

УДК 524.3-337+539.171

А.И. СЕРЫЙ

Брест, БрГУ

К ВОПРОСУ О СООТНОШЕНИИ МЕЖДУ МАГНИТНЫМ И ЯДЕРНЫМ ПСЕВДОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В МАГНЕТАРАХ

Проведенные в земных условиях эксперименты по ядерному псевдомагнетизму показали, что в случае поляризованных протонов ядерное псевдомагнитное поле (ЯПМП), действующее на отдельно взятый нуклон низкой энергии, равно около 3 Тл и на 2 порядка превосходит обычное магнитное поле (МП), создаваемое поляризованными собственными магнитными моментами протонов [1, с. 54]. Тогда влиянием последнего на преимущественную ориентацию спинов нуклонов можно пренебречь.

Запишем формулы (в СГС) для индукции поляризационного МП и ЯПМП, создаваемых нуклонами сорта «*i*» по отношению к нуклону сорта «*j*» ([1, с. 55]; $\mu_{j\gamma_i}, n_i, p_{0i}$ – соответственно, собственный магнитный момент в единицах ядерного магнетона, концентрация и степень поляризации; $f \sim 10^{-12}$ см и зависит от амплитуд нуклон-нуклонного рассеяния; α – электромагнитная константа связи):

$$B_i = 4\pi\mu_{j\gamma_i} n_i p_{0i}, B_{\text{эф}(i)} = \frac{\pi\hbar^2 n_i p_{0i} f}{m_i \gamma_j \mu_j} \Rightarrow \frac{B_{\text{эф}(i)}}{B_i} \approx \frac{f}{\lambda_c \alpha \gamma_i \gamma_j} \sim 10^3, \lambda_c = \frac{\hbar}{m_p c}. (1)$$

Т. е. расчетное отношение даже превосходит экспериментальное. Но при проведении эксперимента, например, во внешнем магнитном поле соленоида, которое может достигать порядка 10^5 Гс [2, с. 665], ситуация должна измениться в пользу пренебрежения ЯПМП.

В космических масштабах магнитные поля гораздо сильнее. Например, в магнетарах оно может достигать 10^{15} Гс [3, с. 259]. Если его происхождение обусловлено исключительно спиновой поляризацией нуклонов, то ядерное псевдомагнитное поле на 2-3 порядка больше, поэтому именно оно, а не магнитное поле, будет влиять на поляризацию (идея В. Г. Барышевского). В рамках ферми-газового (ФГ) подхода (для плотностей, на 2-3 порядка меньше ядерных) это подтверждается [4, с. 38], причем $B \sim 10^{14}$ Гс, т. е. на порядок меньше, чем в магнетарах.

Но возникают трудности: 1) Формулы для ЯПМП в [1, с. 55] пригодны именно для ФГ подхода, а в нейтронных звездах содержится нуклонная ферми-жидкость; 2) При значительном вкладе, например, поляризации

электронов или сверхпроводящих протонных токов в генерацию магнитного поля степень влияния ЯПМП может ослабеть.

Выводы: 1) Если степень поляризации известна, то легко найти $B_{\text{эф}(i)}$, и тогда $B_i \sim 0.01B_{\text{эф}(i)}$; 2) если при моделировании нейтронных звезд, исходя из данных наблюдений, можно оценить B_i на поверхности, то из этого, вообще говоря, не следует, что $B_{\text{эф}(i)} \sim 10^2 B_i$, т. к. механизм генерации МП не обязан быть чисто поляризационным.

Например, если для простоты предположить, что в обычных нейтронных звездах и в магнетарах одной и той же массы и (или) радиуса ЯПМП примерно одинаково, то его соотношение с обычным МП будет существенно различным: в магнетарах эти величины будут уже одного порядка, а для объяснения МП магнетаров придется привлекать неполяризационные механизмы. Рассуждения отобразим в виде Таблицы 1.

