

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.В. Иванов, В.П. Решетников, К.В. Холшевников

ВСЕЛЕННАЯ В ЧИСЛАХ И ФАКТАХ

Учебное пособие

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2008

*Печатается по постановлению Редакционно-издательского совета
математико-механического факультета Санкт-Петербургского
государственного университета*

Иванов В.В., Решетников В.П., Холшевников К.В.

Вселенная в числах и фактах: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ, ВВМ,
2008. – 76 с.

Пособие предназначено для студентов астрономических специальностей, а также для всех, кто нуждается в базовой астрономической информации. В первой части пособия приведен “числовой портрет” Вселенной на всех ее уровнях – от атомных ядер до Вселенной в целом. (Предыдущая версия этого “портрета” была опубликована в книге В.В. Иванова, А.В. Кривова и П.А. Денисенкова “Парадоксальная Вселенная”, СПб: Изд. СПбГУ, 1997.) Во второй части собраны данные о крупнейших наземных оптических телескопах и радиотелескопах, об избранных космических обсерваториях, о космических аппаратах, а также приведен ряд других сведений. Завершают книгу две статьи, дающие общую картину современной астрономии и астрофизики.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке грантами ведущих научных школ РФ НШ-1318.2008.2 и НШ-1323.2008.2.

© В.В. Иванов, В.П. Решетников, К.В. Холшевников, 2008
© С.-Петербургский гос. университет, 2008

Фундаментальные постоянные

Гравитационная постоянная	$6.67 \cdot 10^{-8} \approx$ $1/15\,000\,000$	$\text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$
Скорость света в вакууме	$3.00 \cdot 10^{10}$	см/с
Постоянная Планка	$6.63 \cdot 10^{-27}$	эрг · с

Атомные ядра

Размер протона	$0.8 \cdot 10^{-13}$	см
Масса протона	$1.67 \cdot 10^{-24}$	г
Заряд протона	$4.8 \cdot 10^{-10}$	ед. СГСЭ
Средняя плотность ядерного вещества	$2 \cdot 10^{14}$	$\text{г}/\text{см}^3$
Единица энергии 1 эВ	$1.6 \cdot 10^{-12}$	эрг
Характерное значение энергии связи нуклона в ядре	$7 \div 8$	МэВ
Масса протона / масса электрона	1836	
Атомная единица массы	(масса ядра ^{12}C)/12	
Энергия покоя атомной единицы массы	931	МэВ
Энергия покоя электрона	0.511	МэВ

Атомы и фотоны

Радиус первой бордовской орбиты	$0.5 \cdot 10^{-8}$	см
Длина волны видимого света (порядок величины)	$5 \cdot 10^{-5}$ 5 000	см ангстрем
Энергия ионизации атома водорода из основного состояния	13.6	эВ
Энергии ионизации различных атомов	$5 \div 20$	эВ
Постоянная Больцмана	$1.38 \cdot 10^{-16}$	эрг/К

Человек и человечество

Характерный линейный размер человека	100	см
Характерная масса человека	10^5	г

Характерное время жизни человека	$2 \cdot 10^9$	с
Плотность тела человека	1	г/см ³
Химический состав тела человека (по массе):		
кислород	65%	
углерод	18%	
водород	17%	
все другие элементы, вместе взятые	менее 1%	
Темп энерговыделения	10^4	эрг/(г · с)
Предельно малая осязаемая масса	0.1	г
Предельно малое временное разрешение органов чувств человека	0.1	с
Предельно малое линейное разрешение глаза	0.01	см
Предельно малое угловое разрешение глаза	1	угл. мин.
Число людей на Земле	$6 \cdot 10^9$	
Число астрономов	$1 \cdot 10^4$	

Окружающая среда

Число молекул в 1 см ³ воздуха (число Лошмита)	$3 \cdot 10^{19}$	
Плотность воздуха	$1.3 \cdot 10^{-3}$	г/см ³
Молярная масса воздуха	29	г/моль
Тепловые скорости молекул воздуха	0.5	км/с
Тепловые энергии молекул воздуха	0.025	эВ
Температура окружающей среды	300	К
Плотности:		
вода	1	г/см ³
железо	7.8	г/см ³
Размер Санкт-Петербурга	30	км
Высота однородной атмосферы	8	км
Яркость безлунного неба (в полосе <i>B</i>)	$22 \div 23$	зв. вел./ (угл. сек.) ²

Земля

Радиус Земли	6 400	км
Сжатие Земли	1/300	
Длина дуги 1° меридиана	111	км
Масса Земли	$6 \cdot 10^{27}$	г
Средняя плотность Земли	5.5	г/см ³
Скорость убегания с поверхности Земли	11.2	км/с
Ускорение свободного падения	980	см/с ²
Скорость вращения Земли на экваторе	0.5	км/с
Напряженность магнитного поля	0.5	Гс
Скорость движения литосферных плит	~2	см/год
Наклон экватора к эклиптике	23°26'	
Период лунно-солнечной прецессии	26 000	лет
Общая прецессия в эклиптике	50	угл. сек./год
Число секунд в сутках	86 400	
Число секунд в году	$3 \cdot 10^7$	
Возраст Земли	$4.5 \cdot 10^9$	лет
Возраст жизни на Земле	$\sim 3.5 \cdot 10^9$	лет
Появление многоклеточных организмов	$\sim 1 \cdot 10^9$	лет назад
Появление позвоночных	$0.5 \cdot 10^9$	лет назад
Вымирание динозавров	$65 \cdot 10^6$	лет назад
Появление человека	$\sim 10^6$	лет назад

Луна

Расстояние до Луны	400 000	км
	1/400	а.е.
	1.3	световых секунд
Видимая звездная величина полной Луны	-13^m	

Видимый угловой диаметр Луны	0.°5	
Наклон орбиты Луны к плоскости эклиптики	5°	
Масса Луны / масса Земли	1/81	
Ускорение силы тяжести на Луне	160	см/с ²
Скорость убегания с поверхности Луны	2.4	км/с
Синодический месяц	29.5	сут
Сидерический месяц	27.3	сут

Солнечная система

Астрономическая единица	149.6 · 10 ⁶	км	
	1.5 · 10 ¹³	см	
	500	свет. сек.	
Скорость движения Земли по орбите	30	км/с	
Размер Солнечной системы (до орбиты Плутона)	40	а.е.	
	6 · 10 ¹⁴	см	
	7	свет. часов	
	1 · 10 ⁴	R _☉	
Период обращения Плутона вокруг Солнца	250	лет	
Юпитер:	период обращения вокруг Солнца	12	лет
		5	а.е.
	большая полуось орбиты	0.001	M _☉
		300	M _⊕
	средняя плотность	1.3	г/см ³
	период осевого вращения	10	часов

Все планеты движутся вокруг Солнца против часовой стрелки (если смотреть со стороны северного полюса)

Солнце

Масса	$2 \cdot 10^{33}$	г
Светимость	$4 \cdot 10^{33}$	эрг/с
Радиус	700 000	км
Средняя плотность	1.4	г/см ³
Темп энерговыделения	2	эрг/(г · с)
Скорость убегания с “поверхности”	600	км/с
Период вращения на экваторе		
синодический	27	сут
сидерический	25	сут
Ускорение силы тяжести на “поверхности”	$3 \cdot 10^4$	см/с ²
В центре диска Солнца 1'' соответствует	750	км

Солнце как звезда

Температура “поверхности”	5 800	К
Плотность на “поверхности”	10^{-7}	г/см ³
Химический состав солнечной атмосферы (по массе):		
водород	70%	
гелий	28%	
остальные элементы, вместе взятые	2%	
Абсолютная звездная величина (в полосе <i>V</i>)	+4.8 ^m	
Видимая звездная величина		
в полосе <i>V</i>	-26.7 ^m	
боллометрическая	-26.8 ^m	
Показатель цвета <i>B – V</i>	+0.65 ^m	
Спектральный класс	G2V	
Магнитное поле в солнечных пятнах	1 000 ÷ 4 000	Гс
Температура солнечной короны	$1 \cdot 10^6$	К
Температура в центре Солнца	$1.5 \cdot 10^7$	К
Плотность в центре Солнца	150	г/см ³

Звезды

А. Нормальные звезды

Массы	$0.1 \div 100$	M_{\odot}
Радиусы:		
главная последовательность	$0.1 \div 25$	R_{\odot}
красные гиганты и сверхгиганты	$10 \div 1\,000$	
Светимости	$10^{-4} \div 10^6$	L_{\odot}
Массы	$0.1 \div 100$	M_{\odot}
Темп энерговыделения	$10^{-3} \div 10^4$	эрг/(г · с)
Наивысшие светимости	$10^{39} \div 10^{40}$	эрг/с
Средние плотности:		
главная последовательность	$0.01 \div 100$	г/см ³
красные гиганты и сверхгиганты	$10^{-7} \div 10^{-2}$	
Температуры “поверхностей”	$3\,000 \div 50\,000$	К

Б. Белые карлики

Массы:		
средние	0.6	M_{\odot}
максимальные	1.4	
Радиусы	~ 0.01	R_{\odot}
Средние плотности	$10^5 \div 10^7$	г/см ³
Магнитные поля	вплоть до $10^6 \div 10^8$	Гс

В. Нейтронные звезды

Массы	не более $2 \div 3$	M_{\odot}
Радиусы	$10 \div 15$	км
Средние плотности	$10^{13} \div 10^{14}$	г/см ³
Магнитные поля	до 10^{14}	Гс
Периоды осевого вращения	$0.0015 \div 10$	с

Межзвездная среда

Масса звезд Галактики / масса межзвездного вещества	30	
Масса межзвездного газа / масса меж- звездной пыли	100	

Диапазон температур межзвездного газа	$10^1 \div 10^7$	К
Средняя плотность межзвездной среды	10^{-24}	г/см ³
Концентрации частиц	$10^{-3} \div 10^8$	см ⁻³
Напряженность магнитного поля	$(3 \div 5) \cdot 10^{-6}$	Гс
Газовые туманности: концентрация частиц температура газа	$10^2 \div 10^4$ $(8 \div 12) \cdot 10^3$	см ⁻³ К

Галактика

Диаметр Галактики	30	кпк
Толщина диска	1	кпк
Масса Галактики	$10^{11} \div 10^{12}$	M_{\odot}
Морфологический тип	SBbc	
Абсолютная звездная величина (в полосе V)	-20.5^m	
Масса атомарного водорода	$4 \cdot 10^9$	M_{\odot}
Расстояние от Солнца до центра Галактики	8	кпк
Число звезд в Галактике: нормальные белые карлики нейтронные звездные черные дыры	10^{11} 10^{10} 10^8 10^7	
Скорость движения Солнца вокруг центра Галактики	200 – 220	км/с
Галактический год	$2 \cdot 10^8$	лет
Единица межзвездных расстояний	1 пк = 3.26 св.года = 206 265 а.е. = $3 \cdot 10^{18}$ см	
Единица скоростей в звездной астрономии (1 а.е./год)	4.74	км/с

Расстояние до α Cen	1.3 4.3	пк светового года
Скорость Солнца относительно окрестных звезд	20	км/с
Наибольшее собственное движение (звезда Барнарда)	10	угл.сек./год
Плотность вещества в окрестностях Солнца (включая вещество звезд)	10^{-23} 0.1	г/см ³ $M_{\odot}/\text{пк}^3$
Межзвездное поглощение в полосе V в плоскости Галактики	~ 1.5	зв.вел./кпк
Шаровые скопления: полное число в Галактике непосредственно наблюдается число звезд в одном скоплении	200 150 $10^5 \div 10^6$	

Галактики

Расстояния: Большое Магелланово Облако туманность Андромеды (M 31) центр скопления галактик в Деве	55 700 20	кпк кпк Мпк
Размеры галактик	$1 \div 100$	кпк
Абсолютные звездные величины (полоса B)	$-10^m \div -23^m$	
Показатели цвета $B - V$	$+0.4 \div +0.9$	
Скорости вращения спиральных галактик	$50 \div 300$	км/с
Отношение масса–светимость	$1 \div 10$	M_{\odot}/L_{\odot}
Среднее расстояние между галактиками / размер типичной галактики	$10 \div 100$	
Средняя встречаемость галактик: эллиптические / линзовидные / спиральные	10 / 20 / 70	%

Пространственная плотность:		
нормальные галактики	$\sim 10^{-2}$	$M_{\text{ПК}}^{-3}$
сейфертовские галактики	$\sim 10^{-4}$	$M_{\text{ПК}}^{-3}$
радиогалактики	$\sim 10^{-6}$	$M_{\text{ПК}}^{-3}$
квазары	$\sim 10^{-7}$	$M_{\text{ПК}}^{-3}$
Скопления галактик:		
масса	$10^{14} \div 10^{15}$	M_{\odot}
пространственная плотность	$\sim 10^{-6}$	$M_{\text{ПК}}^{-3}$
Число галактик в наблюдаемой части Вселенной	10^{11}	

Вселенная

Постоянная Хаббла (H)	70	км/(с·Мпк)
Хаббловское время (1/H)	10^{10}	лет
Хаббловское расстояние (c/H)	10^{28}	см
Эпоха рекомбинации:		
возраст	$4 \cdot 10^5$	лет
красное смещение (z)	10^3	
температура	3000	К
Температура реликтового излучения	2.7	К
Амплитуда флуктуаций температуры реликтового излучения ($\Delta T/T$)	10^{-5}	
Средняя плотность Вселенной	10^{-29}	г/см ³
Плотность видимого вещества / плотность скрытой массы / плотность темной энергии	$\sim 5 / 25 / 70$	%
Время, прошедшее с начала расширения,		
к $z = 0$ (возраст Вселенной)	$14 \cdot 10^9$	лет
$z = 1$	$6 \cdot 10^9$	лет
$z = 5$	$1 \cdot 10^9$	лет

Математические постоянные

$$\pi = 3.141593 \approx 3.14$$

$$\pi^2 \approx 9.87 \approx 10$$

$$\sqrt{\pi} \approx 1.77$$

$$e = 2.718282 \approx 2.72$$

$$e^3 = 20.0855 \approx 20$$

$$\lg e = 0.4343 \approx 0.43; \quad e \approx 10^{0.43}$$

$$\ln 10 = 2.3026 \approx 2.30; \quad e^{2.30} \approx 10$$

$$\lg 2 = 0.30103 \approx 0.301$$

$$2^{10} = 10^{3.01} = 1024$$

$$\sqrt{2} \approx 1.41$$

$$\sqrt{3} \approx 1.73$$

$$\sqrt{10} \approx 3.16 \approx \pi$$

$$1 \text{ радиан} = 180/\pi = 57.29578 \text{ град.} = 206\,265 \text{ угл. сек.}$$

$$1 \text{ стеррад.} = (180/\pi)^2 = 3282.8 \text{ кв. град.}$$

$$\text{Площадь единичной сферы} = 4\pi \text{ стеррад.} = 41\,253 \text{ кв. град.}$$

$$1 \text{ кв. град.} = 3.046 \cdot 10^{-4} \text{ стеррад.}$$

$$1 \text{ угл. сек.}^2 = 2.3504 \cdot 10^{-11} \text{ стеррад.}$$

Греческий алфавит

Буква	Название	Буква	Название	Буква	Название
Α α	альфа	Ι ι	йота	Ρ ρ	ро
Β β	бета	Κ κ	каппа	Σ σ	сигма
Γ γ	гамма	Λ λ	лямбда	Τ τ	тау
Δ δ	дельта	Μ μ	мю	Υ υ	ипсилон
Ε ε	эпсилон	Ν ν	ню	Φ φ	фи
Ζ ζ	дзета	Ξ ξ	кси	Χ χ	хи
Η η	эта	Ο ο	омикрон	Ψ ψ	пси
Θ θ	тэта	Π π	пи	Ω ω	омега

Связь систем единиц

$$1 \text{ Н} = 10^5 \text{ дин}$$

$$1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Т}$$

$$1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг} = 0.239 \text{ кал}$$

$$1 \text{ Па} = 10 \text{ дин/см}^2$$

$$1 \text{ Вт} = 10^7 \text{ эрг/с}$$

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101\,325 \text{ Па}$$

Крупнейшие оптические телескопы (конец 2007 года)

Диаметр объектива (м)	Название	Расположение	Начало наблюдений	Высота над уровнем моря (м)
10.4	GTC (Gran Telescopio Canarias)	La Palma, Canary Islands, Spain	2007	2400
10.0 10.0	Keck Keck II	Mauna Kea, Hawaii, USA	1990 1996	4123
10	SALT (Southern African Large Telescope)	South African Astronomical Observatory	2005	1759
9.2	Hobby-Eberly	Mt.Fowlkes, Texas, USA	1996	2072
8.4+8.4	LBT (Large Binocular Telescope)	Mt.Graham, Arizona, USA	2007	3170
8.3	Subaru	Mauna Kea, Hawaii, USA	1999	4100
8.2 8.2 8.2 8.2	Antu Kueyen Melipal Yepun	Cerro Paranal, Chile	1998 – 2000	2635
8.1 8.1	Gemini North (Gillett) Gemini South	Mauna Kea, Hawaii, USA Cerro Pachon, Chile	1998 2000	4100 2737
6.5 6.5 6.5	MMT (Multiple Mirror Telescope) Magellan I (Walter Baade) Magellan II (Landon Clay)	Mt.Hopkins, Arizona, USA La Serena, Chile	1998 2000 2002	2600 2282
6.0 6.0	БТА (Большой Телескоп Азимутальный) LZT ¹ (Large Zenith Telescope)	Нижний Архыз, Россия British Columbia, Canada	1976 2001	2070 395
5.0	Hale	Mt.Palomar, California, USA	1948	1900

(1) – Жидкое зеркало (ртуть). Наблюдения возможны только в области зенита.

