



УДК 52-34

**В.А. Лиопо, С.С. Липовецкий, С.С. Секержицкий,
В.А. Струк, А.В. Никитин**

МЕТОДЫ СТРУКТУРНОЙ ФИЗИКИ В АСТРОНОМИИ

Рассмотрен метод разбиения космического пространства на зоны влияния отдельных небесных тел с использованием структурных полиэдров Вороного. Предлагается проводить анализ взаимных конфигураций космических объектов на основе этих зон влияния не только по распределению ближайших, но и более отдаленных координаций. Метод Делоне-Галиулина дополнен методом Бриллюэна. Анализ выполнен для двухмерных распределений.

*Пути, которыми люди проникают
в суть небесных явлений, представля-
ются мне почти столь же удивитель-
ными, как и сами эти явления.*

Иоганн Кеплер (1571–1630).

Введение

Еще в сентябре 2001 года на Объединенной научной сессии Отделения общей физики и астрономии Академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации доктором физико-математических наук, профессором Р.В. Галиулиным был прочитан доклад, посвященный описанию кристаллографической модели Вселенной [1]. За прошедшее время не было ни одного серьезного возражения против этой модели, хотя определенные критические замечания (иногда конструктивные, а иногда и нет) были. Все это позволяет считать, что модель имеет право на существование.

На первый взгляд кажется странным, что кристаллография (наука, описывающая закономерности строения кристаллов) может быть применена для анализа строения мира в целом. Космос как система взаимодействующих друг с другом дискретных объектов, находящихся в пространственном континууме, как показал Р.В. Галиулин, имеет определенную аналогию с атомно-молекулярными системами, которые исследуются структурной физикой конденсированного состояния. Объектами этой науки являются различные вещества, но в наиболее полной мере методы структурной физики разработаны для кристаллов.

Симметрия кристаллов. Кристаллы – это атомно-молекулярные системы с решеточной симметрией. Это означает, что для любого направления при наличии соседних двух одинаковых структурно-физических (гомологичных) точек с расстоянием между ними равном a на концах любого отрезка вдоль этого направления длиной $A = na$ находятся гомологичные точки при любых целочисленных значениях n . Кристаллы характеризуются трехмерной трансляционной симметрией, которая в расположении космических объектов отсутствует. Но очевидно, что и для космических объектов, подчиняющихся в своем движении законам физики, существует определенная взаимная упорядоченность.

Мы полагаем, что для изучения взаиморасположения объектов при отсутствии решеточных симметрий применимы методы, используемые при анализе структур некристаллических веществ [2].



Модель Вороного-Дирихле. В начале XX века российским ученым Георгием Феодосьевичем Вороным (1868–1908) был предложен оригинальный метод разбиения пространства на многогранники вокруг находящихся в нем точек любой природы. Суть его метода проиллюстрируем двухмерным примером.

Пусть на плоскости имеется случайное распределение точек. Выберем одну из них (точка A_0 на рис. 1) и соединим ее с соседними точками A_1, A_2, \dots, A_6 . Через середины этих отрезков проведем перпендикулярные им прямые. Пересечение этих нормалей приводит к построению многоугольника (полигона), который и называется полигоном Вороного. Затем аналогичное построение выполняется для точек A_1, A_2 и так далее. Вся плоскость будет разделена на полигоны Вороного.

