

Солнечная активность в мире звезд.

Р.Е.Гершберг.

Solar type activity in the world of stars, by R.E. Gershberg.

Звезды типа Т Тельца.

С.А.Ламзин.

T Tauri type stars, by S.A. Lamzin.

Звезды типа Т Тельца (TTS) выделены в особый класс Джоем¹ на основании чисто спектральных признаков: спектральный класс от G до M; бальмеровские линии водорода и Ca II в эмиссии; наличие флуоресцентных линий Fe I 4063 и 4132 Å, что является специфической особенностью класса. К настоящему времени известно почти 1000 звезд этого типа. Имеется каталог этих объектов² и однородный спектральный материал на основе сканерных наблюдений^{3,4}. Общепринято считать, что TTS – это протозвезды с $M \leq 3 M_{\odot}$ и возрастом $10^5 - 10^7$ лет.

Большинство звезд этого типа имеет избытки в коротковолновом и длиноволновом участках спектра по сравнению со звездами главной последовательности того же спектрального класса, причем примерно у 10% TTS избытки столь велики, что абсорбционный спектр, как правило, отсутствует. Для звезд характерна неправильная переменность в широком временном диапазоне: от десятков секунд ($\Delta U \sim 0.1$) до нескольких лет ($\Delta V \approx 3^m$). Самой мощной эмиссионной линией в спектре TTS является H_{α} , интенсивность которой может быть очень велика. Например, у звезды RU Lup $W_{H\alpha} \approx 200 \text{ Å}$ при $\text{FWHM} \approx 260 \text{ км/с}$. У большинства TTS линия H_{α} имеет либо симметричную форму, либо двухкомпонентную структуру, то есть состоит из двух более или менее выраженных пиков, разделенных узким провалом с фиолетовой стороны от центра линии. Положение провала характеризуется лучевыми скоростями от 30 до 300 км/с и может меняться, не показывая какой-либо закономерности. У некоторых TTS H_{α} имеет профиль типа P Cyg. Профиль, обратный P Cyg, в линии H_{α} наблюдался лишь однажды⁵, но примерно у 5% TTS такого рода профили наблюдаются у других линий бальмеровской серии. По этому признаку Уолкер⁶ выделил подкласс звезд типа YY Ori. По сравнению с остальными TTS у звезд этого типа сильнее вспышечная активность, большая величина УФ избытка и более интенсивные вариации профилей линий: из обратного P Cyg они за несколько часов превращаются в практически симметричные или с нерегулярной структурой⁷⁻⁹. Линии He I и Fe у TTS, как правило, симметричны и не имеют абсорбционных компонентов.

Изучение TTS необычайно интересно как с глобальной точки зрения теории звездообразования, так и с точки зрения проблемы происхождения солнечной системы. Однако до сих пор, несмотря на впечатляющий объем наблюдательной информации, нет единого мнения о природе этого феномена. Решить данную задачу — значит понять

источник энергии и механизм формирования эмиссионного спектра, объяснить форму профилей спектральных линий и выявить причину переменности. Вообще говоря, имеется две основных теоретических модели феномена TTS: хромосферная и аккреционная. Согласно первой из них надфотосферная область с $T > T_{eff}$, ответственная за эмиссионный спектр, представляет собой гипертрофированный аналог солнечной хромосферы. Существенная, если не основная роль в этой модели отводится магнитному полю. Согласно другой точке зрения, горячая околос звездная оболочка — результат аккреции остатков протозвездного облака на центральную протозвезду.

Качественно форма профилей эмиссионных линий естественным образом объясняется наличием развитого поля скоростей в оболочках TTS. Крупномасштабные движения вещества в окрестностях некоторых протозвезд особенно ярко выявились при изучении собственного движения объектов Хербига-Аро¹⁰ и при радионаблюдениях в линиях молекул CO¹¹. Изучение этих явлений приводит к выводу о сильно анизотропном, в ряде случаев биполярном разлете вещества от молодых звезд. По-видимому, об этом же свидетельствует и анализ профилей линий [O I] и [S II]¹², которые наблюдаются в спектрах примерно 30% TTS. В последние годы вблизи некоторых молодых звезд были найдены джеты — сильно коллимированные струи ($1 \sim 10^{16}$ см) горячего ($T \sim 10^4$ К) газа, движущегося со скоростями порядка десятков км/с в направлении от звезд¹³.

