ساختار دینامیکی جهان پدید می‌آورند. بنابراین، جهت‌مندی زمان نه نتیجه یک اصل آماری، نه فرآیند محیطی و نه پارامتر متافیزیکی، بلکه حاصل عملکرد خود سیستم در-گذار از حالت کوانتومی به وضعیت بالفعل است- گذار هدایت‌شده توسط گرایش‌هایی که تنها در یک جهت زمانی معنا دارند (بلنپ، ۲۰۰۷؛ سوارز، ۲۰۰۷).

از منظر تبیینی نیز، این رویکرد امتیاز مهمی دارد. اگر گرایش‌ها بخشی از ساختار دینامیکی نظریه تلقی شوند، آنگاه می‌توان بدون نیاز به شروط بیرونی یا فرضیه‌های ویژه آغازین، جهت زمان را توضیح داد. به بیان دیگر، تبیین مبتنی بر گرایش‌ها نه تنها نظریه را از نظر مفهومی منسجم‌تر می‌سازد، بلکه راه را برای مدل‌سازی دقیق‌تر فرایندهای برگشت‌ناپذیر کوانتومی و احتمالات زمانی هموار می‌کند (پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰۳، ۲۰۴؛ وینرت، ۲۰۲۳، ۱۷۰).

از حیث معرفت‌شناختی، تبیین گرایشی همچنین پاسخی برای این مسئله فراهم می‌کند که چرا ما همواره آینده را باز و نامتعیین تجربه می‌کنیم و گذشته را قطعی و تثبیت‌شده می‌یابیم. زیرا گرایش‌ها، در واقعیت فیزیکی نیز فقط در آینده معنادارند، نه در گذشته. آنچه از منظر ذهنی و تجربه انسانی ما به عنوان «پیکان روان‌شناختی» زمان درک می‌شود، بازتابی از همین جهت‌مندی واقعی در سازوکارهای بنیادین طبیعت است (پوپر، ۱۹۹۰، ۱۸۹).

در مجموع، گرایش‌ها با برخورداری از سه ویژگی بنیادین- عینیت، عدم تعین و عدم تقارن زمانی- می‌توانند بنیانی برای تبیینی درون‌سازمان‌یافته از پیکان زمان فراهم کنند؛ تبیینی که به جای اتکا بر فرضیات اولیه یا مداخلات بیرونی، از دل خود نظریه مکانیک کوانتومی و دینامیک تحقق امکان‌ها برمی‌خیزد (میلر، ۱۹۹۵؛ پوپر، ۱۹۸۲، ۲۰۳، ۱۸۵).

۳-۲. جایگاه دیدگاه گرایشی در تبیین پیکان زمان: از تقارن میکروسکوپی تا عدم تقارن ماکروسکوپی

برای تبیین پیکان زمان و حل پارادوکس میان تقارن زمانی قوانین فیزیک بنیادین و جهت‌دار بودن پدیده‌های ماکروسکوپی، می‌توان رویکردهای متافیزیکی اصلی را در دو دسته رویکرد هیومی^۲ و رویکرد غیرهیومی^۳ طبقه‌بندی کرد. دیدگاه گرایشی پوپر، با ارائه یک تبیین هستی‌شناسانه، جایگاهی میانی در این طیف دارد.

رویکرد هیومی که دیدگاهی تقلیل‌گرا^۴ است در آثار آلبرت مشهود است. این دیدگاه قوانین طبیعت را صرفاً الگوهایی می‌داند و هرگونه واقعیت علی ضروری را انکار می‌کند (لور، ۲۰۰۷). در این چارچوب، پیکان زمان به پیکان ترمودینامیکی تقلیل می‌یابد و جهت‌مندی زمان به عنوان یک پدیده آماری و نوظهور، نتیجه فرضیه گذشته است. چالش اصلی این رویکرد، عدم ارائه تبیین هستی‌شناسانه برای خود این فرضیه و ناتوانی در توضیح منشأ بنیادی جهت‌مندی است.

