



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ”

ФИЛОСОФСКИ ФАКУЛТЕТ,
Катедра „Философия”

АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ

УПОТРЕБИ НА ПОНЯТИЕТО ЗА ИНФОРМАЦИЯ В БИОЛОГИЧЕСКИТЕ ДИСЦИПЛИНИ. КОНЦЕПТУАЛЕН АНАЛИЗ.

Никола Корчагин Неделчев

Научен ръководител:

доц. д-р Константин Янакиев

София

2018



Съдържание

УВОД.....	5
Глава I.....	7
Дефиниране на информационния дискурс.....	7
1. Употреби на понятието за информация.	7
1.1. Ранни употреби.	7
1.2. Всекидневни употреби.	7
1.3. Специализирани употреби.....	8
2. Тенденции в употребата на информационната терминология в биологията.	8
2.1. Прото-информационните понятия на ранната генетика.....	8
2.2. „Информацията” в молекулярната биология, биологията на развитието и еволюционната биология.	9
2.3. Разликата между предикативна и атрибутивна употреба на понятието за биологична информация.....	10
3. Исторически и социален контекст на употребата на понятието за информация.	10
3.1. Пътят към информационния ген.....	10
3.2. Информационната понятийна рамка като продукт на епистемичен трансфер.	11
4. Употреба на понятието за информация в контекста на Централната догма на молекулярната биология.	12
Глава II.....	15
Философският интерес към информационния дискурс.....	15
1. Сахотра Саркар за биологичната информация като провалило се евристично средство.	15
2. Мейнард Смит за гените като носители на интенционални свойства.	16
3. Тезата за информационния паритет между генетичните и епигенетичните каузални фактори.	18
3.1. Аргументи в подкрепа на Мейнард Смит: семантичната нищета на математическото понятие за информация на Шанън.....	18
3.2. Аргументи против Мейнард Смит: епигенетичните наследствени системи като носители на интенционална информация.	19
3.3. Символичната връзка между генетичните системи и генетичните продукти: „за” или „против” тезата за информационен паритет?.....	20
4. Генетичната програма.	21
4.1. Раждането на една метафора.....	21
4.2. Формализиране на понятието за програма: теорията за алгоритмичната	

сложност.....	22
5. Биология без информация: термодинамика и пробалистични каузални вериги.	23
Глава III.....	25
От информационен дискурс към информационни модели	25
1. Генетична информация и генетичен код.....	25
1.1. Потокът на информация като „обуславяне” и потокът на информация като „спецификация”: анализ на дефинициите.....	25
1.2. Кодът зад генетичната информация.	26
2. Установяване на епистемичната стойност на понятието за биологична информация.	27
2.1. Епистемични стандарти и метафоричност.....	27
2.2. Уроци от историята и философията на науката.....	27
2.2.1. „Биологичната информация” научна метафора ли е?.....	28
2.2.2. Принос към предвиждащия потенциал на научната теория.	29
2.2.3. Принос към конкретизацията на абстрактни проблеми.....	30
2.2.4. Принос към опростяването на сложни системи.....	30
2.3. Метафоричност, идеализиращи допускания и научни модели.....	31
2.3.1. Проблемът за научната репрезентация.....	32
2.3.2. Алтернативата: епистемичен фикционизъм.....	33
2.3.3. Централната догма и кодиращите схеми като <i>репрезентации-като</i>.....	35
3. От биологична информация към биологична каузалност: каузална селекция, каузална специфичност и генетичен контрол.....	36
Глава IV.....	38
Граници на формализма на математическата теория за комуникацията.....	38
1. Информация на Шанън.....	38
1.1. Формализмът на математическата теория за комуникацията.....	38
1.1. Приложение в биологията	38
1.1.1. Основания за прилагането на формализма на Шанън в молекулярната биология.....	39
1.1.2. Обзор на математическите модели: Квастлер, Гатлин, Йоки, Шнайдер	39
1.1.3. Комуникационната система като аналогия: случаят „Йоки”	40
2. Граници на приложимост.....	41
Заклучение и приноси.....	43

УВОД

В уводната си част дисертацията въвежда понятието за биологична информация като научен и философски проблем. Настоящият труд започва с централното място, което понятието за биологична информация заема в понятийното поле на биологията от създаването на триизмерния макет на ДНК до днешни дни и показва как „биологичната информация” е третирана като *differentia specifica* между изследователските интереси на биолозите и тези на химиците и физиците. В един малко по-конкретен контекст, „биологичната информация” се третира като *differentia specifica*, но този път с оглед изготвянето на специфичната каузална етиология на биологичните феномени. Сортирането на биологичните детерминанти като „информационни” в контраст на „неинформационни” се оказва форма на каузална селекция, при която релевантните фактори се отсяват с оглед на тяхното значение за синтеза на протеини и въобще за биологичното развитие на организма.

Не всеки биолог обаче се чувства комфортно от концептуалния завой, който биологията поема през 50-те години на миналия век. Опасенията са, че работната енергия на учените, вниманието на медиите и парите на съответните финансиращи звена могат да бъдат подведени към изследвания, проекти и теоретизации, които имплицитно поддържат опростенчески редукционистки позиции, наивни детерминистки нагласи и дори наличието на дуалистична онтология в една принципно материалистка наука.

След това дисертацията преминава към оправдаването на „биологичната информация” като проблем, който заслужава философско внимание. В един по-широк план, „биологичната информация” спада към полето на изследване на философите, доколкото наличието му в биологията бива идентифицирано не само от философите, но и от самите биолози, като концептуален проблем, а концептуалните проблеми са теми, с които се занимават философите. По-конкретно, „биологичната информация” заслужава философско внимание, защото се явява пресечена точка на редица централни теми в областта на философията на науката, които по един или друг начин се приемат за съпътстващи научното асимилиране на света: „каузалност”, „функция”, „научни модели”, „научно обяснение”, „каузална селекция”, „научна репрезентация”, „научни метафори”, „механизъм” и т.н. В някакъв смисъл настоящата дисертация е опит да се

съберат тези частици от пъзела и да се хвърли светлина върху определена епистемична област от биологията чрез анализ на съответното понятие и формулиране на хипотеза относно неговата научна стойност.

Така стигаме до **целта** на дисертацията: да се формулира колкото се може позитивен и последователен поглед върху ролята на това понятие за биологичната практика и биологичното познание.

Тезата на дисертацията е, че понятието за биологична информация е научна метафора и че нейната познавателна роля може да получи най-оправданата си философска интерпретация и реконструкция в термините на т.нар. „епистемичен фикционизъм”.

За изпълнение на целта, в дисертацията са поставени следните **задачи**: (1) да се проследят различните тенденции на употреба на понятието за биологична информация, както и социално-историческите условия на неговото въвеждане в биологията; (2) да се направи критически обзор на основния философски дебат около „биологичната информация” и производните ѝ понятия; (3) да се аргументира нуждата от алтернативен подход към проблематиката; (4) да се намерят примерни казуси от история на науката, да се анализира употребата на понятието в тях и да се идентифицират неговите епистемични ефекти за някои методологически важни стратегии в научната практика; (5) да се предложат философски средства, чрез които ролята на понятието за биологична информация да се експлицира в една по-генерална картина, която обхваща стойността му за биологичната практика и съответно може да се генерализира върху други случаи.

Методологически, дисертацията разчита на концептуален анализ, който обаче следва да бъде допълнен с исторически анализ, сравнителен анализ и предоставяне на примери от „полеви” емпирични изследвания, така че да се приложи върху актуални понятийни употреби в един специализиран контекст и като резултат да изясни познавателната и обяснителна стойност на понятието под внимание.

Глава I.

Дефиниране на информационния дискурс

Настоящата глава проследява различните употреби на понятието за информация извън и вътре в биологията, след което се посочва, че неговото присъствие в биологически контекст е следствие от епистемичния обмен между парадигмални за 40-е години на миналия век дисциплини. Главата завършва с експлицитното дефиниране на понятието за биологична информация в контекста на Централната догма на молекулярната биология.

1. Употреби на понятието за информация.

1.1. Ранни употреби.

„Информацията”, която днес може да се срещне в Оксфордския речник на съвременния английски език ([Information](#), n.d.) със значението на „комуникиране на познание” или „оформяне на нечие съзнание” притежава латински корени и старогръцки произход. Най-ранните свидетелства за употреби на понятието за информация са свързани с имена като Вергилий (покрай митическите образи на Вулкан и циклопите, *оформящи* мълниите на Зевс), Марк Теренций Варон (покрай *оформянето* на човешкия фетус), Тертулиан (който нарича Мойсей „*populi informator*”), Цицерон (който подвежда редица гръцки понятия като *prolepsis*, *eidosis*, *typos*, *idea* и *morphe* под латинското *informatio* и *informo*) и Тома от Аквино (който обозначава естественото начало на всеки живот „*per modum informationis*”). През Новото време „информацията” изчезва от тенденциозния философски дискурс и се завръща чак през 19-ти век покрай иновациите в областта на комуникационните технологии.

1.2. Всекидневни употреби.

Днес всекидневните словоупотреби свързват понятието за информация с мрежа от понятия като „знание”, „данни”, „вести” и „новини”, а „вестниците”, „телевизията” и „интернет” се приемат за нейни източници. Настоящото изследване признава, че във всекидневието хората не изпитват прагматичен натиск да фиксират по-строго

екстензията на понятията, с които работят, което именно прави и употребите им „неспециализирани”.

1.3. Специализирани употреби.