Избранные радиотелескопы

Обсерватория	Радиотелескоп	Описание, рабочий диапазон
Arecibo Observatory (входит в состав National Astronomy and Ionosphere Center, USA) (Puerto Rico)	305-м радиотелескоп	неподвижная сферическая чаша диаметром 305 м, расположенная в кратере потухшего вулкана, см-дм
Effelsberg Radio Observatory (Germany)	100-м радиотелескоп	полноповоротный, рабочий диапазон 3.5 мм – 90 см
Jodrell Bank Observatory (UK)	76-м Lovell Telescope	полноповоротный телескоп, дм

Green Bank (NRAO, USA)	GBT – Robert C. Byrd Green Bank Telescope	100-м полноповоротный радиотелескоп, см–дм
National Radio Astronomy Observatory – NRAO (USA)	VLA – Very Large Array	радиоинтерферометр из 27 полноповоротных 25-м телескопов, расположенных в виде 36 километровой буквы “Y”; максимальное разрешение – 0."04 на длине волны 0.7 см
National Radio Astronomy Observatory – NRAO (USA)	VLBA – Very Long Baseline Array	радиоинтерферометр из 10 телескопов диаметром 25 м, разбросанных по территории США; максимальное разрешение – 0."0002 на 0.7 см.
National Centre for Radio Astrophysics (India)	GMRT – Giant Metrewave Radio Telescope	интерферометр из 30 полноповоротных 45-м параболических антенн, максимальная база – 25 км; разрешение в метровом диапазоне $\sim 1', 2''$ на 21 см
Nancay Radio Observatory (France)	Decimetric radiotelescope	состоит из двух зеркал – плоского отражателя размером 200 м \times 40 м и сферического рефлектора размером 300 м \times 35 м, 10-30 см
Nobeyama Radio Observatory (Japan)	45-м радиотелескоп	полноповоротный радиотелескоп, мм; максимальное разрешение 15" на 3 мм
Parkes Observatory (Australia)	64-м радиотелескоп	полноповоротный радиотелескоп, дм
Pico Veleta (Spain)	30-м радиотелескоп IRAM (Institut de Radioastronomie Millimetrique)	полноповоротный, диапазон 0.8 мм – 3 мм
Westerbork Observatory (Netherlands)	Westerbork Synthesis Radio Telescope	радиоинтерферометр из 14 полноповоротных 25-м антенн, расположенных вдоль 3-км прямой; см–дм
Институт прикладной астрономии (ИПА РАН)	РСДБ “Квазар”	радиоинтерферометр из 3-х 32-м полноповоротных телескопов (п. Светлое – ст. Зеленчукская – п. Бадары), см–дм
Институт солнечной земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН)	ССРТ – Сибирский солнечный радиотелескоп	крестообразный интерферометр из 256 2.5-м антенн, длина базы – 600 м, рабочая длина волны 5.2 см, разрешение 15"
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория (ПРАО АКЦ ФИАН)	22-м радиотелескоп РТ-22	полноповоротный, мм–см

Пуштинская радиоастрономическая обсерватория (ПРАО АКЦ ФИАН)	БСА – Большая синфазная антенна	многоэлементная фазируемая решетка размером 300 м × 200 м, м
Пуштинская радиоастрономическая обсерватория (ПРАО АКЦ ФИАН)	ДКР-1000 – Диапазонный крестообразный радиотелескоп	два параболических цилиндра шириной 40 м и длиной 1 км, 2.5–10 м
Специальная астрофизическая обсерватория (САО РАН)	600-м телескоп РАТАН-600	кольцо из 895 отраж. элементов, 1–30 см

Избранные космические обсерватории

- **Ariel 1, 2, 3, 4, 5, 6 (UK)**

Первый в мире астрономический спутник – Ariel 1 – был запущен в 1962 году Великобританией. Ariel 1 исследовал ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца, построил спектр космических лучей. Спутники Ariel 2, 3 и 4 (запущены в 1964, 1967 и 1971 гг. соответственно) изучали радиоизлучение космических объектов. Ariel 5 (1974) и Ariel 6 (1979) являлись рентгеновскими обсерваториями.

- **Orbiting Astronomical Observatory (OAO) 2, 3(=C, Copernicus) (NASA)**

Ультрафиолетовая обсерватория OAO-2 была запущена в 1968 г. и успешно работала более года. С ее помощью было обнаружено ультрафиолетовое излучение центра Туманности Андромеда (M 31). OAO-C после запуска в 1970 году был назван OAO-3, а позднее переименован в обсерваторию имени Коперника. “Коперник” нес на борту 80-см телескоп, предназначенный для изучения ультрафиолетовых (930–3000Å) спектров. Он проработал более 8 лет и позволил впервые подробно изучить ультрафиолетовые спектры звезд.

- **Small Astronomy Satellite (SAS) A (=1, Explorer 42, Uhuru), B (=2, Explorer 48) (NASA)**

Explorer 42 (SAS-A) после запуска в 1970 году стал называться SAS-1, а затем был переименован в Uhuru (“ухуру” – “свобода” на языке суахили). “Ухуру” – первая в мире рентгеновская (2–20 кэВ) спутник-обсерватория. Работал более двух лет, зарегистрировал более 300 источников (двойные звезды, остатки сверхновых, сиффертовские галактики, скопления галактик). Открыл диффузное рентгеновское излу-

чение скоплений галактик. Explorer 48 (SAS-B, SAS-2) был запущен в 1972 г., работал около полугода (диапазон 20 МэВ – 1 ГэВ).

- **High Energy Astronomical Observatory 1, 2 (Einstein), 3 (NASA)**

HEAO 1 был запущен в 1977 г. и работал более года. Выполнил обзор всего неба в диапазоне от 0.2 кэВ до 10 МэВ. HEAO 2 (“Эйнштейн”) в период с 1978 по 1981 гг. зарегистрировал около 10 000 отдельных рентгеновских источников (звезд, остатков сверхновых, галактик и скоплений галактик, квазаров). Был первым телескопом, позволяющим строить рентгеновские изображения. HEAO 3 – орбитальная обсерватория, работавшая в 1979–1981 гг. в гамма-диапазоне.

- **International Ultraviolet Explorer (IUE) (ESA, NASA, UK)**

45-см ультрафиолетовый телескоп IUE был выведен в 1978 году на геостационарную орбиту и проработал 18 лет. Получено $\sim 100\,000$ спектров (диапазон 1150–3200Å) звезд, туманностей, галактик, планет и комет.

- **Infra Red Astronomical Satellite (IRAS) (NASA, Netherlands)**

IRAS – первый космический инфракрасный телескоп (диаметр главного зеркала – 57 см). Запущен в 1983 г., работал 10 месяцев. Выполнил обзор почти всего неба в диапазоне от 12 до 100 мкм. Открыл около 200 000 ИК-источников, в том числе звезд, галактик, астероидов, комет.

- **Астрон (СССР)**

80-см УФ-телескоп был выведен на орбиту в 1983 г. и работал до 1989 г. Выполнен широкий круг исследований спектров пекулярных и нестационарных звезд, квазаров и галактик, диффузного УФ-излучения Млечного Пути.

- **HIPPARCOS (ESA)**

High Precision PARallax Collecting Satellite – специализированный астрометрический спутник, оснащенный 29-см телескопом. Запущен в 1989 г., наблюдения продолжались до 1993 г. С точностью 0."001 измерил параллаксы 118 000 звезд, параллаксы $\sim 10^6$ звезд измерены с точностью 0."025.

- **COBE (NASA)**

COsmic Background Explorer был запущен в 1989. Самым знаменитым результатом его работы является открытие в 1992 году флуктуаций температуры ($\sim 10^{-5}$) реликтового излучения.

- **Hubble Space Telescope (HST) (NASA, ESA)**

Оптический телескоп с главным зеркалом диаметром 2.4-м был выведен на орбиту в 1990 г. Остается крупнейшим орбитальным телескопом. Оснащен рядом специализированных приборов, позволяющих решать большое число астрофизических задач. Основной оптический телескоп астрономии 90-х годов прошлого века. Продолжает работать по настоящее время (2007 г.).

- **Гранат (СССР)**

Предназначен для исследований в рентгеновском и гамма-диапазонах (от 2 кэВ до 100 МэВ). Запущен в 1989 г., работал до 1998 г. Особое внимание при наблюдениях уделялось построению глубоких изображений и спектроскопии объектов в центре Галактики, а также изучению рентгеновских новых и кандидатов в черные дыры.

- **ROSAT (Germany, NASA, UK)**

ROentgen SATellite – 83-см рентгеновский телескоп для работы в диапазоне 0.1-2.5 кэВ. Запущен в 1990 г., работал почти 9 лет. Выполнил обзор всего неба, открыл 150 000 рентгеновских источников (в том числе впервые обнаружены вариации излучения от пульсара Геминга, открыто рентгеновское излучение комет).

- **Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) (NASA)**

Обсерватория Compton работала на орбите с 1990 по 2000 гг. Была предназначена для наблюдений в гамма-диапазоне (от 30 кэВ до 30 ГэВ).

- **ASCA (Japan)**

Рентгеновская (диапазон 0.4 – 10 кэВ) обсерватория ASCA (Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics) работала на орбите с 1993 по 2001 гг. Наряду с получением изображений позволяла наблюдать рентгеновские спектры объектов с высоким спектральным разрешением. Основные результаты относятся к изучению активных ядер галактик, определению содержаний элементов в звездах и скоплениях галактик.

- **Infrared Space Observatory (ISO) (ESA)**

Инфракрасная обсерватория ISO была запущена в 1995 г., наблюдения продолжались до весны 1998 г. Диапазон от 2.5 до 240 мкм. Получено множество результатов парактически во всех разделах астрономии – от исследований планет и комет, звезд и околозвездных дисков, до изучения изображений и спектров квазаров, гравитационных линз, глубоких полей.

- **Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) (ESA, NASA)**

Обсерватория SOHO, предназначенная для детального изучения Солнца и околосолнечного пространства, была запущена в точку Лагранжа L_1 в 1995 г. На борту обсерватории находятся 12 специализированных инструментов, позволяющих исследовать солнечный ветер и ультрафиолетовое излучение Солнца и его короны. Продолжает работать по настоящее время (2007 г.).

- **SAX (Italy)**

Рентгеновская обсерватория, известная также под названием ВерроSAX, проводила наблюдения в диапазоне 0.1 – 300 кэВ с 1996 по 2002 гг. Впервые позволила определять координаты гамма-всплесков с точностью $\sim 1'$.

- **Chandra X-ray Observatory (CXO) (NASA)**

Рентгеновская (0.1 – 10 кэВ) обсерватория. Запущена на орбиту в 1999 г. Получены многочисленные результаты во всех разделах астрономии. Продолжает работать по настоящее время (2007 г.).

- **XMM Newton (ESA)**

Обсерватория X-ray Multi-Mirror Mission (0.1 – 15 кэВ) выведена на орбиту в 1999 г. Основное направление исследований – определение содержаний химических элементов в ближайших звездах, остатках сверхновых, скоплениях галактик. Продолжает работать по настоящее время (2007 г.).

- **WMAP (NASA)**

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe запущен на орбиту в 2001 г. Предназначен для измерения флуктуаций температуры реликтового излучения с более высокими, чем было получено COBE, угловым разрешением и чувствительностью.

- **Integral** (Россия, ESA, NASA)

Международная обсерватория для наблюдений в гамма-диапазоне (15 кэВ – 10 МэВ). Выведена на орбиту в 2002 г. Предназначена для проведения обзора всего неба. Оборудована также детекторами излучения в рентгеновском и оптическом диапазонах. Возможны одновременные наблюдения во всех диапазонах. Продолжает работать по настоящее время (2007 г.).

- **GALEX** (JPL/NASA)

Ультрафиолетовая обсерватория Galaxy Evolution Explorer запущена в 2003 г. На борту находится телескоп диаметром 50 см, предназначенный для наблюдений в диапазоне от 1750 до 2800 Å. В результате работы будет выполнен фотометрический обзор всего неба и получены спектры с разрешением 10–20 Å всех обнаруженных объектов. Продолжает работать по настоящее время (2007 г.).

- **Spitzer Space Telescope (SST)** (JPL/NASA)

Инфракрасная обсерватория SST, известная ранее как SIRTF, выведена на орбиту в 2003 г. Оснащена 85-см телескопом – крупнейшим из всех запущенных ИК инструментов. Предназначена для фотометрии и спектроскопии объектов в диапазоне от 3 до 180 мкм. Продолжает работать по настоящее время (2007 г.).

- **Swift** (NASA)

Многоволновая обсерватория Swift (запущена в 2004 г.) ориентирована на поиск и исследование гамма-всплесков. Одновременно ведутся наблюдения в оптическом, УФ, рентгеновском и гамма-диапазонах. Продолжает работать по настоящее время (2007 г.).

Исследование объектов Солнечной системы

- **1957** 4 октября запущен первый искусственный спутник Земли (СССР). По торможению определена плотность верхних слоев атмосферы Земли.
- **1959** Космический аппарат (КА) “Луна-3” произвел облет и фотографирование обратной стороны Луны (СССР).
- **1965** Открытие кратеров на Марсе, исследование его атмосферы (телепередача с КА “Маринер-4”, США).

- **1966** Первая мягкая посадка на Луну (КА “Луна-9”, СССР). Телепередача лунного ландшафта.
- **1969** Высадка на поверхность Луны американских астронавтов (Н. Армстронг, Э. Олдрин; в корабле “Аполлон-11” на окололунной орбите оставался М. Коллинз).
- **1970** Радиоуправляемый “Луноход-1” (СССР), посаженный на поверхность Луны КА “Луна-17”, прошел по поверхности Луны 10.5 км и произвел панорамную съемку.
- **1971** Первая мягкая посадка на поверхность Марса (“Марс-3”, СССР).
- **1973** КА “Пионер-10” прошел вблизи Юпитера и передал на Землю изображения планеты, исследовал атмосферу и магнитосферу (США).
- **1974** КА “Маринер-10” с близкого расстояния передал изображения Меркурия, на которых видны многочисленные кратеры (США).
- **1975** Спускаемые аппараты КА “Венера-9” и “Венера-10” во время спуска исследовали атмосферу Венеры и передали первые изображения с ее поверхности (СССР).
- **1976** Передача изображений Фобоса и Деймоса и поверхности Марса после мягкой посадки американских КА “Викинг-1” и “Викинг-2”.
- **1979** Обнаружение колец у Юпитера (“Вояджер-1”, США).
- **1980** Прохождение КА “Вояджер-1” около Сатурна, обнаружение тонкой структуры его колец.
- **1982** Первые цветные изображения поверхности Венеры, первый детальный анализ химического состава пород поверхности (“Венера-13” и “Венера-14”, СССР).
- **1986** КА “Вояджер-2” (США) получил изображение Урана, его спутников и колец; открыто 10 новых спутников и еще одно кольцо; исследована магнитосфера Урана; открыты кольца Нептуна.
- **1986** Исследование кометы Галлея при пролете сквозь голову кометы (“Вега-1” и “Вега-2”, СССР; “Джотто”, ESA).
- **1989** КА “Магеллан” (США) стал спутником Венеры и получил радиолокационную карту ее поверхности.

- **1994** КА “Галилео” (США) с расстояния 238 Гм наблюдал падение кометы Шумейкеров-Леви 9 на Юпитер. В 1995 г. “Галилео” достиг системы Юпитера, в 2003 г. прекратил свое существование при запланированном погружении в атмосферу Юпитера.
- **1997** Межпланетная станция “Марс Пасфайндер” (США) доставила на поверхность Марса научную станцию им. Карла Сагана и первый автоматический самоходный аппарат для исследования химического состава грунта.
- **2000** Зонд “NEAR-Шумейкер” (США) впервые стал искусственным спутником астероида (Эрос) и в течение года провел его детальное исследование с орбиты, закончив работу 12 февраля 2001 г. посадкой на Эрос.
- **2004** КА “Кассини-Гюйгенс” (Европ. косм. агенство, НАСА) достиг системы Сатурна, стал его первым искусственным спутником, передал снимки и данные о 60 спутниках, кольцах и атмосфере Сатурна.
- **2005** Зонд “Гюйгенс” совершил мягкую посадку на поверхность Титана и передал оттуда множество изображений.
- **2007** Межпланетная станция “Новые горизонты” (США) совершила пертурбационный пролет у Юпитера. В 2015 году планируется пролет около Плутона, его картографирование, исследование атмосферы.

