

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**70 лет Институту земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)**

Научная сессия

*Отделения физических наук Российской академии наук,
25 ноября 2009 г.*

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005e.0509

25 ноября 2009 г. в конференц-зале Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) (г. Троицк, Московская обл.) состоялась Научная сессия Отделения физических наук РАН, посвящённая 70-летию ИЗМИРАН.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.gpad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. Гуревич А.В. (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Роль космических лучей и пробоя на убегающих электронах в атмосферно-грозовых разрядах.*

2. Александров Е.Б. (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург). *Прогресс в квантовой магнитометрии для геомагнитных исследований.*

3. Дорман Л.И. (ИЗМИРАН, г. Троицк, Московская обл., CR & SWC, Израиль). *Вариации космических лучей и космическая погода.*

4. Мареев Е.А. (Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород). *Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи.*

5. Терещенко Е.Д., Сафаргалеев В.В. (Полярный геофизический институт, Кольский научный центр РАН, Мурманск). *Состояние и перспективы геофизических исследований на архипелаге Шпицберген.*

6. Гуляев Ю.В., Арманд Н.А., Ефимов А.И., Матюгов С.С., Павельев А.Г., Савич Н.А., Самознаев Л.Н., Смирнов В.М., Яковлев О.И. (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, г. Фрязино, Московская обл.). *Результаты исследований солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами.*

7. Куницын В.Е. (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва). *Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы.*

8. Кузнецов В.Д. (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Московская обл.). *Космические исследования ИЗМИРАН.*

Статьи, написанные на основе докладов 2–8, публикуются ниже. Основное содержание доклада 1 отражено в обзоре А.В. Гуревича "Нелинейные явления в ионосфере" [УФН 177 1145 (2007)] и статье А.В. Гуревича и др. "Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые разряды" [УФН 179 779 (2009)].

PACS numbers: 07.55.Ge, 91.25.G-, 93.85.Jk
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005f.0509

**Прогресс в квантовой магнитометрии
для геомагнитных исследований**

Е.Б. Александров

Прецизионные измерения слабых магнитных полей составляют быстро развивающийся раздел метрологии, находящий множество применений как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. К первым относятся многочисленные исследования в области фундаментальной физики, геофизики, геологии, космофизики, аэрономии и т.д. (рис. 1).

Самым ярким примером таких исследований в области фундаментальной физики последних лет являются эксперименты по поиску нарушения фундаментальных законов симметрии, в частности по поиску постоянного электродипольного момента нейтрона, точность которых всецело зависит от точности измерения и стабилизации магнитного поля.

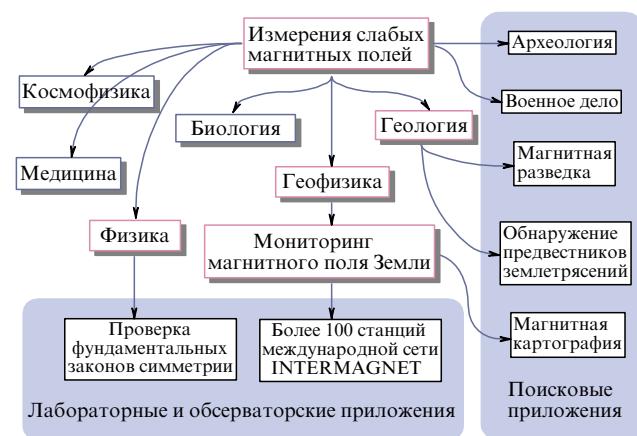


Рис. 1. Основные приложения квантовой магнитометрии.

Е.Б. Александров. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ
E-mail: ealexandrov@bk.ru

Однако наиболее интенсивно магнитометрические методы применяются в геофизике, где изучение изменений магнитного поля Земли (МПЗ) от миллисекундных колебаний до вековых вариаций позволяет получить информацию об эволюции, строении и современном состоянии Земли. Поэтому векторные измерения вариаций МПЗ являются необходимой составляющей геофизических исследований. В частности, наблюдения за состоянием компонент векторного МПЗ уже более 150 лет проводят обсерватории Института земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) и геомагнитные станции, которых на территории РФ, СНГ и в российском секторе Антарктиды насчитывается около 40.

Мониторинг магнитного поля Земли постоянно осуществляется несколькими международными сетями обсерваторий. Общее число геомагнитных станций в мире — более 200 в 70 странах, в частности в сети INTER-MAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network) имеется более ста автоматизированных магнитометрических станций, расположенных в нескольких десятках стран мира, в сети SAMNET (Sub-Auroral Magnetometer Network) — более 20 станций, в сети IMAGE (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects) — 29 станций и т.д. В последние десятилетия в связи с развитием сейсмологии и перемещением значительной части средств в область исследований, направленных на предотвращение чрезвычайных ситуаций, в том числе землетрясений, происходит бурный рост числа геофизических обсерваторий в сейсмоопасных зонах, таких как западное побережье США и Юго-Восточная Азия, причём приборная база этих измерений непрерывно совершенствуется.

Данные магнитометрических обсерваторий, наряду с данными, полученными с помощью квантовых магнитометров, устанавливаемых начиная с 1964 г. на искусственных спутниках Земли и исследовательских космических аппаратах, являются одним из основных источников наших знаний как о внутреннем строении Земли и происходящих в ней процессах, так и о процессах взаимодействия солнечного излучения с атмосферой и магнитосферой Земли.

Прикладные применения магнитометрии прежде всего связаны с разнообразными задачами навигации и магнитной разведки, в том числе с прецизионным магнитным картированием в целях поиска всевозможных полезных ископаемых, как магнитных, так и немагнитных. Например, поиск подводных нефтяных месторождений магнитометрическими средствами основан на том факте, что нефтесодержащие осадочные породы обладают существенно более слабыми, чем прочие геологические образования магнитными свойствами. Магнитное картирование широко применяется и в археологии для поиска и датирования древних артефактов, и в военном деле — для обнаружения скрытых под водой и под землёй объектов военной техники и боеприпасов. Прецизионные измерения магнитного поля в сейсмических районах в последние десятилетия всё чаще привлекаются для обнаружения предвестников землетрясений. Всё большее значение приобретают магнитные измерения в медицине и биологии.

Высокие требования, предъявляемые к точности и чувствительности методов магнитных измерений, как правило, определяются тем фактом, что магнитные

поля исследуемых или искомых объектов должны изменяться на фоне МПЗ, нередко превосходящего их на пять и более порядков величины. Выделение таких сигналов требует повышения точности и чувствительности магнитометрических средств до уровня $10^{-7} - 10^{-9}$, что, конечно, вряд ли было бы возможным без привлечения средств атомной и ядерной спектроскопии, позволяющей привязывать измерения магнитного поля непосредственно к значениям атомных констант. В этом квантовая магнитометрия очень близка к другой отрасли метрологии — метрологии времени. Различие между современными квантовыми магнитометрами и квантовыми стандартами частоты состоит лишь в том, что принцип работы первых основан на измерении частот магнитозависимых переходов, а вторых — на измерении частот магнитонезависимых переходов в тех же самых атомных структурах. И действительно, относительный уровень точности, достигаемый благодаря использованию квантовых магнитометров в метрологии слабых магнитных полей, уступает только уровню точности, с которой осуществляется измерение частоты (времени).

1. Квантовая магнитометрия: краткая история и сегодняшнее состояние

Магнитометрия как область точных исследований начиналась с создания и использования классических устройств для измерения магнитного поля, регистрирующих воздействие поля на постоянные магниты, движущиеся заряды и т.д. Как правило, эти устройства характеризуются сильными дрейфами и не позволяют совместить *высокую вариационную чувствительность* (т.е. способность регистрировать малое приращение измеряемой величины) и абсолютность измерений, под которой понимается возможность производить измерение, опираясь только на фундаментальные и атомные константы.