Таблица 1 – Возможные ситуации в обычных нейтронных звездах и магнетарах

тип нейтронной звезды (НЗ)		обычная	магнетар
МП на поверхности, Гс		10^{12}	10^{15}
если МП чисто поляризованное, и при этом	сонаправлены спины протонов и нейтронов, то	а) ЯПМП $\sim 10^{14}$ Гс	а) ЯПМП $\sim 10^{17}$ Гс
		б) МП мешает, но не сильно	
		в) влияние МП можно не учитывать	
	сонаправлены собственные магнитные моменты протонов и нейтронов, то	а) ЯПМП $\sim 10^{14}$ Гс	а) ЯПМП $\sim 10^{17}$ Гс
		б) МП помогает, но не сильно	
		в) влияние МП можно не учитывать	
если значителен вклад гидромагнитного динамо, электронной поляризации и протонных сверхпроводящих токов, и при этом	сонаправлены спины протонов и нейтронов, то	а) ЯПМП $< 10^{14}$ Гс	а) ЯПМП $< 10^{17}$ Гс
		б) МП мешает, но как сильно, однозначно сказать нельзя	б) МП может мешать очень сильно, если ЯПМП такое же, как и в обычной НЗ
		в) влияние МП, возможно, надо учитывать	в) влияние МП необходимо учитывать
	сонаправлены собственные магнитные моменты протонов и нейтронов, то	а) ЯПМП $< 10^{14}$ Гс	а) ЯПМП $< 10^{17}$ Гс
		б) МП помогает, но как сильно, однозначно сказать нельзя	б) МП может помогать очень сильно, если ЯПМП такое же, как и в обычной НЗ
		в) влияние МП, возможно, надо учитывать	в) влияние МП необходимо учитывать

Тогда открытым остается вопрос: насколько существенно прочие факторы, не связанные со спиновой поляризацией нуклонов, могут повлиять на генерацию магнетарных МП? Если удастся доказать, что прочие факто-

ры на это не способны, то предположение В.Г. Барышевского можно будет считать правдоподобным. Рассмотрим основные группы основных «альтернативных» механизмов в виде сравнительной таблицы.

Таблица 2 – Основные возможные механизмы генерации сверхсильных магнитных полей магнетаров (1 – протонная сверхпроводимость, пиннинг и крип вихрей, 2 – гидромагнитное динамо, 3 – спиновая поляризация нуклонов, 4 – сжатие звезды с сохранением первоначального магнитного потока [5])

	Реализация в лабораторных условиях на Земле	Какие МП предсказываются	Прочие замечания
1	1) в ${}^4\text{He}$ (He II) наблюдались [7, с. 425] только вихри, но не пиннинг и крип; 2) сходство лабораторных образцов с епр-жидкостью весьма условное	$\sim 10^{12}$ Гс (вблизи нейтронного вихря до 10^{14}) [6, с. 19, 23], хотя формулы довольно чувствительны к входящим в них величинам, поэтому можно подогнать даже под 10^{15} Гс	1) хорошо объясняет совокупность наблюдательных данных о сбоях пульсаров [6, с. 37]; 2) не имеет значения, как проходил коллапс НЗ; 3) если локальное поле вокруг нейтронного вихря ниже критического, то мейсснеровские протонные токи сводят МП к нулю [6, с. 22]
2	1) исследования ведутся, но пока без заметных успехов; 2) лабораторные образцы от космической плазмы на стадии звездообразования отличаются по многим параметрам	специальная подгонка под поля $\sim 10^{15}$ Гс (авторы [3] и аналогичных статей этого не скрывают)	1) слишком много «если»; 2) имеют большое значение детали коллапса НЗ; 3) на астрофизический механизм динамо [7, с. 469, 470] (условие вмороженности МП) наведена критика в [6, с. 18, 19] (см. также Таблицу 3);
3	1) ЯПМП как коллективный эффект воздействия на отдельно взятый нуклон, убедительно обнаружено экспериментально [1, с. 55]; 2) лабораторные образцы от епр-жидкости отличаются плотностью	$\sim 10^{14}$ Гс в рамках ФГ-подхода для $\rho \sim 10^{13}$ г/см ³ (согласно [4]); $\sim 10^{15}$ Гс можно получить при увеличении плотности на порядок	1) трудность в том, что в ядре НЗ уже не ФГ, а ФЖ, поэтому для таких плотностей это может носить оценочный характер 2) не имеет значения, как проходил коллапс НЗ
4	Нет убедительной проверки	$\sim 10^{12}$ Гс	учет динамики процесса сжатия может свести МП к нулю (см. также Таблицу 3)

Таблица 3 – Критика механизма Гинзбурга усиления МП через сохранение магнитного потока при сжатии вещества во время образования звезды [6, с. 18, 19].