История астрономии

- Около 360 г. до н.э.
Геоцентрическая система мира Аристотеля
- 240 г. до н.э.
Первое измерение размеров Земли (Эратосфен)
- II век до н.э.
Первая гелиоцентрическая система мира (Аристарх Самосский)
- II век до н.э.
Гиппарх. Открытие прецессии, введение звездных величин, звездный каталог

- II век н.э.
"Альмагест" Птолемея, эпициклы
- 1543 г.
Коперник: выход в свет "De revolutionibus orbium coelestium" ("Обращениях кругов небесных")
- 1610 г.
Галилей. Начало телескопической астрономии
- 1610–1620 гг.
Кеплер. Законы движения планет
- 1687 г.
Ньютон: выход в свет "Philosophiae naturalis principia mathematica" ("Математические начала натуральной философии", "Математические основы естествознания")
- Конец XVIII века
Гершель. Зарождение звездной астрономии
- 1800/1801 гг.
Пиаци. Открытие первой малой планеты
- Середина XVIII – первая половина XIX в.
Расцвет небесной механики (Эйлер, Лаплас, Лагранж, Гаусс)
- 1835–1840 гг.
Струве, Бессель, Гендерсон. Первые определения годичных параллаксов
- 1859 г.
Кирхгоф. Открытие спектрального анализа
- 1915 г.
Эйнштейн. Общая теория относительности
- 1918 г.
Шепли. Галактоцентрическая революция
- 1922 г.
Фридман. Нестационарные модели Вселенной

- 1920-е гг.
Хаббл. Внегалактическая астрономия. Расширение Вселенной
- 1933 г.
Янский. Космическое радиоизлучение
- 1939 г.
Бете, Вейцеккер. Источники энергии звезд
- 1950-е гг.
Эволюция звезд
- 1960-е гг.
Квазары, реликтовое излучение, пульсары
- 1970-е гг.
Рентгеновская и гамма-астрономия
- 1970-е гг.
Первое измерение потока нейтрино от Солнца (Дэвис)
- 1980-е–1990-е гг.
Инфракрасная астрономия. Космическая астрометрия
- 1992 г.
Открытие пояса Койпера-Эджворта
- 1992 г.
Обнаружена анизотропия реликтового излучения
- 1995–1996 гг.
Открытие планетных систем у близких звезд
- 1998 г.
Открыто ускорение космологического расширения Вселенной

Полезные сайты

<http://www.astro.spbu.ru> – Астрономический институт СПбГУ

<http://www.inasan.rssi.ru/rus/rvo/organisations.html> – астрономические организации России

<http://www.astronet.ru> – астрономический образовательный сайт (новости астрономии, многочисленные популярные статьи и книги)

<http://library.stsci.edu/lib/Ejournalist.html> – электронные версии основных профессиональных астрономических журналов

http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html – крупнейшая библиографическая база данных в области астрономии

<http://arxiv.org> – база данных электронных препринтов (только естественные науки)

<http://nedwww.ipac.caltech.edu> – крупнейшая база данных по внегалактической астрономии (доступ к информации и оригинальным наблюдательным данным для миллионов объектов, а также к научной литературе)

<http://cdsweb.u-strasbg.fr/astroWeb/astroweb.html> – астрономические ресурсы в интернете

Астрономия¹

К. В. Холшевников

Астрономия — наука о движении, строении, возникновении, развитии (эволюционном и катастрофическом), превращении небесных тел, их систем и всей наблюдаемой Вселенной. Иногда говорят о Вселенной в целом, но законность такого понятия дискуссионна.

Слово *астрономия* происходит от греческого *астро* — звезда и *номос* — закон.

Астрономия — точная наука, опирающаяся на физику и широко применяющая математические методы. Ее основу, в отличие от физики, составляют наблюдения, поскольку эксперимент за редчайшими исключениями невозможен. Это слабо препятствует изучению тысяч и миллионов однородных объектов, поскольку эксперименты ставит сама природа, но затрудняет исследование уникальных объектов, каковыми, например, до 1977 были кольца Сатурна и до 1996 — Солнечная система.

1 Задачи и разделы астрономии

Поле деятельности астрономии чрезвычайно обширно. Она исследует тела Солнечной системы (Солнце, планеты, спутники, астероиды, кометы, кольца, метеорные потоки и другие пылевые комплексы), аналогичные Солнечной системы других звезд, нормальные и вырожденные звезды и звездные системы, межзвездную среду (молекулы и пылинки, облака ионизованного, нейтрального и молекулярного водорода, газо-пылевые туманности, космические лучи), нашу Галактику, другие галактики и их системы, квазары. Изучается движение этих объектов, распределение в пространствах координат и скоростей, физическая природа, взаимодействие, происхождение, развитие и гибель. Неудивительно, что нашу науку подразделяют на составляющие, и таких подразделений столько, сколько существует разумных критериев (так, рыб можно делить на костных и хрящевых, а можно на съедобных и несъедобных).

¹Расширенная и дополненная новейшими данными версия статьи того же названия, опубликованной в 2005 г. в Большой Российской Энциклопедии, том 2, стр. 412 – 419.

По источникам первичной информации различают оптическую, инфракрасную, радио, ультрафиолетовую, рентгеновскую и гамма-астрономию в зависимости от диапазона электромагнитного излучения, попадающего в приемники; астрономию космических лучей; нейтринную и гравитационно-волновую, а для близких небесных тел локационную (радио и лазерную) астрономию. Лабораторные исследования метеоритов, космических пылинок, образцов грунта небесных тел используются в астрономии, но не относятся к ее методам.

По расположению обсерваторий различают наземную и внеатмосферную (стратосферную и космическую) астрономию. Название несколько условно: стратосфера — часть атмосферы. Однако она уже практически прозрачна для электромагнитных волн, поглощаемых тропосферой. Оптическая и радиоастрономия может быть и наземной, и внеатмосферной, тогда как в других диапазонах возможна лишь внеатмосферная астрономия.

По объектам исследования различают гелиофизику, планетологию, кометную и метеорную астрономию как часть астрономии Солнечной системы, физику звезд и межзвездной среды, галактическую (наша Галактика) и внегалактическую (мир галактик и квазаров) астрономию, космологию (вся наблюдаемая Вселенная и ее развитие в пространстве-времени).

По изучаемым характеристикам объектов различают астрометрию (положение и кинематика небесных тел), геодинамику (часть астрометрии, занимающуюся кинематикой Земли относительно своего центра масс), небесную механику (динамика небесных тел), астрофизику (физика небесных тел), космогонию (происхождение и развитие небесных тел и их систем). Космологию можно считать космогонией всей наблюдаемой Вселенной или даже Вселенной в целом. С другой стороны, идеи эволюции столь глубоко проникли во все области астрономии, что теперь редко выделяют космогонию в отдельный раздел.

Наиболее условно деление на наблюдательную и теоретическую астрономию, поскольку наблюдатели используют теорию для создания новых приборов и первичной обработки наблюдений, а теоретики опираются на наблюдения.

Астрономия тесно связана с другими точными науками, прежде всего с физикой, механикой, химией, математикой. Имеется связь с геофизикой, физической географией, геодезией и гравиметрией, биологией (влияние околосолнечной среды на земные организмы, жизнь во Вселенной), историей (датировка по астрономическим явлениям), религиоведением (астрономическая мифология).

2 Дотелескопическая астрономия

Астрономия возникла в глубокой древности, о чем свидетельствуют обсерватории первых цивилизаций и даже каменного века (Стоунхендж и др.). Появление и развитие астрономии вызвано многими причинами. Назовем важнейшие: стремление познать природу и место человека в ней, потребности практики, культовые потребности. Астрономическими методами определялось время суток, времена года, географические координаты, направления на Восток и на некоторый невидимый пункт (например, на Мекку из Багдада); предсказывались моменты наступления равноденствий и солнцестояний, новолуний и полнолуний, солнечных и лунных затмений, разливов Нила и многое другое.

На основе многовековых наблюдений в Китае, Индии, Египте, Месопотамии, Греции, Эллинистическом мире определили продолжительность сезонов, тропического года, синодического месяца с точностью до нескольких минут. В 6 в. до н.э. был открыт Сарос, период в 18 лет 10 сут. повторяемости солнечных затмений, а в 5 в. до н.э. — метонов цикл в 19 лет, по истечении которого фазы Луны попадают на те же даты года. Были созданы солнечные, лунные и лунно-солнечные календари, доказана шарообразность Луны и Земли. В 3 в. до н.э. Эратосфен (Александрия) измерил радиус Земли. Высокими достижениями отмечена и астрономия Доколумбовой Америки.

Древними наблюдателями была замечена неподвижность звезд. Как бы прикрепленные к небосводу, они совершают суточное вращение, не меняя взаимного расположения. Расстояния до тел Солнечной системы не были известны вплоть до конца 16 в., хотя их пытался найти еще Аристарх Самосский, а до звезд — вплоть до середины 19 в. Древние астрономы знали лишь, что Луна ближе Солнца, а Коперник установил

отношения расстояний в Солнечной системе к расстоянию от Земли до Солнца. В неправильных группах звезд древние пытались найти сходство с животными, мифологическими персонажами, предметами быта. Так появилось деление на созвездия, различные у разных народов. Названия созвездию давались не только по внешнему сходству его рисунка. Например, Большая Медведица указывала направление на страну медведей, а Весы связывались с равноденствием. Для точного определения местоположения звезд была разработана сферическая система координат (на полтора тысячелетия раньше декартовой, принимаемой теперь за основную) и сферическая тригонометрия. В результате упорных наблюдений составлены первые каталоги, т.е. списки звезд вместе с двумя их сферическими координатами (третья координата — расстояние — была неизвестна), иногда также с яркостью и цветом. Образцом служит каталог Гиппарха (Александрия, 2 в. до н.э.), содержащий 1022 звезды. Сравнив свой каталог с составленным на сто лет раньше каталогом Тимохариса, Гиппарх открыл прецессию, т.е. движение точки весеннего равноденствия по эклиптике в обратном направлении.

С древнейших времен были известны 7 блуждающих среди звезд светил (по-гречески — планет): Солнце, Луна, Марс, Меркурий, Юпитер, Венера и Сатурн. Отсюда берет начало 7-дневная неделя, дни которой в указанном порядке были посвящены перечисленным планетам и соответствующим божествам, что отразилось в ряде языков в названиях дней. Трудно понять, откуда взялся такой странный порядок. Древние давно разделили планеты на три класса по особенностям их движения по небесной сфере. Первый класс: Луна и Солнце. Двигаются приблизительно по большому кругу в одном направлении. Иными словами, их эклиптическая долгота возрастает. Второй класс (нижние планеты): Меркурий и Венера. С полной очевидностью двигаются вокруг Солнца, никогда не отходя от него на угловое расстояние свыше 28° и 48° соответственно. Третий класс (верхние планеты): Марс, Юпитер, Сатурн. Могут отходить от Солнца на любое угловое расстояние. Связь их движения с Солнцем (скажем, в противостоянии всегда наблюдаем попятное движение) не столь бросается в глаза, но была очевидна астрономам. Подробнее свойства орбит рассмотрены чуть ниже. Здесь же заметим, что внут-

ри каждого класса мы упорядочили планеты по возрастанию известной древним средней угловой скорости перемещения (относительно Земли для первого и третьего класса, и Солнца для второго).

После Коперника терминология изменилась. Солнце стало центром Солнечной системы, Луна — спутником Земли, Земля — планетой.

Но вернемся к античности. Пути планет среди звезд были измерены и описаны в терминах сферической геометрии. Наиболее трудный для наблюдений путь Солнца (приходилось наблюдать яркие звезды перед восходом Солнца или звезды, видимые в полночь на юге) оказался самым простым. Солнце движется по наклоненному к экватору на 23.5° большому кругу небесной сферы, называемому эклипстикой, всегда в прямом направлении, т.е. обратно суточному движению, хотя и неравномерно: зимой быстрее, летом медленнее. Расположенные вдоль эклиптики созвездия получили названия зодиакальных, от греческого *зоон* — живое существо, т.к. большинство их носит названия живых существ. В Китае небо было разделено на 122 созвездия, из них 28 зодиакальных. Но у большинства народов было 12 зодиакальных созвездий, каждое из которых Солнце проходило примерно за месяц. Путь Луны сложнее. За месяц она проходит в прямом движении, но неравномерно, лежащий в Зодиаке большой круг, наклоненный к эклиптике на 5° . Этот круг, сохраняя указанный наклон, скользит по эклиптике в обратном направлении с периодом 18.6 года. Точка наибольшей скорости движения Луны по орбите (перигей) скользит вдоль нее в прямом направлении с периодом 8.85 года.

Происходящее в том же Зодиаке движение пяти оставшихся планет должно было казаться невообразимо сложным. Они описывают кривые, имеющие участки попятного движения, петли и точки возврата. Это многим казалось проявлением собственной воли планет и способствовало их обожествлению, что вместе с такими внушавшими ужас явлениями, как лунные и особенно солнечные затмения, появления ярких комет и вспышки новых звезд породило лженауку астрологию, в которой расположения планет в Зодиаке и упомянутые явления служили для предсказания судеб народов и правителей (царей, полководцев, сатрапов, но никак не простых смертных в отличие от современной демократической астроло-

гии, берущейся предсказать судьбу любого клиента, его любимой кошки и злой собаки соседа). Предсказывали в основном беды и несчастья и в те времена войн, кровавых переворотов, неурожаев и эпидемий предсказания обычно оправдывались. Для составления гороскопа по астрологическим правилам нужно было знать астрономию. Т.о., несмотря на свою абсурдность, астрология на определенном этапе способствовала развитию астрономии.

Вершина античной астрономии — математическая (не физическая) модель Солнечной системы, известная как геоцентрическая Система мира, построенная продолжателем дела Гиппарха александрийским астрономом 2 в. Клавдием Птолемеем (случайное совпадение с царским именем послужило утверждению системы в средние века) и изложенная в его многотомном сочинении, вошедшем в историю под арабским названием *Альмагест*. В этой модели Земной шар, ни на что не опираясь, покоится в центре Вселенной, звезды неподвижны на сфере, равномерно вращающейся вокруг полярной оси. Сложное движение каждой из 7 планет разложено на несколько простых — непреходящее достижение, используемое во всех разделах современной механики. В системе Птолемея по неподвижной окружности (деференту) с центром в центре Земли равномерно движется воображаемая точка — центр другой неподвижной окружности (эпицикла), по которой равномерно движется воображаемая точка — центр второго эпицикла и т.д. По последнему эпициклу движется планета. Число эпициклов можно уменьшить, смещая центры кругов и предполагая равномерность вращения не относительно центра, а относительно еще одной вспомогательной точки — экванта. Средствами современной небесной механики легко показать, что эта модель может представить сколь угодно точно любое движение. Для представления движения планет с достигнутой древними греками точностью в $1/5$ градуса (ее превзошли лишь через полторы тысячи лет) достаточно небольшого числа кругов, например, 2 для Солнца и 4 для Марса, если правильно подобрать значения параметров теории: радиусы кругов, их наклоны к эклиптике, периоды и др. Эти величины непосредственно не измеряются, но связаны уравнениями с наблюдаемыми промежутками времени и углами. Для измерения последних были созданы угломерные

инструменты: гномон, трикветрум и армиллярная сфера. Теория уравнивания измерений отсутствовала, и при бóльшем числе кругов Птолемей получил точность, меньшую возможной в его время.

В средние века христианство и мусульманство уничтожило античную науку, к счастью, не полностью. С арабским и позднее европейским Возрождением продолжила развитие и астрономия. В начале 9 в. при просвещенном багдадском халифе аль-Мамуне сочинения Птолемея были переведены на арабский язык. Аль-Баттани (Альбатегний) в 9 – 10 в. закончил разработку сферической тригонометрии, произвел многочисленные наблюдения, уточнив значения прецессии, наклона эклиптики к экватору, элементов орбиты Солнца. Постепенно совершенствовалась теория Птолемея: добавлялись новые эпициклы и уточнялись параметры. Всемирную известность получили астрономические таблицы положений небесных тел, составленные в 1252 еврейскими и мавританскими учеными по распоряжению короля Кастилии Альфонса X и названные альфонсовыми. Открывались обсерватории. Насиреддин ат-Туси соорудил большую обсерваторию в Мараге (современный Иран). По размерам, количеству и качеству инструментов выдающееся место заняла обсерватория Улугбека в Самарканде, где в 1420-37 был составлен новый большой каталог звезд. В Европе первые переводы Альмагеста на латинский язык появились в 15 в. и была канонизирована церковью теория Птолемея, несмотря на ее противоречие взглядам Аристотеля. Усложнение теории в трудах арабских и позднее европейских ученых не поспевало за ростом точности наблюдений, что порождало сомнения в ее истинности.

Польский астроном Николай Коперник, познакомившийся в Краковском университете и затем в Италии с теорией эпициклов, по возвращении в Польшу построил более адекватную математическую (но по-прежнему не физическую) модель Солнечной системы — гелиоцентрическую Систему мира. В этой модели Солнце покоится в центре Вселенной, а планеты обращаются вокруг него. Луна стала спутником, обращающимся вокруг Земли. Земля как одна из планет обращается вокруг Солнца и вращается вокруг неподвижной в ее теле полярной оси, в свою очередь описывающей конус с периодом 26000 лет. Деференты и эпициклы сохранены Коперником, но при той же точности их число

существенно уменьшилось. Современники говорили об *истинности* теории Коперника и *ложности* теории Птолемея. Это не совсем правильно. Эпициклы Коперника и неподвижность Солнца не более истинны, чем движение Солнца и эпициклы у Птолемея. Но гелиоцентрическая система более физична и ближе к истине. Одним механизмом движения Земли она объяснила сразу три явления: суточное вращение небосвода, годичное движение Солнца, прецессию; вскрыла причину необъяснимого в геоцентрической теории равенства году периодов движения по деференту или первому эпициклу у всех пяти планет. Теория Коперника впервые позволила построить трехмерную (а не двумерную на небесной сфере) модель Солнечной системы и правильно выразить все расстояния через одно — среднее расстояние от Земли до Солнца, называемое астрономической единицей длины (а.е.). Огромно и философское значение теории: она показала отсутствие принципиальной разницы между земным и небесным и сделала весьма вероятным предположение, что звезды — это далекие солнца, вокруг которых могут обращаться свои планеты.

Гелиоцентризм опирался на идеи древних ученых и особенно Аристарха Самосского (3 в. до н.э.). Печально, что на полтора тысячелетия эти идеи были сданы в архив. Мы уже говорили об очевидности гелиоцентрического движения внутренних планет для человека с улицы и внешних планет для специалиста. Античный гелиоцентризм был отвергнут по вненаучным соображениям.

Коперник разработал гелиоцентрическую систему во всех деталях и изложил ее в сочинении *Об обращении небесных сфер*, напечатанном в Нюрнберге в 1543. Однако веками укоренившееся мнение о неподвижности Земли как центре Вселенной, разделяемое церковью, десятилетиями не уступало места новому учению, которого не могли принять многие выдающиеся люди того времени. Даже крупнейший наблюдатель датский астроном Тихо Браге (16 в.) не принял системы Коперника, заменив ее химерической схемой движения Солнца вокруг Земли и планет вокруг Солнца. Лишь в результате трудов Галилео Галилея и Иоганна Кеплера утвердилась гелиоцентрическая модель, существеннейшим образом модифицированная Кеплером.