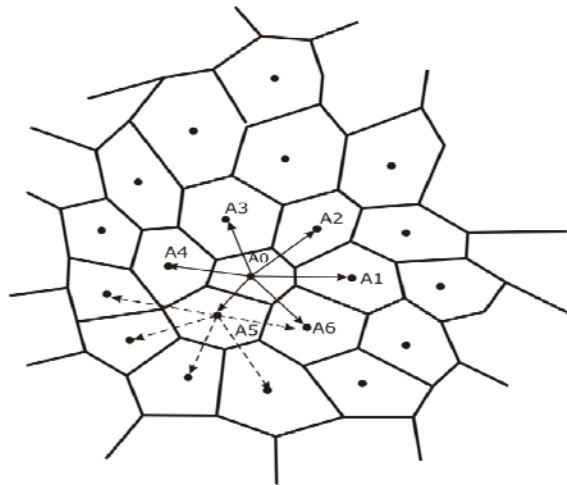


Рисунок 1 – Построение полигонов Вороного

Для пространственного распределения через середины отрезков, соединяющие точки, ближайšie к выбранной, надо проводить нормальные к этим отрезкам плоскости, которые формируют вокруг выбранной точки полиэдр (многогранник) Вороного. Аналогичные построения можно выполнить для всех точек системы. Все непрерывное пространство будет разбито на отдельные полиэдры Вороного, причем, каждый из них включает в себя строго одну точку. При случайном расположении точек полиэдры Вороного имеют различные размеры и формы. Для кристаллов будет получено регулярное чередование одного или нескольких типов полиэдров (рис. 2). Ячейки Вороного (полигоны или полиэдры) для кристалла называются ячейками Вигнера-Зейца.

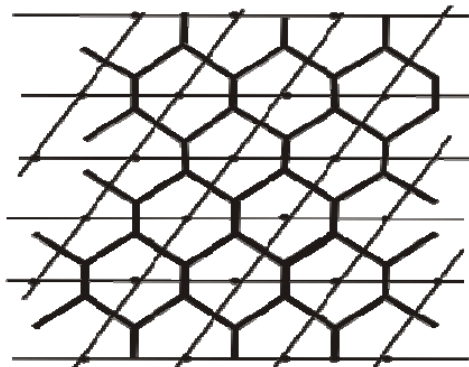


Рисунок 2 – Ячейки Вороного для кристалла
(ячейки Вигнера-Зейца)



Описанную методику разбиения пространства в физическую парадигму ввел Вороной, но идея такого разбиения была высказана ранее математиком Дирихле, поэтому часто используют термин «метод Вороного-Дирихле».

Модель Делоне. Метод Вороного-Дирихле является чисто геометрическим методом, позволяющим «разбить» пространство на своеобразные зоны влияния, расположенных в этом пространстве точек. Для анализа взаимных конфигураций атомов в веществе метод Вороного необходимо расширить, включив в него дополнительные требования. Эта задача была решена выдающимся советским математиком Борисом Николаевичем Делоне [3].

Его метод, названный позднее методом пустого шара Делоне, рассматривает систему точек, удовлетворяющую двум требованиям:

1. В системе Делоне пространство заполнено точками, с определенными промежутками между ними (r). Это свойство названо r -дискретностью.

2. Существует сфера радиуса R , такая, что при построении ее вокруг всех точек системы Делоне пространство будет заполнено без пропусков. Очевидно, при этом возможно перекрывание сфер радиуса R , который отражает так называемую R – однородность. Радиус R называется радиусом сферы однородности. Очевидно, что $R \geq r$

Эти сферы могут быть построены не только для твердых тел, в которых атомы можно рассматривать как неподвижные, но и для жидкостей и даже для газов. В газах и жидкостях система Делоне носит динамический характер, что дает возможность говорить о своеобразном газе Делоне. Метод Делоне получил в настоящее время широкое признание, так как позволяет строить многогранники, заполняющие пространство без пропуска. Этот метод является очень продуктивным для физики конденсированных сред. В частности для любых атомно-молекулярных систем он позволяет выбрать репрезентативный объем для получения численных экспериментальных или теоретических значений соответствующих параметров [4].

