**Мир глазами Нильса Бора: волны и их восприятие**

**Волны и частицы в классическом естествознании.**

Вещество в классической теории обычно рассматривается как совокупность дискретных неделимых частиц - материальных точек. В зависимости от рассматриваемой задачи в их роли могут выступать макроскопические объекты, молекулы, атомы и т.д.

Введение в естествознание концепции поля, в большинстве случаев описываемого непрерывными и обращающимися на бесконечности в 0 весьма сложными функциями координат и времени , ставит вопрос о их разложении по более простым “базисным” функциям, с которыми легче производить расчеты. Такое представление функций аналогично процедуре нахождения проекций вектора на выбранные оси координат. Основное отличие состоит в том, что в случае “обычных“ векторов число ортогональных координатных осей и соответствующих им базисных векторов (размерность пространства) весьма ограничено (в евклидовом пространстве их 3), пространство же непрерывных функций оказывается бесконечно мерным, число элементов его базиса часто оказывается даже несчетным. В качестве базисных могут выбираться различные наборы функций. В большинстве задач наиболее удобны гармонические: синусы и косинусы. Теорема о разложении в ряды и интегралы Фурье утверждает, что любая достаточно гладкая функция может быть представлена как суперпозиция (сумма или интеграл) гармонических функций с различными частотами.

В случае зависящей только от времени исходной функции о ее Фурье разложении говорят как о представлении в виде суммы гармонических колебаний различных частот , каждое из которых имеет вид

(1) .

В природе встречается множество процессов, представляющих собой почти гармонические колебания (напр. изменение электрического поля в конденсаторе, включенном в цепь колебательного контура , широко используемого в качестве маятника в электронных часах). По существу все системы, имеющие точки устойчивого равновесия, могут совершать гармонические колебания вблизи этих точек.

Если рассматриваемая функция зависит только от пространственных координат , она может быть представлена суммой пространственных гармоник вида:

(2) .

В общем случае функций, зависящих и от координат и от времени, их можно представить в виде суммы плоских монохроматических волн, каждая из которых описывается математическим выражением вида:

(3) .

Помимо плоских волн иногда используют разложения на сферические, цилиндрические и др. монохроматические волны. В качестве примера приведена “мгновенная фотография” круговых (двухмерных сферических) волн. Примерами объектов природы, приближенно описываемых отдельными плоскими монохроматическими волнами, являются волны на поверхности моря (без “гребешков”), звуковые волны от камертона, излучение лазера.

Т.о. монохроматические волны, как и точечные частицы, являются не столько понятиями, отражающими свойства реально существующих объектов, сколько моделями, существенно облегчающими математическое рассмотрение явлений природы. Наличие ряда объектов и явлений, приближенно описываемых этими моделями, привело к их некоторой абсолютизации на классическом этапе развития естествознания.

**Математический формализм описания волн и частиц.**

Функцию, описывающую плоскую монохроматическую волну (3), удобно записывать с использованием многомерных обозначений в комплексном виде

(4) ,

причем знак операции взятия вещественной части комплексного числа обычно для краткости опускается.

Для описания распределения плотностей (массы, заряда, спина и т.д.) точечных объектов вводят так называемые дельта-функции , математические свойства которых весьма экзотичны:

(5) ,

причем на бесконечность функция уходит так “далеко”, что объем под ее графиком оказывается равным конечной величине - 1.

Аналогия между разложением вектора по базису и Фурье-представлением функций. Ортонормированный базис (совокупности взаимно ортогональных векторов единичной длины) {e} определяется соотношением:

(6) ,

Любой вектор R может быть разложен по выбранному базису:

(7) ,

т.е. представлен как сумма единичных ортов, домноженных на числа, называемые проекциями вектора на направление орта . Выражение для проекций получается с учетом (6) в результате скалярного умножения (7) на каждый из ортов:

(8) .

В функциональном пространстве роль векторов играют непрерывные функции, роль скалярного произведения (операция, ставящая в соответствие двум векторам число) - интеграл по конфигуранционному пространству аргументов от их произведения:

(9) .

Роль ортонормированного базиса может играть множество гармонических функций:

(10) ,

причем дельта функция в (10) является аналогом символа Кронекера в (6). Теорема о разложении в интеграл Фурье, имеющая вид:

(11)

аналогична разложению (7), причем амплитуды волн (“проекции функции F на гармонические отры”) находятся аналогично тому, как это делалось для векторов в (8):

(12) .