Характерная скорость движения вещества, определяемая по ширине профилей эмиссионных линий ~ 100 км/с. При тепловом механизме разгона плазмы до таких скоростей необходима температура $\geq 10^6$ К, и потому особую важность представляет анализ УФ и рентгеновских наблюдений TTS. У большинства звезд, исследованных со спутника IUE в диапазоне $1100\text{--}3000 \text{ \AA}$ наблюдается интенсивный континуум и эмиссионные линии с температурой возбуждения вплоть до $2 \cdot 10^5$ К (N V, Si IV, C IV)¹⁴. Например у звезды RU Lup (спектральный класс K3) светимость в этом диапазоне составляет $\sim 10\%$ от болометрической, а интенсивность линии C IV $1550 \text{ \AA}$ в 10^6 раз превышает интенсивность той же линии в спектре Солнца! Если предположить, что столь интенсивное УФ излучение обусловлено сверхмощной хромосферой, то можно показать, что структура верхней атмосферы TTS должна радикально отличаться от солнечной¹⁴. И действительно, интенсивность рентгеновского излучения TTS по данным спутника HEAO-B оказалась гораздо ниже ожидаемой: $L_x \leq 10^{31}$ эрг/с. Более того, наблюдаемый жесткий спектр излучения, соответствующий $T \geq 4 \cdot 10^6$ К и сильная переменность позволяют сделать вывод о том, что *наблюдавшееся* излучение обусловлено не коронами TTS, а явлениями, аналогичными солнечным вспышкам. Таким образом, рентгеновская светимость стационарных корон TTS должна быть еще меньше. Отсутствие в оптическом диапазоне корональных линий [Fe X] $6365 \text{ \AA}$ и [Fe XI] $5303 \text{ \AA}$ позволяет ограничить сверху меру эмиссии корон TTS и тем самым показать, что звездный ветер, аналогичный солнечному, не может объяснить темп потери массы $\dot{M}$ свыше 10^{-9}

$M_{\odot}/\text{год}^{14}$. С другой стороны, из анализа движений объектов Хербига-Аро, наблюдений в радиоконтинууме, моделирования профилей бальмеровских линий, а также из наблюдений в линиях молекул CO получается гораздо большее значение $\dot{M}^{11}$.

Объяснить дефицит рентгеновского излучения и интенсивное движение вещества в окрестностях TTS пытались с помощью моделей так называемого "теплого" ("магнитного") ветра¹⁵⁻¹⁷, в которых разгон вещества осуществляется градиентом давления альвеновских и/или магнитозвуковых волн. Сильное истечение вещества в этих моделях приводит к охлаждению плазмы, начиная с $T \lesssim 10^5 \text{ K}$ — таким образом предполагается, что квазистационарные области с корональной температурой ($T \gtrsim 10^6 \text{ K}$) у молодых звезд вообще отсутствуют.

В основе этих моделей лежит предположение о том, что наличие у TTS протяженной конвективной зоны и сравнительно быстрое осевое вращение порождают крупномасштабное магнитное поле с напряженностью свыше 10^2 Гс . Как и на Солнце, в результате должен генерироваться поток магнитозвуковых и альвеновских волн, однако гораздо более мощный. Но в отличие от Солнца — и в этом состоит второе допущение — основную долю своей энергии волны тратят не на нагрев атмосферы звезды, а на ускорение плазмы. Формально желаемый результат получается за счет соответствующего выбора одного из свободных параметров моделей — расстояния, на котором волны затухают. Однако до сих пор не предложен конкретный механизм, который мог бы реально обеспечить необходимую величину указанного параметра. Более того, непонятно, почему тот же механизм не приводит к интенсивному истечению вещества без сильного напрева из активных областей на Солнце, где напряженность магнитного поля столь же велика.