Но дори с оглед на специализираните употреби, не съществува монолитно разбиране за „информация”. Свидетелство за това е принципното разделение между количествени (информация на Фишър, информация на Шанън, алгоритмична информация, квантова информация) и качествени понятия (информация на Бар-Хилел и Карнап, информация на Флориди, интенционална информация) за информация. Въпреки опитите да се прокарат връзки между значенията в различните класове, „информацията” си остава полисемантична дори с оглед на техническите си употреби.

2. Тенденции в употребата на информационната терминология в биологията.

От невъзможността за редукция до едно централно понятие следва, че „информацията” може да се употребява за различни типове феномени, а това означава, че анализът ѝ ще изисква точен контекст на употреба. Настоящата секция очертава този контекст на употреба.

2.1. Прото-информационните понятия на ранната генетика.

Тук се демонстрира, че ранната генетика е област на изследване, в която учените разчитат на езикови метафори и комбинаторна логика. Представени са примери, че генетиците в класическия период от генетиката са били склонни да систематизират новото биологично знание чрез диаграми, представящи генетичния материал като последователност от букви. Именно аналогията с азбуката става причина учените да изключат четири-буквената азбука на ДНК като претендент за субстрат на генетичното действие и да привилегирова много по-богатите на химични конституенти протеини. През 1944 г. квантовият физик Ървин Шрьодингер започва да говори по нов начин за организационния капацитет на хромозомния материал, използвайки израза „кодова писменост”.

2.2. „Информацията” в молекулярната биология, биологията на развитието и еволюционната биология.

С молекуляризацията на генетиката в лицето на триизмерния модел на ДНК се осъществява и преходът от прото-информационен към информационен период в биологията. Докато „кодовата писменост” на Шрьодингер е базирана на идеята за пермутация на хромозомните елементи, Уотсън и Крик говорят за код, който не само представлява таблица с възможните корелации между кодоните и аминокиселините, но благодарение на понятието за информация той се отнася и към самото действие на гените по време на синтеза на протеини. Както вече се е знаело от кибернетиката и от математическата теория на Шанън, информацията подлежи на кодиране, декодиране и трансфер, поради което придобива статут на епистемично средство, фасилитиращо изследванията на гените в ролята им на специфични каузални фактори дори днес. Така понятието за информация ще стане органична част от формулировката на една от най-съществените генерализации, касаещи живия свят – Централната догма на молекулярната биология. Там то ще получи и първата си експлицитна дефиниция – точната обусловеност на аминокиселините в протеина.

До края на секцията са разгледани и употребите на понятието за информация в още две биологически дисциплини – биологията на развитието и еволюционната биология. В биологията на развитието понятието за информация бива изместено от изричната си употреба върху протеиновия синтез и след 60-те години то започва да засяга новите изследвания около развитието на зиготата в организма. Като допълнение към информационния речник, биолозите започват да говорят за генетична и клетъчна „програма” (в зависимост от това дали третират локуса на контрол върху биологичното развитие като централизиран в ядрото на клетката или децентрализиран измежду клетъчните компоненти), както и за „епигенетична информация” и „епигенетичен код” (мотивирани от интензивно развиващата се епигенетика). Не на последно място покрай Уолпърт и неговата „позиционна информация” навлизат и алтернативни форми на изразяване като „конвертиране” и „интерпретиране”.

В еволюционната биология информационната понятийна рамка се популяризира около идеите на Джордж Уилямс за „еволюционния ген”, на Ричард Докинс за „себичния ген” и на Мейнард Смит и Жатмари за „големите преходи на еволюцията”. Голямата ирония

на съюза между еволюционната биология и информационния дискурс е, че теоретиците на интелигентния дизайн намират именно информационните абстракции за подкопаващи естествения подбор като основен принцип на Дарвиновата еволюция (пример за най-авторитетен представител на тази традиция е Уилям Дембски с неговия аргумент, че не съществува натуралистко обяснение на това, което той нарича „сложна специфицирана информация“).

2.3. Разликата между предикативна и атрибутивна употреба на понятието за биологична информация.

Тук се правят две методологически разграничения, мотивирани от Флориди, които могат да послужат за експлициране на смисловите нюанси в употребата на изрази като „генетична/биологична информация“. В първия случай прилагателните „биологичен“ и „генетичен“ могат да се употребяват предикативно спрямо съществителното „информация“, а във втория - атрибутивно. Характерно за предикативната употреба е, че информацията се третира *като* биологична реалност (например: „гените са носители на биологичната информация за развитието на организма“). От друга страна, при атрибутивното говорене за биологична или генетична информация, се има предвид, че информацията е *за* някаква (биологична) реалност (например: „целта на проекта „Човешки геном“ е да открие всички гени в ДНК последователността и да развие инструменти, с които да използва тази информация в изучаването на човешката биология и медицината“). Разделението между атрибутивен и предикативен смисъл е от значение, защото, ако философската методология е експлицитно ограничена до концептуални проблеми, а философските проблеми възникват по един или друг начин от понятийните проблеми, то въпросното разграничение би формирало два различни класа проблематики.

3. Исторически и социален контекст на употребата на понятието за информация.

3.1. Пътят към информационния ген.

Чисто исторически понятието за ген е въведено в биологията без да притежава нито физико-химично значение, нито информационна аналогия. По думите на Томас Х. Морган, „с оглед нивото, на което генетичните експерименти се извършват, няма никакво значение дали генът е хипотетична единица или материална частица“. Това се

променя в периода между двете Световни войни, който ще породи нуждата от нов начин за описание и схващане на новооткритите биологични данни. Първо, биолозите покрай Херман Мюлер, Джордж Бидъл и Ед Татъм започват да експериментират с каузалните свойства на гените, за да контролират специфични биологични процеси. След това Ейвъри и колегите му от института Рокфелер успяват да идентифицират бактериалната трансформация, като един от трита вида хоризонтален генен трансфер, с нуклеотидните последователности на ДНК. Като допълнение към тях, Хърши и Чейз забелязват, че бактериофагният вирус засяга ядрото на бактериалните клетки, предавайки им не протеините си, ами своето ДНК. Не на последно място Уотсън и Крик създават триизмерния макет на ДНК, който заздравява епистемичната сигурност в потенциала на понятието за ген да реферира към обекти с реални каузални свойства. В резултат на това, Джордж Гамов формулира т.нар. „колинеарна хипотеза”, според която линейните последователности на ДНК детерминират първичната структура на полипептидните вериги. Описанието на гените като текстови структури започва все повече да изглежда семантически недостатъчно, за да обхване новооткритите генетични свойства. Реферирайки към функционални нуклеотидни последователности, молекулярните гени не са просто комбинации от елементи, стоящи в корелация с фенотипните характеристики на организма, ами притежават продукти. Последното ще рече, че връзката ген - продукт не е просто корелационна, а е причинно-следствена.

3.2. Информационната понятийна рамка като продукт на епистемичен трансфер.

Периодът по увеличаващото се каузално знание за функцията на гените съвпада с институционалното утвърждаване на нови дискурсивни практики, които ще превърнат информационната и кибернетичната понятийна рамка в неизменна част от молекулярната идентичност на гените. Дистрибуцията на знание между биолозите и специалистите в компютърните науки започва през 1944 г., когато Робърт Уинър и колегата му Джон фон Нойман, които по това време разработват системи за контрол на артелилерийския огън към Изследователския комитет за национална отбрана на САЩ, стартират серия от интердисциплинарни научни срещи, финансирани от института „Рокфелер” и фондация „Мейси”. Парадигмални примери за биологически модели, които са базирани на понятието за регулация и свързаните с него понятия за контрол и негативна обратна връзка, са *алостеричният модел* на ензимната динамика и

оперонният модел на генетичната експресия. За разлика обаче от интуитивната употреба на „информацията” в контекста на контролните системи и негативните обратни връзки (като предаване на сигнали с цел регулация на поведението), математическата ѝ дефиниция не е обект на епистемичния обмен.

Причината за това е Клод Шанън, който разработва математическа теория с цел оптимизация на комуникационните системи при кодирането и декодирането на съобщения. За разлика от епистемичното влияние на кибернетиката, намиращо се в сферата на аналозите (между биологичните процеси и системите с обратна връзка) и метафорите (за компютри, памет, програми, сигнали и съобщения), математическата теория за комуникацията освен всичко предоставя на биологията и математически модел за изчисляване на биологическите регулярности. Ето защо благодарение на пионера в биоинформатиката Хенри Квастлер, който в съавторство със Сидни Данкоф прави първия опит за изчисление на информационното съдържание на човешкия организъм, и който организира първите симпозиуми по темата, формализмът на Шанън намира своето широко приложение не само в молекулярната биология, но и в еволюционната биология, радиобиологията, невронауката и т.н.

4. Употреба на понятието за информация в контекста на Централната догма на молекулярната биология.

В настоящата секция базовите трудове на Уотсън и Крик са третирани като езикова „ситуация” на въвеждане на термина „информация” в контекста на молекулярната биология. Защо тези трудове са от такова значение? Както видяхме от миналата секция, по това време информационните понятия не са новост за биологията, но тяхното приложение си остава малко или много интуитивно и базирано на аналогии, свързани с автоматите и информационните технологии. Големият принос на Уотсън и (най-вече на) Крик към информационния дискурс е, че успяват да направят „информацията” част от специализирания речник на биологията, дефинирайки я в биологични термини.