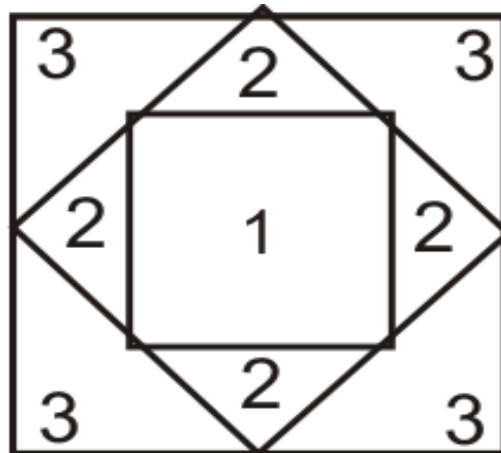
Осуществить разбиение пространства можно как методом Вороного, так и на основе метода Делоне. При этом применима следующая модель. Каждая точка в двумерном случае является центром окружности (в трехмерном – сферы) малого радиуса, которую можно раздувать. Окружность будет сохранять свою форму до тех пор, пока не станет касаться другой окружности, раздуваемой вокруг другой точки. При дальнейшем раздувании окружности они преобразуются в полигоны, сферы – в полиэдры. Плоскость будет заполнена полигонами, при этом возникнет либо газ Делоне (рисунок 1), либо правильная система Делоне (рисунок 2), которые соответствуют случайному или регулярному распределению точек. Принципиальное различие методов Делоне и Вороного в том, что в методе Вороного рассматривается только геометрическое распределение точек, тогда как в методе Делоне можно учесть их физическую природу. Для иллюстрации приведем пример ионного кристалла (A^+B^-). Анионы (B^-), как правило, имеют большие размеры, поэтому правильная система Делоне строится для них. Сферы раздуваются вокруг анионов до тех пор, пока они не станут касаться друг друга. Затем создается правильная система раздуванием сфер вокруг катионов до тех пор, пока полиэдрами Делоне не будет заполнено все пространство. Эту модель можно видоизменить, придав сферам различные коэффициенты растяжения в зависимости от сорта атома. Метод Делоне является развитием метода Вороного, так как отражает не только расположение точек, но и их физические особенности. Если полиэдры Делоне будут строиться для небесных тел, то коэффициенты растяжения шаров Делоне должны быть тем меньше, чем больше масса небесного тела.



Геометрические модели вселенной. Еще в глубокой древности люди пытались понять природу мира, отыскивая во взаиморасположении и в движении небесных тел геометрические соотношения.

Увидеть единство в движении небесных тел пытались многие мыслители средневековья. Особенно эти тенденции усилились после появления в 1543 году работы Николая Коперника «Об обращении небесных сфер». Общая теория движения космических объектов заложена в 1714 году Исааком Ньютоном в его «Математических началах натуральной философии». Но еще до Ньютона Иоганн Кеплер сделал попытку придать солнечной системе геометрическую завершенность. При этом он исходил из странной, с современной точки зрения, идеи о связи между числом планет, равным шести, и числом правильных многогранников, называемых платоновыми телами и сферой [2]. Таких многогранников пять: тетраэдр, гексаэдр (куб), октаэдр, додекаэдр и икосаэдр. По сути дела, это было предположение о геометрическом принципе взаиморасположения планет в соответствии с симметрией правильных многогранников, или, выражаясь современным языком, в соответствии с кристаллографической симметрией. Дальнейшее развитие астрономии показало, что идея Кеплера неверна, так как планет больше пяти, но его третий закон справедлив до сих пор, так как лег в основу теории Ньютона.

Ячейки Вигнера-Зейца. Указанные ранее методы построения полигонов для двумерных распределений объектов различного типа позволяют с большей наглядностью анализировать взаимное расположение (или взаимную конфигурацию) этих объектов по сравнению с обычным координатным методом. Эти полиэдры могут описать изменение взаимной конфигурации объекта в динамической системе относительно ближайших соседей. Но аналогичное построение можно провести и для последующих конфигураций. В этом случае после построения полигона Вороного или Делоне следует повторить процедуру построения полигона для объектов ближайших к соседям рассматриваемого объекта. Этот метод широко используется в физике кристаллов. Строятся такие полигоны в обратной решетке (или в пространстве волнового вектора) относительно начала координат обратного пространства и известны под названием зон Бриллюэна [5]. Принцип построения зон Бриллюэна приведен на рисунке 3 для простейшего случая – тетрагональной плоской сетки.