Помимо гармонических функций существует бесконечное множество других ортонормированных наборов, конкретный выбор которых определяется спецификой задачи. В частности, могут использоваться и дельта-функции, строгое математическое определение которых аналогично разложениям (7) и (11):

(13) .

Т.о. с точки зрения математики дельта функции (описывающие точечные частицы) и гармонические функции (описывающие монохроматические волны) составляют ортонормированные наборы и могут использоваться для разложения более сложных функций и одинаково пригодны для описания объектов и процессов с весьма разнообразными свойствами.

Акустические волны. Звук представляет собой продольные волны сжатия, распространяющиеся в упругих материальных средах. В твердых телах возможен “поперечный” звук. Ухо человека воспринимает колебания, частоты которых лежат в диапазоне от ?? Гц до Гц ??. Высота звука определяется частотой колебаний: более высокие частоты вызывают ощущение “более высокого звука”, “басы” соответствуют низкочастотным колебаниям. Ощущение громкость звука определяется энергией, переносимой звуковой волной (пропорциональна квадрату амплитуды колебаний давления).

Органы слуха млекопитающих представляют собой весьма совершенный акустический прибор, позволяющий регистрировать звук в широких диапазонах громкости (“сила возникающего ощущения” пропорциональна логарифму энергии). Основу “входного устройства” звукового канала составляет акустический резонатор, выделяющий и усиливающий из всевозможных акустических колебаний лишь те, что лежат в диапазоне восприятия. Основная роль в анализе звука принадлежит специальным упругим волоскам различных размеров, связанных с чувствительными нервными окончаниями. Гармонические Фурье-составляющие, на которые можно разложить звуковые колебания, вследствие явления резонанса (резкое увеличение амплитуды колебаний при совпадении собственной и вынуждающих частот) сильно раскачивают волоски строго определенных размеров, что вызывает появления импульсов в соответствующих нервных окончаниях. Соответствующая информация передается в мозг, где и возникает ощущение звука (эта часть процесса восприятия изучена наиболее плохо). Т.о, в ухе происходит фурье-анализ звуковых колебаний.

Колебания воздуха, создаваемые свободно колеблющимися струнами, весьма близки к гармоническим (”чистый звук”), хотя и содержат малые примеси частот, кратных главной - обертоны. Их наличие объясняет факт различного звучания одной и той же ноты на разных инструментах. Обертоны “несут ответственность” за распознавание речи: при произношении гласных звуков голосовые связки человека создают соответствующие его высоте голоса частоты, весьма богатые обертонами. Движение языка и губ изменяют форму ротовой полости, выполняющей роль акустического резонатора, и, как следствие, - режимы затухания различных гармоник.

Музыкальные звуки представляют собой смесь нескольких гармонических колебаний, частоты которых относятся как небольшие целые числа и вызывают у человека приятные ощущения (механизм последнего не выяснен). Близкие, но отличающиеся по частоте колебания вызывают неприятные ощущения диссонирующего звука. Звуковые колебания со сплошными спектром частот воспринимаются человеком как шум.

Колебания плотности с частотами, лежащими ниже частотного порога восприятия, называются инфразвуком. Имеются данные о том, что интенсивный инфразвук определенных частот может оказывать весьма неблагоприятное влияние на человека, что по-видимому связано с его резонансным воздействием на протекающие в организме периодические процессы.

Акустические колебания с частотами, превышающими порог восприятия, носят названия ультразвука. Ультразвук широко используется в локации в случаях, когда расстояния до объекта столь малы, что измерение времени распространения электромагнитных волн превращается в трудоемкую задачу. Возникающий при отражении звуковых волн от движущихся объектов эффект Доплера позволяет определять скорости наблюдаемого объекта

Видимый свет представляет собой поперечные электромагнитные волны, лежащие в частотном диапазоне от ?? Гц до ??Гц. Вызываемое им ощущение яркости определяется логарифмом энергии световой волны (энергия пропорциональна квадрату амплитуды). Глаза человека и ряда высших млекопитающих способны осуществлять частотный Фурье-анализ электромагнитного поля, создавая различные ощущения цвета. Изменение цветов при движении по спектру от красного до фиолетового соответствует увеличению частот монохроматических гармоник электромагнитного поля.

Ниже пределов чувствительности человеческого глаза на шкале частот электромагнитного излучения лежит инфракрасное излучение , непрерывно переходящее в радиоволны. Их биологическое воздействие в подавляющем большинстве случаев сводится к эффектам, связанным с нагреванием. Ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма излучения характеризуются частотами, лежащими выше предела зрительного восприятия.

Возрастание частоты электромагнитного излучения сопровождается увеличением его вредного воздействия на биологические объекты.

