

# Современное модельное описание магнетизма

В.Ю. Ирхин

## Аннотация

Проведено сопоставление основополагающих работ С. В. Вонсовского по многоэлектронным полярной и  $s - d(f)$  обменной моделям с последующим развитием теории магнетизма переходных и редкоземельных металлов, а также их соединений. Особый упор делается на вывод различных многоэлектронных моделей (Гейзенберга, Хаббарда, Андерсона), а также соотношения и внутреннюю связь между ними. Среди тем, рассмотренных в обзоре, - многоэлектронные подходы при описании систем  $d$ - и  $f$ -электронов, атомное представление  $X$ -операторов, проблема сильного коллективизированного магнетизма и формирования локальных моментов, роль неквазичастичных (некогерентных состояний). Обсуждается применение этих концепций к сильнокоррелированным системам, в частности, к полуметаллическим ферромагнетикам и решеткам Кондо.

## 1. Введение

## 2. Полярная модель и модель Хаббарда.

### 2.1 Атомное представление и метод многоэлектронных операторов

### 2.2 Электронный спектр в модели Хаббарда и переход металл-изолятор

### 2.3 Ферромагнетизм сильно коррелированных $d$ -систем

## 3. $s - d(f)$ -обменная модель и модель Андерсона

### 3.1 Электронные состояния в $s - d$ обменной модели

### 3.2 $s-d$ обменная модель с узкими зонами и $t-J$ модель

### 3.3 Сопротивление магнитных переходных металлов

### 3.4 $s - f$ -обменная модель и свойства редкоземельных металлов

### 3.5 Эффект Кондо

### 3.6 Свойства аномальных $f$ -соединений

## Заключение

# 1 Введение

Проблема двойственной природы электронных состояний в кристалле, проявляющих как зонные, так и атомные черты, — до сих пор одна из центральных в физике твердого тела. Особенно существенна эта проблема для описания поведения  $d$ -электронов. В частности, именно в переходных металлах, их сплавах и соединениях наблюдается столь важное явление сильного магнетизма, обусловленное формированием локальных магнитных моментов вследствие межэлектронного взаимодействия.

Уже в 20-30-е годы XX века были достигнуты первые успехи теории металлов в рамках новой квантовой механики — после открытия статистики Ферми. В рамках приближения свободных электронов, а затем одноэлектронной зонной теории — в работах Паули, Блоха, Вильсона, Пайерлса, Зоммерфельда — было дано объяснение парамагнетизма, поведения теплоемкости и кинетических свойств [1]. Однако для описания ферромагнетизма и ряда других явлений (например, перехода металл-изолятор) эти представления оказались недостаточными. С другой стороны, попытки использовать для магнитных металлов модель Дирака-Гейзенберга, основанную на атомной картине локализованных спинов, также не дали хороших результатов (в частности, она была не в состоянии объяснить дробные значения магнитных моментов). Таким образом, потребовался определенный синтез модели Гейзенберга и одноэлектронной зонной модели.

В 1934 г. была предложена полярная модель Шубина и Вонсовского [2], а в 1946 г. —  $s$  —  $d$ -обменная модель [3, 4]. Обе эти модели сыграли исключительно важную роль в теоретическом описании  $d$ - и  $f$ -металлов и их соединений.

Работы Шубина и Вонсовского по полярной модели [2] были опубликованы в престижном английском журнале Proc. Roy. Soc. и (в более подробном изложении) в харьковском журнале Phys. Zs. UdSSR, выходившем на немецком языке; их русский перевод можно найти в книге [5]. В этих статьях была намечена программа на много лет вперед, которая полностью не выполнена до сих пор: построение систематической теории металлов, позволяющей рассматривать их электрические и магнитные свойства одновременно, и выбор подходящей системы приближений.

Настоящий обзор посвящен эволюции идей многоэлектронных моделей, которые были заложены и развиты в работах С.В. Вонсовского, его коллег и учеников.

Мы ограничимся модельными аспектами теории металлов, хотя в настоящее время широко используются как первопринципные зонные расчеты, так и попытки их комбинации с многоэлектронными моделями (что позволяет значительно улучшить учет корреляционных эффектов). Изложение будет придерживаться