

УДК 004.3

ЗАКОНЫ ИНФОРМАТИКИ В ПРОБЛЕМЕ ПОЗНАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

И. М. Гуревич

Излагается история использования информационных методов в исследованиях естественных и искусственных систем. Описаны свойства сложных систем. Приведены законы информатики и основные результаты, полученные с их использованием: сохранение неопределённости (информации), информационная форма принципа неопределённости Гейзенберга, оценка объёма информации и числа частей во Вселенной, информационная классификация видов материи, тенденций изменения массы обычного вещества при расширении Вселенной. Даны условия и оценки характеристик познаваемости сложных систем, коэффициента сжатия информации, предельных возможностей познания. Определены направления дальнейших исследований.

1. Введение

Большинство учёных считают Вселенную и тем самым, входящие в неё объекты, познаваемой. Среди них А. Эйнштейн, Э. Шрёдингер, Ж. Леметр, К. А. Валиев, И. В. Прангишвили, Н. С. Кардашев, В. М. Липунов, Б. Грин. Так К. А. Валиев считает, что информационные ресурсы природы уже практически исчерпаны [1]: «Второе соображение, на которое я хочу обратить ваше внимание, связано со скоростью постижения мира, которую мы набрали в уходящем веке. Я прожил пятьдесят сознательных лет в науке. На мой взгляд, мы слишком торопимся взять от природы то, что она может нам дать. Вот сегодня мы близки к исчерпанию атома (Ленин насчёт исчерпаемости атома и электрона, я думаю, ошибался). Мы поняли, как он устроен, даже научились на нём считать. Я думаю, и моё мнение разделяют многие коллеги, что мы близки к исчерпанию информационного ресурса природы в целом».

Практически одинокой выглядит точка зрения Ю. И. Манина [2]: «Я попытаюсь объяснить основания для беспокойства.

Оба круга наших представлений, об эволюции и о мозге, состоят из двух компонентов: очень обширные наблюдательные данные и очень примитивные качественные представления о том, как эти штуки могут работать. Компьютерный век открыл принципиальную возможность дополнить эти качественные представления количественными оценками, потому что мы научились измерять информацию, как когда-то физики — энергию (или, точнее, действие). При всей предвзятости нынешних оценок мне кажется, что для переработки тех объёмов информации, с которыми мы имеем дело эволюция и человеческий мозг, у них не должно хватать ресурсов, причём на много порядков — если принять, что мы правильно понимаем, как они работают. Может оказаться, что мы приближаемся к пределу, за которым интересующую нас информацию о природе мы просто не сможем воспринимать, не столько из-за её объёма, сколько из-за величины её колмогоровской сложности. Иными словами, даже в максимально сжатом виде её будет слишком много».

Н. С. Кардашев констатировал, что наряду с материей и энергией Вселенная содержит, включает в себя и информацию [3]. Информация является неотъемлемой частью Вселенной. По мнению ряда учёных (В. М. Глушкова [74], Г. В. Встовского [29], К. К. Колина [75]) и автора [35], по своей физической сущности, информация — это *неоднородности в распределении материи и энергии в пространстве и времени*. Поэтому информация неразрывно связана с материей и энергией.

В свою очередь, наличие информации во Вселенной приводит к необходимости использования информационных методов исследования, как самой информации, так и связанной с нею материи и энергии. Использование *информационного подхода*, наряду с физическим, позволяет получить новые, порой более общие сведения, по отношению к сведениям, получаемым на основе только физических законов. В работах [35–37] показано, что законы информатики определяют физически допустимые преобразования и, тем самым, в значительной мере, физические законы. Поэтому законы информатики, совместно с физическими законами, могут служить эффективным инструментом познания сложных систем, включая Вселенную.

До сих пор обсуждение вопросов познаваемости сложных систем, в том числе природы и Вселенной проводилось, главным образом, на качественном, философском уровне. Ниже будет показано, что законы же информатики дают возможность ис-

пользовать количественные оценки при исследованиях проблем познаваемости сложных систем, в том числе, вопросов познаваемости Вселенной.

2. Краткая история использования информационных методов в исследованиях естественных и искусственных систем

А. Эйнштейн впервые провёл анализ физических процессов с использованием информационных понятий. Пользуясь «мысленными» физическими экспериментами, он установил, что нужно понимать под синхронно идущими, находящимися в различных местах покоящимися часами, и определил понятия «одно-временность» и «время» [4].

Л. Сциллард, анализируя мысленный эксперимент с «демоном Максвелла», показал, что энтропия, теряемая газом за счёт разделения молекул на медленные и быстрые, в точности равна информации, получаемой «демоном Максвелла». Другими словами, сумма энтропии и информации в системе «газ-наблюдатель» оказалась постоянной величиной. Таким образом, *физическая характеристика становится мерой познания*. Причём наблюдатель узнаёт о системе ровно столько, сколько она теряет [5].

И. Фон Нейман ввёл понятие квантовой энтропии:

$$S = \rho \ln \rho,$$

где ρ — матрица плотности. Энтропия Неймана чистого состояния всегда (по определению) равна нулю. Энтропия Неймана оценивает неопределённость смешанных состояний [6].

К. Шеннон [7] ввёл понятие «Информационная энтропия», суть которого состоит в следующем. В дискретном случае случайная величина может принимать значения $1, \dots, i, \dots, n$ с вероятностями $p_1, \dots, p_i, \dots, p_n$ соответственно: $P(i) = p_i$, $\sum_i p_i = 1$.

Энтропия H дискретной случайной величины определяется в битах:

$$H = - \sum p_i \log_2 p_i,$$

и в натах:

$$H = - \sum p_i \ln p_i.$$

В непрерывном случае случайная величина x задаётся функцией распределения

$$F(x) = P(x' < x)$$

или плотностью распределения

$$p(x) = \frac{dF(x)}{dx},$$

причём

$$P(x < x' < x + dx) = p(x) dx.$$

Энтропия H непрерывной случайной величины определяется в битах:

$$H(x) = - \int p(x) \log_2 p(x) dx$$

и в натах:

$$H(x) = - \int p(x) \ln p(x) dx.$$

Э. Шрёдингер писал [8]: «... Не углубляясь в подробности и приняв более широкий взгляд на усилия Эддингтона, которые явились результатом сильной веры в разумность и простоту природы, мы убеждаемся, что его идеи ни в коем случае не одиноки. Даже замечательная теория гравитации Эйнштейна, основанная на разумных экспериментальных доказательствах и твёрдо подкреплённая новыми фактами наблюдений, которые он предсказал, могла быть открыта только гением с сильным чувством простоты и красоты идей. Попытки обобщить его великий удачный замысел, с тем чтобы охватить электромагнетизм и взаимодействие ядерных частиц, полны надежды в значительной мере „догадаться“ каким образом в самом деле действует природа, получить ключ на основе принципа простоты и красоты».

Е. Т. Джейнс предложил метод отыскания равновесных распределений вероятности, используя принцип максимума энтропии при наличии дополнительных условий [9]. Для учёта дополнительных условий (их может быть несколько) используется метод множителей Лагранжа. Все основные результаты равновесной термодинамики могут быть получены на основе этого подхода.

Систематическое применение методов теории информации к анализу физических явлений и процессов, по-видимому, впервые проведено Л. Бриллюэном. Он определил *негаэнтروпийный принцип информации*: «Мы введём теперь различие между двумя видами информации: 1) Свободная информация (free info-

mation), возникающая, когда возможные случаи рассматриваются как абстрактные и не имеющие определённого физического значения. 2) Связанная информация (bound information), возникающая, когда возможные случаи могут быть представлены как микросостояния физической системы».

Л. Бриллюэн исследовал связь между информацией и энтропией. Он показал, что одна двоичная единица информации соответствует энтропии $\Delta S = k \ln 2$ и должна быть оплачена негаэнтропией большей, чем $k \ln 2$. Одна двоичная единица информации должна быть оплачена энергией, не меньшей чем $kT \ln 2$.

Он также получил оценку объёма информации, содержащейся в физическом законе. Пусть физический закон $f(x_1, \dots, x_n) = \text{const}$ правильно отображает экспериментальные факты, с погрешностью, никогда не превосходящей некоторого числа φ . Тогда объём информации I , содержащейся в законе, равен

$$I = \frac{1}{\ln 2} N(\ln F - \ln \varphi).$$

Здесь F — диапазон действия закона, $N = \frac{X_1 X_2 \dots \cdot X_n}{\alpha_1 \alpha_2 \dots \cdot \alpha_n}$ — количество точек наблюдения, X_i — диапазон изменения переменной x_i , α_i — погрешность наблюдения переменной x_i [10].

Дж. Уиллер предложил использовать в научных исследованиях *принцип простоты* [11–12]. Он писал: «Но не должна ли природа всех этих частиц и взаимодействий заключаться в чём-то фантастически простом? Какой-то принцип, единственно правильный и в своём роде поразительно простой, когда он станет известен, должен быть также и столь очевидным, что станет ясно, из чего построена Вселенная и из чего она должна быть построена таким и только таким способом и почему она не могла стать иной. Но как открыть этот принцип? Если безнадежно изучать атомную физику, исследуя механическое упорочение и дислокации, то в равной мере может оказаться безнадежным узнать об основном принципе функционирования Вселенной — называйте его предгеометрией или как вам заблагорассудится, — какой бы объём работы в области общей теории относительности и физики частиц вы ни выполнили. Среди всех принципов, которые можно выделить в мире науки, трудно вообразить более привлекательный, чем принцип простоты. И среди всех видов простоты динамики и жизни и движения ни один не является

таким совершенным, как альтернатива „да — нет“ или „истинный — ложный“.

Х. Бренерманн так оценивал информационные ограничения на познаваемость сложных систем [13]: «...если принять различные состояния атомов за представления чисел, используемых в вычислениях, то, в силу самых общих законов физики, любая материальная вычислительная машина не может перерабатывать за секунду объём информации, превышающий 10^{47} двоичных разрядов на грамм своей массы. Если бы такая машина имела массу, равную массе земного шара, и работала в течение всех геологических эпох, то она не смогла бы переработать больше 10^{78} двоичных разрядов информации»¹.

У.Р. Эшби принадлежит следующая оценка данной проблемы [14]: «...я позволю себе высказать следующее утверждение: всё материальное не может характеризоваться числом, превышающим 10^{100} . Таким образом, возможности теоретика систем не превосходят 10^{100} , в то же время ему приходится сталкиваться с задачами и процессами, в которых фигурируют числа, намного превосходящие этот предел... Я лично убеждён, что возможность устранения этого ограничения менее вероятна, чем, возможность устранения этого ограничения, обусловленного законом сохранения энергии, являясь в основе своей эмпирическим, и он может быть опровергнут в течение одного дня, как это случилось с законом сохранения массы. Однако ограничение, не позволяющее человеку, обладающему ресурсами в 10^{100} , реализовать процесс, требующий переработки большего количества информации, основано на принципиальных особенностях нашего анализа причинно-следственных связей и совершенно не зависит от конкретного материала, на котором оно проявляется».

А.С. Холево, первый в Советском союзе и мире, выполнил комплекс информационных исследований по квантовым каналам связи. Он создал математический аппарат исследований и получил важные результаты [15].

С. Хокинг (Hawking), J. Bekenstein, Дж. Прескилл, И.Д. Новиков, В.П. Фролов, Д.А. Киржниц использовали информационный подход применительно к процессу образования чёрных дыр.

¹ Легко видеть, что если бы такая машина имела массу, равную массе Вселенной, и работала в течение всех геологических эпох, то она не смогла бы переработать больше 10^{120} двоичных разрядов информации (результат С. Ллойда 2001 год).

Может ли исчезать информация при образовании чёрной дыры? Куда она может исчезать? В случае чёрных дыр доступен огромный объём информации о микросостоянии её предшественника, «забытый» в процессе образования чёрной дыры, которая помнит лишь малое число наблюдаемых параметров. Чёрная дыра искажает поглощенную информацию, но всё же не разрушает её бесследно. В процессе испарения чёрной дыры информация вырывается из её объятий [16].

Х. Хармут привёл следующие аксиомы, основываясь на которых он проводит физические исследования и геометрические построения [17].

Аксиома 1. В любой системе координат информация о событии всегда конечна.

Аксиома 2. Для передачи информации требуется конечное время. Длительность сигнала ΔT всегда больше нуля ($\Delta T > 0$). С. Беннетт возглавляет международный коллектив учёных, проводящий систематические исследования в области квантовых вычислений. Среди полученных им результатов следует отметить идеи обратимости классических и квантовых вычислений, использование различных информационных оценок квантовых состояний и процессов вычислений, идею квантовой телепортации и идеи квантовой криптографии [18–19].

К. А. Валиев систематически проводит и курирует в России исследования по квантовым вычислениям и *квантовой информатике* [20–21]. Он так оценивает перспективы развития этих новых направлений развития информатики: «Теоретические и экспериментальные исследования квантовых явлений привели к существенным изменениям наших представлений о Природе вообще и о твёрдом теле, в частности. Квантовые явления находят применение в самых разных областях современных науки и техники. В последнее время, в связи с открывшимися возможностями квантовых вычислительных процессов и реальными перспективами их реализации, обещающих грандиозный прорыв в вычислительной технике».

Б. Б. Кадомцев в своей монографии по проблемам квантовой механики [22] неоднократно подчёркивает принципиальную важность изучения именно информационных аспектов развития квантовых систем. Так, например, он пишет: «При переходе к изучению всё более сложных систем именно структурные, информационные аспекты их поведения и развития выступают на первый план, а динамика создаёт лишь основу для информацион-

ного развития. С учётом квантовых процессов в микромире картина развития мира становится ещё более сложной и более богатой в смысле её информационного поведения. В игру вступает новый неравновесный и сильно нелинейный процесс — коллапсы волновых функций. Соответственно, усложняется структура информационных связей и их влияние на динамические процессы».