رویکرد غیرهیومی که تیم مادلین^۵ از آن دفاع می‌کند، قوانین طبیعت را واقعیت‌هایی مستقل و بنیادین می‌داند که تحولات جهان را «تولید» یا «حکمرانی» می‌کنند (مادلین، ۲۰۰۷، ۱۳۴، ۱۰۹، الف). در این دیدگاه، زمان و جهت آن یک ویژگی

^۱Psychological Arrow of Time

^۲Humean Approach

^۳Non Humean Approach

Reductionist

^۵Maudlin Tim

متافیزیکی غیرقابل تقلیل است که در ساختار هستی ریشه دارد. قوانین، نه صرفاً توصیف‌گر، بلکه موجودیت‌هایی با قدرت علی هستند که فرآیندهای فیزیکی را جهت می‌دهند (مادلین، ۲۰۰۷، ب).

تعبیر گرایشی پوپر، با وجود نزدیکی به دیدگاه غیرهیومی در مورد قوانین، دیدگاهی میانی است. پوپر، همانند مادلین، معتقد است که قوانین طبیعت بیانگر واقعیت‌های عینی و مستقل از ذهن هستند و همچنین پیکان زمان نتیجه افزایش آنتروپی نیست و برای تبیین آن نیاز به امری بنیادی‌تر داریم (پوپر، ۱۹۶۷). با این حال، او این واقعیت‌های عینی را نه در قالب موجودیت‌های انتزاعی و سنگین متافیزیکی، بلکه به صورت گرایش‌های فیزیکی تفسیر می‌کند که از ترتیبات تجربی و فیزیکی سامانه ناشی می‌شوند. این گرایش‌ها، تمایلات علی سامانه برای تحقق نتایج احتمالی در آینده هستند. این رویکرد، دو نقطه قوت اصلی دارد. حل پارادوکس‌های ترمودینامیکی: در این دیدگاه، پیکان زمان ترمودینامیکی (افزایش آنتروپی) نیازمند فرضیه گذشته نیست. به جای آن، افزایش آنتروپی به عنوان پیامد طبیعی گرایش‌های ذاتی سامانه‌ها به سمت حالت‌های با احتمال بالاتر (و نامنظم‌تر) تفسیر می‌شود. جهت‌مندی در اینجا یک پدیده آماری صرف نیست، بلکه ریشه در ماهیت نامتقارن گرایش‌ها دارد (وینرت، ۲۰۲۳، ۱۶۹، ۱۶۵). این امر شکاف میان سطح میکروسکوپی و ماکروسکوپی را پر می‌کند، زیرا گرایش‌های نامتقارن در تمام سطوح جهان، از رویدادهای کوانتومی گرفته تا فرآیندهای ترمودینامیکی، وجود دارند.

تبیین نوظهوری و خلاقیت جهان: دیدگاه گرایشی، علاوه بر تبیین جهت‌مندی، امکان توضیح نوظهوری را نیز فراهم می‌کند. پوپر معتقد بود که گرایش‌ها نه تنها رویدادها را تولید می‌کنند، بلکه می‌توانند به پدید آمدن امکان‌های کاملاً جدید منجر شوند. این امر، جهان را به جای یک ماشین علی بسته، صحنه‌ای پویا برای تحقق امکان‌های جدید معرفی می‌کند (میلر، ۱۹۹۵).

در نهایت، می‌توان گفت تعبیر گرایشی با تأکید بر واقعیت عینی گرایش‌ها، دیدگاهی میانه ارائه می‌دهد که نقاط قوت هر دو رویکرد هیومی و غیرهیومی را در خود جمع می‌کند. این رویکرد، قوانین را صرفاً الگوهای آماری نمی‌داند (برخلاف هیومی‌ها) و در عین حال از متافیزیک غیر قابل دفاع در مورد قوانین به عنوان جوهرهای مستقل فاصله می‌گیرد (برخلاف برخی غیرهیومی‌ها). بدین ترتیب، پیکان زمان یک پدیده آماری یا یک فرض متافیزیکی نیست، بلکه برآمده از ساختار علی و نامتقارن خود گرایش‌ها است که جهان را به شکلی پویا از گذشته بسته به سوی آینده باز هدایت می‌کنند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با بررسی انتقادی محدودیت‌های رویکردهای رایج در تبیین پیکان زمان، به‌ویژه تفسیرهای مبتنی بر تقلیل تابع موج و ناهمدوسی، و با تکیه بر ظرفیت‌های هستی‌شناختی تعبیر گرایشی پوپر، کوشیدیم نشان دهیم که گرایش‌های عینی و زمان‌مند می‌توانند مبنایی نظری برای تبیین درون‌سازمان‌یافته و مستقل از مفروضات بیرونی جهت‌مندی زمان در سطح کوانتومی فراهم آورند.