3 Телескопические наблюдения

В 1609 Галилеем впервые был применен телескоп (подзорная труба) для наблюдений небесных тел. За несколько лет он изменил представления о Вселенной, широко раздвинув ее границы. Были открыты горы, кратеры, долины и другие структурные образования на Луне; пятна на Солнце, указавшие на его вращение вокруг полярной оси с периодом в 25 сут.; диски планет, фазы Венеры; спутники Юпитера. На порядок возросло число видимых звезд; Млечный путь оказался состоящим из огромного числа звезд, сливающихся в сплошную полосу для невооруженного глаза. Постепенно телескопы совершенствовались. Кеплер заменил рассеивающую окулярную линзу собирающей, что расширило поле зрения и усилило увеличение. Однако вследствие хроматической и отчасти сферической аберрации изображения оставались расплывчатыми, с радужными каемками, что заставляло увеличивать фокусные расстояния линз вплоть до 45 м, сохраняя малые их диаметры, т.к. тогда не умели выплавлять большие блоки оптического стекла. С такими инструментами было совершено много открытий. В 1655 Х.Гюйгенс (Голландия) обнаружил кольцо Сатурна, открыл его спутник Титан, а Дж.Кассини (Франция) открыл еще 4 более слабых. Он же в 1675 заметил, что кольцо состоит из двух концентрических частей, разделенных темной полоской — щелью Кассини.

В 1675 Оле Ремер (Дания) обнаружил колебания периодов обращения спутников Юпитера. Колебания имеют период, равный *синодическому* периоду Юпитера и, следовательно, связанный с Землей. Но связи с Землей не должно быть по принципу Коперника. Ремер правильно интерпретировал изменения периодов эффектом, вызванным конечностью скорости света. Измеренный наблюдателем период $P + \Delta P$ любого процесса в некоторой точке Q пространства отличается от собственного периода P согласно формуле

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{v}{c},$$

где v — скорость изменения расстояния от наблюдателя до Q , или лучевая скорость Q , c — скорость распространения сигнала, в данном случае — скорость света. В учебниках говорится, что таким образом Ремер

впервые измерил скорость света. Это правильно. Но и сама приведенная формула отражает фундаментальный закон природы, который я предлагаю именовать эффектом Ремера. В частном случае электромагнитного колебательного процесса получаем эффект Доплера.

В 17 в. И.Ньютон сконструировал телескоп-рефлектор, свободный от хроматической aberrации и нуждающийся в обработке лишь одной поверхности зеркала. В 1789 В.Гершель (Англия) довел диаметр зеркала до 122 см. Линзовые телескопы-рефракторы также совершенствовались. По методу Л.Эйлера объективы стали делать двойными, сочетая 2 сорта стекла с разной дисперсией, что позволило уменьшить хроматизм. Вместе с уменьшением сферической aberrации это позволило сократить длину трубы, повысить проникающую силу и получить четкое изображение без радужек.

С усовершенствованными инструментами искусные наблюдатели обнаружили много нового. Было открыто много комет и доказана многочисленность кометного населения. Обнаружено множество звездных скоплений и туманностей, относительно которых было предложено 2 гипотезы: газо-пылевые объекты или далекие звездные скопления, неразрешенные на отдельные звезды. Первый каталог туманностей составлен во Франции Ш.Мессье в 1771. К 1802 Гершель каталогизировал свыше тысячи туманностей и произвел их классификацию. Он обосновал ограниченность нашей звездной системы – Галактики и укрепил предположение И.Ламберта (1761) о существовании других звездных систем – галактик. Лишь в 20 в. это было установлено окончательно. В середине 19 в. ирландский астроном У.Парсонс (лорд Росс) впервые описал спиральную структуру некоторых туманностей.

С 1715 и до последней четверти века продолжались поиски атмосфер Луны и Венеры, и одновременно — исследование дифракции света. Ж.Делилем (Париж) в 1748 по наблюдениям кольцеобразного затмения было установлено отсутствие атмосферы у Луны. В 1761 М.В.Ломоносов обнаружил искажение геометрической картины прохождения черного диска Венеры по яркому диску Солнца и сделал вывод о наличии у Венеры атмосферы, не менее плотной, чем земная.

В 18-ом, 19-ом и 20-ом в. в Солнечной системе открывалось по одной

планете. В 1781 Гершель обнаружил Уран. В 1846 И.Г.Галле (Германия) вблизи указанного ему У.Леверье (Франция) места нашел Нептун. В 1930 К.Томбо (США) открыл Плутон. В 1801 в Палермо Дж.Пьяцци открывает первую малую планету (астероид) Цереру, а к 1960 число открытых астероидов превысило 1600. Крупнейшие, диаметром от 400 до 1000 км, представляют собой каменные шары, меньшие — осколки неправильной формы. В 2006 МАС изменил номенклатуру типов тел Солнечной системы. *Больших планет* стало надолго (навсегда?) 8: от Меркурия до Нептуна. Появились *карликовые планеты*: Плутон, Церера, Эрида, Макемаке, Хаумеа. Кроме Цереры, все они принадлежат поясу Койпера (см. ниже). Эрида имеет спутник Дисномию. Благодаря последнему удалось надежно определить массу Эриды, превысившую массу Плутона. Впрочем, решение МАС не вполне продумано. Эфемериды карликовых планет (кроме Плутона) и сейчас публикуют в *Эфемеридах малых планет*, а эфемериды Плутона — в *Астрономическом Ежегоднике*.

4 Развитие астрометрии и небесной механики

Современник Г.Галилея И.Кеплер, будучи в Праге ассистентом Тихо Браге, после смерти последнего получил непревзойденные по точности результаты наблюдений планет, проводившихся более 20 лет. Кеплер начал с Марса, в движении которого обнаружил значительные отступления от всех прежних теорий. Ценой огромного труда и длительных вычислений ему удалось найти 3 закона движения планет, сыгравших важнейшую роль в развитии небесной механики. I закон, по которому планеты движутся по эллипсам, в фокусе которых находится Солнце, разрушил тысячелетние представления о круговых движениях. II закон определил переменную скорость движения по орбите. III закон установил однозначную зависимость между размерами орбит и периодами обращения планет вокруг Солнца. Составленные Кеплером таблицы намного превзошли по точности все прежние и употреблялись в течение всего 17 в.

Дальнейший прогресс астрономии тесно связан с развитием математики и аналитической механики, с успехами оптики и астрономического приборостроения. Фундаментом небесной механики явился закон все-

мирного тяготения, открытый И.Ньютоном в 1685. Следствием его оказались законы Кеплера для частного случая, когда планета движется под влиянием притяжения лишь одного тела — Солнца. В реальном случае, при наличии взаимного притяжения между всеми телами Солнечной системы, движение планет сложнее. Соблюдение законов Кеплера с хорошим приближением — результат преобладания притяжения массивного Солнца над притяжением всех остальных небесных тел, вместе взятых. Движение небесных тел однозначно определяется системой дифференциальных уравнений, представляющих собой математическую запись закона тяготения, если известны начальные данные: положение и скорость в некоторый момент времени, принимаемый за начальный. В случае 2 точечных тел уравнения интегрируются в элементарных функциях, что удалось конструктивно проделать И.Ньютону. Он же показал, что шар притягивает внешние тела как материальная точка той же массы в его центре. Общую задачу о движении N тел можно решать только численно. Но слабозмущенную планетную задачу (притяжение планет — лишь малая добавка к притяжению Солнца) Ньютону удалось в первом приближении на небольшом промежутке времени решить аналитически, т.е. представить положения и скорости планет в виде элементарных функций времени и начальных данных. Усилия крупнейших математиков, механиков и теоретиков астрономии в течение столетий были направлены на повышение точности решения и увеличение промежутка времени, на котором приближенное решение близко к истинному. Труды Л.Эйлера, Ж.Лагранжа, П.Лапласа, С.Д.Пуассона, Ф.Тиссерана, К.Гаусса, У.Лeverрье, С.Ньюкома, Дж.Хилла, А.М.Ляпунова, А.Пуанкаре, Х.Цайпеля и др. решение планетной задачи было представлено с высокой точностью на временах порядка сотен тысяч лет и более рядами, обобщающими ряды Фурье. Решение было найдено и на значительно более долгую эпоху, но с низкой точностью. Обнаруженное Пуанкаре отсутствие равномерной сходимости указанных рядов в сколь угодно малой окрестности начальных данных делало их непригодными для получения высокой точности на миллионы лет вперед или назад и вовсе неприменимыми на еще больших временах. Похожие ряды представляют поступательное и вращательное движение Луны, многочисленных спутников

и астероидов.

Поведение траекторий и свойства представляющих их рядов зависят от наличия или отсутствия резонанса между периодами обращения планет. На движение 8 больших планет резонансы влияют слабо. Напротив, движение небольших тел — Плутона, многих спутников и астероидов — острорезонансно. В 1906 была открыта группа малых планет, т.н. троянцев (им стали давать имена героев поэмы Гомера *Илиада*), движущихся в резонансе 1:1 с Юпитером. Они описывают гелиоцентрические орбиты, близкие к орбите Юпитера, причем часть из них (греки) движется всегда впереди планеты, а часть (собственно троянцы) — всегда сзади. Существование таких орбит было предсказано Лагранжем задолго до их открытия. Сейчас известно около тысячи троянцев и открыты их аналоги для других планет. Резонансы сильно проявляются и в орбитально-вращательном движении. Луна и большинство естественных спутников движутся в резонансе 1:1, т.е. периоды их вращения и обращения совпадают, они повернуты к планете одной стороной. Плутон и Харон — единственная пара, в которой и планета, и спутник обращены одной стороной друг к другу. Меркурий движется в резонансе 2:3 (обнаружено по радиолокационным данным в 1960-е годы), 2 года равны 3 звездным суткам, тем самым солнечные сутки равны 2 годам. Наличие резонанса в одних случаях повышает устойчивость системы, и наблюдается много соответствующих тел, в других — уменьшает, и наблюдается их дефицит. Это ярко проявляется на гистограмме период обращения — количество астероидов, что впервые обнаружено в 1857 Д.Кирквудом (США).

Закон всемирного тяготения объяснил и форму небесных тел. В первом приближении это показали И.Ньютон и Х.Гюйгенс. Теорию фигур равновесия находящихся в жидком или пластическом состоянии небесных тел создали позднее К.Маклорен, А.Клеро, П.Лаплас, К.Якоби, А.М.Ляпунов, А.Пуанкаре, Дж.Дарвин, Л.Лихтенштейн. Оказалось, что кроме интуитивно очевидных осесимметричных вращающихся фигур равновесия существуют и неосесимметричные (трехосные эллипсоиды Якоби, грушевидные фигуры Дарвина и др.).

Триумфом небесной механики явилось блестяще подтвердившееся предсказание Галлеем следующего появления кометы (1759), носящей теперь

его имя; открытие новой планеты (Нептуна) по вычислениям Леверье, который предположил, что неустранимые невязки в движении Урана вызваны притяжением неизвестной планеты, и сумел указать ее положение на небе. В 1844 Ф.Бесселем были предсказаны невидимые спутники Сириуса и Проциона, отклоняющие собственное движение основных звезд от прямолинейного равномерного. Позднее спутники были обнаружены в большие телескопы. Наиболее сложной из разработанных к середине 20 в. теорий движения небесных тел была теория Луны, положение которой надо знать с наибольшей точностью. Оставшиеся отклонения, которые раньше приписывались неизвестному негравитационному влиянию, оказались следствием неравномерности вращения Земли. Неравномерность эта стала заметной с переходом к высокоточному атомному времени, в результате чего задача астрономической службы времени изменилась на противоположную: не давать время по наблюдениям звезд, а определять сложные движения Земли относительно своего центра масс.

Телескоп повысил точность угломерных измерений лишь в 1640, сразу в десятки раз, когда У.Гаскойн в Англии поместил в его фокусе тончайшие нити. Им же был изобретен окулярный микрометр для измерения малых угловых расстояний между деталями видимого в поле зрения изображения. Ж.Пикар во Франции (1667) снабдил телескоп разделенными кругами, по которым отсчитывались углы с точностью до секунды дуги. Применяв инструмент для триангуляции, ученые получили более точные размеры Земли и определили ее отличие от шара — полярное сжатие, что было важно для проверки теории тяготения Ньютона. Используя окулярный микрометр, Гершель (1803) установил, что многие звезды образуют связанные всемирным тяготением системы, состоящие из двух, а иногда и более, звезд, обращающихся по законам Кеплера. Этим закон Ньютона был распространен с Солнечной системы на всю Галактику. Сравнивая свои наблюдения со старыми греческими, Галлей в 1718 обнаружил большое смещение 3 ярчайших звезд — Сириуса, Арктура и Альдебарана. Так были открыты собственные движения звезд и они перестали быть неподвижными.

Одной из фундаментальных задач астрономии было определение астрономической единицы в единицах земных: экваториальный радиус Зем-

ли, или — с 19 в. — метр. Первые близкие к истинным результаты были получены методом Галлея по наблюдениям из разных мест прохождения Венеры по диску Солнца в 1761 и 1769 с последующим определением горизонтального (суточного) параллакса Солнца: угла, под которым из центра Солнца виден экваториальный радиус Земли при ее среднем удалении от Солнца. По параллаксу элементарно находится а.е. в радиусах Земли. Наблюдения прохождений в 18 в. были первыми международными научными кампаниями, в которых участвовало большинство цивилизованных стран, в т.ч. Россия. Тщательная обработка наблюдений дала значение параллакса от $8.5''$ до $10.5''$. Невысокая точность объясняется прежде всего плотной атмосферой Венеры, не позволяющей видеть четкий край диска. После открытия малых планет их наблюдения повысили точность в десятки раз. К середине 20 в. было принято значение параллакса $8.80''$, что соответствует значению астрономической единицы $1.496 \cdot 10^{11}$ м.

Другая фундаментальная проблема — определение расстояний до звезд измерением для каждой из них годичного параллакса, угла, под которым видна наибольшая проекция радиуса земной орбиты на небесную сферу для находящегося на звезде наблюдателя. Параллаксы измерялись постоянно в течение 300 лет, начиная с самого Коперника, но были слишком малы и терялись в погрешностях измерений. Тем не менее это принесло огромную пользу астрономии. Открытие Гершелем двойных звезд было сделано при попытке найти параллакс, отслеживая движение яркой (предположительно близкой) звезды относительно расположенной близко на небесной сфере слабой (предположительно далекой) звезды. Безуспешные поиски параллакса привели английского астронома Дж.Брадлея в 1725 к открытию абберации света, которую он правильно объяснил конечной скоростью света, а в 1748 — к открытию нутации земной оси. Ко времени Гершеля выяснилось, что параллактические смещения звезд, отражающие движение наблюдателя вокруг Солнца вместе с Землей, не превышают $1''$. Лишь в 1836-39 удалось надежно определить параллаксы Веги (В.Я.Струве, Дерпт), β Лебедя (Ф.Бессель, Кенигсберг) и α Центавра (Т.Гендерсон, Кап). Найденная впоследствии самая близкая звезда Проксима Центавра имеет параллакс в $0.76''$, что

отвечает расстоянию в 1.3 парсека или 4.3 световых года.

Важным направлением астрономии является составление звездных каталогов, содержащих точнейшие координаты звезд. Они нужны как для научных целей — определения астрономических постоянных и исследования кинематики Вселенной, так и для прикладных целей — геодезии, картографии, географических исследований, навигации. Особые заслуги в этой области имеют обсерватории: Гринвичская (основана в 1675), Капская (1820), Пулковская (1839), Вашингтонская (1842).

5 Развитие астрофизики

До середины 18 в. можно говорить лишь о зачатках астрофизики: определение яркости (фотометрия) и цвета светил, поглощение и рассеяние света атмосферой Земли, попытки обнаружения атмосфер Луны и Венеры, определение масс планет и Солнца. Фотометрия экспериментально разрабатывалась французским ученым П.Бугером (1729) и немецким ученым И.Ламбертом (1760). Тогда же было окончательно доказано, что Солнце — близкая звезда. Выявленный В.Я.Струве закон роста числа звезд с уменьшением их видимой яркости позволил ему в 1847 обосновать существование поглощения света межзвездной средой, окончательно подтвержденного в 1930 американским астрономом Р.Трамплером. В 1814 Й.Фраунгофер обнаружил в спектре Солнца темные линии, природа которых стала понятна с открытием спектрального анализа (Р.Бунзен и Г.Кирхгоф, 1859). С этого времени астрофизика становится важнейшей частью астрономии.

Применение спектрального анализа У.Хеггинсом и Дж.Локьером в Англии, А.Секки в Италии, Ж.Жансеном во Франции к Солнцу, звездам и туманностям открыло их химический состав. Чешский физик К.Доплер сформулировал в 1842 свой принцип, уточненный А.Физо в 1848 и экспериментально проверенный А.А.Белопольским на лабораторной установке в 1900. Эффект Доплера смещения спектральных линий пропорционально скорости изменения расстояния между объектом и наблюдателем (лучевая скорость) получил многочисленные применения в астрономии для измерения скорости движения по лучу зрения, в том числе для измерения вращения звезд, туманностей, скоплений, галактик, турбулентных

движений в солнечной фотосфере и пр. Спектральный анализ позволил углубить исследования переменных звезд и обнаружить множество спектрально-двойных звезд, близкие компоненты которых не разделяются даже крупными телескопами.

Изобретенная в 1839 фотография получила широкое применение в астрономии, когда стали изготавливать сухие фотопластинки. Длительные экспозиции, продолжительность которых ограничивалась лишь атмосферной засветкой и точностью гидрирования, позволила фиксировать небесные светила, невидимые глазом даже в сильные телескопы. Астрофотография многократно увеличила возможности фотометрии, спектроскопии и астрометрии, позволила глубоко и детально исследовать строение, химический состав и движение небесных тел, повысила точность, объективность и документальность наблюдений. В 1888 был принят международный план составления фотографического каталога звезд всего неба до 11-й звездной величины общим числом около 3.5 млн. и карт, содержащих около 30 млн. звезд до 14-й величины (около 22000 листов). В выполнении этой работы приняли участие 18 обсерваторий мира.