1 – первая зона; 2 – вторая зона; 3 – третья зона

Рисунок 3 – Принцип построения зон Бриллюэна

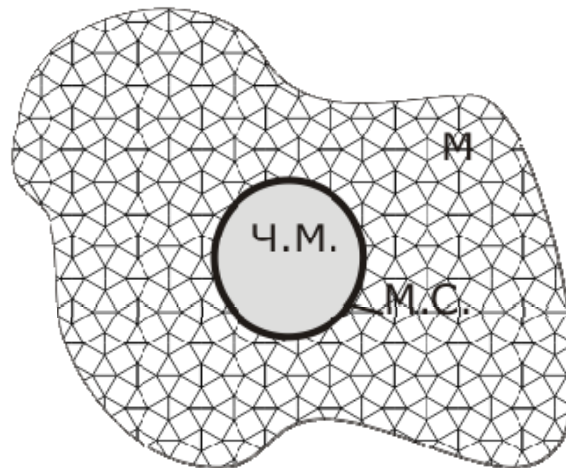


В этом примере ячейка Вигнера-Зейца с порядком n находится внутри ячейки с порядком $N > n$. Для более сложной сетки ячейки разных порядков могут перекрываться или не иметь общих точек.

Очевидно, что для регулярных сеток (плоских решеток) зоны Бриллюэна, построенные для разных узлов решетки, будут совершенно одинаковыми, так как в решетке имеется трансляция.

Композиционные материалы. Композиционные материалы или композиты в предыдущем столетии вызывали активный интерес у специалистов в областях физики конденсированного состояния. Эти вещества в зависимости от их компонентов меняли свойства с учетом их применения. Структуру композита можно описать следующей моделью.

Любой композит создается на основе определенного материала (например, полимера, цементного раствора, глины и т.п.), который так и называется основа, либо связующая матрица. В это связующее вещество вносятся частицы другого вещества, называемого наполнителем. Частицы наполнителя могут представлять собой смесь различных веществ, одни из которых влияют, например, на твердость, другие – на трибологические свойства поверхности, третьи – на цвет и т.д. Частица наполнителя влияет на взаимную конфигурацию и структурно-энергетические свойства молекул основы.



М-матрица основы; Ч.Н. – частица наполнителя;
М.С. – модифицированный слой

Рисунок 4 – Фрагмент композита

Наполнитель изменяет (модифицирует) физические (и технологические) характеристики вещества основы. Частицы наполнителя-модификатора создают вокруг себя модифицированный слой, влияющий на свойства композита, которые могут существенно отличаться от аналогичных свойств основы.

Космическая модель Делоне-Галиулина. Вернемся к модели Делоне-Вороного и рассмотрим ее применимость для распределения космических объектов. Планеты, кометы, звезды галактики можно рассматривать как совокупность точек, заполняющих пространство Вселенной. Либо в качестве таких точек могут быть взяты сложные объекты: планетные системы, звездные скопления, галактики и др.



Следовательно, распределение космических объектов во Вселенной подобно распределению частиц наполнителя в непрерывной (континуальной) матрице основы. В наиболее выраженной форме сходство распределения космических тел с распределением точек подчеркнул Р.В. Галиулин. Он же впервые указал на возможность применения кристаллографических методов при исследовании Вселенной. Как и в «классических» композитах космос является континуальной основой. Космические объекты, как и частицы наполнителя, являются дисконтинуальной субстанцией. Причем все они, обладая массой, существенно влияют на свойства матрицы, изменяя характеристики пространства, создавая гравитационные поля. Пространство перестает быть прямым, а становится искривленным. Если в свободном космосе пространство однородно и изотропно, то есть на объект с массой m внешние силы не действуют, то в «модифицированном» космическом слое вокруг объекта с массой M на объект с массой m будет действовать сила

$$F_M^m = \gamma \frac{mM}{r^2}, \quad (1)$$

где r – расстояние между центрами масс рассматриваемых объектов, γ – гравитационная постоянная.

Итак, звездное небо можно представить как поверхность, на которой распределены точки, соответствующие определенным объектам. Для этих точек можно построить распределение полигонов Вороного-Делоне. Следовательно, будет получен космический газ Делоне. В отличие от привычного нам газа, в этом газе изменения носят не случайный характер, а подчиняются законам движения небесных тел. При анализе в динамической системе полигонов газа Вороного-Делоне будет наблюдаться определенная закономерность, а значит симметрия. Если в качестве отдельных точек взять более крупные космические объекты, например звездные системы или галактики, то взаимное расположение этих точек будет меняться в значительно меньшей степени, чем взаиморасположение планет. Но в обоих случаях эти системы точек являются устойчивыми. Для звездных систем эта устойчивость взаиморасположения статическая, а внутри этих космических объектов она является динамической.

