СУПЕРВСПЫШКИ НА СОЛНЦЕ И ЗВЁЗДАХ

Кацова М.М.¹, Обридко В.Н.², Соколов Д.Д.^{2,3}, Лившиц И.М.¹

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²ИЗМИРАН им. Н.В.Пушкова, Троицк, Москва, Россия

³Физический факультет Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

SOLAR AND STELLAR SUPERFLARES

Katsova M.M.¹, Obridko V.N.², Sokoloff D.D.^{2,3}, Livshits I.M.¹

¹Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Pushkov IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia

³Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

We discuss the current observations of the most powerful non-steady phenomena on solar-like stars. While remaining within even the most extreme solar ideas, there is problematic to get the flare energy more than 3×10^{34} erg, which is apparently an absolute upper limit for solar flares. For explanation of the flare energy about of 10^{36} erg, one need to adopt that spots with the magnetic field strength of a few kG should cover more than 30% of a hemisphere. This estimate leads to a mean field around 1kG. New observational evidences for a presence of the strong relict magnetic fields on solar-like stars appeared recently. We discuss to what extent it is necessary to change the mechanisms of convection and dynamo with a corresponding change in the models of the atmosphere. We consider possible ways of solving the problem of the energy of superflares.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-143-148

Введение

Как известно, полная энергия солнечных вспышек от наиболее слабых до самых мощных событий находится в широком диапазоне от 10^{24} до 10^{32} эрг. Самые изученные вспышки на звёздах малых масс происходят на красных карликах, и их полные энергии на несколько порядков превышают максимальное солнечное значение. Наблюдения показали, что при вспышках на очень молодых звёздах-карликах рассеянных скоплений, таких как Орион и Плеяды, достигаются энергии до 10^{36} эрг, а иногда и выше [1, 2]. Космический телескоп Кеплер с 2009 по 2018 гг. обнаружил столь же мощные явления на G-звёздах солнечного типа, т.е. похожих по своим фундаментальным параметрам на Солнце [3, 4]. Большинство вспышек имели полные энергии 10^{33} – 10^{34} эрг, лишь малую долю явлений можно считать супервспышками с $E \sim 10^{35}$ – 10^{36} эрг. Позже выяснилось, что гигантские вспышки с энергиями $E > 10^{36}$ – 10^{37} эрг присущи субгигантам либо гигантам, либо очень молодым объектам, не достигшим главной последовательности, а также компонентам двойных систем с хромосферной активностью [5].

Анализ многоволновых наблюдений звёздных вспышек в большинстве случаев свидетельствует об общности их физической природы явлений с солнечными явлениями [1, 2]. Речь идёт о накоплении свободной энергии непотенциального магнитного поля в определённом объёме, её импульсном выделении в ходе нестационарного процесса, последующего отклика атмосферы на возникающие при этом ускоренные частицы и нагрев плазмы. В то же время уже в [2] обращалось внимание на неудовлетворительность современных моделей солнечных вспышек для объяснения наиболее мощных вспышек на звёздах.

Накопление свободной энергии для генерации солнечных вспышек

Традиционно считается, полная энергия E , необходимая для вспышки, вычисляется по следующей формуле: $E = fB^2L^3/8\pi$

По существу, предполагается, что магнитное поле заключено в объёме с характерными размерами L и магнитное поле в нём постоянно. Множитель f показывает, что в диссипации участвует только непотенциальная часть поля. Предполагая, что $B = 3000$ Гс, а $L = 3 \times 10^9$ см, получим $\sim 3 \times 10^{32}$ эрг. Это значение близко к оценкам энергии самых мощных вспышек на Солнце, и можно было бы считать ситуацию удовлетворительной. Однако некоторые указанные параметры в этих расчётах сильно завышены и, во всяком случае, значительно отличаются от статистических свойств даже самых больших групп солнечных пятен.

Оценки величины и структуры магнитного поля в солнечных пятнах на уровне фотосферы

Солнечное пятно является областью повышенных значений магнитного поля. Однако до сих пор нет надежных результатов, указывающих на величину магнитного поля на границе пятна. Установление этого значения очень важно, поскольку именно при этом значении уменьшается конвективный нагрев фотосферы и возникает темное образование. Непосредственно измерить эту величину трудно в силу изрезанности границ и затруднений при проведении изолиний. На магнитограммах высокого разрешения это сделать ещё труднее. Поэтому мы предложили новый метод – вычисление площади, в которой поле выше некоторого порогового значения [6]. Величина порогового значения, при которой суммарная «магнитная» площадь совпадает с измеренной в этот день суммарной площадью пятен, может быть названа границей пятна.