20 в. характеризуется огромным развитием техники наблюдений. Строятся большие рефлекторы. Диаметры зеркал растут (1917: 254 см, США; 1948: 508 см, США, 1975: 605 см, СССР). Создаются новые типы приемников излучения. Во много раз повышается чувствительность фотоэмульсий и расширяется их спектральная область. Фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи, методы электронной фотографии и телевидения значительно повысили точность и чувствительность фотометрических наблюдений и расширили спектральный диапазон регистрируемых излучений. Совершенствование спектральной аппаратуры позволило получать спектрограммы с высокими дисперсиями и регистрировать спектры очень слабых светил. Доступным наблюдению стал мир далеких галактик, находящихся на расстояниях нескольких млрд. парсек.

В 1929 американский астроном Э.Хаббл обнаружил, что линии спектра далеких галактик смещены в длинноволновую область, причем смещение пропорционально расстоянию, если пренебречь естественными флуктуациями (остаточными скоростями). Явлению *красного смещения* га-

ластик найдена лишь одна непротиворечивая интерпретация: смещение вызвано эффектом Доплера, так что все галактики удаляются со скоростями, пропорциональными расстоянию. Такая картина имеет место при наблюдении из любой галактики, так что все они равноправны (принцип Коперника не нарушен). За 7 лет до открытия Хаббла советский ученый А.А.Фридман, исследуя уравнения общей теории относительности Эйнштейна для Вселенной в целом, предполагая ее однородность и изотропность, пришел к трем типам решений. Один из них описывал расширяющуюся со временем Вселенную, в которой выполняется закон Хаббла пропорциональности скорости расстоянию. Открытия Фридмана и Хаббла положили начало теоретической и наблюдательной космологии.

Звезды обладают сходным химическим составом, но сильно различаются между собой по массе, радиусу, температуре поверхности и светимости. Эти параметры не являются независимыми и статистически связаны. Первая подобная связь была обнаружена в 1913 Э.Герцшпрунгом и независимо Г.Ресселом, составившими играющую огромную роль при изучении строения и эволюции звезд диаграмму спектр – светимость, на которой каждая звезда изображается точкой плоскости с координатами спектр или цвет (как выяснилось позднее, это почти однозначно отвечает температуре) и светимость. Многие сотни диаграмм, составленных для рассеянных и шаровых скоплений Галактики, а также для других разрешенных на звезды галактик, позволили выяснить жизнь звезд от рождения до смерти. В частности, в 1940-е гг. выяснилось, что звездообразование в Галактике интенсивно продолжается в наше время, причем звезды рождаются группами в газопылевых облаках.

В 1910 открыты белые карлики — звезды с массами порядка массы Солнца и размерами порядка размера Земли. Были разработаны фотометрические способы определения расстояний до далеких (более 100 пк) звезд, имеющих исчезающе малые параллаксы. Особенно полезным оказалось изучение цефеид — переменных звезд высокой светимости, период изменения блеска которых связан со светимостью. Поэтому измерение видимой яркости и периода изменения блеска дает расстояние до цефеиды и скопления, в котором она находится. Были подробно изучены и другие классы переменных звезд, часть из которых тоже может служить

“маяками Вселенной”.

В 1930-х гг. было обнаружено много космических источников, излучающих в диапазоне от миллиметровых до метровых электромагнитных волн. Часть из них была отождествлена с Солнцем, галактиками, туманностями, что стало рождением радиоастрономии. Позднее было зарегистрировано радиоизлучение межзвездной среды, прежде всего в запрещенной линии 21 см атомарного водорода, что стало мощным методом изучения химии и физики Галактики, расположения ее спиральных рукавов, вращения и др.

Со второй половины 19 в. остро стояла проблема колоссальной энергии звезд, расходуемой на излучение. В 1930-е гг. Г.Бете и К.Вейцеккер независимо указали цепочки термоядерных реакций в недрах звезд, ведущие к превращению водорода в гелий, как на источник этой энергии: ни один из рассмотренных ранее механизмов ее генерации не мог обеспечивать жизнь звезды сотни миллионов и миллиарды лет. Основные идеи оказались правильными и сейчас гипотеза превратилась в стройную теорию эволюции звезд, подтвержденную огромной массой наблюдений.

Значительных успехов достигли исследования Солнца. Использование специальных фильтров, имеющих узкую спектральную полосу пропускания, позволило изучить распределение и движение отдельных химических элементов в солнечной хромосфере. Благодаря разработке специальных методик и аппаратуры (внезатменный коронограф, изобретенный в 1931 Б.Лио, Франция) стало возможным на высокогорных обсерваториях наблюдать солнечную корону вне затмений. Открытие эффекта Зеемана дало возможность изучать магнитные поля, определяющие многие процессы на Солнце, а через солнечный ветер и на Земле.

6 Астрономия в космическую эру

С запуском 4 октября 1957 первого ИСЗ (СССР) в астрономии началась новая эпоха. Появилась возможность изучать тела Солнечной системы и межпланетную среду прямыми методами; исследовать Землю из космоса; ставить опыты (например, запуск зондов для определения геометрии поверхности океана и суши, магнитного и гравитационного поля Земли и других небесных тел — это эксперимент, а не только наблюдения); на

порядки увеличить базу интерферометров. Астрономия стала всеволновой. В космосе работают приемники инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-диапазонов, применение которых на земле невозможно из-за поглощающего действия атмосферы. Стали доступны изучению первичные космические лучи и микрометеориты. Очевидно и педагогическое значение космических исследований: теперь форма и движения Земли воспринимаются непосредственно по снимкам и кинофильмам — ср. со временем Коперника. На ИСЗ устанавливают и оптические телескопы: отсутствие атмосферы убирает основные дефекты изображений, движение ИСЗ позволяет видеть всю небесную сферу. Крупнейший космический телескоп им. Хаббла (США) с зеркалом диаметром 2.4 м запущен в 1990 и еще работает на околоземной орбите. С 1990-х гг. астрофизические инструменты выводятся и на гелиоцентрические орбиты (например, SOHO — специализированный аппарат для исследования Солнца и околосолнечного пространства).

С началом космической эры совпало появление и развитие многих новых методов, пришедших в астрономию из других наук и техники. Радиоастрономия получила полноповоротные радиотелескопы с зеркалами диаметром до 100 м; неподвижную чашу радиотелескопа диаметром 300 м (Аресибо, Пуэрто-Рико); составной радиотелескоп из прямоугольных элементов по окружности диаметром 600 м (Специальная астрофизическая обсерватория, Россия). Разрешающая способность зеркала определяется расстоянием между наиболее удаленными его точками. Если 2 удаленных инструмента работают как один, то разрешающая способность многократно увеличивается. Сейчас наибольшее разрешение достигнуто в радиодиапазоне благодаря согласованной работе 2 и более инструментов в режиме интерферометра. Радио и лазерные локаторы и радиоинтерферометры со сверхдлинной базой (порядка радиуса Земли) позволили измерить расстояния до Луны и многих других тел Солнечной системы с точностью до метра, а в некоторых случаях — до миллиметра. Решена и задача о дрейфе тектонических плит. По наблюдениям ИСЗ и радиоинтерферометрическим наблюдениям удаленных на миллиарды световых лет источников радиоизлучения определены скорости перемещения плит друг относительно друга и угловые скорости их вращения.

Изменилась и наземная оптическая астрономия. В обоих полушариях Земли появились телескопы с зеркалами 8, 10, 12 и 15 м. Проектируются 25- и даже 100-метровые телескопы.

В 1970-е гг. в астрономии наряду с фотографической пластинкой в качестве приемников излучения стали применяться ПЗС-матрицы (приборы с зарядовой связью). Уступая пока фотографии по размеру поля зрения, они многократно превосходят ее по чувствительности. Предельно слабые объекты регистрируются современными электронными приемниками с экспозицией, на порядок меньшей, чем требуется фотопластинке, либо позволяют использовать телескопы меньшего размера.

В 1968 построенный Р.Девисом (США) нейтринный телескоп дал первые результаты. К 2007 в 6 странах (Австралия, Канада, РФ, США, Франция, Япония) действуют нейтринные телескопы, различающиеся принципами регистрации нейтрино: распад аргона-37, образующегося при захвате нейтрино ядром хлора-37; распад германия-71, образующегося при захвате нейтрино ядром галлия-71; черенковское излучение электронов, вырванных нейтрино из атомов водорода. В последнем случае грубо измеряется и направление прихода нейтрино. Установлено, что практически весь его поток приходит из центральных областей Солнца. Таким образом, термоядерные реакции теперь регистрируются непосредственно в превосходном согласии с теорией, разработанной по наблюдениям электромагнитного излучения, порожденного поверхностными слоями Солнца и звезд.

Гравитационно-волновые телескопы, первые варианты которых появились еще в 1970-е гг., дают пока не вполне надежные результаты.

Фантастических успехов достигла информатика и вычислительная техника. Стало возможным решение задач, ранее не ставившихся из-за необходимости необозримого количества вычислений. Аппараты дальнего космоса, марсоходы и т.п. могут работать только при наличии элементов искусственного интеллекта: сигнал до Марса и обратно идет более 6 минут, а до Юпитера и обратно — более часа. Современные наземные и космические телескопы и устройства, обрабатывающие изображения, представляют собой своеобразных роботов. Стало возможным вести программы наблюдений миллионов однотипных объектов заранее составленного

списка с автоматическим переключением от одного объекта к другому.

6.1 Солнечная система

Искусственные спутники работают или работали у Венеры, Земли и Луны, астероида Эрос, в системах Марса, Юпитера и Сатурна. Совершенна посадка с последующей работой аппаратов на Венеру, Луну, Марс, Юпитер, спутник Сатурна Титан. Все большие планеты исследованы с пролетных траекторий. К карликовой планете Плутон движется европейский КА *Новые горизонты*. С пролетных траекторий исследованы также кометы Джакобини-Циннера (International Cometary Explorer, 1985), Галлея (Вега-1, Вега-2, Giotto, 1986), Борелли (Deep Space 1, 2001), Вильда 2 (Stardust, 2004), Темпля 1 (Deep Impact, 2006), астероиды Гаспра (Galileo, 1991), Ида (Galileo, 1993) и несколько других. К комете Чурюмова – Герасименко с целью посадки на нее летит КА Розетта. Неоднократно запускались солнечные обсерватории, в т.ч. по перпендикулярной к эклиптике орбите для изучения полярных областей Солнца.

Это позволило попутно уточнить орбиты тел Солнечной системы. Построенные с учетом релятивистских эффектов теории движения планет представляют их положение на десятки лет с погрешностью в доли километра для планет земной группы (ньютонская теория ошибается на 1000 км). Близка к решению задача о поведении планетной системы на космогонических временах в 5 – 10 млрд. лет. Орбиты планет-гигантов и Плутона не претерпевают существенных изменений. Для планет земной группы то же верно в течение по крайней мере 2 млрд. лет. Вследствие приливной диссипации энергии Земля замедляет свое вращение, Луна удаляется от Земли, месяц стремится совпасть с сутками, как сейчас для пары Плутон – Харон. Этот процесс требует десятков млрд лет, но возмущения от притяжения Солнца, возможно, еще раньше столкнут Луну со спутниковой орбиты. По той же причине Фобос, орбита которого ниже стационарной, приближается к Марсу и упадет на него через 30 млн. лет, если этому не воспрепятствуют люди (технически это возможно уже при современном состоянии техники). Отслеживаются и орбиты тысяч ИСЗ. Большинство из них не требует высокой точности, но орбиты геодезических и навигационных ИСЗ представляются с точностью до мм.

Для этого необходим тщательный учет возмущающих факторов, в свою очередь уточняемых по траекторным измерениям. В частности, определено свыше 10^5 коэффициентов Стокса, описывающих гравитационное поле Земли, установлена переменность некоторых из них (сезонные вариации и вековое уменьшение, вызванное послеледниковым поднятием). С несколько меньшей точностью известны гравитационные поля Луны и других небесных тел.

В 1979-99 Плутон проходил окрестность перигелия и был ближе к Солнцу, чем Нептун. Благоприятное время не было упущено: в 1978 Дж.Кристи и Р.Харрингтон (США) открыли спутник Плутона Харон. Это позволило определить массы Плутона и Харона, оказавшиеся меньше ожидаемых: $1/6$ и соответственно $1/45$ от лунной (по этой причине позднее Плутон был переведен в разряд карликовых планет). Найдены следы атмосферы Плутона, вымерзающей с удалением его от Солнца.

Построены подробные карты около 20 небесных тел, исследованы физические условия на их поверхности, химический состав пород и атмосферы. Обнаружены радиационные пояса у всех планет, обладающих магнитным полем, подробно изучены их магнитосферы, сложная динамика которых определяется взаимодействием с потоком заряженных частиц солнечного ветра.

У всех планет-гигантов открыты кольца, предсказанные в 1960-е гг. С.К.Всехсвятским, и обнаружено много спутников, общее число которых уже превысило 150 и часть которых, связанная с кольцами, была предсказана А.М.Фридманом и Н.Н.Гарькавым в 1985. Выяснилось, что у каждой планеты-гиганта система спутников, количество которых растет с уменьшением размеров, генетически связана с кольцами, представляющими собой систему спутников минимальных размеров вплоть до пылинок. По крайней мере часть материи колец выметается из системы, падая на планету, постоянно возобновляясь за счет столкновений и дроблений более крупных спутников, а также их метеоритной бомбардировки.

Число открытых к 4 октября 2008 г. астероидов превысило 400 тысяч (свыше 190 тысяч из них получили постоянные номера) и сведения о них приходится размещать лишь на электронных носителях, помещая в издаваемый в Петербурге Институтом теоретической астрономии, а с 1998

Институтом прикладной астрономии ежегодник *Эфемериды малых планет* лишь минимальную информацию. Второй из сфотографированных КА Галилео в 1993 астероидов Ида оказался двойным (сейчас двойных астероидов известно уже более 130) со спутником Дактиль диаметром менее 2 км. Обнаружены группы астероидов, сближающихся с Землей и с другими планетами, что показало реальность астероидной опасности. В 1977 за Сатурном был обнаружен астероид Хирон, более напоминающий ядро потухшей кометы. Подобных *кентавров* (тел с признаками астероидов и комет) известно уже около 200. В 1992 за Нептуном открывается новый пояс небесных тел (Койпера – Эджворта, предсказавших его существование за 50 лет до открытия). Известно уже более 1000 объектов пояса, очень темных тел размером в сотни км. Крупнейшие сравнимы с Плутоном, а один (Эрида) даже превышает его по размерам и массе. Множество более мелких тел пояса пока необнаружимы: яркость светящегося отраженным от Солнца светом тела обратно пропорциональна квадратам расстояний от Солнца и Земли, т.е. для далеких тел — четвертой степени расстояния от Солнца. Около 1/5 тел пояса Койпера движется в резонансе 3:2 с Нептуном, как и Плутон, за что они названы Плутино.

В 1986 КА Вега-1, Вега-2 (СССР) и Джотто (ЕКА) пролетели сквозь кому кометы Галлея на близком расстоянии от ядра, получив его изображение, определив плотность, химический состав истекающих газов и пыли. Подтверждена модель ядра как конгломерата замерзшей воды и газов, покрытых силикатной коркой, прорываемой испаряющимися газами и паром с приближением к Солнцу. В 1994 наблюдалось редкое явление падения кометы Шумейкеров – Леви 9 на Юпитер. Приливное воздействие планеты разорвало ее на цепочку из 21 фрагмента, последовательно врезавшихся в Юпитер на параллели 44° ю.ш. со скоростью 60 км/с. Каждое падение оставляло на поверхности планеты пятно размером больше Земли. Удар 370-килограммовым снарядом по ядру кометы Темпля-1 в июле 2006 вызвал выброс огромной массы пыли и газа: образовавшийся кратер так и не удалось сфотографировать сквозь пылевую завесу. КА SOHO за 12 лет обнаружил более 1200 комет в непосредственной близости от Солнца, значительная часть которых испарилась

в солнечной короне.

Космическими и наземными средствами детально изучен химический состав верхних слоев Солнца, исследована природа солнечных вспышек и других нестационарных процессов, связанных со сложными, меняющимися магнитными полями. Космические обсерватории выявили тонкую структуру протекающих в поверхностных слоях Солнца процессов, связь глобального и локального магнитных полей и их роль в солнечной активности. Зарегистрированные нейтринными телескопами потоки солнечных нейтрино подтвердили протекание термоядерных реакций в солнечном ядре. Первоначальное расхождение между теоретически предсказанным и наблюдаемым потоком привело к фундаментальному открытию нейтринных осцилляций и наличия ненулевой массы покоя нейтрино. Теперь наблюдения подтверждают теорию с точностью до долей процента.

6.2 Внесолнечные планеты

После ста лет поисков первая планетная система была обнаружена в 1991 А.Вольщаном (радиотелескоп Аресибо) у пульсара PSR B1257+12 по эффекту Ремера в периоде вращения пульсара. В случае одной планеты по полученной кривой периодического изменения периода пульсара по формулам задачи двух тел находятся большая полуось, эксцентриситет орбиты планеты и произведение ее массы на синус угла наклона орбиты к картинной плоскости. Так устанавливается нижний предел массы планеты и ее расстояние от звезды. В случае нескольких планет задача усложняется принципиально. Выжила ли планетная система при взрыве Сверхновой, приведшем к образованию пульсара, или планеты образовались около нейтронной звезды, пока неизвестно. Планетные системы зарегистрированы у 2 пульсаров.

В 1995 М.Майор и Д.Келос (Швейцария) открыли первую планету у звезды солнечного типа 51 Пегаса методом Доплер-эффекта в спектральных линиях. В случае одной планеты звезда обращается вокруг общего центра масс и ее лучевая скорость колеблется с периодом в местный год (время оборота планеты вокруг звезды).