Н. С. Кардашев проводит исследование, в существенной части направленные на оптимизацию способов получения астрофизической информации и информации от внеземных цивилизаций, осмысление феномена возникновения и развития вселенных. Ему, в частности, принадлежит: идея о том, что расширение наблюдаемой области Вселенной может быть «результатом сознательной деятельности суперцивилизаций», идея о существовании цивилизаций на разных технологических уровнях, в частности, значительно превышающих уровень земной цивилизации. Рассмотрены им также и варианты использования такими цивилизациями энергетических ресурсов центральной звезды с возможностью установления космической радиосвязи на галактических и метagalactических расстояниях [23].

Э. Стин предложил «...глобальную теоретическую задачу: необходимо определить несколько законов, схожих с законами сохранения энергии и момента, но используемых по отношению к информации и определяющих большую часть квантовой механики» [24].

Теорема Марголиса–Левитина [25] показывает, что общее количество элементарных действий, которые система может выполнить в секунду, ограничено энергией:

$$k_{\text{оп/с}} = \frac{2E}{\hbar},$$

где E — превышение средней энергии системы над энергией нижнего состояния, $\hbar = \hbar/(2\pi) = 1.0545 \cdot 10^{-34}$ с · Дж — уменьшенная постоянная Планка.

К. К. Колин рассматривает информационный подход как дальнейшее развитие системного подхода, которое даёт учёному новые возможности для исследования сложных объектов, процессов и явлений в природе и обществе на основе использования общих свойств и закономерностей проявления информационных процессов [26]. Им предложена перспективная структура предметной области информатики, учитывающая современные тенденции развития научного познания и включающая в качестве

одного из её основных направлений также и *физическую информатику*, которая должна изучать информационные процессы, протекающие в физической информационной среде неживой природы [27]. Ниже будет показано, что данное направление в информатике не только является весьма важным и перспективным, но достаточно активно развивается уже сегодня, позволяя получить новые представления об информационных свойствах и закономерностях окружающего нас мира физической природы.

С. Ллойдом при проведении своих исследований использовались следующие постулаты:

- 1) теорема Марголиса–Левитина;
- 2) общее количество битов $K_{\text{бит}}$, доступных для обработки в системе ограничено энтропией системы:

$$K_{\text{бит}} = \frac{S}{k_B \cdot \ln 2},$$

где S — термодинамическая энтропия системы, $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана;

- 3) скорость, с которой информация может быть перемещена с места на место, ограничена скоростью света $c = 2.98 \times 10^{10}$ м/с.

Эти три предела были использованы для оценки способности Вселенной обрабатывать информацию. В частности, было оценено общее количество битов, доступных во Вселенной для вычисления, и число элементарных логических действий, которые могут быть выполнены на этих битах за время существования Вселенной. При этом оказалось, что общее количество битов в материи может составлять $\approx 10^{90}$ (результат И.М. Гуревича, полученный в 1989 году) и $\approx 10^{120}$, если тяготение принято во внимание, а количество операций с ними может достигать величины $\approx 10^{120}$ (фактический результат Х. Бренерманна, 1962 год) [28].

Г.В. Встовский, Г.А. Голицын и А.П. Левич проводят систематические исследования физических систем с использованием информационных критериев и вариационных методов [29, 30].

И.Л. Розенталь обращает внимание на принципиальную важность проявления *феномена симметрии и простоты* в природе [31]: «Изотропию и однородность физического пространства — его евклидовость (псевдоевклидовость) — можно объяснить его простотой. Эти свойства пространства характеризуют его предельную симметричность. Пространство Евклида — единственное максимально симметричное пространство с нуле-

вой (экстремальной) кривизной. Экстремальностью симметрии (хотя и в меньшей степени) характеризуются и другие космологические пространства (пространство Лобачевского или сферу). Поскольку известно, что природа «любит» симметрию и экстремальность, то кажется естественным, что её выбор остановился на симметричных пространствах».

S. Hsu, A. Zee; D. Scott, J. Zibin обсуждают проблему представления послания Создателя неоднородностями реликтового излучения и объём послания. Они считают, что в космическом микроволновом фоне могут быть закодированы 10^5 или же 300 битов информации [32, 33].

Определённая систематизация знаний в области информационных аспектов теоретической информатики в виде основных законов и принципов информатики и результаты ряда исследований приведены в работах автора [34, 44] и будет кратко рассмотрена ниже. Необходимо отметить, что количество учёных, использующих информационный подход в физических исследованиях, в последние годы быстро возрастает.

3. Свойства сложных систем и проблема их познаваемости

Сложные системы имеют ряд свойств, присущих им всегда. Их можно упорядочить по степени общности [35–37]. Самыми общими, фундаментальными свойствами сложных систем являются свойства существования, развития и познаваемости.

Рассмотрение, изучение, анализ и систематизация сложных систем имеют смысл только в том случае, если они существуют в течение определённого периода времени. Конструирование, синтез и создание систем также имеют смысл лишь тогда, когда предполагается или требуется их существование на определённом интервале времени. Поэтому *свойство существования* предшествует всем остальным свойствам систем, так как, не обладая этим свойством, система не может иметь никаких других свойств.

Вместе с тем свойство существования определяет лишь одну сторону той части объективной реальности, которая названа нами сложной системой. Самодвижение природы отражается в движении и изменении сложных систем, обуславливая наличие у них *свойства развития*, поскольку системы не являются

неподвижными формированиями и не могут существовать в застывшем виде. Следовательно, существование сложных систем невозможно в отрыве от их развития.

Свойство познаваемости сложных систем определяет возможность теоретических и экспериментальных исследований, описания, моделирования сложных систем.

Фундаментальные свойства сложных систем — существование, развитие, познаваемость — реализуются совокупностью их частных свойств.

Свойство существования сложных систем конкретизируется в таких частных свойствах, как:

— устойчивость (в широком смысле) — свойство системы возвращаться в исходный или близкий ему установившийся режим из различных начальных состояний;

— инвариантность — свойство сохранять свои конструктивные элементы, структуры, параметры, характеристики при определённых преобразованиях;

— сохраняемость — свойство не менять значений некоторых переменных, характеристик или функций от них;

— синергетичность — свойство системы обладать свойствами, отличными от свойств составляющих её частей;

— реализуемость — свойство, заключающееся в возможности осуществления, создания системы в целом, её частей и элементов, взаимосвязей, тех или иных видов поведения;

— уникальность — свойство существовать в немногих экземплярах, даже в единственном экземпляре, или проявлять поведение единственным образом;

— слабая предсказуемость — свойство, заключающееся в невозможности описать траекторию движения системы на достаточно большом интервале времени;

— нетривиальность поведения — свойство системы иметь собственное поведение, не тождественное поведению внешней среды.

Свойство развития конкретизируется в таких частных свойствах сложных систем, как:

— синергичность;

— открытость (незамкнутость) — свойство системы взаимодействовать (обмениваться энергией, веществом, информацией) с другими системами и внешней средой;

— нестационарность — изменение структуры, элементов, параметров и характеристик системы во времени;

— неполнота — свойство системы иметь неразрешимые, типовые ситуации;

— противоречивость — наличие в системе частей и элементов, одновременно использующих одни и те же ресурсы;

— целенаправленность — свойство управлять своим поведением для достижения определённой цели.

Свойство познаваемости сложной системы означает наличие следующих возможностей:

— описания, построения моделей, теоретических исследований сложной системы;

— измерения параметров, характеристик сложной системы;

— понимания и объяснения существования, строения, функционирования, развития сложной системы.

Свойство познаваемости сложной системы в широком смысле означает, наряду с вышеперечисленными, наличие следующих дополнительных возможностей:

— создания, конструирования сложной системы;

— управления сложной системой.

Совокупность перечисленных свойств в той или иной мере присуща любой сложной системе. Чем же объясняется наличие данных свойств у сложных систем? Автор придерживается той точки зрения, что объективно существующие свойства сложных систем объясняются объективно существующими законами природы, которые названы *законами информатики* с целью подчеркнуть их отличие от традиционных физических законов, а также их информационное, системное происхождение и сущность.

Законы информатики «первичны», в частности, по отношению к физическим законам. Это означает, что существование и содержание физических законов зависит от существования и содержания законов информатики.

Поиск, отбор законов информатики производился нами исходя из следующих методологических установок:

— в них должна быть сконцентрирована информация о сложных системах;

— конкретные системы должны представлять собой развёртывание, конкретизацию, реализацию законов информатики в материальных и идеальных (модельных) структурах;

— они должны объяснять и обеспечивать существование и развитие сложных систем, объяснять их строение и свойства, значения их параметров и характеристик;

- законы информатики не могут противоречить физическим законам природы;
- любая данная совокупность законов информатики не может претендовать на объяснение и описание всей совокупности явлений, процессов и систем, существующих в природе.

4. Законы и принципы информатики, используемые в процессе познания сложных систем

Приведём краткий перечень тех положений, которые, по нашему мнению, имеют право и должны называться основными законами и принципами информатики в области познания сложных систем. Более детальное их изложение содержится в работах² [35–37].

Закон простоты сложных систем. *Реализуется, выживает, отбирается тот вариант сложной системы, который обладает наименьшей сложностью.*

Закон простоты сложных систем реализуется природой в ряде конструктивных принципов:

- Окамма;
- иерархического модульного построения сложных систем;
- симметрии;
- симморфоза (равнопрочности, однородности);
- полевого взаимодействия (взаимодействия через носитель);
- экстремальной неопределённости (функции распределения характеристик, параметров имеющих неопределённые значения имеют экстремальную неопределённость).

Важной реализацией закона простоты сложных систем является **закон сохранения неопределённости (информации)**. *Неопределённость (информация) изолированной (замкнутой) системы сохраняется при физически реализуемых преобразованиях и только при физически реализуемых преобразованиях.*

Закон конечности информационных характеристик сложных систем. *Скорость взаимодействия между элементами, частями системы, системами конечна. В любой системе коор-*

динат информация о событии всегда конечна. Длительность сигнала ΔT всегда больше нуля ($\Delta T > 0$).

Закон необходимого разнообразия Эшби. *Для эффективного функционирования системы разнообразие управляющего органа должно быть не менее разнообразия объекта управления.*

Отметим, что неопределённость (информация) является основной из характеристик *разнообразия системы*. Закон необходимого разнообразия Эшби также реализуется в ряде конкретных принципов, а именно теорем Шеннона, Котельникова, Холлево, Брюллиена, Марголиса–Левитина.

Теорема Гёделя о неполноте. *В достаточно богатых теориях (включающих арифметику) всегда существуют недоказуемые истинные выражения.*

Закон эквивалентности вариантов построения сложных систем. *С ростом сложности системы доля вариантов её построения, близких к оптимальному растёт.*

Законы изменения систем.

Закон Онсагера о максимизации убывания энтропии. *Если число всевозможных форм реализации процесса, согласных с законами физики, не единственно, то реализуется та форма, при которой энтропия системы растёт наиболее медленно. Иначе говоря, реализуется та форма, при которой максимизируется убывание энтропии или рост информации, содержащейся в системе.*

Принцип ле Шателье. *Внешнее воздействие, выводящее систему из равновесия, вызывает в ней процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия.*

5. Некоторые результаты исследования физических систем, полученные с использованием законов информатики

5.1. Закон сохранения неопределённости (информации). **Физические законы сохранения как следствие закона сохранения неопределённости.** Приведём определение неопределённости, введённое автором в 1989 г. в работе [35].

Рассмотрим сначала непрерывный случай. Используем описание физической системы волновой функцией. Согласно квантовой механике, для системы, находящейся в чистом состоянии,

² По сравнению с предыдущими публикациями [35–37] уточнены формулировки законов конечности скорости распространения взаимодействия, необходимого разнообразия Эшби. Кроме того, в состав законов информатики добавлен принцип ле Шателье.

часть параметров « a » может задаваться точно, значения другой части параметров « b » при этом задаются функцией или плотностью распределения

$$P(b) = |\psi_a(b)|^2,$$

где $\psi_a(b)$ — волновая функция [45–48], описывающая физическую систему в b -представлении (волновая функция, описывающая наблюдаемую b). Система, находящаяся в чистом состоянии $\psi_a(b)$ имеет неопределённость наблюдаемой b равную

$$N_a(b) = - \int |\psi_a(b)|^2 \log_2 |\psi_a(b)|^2 db \text{ бит.}$$

Аналогично даётся определение неопределённости в дискретном случае при описании системы с помощью амплитуд вероятностей. Рассмотрим объект в состоянии $|\alpha\rangle$, описываемый амплитудами вероятностей $\langle\beta_i|\alpha\rangle$:

$$|\alpha\rangle = \sum_i |\beta_i\rangle \langle\beta_i|\alpha\rangle.$$

Величина $\langle\beta_i|\alpha\rangle^2$ есть вероятность обнаружения наблюдаемой β , объекта, находящегося в состоянии $|\alpha\rangle$, в базисном состоянии $|\beta_i\rangle$. Неопределённость наблюдаемой β , объекта, находящегося в состоянии $|\alpha\rangle$ равна

$$N = - \sum_i |\langle\beta_i|\alpha\rangle|^2 \log_2 |\langle\beta_i|\alpha\rangle|^2 \text{ бит.}$$

Неопределённость определяется состоянием, в котором находится система и наблюдаемой, описывающей систему. Наблюдаемой в квантовой механике называют любую физическую величину, которую можно измерить, причём результатами эксперимента обязательно должны являться действительные числа. В общем случае, неопределённость разных наблюдаемых системы, находящейся в заданном состоянии, может быть различна. Если наблюдаемая фиксирована, то можно говорить о неопределённости состояния квантовой системы. Точно также можно говорить о неопределённости состояния квантовой системы в случае задания системы координат из априорных соображений.

Примечание 1. В 1993 г. Bennett С.Н. с коллегами [18, 19] под названием «*величина запутывания*» ввели эту же информационную характеристику физических объектов.