Първият път, когато срещаме „информацията” в официална статия на двамата учени, е още през 1953 г., когато двамата за пръв път съобщават на света за макетния си модел. През тази година Уотсън и Крик публикуват две статии, първата от които описва ДНК в напълно химични термини: полинуклеотидните вериги, притежаващи захарно-

фосфатни гръбнаци, са свързани благодарение на нуклеотидите (аденин = А, тимин = Т, гуанин = Г и цитозин = Ц) по дължината им, които образуват помежду си водородни връзки, наречени също така базови двойки. Във втората статия обаче, която е посветена на пермутациите на базовите двойки и тяхното значение за клетъчното делене, четем, че „точната последователност на базите е кодът, който носи генетичната информация” (Watson & Crick 1953b). Ако (1) „генетичен код” =df „точната последователност на нуклеотидните бази”, то (2) „генетична информация” =df „X, което е носено от генетичния код” или (3) „генетична информация” =df „X, което е носено от точната последователност на нуклеотидните бази”. С други думи, езиковият контекст, в който се появява думата „информация”, не споменава нищо за семантиката на X.

В исторически план понятието за генетична информация остава без експлицитна дефиниция поне докато Крик не публикува няколко години по-късно статията си върху Централната догма на молекулярната биология. Всъщност там намираме цели две дефиниции. В единия случай (4) „генетична информация” =df „точната обусловеност на последователността или на базите, или на аминокиселините в протеина”, а в другия (5) „генетична информация” =df „спецификацията на аминокиселините в протеина”. Дефиниция (4) е част от Централната догма на молекулярната биология, която описва синтеза на протеини не като пренос на материя и енергия, а като пренос на информация. Имайки предвид дефиниция (4), Догмата ни позволява да говорим за пренос на информация от една макромолекулна последователност към друга макромолекулна последователност, само ако първата обуславя появата на втората. Единствените забранени посоки касаят преноса на информация от протеините към нуклеиновите киселини и от протеин към протеин. Това означава, че протеиновите последователности не могат да се разглеждат като детерминанти за появата на други протеинови последователности или за определяне реда на нуклеотидите. По този начин Догмата ни информира кои променливи, спадащи към трите семейства полимери (ДНК, РНК, протеини), притежават свойствата да упражняват каузален контрол помежду си.

Дефиниция (5) обвързва биологичната информация с биологичната специфичност, което бележи нов период за биологията. До този момент рационализацията на високо специфичните молекулни интеракции минава през техните триизмерни конфигурации и стереокомплементарни характеристики (Полинг). С навлизането на информационния

дискурс в биологията, Крик осъществява преход в контекста на протеиновия синтез от стерео-специфичност към секвенциална специфичност.

Глава II.

Философският интерес към информационния дискурс

Настоящата глава въвежда философския дебат върху понятието за биологична информация. Както демонстрира критическия анализ върху дебата, аргументираните позиции могат да се систематизират по следния начин:

- Понятието за информация притежава субстантивна теоретична роля (участва в обяснението на биологичните феномени) и ограничен обхват на употреба (приложимост върху генетичните системи).
- Понятието за информация притежава субстантивна теоретична роля (участва в обясненията на биологичните феномени) и широк обхват на употреба (приложимост върху генетични и епигенетични системи).
- Понятието за информация не притежава субстантивна теоретична роля (употребата му е метафорична) и в най-добрия случай употребата му е ограничена и контекстуална (молекулите „носят информация”, ДНК „кодира за” протеините, клетките „изпращат сигнали”, еволюцията „програмира” организма), а в най-лошия – употребата му е отворена към елиминация.

1. Сахотра Саркар за биологичната информация като провалило се евристично средство.

Саркар е даден като пример за авторитетен автор, който защитава тезата, че понятието за информация не притежава субстантивна теоретична роля и неговата употреба е ограничена. Основата на аргумента на Саркар против понятието за биологична информация е, че то губи евристичната си роля още някъде между 60-е и 70-е години, когато експерименталният интерес към еукариотните геноми се задълбочава. С това понятието за биологична информация, въпреки интензивната си употреба днешно време, не успява да се превърне в субстантивна част от съвременните биологични теории. Например, понятието на Крик за секвенционна информация, което е базирано на колинеарността между последователността на едни молекули и тази на техните

продукти¹, днес не може да се използва за предвиждане на биологични феномени, защото употребата му е сериозно разколебана от „сложността“ на еукариотната ДНК. Саркар разчита на сравнително тясно разбиране за това какво би трябвало да конституира епистемичния принос на едно или друго понятие. Неговият патос е, че подобен тип предвиждания всъщност не могат да разчитат единствено на нуклеотидните последователности, а се нуждаят от допълнително знание: знание относно процесите на сплайсинг и РНК-редактиране, относно разнообразието от некодирани форми на ДНК („псевдогени“, „мобилни гени“, „повторими гени“) и дори въобще с какъв „генетичен код“ се отличава съответния организъм (идентифицирани са 20 алтернативни разновидности на стандартния код).

Като съществена критика към Саркар може да се посочи, че важното е не дали информационните понятия обясняват *изцяло* даден феномен, а дали биолозите ги използват в своите обяснения (Moffatt 2008, p. 27). Аз бих допълнил: как ги използват в своите обяснения? С други думи, ние като философи все още сме отговорни да се изкажем как информационните понятия допринасят за практиките на обяснение в условията, за които са пригодени, дори тези условия да са ограничени.

2. Мейнард Смит за гените като носители на интенционални свойства.

Мейнард Смит е разгледан като авторитетен автор, който защитава информационния дискурс в биологията като неизменна част от биологичната теория за генетичното действие. Причината за това е, че неговата статия от 2000 г. стимулира цялата последвала дискусия върху понятието за биологична информация. Обзорът му на начина, по който биолозите употребяват информационния речник, показва, че те третират гените като привилегирован клас детерминанти (различни от епигенетичните фактори), притежаващи прескрептивни свойства (подобно на програма), действието на които е отворено към грешки (съществува норма за успешно и неуспешно произведен генетичен ефект). Според Мейнард Смит подобно отношение към гените е индикатор, че гените функционират в информационните описания и обяснения като логически

¹ „...специфичността на дадена нуклеинова киселина се изразява единствено от последователността на нейните бази, и че тази последователност представлява (прост) код за последователността на аминокиселините в конкретен протеин.“ (Crick 1958, p. 152)

субекти на интенционални предикати. Интенционалните предикати, както сме добре запознати още от Брентано, застрашават материалистката онтология на съответната наука. Ето защо за Мейнард Смит е важно да намери такова понятие за биологична информация, което да обхване насочеността на подобен тип описания без да застраши онтологията на науката. Такова понятие той намира в телеосемантиката (още позната като биосемантика) (Millikan 1984, Papineau 1984).

Телеосемантиката е натуралистка програма в областта на философия на съзнанието, която редуцира интенционалните и семантични свойства на менталните състояния до биологичната функция на механизмите, които ги пораждат. Биологичната функция на механизмите от своя страна се характеризира с определена еволюционна история, която може и да не гарантира безупречното ѝ изпълнение, но задава норматива за правилното ѝ изпълнение. Що се отнася до гените, тяхното интенционално съдържание също се гарантира от еволюционната им история: гените притежават интенционалност, защото са наследими биологични фактори, селектирани успешно заради това как определят редица (адаптивни) изходни състояния на организма по време на неговото развитие. Именно опирането до етиологията на функцията, което е в основата на телеосемантичното понятие за информация, отговаря на свойствата, които учените приписват на гените: привилегированост (гените се приемат за основни причини за вариациите в приспособимостта), прескриптивност (притежават еволюционно селектирана функция да кодират за определени биологични ефекти) и отвореност към грешки (еволюционната история на гените не гарантира правилното им функциониране като кодиращи фактори).

Съществена характеристика на интенционалните предикати е, че са двуместни. С други думи, те притежават структура от типа на „ x е за y “. Езиковите символи са парадигмален пример за интенционални системи, които удовлетворяват тази структура. Мейнард Смит забелязва, че символните системи и генетичните системи притежават аналогично свойство – връзката и на двете системи с онзи x , към който са интенционално насочени (референтът в единия случай и биологичният ефект в другия случай), е произволна. Както не съществува необходима връзка между думата „ген“ и онова x , което наричаме „ген“ (връзката им е по-скоро историческа, отколкото някаква друга), така и не съществува необходимост (химическа, да кажем), според която кодоните да задават последователността на точно определена аминокиселина.

3. Тезата за информационния паритет между генетичните и епигенетичните каузални фактори.

3.1. Аргументи в подкрепа на Мейнард Смит: семантичната нищета на математическото понятие за информация на Шанън.

Основанието на Мейнард Смит да оправдава информационния дискурс в биологията, експлицирайки го в термините на телеосемантиката, е, че търси такова понятие, което да избегне т.нар. „паритет” между генетични и епигенетични фактори. Според тезата за паритет не съществува понятие за биологична информация, което да е приложимо експлицитно върху ДНК, но не и върху други фактори с каузално влияние върху развитието на организма. Тезата бива формулирана първоначално покрай провала на понятието за информация на Шанън да предостави нужния теоретичен инструментариум за разграничение между генетични и негенетични каузални приноси. Причините за този провал са няколко.