Известно уже свыше 310 внесолнечных планет у звезд главной по-

следовательности, включая 32 системы из двух и более планет. Почти все они открыты по колебаниям лучевых скоростей материнской звезды; часть — по фотометрическим измерениям прохождений планеты по диску звезды. Все открытые фотометрическим способом планеты подтверждены измерениями лучевых скоростей. Обратное наблюдается лишь при благоприятной ориентации орбиты (близость к 90° наклона к картинной плоскости). Эффекты Ремера и Доплера математически эквивалентны. Поэтому кривая лучевой скорости позволяет определить те же параметры: большую полуось, эксцентриситет, произведение массы на синус угла наклона. Если наблюдаются прохождения по диску, наклон и масса находятся отдельно.

Первые открытые планеты звезд солнечного типа были сравнимы по массе с Юпитером (или превышали ее) и обращались по орбитам, расположенным значительно ближе к звезде, чем Меркурий к Солнцу. Теперь известны и близкие планеты с массами порядка 10 масс Земли, и далекие с массами порядка массы Юпитера. Существование *горячих юпитеров* явилось неожиданностью для специалистов по планетной космогонии и вызвало бурный поток работ в этой области. Хотя исключить эффект селекции (открываются преимущественно массивные планеты, расположенные недалеко от материнской звезды) полностью не удается, уже можно сделать предварительный вывод о месте Солнечной системы среди планетных систем. Она не является ни типичной, ни исключительной. По предварительной оценке 3÷5 процентов звезд главной последовательности классов *F*, *G*, *K* обладают планетами; подобные Солнечной системе составляют около процента.

6.3 Звезды

В 1910 была измерена масса спутника Сириуса. Так был обнаружен новый класс звезд (белые карлики) с массами порядка солнечной и размерами порядка земного, следовательно, с плотностью порядка 10^6 от плотности воды. В 1967 были открыты предсказанные в 1930-е гг. Л.Д.Ландау нейтронные звезды с массами порядка солнечной и размерами порядка размера Фобоса, следовательно, с плотностью порядка 10^{15} . Столь слабые объекты не видны ни в какой телескоп. Они были обнаруже-

ны Дж.Бэлл и Э.Хьюишем (Англия) как пульсары по периодическому радиоизлучению, позднее зарегистрированному и в других диапазонах электромагнитных волн. В 1990-х гг. открыты бурые карлики с масса-ми менее $1/12$ массы Солнца. В их недрах слишком низкая температура для ядерного горения водорода, но идут термоядерные реакции с участием дейтерия и лития. Обнаружено более 20 кандидатов в черные дыры звездных масс. Слово *кандидат* употреблено, поскольку нет полной уверенности, что известные законы физики продолжают работать при плотностях, на много порядков превышающих ядерную.

Разработанные еще в 1960-е гг. сценарии эволюции одиночных звезд превратились в стройную теорию, подтвержденную миллионами наблюдений. Звезды с массой порядка солнечной живут на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга – Рассела миллиарды лет, мало меняясь до исчерпания водорода. Затем они переходят в стадию красного гиганта, длящуюся порядка миллиона лет, сбрасывают оболочку в виде планетарной туманности и превращаются в белые карлики. Звезды с массами в половину и менее солнечной живут на главной последовательности десятки миллиардов лет и потому ни одна из них не завершила этой стадии. Ядерные реакции в недрах массивных звезд протекают интенсивно и после нескольких миллионов лет жизни на главной последовательности звезда взрывается как Сверхновая, оставляя в остатке нейтронную звезду, черную дыру или полностью рассеиваясь и поставляя в космическое пространство химические элементы тяжелее гелия. Эволюция звезд в тесных двойных системах сложнее. После превращения одной из компонент в гиганта происходит обмен масс, и менее массивная звезда после существенного увеличения массы может быстрее закончить свою эволюцию. Вообще, в окрестности тесных двойных часто происходят бурные процессы, связанные с перетеканием вещества. Накопив достаточно водорода, сброшенного на белый карлик нормальной звездой, карлик взрывается как Новая, увеличивая на месяц за счет ядерных реакций свою светимость на 12-13 звездных величин. Процесс повторяется с тем бóльшим периодом, чем ярче вспышка. Характерный период Новых — десятки тысяч лет, Новоподобных (карликовых Новых) — десятки и сотни лет. Если одна из звезд — нормальный гигант, а другая — ней-

тронная звезда или черная дыра, то перетекающее вещество образует аккреционный диск, в котором происходят быстрые процессы с выделением энергии в виде синхротронного излучения релятивистских электронов и рентгеновского излучения падающего на поверхность вещества.

6.4 Галактика

Полученные спутником *Гиппаркос* параллаксы и собственные движения звезд в шаре радиуса 300 пк, в котором находится много звезд – эталонов расстояний, включая несколько цефеид, позволили уточнить шкалу расстояний во Вселенной. Данные внеатмосферной астрономии позволили построить тысячи диаграмм Герцшпрунга – Рессела различного населения Галактики.

Достоверно установлено, что наша Галактика – спиральная. Солнце находится в пространстве между спиральными рукавами на расстоянии около 8 кпк от ее центра, обращаясь вокруг него по близкой к круговой орбите с периодом 230 миллионов лет.

В центральной области Галактики выделяется близкое к сферическому ядро, концентрация звезд в котором на порядки превышает концентрацию звезд в окрестностях Солнца. На рубеже 20 и 21 в. в самом центре Галактики (центральный деципарсек) обнаружено орбитальное движение нескольких десятков звезд вокруг компактного радиоисточника *Sgr A**. Звезда с рекордно малым периодом (15 лет) имеет большую полуось около 920 а.е. Обработка наблюдений приводит к заключению, что центр Галактики занят компактным объектом с массой около $4 \cdot 10^6$ масс Солнца. Вероятно, это черная дыра.

Межзвездное пространство диска Галактики заполнено разреженным веществом, частично сконденсированным в облака ионизованного, нейтрального и молекулярного водорода. В качестве примесей имеется богатый набор почти всех химических элементов. Под действием коротковолнового излучения происходит синтез и распад молекул межзвездного газа и образование силикатных пылинок с включением многих элементов. В радиодиапазоне атомарный водород ярко светится в запрещенной линии 21 см. Отождествлены и другие линии атомов и молекул. Зарегистрировано более 130 молекул, в большинстве органических, содержащих

до 13 атомов. В плотных облаках открыты космические метанольные мазеры. В радиодиапазоне детектируются переходы между уровнями атома водорода с номерами более сотни. Размеры таких атомов макроскопичны: доли мм.

В общих чертах стал понятен механизм звездообразования. В результате гравитационной неустойчивости газо-пылевое облако начинает сжиматься, фрагментироваться на плотные глобулы, превращающиеся в протозвезды. Так возникают звездные скопления, содержащие и кратные звезды. Спутниками могут быть нормальные звезды, бурые карлики с массами менее $1/12$ солнечной, в недрах которых ядерные реакции протекают неустойчиво, и планеты с массами менее $1/80$ солнечной, в которых реакции не идут. Звезды первого поколения состоят из водорода и гелия, в следующих поколениях состав их обогащается тяжелыми элементами. Сейчас в Галактике (и в ближайших галактиках) обнаружено два десятка областей звездообразования с инфракрасными глобулами и протозвездами. Выброшенные при взрыве Сверхновых заряженные частицы — космические лучи движутся с релятивистскими скоростями, но не покидают Галактику, искривляя свои траектории под действием Галактического магнитного поля.

6.5 Галактики и квазары

Ближайшие галактики изучены с детальностью, сравнимой с достигнутой для Галактики, уступая ей для звезд низкой светимости и превосходя в описании общего плана строения. В инфракрасном диапазоне обнаружено несколько карликовых галактик — спутников Галактики, скрытых мощной пылевой полосой, лежащей вблизи плоскости галактического экватора. Установлено, что эллиптические галактики содержат мало газо-пылевой составляющей, вращаются медленно и состоят из старых звезд, процесс образования звезд в них прекратился или течет вяло. Спиральные галактики противоположны по этим параметрам. Различие — генетическое. Медленное вращение благоприятно для звездообразования, так что в эллиптической протогалактике почти весь газ сразу превращается в звезды, и новым поколениям не из чего возникать. В спиральных галактиках первичное звездообразование протекало менее бурно, пыль и

газ осели к галактической плоскости, где рождение звезд происходит и сейчас.

В 1963 открыт первый квазар — точечный источник, находящийся, судя по красному смещению, на космологическом расстоянии и имеющий спектр, подобный спектрам далеких галактик. Сейчас открыто более 10^4 квазаров, многие из них окружены на снимках туманными оболочками. Установлена их природа — ядра далеких галактик, видимые нами в эпоху их молодости, много млрд. лет назад. Предположительно главный вклад в огромную светимость квазаров вносят процессы вокруг сверхмассивных (сотни миллионов масс Солнца) черных дыр в их центре. В 1967 с борта ИСЗ Vela-4a (США), предназначенного для фиксации ядерных испытаний в земной атмосфере, были замечены всплески гамма-излучения. В 1973 установлена их космическая природа. С 1997 часть гамма-всплесков удается отождествить с известными объектами неба благодаря немедленной передаче сведений с ИСЗ земным обсерваториям. По крайней мере часть всплесков представляет собой излучение от наиболее мощных взрывов, приходящее с космологических расстояний.

6.6 Эволюция Вселенной

Теория расширяющейся в результате Большого взрыва Вселенной долго имела мало наблюдательных подтверждений: красное смещение галактик, распределение изотопов водорода, лития и гелия в зависимости от расстояния до галактик. В 1965 А.Пензиас и Р.Вильсон (США) обнаружили излучение мм-диапазона радиоволн, приходящее изотропно со всего неба. Оно было отождествлено теоретиками с потоком фотонов, оставшихся от эпохи разделения вещества и излучения, и получило название реликтового, или фонового. В 1990 спутником COBE и в 2003 космическим аппаратом WMAP была построена карта интенсивности реликтового излучения в зависимости от направления прихода фотонов и обнаружены флуктуации интенсивности (анизотропность на уровне 10^{-5}). Это дает указания на первичные неоднородности распределения материи, из которых и возникла современная структура Вселенной.

В 1998 по наблюдениям вспышек сверхновых типа *Ia* в далеких га-

лактиках обнаружено ускорение расширения Вселенной. Более поздние исследования уточнили: после инфляционной стадии Вселенная расширялась с замедлением, но 5 млрд. лет назад замедление сменилось ускорением. Это говорит о наличии сил отталкивания, приписываемых особому виду материи (темная энергия) или физическому вакууму. Впервые подобные силы были введены в теорию относительности еще А.Эйнштейном, но позднее сам Эйнштейн отказался от них.

Физики-теоретики провели квантово-механические расчеты поведения вещества вблизи сингулярности. Теория еще далека от завершения, но приемлемый сценарий уже разработан. В результате квантовой флуктуации вакуум совершил фазовый переход и перешел в наблюдаемое состояние, сохранив общую нулевую энергию (энергия гравитационного поля отрицательна). В первичном бульоне, нагретом до 10^{13} К, происходили реакции рождения и аннигиляции пар элементарных частиц. В результате расширения Вселенной материя остывала, постепенно прекращались реакции рождения протон-антипротонных и электрон-позитронных пар, излучение отделилось от вещества. Асимметрии слабых взаимодействий оказалось достаточно для того, чтобы антивещество исчезло и осталось только вещество и излучение. Нулевая энергия Вселенной влечет евклидовость ее геометрии. С дальнейшим расширением и охлаждением возникли атомы изотопов водорода, гелия и лития, галактики и звезды.

Сменится ли расширение сжатием, или будет продолжаться вечно? До открытия темной энергии казалось, что ответ зависит от одного параметра: средней плотности материи ρ во Вселенной. Если $\rho < \rho_0$, то геометрия последней родственна геометрии Лобачевского, пространство бесконечно во всех направлениях, расширение вечно. Здесь $\rho_0 = 2.5 \cdot 10^{-30} \text{ г/см}^3$ — критическая плотность. Если $\rho > \rho_0$, то геометрия родственна геометрии Римана в узком смысле, пространство конечно (безгранично, но имеет конечное число кубических метров), расширение должно смениться сжатием. В пограничном случае $\rho = \rho_0$ геометрия Вселенной евклидова, расширение вечно, скорость расширения стремится к нулю. Средняя плотность видимой материи более чем на порядок ниже критической. Но большие погрешности в оценке скрытой массы не позволяли выбрать одну из трех альтернатив. Сегодня положение еще менее определено.

Свойства темной энергии известны столь мало, что мы пока не можем сказать не только, изменится ли знак скорости расширения, но и изменится ли знак ускорения расширения. Однако установлено, что геометрия Вселенной очень близка к евклидовой.

7 Значение астрономии для науки, искусства, практики

Общеизвестно мировоззренческое значение астрономии: невозможно ориентироваться в большом мире, не зная, как он устроен.

Фундаментальна роль астрономии в физике и химии: достаточно упомянуть открытие закона всемирного тяготения, конечности скорости света, ее инвариантности относительно систем отсчета, эффектов Ремера и Доплера, линий поглощения в светящемся газе, новых химических элементов (гелий был открыт на Солнце, короткоживущий радиоактивный технеций воссоздается в естественных условиях только на некоторых звездах), химических элементов в необычных состояниях (атомы макроскопических размеров, 16-кратно ионизованное железо и др.), общей теории относительности, гравитационного линзирования, осцилляций нейтрино. Сейчас астрономия предоставляет физике и химии космическую лабораторию с недостижимыми в земных условиях параметрами: сильнейшие гравитационные, магнитные, электрические поля, макроробъекты с ядерной плотностью, высочайший вакуум, обладающие макроэнергией атомные ядра в космических лучах и др. Огромен вклад астрономии как поставщика труднейших задач в развитие математики. Элементы астрономии составляют часть физической географии (тропики Рака и Козерога, полярные круги, линия перемены даты и др.). По астрономическим явлениям (затмения, вспышки Новых и Сверхновых, кометы) произведены датировки многих исторических событий и согласование календарных систем разных народов.

Астрономические сюжеты (солнечные и лунные затмения, кометы, звездопады, полярные сияния, не говоря о восходах, закатах, лунном свете, звездном небе, . . .) пронизывают все виды искусства. Мифология отражается на небе в названиях созвездий и планет. Целый пласт научной фантастики обязан астрономии своим существованием. Астрономические термины вошли в литературный обиход (чаще в переносном

смысле): зенит, горизонт, восход, закат, сумерки, кульминация, апогей, аспект, противостояние, сфера действия, звезда первой величины, созвездие, плеяда, галактика, черная дыра и др. Множество исторических личностей увековечено на небе в названиях двух созвездий (Змееносец — Асклепий, Волосы Вероники — косы царицы Египта Птолемея), тысяч малых планет, кратеров и других образований на телах Солнечной системы.

Огромно практическое значение астрономии. Астрономическими методами человек ориентируется на местности, определяет положение в открытом море или пустыне, время года и суток, фазы Луны (что привело к созданию календаря), предвычисляет колебания высоты приливов. В конце 20 в. созданы атомные часы, на порядки превосходящие по точности хода естественные часы — вращающуюся Землю. Однако жизнь человека связана с солнечными ритмами, поэтому астрономическая служба времени сохранила свое значение, внося поправки в атомное время для его согласования с солнечным. Космонавтика представляет собой приложение открытых в астрономии законов для практики. Траектории ИСЗ и космических зондов рассчитываются по законам небесной механики. Ориентация судов и других транспортных средств теперь чаще производится по навигационным ИСЗ, но ИСЗ — небесные тела, слежение за которыми осуществляется астрономическими методами. Вообще, прикладная космонавтика (спутники связи, телевидения, навигации, спасатели, исследователи солнечной активности) — это в то же время и прикладная астрономия. С исторически неизбежным расширением деятельности людей вне Земли прикладное значение астрономии будет увеличиваться.

8 Астрономические учреждения, общества и журналы

Наблюдения небесных тел и астрономических явлений ведутся главным образом в астрономических обсерваториях. Характерный облик обсерваториям придают здания для астрономических инструментов — башни цилиндрической или многогранной формы с полусферическими куполами или павильоны с отодвигающейся крышей. Радиотелескопы устанавливают под открытым небом. С 20 в. для обсерваторий выбирают

места с наилучшим астрономическим климатом за пределами городов, в основном высоко в горах. Обработка наблюдений, теоретические исследования в области астрономии, а также разработка наблюдательной и измерительной техники проводятся в обсерваториях, специализированных институтах и астрономических отделениях университетов.

В России крупнейшими астрономическими учреждениями РАН являются Специальная астрофизическая обсерватория, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Институт астрономии, Институт прикладной астрономии, Астрокосмический центр ФИАН, Институт космических исследований. Основные университетские центры — Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга МГУ, Астрономический институт им. В.В.Соболева СПбГУ, Коуровская обсерватория Уральского университета, Астрономическое отделение и обсерватория им. В.П.Энгельгардта Казанского университета.

Среди зарубежных астрономических учреждений наибольшее значение имеют: учрежденная 11 государствами расположенная в Чили Европейская южная обсерватория, расположенная на Канарских островах Европейская северная обсерватория; Астрономическая обсерватория Мауна-Кеа, Астрономическая обсерватория Маунт Паломар, Радиоастрономическая обсерватория Аресибо (США); обсерватория Австралийский телескоп; Институт астрономии, Институт астрофизики и Институт радиоастрономии Общества им. Макса Планка (Германия). Астрономические подразделения созданы в космических агентствах, поскольку все больший объем наблюдений проводится с использованием орбитальных телескопов и межпланетных зондов.