Предпосылки для создания квантовой магнитометрии появились в 1896 г., когда П. Зееман обнаружил эффект расщепления спектральных линий в магнитном поле. В 1930-е годы Раби провёл ряд работ по измерению ядерного магнитного момента [1]. Рождение квантовой магнитометрии произошло в 1940-х годах, когда Р. Блох [2], а также Вариан и Паккард [3] предложили идею измерения магнитного поля по частоте свободной прецессии магнитного момента протона. Так были созданы *протонные магнитометры* — первые устройства для измерения магнитного поля, характеризующиеся свойствами абсолютности.

С этого времени магнитометры делятся на классические и квантовые (рис. 2); квантовые магнитометры бывают двух основных типов: приборы со сверхпроводящими датчиками, так называемые СКВИДы (от англ. SQUID, Superconducting Quantum Interference Device), о которых здесь речь идти не будет, и устройства, так или иначе использующие эффект Зеемана в атомной структуре. Среди этих устройств наилучшими характеристиками обладают квантовые магнитометры с оптической накачкой (КМОН), реализованные на разных, преимущественно щелочных, атомах.

При многих достоинствах протонных магнитометров три их основных недостатка ограничивали круг их применения, именно: циклический характер работы, не допускающий непрерывного измерения поля; очень малая величина статической ядерной восприимчивости;

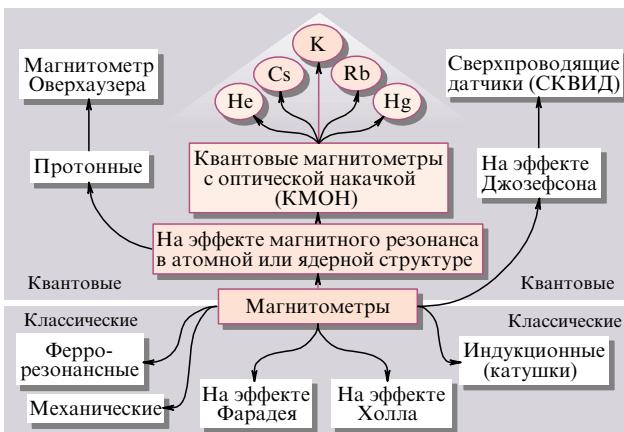


Рис. 2. Классификация основных типов магнитометрических устройств.

сравнительно низкая частота прецессии протонов, для точного измерения которой требуется не менее нескольких десятых долей секунды.

Второй из этих недостатков был в значительной мере преодолён благодаря работам [4–6], продемонстрировавшим возможность более чем тысячекратного увеличения степени поляризации протонного спина, а следовательно, и сигнала протонного магнитометра с помощью метода динамической поляризации ядер. Основанный на этом принципе магнитометр получил название "магнитометр Оверхаузера".

Начало радиооптическим квантовым методам измерения магнитного поля положили два события, произошедших практически одновременно в середине XX в.:

1) изобретение Ф. Биттером *оптического детектирования* магнитного резонанса [7], позволяющего реализовать чувствительность детектирования, на несколько порядков большую по сравнению с таковой прямого электромагнитного метода;

2) открытие А. Кастрлером [8, 9] *оптической накачки* — эффекта, благодаря которому при облучении атомов резонансным светом с определённой поляризацией можно получить чрезвычайно высокую степень ориентации магнитного момента.

Эти события спровоцировали бурное развитие квантовой магнитометрии, приведшее к созданию семейства квантовых магнитометров с оптической накачкой и оптическим детектированием магнитного резонанса, позволивших добиться необычайно высоких абсолютной точности и чувствительности измерения магнитного поля [10–14]. Не имея себе равных по абсолютной точности, по вариационной чувствительности квантовые магнитометры могут превосходить даже магнитометры на основе сверхпроводящих квантовых датчиков — СКВИДов [15]; впрочем, конкуренция между этими двумя классами устройств, скорее, номинальная — слишком сильно различаются физические принципы их действия и, как следствие, области их применения. Квантовые магнитометры являются измерителями абсолютной напряжённости магнитного поля, а магнитометры со сверхпроводящими датчиками — измерителями приращения магнитного потока, проходящего через сверхпроводящий контур.

Благодаря сверхмалым размерам датчиков и высокой чувствительности СКВИДы заняли прочные пози-

ции в биологии и медицине; однако в геологии и геофизике, а также космофизике они практически не находят применения. В дальнейшем, во избежание путаницы, под квантовыми магнитометрами мы будем подразумевать исключительно устройства с оптической накачкой, исключив тем самым из рассмотрения протонные магнитометры и СКВИДы.

1.1. Классификация квантовых магнитометров

Квантовые магнитометры можно классифицировать по характеру парамагнетизма рабочего вещества (электронный или ядерный), типу используемого атомного перехода (зеемановский, сверхтонкий, многофотонный и т.д.); способу возбуждения магнитного резонанса; способу детектирования магнитного резонанса (регистрация изменения населённостей магнитных подуровней — M_z -магнитометр, регистрация сигнала когерентности атомных состояний — M_x -магнитометр). Кроме того, в последние десятилетия появилось много модификаций идеи квантового магнитометра, выходящих за рамки основной классификации.

На рисунке 3 показана примерная классификация модульных магнитометрических устройств по основным метрологическим параметрам — кратковременной чувствительности, точности и быстродействию. Представленные на рисунке резонансные магнитометры — это цезиевый (Cs) и калиевый (K) M_x -магнитометр, калиевый (K-СТС) M_z -магнитометр на сверхтонкой структуре, ядерный гелиевый (^3He) M_x -магнитометр и щёлочно-гелиевый (He-Me) M_z -магнитометр.

Стрелкой на диаграмме отмечено общее направление развития магнитометрических устройств. Следует оговориться, что данные, представленные на рис. 3, не претендуют ни на полноту, ни на полную достоверность: дело в том, что непосредственное измерение параметров прецизионных устройств невозможно в ситуациях, в которых эти параметры превосходят соответствующие параметры эталонных устройств. Кроме того, некоторые из перечисленных магнитометров измеряют вели-

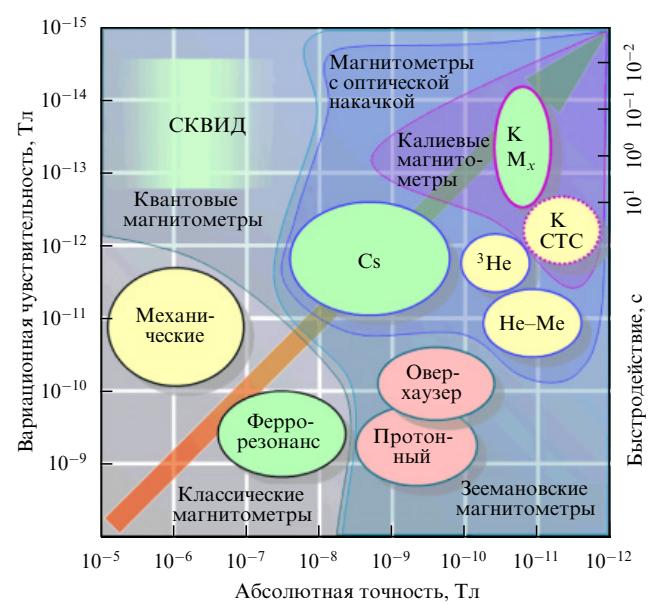


Рис. 3. Классификация магнитометрических устройств по основным метрологическим параметрам.

чины, отличные от модуля индукции магнитного поля. Данные о коммерческих магнитометрах, приводимые производителями, часто очень сильно отличаются в лучшую сторону от результатов независимых тестов, что особенно характерно для небольших частных компаний. Таким образом, рис. 3 призван дать лишь самое общее представление о состоянии дел в магнитометрии.

Квантовые датчики также применяются в схемах так называемых *векторных*, или *компонентных*, устройств, измеряющих три компоненты вектора земного магнитного поля. Принцип работы векторных магнитометров, как правило, основан на законе сложения векторов — к неизвестному вектору индукции измеряемого поля последовательно прибавляются известные векторы с различной направленностью и измеряется модуль вектора результирующего поля, таким образом вычисляется неизвестный вектор.