Суммарная действующая сила для большинства космических объектов равна нулю. В противном случае Вселенная была бы неустойчивой и за миллиарды лет ее существования давно бы произошла релаксация. Распределение объектов Вселенной соответствует распределению атомов в силовом поле вещества, в котором атомы находятся именно в условиях равенства нулю всех действующих на них сил.

Применив метод Вороного для разбиения небесного свода на ячейки влияния отдельных объектов, как это предложил Р.В. Галиулин, можно исследовать динамику процессов на основе анализа газа Делоне. Мы полагаем, что этот метод может оказаться более продуктивным при исследовании отдельных объектов, то есть при анализе изменений его полигона влияния. Ячейка отдельного объекта строится с учетом характеристик соседних точек, между которыми проводится граница. Если расстояние между объектами равно R (рисунок 5), а их массы равны m и M , то границу раздела определяет та часть пространства, которая находится под влиянием соответствующей точки. На рисунке 5 граница раздела соответствует точке на прямой, соединяющей центры масс m и M при выполнении условия:



$$\frac{m}{x^2} = \frac{M}{(R-x)^2}, \quad (2)$$

где R – расстояние между центрами масс, x – расстояние до границы ячейки от центра меньшей массы.

То есть

$$x = R \left(1 + \sqrt{\frac{M}{m}} \right)^{-1}. \quad (3)$$

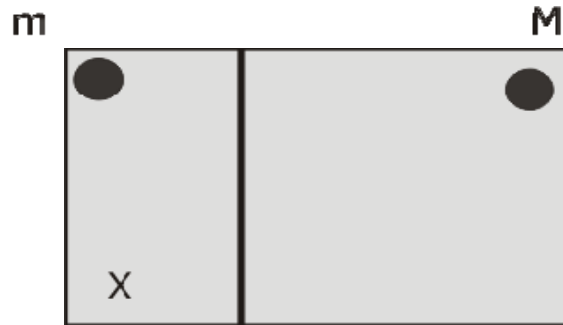
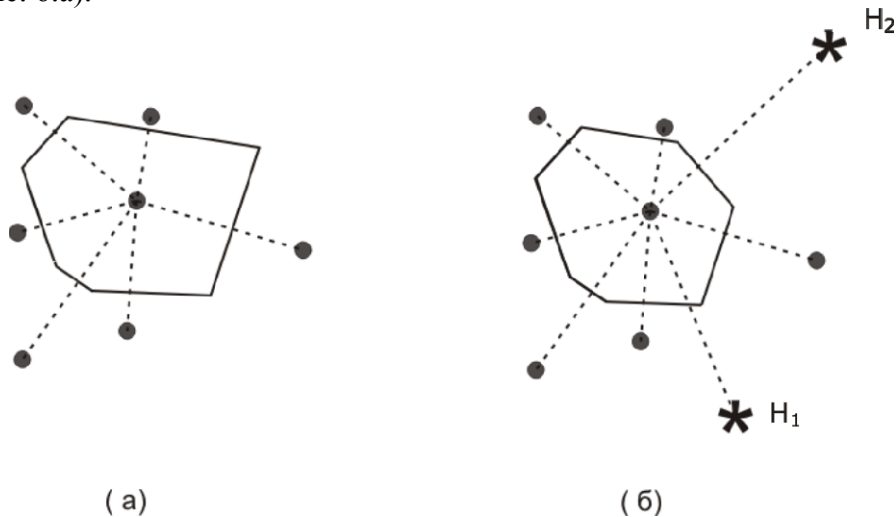


Рисунок 5 – Положение границы раздела в зависимости от масс m и M

Следовательно, на расстояниях до m , удовлетворяющих условию $r < x$, пространство «модифицировано» массой m , при $r - x$ – массой M . Рассмотрев ближайшие к m соседние точки и учитывая их массы, получим ячейку, «модифицированную» массой m (рис. 6.а).