Особенности цветного зрения. Интересной физиологической особенностью зрения является тот факт, что определенным образом подобранная смесь монохроматических излучений может создавать точно такое же ощущение: как другое монохроматическое излучение (смесь красного и желтого цветов воспринимается как оранжевый, а не “красно-желтый”). Объяснение кроется в строении светочувствительных клеток - палочек и колбочек, образующих сетчатку глаза. Более чувствительные палочки реагируют только на энергию световой волны (в сумерках изображения теряют свой цвет), а колбочки содержат три сорта зрительного пигмента, имеющие различные кривые спектральной чувствительности . В результате протекающих в них физико-химических процессов при облучении клеток формируются электрические импульсы, величины которых определяются произведением интенсивности световой гармоники на чувствительность пигмента на ее частоте. Т.о. преобразование световых сигналов при зрительном восприятии с математической точки зрения может рассматриваться как проектирование из бесконечномерного пространства амплитуд Фурье-гармоник электромагнитного поля в трехмерное пространство электрических импульсов. Всякое проектировании на подпространство меньшей размерности сопровождается частичной потерей информации, что и приводит к неоднозначности цветового восприятия.

Физиологические особенности зрительного восприятия образов. Физико-химические процессы преобразования оптических сигналов в электрохимические являются первым звеном в длинной цепи, приводящей к формированию в сознании зрительного образа. Многие звенья этой цепи изучены весьма неполно.

Светочувствительные клетки сетчатки соединены не только с мозгом, на и друг с другом, образуя нейронную сеть, производящую первичную обработку зрительных сигналов и являющуюся вынесенной вперед частью мозга. О сложности процессов формирования зрительного образа говорят следующие особенности нашего восприятия:

1. Оптическая система глаза формирует на сетчатке перевернутое изображение, что не отражается на восприятии. При использовании специальных оптических систем, изменяющих изображение на сетчатке на неперевернутое, человек теряет способность адекватного зрительного восприятия. Через несколько дней пользования такой системой зрительная информация вновь начинает восприниматься нормально.

2. Сетчатка разделена на две примерно равные области, нервные волокна от которых идут в разные полушария мозга. Несмотря на то, что граница раздела приходится на центр зрительного поля, изображение не воспринимается как разорванное на две части.

3. Наличие на сетчатке “слепого пятна” (области, лишенной светочувствительных клеток) не приводит к возникновению незаполненной области в зрительной картине даже при восприятии ее одним глазом.

4. Ощущение объемного непрерывного образа строится из двух не совпадающих друг с другом мозаичных картин, возникающих на сетчатках глаз.

5. Способность распознавания образов трехмерных объектов по их плоским контурным изображениям и возможность их классификации.

Последняя, возможно наиболее удивительная способность зрения человека, тесно связана с интенсивно разрабатываемой в математике и технике проблемой распознавания образов.

Фурье-анализ изображений. При попадании в поле зрения человека нового объекта, его зрительный образ в сознании возникает весьма быстро, но потом уточняется и достраивается (иногда с исправлением ошибок первоначального восприятия (все любители сбора грибов знают, как “замирает сердце” при виде гриба, через мгновение “превращающегося” в опавший лист). Очевидно, что на более ранних стадиях эволюции отмеченное свойство было весьма полезным с точки зрения выживания.

Указанная особенность хорошо вписывается в концепцию Фурье-анализа изображений, согласно которой обработка нервной системой зрительного образа начинается с разложения описывающей распределение интенсивности на сетчатке глаза функции I(x,y) в пространственный ряд Фурье, Его дальнейший анализ начинается с наиболее медленных пространственных гармоник и состоит в сравнении их амплитуд с “хранящейся в памяти библиотекой образов”. По результатам анализа сравнительно небольшого числа гармоник делается предварительный вывод об объекте, который впоследствии уточняется в результате анализа высших составляющих. Наряду с “волновой” существует и “точечная” концепция восприятия зрительных образов, согласно которой изображение воспринимается как совокупность светящихся точек.

Т.о. даже на уровне классического описания с точки зрения математики нет принципиальной разницы между корпускулярным и волновым подходами к описанию реальности. Различие состоит в выборе набора базисных функций. Правильной формулировкой вопроса к естествознанию в рассматриваемом блоке проблем, по-видимому состоит в том, существуют ли в природе реальные объекты, свойства которых близки (или даже тождественны) свойствам отдельно взятой базисной функции (гармонической или дельта-функции). Классическое естествознание отвечало на так поставленный вопрос утвердительно.