در این چارچوب، گرایش‌ها به عنوان ویژگی‌هایی واقعی، غیرقابل فروکاست و ذاتاً نامتقارن زمانی، در فرایند گذار از امکان به فعلیت ایفای نقش می‌کنند. این ویژگی آن‌ها، در تعامل با ساختار نامتعیین مکانیک کوانتومی و الگوی آینده باز، می‌تواند دست‌کم در سطح مفهومی- پایه‌ای برای تبیینی نو از منشأ پیکان زمان ارائه دهد؛ تبیینی که نه به فرضیه گذشته متکی است و نه به دخالت ناظر یا عوامل محیطی. چنین رویکردی با مدل جهان بلوکی در حال رشد نیز هم‌ساز است و می‌تواند تفسیر فلسفی قابل دفاع‌تری از زمان در فیزیک فراهم سازد.

البته این تبیین در وضعیت فعلی، بیشتر جنبه مفهومی و نظری دارد. هنوز پرسش‌های مهمی باقی است که بررسی آن‌ها می‌تواند مسیر پژوهش‌های آینده را شکل دهد. برای نمونه، چگونگی تبیین دقیق فرایند تقلیل تابع موج در چارچوب گرایش‌ها، بدون ارجاع به ناظر یا مکانیسم‌های بیرونی، همچنان نیازمند تحلیل بیشتر است. همچنین، فهم نحوه انتقال جهت‌مندی گرایش‌های میکروسکوپی به سطوح ماکروسکوپی، به‌ویژه در زمینه ترمودینامیک و آنتروپی، مسئله‌ای باز و پیچیده است.

از سوی دیگر، باید بررسی کرد که آیا می‌توان پیش‌بینی‌های تجربی متمایزی از تعبیر گرایشی استخراج کرد که آن را از سایر تعبیر کوانتومی قابل تفکیک سازد، یا نه. پرسش بنیادی‌تر نیز آن است که آیا گرایش‌ها را باید هویتی بنیادین در ساختار واقعیت فیزیکی دانست، یا آن‌ها را می‌توان از سازوکارهای عمیق‌تری چون هندسه فضا-زمان مشتق کرد.

بر این اساس، به نظر می‌رسد تبیین گرایشی از پیکان زمان - با وجود چالش‌های باقی‌مانده - پتانسیل نظری قابل توجهی برای گسترش و تعمیق دارد. این تبیین می‌تواند نقطه آغازی برای بازاندیشی نسبت زمان و علیت در چارچوب مکانیک کوانتومی باشد. همچنین می‌تواند زمینه‌ای برای گفت‌وگوی میان فیزیک نظری، فلسفه علم و هستی‌شناسی تحلیلی فراهم آورد.