Примечание 2. Информационная энтропия служит одновременно для оценки неопределённости и информации. «Эта

величина измеряет также количество неопределённости, содержащейся в этом эксперименте, т.е. количество неопределённости до бросания кости относительно того, каков будет его результат. Наконец, эта величина измеряет информацию, содержащуюся в этом эксперименте, или количество информации, получаемой в результате бросания. Тот факт, что случайность и неопределённость имеют естественную общую меру, неудивителен. Вследствие «формулы» прирост информации = устранённая неопределённость представляется разумным, что неопределённость и информация должны измеряться с помощью одной и той же функции» [49]. Поэтому можно сказать, что *закон сохранения неопределённости является также законом сохранения информации*.

В отличие от энтропии, используемой в статистической физике и характеризующей неопределённость состояний, в которых может находиться физическая система, информационная энтропия характеризует неопределённость конкретного состояния, точнее говоря, неопределённость наблюдаемой системы, находящейся в некотором состоянии. Если наблюдаемая фиксирована, то можно говорить о неопределённости состояния квантовой системы. Во избежание неоднозначности терминологии, для обозначения свойства «неопределённость» и его количественной меры — информационной энтропии — будем использовать один термин — «неопределённость». Введённое определение неопределённости придаёт широко используемому в квантовой механике понятию неопределённости точный *информационный смысл*.

Смешанное состояние $\psi_S(x)$ определяется как смесь чистых состояний $\psi_i(x)$. Величина p_i есть вероятность реализации чистого состояния $\psi_i(x)$. Неопределённость наблюдаемой в смешанном состоянии системы N_S равна сумме средней неопределённости наблюдаемой в чистых состояниях плюс энтропия системы (неопределённость состояний)

$$N_S = N + S.$$

Здесь N — средняя неопределённость наблюдаемой в (чистых) состояний системы $N = \sum_i p_i N_i$, N_i — неопределённость наблюдаемой в i -м (чистом) состоянии системы; $S = - \sum_i p_i \ln p_i$ — энтропия системы (неопределённость состояний системы).

5.1.1. Основные свойства неопределённости (информации).

1. Неопределённость физических систем (наблюдаемых) N может принимать любые значения: $\infty \leq N < +\infty$.
2. Классические объекты, приборы, обладающие точными значениями всех своих параметров, имеют неопределённость, равную $-\infty$ (не ноль!). Точнее говоря, неопределённость, равную $-\infty$, имеют состояния, соответствующие точным значениям некоторых наблюдаемых в представлении этих же наблюдаемых.
3. Свободные частицы имеют пространственную неопределённость, равную $+\infty$.
4. Неопределённость физической системы S , состоящей из не взаимодействующих подсистем $S_1, S_2, \dots$, равна сумме неопределённостей этих подсистем (аддитивность):

$$N_s = N_{s1} + N_{s2} + \dots$$

5. Неопределённость физической системы S , состоящей из взаимодействующих подсистем S_1, S_2 , не превосходит суммы неопределённостей этих подсистем:

$$N_{s1} + N_{s2} + \dots \geq N_s.$$

Можно сказать, что в системе, состоящей из взаимодействующих подсистем, образуется дефект неопределённости:

$$\Delta N_s = N_{s1} + N_{s2} + \dots - N_s.$$

6. Если у физической системы S , находящейся в смешанном состоянии, число состояний M , в которых может находиться система, велико так, что $\ln M \gg \max N_i$, то неопределённость системы можно считать приблизительно равной энтропии системы.

5.1.2. Описание и измерение. Поскольку информационная энтропия служит одновременно для оценки неопределённости информации, а неопределённость наблюдаемых в заданных состояниях, неопределённость состояний при фиксированной наблюдаемой, измеряется информационной энтропией, то можно утверждать, что *теоретический и экспериментальный способы познания имеют одинаковую познавательную силу*, так как объёмы информации, получаемые при описании (теоретических исследованиях) систем и измерениях (экспериментальных исследованиях) систем, одинаковы.

5.1.3. Сохранение неопределённости (информации) при различных математических преобразованиях. Рассмотрим системы координат $x = (x_1, \dots, x_n)$ и $y = (y_1, \dots, y_n)$ [7]. Пусть $p(x_1, \dots, x_n)$ — плотность распределения случайной величины в системе координат $x = (x_1, \dots, x_n)$. Неопределённость случайной величины в системе координат $x = (x_1, \dots, x_n)$ равна

$$N_x = - \int \dots \int p(x_1, \dots, x_n) \ln p(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n.$$

При переходе от системы координат $x = (x_1, \dots, x_n)$ к системе координат $y = (y_1, \dots, y_n)$ новое значение неопределённости равно старому минус среднее значение логарифма якобиана

$$\begin{aligned} N_y &= - \int \dots \int p(y_1, \dots, y_n) \ln p(y_1, \dots, y_n) dy_1 \dots dy_n = \\ &= N_x - \int \dots \int p(x_1, \dots, x_n) \ln p(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \end{aligned}$$

Рассмотрим линейное преобразование координат $y_i = \sum_j a_{ij} x_j$.

В этом случае якобиан равен определителю обратного преобразования равен $\|a_{ij}\|^{-1}$ и при переходе от системы координат $x = (x_1, \dots, x_n)$ к системе координат $y = (y_1, \dots, y_n)$ новое значение неопределённости равно старому минус значение логарифма определителя обратного преобразования координат

$$N_y = N_x - \ln \|a_{ij}\|^{-1}.$$

Можно сформулировать условия сохранения неопределённости (информации).

Утверждение 1. Пусть квадрат модуля волновой функции наблюдаемой физической системы — плотность распределения случайной величины в системе координат $x = (x_1, \dots, x_n)$ равен $p(x_1, \dots, x_n) = |\psi(x_1, \dots, x_n)|^2$. Тогда неопределённость наблюдаемой равна

$$N_x = - \int \dots \int |\psi(x_1, \dots, x_n)|^2 \ln |\psi(x_1, \dots, x_n)|^2 dx_1 \dots dx_n.$$

При линейном преобразовании системы координат $y_i = \sum_j a_{ij} x_j$ неопределённость сохраняется ($N_y = N_x$) тогда и только тогда, когда определитель преобразования координат равен единице $\|a_{ij}\|^{-1} = 1$.

Утверждение 2. Мультипликативные преобразования волновых функций вида $\varphi(x) = e^{i\alpha x} \psi(x)$ сохраняют неопределённость.

Утверждение 3. Пусть система с M состояниями представлена вектором-столбцом $\varphi = (a_1, \dots, a_m)$. Неопределённость системы φ равна $N_\varphi = -\sum_i |a_i|^2 \ln |a_i|^2$. Преобразование вида $U_M = \|u_{kj}\| = \|s_{kj} e^{i\alpha_{kj}}\|$ сохраняют неопределённость системы φ . Здесь s_{kj} — единичные элементы матрицы перестановок $S = \|s_{kj}\|$, α_{kj} — вещественные числа; $k, j = 1, \dots, M$.

Утверждение 4. Если унитарный оператор U коммутирует с гамильтонианом $\hat{H}U = U\hat{H}$, то он описывает некоторую физическую операцию для рассматриваемой системы, которая сохраняет неопределённость.

Утверждение 5. Если эрмитов оператор $\hat{A}$ коммутирует с гамильтонианом $\hat{H}\hat{A} = \hat{A}\hat{H}$, то неопределённость наблюдаемой, соответствующей оператору $\hat{A}$, не зависит от времени.

5.1.4. Сохранение неопределённости и физические преобразования. Преобразования координат (трансляции в пространстве, трансляции во времени, собственные вращения, преобразования Галилея, преобразования Лоренца, локальные преобразования общей теории относительности [50]) имеют определитель равный единице. Следовательно, данные преобразования сохраняют неопределённость и поэтому физически реализуемы.

Преобразование волновой функции, описывающей стационарное состояние квантовой системы при эволюции системы согласно уравнению Шрёдингера, имеет мультипликативный вид. Преобразование амплитуд вероятности, описывающих стационарные состояния M -мерной квантовой системы при эволюции согласно уравнению Шрёдингера, имеет мультипликативный вид. Тем самым, неопределённость стационарных состояний квантовых систем, описываемых волновой функцией, амплитудой вероятности, при эволюции, согласно уравнению Шрёдингера, сохраняется. Следовательно, эволюция квантовой системы согласно уравнению Шрёдингера физически реализуема.

При преобразованиях пространственной инверсии, обращении времени, несобственных вращениях определитель не равен

единице. Следовательно, данные преобразования не сохраняют неопределённость и поэтому физически нереализуемы.

5.1.5. Сохранение неопределённости (информации) при квантовых вычислениях. Рассмотрим основные преобразования, используемые при квантовых вычислениях [20, 21]. Такими преобразованиями являются: Операторы Паули, Гейт изменения фазы (phase-gate) и $\pi/8$ -гейт, Оператор контролируемое не (controlled-not gate) CNOT, Оператор обмена состояниями (swap-gate) SWAP, Оператор контролируемого изменения фазы, Вентиль Тоффоли или «контролируемое контролируемое не» CCNOT (Toffoli-gate or controlled-controlled-not), Вентиль Фредкина или оператор «контролируемого обмена состояниями» CSWAP (Fredkin-gate or controlled-SWAP). Все перечисленные операторы сохраняют неопределённость.

Adriano Barenco, Charles H. Bennett и др. в работе 1995 г. «Elementary gates for quantum computation» [51] показали, что произвольное унитарное преобразование в сети всегда может быть конструировано из двубитового гейта $\Lambda_1 \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ CNOT и одnobитовой операции $\Lambda_0 \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ NOT.

Утверждение 6. Поскольку операции NOT, CNOT, CCNOT сохраняют неопределённость, то построенные на их основе произвольные схемы вычислений также сохраняют неопределённость. Тем самым, произвольные квантовые механические вычисления можно выполнять с сохранением неопределённости.

5.1.6. Физические законы сохранения как следствие законов информатики. Вывод из законов сохранения неопределённости и закона простоты сложных систем физических законов сохранения основывается на теореме Нётер [52], которая формулируется следующим образом.

Для физической системы, уравнения движения которой имеют форму дифференциальных уравнений и могут быть получены из вариационного принципа, каждому однопараметрическому непрерывному преобразованию, оставляющему вариационный функционал инвариантным, соответствует один дифференциальный закон сохранения.

Используя теорему Нётер, можно показать, что из закона сохранения неопределённости и закона простоты сложных си-

тем следуют законы сохранения энергии, импульса, момента количества движения [35–37].

Утверждение 7. В мире, где действует закон сохранения неопределённости (информации), действуют также и законы сохранения энергии, импульса, момента количества движения.

5.2. Информационная форма соотношения неопределённости Гейзенберга. В мире, описываемом квантовой механикой, частицы одновременно не имеют координат и импульсов. Вследствие чего невозможно «точное» (в классическом смысле) описание и измерение квантовых объектов [45–48]. Считается, что в природе существует принцип, ограничивающий возможности любых экспериментов (измерений). Можно сказать, что в природе также существует принцип, ограничивающий возможности любых моделей (теорий, описаний). Увеличивая точность описания, измерения одной из величин, наблюдатель увеличивает неопределённость описания, измерения другой. Точность этого эксперимента (измерения), описания определяется соотношением неопределённости Гейзенберга $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$.

5.2.1. Наблюдаемые. Наблюдаемые (пары наблюдаемых), описывающие квантовый объект, можно разделить на два класса, отличающиеся информационными свойствами наблюдаемых:

- 1) наблюдаемые, определяемые попарно коммутирующими операторами.
- 2) наблюдаемые, определяемые попарно некоммутирующими операторами и наблюдаемые, определяемые попарно антикоммутирующими операторами.

5.2.2. Одновременно измеримые наблюдаемые. «Две наблюдаемые называются совместными, если измерение одной из них не влияет на результат измерения другой. Условие совместности наблюдаемых A и B состоит в том, что если провести три измерения: сначала наблюдаемой A , затем наблюдаемой B и снова наблюдаемой A , то повторное измерение наблюдаемой A даст в точности тот же результат, что и первое её измерение. Высказывание о совместности наблюдаемых легко трансформировать в высказывание о соответствующих им операторах» [46].

Утверждение 8. Наблюдаемые A и B совместны тогда и только тогда, когда операторы $\hat{A}$ и $\hat{B}$, действующие

в гильбертовом пространстве H коммутируют друг с другом [45–48]³.

5.2.3. Неопределённость совместных наблюдаемых.

Утверждение 9. Пусть наблюдаемые A и B совместны и $\{\psi_{nm}\}$ образуют полную систему собственных векторов наблюдаемых $\hat{A}$ и $\hat{B}$. Пусть $c_{nm} = (\psi_{nm}, \psi)$ для произвольного состояния ψ . Тогда неопределённость наблюдаемых $\hat{A}$ и $\hat{B}$ в состоянии ψ одинакова и равна $N(\psi) = -\sum_{nm} |c_{nm}|^2 \ln |c_{nm}|^2$.

5.2.4. Неопределённость несовместных наблюдаемых, волновые функции которых связаны преобразованием Фурье. Наблюдаемые A и B несовместны тогда и только тогда, когда операторы $\hat{A}$ и $\hat{B}$ не коммутируют друг с другом $\hat{A}\hat{B} \neq \hat{B}\hat{A}$. Предположим, что волновые функции несовместных наблюдаемых A и B связаны прямым и обратным преобразованием Фурье, что состояние объекта в q -представлении задано волновой функцией $\psi(q)$, где q — обобщённая координата квантового объекта. Необходимо отметить, что здесь и далее предполагается, что задан масштаб и тем самым переменные являются безразмерными. Тогда состояние объекта в p -представлении задано волновой функцией $\varphi(p)$, причём состояние в дополнительном к q -представлению — представлении p связано с состоянием в q -представлении преобразованием Фурье:

$$\varphi(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(q) e^{-i2\pi pq} dq.$$

В свою очередь, состояние в исходном представлении q связано с состоянием в дополнительном p -представлении обратным преобразованием Фурье

$$\psi(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(p) e^{i2\pi pq} dp.$$

³ Состояние системы могут описывать векторы и наблюдаемые в прямом произведении нескольких гильбертовых пространств. Например, координаты и спин.

Плотность вероятности обобщённой координаты q равна $|\psi(q)|^2$ с нормировкой $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(q)|^2 dq = 1$.