Квантовые магнитометры могут быть с успехом применены, не только в задачах измерения модуля и компонент вектора индукции магнитного поля, но и в задачах измерения компонент вектора *градиента* модуля магнитной индукции. В простейшей конфигурации магнитометр-градиометр состоит из двух (в расширенной конфигурации — из трёх и более) магнитометров, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга.

Возможно также построение устройств, измеряющих градиенты модуля магнитного поля второго и более высоких порядков, а также градиенты компонент вектора магнитного поля. Однако такие системы, состоящие из большого числа модульных или векторных датчиков, довольно сложны, и они применяются относительно редко (пример — упоминавшийся выше эксперимент по поиску электродипольного момента нейтрона).

Хотя квантовым измерителям магнитного поля изначально присуще свойство абсолютности измерений, в определённых случаях это свойство может в значительной мере утрачиваться из-за наличия дополнительных магнитных полей в датчике, уширения, смещения и искажения формы резонансной линии и т.д. Измерительные устройства, имеющие высокую кратковременную чувствительность, но не обладающие абсолютной точностью, относятся к классу вариометров.

В таблице проведено сравнение характеристик векторного магнитометрического комплекса на базе КМОН,

Таблица

Характеристика	Спецификация INTERMAG-NET	Магнитометрический комплекс на базе КМОН	Преимущество
Вариационная чувствительность в полосе 0,2 Гц	0,1 нТл	0,002 нТл	50 раз
Полоса частот	0,2 Гц	5 Гц	25 раз
Быстродействие	5 с	0,1 с	50 раз
Долговременная стабильность	5 нТл год ⁻¹	0,2 нТл год ⁻¹	25 раз
Точность измерений	±10 нТл	0,2 нТл	50 раз

разработанного совместно Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ) и Государственным оптическим институтом им. С.И. Вавилова (ГОИ), с характеристиками, соответствующими Спецификации международной сети магнитных обсерваторий INTERMAGNET.

Кроме того, существует классификация квантовых магнитометров по условиям их эксплуатации — стационарные обсерваторские устройства, устройства, предназначенные для эксплуатации на подвижных носителях, носимые устройства и т.д.; по способу съёма информации — аналоговые и цифровые, по классу точности и т.д.

2. Основные физические принципы квантовой магнитометрии

2.1. Оптическая накачка

и двойной радиооптический резонанс

Протонные магнитометры, которые обеспечивают абсолютную точность измерения вплоть до ~1 нТл при разрешении до 0,1 нТл, до сих пор используются в метрологии магнитного поля и во многих магнитных обсерваториях. Однако, несмотря на очевидные достоинства этих магнитометров, их следующие недостатки требовали исправления:

- 1) циклический характер работы, не допускающий непрерывного измерения поля;
- 2) малая чувствительность, связанная с низкой магнитной восприимчивостью ядерного парамагнетика;
- 3) низкая частота прецессии протонов, ограничивающая быстродействие прибора;
- 4) линейная зависимость чувствительности от величины измеряемого поля, затрудняющая измерение слабых полей;
- 5) значительное энергопотребление, связанное с необходимостью создания сильного поля.

В значительной мере перечисленные выше недостатки были преодолены в важной модификации протонного магнитометра, использующей эффект Абрагама — Оверхаузера — эффект динамической поляризации ядер, позволивший отказаться от поляризующего поля и на 2–3 порядка повысить степень поляризации протонов.

Дальнейшее развитие идеи магнитометра на основе эффекта прецессии магнитного момента было возможно в трёх основных направлениях: 1) увеличение частоты осцилляций, позволяющее повысить как быстродействие, так и чувствительность прибора; 2) увеличение степени поляризации рабочего парамагнетика; 3) отказ от индукционного съёма сигнала прецессии. Все эти задачи были решены посредством, во-первых, перехода от ядерного парамагнетизма к электронному (с повышением гиромагнитного отношения на 2–3 порядка) и, во-вторых, применения техники оптической накачки и двойного радиооптического резонанса.

Сущность процесса оптической накачки состоит в селективном оптическом заселении магнитных и/или сверхтонких подуровней возбуждённого состояния атомов.

Пусть имеется основное состояние, включающее в себя два подуровня, 1 и 2, и возбуждённое состояние (рис. 4). Если обеспечить селективное возбуждение подуровня 1 основного состояния, то при условии, что вероятность переходов между подуровнями 1 и 2 мала по

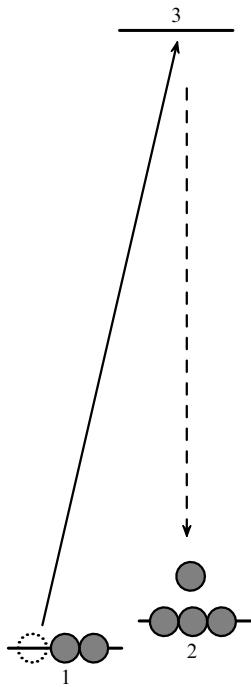


Рис. 4. Оптическая накачка в трёхуровневой системе.

сравнению с вероятностью оптического возбуждения, населённость подуровня 1 можно уменьшить за счёт увеличения населённости подуровня 2.

Оптическая накачка, приводящая к возникновению ненулевого дипольного магнитного момента в веществе, называется оптической *ориентацией*. Существуют также оптические методы создания квадрупольного магнитного момента (выстраивание) и моментов более высоких порядков. Физические основы процесса оптической накачки изложены в ряде публикаций, начиная с 1950-х годов; в первую очередь здесь следует выделить обзор [16].

Метод двойного радиооптического резонанса (ДРР) обычно используется в комбинации с оптической накачкой. Суть этого метода состоит в том, что резонансное оптическое возбуждение атомов сочетается с индуцированием радиочастотных переходов между подуровнями возбуждённого или основного состояний. При этом каждый акт поглощения (или вынужденного испускания) радиочастотного кванта сопровождается поглощением или спонтанным испусканием оптического кванта. Детектирование поглощения (испускания) в оптическом диапазоне, как правило, позволяет на много порядков увеличить чувствительность детектирования магнитного резонанса по сравнению с таковой в методах обычной радиоспектроскопии, поскольку энергия оптического кванта на много порядков превышает энергию кванта радиочастоты.

В 1949 г. А. Кацлер предложил осуществлять детектирование магнитного резонанса по изменению интенсивности и поляризации излучённого атомами света. Успех метода определялся прежде всего возможностью обеспечить низкую скорость релаксации между подуровнями 1 и 2. В своём первом эксперименте Кацлер для устранения релаксации атомов в основном состоянии применил метод атомного пучка — в пучке атомы практически не сталкиваются на всей длине траектории.

Время релаксации атомов, которое измерялось временем пролёта атомов, имело порядок 10^{-4} с.

Следующим шагом был переход к газовым ячейкам. Экспериментальным путём было обнаружено, что можно предотвратить релаксацию углового момента, вызванную столкновениями со стенками сосуда, заполняя его специальным буферным газом, который замедляет диффузию ориентированных атомов к стенке, но не разрушает ориентацию.

Сходные и даже лучшие, чем при заполнении буферным газом, результаты могут быть получены при нанесении на внутреннюю поверхность ячейки парафинового или полисилаксанового покрытия. Такие покрытия характеризуются аномально низкой энергией адсорбции щелочных атомов, в результате чего время пребывания атомов на стенке настолько мало (порядка 10^{-10} с), что не успевает произойти заметная релаксация электронных спинов.

В подавляющем большинстве радиооптических магнитометров используется техника магнитного резонанса, в которой частота перехода между магнитными подуровнями устанавливается посредством воздействия на поляризованный образец пробного монохроматического радиочастотного поля \mathbf{B}_1 . Уравнения магнитного резонанса с учётом релаксационных процессов впервые были написаны Блохом [17]. Для них может быть легко получено стационарное решение во врачающейся вокруг оси z ($z \parallel \mathbf{B}$) с частотой радиочастотного поля системе координат для трёх компонент вектора магнитного момента, которые обозначаются как M_z , v , и ($v \parallel \mathbf{B}_1$, $v \perp \mathbf{B}_1$).