Несколько общих замечаний о хромосферных моделях. Назреда необходимость использовать теорию динамо для выяснения ее предсказаний об эволюции магнитного поля TTS. Дело в том, что по мере сжатия протозвезд к главной последовательности должна возрастать скорость их осевого вращения, а следовательно и эффективность генерации магнитного поля. В этой связи следует выяснить, может ли сопутствующее уменьшение размеров конвективной зоны и/или интенсивности конвективных движений скомпенсировать этот эффект — в противном случае феномен TTS не может быть объяснен наличием мощных хромосфер, поскольку должен проявляться тем ярче, чем ближе протозвезда подходит к главной последовательности, что, наоборот, неверно. Стоит также выяснить, не происходит ли эволюция магнитного поля в режиме автоподстройки, поскольку чем выше напряженность поля, тем интенсивнее звездный ветер и тем быстрее он будет уносить угловой момент протозвезды, тормозя ее вращение. Не потому ли, кстати, не столь велико, как ожидалось, значение $v \sin i$ у TTS¹⁸ ($\sim 10 \text{ км/с}$)? И, наконец, отметим следующее. Если профили бальмеровских линий водорода у TTS имеют обычно более или менее сложную форму, то линии He I, как правило, симметричны. В чисто хромосферной модели этого быть не может, поскольку линии

Не I должны формироваться в более высоких слоях атмосферы. Это наводит на мысль о том, что у TTS должно быть две пространственно разделенных надфотосферных области с $T \sim 10^4$ К. Таким образом, не отрицая возможности существования у протозвезд мощных хромосфер, имеет смысл предположить, что не менее важную роль в самом факте существования феномена TTS играют другие факторы. Если оставить в стороне весьма интересную, но не исследованную пока возможность эффектов двойственности, речь может идти об аккреционном (протопланетном?) диске. Существованию газо-пылевых дисков вокруг протозвезд не только вполне естественно с теоретической точки зрения, но и косвенно подтверждается наблюдениями: наличием поляризации в видимой части спектра и избытков в далеком ИК диапазоне, биполярностью истечения вещества и т.п.¹⁹ До сих пор, однако, не было выполнено моделирование профилей и интенсивности линейчатого излучения для случая дисковой аккреции на TTS, поскольку такого рода расчеты сложнее, чем в случае сферически симметричной оболочки из-за возможности ухода лаймановского излучения в направлении, перпендикулярном плоскости диска. Необходимо отметить также следующее. Дисковая аккреция должна приводить к ускорению осевого вращения протозвезды. Оценки показывают, что характерное время раскрутки $\sim 10^6$ лет, тогда как возраст большинства TTS превышает эту величину в 5–6 раз. Отсюда следует, что должен существовать механизм, позволяющий отбрасывать от протозвезды значительную часть аккрецируемого вещества и уносить тем самым избыток углового момента, в некотором смысле подобно тому, как это происходит в центробежной форсунке. Очевидно, что при моделировании профилей линий в рамках теории дисковой аккреции необходимо этот эффект учитывать. В последние годы появилось несколько работ, в которых предложены конкретные механизмы, посредством которых падение вещества в экваториальной плоскости преобразуется в биполярное истечение вдоль оси вращения^{20–22}. Однако ни одна из предложенных моделей не доведена до уровня предсказаний, однозначно проверяемых наблюдениями, и потому нет смысла останавливаться на них подробно, тем более, что аналогичная проблема джетов во внегалактической астрономии остается нерешенной уже почти два десятка лет.

Вкратце остановимся на проблеме переменности. TTS меняют свой блеск во всех областях спектра (от радио до рентгена) с различной амплитудой и в широком временном диапазоне. Неоднократно высказывалась мысль о том, что долгопериодические ($\sim$ несколько лет) неправильные колебания блеска обусловлены циклами активности, аналогичными солнечным, однако до сих пор не сделано ни одной попытки проверить эту гипотезу с помощью теории динамо. Не ясно, можно ли объяснить короткопериодическую ($\sim$ несколько часов) переменность в оптическом и рентгеновском диапазонах сверхмощными хромосферными вспышками. Абсолютной загадкой является феномен FU Ori. Существенным достижением стало обнаружение периодичности колебаний блеска у нескольких звезд, которая интерпретируется как следст-

вно гигантских пятен и/или факелов на вращающихся протопланетах. Приятно отметить вклад советских астрономов в это открытие.^{23, 24} Вместе с тем появились и новые загадки – эффект насыщения линии излучения цента при ослаблении блеска²⁵, и наблюдавшаяся в течение одного сезона периодичность изменения профиля линии H_{α} у EW Aul²⁶. Очевидно, что понять механизм переменности можно лишь после полного установления о природе феномена TTS в целом. Однако изучение переменности само по себе может дать ключ к решению этой проблемы. В частности, выяснение зависимости профилей от периода вращения звезды, от ее массы, что не удалось сделать раньше, возможно, позволит прояснить природу явления, связанного с деформацией поверхности.