Първо, според математическата теория за комуникацията всеки фактор, включително и такива извън организма, който притежава каузален ефект върху някоя биологична единица, може да се определи като информационен източник. Биолозите обаче не са склонни да третират всички каузални фактори като източници на информация. Съответната терминология е ограничена до конкретни причини, каквито могат да бъдат различните форми наследствен материал. Следователно, понятието на Шанън е неприложимо в случая, за разлика от телеосемантичното понятие за информация. Второ, отношението между „източник” и „получател” в математическата теория за комуникацията по дефиници е обратимо и разграничението между двете е въпрос на научен интерес. С други думи, разграничението между „източник” и „получател” не разчита на характеристики, свойствени на изследваната система, а биологичните системи притежават такива характеристики. Например, протеините не могат да са източник на информация в смисъла, в който се говори за „информация” в Централната догма. Следователно, понятието на Шанън е неприложимо в случая. Трето, математическата теория за комуникацията съвсем преднамерено игнорира значението или съдържанието, което може да носи едно или друго съобщение, поради което по дефиниция не концептуализира феномени като възникването на грешки. Както знаем, генетичните процеси са отворени към грешки. Имайки предвид тези три точки, според

Мейнард Смит ни е нужно семантически по-богато понятие, което да адресира съответните проблеми.

3.2. Аргументи против Мейнард Смит: епигенетичните наследствени системи като носители на интенционална информация.

Тук се изследва въпроса дали телеосемантичното понятие за информация на Мейнард Смит наистина може да избегне „паритета”. Според представителите на т.нар. „теория за системите на развитие” (*Developmental systems theory*, както е на английски език, или просто *DST*, както ще я наричам отгук нататък) всяко адекватно понятие за информация трябва да позволява и на други фактори, не само генетични, да бъдат описвани като носители на информация за развитието на организма. *DST* е програма в биологията, която се отдалечава от стандартната ген-центристка позиция и се опитва да обоснове по-холистки (например, гените са едни от многото ресурси, необходими за биологичното развитие) подход към организмите и еволюцията.

За да аргументират позицията си, представителите на *DST* предоставят свидетелства за наличието на епигенетични наследствени системи в организмите. За епигенетична наследствена система се приема всяка система, която функционира като фактор или механизъм при предаването на наследствена информация, но не е ограничена до предаването на ДНК-структури. Примерите в контекста на митозата са добре познати на биолозите. Част от примерите за подобен тип материални структури, които се предават от клетка на клетка, но са различни от ДНК-последователностите, включват клетъчните мембрани и клетъчните „репродуктивни органи” – центриолите. Както ДНК-последователностите се използват като модел за синтеза на РНК и в следствие на протеините, така и пре-съществуващи клетъчни структури се използват като модел за синтеза на нови клетъчни структури.

По-важното в случая е дали съществуват епигенетични системи, които да участват в образуването на наследими полови разлики между организмите без да засягат самите кодиращи структури като такива. Метилирането на ДНК е най-добре изследваният случай на епигенетична наследствена система в този смисъл. Процесът представлява добавяне на метилова група към някои от цитозините на съответната ДНК-последователност, което оказва влияние върху активността ѝ без да променя самия ред

на базите. Забелязано е, че маркираните последователности се предават мейотично, така че, ако при женски организъм се получи метилиране на последователност в X хромозомата и следващото мъжко поколение получи от майка си само една X хромозома, то не би било способно да транскрибира гените в тази последователност. Съответно достъпът на това мъжко поколение до някои генетични продукти би бил блокиран. Други примери включват някои микроорганизми като *Wolbachia*, *Spiroplasma*, *Cardinium*, *Rickettsia* и *Arsenophonus*, които не само се возят „безплатно” върху репродуктивните процеси на своите гостоприемници, но и участват във фенотипната диференциация на популационно ниво. Не толкова популярна, но въпреки това срещаща се позиция сред някои представители на *DST*, е, че екологичната ниша също така представлява поредният кандидат за епигенетична (в случая екологична) наследствена система. Основанието за подобна позиция е, че особеностите на нишата съществуват заради действието на предишните поколения върху околната среда и тези особености оказват влияние върху еволюцията на животинските видове с години напред.

Като обобщение, *DST* приема редица негенетични фактори (те, разбира се, могат да варират спрямо различните аргументи на представителите на течението) в или извън границите на тялото като ресурс за развитието на организма и съответно като носител на интенционални свойства, поради което интенционалното разбиране за информация не ни върши отсяващата теоретична роля, на която Мейнард Смит се надява.

3.3. Символичната връзка между генетичните системи и генетичните продукти: „за” или „против” тезата за информационен паритет?

На пръв поглед изглежда, че концептуалният апарат на Мейнард Смит притежава нужните средства, за да се измъкне от информационния паритет. По-рано стана дума, че носителите на интенционална информация предполагат каузалност, която не всяка адаптирана функция може да удовлетвори спрямо продуцираните от нея ефекти. В случая с генетичния материал и техните ефекти, връзката е „произволна”. Годфри-Смит контрира Мейнард Смит, допускайки, че „произволът” не е специално отношение, а следствие от увеличаващото се ниво на каузално разделение между две отдалечени събития, което предполага и увеличен брой фактори, от които зависи тяхната връзка. Съответно това увеличава броя на начините, по които тази връзка може да се промени.

Възражението обаче пропуска идеята на Мейнард Смит. Видяхме, че за него семантичните свойства на гените са продукт на естествения подбор. За да притежават обаче семантичните свойства на генетичния материал адаптивен ефект върху организма, трябва да съществува приемник, който се е адаптирал да отговаря на предаваната информация по специфичен начин. С други думи, ако еволюцията промени рецептора, то и адаптивните отговори ще се променят. В този смисъл, не разстоянието гарантира „произволната“ връзка, ами еволюцията.

Ева Яблонка доразвива идеята на Мейнард Смит, използвайки аргумента за еволюирания рецептор и съответно за адаптивните му отговори, но отрича, че източникът трябва да е продукт на естествения подбор, за да третираме x като носител на интенционална информация. Например, общото между факторите в средата (облаци), наследствените системи (ДНК) и човешките инструкции (влакови табла) е, че и трите категории са разпознаваеми като източници на информация, защото приемникът е предразположен към реакции спрямо формата на източника (и варианти в тази форма) по функционален и адаптивен начин (цветът на облаците може да накара животните да търсят подслон; ДНК може да окаже влияние върху фенотипните разлики между поколенията; влаковите табла могат да зададат посоката на поведение на пасажерите). Подобна реконцептуализация на интенционалното понятие за информация разхлабва неговата употреба в разумни граници (без да го прави претендент за елиминация), така че предикатът „биологичен“ да е все още приложим към него (доколкото поведението на приемника е еволюционно обосновано) и така че семиотичните конотации да бъдат запазени (реакциите на приемника са спрямо организацията и формата на източника, а не спрямо физичната и/или химичната му конституция), но в същото време да обхваща негенетични системи, включително фактори от околната средата (като пълното с черни облаци небе²), с което отново да се аргументира „информационният паритет“.

4. Генетичната програма.

4.1. Раждането на една метафора.

² Напротив, според телеосемантичната теория на Мейнард Смит, черните облаци по дефиниция няма как да са носители на семантични свойства, защото не са обект на еволюционен натиск.

Телеосемантиката на Мейнард Смит до голяма степен е мотивирана от аналогията между компютърните програми и функционалността на генома. Понятието за генетична програма се заражда през 60-е години, когато молекулярната биология е успяла да предложи основните механизми за трансфер на генетичната информация, с което налага информационния речник в биологията, но е оставила въпроса за това как геномът направлява ембрионалното развитие незасегнат. През 1961 г. излизат две публикации, едната на еволюционния биолог Ернст Майр (1961) и другата на бъдещите Нобелови лауреати Франсоа Жакоб и Жак Моно (1961), които без да реферират една към друга употребяват новата метафора като обяснително понятие за оставената от молекулярната биология празнина. Първоначално, понятието за програма се появява в статията на Майр като опит да се репонятизира каузалността в биологията, поради което случаят наподобява този с Централната догма на Крик. Чрез понятието за генетична програма обаче Майр се опитва да предложи конкурентни езикови средства на симптоматичните за биологията телеологични обяснения. При нобеловите лауреати Жакоб и Моно понятието за програма обобщава дългогодишната им работа върху регулацията на генетичната експресия в лактозните системи при *Escherichia coli*. Както ще свидетелства по-късно и Жакоб в книгата си *The Logic of Life*, „понятието за програма направи от телеологията почтена жена”.

4.2. Формализиране на понятието за програма: теорията за алгоритмичната сложност

Години по-късно, в контекста на мотивирания от Мейнард Смит дебат около информацията в биологията, Уини ще предложи, че понятието за програма, както е формализирано от теорията за алгоритмичната сложност на Соломонов, Колмогоров и Чайтин, може да изведе информационния дискурс от обвиненията в паритет и да го ограничи до генетичното действие. В контекста на теорията за алгоритмичната сложност информацията се дефинира като най-минималната (измерена в битове) програма p , която може да изчисли низ от краен брой символи X в Универсална Тюринг машина (или УТМ). Плюсът според Уини е, че за разлика от класическата информация на Шанън, алгоритмичната информация е неутрална спрямо процесите, генериращи структурата на последователностите, поради което не е необходимо да търсим стриктни биологически аналогии за елементите от комуникационната система. Като резултат, можем да избегнем объркването около това кое е „източник” и кое

„приемник” в контекста на биологичните системи. Минусът обаче е, че подобно на информацията на Шанън, алгоритмичната информация не е приложима върху семантичното съдържание на предмета под внимание, а единствено върху неговия синтаксис. Поради тази причина Уини се чувства длъжен да предложи минимален критерий за третирането на алгоритмичната информация в биологията като „смислена”.