Необходимость координации астрономических исследований привела к образованию национальных и международных астрономических обществ. Первое (*Astronomische Gesellschaft*) возникло в Германии в 1863 и организовало составление на 13 обсерваториях разных стран большого каталога с высокоточными координатами звезд северного полушария. Международную роль играют и крупные современные астрономические общества: Американское, Европейское, Лондонское Королевское и др. В России существовало несколько небольших научных и любительских обществ. В 1932 на их базе образовалось Всесоюзное (ныне Всероссийское)

астрономо-геодезическое общество (ВАГО). В 1990 в СССР учреждено профессиональное Советское астрономическое общество (позднее — Евразийское астрономическое общество, Россия), открытое для граждан СНГ и других стран.

В 1919 учреждается Международный астрономический союз (МАС), к которому переходят функции координатора научных работ. Каждые 3 года МАС проводит большие съезды для подведения итогов и обсуждения планов дальнейшего развития астрономии.

Результаты наблюдений и теоретических исследований публикуются в специализированных журналах, издаваемых астрономическими учреждениями и обществами. Первый астрономический журнал *Astronomische Nachrichten* основан в Германии в 1821. На начало 21 в. около 20 астрономических журналов имеют международный или региональный (например, европейский) статус. Всероссийским статусом обладают журналы: *Астрономический журнал*, *Письма в астрономический журнал*, *Астрономический вестник*, *Космические исследования*. Впрочем, нередки публикации статей астрофизического содержания в журналах физического профиля.

Астрофизика²

В.В. Иванов

Астрофизика – раздел астрономии, изучающий небесные тела, их системы и пространство между ними на основе анализа происходящих во Вселенной физических процессов и явлений. Астрофизика изучает небесные объекты любых масштабов, от космических пылинок до межгалактических структур и Вселенной в целом, а также все виды полей (гравитационные, магнитные, электромагнитного излучения) и геометрические свойства самого космического пространства. Целью астрофизических исследований является понимание строения, взаимодействия и эволюции небесных тел, их систем и Вселенной как целого. Основным методом исследования в астрофизике служит не активный эксперимент (как в физике, химии и т.п.), а пассивное наблюдение. Диапазон физических параметров – плотности, температуры, давления, напряженности магнитного поля и др., с которыми приходится иметь дело в астрофизике, далеко превосходит достижимый в земных лабораториях. Поэтому многие виды астрофизических объектов выступают в роли уникальной физической лаборатории, предоставляющей возможности для изучения вещества и полей в экстремальных условиях. Это делает астрофизику неотъемлемой частью физики.

Обычно астрофизику подразделяют на наблюдательную и теоретическую, хотя в последние десятилетия 20 в. граница между ними стала весьма размытой. В зависимости от того, откуда проводятся наблюдения, различают наземную и внеатмосферную наблюдательную астрофизику. По объектам исследования в астрофизике выделяют физику Солнечной системы, гелиофизику (изучение Солнца), физику звезд и межзвездной среды, галактическую (объект исследования – наша Галактика) и внегалактическую астрономию (объекты за пределами Галактики), космологию (изучение Вселенной как целого). Подавляющая часть информации в астрофизике получается путем регистрации и анализа электромагнитного излучения небесных тел. В зависимости от того, в каком спектральном диапазоне ведутся наблюдения, различают оптическую

²Расширенная версия статьи того же названия, опубликованной в 2005 г. в Большой Российской Энциклопедии, том 2, стр. 422 – 424.

наблюдательную астрофизику (сложившуюся еще в 19 в.), радиоастрономию (ставшую самостоятельным разделом астрофизики в середине 20 в.), ультрафиолетовую и рентгеновскую астрономию (получившую широкое развитие с 1970-х гг.), инфракрасную, субмиллиметровую и гамма-астрономию. Несколько особняком стоят астрофизика космических лучей (оформившаяся в 1960-е гг.), нейтринная астрофизика (зародившаяся в 1970-е гг.) и делающая первые шаги гравитационно-волновая астрономия. В зависимости от спектрального разрешения регистрируемого потока электромагнитного излучения различают астрофотометрию (низкое разрешение) и астроспектроскопию (разрешение, достаточное для регистрации спектральных линий). Астрополяриметрия исследует поляризационные характеристики излучения астрономических объектов.

С момента своего зарождения в середине 19 в. роль астрофизики в изучении Вселенной быстро возрастала. В 20 в. она заняла в астрономии доминирующее положение. Стремительное развитие астрофизики с начала 20 в. было обусловлено, с одной стороны, общим техническим прогрессом, приведшим к радикальным изменениям в технике астрофизических наблюдений, с другой стороны – с развитием физики. Особенно важное влияние на астрофизику оказало появление квантовой механики (1920-е гг.) и ядерной физики (30 – 50-е гг. 20 в.). Постепенно возрастала и к началу 21 в. стала играть важнейшую роль в астрофизике также общая теория относительности. Исторический очерк см. в статье *Астрономия* в настоящем сборнике.

1 Солнечная система, планетные системы звезд

Большая часть физической информации о Солнечной системе получена в ходе космических исследований. Применяемые в них методы и аппаратура сильно отличаются от традиционных астрофизических. Пассивные наблюдения дополняются активным зондированием, прямыми измерениями *in situ* и даже экспериментом. В итоге исследования Солнечной системы в значительной мере обособились от остальной астрофизики. Динамика Солнечной системы, ее устойчивость и динамическая эволюция – предмет небесной механики. Изучение планет, в первую очередь

земной группы, а также астероидов и спутников планет стало предметом планетологии – новой дисциплины, сложившейся на стыке астрономии, геологии и геофизики.

Космические исследования позволили получить крупномасштабные изображения и выполнить картирование поверхностей Луны, планет земной группы, спутников планет, ряда астероидов и ядер нескольких комет. Прояснилась относительная роль эндогенных (вулканизм, тектонические перемещения) и экзогенных факторов (метеоритная бомбардировка) и процессов эрозии в формировании рельефа поверхностей планет. Открыт активный вулканизм на спутнике Юпитера Ио и выяснен его механизм (диссипация энергии приливных деформаций). Для Луны, Марса и астероида Эрос прямыми измерениями найден химический и даже минералогический состав их покрова. Измерен возраст доставленных на Землю лунных пород (до 4.5 млрд. лет). Детально определен химический состав, изучено строение, общая циркуляция и динамика атмосфер планет. При этом для Венеры и Юпитера производились прямые измерения в их атмосферах со спускаемых аппаратов, на Марсе измерения неоднократно велись и с его поверхности. Возникло новое научное направление – климатология планет. На Марсе обнаружены большие количества водяного льда. Имеются убедительные указания на присутствие на нем в прошлом значительных количеств жидкой воды. Продолжаются поиски признаков наличия (сейчас или в прошлом) простейших форм жизни на Марсе. С космических аппаратов измерены магнитные поля планет и изучена их структура. В ее формировании важнейшую роль играет взаимодействие поля с набегающим потоком плазмы солнечного ветра, что порождает магнитосферы планет. Строение магнитосфер планет с магнитным полем (Меркурий, Земля, планеты-гиганты) оказалось сложным, особенно у Юпитера. У Земли и планет-гигантов открыты радиационные пояса, самые мощные – у Юпитера. Данные о магнитных и гравитационных полях планет, полученные в ходе космических исследований, позволили значительно уточнить представления о внутреннем строении планет.

Одной из ключевых проблем физики Солнечной системы остается проблема ее происхождения. Общепринятая точка зрения состоит в том, что планеты сформировались около 5 млрд. лет назад, вскоре после рожде-

ния Солнца, из окружавшего его газо-пылевого диска. Подобные диски обнаружены у некоторых звезд. Однако детали процесса формирования Солнечной системы известны плохо.

Начиная с 1995 г. около звезд, подобных Солнцу, открыто (к июню 2007 г.) более 230 газовых планет-гигантов (экзопланеты). Экзопланеты земного типа пока не доступны наблюдениям. Обнаружены звезды с двумя и даже с четырьмя планетами. Найденные около звезд планетные системы значительно отличаются от Солнечной. В них планеты типа Юпитера часто имеют орбиты меньших размеров, чем у Меркурия – самой близкой к Солнцу планеты. Излучение звезды сильно (до ~ 1000 К) нагревает атмосферы таких планет (“горячие Юпитеры”). В ряде случаев движение происходит по сильно вытянутым орбитам. Накопление данных о внесолнечных планетных системах и их систематизация должны будут составить основу для построения последовательной теории происхождения планетных систем. Другая важнейшая перспективная задача исследований экзопланет – попытка обнаружения планет земного типа (не газовых) с атмосферами, содержащими озон и водяной пар. Последнее можно будет рассматривать как указание на наличие жизни на планете. Разрабатывается крупный международный проект “Дарвин”, имеющий целью решение этой задачи (ориентировочный срок – 2015 г.).

2 Физика Солнца

Специфика исследований Солнца определяется его близостью к нам. Отсюда – большие потоки излучения и возможность наблюдения явлений, развивающихся на Солнце на малых пространственных масштабах, вплоть до ~ 100 км. Кроме того, прямому исследованию доступно вещество солнечного ветра и частицы солнечных космических лучей. Имеется также уникальная (по сравнению со звездами) возможность наблюдения Солнца с космических аппаратов с малых расстояний и со всех сторон, в том числе и со стороны полюсов (что и было реализовано). Многие явления, наблюдаемые на звездах, были поняты благодаря тому, что их гораздо детальнее удалось ранее исследовать на Солнце. Гелиофизические исследования имеют прикладное значение из-за прямого воздействия событий на Солнце на биосферу, в том числе на здоровье людей и на их

технологическую деятельность (радиосвязь, космонавтика и др.).

То, что мы видим как “поверхность” Солнца – так называемая фотосфера – это слои солнечной атмосферы толщиной в 200 – 300 км, где температура составляет 5000 – 6000 К. Плотность газа в фотосфере мала, в $10^3 \div 10^4$ раз ниже плотности воздуха, однако из-за высокой температуры этот газ гораздо менее прозрачен, чем воздух. Наш дневной свет рождается в фотосфере при присоединении второго электрона к атомам водорода – основной составляющей солнечной атмосферы. В итоге образуются отрицательные ионы водорода. Донорами свободных электронов выступают при этом имеющиеся в виде “примесей” атомы тяжелых элементов. По интенсивностям линий поглощения в спектре Солнца был детально изучен его химический состав, а по доплеровским смещениям линий – движения газа в фотосфере. В фотосфере наблюдаются различные структурные образования, из которых общеизвестны солнечные пятна – области пониженной температуры с сильным, до нескольких килогаусс, магнитным полем.

Над фотосферой находятся почти прозрачные для видимого света атмосферные слои – хромосфера (толщиной в тыс. км) и корона, простирающаяся на многие радиусы Солнца и не имеющая четкой внешней границы. В явлениях, происходящих в хромосфере и особенно в короне, определяющую роль играет магнитное поле, управляющее движением солнечной плазмы. Температура над фотосферой быстро растет наружу, достигая в короне ($1 \div 2$) млн. К. Эти внешние слои солнечной атмосферы крайне неоднородны и динамичны, в них имеются разнообразные образования (протуберанцы, магнитные петли, яркие корональные точки, корональные дыры и др.), меняющиеся день ото дня, иногда происходят взрывы, сопровождающиеся перестройкой магнитного поля (хромосферные вспышки, эруптивные протуберанцы). Наблюдающиеся в атмосфере Солнца изменения получили название солнечной активности. Наиболее сильное воздействие на Землю (в том числе на самочувствие людей) оказывают солнечные вспышки и выбросы коронального вещества, вызывающие различные геомагнитные возмущения. Солнечная активность циклически изменяется с квазипериодом в 11 лет. Последний максимум солнечной активности был в апреле 2000 г. Служба Солнца – монито-

ринг изменений на Солнце – зародилась еще в 19 в. В середине 20 в. к оптическим наблюдениям добавились систематические измерения радиоизлучения Солнца, а затем и его ультрафиолетового и рентгеновского излучения с борта космических аппаратов.

Долгое время возможности изучения строения недр Солнца мало чем отличались от того, что имеется для звезд. Однако с 1970-х гг. картина резко изменилась. Были начаты измерения потока приходящих непосредственно из недр Солнца нейтрино, рождающихся при идущих там термоядерных реакциях. Было разработано несколько методов их регистрации. К 2003 г. было надежно установлено, что полный поток солнечных нейтрино согласуется с предсказанным по модели строения Солнца. Одновременно эти измерения позволили доказать, что масса покоя нейтрино отлична от нуля – факт, важный для физики элементарных частиц. Нейтринные эксперименты дали прямое доказательство правильности основных представлений о ядерных реакциях как источнике энергии Солнца (и звезд) и, более того, позволили измерить температуру в центре Солнца с погрешностью в несколько процентов. Второй метод тестирования недр Солнца дало изучение колебаний и волн, распространяющихся по “поверхности” Солнца - так называемая гелиосейсмология. Подобно тому, как сейсмология по изучению распространения сейсмических волн в теле Земли позволяет изучать ее внутреннее строение, гелиосейсмологические исследования позволили измерить основные физические характеристики недр Солнца и полностью подтвердили модель, рассчитанную теоретиками.

3 Физика звезд

Физика звезд – один из краеугольных камней астрофизики. Она развивалась в двух направлениях – изучение строения наружных слоев звезды, из которых излучение выходит непосредственно (звездные атмосферы) и исследование звездных недр и происходящих там процессов, что определяет строение и эволюцию звезды как целого. Изучение звездных атмосфер – это фактически интерпретация звездных спектров. Строение атмосферы, помимо ее химического состава, определяется двумя параметрами – ускорением силы тяжести и величиной подводимого снизу,

из недр звезды, потока энергии, который выражают в температурной шкале, характеризуя его так называемой эффективной температурой. Она близка к температуре газа в тех слоях атмосферы, откуда выходит большая часть излучения. Отражением того факта, что строение звездных атмосфер определяется всего двумя параметрами, является сложившаяся в первой половине 20 в. эмпирическая двумерная классификация звездных спектров. Создание последовательной теории звездных спектров стало возможным лишь с развитием квантовой механики, позволившей понять физику элементарных процессов взаимодействия излучения и вещества. Один из важнейших фактов, установленных при изучении звездных спектров, – сходство химического состава атмосфер большинства нормальных звезд диска Галактики (так называемое звездное население I типа) с химическим составом наружных слоев Солнца: водород – около 70% по массе, гелий 27%, все остальные элементы, вместе взятые (так называемые тяжелые) – не более 3%. У звезд сферической составляющей нашей Галактики (звездное население II) содержание тяжелых элементов в десятки и сотни раз ниже солнечного. Этот факт, обнаруженный в 1940–1950-е гг., нашел свое естественное объяснение в созданной в 1950–1960-е гг. теории происхождения химических элементов в звездах, согласно которой все химические элементы, кроме водорода и частично гелия и лития, были синтезированы в недрах нескольких поколений звезд.

Наблюдательной основой изучения строения и эволюции звезд служат статистические зависимости между их основными глобальными параметрами – массами, светимостями и радиусами (так называемая диаграмма Герцшпрунга-Рессела и зависимость масса-светимость). Во многих отношениях наиболее важным параметром звезды является ее масса. Массы звезд находятся из изучения движения двойных звезд по (обобщенному) третьему закону Кеплера. Оказалось, что они заключены между ~ 0.1 и ~ 100 массами Солнца ($2 \cdot 10^{33}$ г). С физической точки зрения, отличительная особенность нормальных звезд – это идущие в их недрах термоядерные реакции превращения водорода в гелий, а после его выгорания – синтез С и О из Не и т.д., вплоть до железа ^{56}Fe . Синтез элементов тяжелее железа также происходит в недрах звезд, но не служит

источником их энергии. Конкретные цепочки реакций горения водорода, обеспечивающих энерговыделение в звездах и на Солнце на протяжении большей части их жизни, были указаны в конце 1930-х гг. (Х. Бете, К. Вейцекер, Германия). Анализ показал, что звезды с массами больше ~ 100 масс Солнца были бы неустойчивы, и поэтому их в природе нет. Тела с массами от ~ 0.1 до ~ 0.01 массы Солнца представляют собой объекты, промежуточные между звездами и планетами – так называемые субзвезды, или бурые карлики (обнаружены в 1990-е гг.). Температуры в их недрах недостаточны для синтеза гелия, однако в них происходят термоядерные реакции выгорания тяжелого изотопа водорода – дейтерия, а также лития. Если же масса объекта ≤ 0.01 массы Солнца (точнее, ≤ 13 масс Юпитера), то термоядерные реакции в нем не идут вовсе – это уже планета.

Масса и начальный химический состав определяют весь жизненный путь одиночной звезды. Первый этап термоядерной эволюции – это горение водорода в центральных частях звезды (так называемая фаза главной последовательности). Он является наиболее продолжительным (для Солнца – около 10 млрд. лет; возраст Солнца – около 5 млрд. лет), и его проходят все звезды. Чем больше масса звезды, тем короче фаза главной последовательности. Для самых массивных звезд она составляет всего несколько миллионов лет. Звезды с массами ≤ 0.8 массы Солнца за все время жизни Вселенной еще не успели завершить этой фазы эволюции. По исчерпанию водорода в центральных частях звезды ее размеры резко увеличиваются. Она превращается в так называемого красного гиганта.