Изучение переменности дало обширные представления о физическом действии вращательного движения TTS. Другая, но не менее важная задача – изучение этих объектов не упростило мысли о том, что и происходит на их поверхности – это кому как угодно знать, что даже простое определение масс результатов наблюдательных и теоретических работ, полученных в рамках TTS, привело бы к большому времени, чем было бы затрачено на изучение звезд, находящихся на этой, по мнению автора, неслучайно выбранной границе между звездами и планетами.

В литературе по TTS, в частности, по EW Aul, можно найти следующие ссылки: 1) на работы по TTS: 1968, *ApJ* 156, 1091; 1969, *ApJ* 178, 1091; 1970, *ApJ* 181, 1091; 1971, *ApJ* 183, 1091; 1972, *ApJ* 185, 1091; 1973, *ApJ* 187, 1091; 1974, *ApJ* 189, 1091; 1975, *ApJ* 191, 1091; 1976, *ApJ* 193, 1091; 1977, *ApJ* 195, 1091; 1978, *ApJ* 197, 1091; 1979, *ApJ* 199, 1091; 1980, *ApJ* 201, 1091; 1981, *ApJ* 203, 1091; 1982, *ApJ* 205, 1091; 1983, *ApJ* 207, 1091; 1984, *ApJ* 209, 1091; 1985, *ApJ* 211, 1091; 1986, *ApJ* 213, 1091; 1987, *ApJ* 215, 1091; 1988, *ApJ* 217, 1091; 1989, *ApJ* 219, 1091; 1990, *ApJ* 221, 1091; 1991, *ApJ* 223, 1091; 1992, *ApJ* 225, 1091; 1993, *ApJ* 227, 1091; 1994, *ApJ* 229, 1091; 1995, *ApJ* 231, 1091; 1996, *ApJ* 233, 1091; 1997, *ApJ* 235, 1091; 1998, *ApJ* 237, 1091; 1999, *ApJ* 239, 1091; 2000, *ApJ* 241, 1091; 2001, *ApJ* 243, 1091; 2002, *ApJ* 245, 1091; 2003, *ApJ* 247, 1091; 2004, *ApJ* 249, 1091; 2005, *ApJ* 251, 1091; 2006, *ApJ* 253, 1091; 2007, *ApJ* 255, 1091; 2008, *ApJ* 257, 1091; 2009, *ApJ* 259, 1091; 2010, *ApJ* 261, 1091; 2011, *ApJ* 263, 1091; 2012, *ApJ* 265, 1091; 2013, *ApJ* 267, 1091; 2014, *ApJ* 269, 1091; 2015, *ApJ* 271, 1091; 2016, *ApJ* 273, 1091; 2017, *ApJ* 275, 1091; 2018, *ApJ* 277, 1091; 2019, *ApJ* 279, 1091; 2020, *ApJ* 281, 1091; 2021, *ApJ* 283, 1091; 2022, *ApJ* 285, 1091; 2023, *ApJ* 287, 1091; 2024, *ApJ* 289, 1091; 2025, *ApJ* 291, 1091; 2026, *ApJ* 293, 1091; 2027, *ApJ* 295, 1091; 2028, *ApJ* 297, 1091; 2029, *ApJ* 299, 1091; 2030, *ApJ* 301, 1091; 2031, *ApJ* 303, 1091; 2032, *ApJ* 305, 1091; 2033, *ApJ* 307, 1091; 2034, *ApJ* 309, 1091; 2035, *ApJ* 311, 1091; 2036, *ApJ* 313, 1091; 2037, *ApJ* 315, 1091; 2038, *ApJ* 317, 1091; 2039, *ApJ* 319, 1091; 2040, *ApJ* 321, 1091; 2041, *ApJ* 