Съществуват два проблема, свързани с подхода на Уини. Първият е, че подобен ход не е нужен. Както демонстрира Розенбърг, понятието за интенционалност (респективно - смисленост) е не само неадекватно в конкретния случай, но и принципно ненужно при говоренето за програми (били те генетични или артефактуални). За да аргументира позицията си, той се обръща към мисловния експеримент на Сърл с „Китайската стая”, концепцията на който е, че следването на алгоритмични стъпки е крайно недостатъчно условие за приписването на интенционални състояния извън нашите собствени. Така стигаме и до втория проблем: с какво понятието за програма е по-различно от останалия арсенал от подобни понятия? Самата възможност да го използваме на различни нива на описание (например Апър го използва, за да опише децентрализирания клетъчен контрол, а не централизирания генетичен контрол) подсказва, че то също е индикатор по-скоро за епистемичните съображения на учените, отколкото за наличието на действителни информационни процеси на биологично равнище.

5. Биология без информация: термодинамика и пробалистични каузални вериги.

Очертаната до сега стандартна философска картина остава разкрячена между дуализъм (информационни и не-информационни каузални фактори) и някаква форма на монизъм, според който информационните причини могат да се увеличават прогресивно в зависимост от нивото на описание. Съществува обаче и трета алтернатива – биология може да се прави и без понятието за информация. Тази алтернатива е мотивирана от Саркар, според когото понятието за биологична информация е изгубило теоретичната си роля с развитието на молекулярната биология. Поддържана от Джовани Боньоло, тезата гласи, че независимо с какво понятие за информация работим (интенционално, на Шанън или алгоритмично), ние можем да го заместим с говоренето за химични агенти, термични флукуации, метаболитни процеси, физични сили и пробалистични описания. Теорията на Боньоло страда обаче от един основен недостатък, за който

самият автор си дава сметка. До момента проблемът за стереоспецифичността пречи за формулирането на глобална редуционистка теория. Някоя физична теория не може да обясни защо регулаторният протеин *MAT-a2* е съвместим точно с участъка от ДНК *ЦАТГТААТТ*? Или защо антикодонът *3'-АЦЦ-5'* пасва точно на *5'-УГГ-3'*? Подобни феномени за сега си остават легитимен предмет на еволюционната биология. Но не означава ли това, че в границите на този нередуцируем участък от биологията, информационните понятия всъщност не са опционални (поради липсата на физична алтернатива)? Все пак един от каналите, през които информационните понятия влизат в биологията, е именно еволюционната теория с нейните квази-телеологични и функционални обяснения и контингентни принципи.

Глава III.

От информационен дискурс към информационни модели

В контраст на пренебрежителното отношение към метафоричната стойност на понятието за биологична информация, настоящата глава проследява как метафората всъщност фасилитира някои методологически важни стратегии в научната практика, като конструирането на модели, които принципно да отразяват поне част от важните за конкретната дисциплина епистемични ценности. За целта използвам *секвенционното понятие* на Крик като парадигмален пример, върху който базирам анализа си и показвам как е възможно учените да мислят за определени каузални връзки и структури посредством метафори и как е възможно да използват идеализации и фикции за разбирането на феномените под внимание. Това поставя няколко въпроса, които получават отговор с разгръщането на главата: „какво са научните метафори?“, „защо биологичната информация е научна метафора?“, „каква роля играе тя за идеализацията на биологичните феномени?“, „каква е връзката между идеализациите и практиките по моделиране на биологичните феномени?“ и „как учим за света посредством метафори и модели?“.

1. Генетична информация и генетичен код.

1.1. Потокът на информация като „обулавяне“ и потокът на информация като „спецификация“: анализ на дефинициите.

За отправна точка на анализа си приемам двете дефиниции на Крик за биологична информация, които се срещат в статията му за Централната догма на молекулярна биология (вж. глава I, секция 4).

(1) „генетична информация“ =_{df} „точната обусловеност на последователността или на базите, или на аминокиселините в протеина“

(2) „генетична информация“ =_{df} „спецификацията на аминокиселините в протеина“

Допълнително, приемам, че една от двете дефиниции може да се аргументира като по-прецизен израз на понятието на Крик за генетична информация. Съществуват много основания да привилегираме дефиниция (1), не защото дефиниция (2) е принципно неправилна, а защото (1) ни позволява да разберем генетичната информация в термините на каузалната зависимост между различните последователности и по този начин да редуцираме проблема за специфичността до проблема за секвенцизацията. Самият Крик говори за редуциране на проблема от „триизмерен“ (намеквайки за доминиращия по това време триизмерен модел за протеиновата специфичност на Полинг) към „едноизмерен“ и приема, че понятието за информация предоставя нужния инструментариум за опростяване на една целева биологична система, която не е била добре позната на биолозите по това време. Опростяването на системата се състои в концептуалното изолиране на химико-физичната специфичност и заменянето на сложните макромолекулни взаимодействия с прости серии от стъпки, репрезентирани позволени посоки, в които една линейна верига от дискретни единици може да детерминира друга линейна верига от дискретни единици. На практика това, което остава е Централната догма на молекулярната биология.

1.2. Кодът зад генетичната информация.

Като резултат от интелектуалния труд на Крик, Догмата представлява една от успешните генерализации в биологията, а нейна най-емблематична характеристика е информационната ѝ формулировка. Въпреки че Уотсън и Крик говорят за информация и код още в първите си публикации, свързани с триизмерния макет на ДНК, човекът, който обръща вниманието на двамата биолози към евристичната роля на съответните понятия е физикът Джордж Гамов. Благодарение на Гамов, Крик се присъединява към *RNA Tie Club*, където заедно с други биолози, физици и математици се надпреварват кой ще предложи най-елегантното решение на математическия проблем (познат също така като „проблем за кодирането“) как последователност от 4 нуклеотида детерминира последователност от 20 нуклеинови киселини. Физична интерпретация на проблема не липсва, но Крик и колегите му признават (Crick et al. 1957, p. 417), че метафората за кода е тази, която играе основната роля при намирането на решение. Това означава, че решението следва да удовлетворява условия, наложени спрямо нумерологични и информационни, а не спрямо физични и химични съображения. Методологически, решението наподобява случая с Централната догма на молекулярната биология, която

отказва да адресира генетичните процеси като химико-физични. Вместо това имаме създаването на хипотетични схеми и диаграми, в центъра на които намираме две понятия – понятието за информация и понятието за код. В следващите секции се фокусирам върху ролята, която двете понятия играят за методологическата особеност на подхода на Крик.

2. Установяване на епистемичната стойност на понятието за биологична информация.

2.1. Епистемични стандарти и метафоричност.

Целта на миналите две секции беше да се демонстрира, че употребата на понятието за информация – и на производното му за код - не е самоцелна. Ето защо, ако информационната репонятизация на биологичните феномени притежава някаква епистемична (или когнитивна) стойност, то в оптималния случай тя би трябвало не само да не излага на риск стандартите за научност, които философите наричаме „епистемични ценности” (теоретична простота, обяснителен обхват, предвиждащ потенциал и т.н.), тя би трябвало да допринася към тяхното запазване и промотиране. Крик, например, сам ни подканва като форма на „инструктивно упражнение” да се опитаме да изградим „полезна теория” без да използваме Централната догма, споменавайки, че по този начин ще завършим в „необятната пустош” (вж. Crick 1958, p. 152). Моята теза е, че Крик е постигнал успеха на Централната догма благодарение на метафорическата употреба на понятието за биологична информация.

2.2. Уроци от историята и философията на науката.

За да разберем как метафорите допринасят за научните стандарти, трябва да разберем как учените се възползват от техните ефекти. По-систематичният философски интерес към метафорите в науката е мотивиран от т.нар. „интеракционен възглед” на Макс Блек, според когото метафорите създават нови (или поне допълнителни) езикови значения от взаимодействието на термини, принадлежащи към различни семантични полета. Например, метафората „Светлината е вълна” не само имплицира някаква прилика между двата обекта (която просто може да се изрази и в буквални термини), тя също така подчертава едни и скрива други детайли от семантичната система, която принципно може да се асоциира с думата „светлина”. По думите на Ричард Моран, това

създава „рамкиращ ефект“ (или епистемична перспектива), който би се различавал от „рамкиращия ефект“ при концептуализирането на светлината в термините на движещи се тела като гюлетата или билиардните топки. Създавайки подобен тип аналогия между поведенческите черти на два принципно различни обекта (светлина – морски вълни), метафората може да насочи учените към експериментален дизайн, чрез който да изучават каузалните свойства на реалната система (например чрез проведения от Йънг още през 1803 г. експеримент с двата процепа) или към модел, чрез който да симулират каузалните свойства на реалната система (например в пулверизационен резервоар с вода).

Според съвременната когнитивна наука, употребата на метафори действително не се изчерпва с експресивна и стилистична роля дори във всекидневието. Лейкъф и Джонсън, например, забелязват, че метафорите представляват съществен когнитивен процес, който позволява на когнитивните агенти да асимилират сложни изживявания и концепции посредством по-познати области на опит. Метафори като „Любовта е пътешествие“ са резултат от взаимодействието между област-цел („любов“) и област-източник („пътешествия“). Областта-източник черпи опитната си база от следните фактори: тела (сензомоторна система, умствени способности, емоции и т.н.); заобикаляща среда (ядене, движение, манипулиране на предмети и т.н.); културни особености (социални, политически, икономически и религиозни фактори). Би било неуместно да се допусне, че учените не споделят същите когнитивни способности, каквито хората използват за решаване на всекидневни задачи (което не означава, че ги използват по същия начин).