Согласно уравнениям Блоха, в точном резонансе составляющей v нет, следовательно, поперечная составляющая углового момента прецессирует со сдвигом на 90° по отношению к вектору поля \mathbf{B}_1 . Поглощение энергии переменного поля системой в единице объёма определяется составляющей v , составляющая v определяет дисперсию.

В многоуровневых системах возможны многоквантовые переходы, которые также могут быть с успехом использованы в магнитометрических устройствах. Такие процессы, теоретически предсказанные [18] в 1929 г., экспериментально впервые были обнаружены именно в радиодиапазоне, где гораздо легче достичь необходимых спектральных плотностей мощности излучения электромагнитного поля [19].

С недавнего времени многоквантовые резонансы находят всё более широкое применение в квантовой магнитометрии — в первую очередь, это 1) многоквантовые переходы высшего ($n - 1$) порядка, связывающие между собой систему из n квазивидистантных зеемановских уровней одного сверхтонкого состояния, и 2) так называемая *Л-схема* (см. рис. 4), в которой два нижних уровня 1 и 2, связываются с общим возбуждённым уровнем 3 двумя когерентными волнами, разность частот которых соответствует расстоянию между нижними уровнями. В условиях резонанса уровни 1 и 2 оказываются связанными друг с другом двухквантовым переходом и между ними возникает когерентность без заселения промежуточного уровня 3. Это явление известно под многими названиями, среди которых наиболее часто употребляются *тёмный резонанс* [20], *эффект когерентного пленения населённости* [21] и *электромагнитно-индукционная прозрачность* [22].

3. Квантовые магнитометры с оптической накачкой

3.1. Виды сигналов магнитного резонанса и основные разновидности квантовых магнитометров

В технике магнитного резонанса используют два вида наблюдаемых величин, пропорциональных мнимой и действительной составляющим магнитной восприимчивости. Соответственно различают два типа сигнала магнитного резонанса, связанные с наблюдением 1) продольной компоненты магнитного момента, т.е. постоянной намагниченности (M_z -сигнал), и 2) его поперечной компоненты, описываемой переменными u и v (M_x -сигнал).

В случае M_z -сигнала для привязки к центру резонансной линии необходимо вводить низкочастотную модуляцию расстройки и применять стандартную технику синхронного детектирования для определения расстройки частоты $\Delta\omega$.

В случае M_x -сигнала можно отдельно фиксировать компоненты v и u ; в частности можно выделить сигнал, пропорциональный u , контур которого как функция от $\Delta\omega$ имеет дисперсионную форму. Именно эта форма сигнала наиболее удобна при использовании резонанса в качестве дискриминатора частоты: в точном резонансе сигнал равен нулю, а при расстройке знак сигнала несёт информацию о её знаке. Однако при этом требуется тщательный контроль за фазой всего сигнального тракта. Соответственно по способу детектирования магнитного резонанса магнитометры делятся на:

1) относительно медленные, но, как правило, более точные M_z -магнитометры;

2) быстродействующие M_x -магнитометры.

Во всех коммерческих радиооптических магнитометрах в качестве рабочего вещества используются электронные параметрики — атомы щелочных металлов (рис. 5) или метастабильные атомы ортогелия ${}^4\text{He}$ (${}^{23}\text{S}_1$). Наиболее распространены магнитометры на парах щелочных металлов; к ним относятся исторически первый, но уже редко используемый рубидиевый магнитометр, а также существенно более популярный цезиевый и относительно новый калиевый магнитометры.

Пары всех щелочных металлов допускают эффективную оптическую ориентацию: их сильнейшие линии первого резонансного дублета попадают в удобную оптическую область — от видимого света до ближнего инфракрасного.

Обычно в КМОН используются резонансные переходы между зеемановскими подуровнями одного уровня сверхтонкой структуры (СТС); однако существуют КМОН, в которых используются переходы между зеемановскими подуровнями разных СТС-уровней (так называемые СТС-магнитометры), а также многофотонные переходы.

Все существующие к настоящему времени коммерческие магнитометры на парах щелочных металлов используют переходы радиочастотного диапазона. СТС-магнитометры в основном известны как лабораторные и опытные установки, хотя они обладают определёнными преимуществами, в частности отличаются особо высокой абсолютной точностью.

В своей основе резонансный квантовый магнитометр представляет собой радиоспектроскоп, автоматически

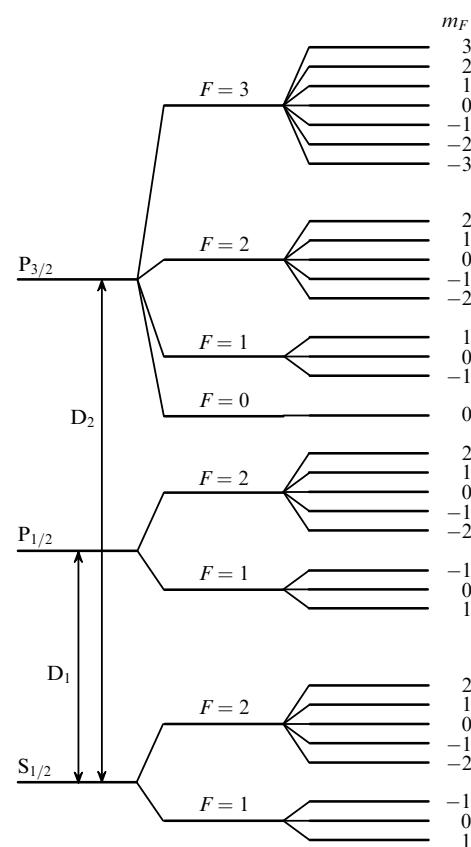


Рис. 5. Схема структуры уровней щелочного атома со спином ядра $I = 3/2$ (изотопы ${}^7\text{Li}$, ${}^{23}\text{Na}$, ${}^{39}\text{K}$, ${}^{41}\text{K}$, ${}^{87}\text{Rb}$).

подстраивающейся на центр выбранной линии магнитного резонанса, что позволяет определять напряжённость магнитного поля по частоте резонанса. В настоящее время большинство магнитометров на парах щелочных металлов строятся по M_x -схеме, поскольку этот тип магнитометра является привлекательным благодаря безынерционному отклику на изменение магнитного поля.

3.2. Основные метрологические характеристики квантовых магнитометрических устройств

Основными метрологическими характеристиками КМОН являются **точность**, **вариационная чувствительность** (или **разрешающая способность**) и **быстродействие**. Эти параметры на принципиальном уровне лимитируются параметрами магнитного резонанса, а именно: шириной резонансной линии, её симметрией, величинами параметрических сдвигов резонанса, а также отношением сигнал/шум. Модель, позволяющая в первом приближении оптимизировать чувствительность атомного дискриминатора, построена в [23].

Для квантовой метрологии атомные резонансы тем привлекательнее, чем меньшей шириной они обладают. Однако узкий резонанс порождает трудности, связанные с его инерционностью. Хотя M_x -схема магнитометра по быстродействию не ограничена шириной линии резонанса, однако это утверждение вполне справедливо лишь до тех пор, пока время измерения не становится существенно меньшим обратной ширины линии. С другой стороны, на больших временах измерения, которые характеризуют **точность** и **долговременную стабиль-**

нность магнитометра, преобладающими становятся разнообразные дрейфы и старения, статистически описываемые зависимостями дисперсии показаний от времени измерений $\sigma(\tau) \sim \tau^{1/2}$, $\sigma(\tau) \sim \tau$ и т.д. Важно отметить, что масштаб порождаемых всеми этими факторами ошибок пропорционален ширине резонанса G .

Кроме *вариационной чувствительности* и *быстродействия* устройств измерения магнитного поля, их важнейшей метрологической характеристикой является *абсолютная точность*, или точность, с которой значение индукции измеряемого поля может быть выражено через фундаментальные константы. Так, для резонансного магнитометра на узкой изолированной линии калия (калиевого магнитометра) предельная абсолютная точность определяется погрешностями электронного g -фактора g_j (связывающего проекцию электронного магнитного момента (выраженную в магнетонах Бора μ_B) с квантовым магнитным числом m_j , μ_B и \hbar : в типичном магнитном поле Земли предельная абсолютная точность калиевого магнитометра в принципе может составить примерно 10 пТл. И именно в калиевом магнитометре систематические погрешности измерения частоты магнитного резонанса могут также быть сведены к ~ 10 пТл — таковы характерные величины сдвигов и погрешностей измерения частоты магнитного резонанса в спектре калия.