Плотность вероятности дополнительной координаты p равна $|\varphi(p)|^2$ с нормировкой $\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(p)|^2 dp = 1$.

Неопределённость обобщённой координаты q равна

$$N_q = - \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(q)|^2 \log_2 |\psi(q)|^2 dq.$$

Неопределённость дополнительной координаты p равна

$$N_p = - \int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(p)|^2 \log_2 |\varphi(p)|^2 dp.$$

Суммарная неопределённость обобщённой координаты q и дополнительной координаты p равна

$$\begin{aligned} N_{qp} &= N_q + N_p = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(q)|^2 \log_2 |\psi(q)|^2 dq - \int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(p)|^2 \log_2 |\varphi(p)|^2 dp. \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(q)|^2 \log_2 |\psi(q)|^2 dq - \int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(p)|^2 \log_2 |\varphi(p)|^2 dp. \end{aligned}$$

Утверждение 10. Суммарная неопределённость обобщённой координаты q и дополнительной координаты q при масштабном преобразовании (умножении аргумента q на число $k > 0$) равна исходной суммарной неопределённости обобщённой координаты q и дополнительной координаты q

$$N_q + N_{q'} = N_q + N_p.$$

Данное выражение есть информационный аналог соотношения неопределённости Гейзенберга. Таким образом, показано, что суммарная неопределённость (информация) описания (измерения) квантового объекта во взаимно дополнительных представлениях при масштабных преобразованиях не зависит от неопределённости (информации) описания (измерения) системы в каждом представлении — при увеличении неопределённости (информации) описания (измерения) объекта в q -представлении настолько же уменьшается неопределённость (информация) описания (измерения) данного объекта в p -представлении и наоборот.

5.2.5. Неопределённость электрона. Рассмотрим пример [48]. Предположим, что имеется электрон в состоянии $|\psi\rangle$, которое описывается амплитудой вероятности $\langle x | \psi \rangle = \psi(x)$. Вероятность, что электрон находится в интервале $[x, x + dx]$ равна

$$P(x, x + dx) = |\psi(x)|^2, \quad \psi(x) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{1/4}} e^{-x^2/(4\sigma^2)},$$

$$P(x, x + dx) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} e^{-x^2/(2\sigma^2)} dx.$$

Неопределённость координаты электрона равна

$$N_x = \log_2 (2\pi e)^{1/2} \sigma.$$

Неопределённость импульса электрона

$$N_p = \log_2 (2\pi e)^{1/2} \eta, \quad \text{где } \eta = \frac{\hbar}{2\sigma}.$$

Суммарная неопределённость координаты x и импульса p электрона в битах равна

$$\begin{aligned} N_{xp} &= N_x + N_p = \\ &= \log_2 (2\pi e)^{1/2} + \log_2 \sigma + \log_2 (2\pi e)^{1/2} + \log_2 \eta = \log_2 \frac{eh}{2}. \end{aligned}$$

Суммарная неопределённость (информация) описания координаты и импульса электрона не зависит от неопределённости (информации) описания системы в каждом представлении — при увеличении неопределённости (информации) описания объекта в координатном представлении настолько же уменьшается неопределённость (информация) описания электрона в импульсном представлении и наоборот.

5.2.6. Неопределённость несовместных наблюдаемых в общем случае. Несовместные наблюдаемые определяются не коммутирующими операторами $\hat{A}$ и $\hat{B}$: $\hat{A}\hat{B} \neq \hat{B}\hat{A}$.

Утверждение 11. Пусть несовместные наблюдаемые, определяемые линейными операторами $\hat{A}$ и $\hat{B}$ связаны коммутационным соотношением $(\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}) = [A, B] = \hat{C}$. Тогда наблюдаемые, определяемые линейными операторами $\hat{A}' = k\hat{A}$ и $\hat{B}' = \hat{B}/k$ связаны тем же коммутационным соотношением $(\hat{A}'\hat{B}' - \hat{B}'\hat{A}') = \hat{C}$.

Утверждение 12. Пусть операторы $\hat{A}$ и $\hat{B}$ не коммутируют друг с другом. $\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} = [\hat{A}, \hat{B}] = C \neq 0$. Суммарная неопределённость наблюдаемой a' и наблюдаемой b' определяемых операторами $\hat{A}' = k\hat{A}$, $\hat{B}' = \hat{B}/k$ ($k > 0$) равна исходной суммарной неопределённости наблюдаемой a и наблюдаемой b , определяемых операторами $\hat{A}$ и $\hat{B}$: $N_{A'} + N_{B'} = N_A + N_B$.

Утверждение 13. Пусть операторы $\hat{A}$ и $\hat{B}$ антикоммутируют друг с другом $\hat{A}\hat{B} + \hat{B}\hat{A} = 0$. Суммарная неопределённость наблюдаемой a' и наблюдаемой b' определяемых операторами $\hat{A}' = k\hat{A}$, $\hat{B}' = \hat{B}/k$ ($k > 0$) равна исходной суммарной неопределённости наблюдаемой a и наблюдаемой b , определяемых антикоммутирующими операторами $\hat{A}$ и $\hat{B}$: $N_{A'} + N_{B'} = N_A + N_B$.

5.2.7. Неопределённость наблюдаемых в различных представлениях. При переходе к другому базису $\psi_{nm} \rightarrow \psi'_{nm}$ вектор $\psi \rightarrow \psi'$ скалярное произведение векторов ψ_{nm}, ψ сохраняется $c'_{nm} = (\psi'_{nm}, \psi') = c_{nm} = (\psi_{nm}, \psi)$. Поэтому, справедливо

Утверждение 14. При переходе к новой системе координат неопределённость наблюдаемых сохраняется

$$N'(\psi') = - \sum_{nm} |c'_{nm}|^2 \ln |c'_{nm}|^2 = - \sum_{nm} |c_{nm}|^2 \ln |c_{nm}|^2 = N(\psi).$$

Утверждение 15. Если неопределённости наблюдаемых в некотором базисе $\hat{A}$, $\hat{B}$ при $[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{C}$ связаны одним из информационных соотношений (утверждения 9, 10, 12, 13), то при переходе к новому базису информационное соотношение между наблюдаемыми сохраняется.

5.2.8. Соотношение между ошибками измерений, возникающими при передаче результатов измерений по каналу с ограниченной пропускной способностью. При передаче по каналу с пропускной способностью C значений равномерно распределённых в диапазонах $M_1, M_2, \dots, M_n$, измеряемых один раз в секунду величин $X_1, X_2, \dots, X_n$, произведение ошибок измерений не может быть меньше [53]

$$\prod_{i=1}^n \Delta X_i \geq \frac{1}{2^C} \prod_{i=1}^n M_i.$$

Для двух величин X_1, X_2 справедливо неравенство

$$\Delta X_1 \Delta X_2 \geq \frac{1}{2^C} M_1 M_2.$$

Данное соотношение неопределённости аналогично соотношению неопределённости Гейзенберга. Приведённая аналогия приводит к интерпретации квантовой механики на базе информационных соотношений (ещё одной интерпретации дополнително к девяти, изложенным в [46]). Процесс познания (описание и измерение) осуществляется через гипотетический информационный канал — «канал познания природы». Ограниченная пропускная способность «канала познания» природы определяет невозможность «точного» (в классическом смысле) описания и измерения квантовых объектов. Увеличивая точность измерения одной из величин, наблюдатель увеличивает неопределённость измерения другой. Увеличивая точность описания одной из величин, наблюдатель увеличивает неопределённость описания другой.

5.3. Связь между информацией, массой и энергией. На запись, передачу одного бита информации в резервуаре с температурой T необходимо затратить энергию не меньшую $E_{\text{бит}} = kT \ln 2$ [10, 20, 21, 54]. При измерении состояния системы, находящейся в резервуаре с температурой T , с помощью кванта энергии $h\nu$ необходимо, чтобы энергия была выше уровня излучения чёрного тела: $E = h\nu \geq kT \ln 2$. Для повышения устойчивости неоднородности целесообразно увеличить энергетические затраты на формирование одного бита [20].

Для дальнейших расчётов⁴ примем, что одному биту соответствует энергия, равная kT (опускаем множитель $\ln 2$) и масса, равная

$$M_{\text{бит}} = \frac{E_{\text{бит}}}{c^2} = \frac{kT}{c^2} \approx \frac{10^{-23} \text{ Дж}}{9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2} = 10^{-40} \text{ кг}.$$

Для записи 1 бита необходима масса, не меньшая, чем $M_{\text{бит}}$.

⁴ Необходимо подчеркнуть, что связь между информацией и энергией, массой не является детерминированной, однозначной, как, например, связь между энергией и массой. Энергия, масса необходима для формирования информации в обычном веществе, пропорциональна объёму информации I_M . Но то же самое количество энергии, массы может быть использовано, например, для формирования объекта, сохраняющего (формирующего) меньше информации.

5.4. Оценка объёма информации во Вселенной. В общем случае, информация — это устойчивая в течение определённого времени неоднородность. Оценка объёма информации во Вселенной (по Шеннону) впервые приведена в 1989 году в работе автора [35]. В 2001 году конечность объёма информации во Вселенной была подтверждена С. Ллойдом [28].

Информация во Вселенной формируется при её расширении в силу *закона сохранения неопределённости*. Неопределённость изолированной системы сохраняется, в то время, как в ней могут происходить разнообразные процессы, определяемые её собственными законами. Если в ходе эволюции первоначально однородной физической системы неопределённость свободных частиц возрастает (убывает), то в системе должна формироваться (деформироваться) информация, т. е. неоднородности. Именно это следствие из закона сохранения неопределённости в совокупности с законами эволюции Вселенной [39] позволяет объяснить феномен неоднородной, развивающейся Вселенной.

Примерами подобных неоднородностей материи являются такие структурные элементы Вселенной, как: кварки, лептоны, элементарные частицы, ядра, атомы, молекулы, жидкости, кристаллы, звёзды, галактики и их скопления, нейтринные «блины», электромагнитное поле и т. п. Важно отметить, что неустойчивые неоднородности, в частности, случайные флуктуации, не формируют информации. Наиболее подходящими для формирования информации структурными единицами материи являются *фермионы*. Они подчиняются принципу запрета Паули, поэтому число состояний в системе из n фермионов растёт с увеличением их количества не менее, чем 2^n . Соответствующим образом растёт и объём информации в системе не менее, чем n .

Бозоны же накапливаются в одном состоянии, потому их роль в формировании информации во Вселенной существенно ниже, пропорционально $\ln n$. Вместе с тем, бозоны могут эффективно переносить информацию. В частности, фотоны идеальны для переноса информации. Именно фермионы, точнее говоря, нерелятивистские фермионы — барионы, электроны и нейтрино, формируют информацию во Вселенной.

Информация (устойчивые неоднородности) формируется нерелятивистскими фермионами при расширении радиационной Вселенной и нейтрино при расширении Вселенной с преобладанием вещества. Автор показал, что *количество информации во Вселенной конечно*. Обычное вещество (протоны, атомные

ядра, электроны) во Вселенной содержит (является носителем) 10^{90} бит информации. Причём, масса обычного вещества примерно соответствует массе, необходимой для содержания 10^{90} бит информации [38, 39]. Тем самым, сложность физически реализуемых систем ограничена 10^{90} бит. Оценка значения текущего объёма информации во Вселенной, полученная С. Ллойдом, также равна $\sim 10^{90}$ бит.

Н. С. Кардашев обратил внимание на то, что можно создать сколь угодно много низкоэнергетических фотонов и тем самым породить во Вселенной неограниченное количество информации. По этому поводу можно сказать следующее.

1. Во Вселенной имеется конечное число фотонов — 10^9 на один барион (всего $\sim 10^{89}$) [55].
2. Поляризованный фотон с заданным направлением движения содержит до 1 бита информации, фотон с неопределённым направлением движения — несколько десятков бит. Все фотоны, как и фермионы, содержат $\sim 10^{90}$ бит.
3. На создание бесконечного числа низкоэнергетических фотонов (при произвольном ограничении энергии фотонов снизу) требуется бесконечная энергия.
4. Если считать, что ограничения энергии фотонов снизу нет, а масса Вселенной конечна, то для любого сколь угодно малого уровня энергии должно быть создано бесконечно много фотонов.

5.5. Оценка количества частиц во Вселенной. Существует колоссальное количество частиц во Вселенной. Как, когда и почему они возникли? Почему число протонов, нейтронов, электронов составляет $\sim 10^{80}$, количество фотонов, нейтрино $\sim 10^{86}$? Каков механизм порождения частиц? Оказывается, что закон сохранения неопределённости в сочетании с экспоненциальным ростом размера Вселенной достаточен для качественного объяснения процесса формирования частиц и даёт возможность оценить количество частиц во Вселенной [35–37].

Степенная t^α скорость расширения Вселенной даёт возможность флуктуационным, вихревым, энтропийным и т. п. процессам [56, 57] успевать формировать необходимое (в соответствии с законом сохранения неопределённости) количество информации, пропорциональное логарифму времени расширения Вселенной $I(t) \propto \ln t$. Экспоненциальный рост размера Вселенной, очевидно, требует экспоненциальной скорости протекания физических процессов формированию неоднородностей.

Для инфляционной Вселенной количество информации, формирующееся в соответствии с законом сохранения неопределённости, должно быть пропорционально времени расширения $I(t) \propto t$. Необходимое количество информации в инфляционной Вселенной может быть сформировано путём порождения требуемого количества частиц. Пусть радиус Вселенной растёт как $R(t) \propto e^{\alpha t}$, здесь α — показатель степени расширения. Неопределённость (энтропия) нерелятивистских частиц пропорциональна величине [58] $N(t) \propto \ln V(t) \cdot T(t)^{3/2}$, где $V(t)$ — объём Вселенной, $T(t)$ — температура Вселенной. В свою очередь $V(t) \propto R^3(t)$ и $T(t) \propto R^{-1}(t)$, $T^{3/2}(t) \propto R^{-3/2}(t)$. Следовательно, получаем линейную зависимость неопределённости от времени: $N(t) \propto \frac{3}{2} \ln R(t) \propto \frac{3}{2} \alpha t$. Прирост неопределённости (энтропии) на одну свободную нерелятивистскую частицу за время Δt пропорционален показателю степени расширения и интервалу времени расширения

$$\Delta N(t + \Delta t) - \Delta N(t) = \frac{3}{2} \ln \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)} = \frac{3}{2} \alpha \Delta t.$$

В силу закона сохранения неопределённости, увеличение неопределённости (энтропии) в инфляционной Вселенной должны компенсироваться таким же приростом информации.