2.2.1. „Биологичната информация“ научна метафора ли е?

Както беше споменато, метафорите създават „рамкиращ ефект“ поради това, че възникват от взаимодействието между две различни семантични области. Преди Уотсън и Крик понятието за информация е чуждо на биологията. Крик го въвежда покрай Централната догма, с което му придава нов смисъл: „точната обусловеност на последователността или на базите, или на аминокиселините в протеина“. От тук и новата епистемична перспектива: заменянето на „триизмерния“ модел на Полинг с модел, в който макромолекулната динамика по време на синтеза е резултат от едноизмерна нуклеотидна последователност.

Стандартизирането на една метафора чрез интензивната ѝ употреба обаче може да ни попречи да я възприемем като метафора. Понятието за биологична информация е такъв пример. За да го разпознаем обаче като метафора, трябва да съществува област-източник, от която областта-цел да черпи смисъл. Лейкф и Джонсън припомнят, че „видът концептуална система, която имаме, е продукт на това какви същества сме и на начина, по който взаимодействаме с нашата физическа и културна среда” (Lakoff & Johnsen 2003, p. 119). Проследявайки ранните употреби на понятието за информация (глава I, секция 1.1.), виждаме, че първоначално „информацията” е била употребявана в смисъла на *оформям*. В днешно време „информацията” изглежда като абстрактно понятие, защото съвременните ѝ употреби са натоварени с допълнителни културни импликации и асоциации покрай т.нар. „информационна ера” и „дигитална революция”. Именно тези допълнителни импликации и асоциации позволяват на Крик да използва „информацията” не само като аналогия на това, че една макромолекулна последователност *оформя* реда на друга макромолекулна последователност, но и по теоретико-конститутивен начин с оглед на генетичната каузалност по време протеиновия синтез.

2.2.2. Принос към предвиждащия потенциал на научната теория.

Метафорите за биологична информация и генетичен код предполагат, че човешките символни системи (цифри и букви) и аминокиселините споделят интересни свойства: и символните системи, и аминокиселините представляват фиксирани компоненти, които биват комбинаторно структурирани на базата на произволни правила. Метафората, идентифицираща съответната аналогия, позволява дескриптивната терминология от областта-източник да бъде използвана по смислен начин върху областта-цел. От тук и говоренето за „копиране”, „информационен трансфер”, „процедури на превод” и т.н.

Освен да разширяват терминологичния запас на теорията, добрите научни метафори разширяват и предвиждащия потенциал на научната практика и създават нови фалсификационни условия. В най-общи линии, стойността на метафоричното мислене си проличава най-вече там, където то разкрива свойства, които не могат да се припишат на целевата област единствено въз основа на наличната теория. Всяка предложена

кодираща схема, например, представлява хипотетично описание на каузалните компоненти (като „смислени” и „безсмислени”), на процесите (в каква посока се четат кодоните), както и на структурните (дали кодоните са застъпващи се или не) и релационни (дали кодът е редувантен или не) свойства на подлежащия синтез на протеини механизъм. Като допълнение към генетичния код, Централната догма прави по-генерални предвиждания относно възможните посоки на генериране на реда на последователностите между трите вида полимерни семейства: (а) ДНК → ДНК; (б) ДНК → РНК; (в) РНК → ДНК; (г) РНК → протеин; (д) РНК → РНК; (е) ДНК → протеин. Допълнително, Централната догма прави и негативно предвиждане: за невъзможността на механизма да използва последователностите на протеините за генериране на последователностите на РНК и ДНК.

2.2.3. Принос към конкретизацията на абстрактни проблеми.

Самата идея за код и информация може да бъде достатъчно абстрактна, но тя често върви с различни иконични ресурси, които правят когнитивния достъп до белязаната от метафората аналогия по-лесно проследим. Докато кодът е таблица, уточняваща участващите компоненти и техните релации (с което предоставя потенциално обяснение на това как синтезът на протеини възниква от оперативно свързани части), Догмата е диаграма, проследяваща продуктивната последователност на механизма - от иницирането на процеса до неговата терминация. Тази динамика е изобразена върху иначе статичната диаграма чрез стрелки, посочващи възможните каузални пътища на запазване на линеарната подредба от една фаза на механизма към друга.

2.2.4. Принос към опростяването на сложни системи.

Простотата и пестеливостта, като едни от най-обсъжданите епистемични ценности, също могат да се възползват от метафората. При конструирането на модел фокусирането върху всеки детайл в целевата система не е най-адекватната стратегия. Често да се остави само скелетът на механизма се оказва достатъчно, за да бъде проследено неговото поведение. В такъв случай можем да третираме метафората като носител на онези идеализиращи предположения, позволяващи ни да конструираме интерпретация на феномена, в която някои от характеристиките му са концептуално изолирани, а други - подчертани. Например, Централната догма подчертава трите

основни каузални фактора в механизма на протеиновия синтез (ДНК + РНК + протеини) и се интересува от връзката помежду им просто в термините на комбинаторно влияние на последователности.

2.3. Метафоричност, идеализиращи допускания и научни модели.

Ако дискредитираме научните метафори - и базираните на тях модели – просто като грешни и подвеждащи, както прави Саркар, ще изхвърлим бебето с мръсната вода, защото това, което ги прави грешни, е същото нещо, което ги прави и от полза. Поради сложността на света и поради когнитивните ни ограничения, учените прекарват съществена част от работата си, опростявайки изследвания феномен, така че да проследят минималните условия, които го пораждат. Някой път задачата по опростяване изисква определени детайли да бъдат пропуснати от описанието (този акт наричам „абстракция“), а друг път опростяването изисква преднамереното привнасяне на грешни репрезентационни ефекти (този акт наричам „идеализация“). Пример за описание, което разчита не само на абстракция, но и на фикция е моделът на Фибоначи за популационната динамика, според който биологичните популации растат прогресивно на фиксирани интервали сякаш не съществуват такива фактори като конкуренция за ресурси, генетични болести, свързани с размножаването между близкородствени екземпляри, опасност от хищници и т.н. Друг пример, естествено, е описанието на генетичната каузалност като информационен трансфер или като кодираща релация, в която не участват химико-физични принципи. Точките, по които описанието се отдалечава (или изкривява) от реалността, се наричат „идеализиращи допускания“.

Метафорите могат да допринасят към формулирането на идеализиращите допускания. Например,

ако M , то A_1, A_2, \dots, A_n ,

където M е съответната метафора (за „код“ или „информация“), а A_1, A_2, \dots, A_n са допуснатите идеализации ($A_1 =$ „някои от 64-е триплета са смислени, а други не“; $A_2 =$ „не е важно да уточняваме дали РНК или ДНК са нуклеотидните киселини“). Понеже метафората е свързана с начин на изказване, по време на който намерението на

говорящия се различава от фактическия речеви акт (Searle 1979), кондиционалната схема, включваща метафората като antecedент, е контрафактуална. С други думи, Крик иска да провери какъв би бил резултатът, ако случаят беше такъв, че проблемът за протеиновия синтез опира до кодиране и предаване на информация.

Имайки предвид казаното до тук, основният въпрос, който касае метафорите и участието им в конструирането на модели, е как учим чрез тях за аспекти от света, след като те очевидно продуцират изкривени представи за света?

2.3.1. Проблемът за научната репрезентация.

Въпреки разнообразието от модели, когато се говори за тяхната функция в науката, най-често дискутираната тема засяга начина, по който учените придобиват чрез тях знание за аспекти от света. Допускам, че независимо какви обекти служат за модели, те трябва да отговарят на следната схема:

M е научна (или епистемична) репрезентация на *T* тогава и само тогава, когато ____.

Настоящата секция представлява обзор на няколко различни отговора с какво да запълним празното място в схемата:

- a. *M* репрезентира *T* тогава и само тогава, когато *M* е в отношение на подобие с *T*.
- b. *M* репрезентира *T* тогава и само тогава, когато учените предложат хипотеза за отношенията, по които *M* и *T* си приличат.
- c. *M* репрезентира *T* тогава и само тогава, когато (i) репрезентационната сила на *M* сочи към *T* и когато (ii) *M* позволява на компетентен и запознат агент да прави специфични заключения за *T*.
- d. *M* репрезентира *T* тогава и само тогава, когато агентът интерпретира *M* в термините на *T*, а *M* е интерпретируем в термините на *T* тогава и само тогава, когато (i) някой денотира *T* посредством *M*, (ii) някой денотира всеки релевантен обект в *T* посредством обект в *M* и (iii) някой денотира всяко релевантно свойство в *T* посредством обект в *M*.

Секцията завършва със заключението, че **a**, **b**, **c** и **d** предлагат незадоволителни отговори на въпроса как и защо един модел притежава когнитивна релевантност за

този, който го употребява. Например, **a** изпада в концептуален проблем, защото отношението на подобие предполага вид симетрия между обекта и неговия модел (ако $M=T$, то $T=M$), а репрезентацията е в някакъв смисъл еднопосочна ($M \rightarrow T$, но не и $T \rightarrow M$). Вторият случай **b** изисква ангажиране с философска теория относно начина, по който теоретичните термини се отнасят към света, а третият случай **c** е незадоволително неясен. Последният случай **d** предоставя най-пълна картина, но денотацията, макар и необходима за насочеността на репрезентацията (т.е. да бъде все пак репрезентация *на* нещо), не е достатъчно условие, за да конституира репрезентационната функция на модела.