Использованы ежедневные данные продольной составляющей магнитного поля SDO/HMI с 1 мая 2010 г. по 31 октября 2016 г., всего 2375 дней. Ежедневные данные о числах солнечных пятен взяты с сайта WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels <http://sidc.oma.be/silso/datafiles> (версия 2). Суммарные ежедневные значе-

ния площадей солнечных пятен взяты с сайта NASA <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>.

Оказалось, что граница пятна соответствует магнитному полю в 550 Гс. Большие магнитные поля выше 2000 Гс занимают крайне малую часть пятна, не более 20%. Поле довольно быстро падает с расстоянием от центра пятна (рис. 1).

Рис. 1. Зависимость B от R_o (относительное расстояние в пятне, вычисленное по доле площади, занимаемой полем выше порогового значения в реальных пятнах).

Среднее значение составляет около 750 Гс для самых малых пятен, несколько возрастает до 900 Гс в дни, когда на Солнце суммарная площадь составляет 500–2000 мдп и затем ещё несколько подрастает (рис. 2). Такое значение кажется довольно малым, но следует учесть, что основной вклад здесь дает полутень, которая занимает около 80% площади пятна [7]. Выделить здесь средние значения поля в суммарных тенях пятен нелегко, поскольку магнитная граница тени ещё более неопределённая, чем граница тени. Фотометрическая граница тени (т. е. внутренняя граница полутени) обычно бывает более размыта, чем её внешняя граница. Исходя из относительной площади тени, можно допустить, что граница тени соответствует магнитному полю 1000–1100 Гс. Средние значения поля в тенях пятен при таких предположениях показаны на рис. 3.

Рис. 2. Средние значения магнитного поля в пятнах.

Рис. 3. Средние значения поля в тени в предположениях, что граница тени соответствует полю в 1100 Гс. Красной линией показана аппроксимация полиномом 4-й степени.

Таким образом, средние значения поля в тени пятна составляют 1400 Гс и также слабо зависят от площади. Полученные значения выглядят достаточно низко по сравнению со средним значением, приведенным в [8]. Это значение (2050 Гс) получено по результатам базы данных 1957–1997 гг. <http://www.gao.spb.ru/database/mtbase/>. Следует, однако заметить, что целью этих наблюдений был, в основном, поиск максимального значения поля для каждого пятна.

При этом относительная доля площади тени составляет около 20% и очень слабо падает с площадью пятна (рис. 4).

Рис. 4. Относительная доля площади тени в зависимости от суммарной площади пятен, мдп.

Гораздо труднее оценить высоту, на которой располагается зона пересоединения L_z . По разным оценкам это должна быть нижняя корона с плотностью $n_e \sim 3 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ или несколько больше. Геометрическая высота этой области может меняться значительно. Она выше в невозмущенной области (5–7 тысяч км) и опускается над пятном до значений порядка 1–2 тысяч км. Для оценки магнитного поля на этой высоте можно использовать некоторые наблюдательные значения (см. [9] и приведенные там ссылки). Градиент падения поля с высотой может составлять меньше 0.7 Гс/км в разных пятнах. Это означает, что на высоте 1–2 тысяч км над пятном можно ожидать значения поля около 1000 Гс.

Таким образом, оценку энергии, запасенной в области вспышки, следует вычислять по несколько более сложной формуле $E = SL_z B^2 / 8\pi$, где S – площадь вспышки, B – среднее по объему значение поля. При указанных выше значениях для очень большого пятна (хотя и не рекордно большого) с площадью 1000 мдп и средним значением поля 1400 Гс и высотой $L_z = 10^8 \text{ см}$ получаем 2.4×10^{32} эрг, что тоже близко к наблюдаемым значениям для самых мощных вспышек на Солнце.

Следует, однако, заметить, что в наших расчетах мы ориентировались на средние значения, а не на максимальные, наблюдавшиеся в прошлом. Оценим теперь энергию, которая соответствовала бы одновременному появлению всех экстремальных значений. Самые большие пятна достигают

площади в 4000 мдп. За всё время наблюдений магнитных полей пятен, зарегистрировано 55 активных областей, с магнитным полем выше 4000 Гс. Заметим, что эти «суперполя» занимали в активных областях крайне малую эффективную площадь. Наконец, совсем недавно, на основе наблюдений SDO/HMI и Hinode SOT/SP путем расчётов бессилового магнитного поля найдено магнитное поле 4000 Гс на высоте 10^8 см [10]. Приняв, что среднее поле составляет 4000 Гс на всей площади 4000 мдп, получим $E = 8 \times 10^{33}$ эрг. Это значение можно рассматривать как абсолютный верхний предел энергии солнечных вспышек.