Предположим, что в момент времени t_0 в инфляционной Вселенной имеется n_0 нерелятивистских частиц. Тогда в момент времени $t_0 + \Delta t$ прирост неопределённости $\Delta N(t_0) = (3/2)\alpha\Delta t$. В силу закона сохранения неопределённости, в период $[t_0, t_0 + \Delta t]$ должно сформироваться точно такое же количество информации $\Delta I(t_0) = \Delta N(t_0)$. Если одна частица несёт β натуральных единиц информации, то за рассматриваемый период будет порождено

$$n_1 = \frac{\Delta I(t_0)}{\beta} = \frac{\Delta N(t_0)}{\beta}$$

частиц или

$$n_1 = n_0 \frac{3}{2} \frac{\alpha}{\beta} \Delta t.$$

За период период $[t_k, t_k + \Delta t]$ в инфляционной Вселенной будет порождено

$$n_k = n_0 \left(\frac{3}{2} \frac{\alpha}{\beta} \Delta t \right)^k$$

частиц. Тем самым, число частиц в инфляционной Вселенной в силу закона сохранения неопределённости экспоненциально растёт. Скорость роста количества частиц в инфляционной Вселенной пропорциональна скорости (показателю) расширения Вселенной и обратно пропорциональна количеству информации, содержащейся в одной частице.

Процесс формирования частиц в инфляционной Вселенной можно также описать непрерывной моделью:

$$\dot{n}(t) = n_0 e^{\frac{3}{2} \frac{\alpha}{\beta} (t - t_0)}.$$

Приведём количественный расчёт. Будем использовать планковскую систему единиц. В соответствии с [59] будем считать, что экспоненциальное расширение Вселенной происходит в период от $t_0 = 10^{-34}$ с $\approx 10^{10} \tau_{\text{пл}}$ ($\tau_{\text{пл}} \approx 10^{-44}$ с) до $t_k = 10^{-32}$ с $\approx 10^{12} \tau_{\text{пл}}$. Температура Вселенной T_0 в момент времени t_0 равна 10^{28} К. Показатель расширения $\alpha \approx 1,2 \cdot 10^{-10} \tau_{\text{пл}}^{-1}$. В момент $t_0 \approx 10^{10} \tau_{\text{пл}}$ при $T_0 = 10^{28}$ К нерелятивистскими частицами являются x^- , у-бозоны с массой $\sim 10^{18}$ МэВ [60].

Расчёты для числа типов порождаемых частиц $\sigma = 2, 3, \dots, 12$ приведены в табл. 1 (считаем появление частиц каждого типа равновероятным).

Таблица 1

Оценки количества частиц во Вселенной

σ	2	3	4	5	6	7
β	0,693	1,09	1,38	1,6	1,79	1,94
n/n_0	$3 \cdot 10^{112}$	$5,2 \cdot 10^{71}$	$4,4 \cdot 10^{56}$	$7,2 \cdot 10^{48}$	$1,7 \cdot 10^{43}$	$2 \cdot 10^{40}$

σ	8	9	10	11	12
β	2,08	2,19	2,30	2,40	2,48
n/n_0	$3,8 \cdot 10^{37}$	$4,9 \cdot 10^{35}$	$9,7 \cdot 10^{33}$	$3,7 \cdot 10^{32}$	$3,3 \cdot 10^{31}$

Расчёты показывают, что предложенный механизм формирования частиц в инфляционной Вселенной порождает количество частиц, сравнимое с общепринятой оценкой числа частиц во Вселенной — $10^{80} - 10^{90}$. Экспоненциально сжатие Вселенной должно приводить к исчезновению частиц.

5.6. Информационная классификация видов материи и энергии.

5.6.1. Распределение масс (энергий) в современной Вселенной. В работе Н.С. Кардашева [61] приведены цитируемые ниже сведения о распределении масс во Вселенной и используемых методах исследований. «Вспомним основные составляющие нашей Вселенной. Земля и мы сами состоим из „тяжёлых“ элементов — это очень малая часть средней плотности нашей Вселенной. В прошлом году было, наконец, надёжно установлено, что нейтрино имеет не нулевую массу ($m \sim 3$ эВ), но общий вклад нейтрино в среднюю плотность Вселенной лишь 0,2%. Вклад звезд и галактик в среднюю плотность всего 0,5%. Свободный водород, который находится в межзвёздной и межгалактической среде составляет не более 4%. Основная часть средней плотности Вселенной приходится на две совсем другие составляющие. Это, во-первых, некая тёмная материя (25–30%), неоднородно распределённая в пространстве. Она, безусловно, гравитирует и связана с галактиками и их скоплениями. Природа этой тёмной материи загадочна. Предложено много гипотез. Вторых, имеется вакуумная материя, равномерно распределённая по всему пространству. Вот она, скорее всего, и есть главная составляющая нашей Вселенной (около 70%), что следует из многих независимых данных...».

5.6.2. Об информационных характеристиках материи и энергии. Объём информации, содержащейся в неоднородности, равен разности неопределённости (информационной энтропии) неравномерного (неоднородного) распределения $P(x)$ и неопределённости (информационной энтропии) равномерного (однородного) распределения $R(x)$. Для непрерывных величин

$$I = \int R(x) \ln R(x) dx - \int P(x) \ln P(x) dx.$$

Если

$$R(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } -\infty < x \leq 0, \\ 1/a & \text{при } 0 < x \leq a, \\ 0 & \text{при } 0 < x \leq \infty; \end{cases}$$

и $P(x)$ определена на интервале $0 \leq x \leq a$, то

$$I = - \int_0^a P(x) \ln (aP(x)) dx.$$

1. Объём информации в чёрной дыре. Для оценки объёма информации в чёрной дыре используем сведения, приведённые в [62]. «Чёрная дыра рождает и излучает частицы так, как если бы вместо неё имелось чёрное тело, нагретое до температуры

$$T = \frac{\hbar \alpha}{2\pi c k},$$

где k — постоянная Больцмана, α — поверхностная гравитация чёрной дыры, характеризующая „напряжённость“ гравитационного поля вблизи её поверхности. Для шварцшильдовской чёрной дыры

$$\alpha = \frac{c^4}{4GM}.$$

Здесь c — скорость света, G — гравитационная постоянная, M — масса чёрной дыры». Энергия необходимая для формирования одного бита информации равна

$$E_{1 \text{ бит}} = kT = \frac{\hbar c^3}{8\pi GM}.$$

Следовательно, в чёрной дыре массы M содержится количество бит I_M , равное

$$I_M = \frac{8\pi G}{\hbar c} M^2.$$

Объём информации, содержащейся в чёрной дыре пропорционален квадрату её массы.

2. Объём информации в обычном веществе. Объём информации в обычном веществе пропорционален его массе

$$I_M = \frac{c^2}{kT} M.$$

3. Объём информации в тёмной материи. К сожалению, модели, описывающие степень неоднородности тёмной материи, только разрабатываются, поэтому нельзя привести точное выражение взаимосвязи между объёмом информации и массой тёмной материи $I_{\text{тм}} = f(M)$. Если тёмную материю составляют частицы вещества, аналогичные обыкновенному веществу, то можно сказать, что $\varkappa_{\text{тм}} M \ll \varkappa_{\text{ов}} M$ или коэффициент пропорциональности $\varkappa_{\text{тм}} \ll \varkappa_{\text{ов}}$.

4. Объём информации в тёмной энергии. Считаем, что тёмная энергия (вакуум) распределена равномерно:

$$P(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } -\infty < x \leq 0, \\ 1/a & \text{при } 0 < x \leq af, \\ 0 & \text{при } 0 < x \leq \infty; \end{cases}$$

тогда объём информации сосредоточенной в тёмной энергии равен нулю $I = 0$.

Таким образом, чёрные дыры, обычное вещество, тёмная материя и тёмная энергия, с информационной точки зрения, представляют собой значительно различающиеся объекты. Чёрные дыры — это объекты с максимальной концентрацией информации. Чёрные дыры и обычное вещество — это неоднородные субстанции. Тёмная материя и тёмная энергия представляют собой существо более однородные образования, информационная энтропия которых незначительна. Тёмная материя — это субстанция с малыми неоднородностями, она содержит мало информации. Тёмная энергия — это субстанция, не имеющая неоднородностей. Иначе говоря, тёмная энергия не содержит информации. Отсутствие неоднородностей и объясняет трудности с поиском тёмной материи и тёмной энергии.

5.6.3. Задача минимизации информации во Вселенной. Рассмотрим следующую задачу. Пусть масса модели Вселенной равна M . Вселенная содержит чёрную дыру массы $M_{\text{чд}}$ и обыкновенное вещество массы $M_{\text{ов}}$:

$$M_{\text{чд}} + M_{\text{ов}} = M.$$

Температура Вселенной T . При каком распределении массы Вселенной между чёрной дырой и обычным веществом объём информации во Вселенной минимален?

Как показано ранее, объёмы информации в чёрной дыре и обыкновенном веществе равны

$$I_{M_{\text{чд}}} = \frac{8\pi G}{\hbar c} M_{\text{чд}}^2$$

$$I_{M_{\text{ов}}} = \frac{c^2}{kT} M_{\text{ов}}.$$

и

Суммарный объём информации во Вселенной равен состоящей из одной чёрной дыры и обыкновенного вещества равен

$$I = I_{\text{чд}} + I_{\text{ов}} = \frac{8\pi G}{\hbar c} M_{\text{чд}}^2 + \frac{c^2}{kT} M_{\text{ов}}.$$

Масса чёрной дыры, при которой объём информации в модельной Вселенной минимален равна

$$\begin{aligned} M_{\text{чд}} &= \frac{\hbar c^3}{16\pi G k T} = \\ &= \frac{1.05 \cdot 10^{-27} \cdot (2.99)^3 \cdot 10^{30}}{16 \cdot 3.14 \cdot 6.67 \cdot 10^{-8} \cdot 1.38 \cdot 10^{-16}} \approx 2 \cdot 10^{25} \text{ г} = 2 \cdot 10^{22} \text{ кг}. \end{aligned}$$

Масса чёрной дыры, при которой достигается минимум информации в модельной Вселенной, не зависит от полной массы Вселенной и равна $2 \cdot 10^{22}$ кг. Это примерно масса Земли. Объём информации в такой чёрной дыре равен $I_{M_{\text{чд}}} = 1.06 \cdot 10^{54}$ бит.

Поскольку решение задачи определения массы чёрной дыры, при которой достигается минимум информации в модельной Вселенной, не зависит от полной массы Вселенной, то легко оценить минимальный объём информации в модельной Вселенной состоящей из 10^{30} чёрных дыр оптимальной массы и только из них.

$$I_{\text{min Вс}} = \frac{M_{\text{Бк}}}{M_{\text{чд}}} I_{M_{\text{чд}}} \approx \frac{10^{52}}{10^{22}} I_{M_{\text{чд}}} = 10^{30} I_{M_{\text{чд}}} = 10^{54} \text{ бит}.$$

5.6.4. Тенденции изменения массы обыкновенного вещества при расширении Вселенной. Связь между массой (энергией) и информацией позволяет получать новые, дополнительные сведения о Вселенной, её развитие. Приведём два примера. Следует отметить, что из-за недетерминированности связи между информацией и энергией в приведённых примерах конкретные значения массы лишь иллюстрируют тенденцию изменения массы обычного вещества.

1. Оценка изменения массы обычного вещества при расширении Вселенной согласно общепринятой модели.

Во Вселенной с преобладанием вещества [55, 56]

$$R \approx t^{2/3}, \quad T = \frac{10^{10}}{t^{1/2}}, \quad n(t) = \frac{t_0^2}{t^2} n_0,$$

$$S_1(t) = \ln \left(3^{3/2} \hbar^{-3} m^{3/2} T(t)^{3/2} n^{-1}(t) \right) = \ln \left(1.8 \cdot 10^{79} m^{3/2} \frac{10^{15}}{t_0^2} n_0^{-1} t^{1/2} \right).$$

Отношение массы обычного вещества в текущий момент t к массе обычного вещества в момент времени t_0 , соответствующий настоящему времени равно

$$\frac{M(t)}{M_0} = \frac{10^{10} k}{c^2 t^{1/2}} \frac{N(71.72 + 0.5 \ln t)}{N(71.72 + 0.5 \ln t_0)} = \frac{t_0^{1/2} (71.72 + 0.5 \ln t)}{t^{1/2} (71.72 + 0.5 \ln t_0)}.$$

Из приведённого выражения, табл. 2 и рис. 1 видно, что масса обычного вещества при расширении Вселенной убывает.

Таблица 2
Отношение масс обычного вещества в текущий момент t и в момент времени t_0 , соответствующий настоящему времени

t , лет	10^7	10^8	10^9	10^{10}	$1.5 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$	10^{11}	10^{12}
$M(t)/M_0$	36.4	11.7	3.79	1.22	1.00	0.85	0.47	0.15

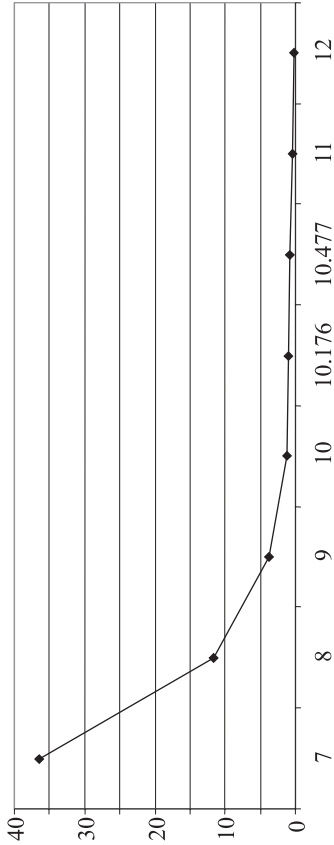


Рис. 1. Тенденция уменьшения массы обычного вещества

По горизонтальной оси отложено время в логарифмическом масштабе, по вертикальной оси отложено отношение массы обычного вещества в момент t , к массе обычного вещества в настоящее время.