2.3.2. Алтернативата: епистемичен фикционизъм.

Като алтернатива, аз предлагам епистемичната схема „ M е научна репрезентация на T тогава и само тогава, когато___” да се мисли фикционистки. Епистемичният фикционизъм е мотивиран от самата практика по моделирането на научните феномени посредством почти неизбежното опериране с идеализиращи предположения и има корени в мисленето на научните модели по аналогия на художествените творби (Картрайт), художествените истории (Морган), контрафактуалните светове (Съгдън) и карикатурите (Гудман). Фикционизмът във философия на науката, както е развит днешно време от философи като Адам Туун и Роман Фриг, стъпва върху теорията за игрите на ужким на Кендал Уолтън. Приемайки речника на Уолтън и с пренебрежими (за случая) разлики помежду си, Туун и Фриг приемат, че

M е научна репрезентация на T тогава и само тогава, когато M функционира като „реквизит” в игра на ужким, която определя какво участникът да си представи за T .

Централната догма на молекулярната биология репрезентира каузалните отношения между полимерите, приписвайки им информационни свойства по начин, подобен на пасажа във „Война на световите”, където Хърбърт Уелс описва дупките по покрива на катедралата „Свети Павел” в Лондон. Пасажът, съдържащ това описание, репрезентира - в Уолтъновия смисъл - Катедралата, защото кара читателите да си представят дупки по нейния таван. Съответно, Централната догма репрезентира каузалните отношения на полимерите, защото текстът (или пък съответната диаграма) генерира въображаеми пропозиции относно целевата система (например, че „информацията, веднъж

попаднала в протеина не може да излезе”). По подобен начин, всеки един от членовете на *RNA tie club* предлага вербални и иконични „реквизити”, подканващи участниците да си представят синтеза на протеини сякаш връзката между кодоните и аминокиселините е кодираща схема, информационен трансфер, текстова структура, нумерологичен и криптографски проблем.

Плюсът на фикционизма е, че представлява деривативна теория: той обяснява репрезентационната сила на научните модели чрез ментални състояния като въображението. Едно от основните притеснения покрай формулираната позиция може да се сведе до следното: фикционизмът стимулира типове поведения, чужди на традиционния научен етос, защото разчита на въображаеми пропозиции, а не на убеждения. Като отговор може да се посочат две неща. Първо, фиктивните пропозиции не означават задължително неистинни пропозиции. Второ, въображението може да бъде ограничавано и фасилитирано. Някой може да си представи, че молекулата на ДНК притежава пръчковидна форма, но това влиза в противоречие с прескрипциите на триизмерния макет на Уотсън и Крик. По подобен начин Централната догма ни забранява две неща: да си представяме протеиновия синтез като материално-енергиен и да си представяме, че протеините могат да детерминират последователностите на нуклеотидите.

Причината, поради която, фиктивните пропозиции вършат работа на учените е, че на когнитивно равнище се характеризират със същите инференциални механизми, които направляват формирането на убеждения, но с тази разлика, че не притежават директен достъп до взимането на поведенчески решения (Stich & Nichols 2000). Да вземем за пример метафората, че „протеиновият синтез е информационен процес”. Нека изведем от нея фиктивни пропозиции *a* и *b* (например, че „нагъването е просто функция на последователността на аминокиселините” или че „информацията, веднъж попаднала в протеина не може да излезе”). Тогава крайният резултат може да е формулирането на ново убеждение с кондиционалната форма „Ако протеиновият синтез е информационен процес, то *a*, *b* и *c*”. Как ще се развият обаче нещата след това не е до метафората или до мотивирания от нея модел. След като вече сме формирали ново убеждение, а убежденията притежават (директен) принос за предприемането на действия, може да преминем към съответните научни операции по тестването на хипотези.

2.3.3. Централната догма и кодиращите схеми като *репрезентации-като*.

Изхождайки от фикционистката позиция, формулирана в миналата секция, тук развивам тезата, че Централната догма не е просто репрезентация *на* каузалните отношения между трите семейства полимери, тя е също така и тяхна репрезентация *като* информационен трансфер. Гудман и Елджин откриват, че, за да функционира даден предмет X като репрезентация-*като* (с други думи, X репрезентира T като Z), той трябва да удовлетворява две форми на референция: екземплификация и денотация. Когато X екземплифицира даден клас от свойства P_1, \dots, P_n (например, информационни свойства), той се нарича Z -репрезентация.

X е Z -репрезентация тогава и само тогава, когато илюстрира Z -свойства $P_1 \dots P_n$.

X обаче трябва да има на какво да ги припише. Това се гарантира от денотацията. Денотацията е двуместно отношение, което установява връзката между X и T и по този начин превръща X в *репрезентация-на*, а комбинацията от екземплификация и денотация превръща X в *репрезентация-като*.

X репрезентира T като Z тогава и само тогава, когато (i) X денотира Y , (ii) X илюстрира Z -свойства P_1, \dots, P_n (т.е. X е Z -репрезентация) и (iii) P_1, \dots, P_n биват приписани на T .

От тук следва, че **Централната догма е информационна репрезентация, защото илюстрира информационни свойства, но не е репрезентация *на* информационна система, защото денотираният обект е микробиологична, а не информационна система.**

Настоящата схема може да бъде допълнително прецизирана, така че да съответства на научната практика. Преди всичко, обектът X следва да бъде припознат като съответстващ на свойствата, които учените искат да илюстрират чрез него. Нека $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ и $Z = \{P_1, \dots, P_n\}$ са релевантните класове от свойства. Според настоящата теза, метафората за биологичната информация е тази, която създава връзката между двата класа свойства.

M е Z -репрезентация тогава и само тогава, когато $M = \{X, I: X \rightarrow Z\}$, където M е научният модел, X е някакъв обект, а $I: X \rightarrow Z$ е метафоричната интерпретация, която общността от учени заема спрямо него.

Когато Централната догма описва каузалните отношения между трите семейства полимери като информационен трансфер, това не означава, че биолозите приписват действителни информационни свойства на съответната биологична система. Вместо това нещата, към които информационното описание ги насочва, са посоките на генериране на едни химически конституенти от други. По Роман Фриг, това означава, че моделът се нуждае от „правило”, което да подсказва как фактите в модела да бъдат преведени в твърдения относно целевата система. Нека отново приемем, че $M = \{X, I\}$ и че P_1, \dots, P_n са Z -свойствата, илюстрирани от M . При това положение функцията на правилото K е да свързва класа $\{P_1, \dots, P_n\}$ с класа на кандидатите за приписване $\{Q_1, \dots, Q_n\}$ на целевата система T . Вече можем да кажем, че

M репрезентира T като Z тогава и само тогава, когато (i) M денотира T , (ii) M е Z -репрезентация, (iii) M притежава K , така че $K(\{P_1, \dots, P_n\} \sim \{Q_1, \dots, Q_n\})$ и (iv) поне едно свойство от $\{Q_1, \dots, Q_n\}$ да може да бъде приписано на T посредством M .

Схемата не ни казва нито дали X денотира правилно T , нито дали T притежава в действителност някое от илюстрираните свойства. Единственото, което схемата ни казва е как на базата на M могат да се формулират допускания относно T , които в последствие да претърпят тестване.

3. От биологична информация към биологична каузалност: каузална селекция, каузална специфичност и генетичен контрол.

Стойността на понятието за биологична информация в разгледаните случаи е, че то позволява на Крик да превърне практическия проблем на биохимиците в теоретичен въпрос относно различните посоки на информационен трансфер. Подобна реконцептуализация вече е част от изграждането на научен модел заради симплифициращите и идеализиращите условия, които метафоричното мислене привнася. Като резултат, пред Крик стои не самата генетична експресия (и протеиновия синтез, в частност), ами определен начин на въобразяване на генетичната експресия

(като оголена от химико-физичната си идентичност, като протичаща в определени посоки и непротичаща в други, като сигурен информационен пренос и т.н.). Идеализирана по съответния начин, Централната догма описва теоретичния минимум при оперирането на механизмите по време на генетичната експресия: *A* причинява *B*, *B* причинява *C*, *B* причинява *A*, *A* причинява *C*, но *C* не причинява нито *A*, нито *B*. Идеалният лимит прави биологичния проблем лесно ханосмилаем и в настоящата секция показвам, че целта му е да идентифицира онези променливи, които биха представлявали най-голям интерес за учените заради условията на контрол, които позволяват.

Следвайки Удуорд, Уотърс и Вебер, показвам какво означава *A* да притежава каузален контрол върху *B*. В най-общи линии, *A* упражнява каузален контрол върху *B* тогава и само тогава, когато интервенция върху стойност на *A* (и върху никоя друга променлива) ще промени стойност на *B*. Централната догма обаче приема за променливи единствено ДНК, РНК и протеините (като последните не притежават каузален контрол върху останалите променливи). В този смисъл, остава да се отговори на въпроса защо Централната догма не включва други каузално релевантни променливи, каквато е РНК-полимеразата, например. Причината за това е, че ДНК и РНК са едни от многото действителни причинители на разлики не само помежду си, но и върху протеините, обаче само те са специфични причинители на такива разлики. Последното означава, че докато намесата върху РНК-полимеразата може да забави или да спре синтеза на широк клас РНК молекули, директната намеса върху ДНК и РНК, които се отличават с огромно разнообразие от състояния, би притежавала много по-голямо разнообразие от корелирани състояния, които да произведе.

Глава IV.