Энергетика звёздных супервспышек

Рассмотрим возможность накопления энергии, достаточной для звёздных супервспышек с энергией до 10^{36} эрг. При этом будем ориентироваться на упомянутую в начале статьи уже использованную концепцию сходства вспышек на Солнце и звёздах и второе выражение для энергии в предыдущем разделе. Нужно так изменить параметры звезды, чтобы получить $E = 10^{36}$ эрг. Поскольку мы предполагаем, что имеем дело со звездой солнечного типа, характеристики короны должны быть прежними. Как следствие, зависимость плотности в короне должна сохраниться и соответственно значение B_z меняется мало. Наиболее перспективным является увеличение площади. Правда, увеличить площадь на 4 порядка невозможно, средняя площадь большого пятна (300 мдп) ограничивает наши возможности. Пусть увеличение в 1000 раз, при этом запятнённая площадь составит 0.3 площади полусферы. Тогда получим энергию 3×10^{35} эрг, что в принципе уже достаточно. Остальное можно добрать незначительным 10%-ным увеличением остальных параметров.

Однако трудности не исчезли, а переместились в другую плоскость.

В самом деле, среднее магнитное поле на такой звезде составит 1–2 кГс, что не наблюдается. Избежать этого грустного вывода никак нельзя. Можно попытаться увеличить L_z , но это не очень поможет. Увеличение L_z означает, что вспышка происходит на высотах в несколько десятых долей радиуса звезды. Сколь-нибудь сильные поля на такой высоте невозможны. Кроме того, такая звезда должна демонстрировать значительную переменность как по величине магнитного поля с амплитудой колебаний 800–1200 Гс, по яркости – на 10% и в несколько раз – в EUV- и микроволновом диапазоне. Пятно таких гигантских размеров должно привести к понижению средней яркости на 20–25% и некоторому изменению спектрального класса в сторону класса К. Под таким пятном должна возникнуть область сильнейшего перегрева. Такая область есть и под солнечным пятном, но там тепло диффундирует в боковые области и выходит на поверхность в виде окружающего пятно светлого кольца. Здесь диффундировать будет некуда. В подповерхностных слоях конвекция будет остановлена на большой площади. Пока не ясно, как в таких условиях будет работать динамо и

совместимо ли это с генерацией сильных полей. Однако не исключено, что недавние наблюдения магнитных полей на звёздах-близнецах молодого Солнца [11] можно понимать как указание на возможность именно такой работы звёздного динамо. По-видимому, такое динамо должно работать непосредственно на поверхности звезды, так что гипотетическое пятно, занимающее практически всю поверхность звезды, должно непрерывно регенерироваться механизмом динамо.

Над таким гигантским пятном должна возникнуть мощная корональная конденсация, и такие звёзды должны иметь очень сильное ультрафиолетовое, рентгеновское и радиоизлучение.

Продолжительности солнечных и звёздных вспышек никак не укладываются на одну прямую. Эти распределения солнечных и звёздных вспышек не могут быть объяснены одним и тем же степенным соотношением, а длительности супервспышек на порядок меньше, чем экстраполированные из мощности.

Таким образом, сформулированные еще более 30 лет назад [2] трудности не только не удалось преодолеть, но с получением новых данных проблема сопоставления солнечных вспышек и звёздных супервспышек стала еще острее. Несмотря на сходство общих физических проявлений, требует признать, что есть существенные различия либо в механизмах генерации магнитных полей, либо в основной модели вспышки, либо и в том, и в другом.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 19-02-00191а.

Литература

1. Р.Е. Гершберг, Н.И. Клиорин, Л.А. Пустильник, А.А. Шляпников. Физика звёзд средних и малых масс с активностью солнечного типа. – М.:Физматлит. 2020.
2. Р.Е. Гершберг, Э.И. Могилевский, В.Н. Обридко // Кинематика и физика небесных тел, 1987, 3 (5), 3.
3. H. Maehara, T. Shibayama, S. Notsu, et al. // Nature, 2012, 485, Iss. 7399, 478.
4. H. Maehara, T. Shibayama, Y. Notsu, et al. // Earth, Planet & Space, 2015, 67, 59.
5. M.M. Katsova, B.A. Nizamov // Geomagnetism & Aeronomy, 2018, **58**, 899.
6. V.N. Obridko, B.D. Shelting // Research Notes of the American Astronomical Society, 2018, March 13, DOI: 10.3847/2515-5172/aab55c.
7. N.G. Bludova, V.N. Obridko, O.G. Badalyan // Solar Physics, 2014, 289, Is. 3, 1013.
8. В.Н. Обридко, Ю.А. Наговицын. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза. – СПб, ВВМ, 2017, с. 248.
9. В.Н. Обридко // Солнечные пятна, комплексы активности. – М.: Наука. 1985.
10. S. Anfinogentov, A.G. Stupishin, I.I. Mysh'yakov, G.D. Fleishman // Astrophys. J. Let., 2019, 880, Iss. 2, article id. L29, 5 pp.
11. O. Kochukhov, T. Hackman, J.J. Lehtinen, A. Wehrhahn // Astron.Astrophys., 2020, 635, A142.