3.3. Самогенерирующий цезиевый магнитометр

Самогенерирующий магнитометр на парах цезия в настоящее время является, наверное, самым простым и распространённым устройством из всех квантовых. Основное состояние ^{133}Cs состоит из двух сверхтонких уровней с полными угловыми моментами $F = 3$ и $F = 4$, которые в магнитном поле расщепляются соответственно на 7 и 9 подуровней. Частоты магнитного резонанса между смежными магнитными подуровнями одного сверхтонкого уровня в среднем земном поле различаются для цезия всего на ≈ 7 Гц. Поэтому множество резонансов фактически сливаются в один общий несимметричный контур шириной около 50 Гц, что в шкале магнитного поля соответствует ≈ 15 нТл. Схематически эта линия резонанса между подуровнями состояния $F = 4$ изображена для МПЗ на рис. 6.

Поскольку вклад различных парциальных резонансов в общую линию сильно зависит от интенсивности света и радиополя, от направления света накачки относительно направления постоянного поля, от плотности паров цезия и других факторов, вариации этих параметров вносят неопределенность в показания. В результате точность цезиевого магнитометра, как правило, не превышает нескольких нТл. Штриховой кривой на рис. 6

показана форма линии при изменении взаимной ориентации вектора магнитного поля и направления света накачки. Из рисунка видно, что максимальная ориентационная ошибка близка к расстоянию между крайними линиями резонансного спектра, т.е. ≈ 15 нТл в среднем земном поле.

Для борьбы с ориентационными сдвигами и дрейфами применяют ряд приёмов симметризации резонанса (многоячечные и многозонные системы [24–26]), позволяющие снизить ориентационные сдвиги до нескольких десятых долей нТл.

Цезиевый магнитометр продолжает оставаться самым простым, надёжным и широко распространённым устройством среди квантовых магнитометров, и область его применения постоянно расширяется. Это связано, в том числе, и с появлением доступных источников лазерной накачки для Cs. Пример — кардиографометр на Cs-M_x-датчиках с лазерной накачкой, демонстрирующий при размерах ячейки 20 мм чувствительность на уровне 100 фТл Гц $^{-1/2}$ [27].

3.4. Ядерный гелиевый магнитометр

В тех специальных случаях, когда быстродействия не требуется, предпочтительными могут оказаться магнитометры на парах ядерных парамагнетиков, для которых характерны очень длительные времена релаксации. В частности, оптически поляризованные ядра ^3He парагелия $^{11}\text{S}_0$ в газовой кювете, стенки которой покрыты монослоем цезия, обнаруживают время релаксации вплоть до 1 сут. Это позволяет создать уникальный магнитометр с индукционным съёмом сигнала свободно прецессирующих ядер гелия, практически не потребляющий энергии в промежутке между редкими циклами оптической накачки.

Ядерный гелиевый магнитометр не получил широкого применения, во-первых, ввиду его низкого быстродействия, во-вторых, из-за его больших веса и габаритов — для съёма сигнала требуются многокилограммовые индукционные катушки — и, в-третьих, из-за большой чувствительности детектирующих катушек к радиочастотным помехам. Кроме того, вследствие низкой частоты ядерной прецессии магнитометр оказался крайне чувствительным к гироскопическим ошибкам.

К достоинствам ядерного гелиевого магнитометра относятся практический бесконечно узкая линия и способность после завершения цикла накачки работать автономно в невозмущённых условиях в течение суток и более. В работе [28] описывается магнитометр с накачкой полупроводниковым лазером, чувствительность которого оценивается в 50 пТл в полосе 70 Гц. В конструкциях ядерных магнитометров с оптической накачкой, кроме ^3He , использовались также изотопы ртути ^{199}Hg и ^{201}Hg [29].

3.5. Магнитометр на основе ^4He с оптической накачкой

Оптическая накачка атомов ^4He в метастабильном 2^3S_1 -состоянии впервые была описана в [30]; с этого времени началась разработка магнитометров на атомах ^4He [31–33]. Принцип их действия включает в себя возбуждение атомов до метастабильного состояния, прямую оптическую накачку (поляризацию) 2^3S_1 -метастабильных атомов гелия, возбуждение M_z -резонанса и оптическое детектирование M_z -сигнала.

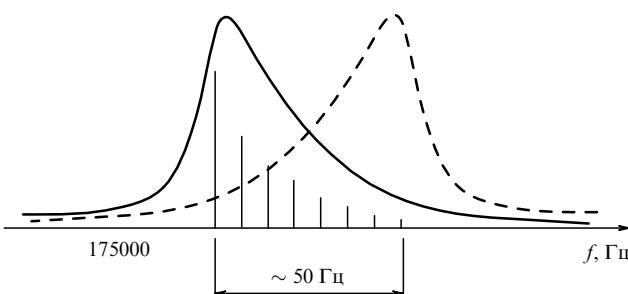


Рис. 6. Форма линии магнитного резонанса Cs в земном поле.

В наиболее современной модификации гелиевого магнитометра [34], в которой используется лазерная накачка перехода $2^3S_1 - 2^3P_0$ и частотная модуляция лазерного излучения при оптическом детектировании сигнала, достигнута чувствительность порядка $1 - 4 \text{ пТл Гц}^{-1/2}$.

3.6. Щёлочно-гелиевый магнитометр

Щёлочно-гелиевый магнитометр — это прибор, который может быть реализован только в виде M_z -схемы. В этом приборе используется эффект передачи спиновой поляризации от ориентированных щёлочных атомов гелию в метастабильном состоянии 2^3S_1 (ортогелий) при столкновениях частиц в условиях щёлочно-гелиевой газоразрядной плазмы [35].

Основную роль в разработке и создании щёлочно-гелиевого магнитометра сыграла в 1980-х годах группа Р.А. Житникова (ФТИ). Сегодня щёлочно-гелиевый магнитометр значительно уступает калиевому магнитометру на изолированной узкой линии как по чувствительности, так и по точности и быстродействию.

3.7. Калиевый магнитометр на изолированной узкой линии

В отличие от цезия и других щёлочных металлов, калий в земном магнитном поле имеет почти полностью разрешённую систему магнитных резонансов в основном состоянии, что позволяет выделить одну изолированную линию и в значительной степени игнорировать прочие линии спектра.

Спектр магнитных резонансов естественной смеси изотопов калия схематически представлен на рис. 7. Положение вершины сильнейшей и наиболее изолированной линии практически не зависит от условий накачки; сдвиг частоты ведущего резонанса под влиянием соседнего в среднем земном поле не превышает 0,3 пТл, что на четыре порядка меньше систематической ошибки цезиевого магнитометра.

Хотя первые попытки использования калия в схеме КМОН были предприняты ещё в 1960-х годах [36], они не увенчались успехом из-за сложности работы со структурой, содержащей несколько резонансных линий. Впервые магнитометр на изолированной узкой линии калия в M_x -модификации был создан в ГОИ [37, 38]; сейчас эти работы продолжаются в ФТИ.

Именно в схеме на парах калия при лазерной накачке в кювете диаметром 15 см была достигнута рекордно

высокая для КМОН вариационная чувствительность — $1,8 \text{ фТл Гц}^{-1/2}$.

3.8. СТС-магнитометр

КМОН, основанный на сверхвысокочастотном (СВЧ) резонансе в сверхтонкой структуре основного состояния атома щёлочного металла (СТС-магнитометр), был предложен в 1970-х годах [39]. Такие схемы обладают рядом преимуществ перед традиционной схемой КМОН. Во-первых, зеемановская структура большинства СТС-переходов оказывается разрешённой уже в сверхслабых полях (порядка 10^{-7} Тл). Во-вторых, в случае СТС-магнитометра может быть реализован магнитометр без "мёртвых зон". В-третьих, систематические ошибки такого магнитометра могут быть подавлены до уровня $\sim 1 \text{ пТл}$ — это возможно, если осуществить так называемую балансную версию магнитометра, измеряющего разность частот переходов между двумя симметричными парами магнитных уровней. При оптической накачке неполяризованным светом эта разность практически свободна от световых сдвигов.