Граници на формализма на математическата теория за комуникацията

Настоящата глава е опит да се тества формулираното разбиране за ролята на биологичната информация като понятие в друг казусен пример, какъвто е моделирането на биологичните феномени посредством формализма на Шанън.

1. Информация на Шанън.

1.1. Формализмът на математическата теория за комуникацията.

Настоящата секция въвежда формализма на математическата теория за комуникацията и покрива основните дефиниции, касаещи понятието за информация в теорията на Шанън. Най-общо, формализмът в теорията е насочен към оптимизацията на комуникационните системи. Технически, класическата комуникационна система е съставена от *източник* (чиято задача е да избира съобщенията), *трансмисер* (който кодира съобщенията под формата на сигнали), *канал* (с дефинирано ниво на пропускливост), евентуален *източник на шум* (т.е. евентуални причини за нарушаване на сигнала), *получател/декодер* (който декодира сигналите) и *крайна дестинация* (системата, получаваща декодираното съобщение).

Формализмът на Шанън следва да обхваща не само максималната информация в дадено съобщение, но и пропускателната способност на комуникационния канал, наречена също така „капацитет на канала”. Каналът представлява система с входящо и изходящо състояние. След като изходящото състояние зависи от входящото, между двете съществува ниво на корелация (т.нар. „взаимна информация”), благодарение на което получателят е в състояние да предвиди сходството между изпратеното и полученото съобщение.

1.1. Приложение в биологията

1.1.1. Основания за прилагането на формализма на Шанън в молекулярната биология

Системите, върху които информационната теория се прилага, са системи, чиито микро-състояния могат да се представят като последователност от символи. Както демонстрирах в миналата глава, подходът на Крик към проблемите на молекулярната биология включва концепции и въображаеми представи относно операциите на хипотетична система, оголена до голяма степен от химико-физичната си идентичност. Това прави приложението на математическия формализъм на теорията на Шанън релевантно, особено що се отнася до две точки: от една страна това е линейната подредба на нуклеиновите киселини, а друга страна това е участието на нуклеиновите киселини във формирането на протеиновите молекули.

1.1.2. Обзор на математическите модели: Квастлер, Гатлин, Йоки, Шнайдер

Настоящата секция дава примери как се е използвал формализмът на Шанън за моделиране на биологични феномени. Началото на 50-те години ражда първите стъпки към установяването на приблизителната синтактична информация в човешкия геном (Dancoff & Quastler 1953), но поради липсата на знание за структурно-функционалната специфика на ДНК, проведените изчисления се оказват не само случайни, но и напълно лишени от биологичен смисъл. Липсата на резултати обаче не разколебава опитите за интеграция на новия формализъм, а с молекуляризацията на биологията се откриват и нови начини за неговото приложение. Лила Гатлин, например, посвещава редица влиятелни публикации върху ролята на редундантността за нумерологичното класифициране на организмите от бактерии към гръбначни. Интересни и дори коректни от математическа гледна точка, количествените резултати на Гатлин не водят до нови качествени прогнози. Както самата тя отбелязва, резултатите преформулират добре известния за биолозите факт, че съставът на гуанин-цитозинови двойки варира между видовете.

В положителен план обаче изчисленията на Гатлин поне са пример за формално сходство между генетичните и комуникационните системи, което в някакъв смисъл оправдава използването на информационната терминология за изследване на генетичните регулярности. Това формално сходство е експлоатирано по-късно от Йоки,

който е първият учен, предложил детайлен модел на генетичната експресия по аналогия на блоковата комуникационна схема на Шанън. Може би най-впечатляващото постижение на Йоки е преформулирането на Централната догма на молекулярната биология в термините на информационната теория на Шанън. Изразена чрез формализма на теорията, Централната догма е свойство на всяка информационна или изчисляваща система, която работи с редуван код. Обратните изчисления, както и обратният пренос на биологична информация, са възможни тогава и само тогава, когато азбуката на източника и азбуката на получателя притежават еднакво количество ентропия на Шанън (такъв е случаят с обратната транскрипция между ДНК и РНК заради техните четирибуквени азбуки). Не е ясно обаче с какво това математическо потвърждение на Централната догма допринася към разбирането на един комбинаторен факт, познат още от времето на Гамов и Крик.

Томас Шнайдер е създател на широко използваната от теоретичните биолози графична техника за изобразяване на класове от последователности, наречена *Sequence Logos*, както и на метод за изчисляване на битовете при разпознаването на свързващите участъци на транскрипционните фактори, в основата на който се намира формализмът на Шанън. Въпреки липсата на пълна експериментална валидация в реални биологични условия, до ден днешен методът на Шнайдер е стандарт в търсенето на свързващи участъци. По време на свързването последователността на едната молекула взаимодейства с тази на другата. Ето защо биохимичното взаимодействие може да се моделира като комуникационен процес и количеството несигурност да се измери като разликата между ентропията преди и след свързването (т.нар. „взаимна информация“).

1.1.3. Комуникационната система като аналогия: случаят „Йоки“

Случаят Йоки е интересен, защото според него „генетиката се подчинява на математиката“ (Yockey 2005, p. 22). Това обаче е бъркане на математическия модел с реалността. В глава III говорих за това как създаването на модел е предшествано от описание (може и да е математическо, какъвто е настоящият случай), уточняващо специфичните параметри на модела, а когато моделът е мотивиран от някаква подлежаща аналогия, метафората, идентифицираща аналогията, позволява инструментариума от областта-източник (дескриптивна терминология, закони, допускания и изчисления) да бъде използван върху областта-цел по теоретично-

конститутивен начин. След като областта-източник в случая са комуникационните и инженерни науки, то основният инструментариум включва използваната от тях система от правила и конвенции, които направляват манипулацията на онези символи, изразени на езика на математиката. Допълнително, този математически формализъм върви с определена теоретична постановка, която може да ни посочи кога моделът ще бъде ефикасен и кога не.

Въпреки че всеки един от елементите на комуникационната система може да бъде представен като абстрактна единица с математически свойства (например източникът и получателят като два класа от символи, а каналът като математическото отношение между техните вероятности), ефективността на модела все пак зависи от идентифицирането на биологичните кандидати, удовлетворяващи функционалната роля на „класическите“ информационни компоненти в комуникационната блоксхема: източник, трансмитер/шифратор, канал, получател/декодер и крайна дестинация. Ето защо дори една формална система като математическата теория за комуникацията може да служи, подобно на Централната догма на молекулярната биология, като „реквизит“, стимулиращ пропозиционалното въображение на учените. Отново, и тук прилагането на информационната схема е начин за организиране на причинно-следствените детайли в целевата система и за подчертаване на определени аспекти на съответните процеси.

2. Граници на приложимост.

В последната секция се прави равносметка на използването на математическата теория за комуникацията като средство за моделиране на биологичните феномени. Може би най-важното следствие от обзорния анализ е, че не съществуват набор от условия, които да гарантират, че информационната концептуална рамка е абсолютно подходяща за описание на целевата система. Използвайки модела на Йоки и сравнявайки го с алтернативни модели, като този на Мей и колеги (2004), показвам, че проблемите, с които се сблъсква моделът с оглед неговата емпирична адекватност, не са поправими чрез теорията на Шанън *per se*, ами всяка корекция и напасване към реалните условия се явява в някакъв смисъл *ad hoc*.

Друг важен момент от равносметката е, че колкото по-идеален и математически-прецизен е даден модел, толкова повече ще допринесе за чувството ни на разбиране на

целевата система. Такъв е случаят с модела на Йоки. За разлика от него обаче, този на Шнайдер не се характеризира с обширна генерализация и математическа прицизност, но притежава това предимство пред останалите коментирани случаи, че използва корелацията между две променливи за правене на предвиждания. Това означава, че увеличаването на генералността на модела почти неизбежно е последвано от намаляването на възможността за постигане на други епистемични ценности, като например правенето на нови и изненадващи предвиждания.

Заклучение и приноси

Като обобщение, дисертацията представлява опит за идентифициране на познавателните ефекти на понятието за биологична информация за биологичната практика. За целта, аргументирах тезата, че „биологичната информация” се употребява като научна метафора, което означава, че понятието за информация и съответния терминологичен запас не предоставят буквални информационни описания, но в същото време не са и просто стилистични придатъци на биологичните теории. В този ред на мисли, като основен принос на дисертацията, мога да посоча следното:

- Дисертацията допринася към философския дискурс върху понятието за биологична информация, демонстрирайки, че съображенията за дискредитирането на „биологичната информация” като „просто метафора” не са основателни.
- Дисертацията допринася към аргумента, че понятието за биологична информация се употребява метафорично, показвайки какво по-точно означава понятието за биологична метафора да се употребява по този начин.
- Дисертацията демонстрира как понятието за биологична информация като метафора допринася за поддържането на епистемични ценности, допринася за формулирането на нови езикови средства, допринася за създаването на нови фалсификационни условия, участва във формулирането на идеализиращите допускания при моделирането на биологичните феномени и допринася за разбирането и проследяването на сложни каузални отношения.
- Дисертацията се фокусира върху конкретни примерни казуси в лицето на Централната догма на молекулярната биология, кодиращите хипотетични схеми на ранната молекулярна биология и използването на информационния формализъм на Шанън за моделиране на биологични феномени. В този смисъл, дисертацията допринася към изясняването на принципите и методологическата роля на тези основни в исторически и научен план „моменти” от развитието на съвременната биология.

- В локален аспект дисертацията се отличава с педагогическа значимост, защото е резюмиран и анализиран дебат във философия на науката, който липсва на български език.