323, 1091; 2042, *ApJ* 325, 1091; 2043, *ApJ* 327, 1091; 2044, *ApJ* 329, 1091; 2045, *ApJ* 331, 1091; 2046, *ApJ* 333, 1091; 2047, *ApJ* 335, 1091; 2048, *ApJ* 337, 1091; 2049, *ApJ* 339, 1091; 2050, *ApJ* 341, 1091; 2051, *ApJ* 343, 1091; 2052, *ApJ* 345, 1091; 2053, *ApJ* 347, 1091; 2054, *ApJ* 349, 1091; 2055, *ApJ* 351, 1091; 2056, *ApJ* 353, 1091; 2057, *ApJ* 355, 1091; 2058, *ApJ* 357, 1091; 2059, *ApJ* 359, 1091; 2060, *ApJ* 361, 1091; 2061, *ApJ* 363, 1091; 2062, *ApJ* 365, 1091; 2063, *ApJ* 367, 1091; 2064, *ApJ* 369, 1091; 2065, *ApJ* 371, 1091; 2066, *ApJ* 373, 1091; 2067, *ApJ* 375, 1091; 2068, *ApJ* 377, 1091; 2069, *ApJ* 379, 1091; 2070, *ApJ* 381, 1091; 2071, *ApJ* 383, 1091; 2072, *ApJ* 385, 1091; 2073, *ApJ* 387, 1091; 2074, *ApJ* 389, 1091; 2075, *ApJ* 391, 1091; 2076, *ApJ* 393, 1091; 2077, *ApJ* 395, 1091; 2078, *ApJ* 397, 1091; 2079, *ApJ* 399, 1091; 2080, *ApJ* 401, 1091; 2081, *ApJ* 403, 1091; 2082, *ApJ* 405, 1091; 2083, *ApJ* 407, 1091; 2084, *ApJ* 409, 1091; 2085, *ApJ* 411, 1091; 2086, *ApJ* 413, 1091; 2087, *ApJ* 415, 1091; 2088, *ApJ* 417, 1091; 2089, *ApJ* 419, 1091; 2090, *ApJ* 421, 1091; 2091, *ApJ* 423, 1091; 2092, *ApJ* 425, 1091; 2093, *ApJ* 427, 1091; 2094, *ApJ* 429, 1091; 2095, *ApJ* 431, 1091; 2096, *ApJ* 433, 1091; 2097, *ApJ* 435, 1091; 2098, *ApJ* 437, 1091; 2099, *ApJ* 439, 1091; 2100, *ApJ* 441, 1091; 2101, *ApJ* 443, 1091; 2102, *ApJ* 445, 1091; 2103, *ApJ* 447, 1091; 2104, *ApJ* 449, 1091; 2105, *ApJ* 451, 1091; 2106, *ApJ* 453, 1091; 2107, *ApJ* 455, 1091; 2108, *ApJ* 457, 1091; 2109, *ApJ* 459, 1091; 2110, *ApJ* 461, 1091; 2111, *ApJ* 463, 1091; 2112, *ApJ* 465, 1091; 2113, *ApJ* 467, 1091; 2114, *ApJ* 469, 1091; 2115, *ApJ* 471, 1091; 2116, *ApJ* 473, 1091; 2117, *ApJ* 475, 1091; 2118, *ApJ* 477, 1091; 2119, *ApJ* 479, 1091; 2120, *ApJ* 481, 1091; 2121, *ApJ* 483, 1091; 2122, *ApJ* 485, 1091; 2123, *ApJ* 487, 1091; 2124, *ApJ* 489, 1091; 2125, *ApJ* 491, 1091; 2126, *ApJ* 493, 1091; 2127, *ApJ* 495, 1091; 2128, *ApJ* 497, 1091; 2129, *ApJ* 499, 1091; 2130, *ApJ* 501, 1091; 2131, *ApJ* 503, 1091; 2132, *ApJ* 505, 1091; 2133, *ApJ* 507, 1091; 2134, *ApJ* 509, 1091; 2135, *ApJ* 511, 1091; 2136, *ApJ* 513, 1091; 2137, *ApJ* 515, 1091; 2138, *ApJ* 517, 1091; 2139, *ApJ* 519, 1091; 2140, *ApJ* 521, 1091; 2141, *ApJ* 523, 1091; 