Проект СТС-магнитометра на парах ^{39}K был всесторонне исследован в 70-е годы прошлого века [40]. В ходе испытаний была продемонстрирована чувствительность около $1 \text{ пТл Гц}^{-1/2}$.

Существенно более высокой чувствительности предполагалось достичь с помощью СТС-магнитометра на основе ^{87}Rb , поскольку СТС-расщепление основного состояния ^{87}Rb примерно в 15 раз превышает такое у ^{39}K , что позволяет осуществлять высокоэффективную накачку сверхтонких подуровней основного состояния. Однако оказалось, что в этом случае появляется дополнительный источник шумов, связанный с недостаточной стабильностью частоты опорного микроволнового генератора [41]. Эта проблема решается посредством замены кварцевых опорных генераторов более высокодобротными, в частности мазерами и лазерами.

Необходимость в случае балансного СТС-магнитометра одновременного измерять частоты двух СВЧ-переходов приводит к существенному усложнению электронной части прибора. Полностью преодолеть этот недостаток удалось совсем недавно с помощью современных методов частотного синтеза [42].

3.9. $M_z - M_x$ -тандем

В метрологии требования к быстродействию и высокой точности измерения часто приводят к противоречию, которое разрешается объединением двух измерительных устройств в единую систему, в которой показания быстрого устройства корректируются с помощью второго устройства, медленного, но более точного [43]. Соответствующее устройство, часто называемое тандемом, может быть составлено из двух КМОН: один из них построен по схеме спинового генератора (M_x -КМОН), выходная частота которого автоматически следует за индукцией внешнего поля, а другой (M_z -КМОН) работает по схеме пассивного радиоспектрометра, привязанного петлёй обратной связи к выбранной линии магнитного резонанса. При этом M_z -КМОН использует спектр магнитного резонанса с разрешённой структурой линий, что обеспечивает повышенную точность измерения частоты.

В первом тандеме [43] использовался изотоп рубидия ^{87}Rb ; в следующей конструкции [44] использовались

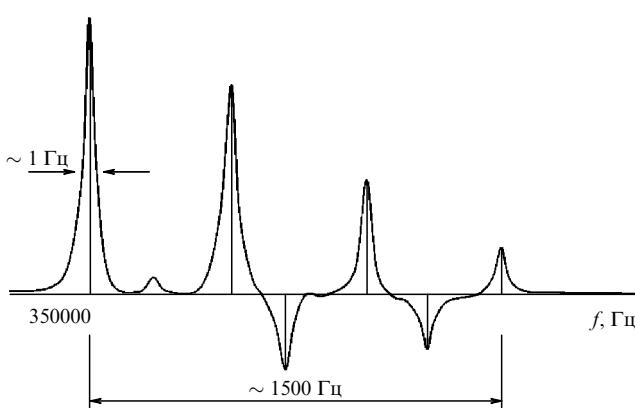


Рис. 7. Спектр магнитного резонанса K в земном поле.

цезий в M_x -схеме и калий в M_z -схеме: в отличие от спектра рубидия, спектр магнитного резонанса калия надёжно разрешён во всем диапазоне земных магнитных полей. Магнитометр характеризовался временем отклика 1 мс, разрешающей способностью 10 пТл и абсолютной точностью $\approx 0,1$ нТл.

В [45] описана схема Cs–K-тандема, отличающегося сразу по двум параметрам: во-первых, вместо двух датчиков был использован один датчик, содержащий смесь паров Cs и K в покрытой парафином колбе, что полностью устранило трудности, связанные с градиентом измеряемого поля. Во-вторых, в качестве M_z -резонанса использовался четырёхквантовый резонанс $m_F = -2 \leftrightarrow m_F = 2$ подуровня $F = 2$ основного состояния K. Здесь впервые были использованы особые свойства резонанса высшей (для уровня $F = 2$) кратности $n = 4$, который практически не смещается переменным полем [46]. Уникальные свойства такого резонанса исследованы в [47, 48]. Тандем продемонстрировал устойчивость показаний в пределах 10 пТл к изменению основных параметров на величины, заведомо превышающие их разумные эксплуатационные вариации.

3.10. Калиевый магнитометр на узкой линии с подавленным спин-обменным уширением

Одним из важнейших факторов уширения резонансной линии является спин-обменное уширение, пропорциональное концентрации атомов в рабочей ячейке, что ограничивает возможности повышения чувствительности квантового магнитометра за счёт повышения оптической плотности ячейки. Однако в 1973 г. Хаппер и Танг [49] экспериментально обнаружили, что спин-обменное уширение можно уменьшить, увеличивая концентрацию атомов в сверхслабых магнитных полях. Спустя четыре года этот эффект получил теоретическое обоснование [50].

С 2002 г. этим эффектом занимается группа, работающая в Принстоне под руководством М. Ромалиса [51–54]. В сверхслабых магнитных полях (порядка 10 нТл) в ячейке с парами калия при температуре 170 °C была зарегистрирована ширина резонанса порядка всего нескольких герц и были получены чувствительности порядка 1 фТл Гц $^{-1/2}$; в то же время уже при напряжённости магнитного поля 300 нТл ширина резонанса достигала 350 Гц.

3.11. Проекты магнитометра на эффекте когерентного пленения населённостей

Впервые попытка использовать эффект когерентного пленения населённостей (КПН) в СВЧ-диапазоне в квантовой магнитометрии была предпринята в [55]. Первые сообщения о реализации магнитометра на основе чисто оптического эффекта КПН [56] относятся к 1998 г. В работе [56] атомы цезия подвергались облучению одновременно светом двух лазеров, частоты которых были отстроены на 9,2 ГГц, т.е. на частоту СТС-расщепления основного состояния Cs. Авторы делают вывод о разрешающей способности магнитометра ~ 500 фТл.

В работе [57] исследовалась схема, в которой также два независимых лазера заменены одним лазером с излучением, модулированным на частоте 4,6 ГГц. Авторы отмечают, что, хотя "тёмный" оптический КПН-резонанс не подвержен уширению мощностью лазерно-

го излучения, он оказывается уширенным вследствие неоднородного штарковского сдвига, что радикально ухудшает чувствительность. Авторами работы [57] приведено значение оценённой по критерию отношения сигнала к шуму и к ширине резонанса чувствительности их магнитометра — 4 пТл при временах измерения от 1 с и более. Параллельно работы ведутся в Национальном институте стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology, NIST) (США) [58, 59], Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) и Институте лазерной физики (ИЛФ) СО РАН [60].

Магнитометр на основе эффекта нелинейного магнито-оптического вращения. Нелинейный эффект магнито-оптического вращения (нелинейный эффект Фарадея), заключается в зависимости угла вращения поляризации квазирезонансного света и от магнитного поля, и от интенсивности света. Д. Будкер с коллегами [61, 62] предложили использовать в магнитометрии эффект вращения поляризации, возникающий при резонансной модуляции частоты света накачки.

Этот эффект близок к эффекту параметрического резонанса, возникающего при воздействии на гармоническую систему света с частотой, кратной резонансной частоте системы: свет, настроенный в резонанс оптическому переходу, производит выстраивание магнитных моментов вдоль поля. При модуляции с частотой Ω_m частоты света условие резонансности будет выполняться два раза за период модуляции; таким образом, свойства среды будут изменяться с частотой $2\Omega_m$. При совпадении этой частоты с ларморовской $\omega = \gamma B$, где γ — гиромагнитное отношение (отношение магнитного момента атома к его механическому моменту), возникает параметрический резонанс.

В экспериментах Будкера и коллег наблюдалась резонансы ширины 1,3 Гц, что, по оценкам авторов, должно обеспечить чувствительность порядка 10^{-11} Гс Гц $^{-1/2}$ (или 1 фТл Гц $^{-1/2}$) в сверхслабых магнитных полях ($\ll 100$ нТл).