(а)

(б)

(H) с большой массой: а – учет ближайших соседей;

б – учет ближайших соседей и более удаленных с большей массой объектов

Рисунок 6 – Иллюстрация влияния на форму полигона массы m более удаленных объектов

Однако, если имеются более удаленные объекты с большой массой H_1 и H_2 на рис. 6.б), то они могут изменить «ячейку влияния» массы m . Если анализируются



положения объектов именно как положения точек, то изменения их взаимного расположения будут менее наглядными по сравнению с анализом изменения формы полигона, который учитывает не только влияние соседей ближайшей конфигурации, но и объектов более удаленных. При этом надо учитывать следующее:

Во-первых, методика влияния ячейки отдельного объекта является чисто геометрической, так как позволяет увидеть происходят ли изменения конфигурации выбранного объекта относительно других объектов.

Во-вторых, границу x (см. (3)) можно взять в другой форме, например:

$$x = R \left(1 + \frac{M}{m} \right)^{-1}. \quad (4)$$

В-третьих, наряду с массами объектов, которые зачастую трудно определить, для построения границ ячеек влияния данного объекта можно использовать и другие характеристики объектов, например, их яркость (S). В этом случае расстояние от анализируемой точки до границы ее зоны (x) может быть определено условием:

$$x = R \left(1 + \frac{S_2}{S_1} \right)^{-1}. \quad (5)$$

И последнее, но очень важное обстоятельство, связано с тем, что расстояние от точки наблюдения до исследуемых объектов различно, хотя в указанной методике полагается, что все эти объекты находятся на поверхности небесной сферы. Описанная методика дает возможность установить, происходят ли изменения конфигурации изучаемого объекта относительно других.

Заключение

При исследовании систем, которые можно представить как распределение дискретных объектов в непрерывной среде с учетом, что эти объекты влияют на эту среду, изменяя ее свойства, используется метод Вороного-Делоне. В обоих случаях вокруг отдельного объекта строится полиэдр, в трехмерном пространстве или полигон на поверхности распределения объектов. Эти методы позволяют в рассматриваемом пространстве выделить область влияния случайного объекта на свойства этого пространства. Например, в композитах найти область влияния частицы модификатора на вещество основы композита. Для космических объектов эта область определяет часть пространства, где вектор напряженности гравитационного поля направлен в сторону анализируемого объекта. Вместо массы можно учесть другие параметры, например, яркость объекта.

Предлагаемая методика позволяет получить информацию об изменении взаимной конфигурации объектов с более высокой чувствительностью по сравнению с координатным методом.

Сведения, полученные об особенностях изменений взаимной конфигурации объектов, являются обоснованием для проведения дополнительных исследований по выявлению причин этих изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиулин, Р.В. Кристаллографическая модель Вселенной / Р.В. Галиулин // УФН, 2002. – Т. 172. – № 2. – С.229–233.
2. Галиулин, Р.В. Кристаллографическая картина мира / Р.В. Галиулин, В.А.Лиопо // Альфа, 2003. – № 1. – С.3–11.



3. Скворцов, А.В. Триангуляция Делоне и ее применение / А.В. Скворцов. – Томск : Изд. Томс. гос. ун-т, 2002. – 146 с.
4. Лиопо, В.А. Термодинамика в материаловедении / В.А. Лиопо, В.А. Струк. – Гродно : Изд. ГрГУ, 1999. – 117 с.
5. Ашкроф, Н. Физика твердого тела / Н. Ашкроф, Н. Мермин. – М. :МИР, 1979. – Т. 2. – 422 с.

V.A. Liopo, S.S. Lipavetski, S.S. Sekerzhitsky, V.A. Struk, A.V. Nikitin. Structural Physical Methods in Astronomy

The method of partitioning space into zones of influence of individual celestial bodies with the use of structural Voronoi polyhedra is considered. It is proposed to analyze the mutual configurations of space objects based on these zones of influence not only on the distribution of the nearest, but more distant coordination. The method of Delaunay-Galiulin is supplemented by Brillouin scattering. The analysis is performed for two-dimensional distributions.

Рукапіс паступіў у рэдкалегію 19.05.2011 г.