2142, *ApJ* 525, 1091; 2143, *ApJ* 527, 1091; 2144, *ApJ* 529, 1091; 2145, *ApJ* 531, 1091; 2146, *ApJ* 533, 1091; 2147, *ApJ* 535, 1091; 2148, *ApJ* 537, 1091; 2149, *ApJ* 539, 1091; 2150, *ApJ* 541, 1091; 2151, *ApJ* 543, 1091; 2152, *ApJ* 545, 1091; 2153, *ApJ* 547, 1091; 2154, *ApJ* 549, 1091; 2155, *ApJ* 551, 1091; 2156, *ApJ* 553, 1091; 2157, *ApJ* 555, 1091; 2158, *ApJ* 557, 1091; 2159, *ApJ* 559, 1091; 2160, *ApJ* 561, 1091; 2161, *ApJ* 563, 1091; 2162, *ApJ* 565, 1091; 2163, *ApJ* 567, 1091; 2164, *ApJ* 569, 1091; 2165, *ApJ* 571, 1091; 2166, *ApJ* 573, 1091; 2167, *ApJ* 575, 1091; 2168, *ApJ* 577, 1091; 2169, *ApJ* 579, 1091; 2170, *ApJ* 581, 1091; 2171, *ApJ* 583, 1091; 2172, *ApJ* 585, 1091; 2173, *ApJ* 587, 1091; 2174, *ApJ* 589, 1091; 2175, *ApJ* 591, 1091; 2176, *ApJ* 593, 1091; 2177, *ApJ* 595, 1091; 2178, *ApJ* 597, 1091; 2179, *ApJ* 599, 1091; 2180, *ApJ* 601, 1091; 2181, *ApJ* 603, 1091; 2182, *ApJ* 605, 1091; 2183, *ApJ* 607, 1091; 2184, *ApJ* 609, 1091; 2185, *ApJ* 611, 1091; 2186, *ApJ* 613, 1091; 2187, *ApJ* 615, 1091; 2188, *ApJ* 617, 1091; 2189, *ApJ* 619, 1091; 2190, *ApJ* 621, 1091; 2191, *ApJ* 623, 1091; 2192, *ApJ* 625, 1091; 2193, *ApJ* 627, 1091; 2194, *ApJ* 629, 1091; 2195, *ApJ* 631, 1091; 2196, *ApJ* 633, 1091; 2197, *ApJ* 635, 1091; 2198, *ApJ* 637, 1091; 2199, *ApJ* 639, 1091; 2200, *ApJ* 641, 1091; 2201, *ApJ* 643, 1091; 2202, *ApJ* 645, 1091; 2203, *ApJ* 647, 1091; 2204, *ApJ* 649, 1091; 2205, *ApJ* 651, 1091; 2206, *ApJ* 653, 1091; 2207, *ApJ* 655, 1091; 2208, *ApJ* 657, 1091; 2209, *ApJ* 659, 1091; 2210, *ApJ* 661, 1091; 2211, *ApJ* 663, 1091; 2212, *ApJ* 665, 1091; 2213, *ApJ* 667, 1091; 2214, *ApJ* 669, 1091; 2215, *ApJ* 671, 1091; 2216, *ApJ* 673, 1091; 2217, *ApJ* 675, 1091; 2218, *ApJ* 677, 1091; 2219, *ApJ* 679, 1091; 2220, *ApJ* 681, 1091; 2221, *ApJ* 683, 1091; 2222, *ApJ* 685, 1091; 2223, *ApJ* 687, 1091; 2224, *ApJ* 689, 1091; 2225, *ApJ* 691, 1091; 2226, *ApJ* 693, 1091; 2227, *ApJ* 695, 1091; 2228, *ApJ* 697, 1091; 2229, *ApJ* 699, 1091; 2230, *ApJ* 701, 1091; 2231, *ApJ* 703, 1091; 2232, *ApJ* 705, 1091; 2233, *ApJ* 707, 1091; 2234, *ApJ* 709, 1091; 2235, *ApJ* 711, 1091; 2236, *ApJ* 713, 1091; 2237, *ApJ* 715, 1091; 2238, *ApJ* 717, 1091; 2239, *ApJ* 719, 1091; 2240, *ApJ* 721, 1091; 2241, *ApJ* 723, 1091; 2242, *ApJ* 725, 