3.12. Векторная магнитометрия с использованием квантовых датчиков

Квантовые магнитометры являются скалярными, или модульными, приборами, обладающими серьёзным преимуществом перед всеми остальными средствами измерения магнитного поля — их показания практически не зависят от направления магнитного поля. Тем не менее именно благодаря этому свойству квантовые магнитометры находят применение в задачах измерения компонент вектора магнитного поля.

Перспективная возможность использования скалярного датчика в векторной магнитометрии основана на использовании зависимости фазы модуляции пробного луча от его направления по отношению к магнитному полю. Вариант такой измерительной схемы рассмотрен в [63]. В схеме используются два луча: луч L1, параллельный измеряемому полю, и луч L2, перпендикулярный первому. Луч L1 обеспечивает оптическую накачку атомов щелочного металла, а луч L2 используется в качестве пробного.

Когда луч L1 точно параллелен магнитному полю, его модуляция отсутствует. При отклонении магнитного поля от направления луча на угол Θ появляется сигнал модуляции, амплитуда которого пропорциональна $\sin \Theta$, а фаза зависит от направления отклонения магнит-

ногого поля. Таким образом, данная схема позволяет измерить модуль поля и две его поперечные компоненты; по оценкам авторов, устройство характеризуется вариационной чувствительностью измерения поперечных компонент поля порядка 0,1 нТл за 1 с и дрейфами порядка 2–3 нТл за сутки.

Многочисленные системы, основанные на методах калиброванного возмущения магнитного поля, предполагают использование скалярного датчика, помещённого в трёхмерную систему магнитных колец, создающих последовательность искусственных полей, перпендикулярных измеряемому полю; обзор таких методов можно найти в [64].

Среди удачных реализаций векторных магнитометров, использующих датчики на парах щелочных металлов, следует отметить работы [65, 66]. Их основным отличием, помимо использования датчика с оптической накачкой, является использование непрерывного быстрого вращения добавочного поперечного магнитного поля. В результате в центре системы образуется магнитное поле, вектор которого вращается по конусу относительно вектора МПЗ.

При изменении поперечных компонент МПЗ ось прецессии суммарного вектора магнитного поля в центре системы отклоняется от вектора МПЗ, что приводит к модуляции величины вектора на частоте f . Сигнал на частоте модуляции f используется для создания полей, полностью компенсирующих соответствующие поперечные компоненты МПЗ. Версия прибора, описанная в [66], осуществляет также 90–95 %-ную компенсацию МПЗ, что позволяет почти на порядок увеличить чувствительность измерения поперечных компонент поля. Прибор, основанный на этом принципе, продемонстрировал собственные шумы на уровне 0,010–0,015 нТл с.к.о. (средняя квадратичная ошибка) при времени измерения 0,1 с.

Эти приборы относятся к классу вариометров — их измерения не обладают свойством абсолютности, поскольку к измеряемому полу добавляются дополнительные поля, создаваемые системами магнитных колец. В работе [67], однако, предложен способ одновременного измерения трёх компонент вектора МПЗ с использованием M_x -магнитометра с оптической накачкой, характеризующийся высокой абсолютной точностью; кратковременная чувствительность измерения при этом определяется чувствительностью M_x -магнитометра.

Суть метода заключается в создании в области датчика системы компенсирующих полей, гармонически изменяющихся таким образом, чтобы вектор суммарного магнитного поля в датчике вращался, сохраняя свою длину, вокруг начального направления магнитного поля, проходя в каждом цикле вращения через три положения, в каждом из которых две компоненты магнитного поля скомпенсированы с высокой точностью, а третья компонента, напротив, не компенсирована совсем, и она может быть измерена. Показано, что при использовании в качестве датчика M_x -магнитометра с оптической накачкой и трёхкомпонентной симметричной системы магнитных колец возможно одновременное измерение трёх компонент вектора МПЗ с абсолютной точностью $\pm 0,1$ нТл при времени измерения 0,1 с, что не может быть достигнуто никакими иными существующими в настоящий момент способами.

3.13. Заключение

Итак, квантовые магнитометры с оптической накачкой паров щелочных металлов могут быть с успехом применены в самых разнообразных геофизических задачах, требующих измерения как модуля магнитного поля и его градиентов, так и компонент вектора магнитного поля. Задачи, которые требуют одновременно и высокой точности, и высокого быстродействия, могут быть решены с помощью сочетания квантовых измерительных устройств различного типа. При всём разнообразии методов возбуждения и детектирования магнитного резонанса генеральным направлением совершенствования систем измерения магнитного поля является сужение линии магнитного резонанса, что в полях земного диапазона подразумевает использование атомных структур, обладающих хорошо разрешённым спектром, таким как СТС-спектр щелочных металлов в СВЧ-диапазоне или зеемановский спектр атома калия в радиочастотном диапазоне.

Список литературы

1. Rabi I I *Phys. Rev.* **51** 652 (1937)
2. Bloch F *Phys. Rev.* **70** 460 (1946)
3. Packard M E, Varian R H *Phys. Rev.* **93** 941 (1954)
4. Overhauser A W *Phys. Rev.* **89** 689 (1953)
5. Overhauser A W *Phys. Rev.* **92** 411 (1953)
6. Carver T R, Slichter C P *Phys. Rev.* **92** 212 (1953)
7. Bitter F *Phys. Rev.* **76** 833 (1949)
8. Kastler A J. *Phys. Radium* **11** 255 (1950)
9. Kastler A J. *Opt. Soc. Am.* **47** 460 (1957)
10. Александров Е Б *Оптр.-мех. промышл.* **55** (12) 27 (1988) [Aleksandrov E B *Sov. J. Opt. Technol.* **55** 731 (1988)]
11. Alexandrov E B, Bonch-Bruevich V A *Opt. Eng.* **31** 711 (1992)
12. Alexandrov E B et al. *Laser Phys.* **6** 244 (1996)
13. Alexandrov E B *Phys. Scr.* **T105** 27 (2003)
14. Budker D, Romalis M *Nature Phys.* **3** 227 (2007)
15. Jaklevic R C et al. *Phys. Rev. Lett.* **12** 159 (1964)
16. Happer W *Rev. Mod. Phys.* **44** 169 (1972)
17. Bloch F *Phys. Rev.* **70** 460 (1946)
18. Göppert-Mayer M *Annder Phys.* **401** 273 (1931)¹
19. Brossel J, Cagnac B, Kastler A *C.R. Acad. Sci. Paris* **237** 984 (1953)
20. Alzetta G et al. *Nuovo Cimento B* **36** 5 (1976)
21. Swain S J. *Phys. B At. Mol. Phys.* **15** 3405 (1982)
22. Harris S E *Phys. Today* **50** (7) 36 (1997)
23. Вершовский А К, Пазгалев А С *ЖТФ* **78** (5) 116 (2008) [Vershovskii A K, Pazgalev A S *Tech. Phys.* **53** 646 (2008)]
24. Bloom A L *Appl. Opt.* **1** (1) 61 (1962)
25. Hardwick C D *Geophysics* **49** 2024 (1984)
26. Yabuzaki T, Ogawa T J. *Appl. Phys.* **45** 1342 (1974)
27. Bison G, Wynands R, Weis A *Appl. Phys. B* **76** 325 (2003)
28. Moreau O et al. *J. Physique III* **7** 99 (1997)
29. Александров Е Б и др. *УФН* **141** 551 (1983) [Aleksandrov E B et al. *Sov. Phys. Usp.* **26** 1015 (1983)]
30. Colegrove F D, Franken P A *Phys. Rev.* **119** 680 (1960)
31. Keyser A R, Rice J A, Schearer L D *J. Geophys. Res.* **66** 4163 (1961)
32. Chéron B et al. *Opt. Commun.* **115** 71 (1995)
33. Chéron B, Gilles H, Hamel J *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **13** 143 (2001)
34. Gilles H, Hamel J, Chéron B *Rev. Sci. Instrum.* **72** 2253 (2001)
35. Keiser G M, Robinson H G, Johnson C E *Phys. Lett. A* **51** 5 (1975)
36. Mosnier J *Ann. Geophys.* **11** 22 (1966)
37. Александров Е Б и др. *Оптр. и спектроск.* **58** 953 (1985) [Aleksandrov E B et al. *Opt. Spectrosc.* **58** 439 (1985)]
38. Александров Е Б, Балабас М В, Бонч-Бруевич В А *Письма в ЖТФ* **12** 749 (1987) [Aleksandrov E B, Balabas M V, Bonch-Bruevich V A *Sov. Tech. Phys. Lett.* **12** 312 (1987)]

¹ Номер тома указан по новой нумерации, принятой на сайте Willey InterScience. В печатном издании номер тома — 9.