References

- Albert, D. (2000). *Time and chance*. Harvard University press, Cambridge, MA.
<https://doi.org/10.4159/9780674020139>
- Bacciagaluppi, G. (2007). Probability, arrow of time and decoherence. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38(2), 439–456. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2006.04.007>
- Belnap, N. (2007). Propensities and probabilities. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38(3), 593–625. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2006.09.003>
- Belnap, N., Perloff, M., & Xu, M. (2001). *Facing the future: agents and choices in our indeterminist world*. Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780195138788.001.0001>
- Bohm, A. (1999). Time-asymmetric quantum physics. *Physical Review A*, 60(2), 861.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.60.861>
- Bunge, M. (1976). Possibility and probability. In *Foundations of Probability Theory, Statistical Inference, and Statistical Theories of Science: Volume III Foundations and Philosophy of Statistical Theories in the Physical Sciences* (pp. 17–33). Springer.
- Bunge, M. (1981). Four concepts of probability. *Applied mathematical modelling*, 5(5), 306–312.
[https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(81\)80051-0](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(81)80051-0)
- Callender, C. (2004). There is no puzzle about the arrow of time. *Philosophy of Science*, 67(4), 630–645.
- Chen, E. K. (2021). Quantum mechanics in a time-asymmetric universe: On the nature of the initial quantum state. *The British Journal for the Philosophy of Science*.
<https://doi.org/10.1093/bjps/axy068>
- Dorato, M., & Esfeld, M. (2010). GRW as an ontology of dispositions. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41(1), 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2009.09.004>
- Esfeld, M. (2006). Popper on irreversibility and the arrow of time. *Karl Popper: A Centenary Assessment. Vol. III: Science*, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2009.09.004>

- Fetzer, J. H. (1981). Probability and explanation. *Synthese*, 371–408. <https://www.jstor.org/stable/20115668>
- Ghirardi, G., & Bassi, A. (2002). Collapse theories.
- Ghirardi, G. C., Rimini, A., & Weber, T. (1986). Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Physical review D*, 34(2), 470. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470>
- Gillies, D. (2012). *Philosophical theories of probability*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203132241>
- Humphreys, P. (1985). Why propensities cannot be probabilities. *The philosophical review*, 94(4), 557–570. <https://doi.org/10.2307/2185246>
- Loewer, B. (2007). Counterfactuals and the second law. 293–326. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199278183.003.0011>
- Loewer, B. (2012). Two accounts of laws and time. *Philosophical studies*, 160(1), 115–137. <https://doi.org/10.1007/s11098-012-9911-x>
- Lombardi, O., Fortin, S., & Pasqualini, M. (2022). Possibility and time in quantum mechanics. *Entropy*, 24(2), 249. <https://doi.org/10.3390/e24020249>
- Maudlin, T. (2007a). *The metaphysics within physics*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/analys/anp022>
- Maudlin, T. (2007b). What could be objective about probabilities? *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38(2), 275–291. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2006.04.006>
- Miller, D. (1995). Propensities and indeterminism. *Royal Institute of Philosophy Supplements*, 39, 121–147. <https://doi.org/10.1017/S1358246100005464>
- Popper, K. R. (1956). The arrow of time. *Nature*, 177(4507), 538–538. <https://doi.org/10.1038/177538a0>
- Popper, K. R. (1959). The propensity interpretation of probability. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 10(37), 25–42. <https://doi.org/10.1093/bjps/X.37.25>
- Popper, K. R. (1967). Structural information and the arrow of time. *Nature*, 214(5085), 322–322. <https://doi.org/10.1038/214322a0>
- Popper, K. R. (1982). Quantum Theory and the Schism in Physics: From the Postscript to the Logic of Scientific Discovery. <https://doi.org/10.4324/9780203713990>
- Popper, K. R. (1990). A world of propensities.
- Price, H. (1996). *Time's arrow & Archimedes' point: new directions for the physics of time*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.2307/2998455>
- Savitt, S. (2021). Being and Becoming in Modern Physics. *Metaphysics Research Lab, Stanford University*. <https://plato.stanford.edu/archives/fall2024/entries/spacetime-become/>
- Suárez, M. (2007). Quantum propensities. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38(2), 418–438. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2006.12.003>
- Suárez, M. (2025). The Possibilities in Propensities. *Modeling the Possible*, 82. <https://doi.org/10.4324/9781003342816>

- Terekhov, V. (2019). Modal approaches in metaphysics and quantum mechanics. *arXiv preprint arXiv:1909.10046*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.10046>
- Weinert, F. (2023). Popper's Realism and His Theory of Time. In *Karl Popper: Professional Philosopher and Public Intellectual* (pp. 159–171). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15424-9_8
- Zeh, H. D. (2007). *The physical basis of the direction of time* (Vol. 4). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68001-7>