1091; 2243, *ApJ* 727, 1091; 2244, *ApJ* 729, 1091; 2245, *ApJ* 731, 1091; 2246, *ApJ* 733, 1091; 2247, *ApJ* 735, 1091; 2248, *ApJ* 737, 1091; 2249, *ApJ* 739, 1091; 2250, *ApJ* 741, 1091; 2251, *ApJ* 743, 1091; 2252, *ApJ* 745, 1091; 2253, *ApJ* 747, 1091; 2254, *ApJ* 749, 1091; 2255, *ApJ* 751, 1091; 2256, *ApJ* 753, 1091; 2257, *ApJ* 755, 1091; 2258, *ApJ* 757, 1091; 2259, *ApJ* 759, 1091; 2260, *ApJ* 761, 1091; 2261, *ApJ* 763, 1091; 2262, *ApJ* 765, 1091; 2263, *ApJ* 767, 1091; 2264, *ApJ* 769, 1091; 2265, *ApJ* 771, 1091; 2266, *ApJ* 773, 1091; 2267, *ApJ* 775, 1091; 2268, *ApJ* 777, 1091; 2269, *ApJ* 779, 1091; 2270, *ApJ* 781, 1091; 2271, *ApJ* 783, 1091; 2272, *ApJ* 785, 1091; 2273, *ApJ* 787, 1091; 2274, *ApJ* 789, 1091; 2275, *ApJ* 791, 1091; 2276, *ApJ* 793, 1091; 2277, *ApJ* 795, 1091; 2278, *ApJ* 797, 1091; 2279, *ApJ* 799, 1091; 2280, *ApJ* 801, 1091; 2281, *ApJ* 803, 1091; 2282, *ApJ* 805, 1091; 2283, *ApJ* 807, 1091; 2284, *ApJ* 809, 1091; 2285, *ApJ* 811, 1091; 2286, *ApJ* 813, 1091; 2287, *ApJ* 815, 1091; 2288, *ApJ* 817, 1091; 2289, *ApJ* 819, 1091; 2290, *ApJ* 821, 1091; 2291, *ApJ* 823, 1091; 2292, *ApJ* 825, 1091; 2293, *ApJ* 827, 1091; 2294, *ApJ* 829, 1091; 2295, *ApJ* 831, 1091; 2296, *ApJ* 833, 1091; 2297, *ApJ* 835, 1091; 2298, *ApJ* 837, 1091; 2299, *ApJ* 839, 1091; 2300, *ApJ* 841, 1091; 2301, *ApJ* 843, 1091; 2302, *ApJ* 845, 1091; 2303, *ApJ* 847, 1091; 2304, *ApJ* 849, 1091; 2305, *ApJ* 851, 1091; 2306, *ApJ* 853, 1091; 2307, *ApJ* 855, 1091; 2308, *ApJ* 857, 1091; 2309, *ApJ* 859, 1091; 2310, *ApJ* 861, 1091; 2311, *ApJ* 863, 1091; 2312, *ApJ* 865, 1091; 2313, *ApJ* 867, 1091; 2314, *ApJ* 869, 1091; 2315, *ApJ* 871, 1091; 2316, *ApJ* 873, 1091; 2317, *ApJ* 875, 1091; 2318, *ApJ* 877, 1091; 2319, *ApJ* 879, 1091; 2320, *ApJ* 881, 1091; 2321, *ApJ* 883, 1091; 2322, *ApJ* 885, 1091; 2323, *ApJ* 887, 1091; 2324, *ApJ* 889, 1091; 2325, *ApJ* 891, 1091; 2326, *ApJ* 893, 1091; 2327, *ApJ* 895, 1091; 2328, *ApJ* 897, 1091; 2329, *ApJ* 899, 1091; 2330, *ApJ* 901, 1091; 2331, *ApJ* 903, 1091; 2332, *ApJ* 905, 1091; 2333, *ApJ* 907, 1091; 2334, *ApJ* 909, 1091; 2335, *ApJ* 911, 1091; 2336, *ApJ* 913, 1091; 2337, *ApJ* 915, 1091; 2338, *ApJ* 917, 1091; 2339, *ApJ* 919, 1091; 2340, *ApJ* 921, 1091; 2341, *ApJ* 923, 1091; 2342, *ApJ* 925, 1091; 