Тезис\ механизм	Идеализированный Гинзбурга	Более реалистичный
1а. $\rho r^3 = \text{const}$	Да	Да
1б. Это приводит к	сохранению массы	сохранению массы
2а. Турбулентное движение вещества	Не учитывается	учитывается
2б. Это приводит к тому, что	Проводимость $\sigma \rightarrow \infty$, и условие замороженности линий МП сохраняется	Резко уменьшается σ , что приводит к нарушению условий замороженности
3а. Выброс части вещества вместе с магнитным полем при взрыве Сверхновой	Не учитывается	Учитывается
3б. К чему это приводит	К сохранению МП	Может сильно уменьшить МП и даже свести его к нулю

Таблица 4 – Аргументы в пользу и против существования магнетаров

В защиту магнетаров	Против магнетаров [8]
1 (Аргумент). Наличие рентгеновской светимости $\sim 10^{35}$ эрг/с требует привлечения таких полей, т. к. иначе потеря энергии при вращении ($\frac{dE}{dt} = I\Omega \frac{d\Omega}{dt}$, $\frac{d\Omega}{dt} = k\Omega^n$, $n = 3$) недостаточно для согласования с такой светимостью (аргумент в защиту сверхсильных МП) [3]	1 (Контраргумент). На деле $n \neq 3$; и не обязательно $\frac{dE}{dt} = I\Omega \frac{d\Omega}{dt}$, тип потери энергии может быть связан не только с величиной B , но и темпом диссипации поля ($\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\int \frac{B^2}{8\pi} dV \right)$)
2 (Аргумент). Магнетары по теории не должны обладать заметным радиоизлучением [3]	2 (Контраргумент). Но такие магнетары есть
3 (Аргумент). Быстрое торможение должно быть обусловлено именно сверхсильным МП, а взаимодействие с окружающей плазмой на это повлиять не может [3]	3 (Контраргумент). Наоборот, взаимодействие с окружающей плазмой может приводить к быстрому торможению
4 (Контраргумент). Сверхсильное МП влияет на эволюцию светимости, поэтому если по наблюдаемой светимости делать экстраполяцию на возраст по алгоритму, разработанному для не очень сильных МП (т. е. полагающему, что излучение преимущественно тепловое), то такая оценка возраста может привести к ошибке в 25 раз [9] (притом важно, какая эпоха рассматривается – нейтринного или фотонного охлаждения)	4 (Аргумент). Сильное рассогласование возрастов ОСН и активных объектов в них (т. е. магнетаров)

Т. о., у всех концепций есть свои трудности, но меньше всего их у концепции ЯПМП, а больше всего у концепций гидромагнитного динамо и сжатия с сохранением магнитного потока. Первые 3 концепции допускают значение МП $\sim 10^{15}$ Гс, но сторонники концепции гидромагнитного динамо заявляют об этом наиболее решительно.

Также из обзорной статьи в энциклопедии [7, с. 469, 470] видно, насколько сложно говорить о гидромагнитном динамо как возможном источнике формирования МП магнетаров, а также о проверке всего этого в земных условиях.

Кроме того, не все считают концепцию магнетаров убедительной [8], полагая, что особенности наблюдаемых характеристик этих объектов можно объяснить без предположения о наличии столь сильных МП. В этом случае концепция ЯПМП в Таблице 2 также смотрится увереннее других.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышевский, В.Г. Ядерная оптика поляризованных сред / В.Г. Барышевский. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.
2. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Балдин, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия, Т. II. Добротность – Магнитооптика. 1990. – 703 с., ил.
3. Thompson, C. The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars – I. Radiative mechanism for outbursts / C. Thompson, R.C. Duncan // *Mon. Nat. R. Astron. Soc.* – 1995. – 275. – P. 255–300.
4. Серый, А.И. Об эффектах ядерного псевдомагнетизма в вырожденной нуклонной среде / А.И. Серый // *Веснік Брэсцкага універсітэта. Сер. прыродазнаучых навук.* – 2006. – № 2(26). – С.33–43.
5. Гинзбург, В. Л. // *УФН.* 1971. Т. 103. С. 393.
6. Седрамян, Д.М. Сверхтекучесть и магнитное поле пульсаров / Д.М. Седрамян, К.М. Шахабасян // *УФН.* – 1991. – Т. 161, № 7. 1 – 224. – С.3–40.
7. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Балдин, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия, Т. I. Ааронова–Бома эффект – Длинные линии. 1988. – 704 с., ил.
8. Истомин, Я.Н. Являются ли аномальные рентгеновские пульсары и источники мягких повторных гамма-всплесков магнетарами? / Я. Н. Истомин, Б. В. Комберг // *Астрономический журнал.* – 2000. – Т. 77, № 11. – С.852–857.
9. Heyl, J.S. The Thermal Evolution of Ultramagnetized Neutron Stars / Jeremy S. Heyl, Lars Hernquist // *arXiv:astro-ph/9710218 v1 21 Oct 1997.*