Через десять миллионов лет после большого взрыва обычное вещество имеет массу более, чем в тридцать раз превосходящую современную массу и, тем самым, по-видимому, имеет момент

времени, когда вся масса Вселенной сосредоточена в обычном веществе. По мере дальнейшего расширения, масса обычного вещества убывает. Например, через 15 млрд лет его масса составит примерно 0.85 от современного значения. Когда возраст Вселенной достигнет сто миллионов лет, масса обычного вещества составит примерно 0,5 от современного значения (без учёта ускоряющегося расширения Вселенной).

2. Оценка изменения массы обычного вещества при ускоренном расширении Вселенной.

Используем результаты, изложенные в [63, 64]. Галактики удаляются друг от друга в мире вакуума со всё возрастающими скоростями. Результат расчётов приведён в табл. 3 и на рис. 2.

Таблица 3
Отношение масс обычного вещества в текущий момент t к массе и в момент времени t_0 , соответствующий настоящему времени

t , лет	10^7	10^8	10^9	10^{10}	$1.5 \cdot 10^{10}$	10^{11}
$M(t)/M(0)$	31.45	10.57	3.55	1.20	1	0.45

t , лет	$3 \cdot 10^{11}$	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	10^{16}
$M(t)/M(0)$	0.342	0.347	0.77	2.41	7.90	25.89

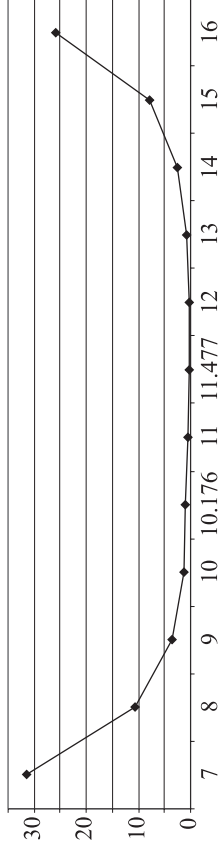


Рис. 2. Тенденция изменения массы обычного вещества

По горизонтальной оси отложено время в логарифмическом масштабе, по вертикальной оси — отношение массы обычного вещества в момент t , к массе обычного вещества в настоящее время.

Как и в предыдущей модели, через десять миллионов лет после большого взрыва, обычное вещество имеет массу более, чем в тридцать раз превосходящую современную массу и, тем самым, по-видимому, имеет момент времени, когда вся масса Вселенной сосредоточена в обычном веществе. По мере дальнейшего расширения, масса обычного вещества убывает и достигает

минимума (примерно треть от массы в настоящее время) при возрасте Вселенной около 300 млрд лет. В дальнейшем масса обычного вещества возрастает. При возрасте Вселенной 10^{16} лет в двадцать пять раз по сравнению с массой в настоящее время.

5.7. Пятое фундаментальное взаимодействие. Оценка энергии информационного взаимодействия сцепленных состояний, подсистем. Сцепленные (спутанные, запутанные, перепутанные) состояния представляют собой физические объекты, имеющие в настоящее время большое значение в теоретических и экспериментальных исследованиях многих вопросов физики и квантовых вычислений. Впервые сконструировали сцепленные состояния и обратили внимание на их необычные свойства, ставящие под сомнение полноту квантовой механики, А. Эйнштейн, Б. Подольский, Н. Розен [65]. В 1935 году Э. Шрёдингер [66] ввёл сам термин «*спутанное состояние*» для чистых состояний систем, состоящих из взаимодействующих частей: «Я считаю это обстоятельство самой характерной чертой квантовой механики, разделяющей её и классическую науку. Благодаря временному взаимодействию ранее независимые системы становятся спутанными». Именно они открыли новый класс физических объектов и взаимодействий. Ведущими учёными исследуются и предлагаются способы построения и использования сцепленных состояний [15, 18–21].

Наиболее известно использование сцепленных состояний для сверхплотного кодирования и квантовой телепортации. Использование сцепленных состояний двух и более частей системы связано с их необычайным свойством — сохранять первоначально заданное взаимодействие (квантовую корреляцию) вне зависимости от их взаимного расположения, расстояния, ориентации. Для оценки «силы», более точно, «энергии» связи между двумя кубитами, в работе автора [41] предложено использовать *информационную связь*. Показано, что «энергия» информационного взаимодействия двух кубитов находится в диапазоне $[0, 1]$, а максимальная «энергия» взаимодействия между двумя сцепленными кубитами равна одному биту.

Поскольку «энергия» взаимодействия сцепленных состояний измеряется в информационных единицах, то естественно считать данное взаимодействие информационным. В общем случае «энергию» связи между сцепленными подсистемами A и B , квантовой системы $A + B$, также, как и силу связи между двумя кубитами, можно охарактеризовать информацией связи.

Информация связи случайных величин x и y определяется следующим образом [7, 54]:

$$I_{AB} = N_A + N_B - N_{AB}.$$

Здесь I_{AB} — информация связи подсистемами A и B ; N_A — неопределённость (информационная энтропия) подсистемы A ; N_B — неопределённость (информационная энтропия) подсистемы B ; N_{AB} — совместная неопределённость (совместная информационная энтропия) системы $A + B$.

Совместная неопределённость (совместная информационная энтропия) совместного распределения событий x и y по определению равна

$$N_{xy} = - \sum_{i,j} p_{ij} \log_2 p_{ij}.$$

Здесь p_{ij} — вероятность совместного осуществления события i для x и j для y , $\sum_{i,j} p_{ij} = 1$.

Для оценки информации связи двух подсистем произвольной системы используем представление системы в виде разложения Шмидта [20, 21]. Волновую функцию (амплитуду) ψ_{AB} объединённой системы $A + B$, которая описывает систему состоящую из двух сцепленных подсистем A и B , представим в виде

$$\psi_{AB} = \sum_{i=1}^d c_i |\alpha_i\rangle |\beta_i\rangle.$$

Здесь d — размерность подсистем A и B ; (размерность соответствующих гильбертовых пространств); $|\alpha_i\rangle, |\beta_i\rangle$ — ортогональные базисные вектора подсистем A и B ; c_i — амплитуды векторов $|\alpha_i\rangle |\beta_i\rangle$.

Матрица совместного распределения вероятностей базовых состояний подсистем системы $A + B$ при использовании разложения Шмидта имеет следующий вид:

$$P_{\text{совм.}AB} = \begin{pmatrix} |c_1|^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & |c_2|^2 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & |c_d|^2 \end{pmatrix}.$$

Вектор распределения вероятностей P_A^T реализации базисных векторов $|\alpha_i\rangle$ подсистемы A равен

$$P_A^T = (|c_1|^2, |c_2|^2, \dots, |c_d|^2).$$

Вектор распределения вероятностей P_B^T реализации базисных векторов $|\beta_i\rangle$ подсистемы B также равен

$$P_B^T = (|c_1|^2, |c_2|^2, \dots, |c_d|^2).$$

Совместная неопределённость подсистем A, B системы $A + B$, неопределённости подсистем A, B равны

$$N_{AB} = - \sum_{i=1}^d |c_i|^2 \log_2 |c_i|^2,$$

$$N_A = - \sum_{i=1}^d |c_i|^2 \log_2 |c_i|^2, \quad N_B = - \sum_{i=1}^d |c_i|^2 \log_2 |c_i|^2.$$

Информация связи («энергия» информационного взаимодействия) подсистем A, B системы $A + B$ равна

$$I_{AB} = N_A + N_B - N_{AB} = - \sum_{i=1}^d |c_i|^2 \log_2 |c_i|^2 \quad (\text{бит}).$$

Из закона сохранения неопределённости следует, что если система находится в состоянии ψ , то при изменении координат отдельных кубитов, подмножеств кубитов, подсистем, сцепленного состояния в целом неопределённости сцепленных состояний сохраняются. При изменении ориентации в пространстве отдельных кубитов, подмножеств кубитов, сцепленного состояния в целом неопределённости сцепленных состояний также сохраняются. Кубиты, входящие в состав сцепленного состояния, можно перемещать с произвольной скоростью друг относительно друга не меняя неопределённости. Тем самым объясняется сохранение первоначально заданного взаимодействия (квантовой корреляции) — «энергии» информационного взаимодействия.

Используя связь между информацией и энтропией ($S = kI$ [9, 20]), а также связь между энтропией и энергией, получаем: $dE = T dS - P dV$ [20, 58].

При $dV = 0$ имеем $dE = T dS$, информационное взаимодействие подсистем A и B системы $A + B$ можно описать в принятых энергетических единицах (эргах, джоулях).

Энергия взаимосвязи подсистем A и B системы $A + B$ в принятых энергетических единицах равна

$$E_{AB} = ST = kTI_{AB}.$$

Максимальная «энергия» информационного взаимодействия подсистем A, B системы $A + B$ равна $I_{AB \max} = \log_2 d$ бит. Поскольку для несцепленных (незапутанных) подсистем A, B справедливо равенство $I_{AB \min} = 0$, то энергия информационного взаимодействия подсистем A, B системы $A + B$ лежит в диапазоне:

$$I_{AB \min} \leq I_{AB} \leq I_{AB \max}.$$

Или

$$0 \leq F_{IAB} \leq \log_2 d.$$

Таким образом, к четырём известным типам взаимодействия (гравитационному, электромагнитному, сильному, слабому) следует добавить ещё один тип взаимодействия — *информационное*.

6. Оценки характеристик познаваемости Вселенной

Существенным для познаваемости является соотношение разнообразия объекта познания (сложной системы) и субъекта познания (наблюдателя). Как будет показано далее, при определённом соотношении разнообразия сложной системы и наблюдателя и сжатии информации наблюдателем, сложные системы с конечной информацией, в том числе Вселенная, познаваемы, более того, эффективно познаваемы.

6.1. Объекты познания. Объекты познания — это естественные и искусственные системы. Отметим некоторые отличительные особенности простых систем: малое число параметров, описывающих систему; малое число частей системы и взаимодействий между ними; однородность, регулярность, симметрия; малое количество состояний системы; линейность, отсутствие синергетических эффектов; стационарность, статичность; тривиальность поведения, копирование системой внешней среды, отсутствие собственного поведения; замкнутость, изолированность от внешней среды; наличие полного описания системы и её поведения в рамках однородной модели, одного языка. Число частей и взаимосвязей простой системы исчисляются единицами.

Следовательно, простые системы представляют собой узкий круг объектов, причём объектов идеализированных, вырванных

из окружающей среды, упрощённых по сравнению с реально существующими системами, объектов, поведение которых может быть однозначно предсказано. Простые системы занимают весьма малую, ограниченную часть множества систем, «ближайшую окрестность» системы, состоящей из одного элемента, описываемой одним параметром, имеющей одно или два состояния, не взаимодействующей с внешней средой либо копирующей состояние внешней среды.

В то же время объекты познания — это подавляющее большинство естественных и искусственных систем — являются сложными системами.

6.2. Субъект познания. Субъект познания (наблюдатель) — это система, осуществляющая познание сложной системы (объекта познания). Субъект познания может быть как системой независимой, внешней по отношению к объекту познания, так и частью познаваемой системы (объекта познания) [37, 38]. Если объектом познания является Вселенная, то субъект познания, по сути, является частью объекта познания, т.е. частью Вселенной.

6.2.1. Состав субъекта познания. Субъект познания, в общем случае, это «Разум», непосредственно осуществляющий познание и среда обитания «Разума», обеспечивающая возникновение, существование и развитие «Разума».

1. «Разум» — это мыслящее существо — люди, составляющие естественный разум. Это также компьютеры, приборы и устройства, составляющие искусственный разум. Это библиотеки, как хранилища знаний, обеспечивающие хранение методов и результатов познания.

2. Среда обитания «Разума» — это Солнечная система. Солнечной системы, по-видимому, необходимо и достаточно для возникновения, существования и развития субъекта познания. Земля — место возникновения, первоначального существования и первоначального развития «Разума». Экономика, промышленность — это компоненты, обеспечивающие существование и развитие «Разума». Система образования, наука и культура — это также компоненты, обеспечивающие существование и развитие «Разума».

Технологические функции «Разума» (мыслящего существа или устройства, оснащённого измерительными приборами, средствами хранения и обработки информации): это поиск, выделе-

ние, фиксация информации; сравнение, различение и отождествление информации, а также её, обобщение и сжатие.

6.2.2. Свойства субъекта познания. Субъект познания должен обеспечивать получение и сжатие информации о познаваемом объекте, а также хранение сжатого разнообразия познаваемого объекта в течение определённого времени. Субъект познания должен обеспечивать *синхронизацию знаний*. Субъект познания должен быть компактным. Его части не должны двигаться с большой скоростью относительно друг друга.

Субъект познания не должен обладать чрезмерной массой, которая может превратить его в нейтронную звезду или чёрную дыру. Субъект познания должен быть *классическим объектом* и обладать значительной массой. Классичность субъекта познания — это детерминированность, воспроизводимость, возможность копирования, получения хранимой информации для обработки.

Субъект познания должен обладать «врождённой» классической логикой и соответствующим классической логике классическим (Колмогоровским) исчислением вероятностей.

Субъект познания должен обладать способностью открывать математические истины и сжимать информацию. Он также должен обладать памятью и быть в состоянии выполнять вычисления. И, самое главное, разнообразие субъекта познания должно превосходить сжатое разнообразие познаваемого объекта.