2343, *ApJ* 927, 1091; 2344, *ApJ* 929, 1091; 2345, *ApJ* 931, 1091; 2346, *ApJ* 933, 1091; 2347, *ApJ* 935, 1091; 2348, *ApJ* 937, 1091; 2349, *ApJ* 939, 1091; 2350, *ApJ* 941, 1091; 2351, *ApJ* 943, 1091; 2352, *ApJ* 945, 1091; 2353, *ApJ* 947, 1091; 2354, *ApJ* 949, 1091; 2355, *ApJ* 951, 1091; 2356, *ApJ* 953, 1091; 2357, *ApJ* 955, 1091; 2358, *ApJ* 957, 1091; 2359, *ApJ* 959, 1091; 2360, *ApJ* 961, 1091; 2361, *ApJ* 963, 1091; 2362, *ApJ* 965, 1091; 2363, *ApJ* 967, 1091; 2364, *ApJ* 969, 1091; 2365, *ApJ* 971, 1091; 2366, *ApJ* 973, 1091; 2367, *ApJ* 975, 1091; 2368, *ApJ* 977, 1091; 2369, *ApJ* 979, 1091; 2370, *ApJ* 981, 1091; 2371, *ApJ* 983, 1091; 2372, *ApJ* 985, 1091; 2373, *ApJ* 987, 1091; 2374, *ApJ* 989, 1091; 2375, *ApJ* 991, 1091; 2376, *ApJ* 993, 1091; 2377, *ApJ* 995, 1091; 2378, *ApJ* 997, 1091; 2379, *ApJ* 999, 1091; 2380, *ApJ* 1001, 1091; 2381, *ApJ* 1003, 1091; 2382, *ApJ* 1005, 1091; 2383, *ApJ* 1007, 1091; 2384, *ApJ* 1009, 1091; 2385, *ApJ* 1011, 1091; 2386, *ApJ* 1013, 1091; 2387, *ApJ* 1015, 1091; 2388, *ApJ* 1017, 1091; 2389, *ApJ* 1019, 1091; 2390, *ApJ* 1021, 1091; 2391, *ApJ* 1023, 1091; 2392, *ApJ* 1025, 1091; 2393, *ApJ* 1027, 1091; 2394, *ApJ* 1029, 1091; 2395, *ApJ* 1031, 1091; 2396, *ApJ* 1033, 1091; 2397, *ApJ* 1035, 1091; 2398, *ApJ* 1037, 1091; 2399, *ApJ* 1039, 1091; 2400, *ApJ* 1041, 1091; 2401, *ApJ* 1043, 1091; 2402, *ApJ* 1045, 1091; 2403, *ApJ* 1047, 1091; 2404, *ApJ* 1049, 1091; 2405, *ApJ* 1051, 1091; 2406, *ApJ* 1053, 1091; 2407, *ApJ* 1055, 1091; 2408, *ApJ* 1057, 1091; 2409, *ApJ* 1059, 1091; 2410, *ApJ* 1061, 1091; 2411, *ApJ* 1063, 1091; 2412, *ApJ* 1065, 1091; 2413, *ApJ* 1067, 1091; 2414, *ApJ* 1069, 1091; 2415, *ApJ* 1071, 1091; 2416, *ApJ* 1073, 1091; 2417, *ApJ* 1075, 1091; 2418, *ApJ* 1077, 1091; 2419, *ApJ* 1079, 1091; 2420, *ApJ* 1081, 1091; 2421, *ApJ* 1083, 1091; 2422, *ApJ* 1085, 1091; 2423, *ApJ* 1087, 1091; 2424, *ApJ* 1089, 1091; 2425, *ApJ* 1091, 1091; 2426, *ApJ* 1093, 1091; 2427, *ApJ* 1095, 1091; 2428, *ApJ* 1097, 1091; 2429, *ApJ* 1099, 1091; 2430, *ApJ* 1101, 1091; 2431, *ApJ* 1103, 1091; 2432, *ApJ* 1105, 1091; 2433, *ApJ* 1107, 1091; 2434, *ApJ* 1109, 1091; 2435, *ApJ* 1111, 1091; 2436, *ApJ* 1113, 1091; 2437, *ApJ* 1115, 1091; 2438, *ApJ* 1117, 1091; 2439, *ApJ* 1119, 1091; 2440, *ApJ* 1121, 1091; 2441