39. Александров Е Б, Мамырин А Б, Соколов А П *Opt. и спектроск.* **34** 1216 (1973)
40. Александров Е Б и др. *Opt. и спектроск.* **38** 818 (1975) [Aleksandrov E B et al. *Opt. Spectrosc.* **38** 466 (1975)]
41. Александров Е Б, Мамырин А Б, Якобсон Н Н *ЖТФ* **51** 607 (1981) [Aleksandrov E B, Mamyrin A B, Yakobson N N *Sov. Phys. Tech. Phys.* **26** 363 (1981)]
42. Александров Е Б, Вершовский А К, Пазгалев А С *ЖТФ* **76** (7) 103 (2006) [Aleksandrov E B, Vershovskii A K, Pazgalev A S *Tech. Phys.* **51** 919 (2006)]
43. Allen A H, Bender P L *J. Geomagn. Geoelectr.* **24** 1 105 (1972)
44. Pulz E, Jäckel K-H, Linthe H-J *Meas. Sci. Technol.* **10** 1025 (1999)
45. Александров Е Б и др. *ЖТФ* **70** (7) 118 (2000) [Aleksandrov E B et al. *Tech. Phys.* **45** 931 (2000)]
46. Александров Е Б и др. *ЖТФ* **69** (9) 27 (1999) [Aleksandrov E B et al. *Tech. Phys.* **44** 1025 (1999)]
47. Александров Е Б, Пазгалев А С *Opt. и спектроск.* **80** 534 (1996) [Aleksandrov E B, Pazgalev A S *Opt. Spectrosc.* **80** 473 (1996)]
48. Александров Е Б, Пазгалев А С, Рассон Ж Л *Opt. и спектроск.* **82** 14 (1997) [Alexandrov E B, Pazgalev A S, Rasson J L *Opt. Spectrosc.* **82** 10 (1997)]
49. Happer W, Tang H *Phys. Rev. Lett.* **31** 273 (1973)
50. Happer W, Tam A C *Phys. Rev. A* **16** 1877 (1977)
51. Allred J C et al. *Phys. Rev. Lett.* **89** 130801 (2002)
52. Kominis I K et al. *Nature* **422** 596 (2003)
53. Savukov I M, Romalis M V *Phys. Rev. A* **71** 023405 (2005)
54. Savukov I M et al. *Phys. Rev. Lett.* **95** 063004 (2005)
55. Вершовский А К, Пазгалев А С, Александров Е Б *ЖТФ* **70** (1) 88 (2000) [Vershovskii A K, Pazgalev A S, Aleksandrov E B *Tech. Phys.* **45** 88 (2000)]
56. Nagel A et al. *Europhys. Lett.* **44** 31 (1998)
57. Stähler M et al. *Europhys. Lett.* **54** 323 (2001)
58. Kitching J et al. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **49** 1313 (2000)
59. Schwindt P D D, Hollberg L, Kitching J *Rev. Sci. Instrum.* **76** 126103 (2005)
60. Тайченачев А В и др. *Письма в ЖЭТФ* **80** 265 (2004) [Taichenachev A V et al. *JETP Lett.* **80** 236 (2004)]
61. Budker D, Yashchuk V, Zolotorev M *Phys. Rev. Lett.* **81** 5788 (1998)
62. Pustelny S et al. *Phys. Rev. A* **73** 23817 (2006)
63. Fairweather A J, Usher M J *J. Physics E* **5** 986 (1972)
64. Lamden R J *J. Phys. E* **2** 125 (1969)
65. Alexandrov E B et al. *Meas. Sci. Technol.* **15** 918 (2004)
66. Вершовский А К и др. *ЖТФ* **76** (1) 115 (2006) [Vershovskii A K et al. *Tech. Phys.* **51** 112 (2006)]
67. Вершовский А К *Opt. и спектроск.* **101** (2) 341 (2006) [Vershovskii A K *Opt. Spectrosc.* **101** 309 (2006)]

1. *Краткая история исследований вариаций космических лучей (КЛ) в Научно-исследовательском институте земного магнетизма и в ИЗМИРАН:* роль Н.В. Пушкова; счётчиковый телескоп Е.С. Глоковой; проект С.Н. Вернова, Н.В. Пушкова и Ю.Г. Шафера (1950–1951 гг.) по созданию серии больших ионизационных камер и привлечению студентов-ядерщиков (не допущенных Комитетом государственной безопасности СССР на ядерные объекты) для организации советской сети станций КЛ; разработка теории метеорологических эффектов и метода функций связи; публикация в 1957 г. первой в мире монографии по вариациям КЛ в Москве и её английского перевода в США; 10-кратная ошибка правительства чиновников в 1960–1961 гг., послужившая стремительному развитию экспериментальной базы исследований вариаций КЛ и вообще солнечно-земной физики в СССР; теоретическое и прикладное значение исследований вариаций КЛ.

2. *Вариации КЛ как элемент космической погоды:* влияние земной атмосферы на КЛ и обратное влияние вариаций КЛ на процессы в атмосфере и глобальное изменение климата; радиационная опасность от галактических КЛ, солнечных КЛ и от энергичных частиц, "высыпающихся" из радиационных поясов.

3. *Вариации КЛ как инструмент для мониторинга и предсказания космической погоды:* предсказание части изменения глобального климата, обусловленной вариацией интенсивности галактических КЛ; предсказание радиационной опасности для людей и электронной аппаратуры на самолётах, спутниках и космических кораблях, обусловленной вариацией интенсивности галактических КЛ и вспышками солнечных КЛ; предсказание опасных больших магнитных бурь по часовым данным интенсивности КЛ в реальном масштабе времени, непрерывно получаемых с мировой сети нейтронных мониторов и мюонных телескопов.

Ниже я хотел бы рассмотреть основы исследований вариаций КЛ и их связь с космической погодой.

2. Основы науки о вариациях космических лучей

Наблюдаемые пространственно-временные вариации плотности и анизотропии КЛ обусловлены в основном причинами, имеющими следующее происхождение: 1) атмосферное, 2) магнитосферное, 3) внеземное, или космическое (солнечное, межпланетное, галактическое и внегалактическое) (см. расширенные обзоры в [1–4]). Для каждой станции КЛ k , регистрирующей компоненту КЛ i (например, мюонную под разными зенитными и азимутальными углами, нейтронную, как полную интенсивность, так и разные кратности, измерения под землей на разных глубинах и на поверхности, на кораблях, самолётах, баллонах и спутниках), интенсивность $I_{ki}(t)$ в момент времени t может быть представлена как

$$I_{ki}(t) = \int_{R_k(t)}^{\infty} m_i(R, t) D(R, t) dR, \quad (1)$$

где $R_k(t)$ — жёсткость геомагнитного обрезания (в случае измерений КЛ вне магнитосферы Земли $R_k(t) = 0$), $m_i(R, t)$ — интегральная кратность (полное число вторичных частиц типа i , генерированных в каскадных процессах от одной первичной частицы жёсткостью R ,

Вариации космических лучей и космическая погода

Л.И. Дорман

1. Введение

В моём докладе, представленном на Научной сессии РАН в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) 25 ноября 2009 г., были рассмотрены следующие вопросы:

Л.И. Дорман. Israel Cosmic Ray and Space Weather Center with Emilio Segré Observatory, affiliated to Tel Aviv University, Technion, and Israel Space Agency; Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, РФ
E-mail: lid@physics.technion.ac.il