6.2.3. Математика — неотъемлемая часть «Разума». Математические объекты, операции над ними, утверждения об отношениях между математическими объектами, по-видимому, существовали до того, когда их открыл человеческий разум. По-видимому, математическая истина существовала всегда.

Вся математика, включая её неоткрытые части, является сложной системой. Причём, системой неразвивающейся, содержащей в любой момент времени одну и ту же совокупность сведений. В отличие от развивающейся Вселенной, математика является её постоянной, неизменной частью.

Математика является *обязательным инструментом субъекта познания*, неотъемлемой частью «Разума». Возможности субъекта познания по познанию Вселенной расширяются по мере открытия им новых математических истин. По-видимому, овладение математикой является необходимым условием существования субъекта познания, его отличительным свойством и главной

особенностью. *Математика — это инструмент эффективного познания.*

Критерием для отнесения некоторого субъекта к «Разуму» можно считать овладение им математическими истинами и умение их использовать.

6.2.4. Диаметр субъекта познания. Свойство синхронизации знаний накладывает ограничение на диаметр субъекта познания d . Он не должен превышать величины $d^* = ct$, где c — скорость света; $\tau = 1/\lambda$ — среднее время между внесениями изменений (научных открытий) в систему знаний субъекта познания (синхронизация изменений); λ — интенсивность внесения изменений в систему знаний субъекта познания. В настоящее время $\lambda > 10$ в год и $\tau < 1$ месяц.

В общем случае диаметр субъекта познания не может превышать светового года. Поскольку расстояние от Земли до ближайшей звезды α Кентавра 272 000 а. е., или 4.3 световых года (для сравнения свет от Солнца до Плутона доходит за 6 часов), то, диаметр субъекта познания — современной цивилизации — ограничен диаметром солнечной системы и составляет ≈ 10 световых часов.

6.2.5. Классичность субъекта познания. Классичность субъекта познания (при возможности использования им квантовых вычислений) представляется основным условием возможности и эффективности познания.

Дело в том, что *классические объекты, системы самодостаточно*, так как они могут описывать и моделировать себя, а также себе подобных, управлять собою, «жить» в своём мире. При этом они могут использовать и другие возможности, в частности, квантовые вычисления. В то же время квантовые объекты для описания, моделирования, измерения, управления и «жизни» требуют классических объектов — классической логики, классической информатики.

6.3. Оценка степени сжатия информации в ходе познания Вселенной.

Утверждение 16. *Коэффициент сжатия разнообразия (информации) при познании системы с конечной информацией должен удовлетворять соотношению $k \geq (R_{os} + R_{oi})/R_{oi}$, где R_{os} — разнообразие наблюдаемой части системы; R_{oi} — разнообразие внутреннего наблюдателя.*

Масса, требуемая для передачи, записи всей информации во Вселенной, примерно в сто раз меньше массы Вселенной и примерно равна массе барионов $m_n/M \approx 10^{-2}$ [37, 38]. Таким образом, наблюдатель, с разнообразием в сто раз меньшим разнообразия Вселенной, способен отобразить в себя всю информацию, содержащуюся во Вселенной, т. е. *Вселенная познаваема!*

Но такой наблюдатель не может быть компактным объектом. Следовательно, познание должно быть эффективным, т. е. в процессе познания Вселенной должно осуществляться *существенное сжатие информации*.

Утверждение 17. *В ходе познания Вселенной осуществляется существенное сжатие информации. Коэффициент сжатия разнообразия (информации) в процессе познания Вселенной не менее $k = 10^{20}$.*

Данное утверждение является следствием следующих посылок:

- 1) опыт свидетельствует, что Вселенная познаваема земной цивилизацией;
- 2) масса, требуемая для записи всей информации во Вселенной, в настоящее время, оценивается величиной $m_n \approx 3 \cdot 10^{50}$ кг;
- 3) масса современной цивилизации — субъекта познания Вселенной — не превосходит массы солнечной системы $M_c \approx 2,0 \cdot 10^{30}$ кг.

Следовательно, процесс познания сжимает разнообразие Вселенной более, чем в 10^{20} раз.

Как уже отмечалось ранее в разделе 3, познаваемость в широком смысле включает в себя также возможность создания, конструирования и управления сложными системами.

6.4. О создании Вселенных. Вопрос о создании Вселенных уже обсуждается. Ю. Н. Ефремов, А. Д. Чернин в [67] так обсуждают идею Э. Харрисона о создании Вселенных: «Видный американский космолог Э. Харрисон [68] предложил идею создания и естественного отбора вселенных, содержащих разумную жизнь. Теоретические пути создания вселенных уже известны, для этого всего лишь надо научиться создавать чёрные дыры из элементарных частиц с энергией порядка 10^{15} ГэВ, т. е. всего лишь на 13 порядков больше, чем в наших мощнейших ускорителях...».

Недавно стало известно [69], что американские учёные создали в лабораторных условиях чёрную дыру. В земных условиях чёрная дыра просуществовала миллиардную часть наносекунды.

6.5. Об управлении Вселенной. Высшей формой познания систем является управление ими (указано автору В. А. Жожикашвили). Н. С. Кардашев предположил, что расширение наблюдаемой области Вселенной может быть «результатом сознательной деятельности суперцивилизаций» [23], а В. А. Лефевр, предложил один из способов управления распределением вещества во Вселенной [70, 71]: «Представим себе, что для того чтобы избежать гравитационного коллапса, субъекты начинают выбрасывать материю из облаков галактик с целью уменьшить их плотность. В результате таких совместных усилий субъекты изменяют характер распределения вещества во Вселенной, продлевая время своего существования. Если оставить в стороне проблему координации совместных усилий, то не видно каких бы — то ни было ограничений со стороны физических законов, препятствующих осуществлению такого проекта».

Таким образом, в будущем человечеству необходимо будет научиться ставить и решать задачи управления Вселенными методами теории управления [72]. Для примера рассмотрим случай однородной Вселенной. Однородная Вселенная описывается уравнением Эйнштейна [73]:

$$\frac{dR}{dt} = R \left(\frac{\chi c^2 \rho}{3} - \frac{k c^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3} \right)^{1/2}.$$

Здесь Λ — космологическая постоянная; $\chi = 8\pi G/c^2$; ρ — плотность Вселенной; p — давление во Вселенной; $k = +1, -1, 0$; c — скорость света; G — гравитационная постоянная; R — текущий радиус Вселенной.

Использование динамической модели Вселенной для описания объекта управления даёт возможность сформулировать классические постановки задач управления. Например:

- 1) уравнения Эйнштейна задают динамику Вселенной;
- 2) в качестве критериев оптимальности можно рассматривать время расширения Вселенной от радиуса R_0 до радиуса R , массу Вселенной, ...;
- 3) в качестве ограничений можно рассматривать ограничения на количество разных типов частиц во Вселенной, продолжительность этапов развития Вселенной, ...;

4) в качестве управляемых переменных можно рассматривать, космологическую постоянную Λ , плотность Вселенной, распределение масс во Вселенной (в последнем случае динамика Вселенной должна описываться тензорными уравнениями Эйнштейна).

Решение задач оптимального управления Вселенной, в частности, даст возможность оценить ход развития Вселенной, возможность «Разума» влиять на развитие Вселенной.

7. Пределные возможности познания

7.1. Оценка сверху максимального коэффициента сжатия. Пусть Вселенная описывается n параметрами. Тогда необходимо иметь n^2 физических законов, описывающих взаимосвязи между параметрами. Будем считать, что на описание одного закона необходимо I бит. Тогда на описание всех n^2 физических законов, описывающих Вселенную необходимо следующее количество информации: $I_{\text{опВсел}} = n^2 I$.

Пусть $n = 100$, $I = 1$ Гбайт (это более 3000 страниц текста), тогда $I_{\text{опВсел}} = 10000$ Гбайт. Поскольку для записи 1 бита необходима масса, не меньшая, чем $M_{\text{бит}} = E_{\text{бит}}/c^2 \approx 10^{-23}$ Дж/($9 \cdot 10^{16}$ м²/с²) = 10^{-40} кг, то в сделанных предположениях коэффициент сжатия информации в процессе познания Вселенной не может быть более $k = 10^{76}$.

7.2. Процесс познания во Вселенной с конечной информацией не ограничен частью Вселенной. Опасение Ю. И. Манина о существовании предельных возможностей познания справедливо во Вселенной, содержащей бесконечный объём информации. Можно бесконечно познавать одну бесконечную часть Вселенной, не познавая другую её бесконечную часть.

Во Вселенной, содержащей конечный объём информации, такое невозможно. Доказательство невозможности ограничения познания частью Вселенной аналогично доказательству бесконечности натуральных чисел или античному доказательству отсутствия границы Вселенной. Предположим, что можно познать максимальный объём информации $I_{\text{Позн}}$, который меньше, чем полный объём информации во Вселенной $I_{\text{Всел}}$:

$$I_{\text{ПознВсел}} < I_{\text{Всел}}.$$

Объём непознанной информации во Вселенной $I_{\text{НепознВсел}}$ также конечен:

$$I_{\text{НепознВсел}} = I_{\text{Всел}} - I_{\text{ПознВсел}}.$$

Очевидно, что во Вселенной, содержащей $I_{\text{НепознВсел}}$ непознанной информации, всегда получить (с помощью операций обнуления, выделения, различения, отождествления и др., измерения и/или моделирования) дополнительно хотя бы 1 бит информации.

Следовательно, объём познанной информации увеличится, по крайней мере, на 1 бит: $I'_{\text{Позн}} = I_{\text{Позн}} + 1$. Таким образом, поскольку объём непознанной информации конечен, то за конечное число шагов Вселенная будет познана. Следовательно, процесс познания Вселенной с конечным объёмом информации не может ограничиться частью Вселенной.

8. Новая парадигма познания

Информационный подход к познанию сложных систем, физическим исследованиям даёт возможность:

- представлять известные результаты в информационной форме;
- в сочетании с физическим подходом получать новые результаты.

Важно отметить, что *информационный язык унифицирует описание* и может существенно упростить понимание физических законов, свойств физических систем.

Информационный подход, а также законы информатики определённым образом меняют *парадигму познания*, т.е. характерную для современного этапа развития науки модель постановки естественно-научных проблем и методы их решения, а также сам способ естественно-научного мышления: реализуются наиболее простые варианты естественных и искусственных систем, и задача науки — поиск наиболее простых вариантов, удовлетворяющих экспериментальным данным.

Отбор вариантов существования и развития систем должен осуществляться, прежде всего, на основе законов информатики, а затем уже изучаться с использованием физических законов и/или технических решений.

Можно перечислить некоторые направления дальнейших исследований с использованием информационных методов. Наиболее актуальными из них представляются следующие.

- Уточнение и развитие законов информатики, как одной из основ естествознания. Определение «границ действия» законов информатики, потенциальных возможностей информационных методов.
 - Изучение свойств систем с конечной информацией.
 - Оценка минимального объёма информации, определяющего возникновение и развитие Вселенной (максимально возможного коэффициента сжатия информации во Вселенной). Поиск неоднородностей, содержащих эту информацию. Определение носителей информационного взаимодействия.
 - Описание физических систем Вселенной, основанное на законах информатики и физики. Использование законов информатики в осмыслении и решении ряда проблем космологии, теории суперструн. Разработка моделей и методов управления Вселенной.
 - Обоснование необходимости классических объектов, классической логики. Анализ различий и взаимосвязи классической и квантовой логик.
 - Совместное использование квантовых и классических средств и методов обработки и передачи информации. Создание и исследование сетей классических и квантовых компьютеров.
 - Определение информационно общего между цивилизациями во Вселенной.
 - Создание минимального познающего субъекта.
 - Сохранение накопленных земной цивилизацией знаний.
- Автор благодарит научного руководителя ФТИАН академика К. А. Валиева, руководителя АКЦ ФИАН академика Н. С. Карлашева, директора ИПИ РАН члена-корреспондента РАН И. А. Соколова, сотрудников ИПИ РАН профессора К. К. Колина, к.ф.м.н. В. И. Синицина, сотрудника ИПУ РАН профессора В. А. Жожикашвили, сотрудника ГАИШ профессора В. М. Липунова, сотрудника НИИЯФ к.ф.-м.н. А. Д. Панова за интерес к данному направлению работ и оказанную помощь.

9. Заключение

Изложенное выше показывает возможности использования информационного подхода и законов информатики при исследовании сложных систем и позволяет сделать следующие выводы.

1. Информационные методы для исследования физических систем сегодня разрабатываются, обосновываются и используются.

ся как зарубежными, так и российскими учёными. А. Эйнштейн, Л. Сциллард, Дж. Уиллер, У.Р. Эшби, Х. Бренерманн, К. Гёдель, Х. Хармут, Japex E.T., С. Беннет с коллегами, С. Ллойд, К.А. Валиев, Б.Б. Кадомцев, К.К. Колин, А.С. Холево, Н. Марголис, Л. Левитин, Г.В. Встовский и ряд других уже получили важные результаты. Количество учёных, использующих информационный подход в физических исследованиях, быстро возрастает.

2. Наряду с материей и энергией Вселенная включает в себя также и информацию. Информация является неотъемлемой частью Вселенной, она неразрывно связана с материей (энергией). Носителем информации являются неоднородности материи и энергии. Наличие информации во Вселенной приводит к необходимости использования информационных методов исследования как самой информации, так и связанной с ней материи и энергии.

3. Законы информатики систематизируют знания по информатике и информационным методам исследования. Они определяют простоту физических систем, физически допустимые преобразования и, тем самым, в значительной мере, — физические законы. Кроме того, законы информатики, наряду с физическими законами, служат инструментом познания сложных систем, включая Вселенную.

4. Закон сохранения неопределённости (информации) определяет допустимость преобразования координат (трансляций в пространстве и во времени, собственных вращений, преобразований Галилея, преобразований Лоренца, локальных преобразований общей теории относительности) и запрещает преобразования пространственной инверсии, обращения времени, несобственных вращений. Произвольные квантово-механические вычисления можно выполнять с сохранением неопределённости.