Конечным продуктом эволюции звезд с начальными массами ≤ 8 масс Солнца служат белые карлики – компактные (размером с земной шар) звезды малой светимости с плотностью, по порядку величины в миллион раз превышающей плотность воды. Они полностью лишены водорода. Ядерные реакции в них не идут. Светятся белые карлики за счет запасаенной в их недрах тепловой энергии, медленно остывая. Массы белых карликов невелики, не более 1.4 массы Солнца (так называемый предел Чандрасекара). Перед образованием белого карлика звезды теряют значительную (а некоторые – большую) часть своей начальной массы частично путем истечения вещества из наружных слоев – звездного ветра,

частично путем отделения и медленного расширения наружных слоев, образующих расширяющиеся со скоростями $\sim 20 - 30$ км/с оболочки – планетарные туманности. Массивные звезды проходят все этапы ядерного горения вплоть до образования железа, после чего их механическое равновесие нарушается. Происходит грандиозный взрыв, наблюдаемый как вспышка сверхновой звезды. В максимуме блеска сверхновые достигают светимости, сопоставимой со светимостью целой галактики. В результате взрыва выделяется колоссальная гравитационная и термоядерная энергия, большая часть которой уносится нейтрино, возникающими при превращении в центре звезды обычного вещества в нейтронный газ в результате сжатия, приводящего к соединению электронов с протонами ядер. Всплеск такого нейтринного излучения был зафиксирован при вспышке сравнительно близкой сверхновой в 1987 г. Самые массивные звезды, вспыхивая в конце жизни как сверхновые, по-видимому, рожают черные дыры – объекты, не находящиеся в равновесии и продолжающие неограниченное сжатие. К настоящему времени в Галактике обнаружено ~ 20 объектов, являющихся, судя по многим признакам, черными дырами звездных масс. Значительная часть, а иногда даже вся масса предсверхновой в результате взрыва рассеивается в окружающем пространстве со скоростями ~ 10000 км/с, образуя со временем в межзвездной среде обширные нагретые до $\sim 10^6$ К области – остатки сверхновых. Пример такого объекта – Крабовидная туманность. Это остаток вспышки сверхновой 1054 г. Вспышки сверхновых приводят к обогащению межзвездной среды тяжелыми элементами и тем самым постепенно меняют химический состав строительного материала для последующих поколений звезд.

Рождающиеся при вспышках сверхновых нейтронные звезды имеют плотности $\sim 10^{14} - 10^{15}$ г/см³ при радиусах ~ 10 км и массах не более 2 – 3 масс Солнца (обычно ~ 1.4 массы Солнца). Возможность существования нейтронных звезд была указана Л.Д. Ландау (СССР) в 1932 г. Они были обнаружены во второй половине 1960-х гг., в частности и в центре Крабовидной туманности в виде пульсаров – точечных источников радиоизлучения периодически меняющейся интенсивности (Дж. Белл, Э. Хьюиш, Англия). Периодичность изменения потока объясняется тем, что излу-

чение пульсара сосредоточено в узком конусе, который из-за вращения пульсара вокруг оси периодически “чиркает” по Земле (при подходящей ориентации). Самый короткопериодический пульсар (открыт в 2006 г.) делает 716 оборотов в секунду, пульсар в Крабовидной туманности – более 30 оборотов в секунду. Огромную роль в физике пульсаров (и вообще нейтронных звезд) играют магнитные поля, характерное значение напряженности которых $\sim 10^{12}$ Гаусс, а рекордные значения доходят до 10^{14} Гаусс. Одиночные пульсары черпают энергию излучения из кинетической энергии вращения, постепенно увеличивая период. Пульсары в тесных двойных системах наблюдаются также в рентгеновском диапазоне, где их свечение поддерживается выделением гравитационной энергии вещества, перетекающего на пульсар со второго компонента пары.

Перетекание вещества одного компонента двойной звезды и захват его вторым компонентом – так называемая аккреция – играет важную роль в эволюции двойных звезд. Вещество, аккрецируемое белым карликом – компонентом двойной системы, аккумулируется на его поверхности, что в конце концов приводит к взрывному загоранию водорода. Этим объясняются вспышки различных типов так называемых катаклизмических переменных звезд, наиболее известными из которых являются обычные Новые (вспышка – раз в несколько тысяч лет) и новоподобные переменные (промежуток между вспышками – от десятков лет до десятков дней). Периодически повторяющиеся термоядерные взрывы вещества, аккрецируемого нейтронной звездой, входящей в состав двойной системы, наблюдаются в рентгеновском диапазоне (так называемые барстеры).

Создание последовательной теории строения и эволюции звезд – одно из крупных достижений естествознания 20 в. В активе этой теории – много предсказаний, впоследствии подтвержденных наблюдениями. В астрономии теория звездной эволюции сыграла роль, сопоставимую с ролью дарвиновской теории эволюции в биологии.

4 Физика межзвездной среды

Межзвездная среда состоит из нескольких основных компонентов – газа, пыли, частиц высокой энергии – космических лучей, магнитных полей

и электромагнитного излучения. Основным по массе компонентом является межзвездный газ, к которому примешана пыль (около 1% от массы газа). Физические условия в межзвездной среде весьма специфичны. Плотности здесь очень малы, хотя и отличаются от места к месту на несколько порядков (в среднем – 1 атом в 1 куб. см.). В плотных облаках плотность может достигать до 10^4 атомов в 1 куб. см. Колоссален и диапазон температур – от нескольких кельвинов до 10^7 К (а в межгалактической среде – и до 10^8 К).

Исследования межзвездной среды ведутся во всех спектральных диапазонах. В оптической области межзвездное вещество проявляет себя в виде пылевых (темных и светлых – отражательных) и газовых туманностей. Кроме того, пыль вызывает межзвездное поглощение света, а также приводит к тому, что излучение далеких звезд при прохождении через межзвездную среду становится поляризованным. Поляризация возникает из-за того, что межзвездные магнитные поля (напряженность $\sim 10^{-6}$ Гаусс) вызывают преимущественную ориентацию несферических межзвездных пылинок. Теория свечения газовых туманностей под действием ультрафиолетового излучения погруженных в них горячих звезд стала основой определения температур, плотностей и химического состава туманностей. Колоссальный прогресс в изучении межзвездной среды вызвала радиоастрономия. Излучение нейтрального водорода в линии с длиной волны 21 см, возникающей при переходах между компонентами сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода, открытое в 1950-е гг., дало возможность изучить распределение и движение (по эффекту Доплера) нейтрального водорода в нашей, а затем и в других галактиках. Впоследствии радиоспектроскопия межзвездной среды позволила обнаружить присутствие в ней молекул более сотни видов, в том числе многоатомных. Были открыты мощные природные мазеры, работающие на молекулах OH, H₂O и др. Внеатмосферные исследования в ультрафиолете привели в 1970-е гг. к открытию в Галактике нескольких тысяч гигантских облаков молекулярного водорода с массами порядка миллиона масс Солнца. Рентгеновские наблюдения дали информацию о наиболее горячей компоненте межзвездной среды и позволили (наряду с наблюдениями в радиодиапазоне) детально изучить большое число

остатков вспышек сверхновых звезд. Одним из центральных вопросов физики межзвездной среды к концу 20 в. стало изучение идущих в ней процессов рождения звезд. Установлено, что звездообразование происходит в гигантских массивных газопылевых комплексах вследствие возникновения в них гравитационной неустойчивости (критерий которой был найден Дж. Джинсом (Англия) еще в 1902 г.). Исследование процесса звездообразования в нашей и других галактиках – активно развивающаяся область астрофизики.

5 Физика Галактики

Представление о нашей Галактике как о типичной спиральной галактике сложилось постепенно, начиная с 1920-х гг., когда впервые было установлено (Х. Шепли, США), что Солнце находится далеко от центра нашей звездной системы. По современным данным, расстояние от Солнца до центра Галактики – 8 килопарсек, или 27 тыс. световых лет, период его обращения (галактический год) – около 230 млн. лет. Большая часть непосредственно наблюдаемого (светящегося) вещества в Галактике сосредоточена в звездах, число которых $\sim 10^{11}$. Масса межзвездной среды составляет около 10% от суммарной массы звезд.

Общая картина строения Галактики такова. В ней выделяют три составляющих – диск (так называемое звездное население I плюс тонкий газово-пылевой слой межзвездного вещества), сферическая составляющая (звездное население II) и темное гало (частицы и/или тела неизвестной природы, присутствие которых выявляется только по их гравитации). Звезды галактического диска обращаются вокруг центра Галактики по близким к круговым орбитам, имеющим малый наклон к галактической плоскости. Совокупность этих звезд образует вращающийся сильно уплощенный (толщина $\sim 1/10$ радиуса) диск диаметром около 30 килопарсек (100 тыс. световых лет). В пределах ~ 1 килопарсека от центра диск вращается твердотельно, а на больших расстояниях – с почти постоянной линейной скоростью ~ 200 км/с. На этом диске имеется спиральный узор, обрисовываемый горячими массивными молодыми звездами и газопылевыми комплексами, как и у всех спиральных галактик. Однако из-за того, что мы находимся внутри Галактики, надеж-

но проследить этот спиральный узор очень сложно. В диске Галактики рождение звезд продолжается и в наше время (темп звездообразования ~ 1 масса Солнца в год). Родившиеся в газопылевых комплексах звезды образуют рассеянные звездные скопления и звездные ассоциации – постепенно рассасывающиеся в звездном поле слабо гравитационно связанные группы по $\sim 10^2 \div 10^3$ звезд близкого возраста. Изучение звездных скоплений в 30 – 50-е гг. 20 в. дало прочную наблюдательную основу и одновременно стало тестом теории эволюции звезд.

Звезды сферической составляющей (население II) движутся вокруг центра Галактики по сильно вытянутым орбитам, плоскости которых ориентированы хаотически, так что эта составляющая Галактики в ее вращении не участвует. К сферической составляющей Галактики относятся также ~ 150 шаровых звездных скоплений (с числом звезд $10^4 \div 10^6$ в каждом). Концентрация звезд сферической составляющей плавно убывает с расстоянием от центра Галактики. Наконец, в гало Галактики, существование которого было установлено в конце 20 в., сосредоточена большая часть массы Галактики. Гало простирается существенно дальше, чем звездные составляющие Галактики и имеет, по-видимому, округлую форму. Что представляет собой вещество гало – неизвестно. Оно не светится ни в каком диапазоне и потому получило название темной материи. Выяснение ее природы – одна из важных нерешенных задач астрофизики. В самом центре Галактики находится массивное ($\sim 4 \cdot 10^6$ масс Солнца) компактное тело. Масса этого объекта надежно определена по ИК-измерениям движений звезд, находящихся в непосредственной его окрестности. Общепринятая точка зрения состоит в том, что массивный компактный объект в центре Галактики – это черная дыра.

6 Физика внегалактических объектов

Галактики трех основных морфологических типов – эллиптические, спиральные и неправильные – сильно отличаются по содержанию в них межзвездного газа (меньше всего его в эллиптических, больше всего – в неправильных галактиках) и по интенсивности процесса звездообразования в них. Эллиптические галактики состоят из старых звезд, тогда как в дисках спиральных галактик и в неправильных галактиках

продолжаются активные процессы звездообразования и имеется много молодых горячих звезд. В эволюции галактик важную роль играет их взаимодействие, столкновения и даже слияния. Изучение морфологии галактик в сопоставлении с составом их звездного населения – одна из активно развивающихся областей внегалактических исследований. Важное открытие было сделано при изучении вращения спиральных галактик по эффекту Доплера (как в оптическом диапазоне, так и по радиолинии нейтрального водорода с длиной волны 21 см). Оказалось, что в галактиках суммарная масса звезд составляет всего несколько десятков процентов от их полных масс, остальное – это темная материя, образующая вокруг видимого тела галактики обширное гало, значительно превышающее размеры звездного диска. Существование темной материи подозревалось давно (по измерениям скоростей движений галактик в скоплениях) и в конце 20 в. подтверждено еще несколькими методами, в частности, по наблюдениям гравитационного линзирования излучения далеких галактик и квазаров при распространении его сквозь пространство, искривляемое тяготеющим веществом более близких скоплений галактик, находящихся на луче зрения.

Давняя задача исследования галактик – объяснение природы спиральных ветвей. Считается, что они представляют собой волны плотности, перемещающиеся по вращающемуся звездному диску галактики. В них идет активный процесс звездообразования. В ядрах эллиптических и спиральных галактик находятся сверхмассивные ($10^6 \div 3 \cdot 10^9$ масс Солнца) компактные объекты, по всем признакам – черные дыры. В непосредственной близости от них наблюдаются газ и звезды, движущиеся со скоростями до тысяч км/с. При захвате газа и звезд этими сверхмассивными черными дырами происходит выделение колоссальной гравитационной энергии, перерабатываемой в излучение всех спектральных диапазонов, от гамма и рентгеновского до радио. Если светимость такого активного ядра галактики превышает светимость целой галактики на 2 – 3 порядка, то объект называется квазаром, при меньшем энерговыделении говорят просто об активной галактике того или иного типа (в зависимости от мощности энерговыделения и геометрии области излучения). Так как выделение энергии в активных ядрах галактик происходит в очень

малом объеме, обычно их излучение оказывается переменным. Значительные вариации потока происходят на многих временных шкалах – от ~ 10 лет до часов, минут и даже нескольких секунд. Захватываемое черной дырой вещество образует вокруг нее вращающийся аккреционный диск (такие диски наблюдаются). В направлении, перпендикулярном к диску, часто выбрасываются в противоположные стороны две движущиеся с релятивистскими скоростями узкие коллимированные струи плазмы – джеты, имеющие зачастую колоссальную протяженность, во много раз превышающую размеры галактик и в отдельных случаях достигающую до $1 \div 2$ мегапарсек, что превышает расстояние между галактиками. Такие джеты наблюдаются во всех диапазонах, от радио до рентгена. Механизм их свечения – синхротронный, т.е. излучение электронов, движущихся в магнитных полях почти со скоростью света (релятивистских). Изучение процессов, происходящих в ядрах галактик, – одна из актуальнейших проблем астрофизики.

Галактики распределены в пространстве неравномерно, образуя группы и скопления (с числом членов от всего нескольких до тысяч), а также гигантские пустоты – войды, размером в десятки мегапарсек. Наша Галактика находится на периферии богатого скопления галактик, на расстоянии ~ 15 мегапарсек (~ 50 млн световых лет) от его центра. В межгалактическом пространстве в скоплениях галактик имеется крайне разреженный (1 атом на несколько куб. м.) горячий (с температурой $\sim 10^7 \div 10^8$ К) газ, который был обнаружен по его рентгеновскому излучению. Масса межгалактического газа превышает суммарную массу звезд, имеющих во всех галактиках скопления. Неоднородность в распределении галактик сохраняется до масштабов ~ 100 мегапарсек, на больших масштабах Вселенная в среднем однородна.

7 Космология

Изучение Вселенной как целого служит предметом космологии. В ее основе лежит общая теория относительности А. Эйнштейна (1915 г.). Исходя из открытых им фундаментальных уравнений, связывающих распределение материи с геометрическими свойствами пространства и ходом времени, в 1917 г. Эйнштейн построил статическую модель Вселенной. В

1922 г. А.А. Фридман (Россия) открыл, что уравнения Эйнштейна имеют решения, которые описывают расширяющийся со временем мир. Этим в науку была введена парадигма эволюционирующей Вселенной, получившая вскоре наблюдательное подтверждение. Именно, в 1929 г. Э. Хаббл (США) установил, что Вселенная расширяется: любые две галактики, разделенные достаточно большим расстоянием r , удаляются друг от друга со скоростью v , которая пропорциональна r , так что $v=Hr$ (закон Хаббла). Коэффициент пропорциональности H в этом соотношении называется постоянной Хаббла ($H = 70$ км/(с·Мпк)). Из-за описываемого законом Хаббла общего расширения пространства линии в спектрах далеких объектов – галактик и квазаров – смещены в красную сторону за счет эффекта Доплера. На начало 2008 г. самым далеким известным объектом Вселенной была галактика, у которой красное смещение увеличивает длины волн всех деталей ее спектра в 8 раз.

В 1946 г. Дж. Гамов (США) выдвинул концепцию горячей Вселенной, согласно которой на ранних этапах расширения, вскоре после своего рождения (так называемый Большой Взрыв), Вселенная была очень горячей и в ней излучение доминировало над веществом. При расширении температура падала, и с некоторого момента пространство стало для излучения практически прозрачным. Излучение, сохранившееся от этого момента эволюции, – так называемое реликтовое – равномерно заполняет всю Вселенную до сих пор. Из-за космологического расширения температура этого излучения продолжает падать. В настоящее время она составляет 2.7 К. Реликтовое излучение было открыто в 1965 г. (А. Пензиас, Р. Вилсон, США). В 1992 г. в распределении интенсивности реликтового излучения по небу были открыты предсказанные теоретически небольшие флуктуации, несущие информацию о ранней Вселенной. С тех пор их изучение сильно продвинулось, что дало важные для космологии результаты. В 1998 г. по изучению вспышек сверхновых (точнее, одного из нескольких известных их типов, именно, Ia) в предельно далеких галактиках было сделано неожиданное открытие, приведшее к пересмотру имевшихся представлений о динамике расширения Вселенной и о роли в ней обычной материи. Было установлено, что в настоящее время Вселенная расширяется ускоренно. Агент, вызывающий это ускорение, получил

название темной энергии. В отличие от обычного вещества, она создает отрицательное давление. Природа темной энергии неизвестна.

Современная космологическая модель такова. Возраст Вселенной около 14 млрд лет. Пространство Вселенной плоское (евклидова геометрия). В массу Вселенной около 70% вносит темная энергия, 26% – темная материя неизвестной природы, и всего 4% обеспечивается обычным (барионным) веществом, из которых лишь около 0.5% дают звезды. Выяснились глубокие связи космологии с физикой элементарных частиц. Эта картина кардинально отличается от представлений всего 20 – 30-летней давности. Переворот был вызван прогрессом наблюдательной астрофизики. К началу 21 в. космология стала наиболее быстро развивающейся областью астрономии.

Справочная литература

Аллен К.У., Астрофизические величины, М., 1977

Засов А.В., К.А. Постнов, Общая астрофизика, Фрязино, 2006

Кононович Э.В., Мороз В.И., Общий курс астрономии, М., 2001

Куликовский П.Г., Справочник любителя астрономии, М., 2002

Соболев В.В., Курс теоретической астрофизики, М., 1985

Сюняев Р.А (ред.), Физика космоса. Маленькая энциклопедия, М., 1986

Carroll B.W., Ostlie D.A., An Introduction to Modern Astrophysics, Reading, 1996

Padmanabhan T., Theoretical Astrophysics, vols. 1 - 3, Cambridge, 2000 - 2002