5. Теоретический (описание) и экспериментальный (измерение) способы познания имеют одинаковую познавательную силу, так как объёмы информации, получаемые при теоретических и экспериментальных исследованиях, одинаковы.

6. Неопределённость описания, объём информации, получаемой при измерении наблюдаемых, определяемых коммутирующими операторами, одинаковы. Суммарная неопределённость описания, суммарный объём информации, получаемой при измерении наблюдаемых, определяемых некоммутирующими и антикоммутирующими операторами, не зависит от неопределённости

одной из них — при увеличении неопределённости описания или объёма получаемой при измерении информации одной наблюдаемой настолько же уменьшается неопределённость описания или объём получаемой при измерении информации другой наблюдаемой и наоборот. При переходе к новому базису информационные соотношения между наблюдаемыми сохраняются.

7. Возможна интерпретация квантовой механики на базе информационных соотношений. При этом процесс познания (описание и измерение) осуществляется через гипотетический информационный канал — «канал познания природы». Ограниченная пропускная способность «канала познания природы» определяет невозможность «точного» (в классическом смысле) описания и измерения квантовых объектов. Увеличивая точность (уменьшая неопределённость) описания/измерения одной из величин, наблюдатель вынужден уменьшать точность (увеличивать неопределённость) описания/измерения другой.

8. Обычное вещество (протоны, атомные ядра, электроны) во Вселенной содержит (является носителем) 10^{90} бит информации. Рассмотренный информационный механизм формирования частиц в инфляционной Вселенной порождает количество частиц, сравнимое с общепринятой оценкой числа частиц во Вселенной — порядка $10^{80} - 10^{90}$. Минимальный объём информации — 10^{54} бит был бы в нашей Вселенной, если бы она состояла из одних 10^{30} чёрных дыр, каждая массой $2 \cdot 10^{22}$ кг.

9. Имеется несколько типов массы (энергии): масса (энергия) чёрной дыры, порождающая неоднородности (информацию) в объёме, пропорциональном квадрату массы (энергии); масса (энергия) обычного вещества, порождающая неоднородности (информацию) в объёме, пропорциональном массе (энергии); масса (энергия) тёмной материи, порождающая неоднородности (информацию) в объёме, непропорциональном массе (энергии) — в объёме, значительно меньшем массы порождённой информации; масса (энергия) тёмной энергии, не порождающая неоднородности (информации).

10. Оценки тенденции изменения массы обычного вещества показывают, что при стандартной модели расширения Вселенной масса обычного вещества убывает, а при расширении Вселенной с ускорением масса обычного вещества в начале убывает, достигает минимума, а затем возрастает.

11. К четырём известным типам взаимодействия (гравитационному, электромагнитному, сильному и слабому), по-видимому, следует добавить ещё один тип взаимодействия — *информационное взаимодействие*.

12. «Энергию» взаимодействия сцепленных состояний подсистем квантовой системы можно оценивать *информацией связи*. Сцепленные состояния, подсистемы различаются по величине, «энергии» информационной связи. Единицей измерения энергии взаимодействия сцепленных состояний, подсистем квантовой системы является бит. «Энергия» информационного взаимодействия подсистем определяется объёмом неопределённости (информации) в подсистемах.

13. Закон сохранения неопределённости (информации) определяет независимость «энергии» взаимодействия сцепленных состояний, подсистем квантовой системы от их расположения в пространстве и от расстояния между ними. Кубиты, подсистемы, входящие в состав сцепленного состояния, квантовой системы можно, перемещать с произвольной скоростью друг относительно друга, сохраняя «энергию» информационной взаимосвязи.

14. Законы информатики дают возможность при исследованиях проблем познаваемости сложных систем, в том числе, Вселенной, использовать количественные оценки. Существенным для познаваемости является соотношение разнообразия объекта познания (сложной системы) и субъекта познания (наблюдателя).

15. В ходе познания Вселенной осуществляется существование сжатия информации. Коэффициент сжатия разнообразия (информации) в процессе познания Вселенной не менее $k = 10^{20}$ и не может быть более $k = 10^{76}$. Процесс познания Вселенной с конечным объёмом информации не может ограничиться частью Вселенной.

16. Информационный подход и законы информатики определённым образом меняют парадигму познания как способ естественно-научного мышления: необходимо осуществлять поиск наиболее простых вариантов описания Вселенной и её частей, удовлетворяющих экспериментальным данным.

17. Проведение исследований по перечисленным направлениям даст возможность уточнить и обобщить ранее полученные результаты, получить новую важную информацию для познания Вселенной и её составных частей.

Список литературы

1. Валиев К.А. Интервью журналу Эксперт, № 17 (228) от 8 мая 2000.
2. Левкович-Маслюк Л. Пространство свободы. Интервью Юрия Манина // Компьютера. 2001. № 1. — <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1180585&uri=2.html>.
3. Кардашев Н.С. Информация, компьютеры и цивилизации во Вселенной // Совместное заседание семинара по космической философии НКЦ SETI и секции «Поиски внеземных цивилизаций» ИСА РАН. 7 апреля 2006. — М.: ГАИШ, 2006.
4. Энштейн А. К электродинамике движущихся тел. Собрание научных трудов. Т. 1. — М.: Наука, 1965.
5. Szillard L. Z. // Physik. 1929. V. 53. P. 840.
6. Фон Нейман М. Математические основы квантовой механики. — М.: Наука, 1964.
7. Шеннон К. Математическая теория связи. Работы по теории информации и кибернетики. — М.: ИЛ, 1963. — С. 243–332.
8. Шрёдингер Э. Природа и греки. — Москва–Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001.
9. Janes E. T. Information theory and statistical mechanics. I, II // Phys. Rev. 1957. V. 106, № 4. P. 620–630; Phys. Rev. 1957. V. 108, № 2. P. 171–190.
10. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. — М.: Государственное изд-во физико-математической литературы, 1960.
11. Wheeler J. A. Geometrodynamics. — N. Y.: Academic Press, 1962. — P. 88. 129.
12. Wheeler J. A. In Complexity, Entropy, and the Physics of Information, W. H. Zurek, ed., Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. V. VIII. — Redwood City: Addison Wesley, 1988.
13. Bremermann H. O. Optimization through Evolution and Re-combination in Self — Organizing Systems. Spartan Books. — Washington D.C., 1962.
14. Эшби У. Росс. Несколько замечаний. Общая теория систем. — М.: Мир, 1966.
15. Холево А.С. Введение в квантовую теорию информации. — М.: Независимый московский университет. Высший колледж математической физики. МЦНМО, 2002.
16. Киржниц Д.А. Горячие «чёрные дыры». Новое в понимании природы теплоты. — М.: МГУ им. М.В. Ломоносова.

17. Хармут Х. Применение методов теории информации в физике. — М.: Мир, 1989.
18. Bennett C.H., Brassard G., Crepeau C., Jozsa R., Peres A., Wootters W.K.. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. P. 1895–1899.
19. Bennett C.H., Bernstein H.J., Poretsu S., Schumacher B. // Phys. Rev. Lett. A. 1996. V. 53. P. 2046.
20. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: Надежда и реальность. — Москва–Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001.
21. Валиев К.А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН. 2005. Т. 175, № 1.
22. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. — М.: Успехи физических наук, 1999. — 400 с.
23. Кардашев Н.С. Астрофизический аспект проблемы поиска внеземных цивилизаций // Внеземные цивилизации. — М.: Наука, 1969.
24. Стин Э. Квантовые вычисления. — Москва–Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2000.
25. Margolus N., Levitin L.B. Phys. Comp. 96. T. Toifoli, M. Biafore, J. Leao, eds. (NECSI, Boston) 1996 // Physica D. 1998. V. 120. P. 188–195.
26. Колин К.К. Информационный подход как фундаментальный метод научного познания // Межотраслевая информационная служба. 1998. № 1.
27. Колин К.К. Эволюция информатики // Информационные технологии. 2005. № 1. С. 2–16.
28. Lloyd Seth Computational capacity of the universe. — arXiv: quant-ph/0110141. V. 1. 24 Oct 2001.
29. Встовский Г.В. Элементы информационной физики. — М.: МГИУ, 2002.
30. Голицын Г.А., Левич А.П. Вариационные принципы в научном знании // Философские науки. 2004. № 1.
31. Розенталь И.Л., Архангельская И.В. Геометрия, динамика, Вселенная. — М.: Едиториал УРСС, 2003.
32. Hsu S., Zee A. Message in the Sky. — arXiv: physics/0510102. V. 2. 6 Dec 2005.
33. Scott D., Zibin J.P. The Real Message in the Sky. — arXiv: physics/0511135. V. 1. 15 Nov 2005.
34. Гуревич И.М. Об основных законах информатики. Тезисы докладов отраслевого научно-технического Семинара 16–20 ноября 1987.

- Проблемы, методы и опыт создания автоматизированных систем управления связью. Ч.1. — М.: ЦООНТИ «Экос», 1987.
35. Гуревич И.М. Законы информатики — основа исследований и проектирования сложных систем связи и управления. Методическое пособие. — М.: ЦООНТИ «Экос», 1989.
36. Гуревич И.М. Законы информатики — основа исследований и проектирования сложных систем связи и управления. Методическое пособие. — М.: ЦООНТИ «Экос», 1989.
37. Гуревич И.М. Законы информатики — основа строения и познания сложных систем. — М.: Антикава, 2003.
38. Игорь Гуревич. О познаваемости сложных систем: Познаваема ли Вселенная? // Наука и культура, 06.VII.2004. — <http://www.pereplet.ru/text/gurevich/gurevich.html>.
39. Гуревич И.М. Сжатие информации «Разумом» в процессе познания Вселенной // Бюллетень Специальной астрофизической обсерватории РАН. Т. 60. (в печати).
40. Гуревич И.М. Физики познают и используют Законы информатики // Информационные технологии. 2004. № 12.
41. Гуревич И.М. Информационные характеристики сцепленных состояний // Информационные технологии. 2006. № 5.
42. Гуревич И.М. Сети классических и квантовых компьютеров // Сборник тезисов докладов конференции «Инфотех — 2004». — Севастополь, 2004.
43. Гуревич И.М. Введение в физическую информатику // Сб. трудов Научной сессии ИПИ РАН. — М.: ИПИ РАН, 2005.
44. Гуревич И.М. Операции над q-битами и сохранение неопределённости. (В печати).
45. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. — М.: Наука, 1974.
46. Садбери А. Квантовая механика и физика элементарных частиц. — М.: Мир, 1989.
47. Борисов А.В. Основы квантовой механики. Учебное пособие. — М.: Изд-во физического факультета МГУ, 1999.
48. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс Э. Фейнмановские лекции по физике. Т. 8, 9. — М.: Мир, 1967, 1968.
49. Билингсгей П. Эргодическая теория и информация. — М.: Мир, 1969.
50. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. — М.: Наука, 1967.
51. Adriano Barenco, Charles H. Bennett, Richard Cleve, David P. DiVincenzo, Norman Margolus, Peter Shor, Tycho Sleator, John Smolin, Harald Weinfurter. Elementary gates for quantum computation. (Sub-

- mitted to Physical Review A, March 22, 1995 (AC5710)). — arXiv: quant-ph/9503016. V. 1. 23 Mar 95.
52. Физический энциклопедический словарь. Т. 3. — М.: Советская энциклопедия, 1963.
53. Гуревич И.М., Литвак И.И., Шахова Н.А. Некоторые соотношения между ошибками измерений, возникающими при передаче результатов измерений по каналу с ограниченной пропускной способностью. Труды РИАН СССР, № 4. — М., 1974.
54. Стратонович Р.Л. Теория информации. — М.: Советское радио, 1975.
55. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б. Космология и элементарные частицы // УФН. 1980. Т. 130. Р. 4. — <http://www.astronet.ru/db/msg/1186391>.
56. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Стрoение и эволюция вселенной. — М.: Наука, 1975.
57. Гуревич Л.Э., Чернин А.Д. Происхождение галактик и звёзд. — М.: Наука, 1983.
58. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Статистическая физика. — М.: Наука, 1964.
59. Новиков И.Д. Чёрные дыры и Вселенная. — М.: Молодая Гвардия, 1985.
60. Окунь Л.Б. $\alpha\beta\gamma = z$. — М.: Наука, 1985.
61. Кардашев Н.С. Космология и проблемы SETI. АКЦ ФИАН. Материалы конференции «SETI-XXI». 2002. — <http://www.astronet.ru/db/msg/1177502>.
62. Новиков И.Д., Фролов В.П. Физика чёрных дыр. — М.: Наука, 1986.
63. Чернин А.Д. Тёмная энергия вблизи нас. — М.: ГАИШ МГУ. — <http://www.astronet.ru:8101/db/msg/1210535>.
64. Чернин А.Д. Физический вакуум и космическая анти-гравитация. — М.: ГАИШ МГУ. Обс. Турла, у-т Турку, Финляндия. 2001. <http://www.astronet.ru/db/msg/1174484/index.html>.
65. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // Phys. Rev. 1935. V. 47. P. 777–780.
66. Schrodinger E. Die gegenwartige Situation in der Quantenmechanik // Naturwissenschaften. 1935. Bd. 23. S. 807–812.
67. Ефремов Ю.Н., Чернин А.Д. О месте и роли человека в Мироздании. — 2003. — <http://doktora.mn.ru/25.06.03.htm>.
68. EHarrison Masks of the Universe. — N. Y.: Collier Books: Macmillan, 1985.

69. «Чёрную дыру» удалось создать на земле. — 2006. — <http://www.inauka.ru/news/article52994.html>.
70. Гиндилис Л.М. SETI: Поиск Внеземного Разума. — М.: Физматлит, 2004.
71. Лефевр В. Космический субъект. — М.: Когито-Центр, 2005.
72. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. — М.: Наука, 1987.
73. Мак-Витти Г. Общая теория относительности и космология. — М.: ИЛ, 1961.
74. Глушков В.М. О кибернетике как науке // Кибернетика, мышление, жизнь. — М.: Мысль, 1964.
75. Колин К.К. Природа информации и философские основы информатики // Открытое образование. 2005. № 2(49). С. 43–51.