# ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЦА

**И.Н. Жукова, В.С. Малых, А.И. Шамбин**

*Адыгейский государственный университет, г. Майкоп*

Рассматриваются способы определения основных параметров Солнца, некоторые из которых могут быть получены учащимися самостоятельно в ходе решения простейших задач теории и практики астрономических наблюдений. Изложение материала сопровождается кратким экскурсом в историю астрономии.

## Введение

Современная физика Солнца является самостоятельной быстро развивающейся областью астрофизики. Многочисленные космические исследования солнечных явлений с околосолнечных спутников (SOHO, Stereo, SDO и др.), межпланетных космических аппаратов («Пионер», «Улисс» и т.д.) и искусственных спутников Земли («Винд» и пр.) [1] позволили получить многочисленный массив информации о центральном теле нашей системы. С большой точностью были определены физические параметры нашего светила. Речь идёт об основных величинах, характеризующих Солнце: радиус, масса, плотность, светимость, температура наружных и внутренних слоёв, химический состав. Ограниченность объёма учебных часов, выделяемых для преподавания астрономии, не позволяет уделить физике Солнца должное внимание. Поэтому в учебниках астрономии авторы обычно указывают значения этих параметров, не останавливаясь на методах их получения. Возникает определённый конфликт между целями изучения астрономии и ресурсами реализации этих целей. В данной статье предлагается возможный вариант решения данной образовательной проблемы: авторы считают, что учащиеся должны иметь представления о способах определения основных параметров Солнца и уметь получить их самостоятельно при решении простейших задач теории и практики астрономических наблюдений и предлагают вариант сжатого изложения материала. В данной статье делается небольшой экскурс в историю астрономии, который можно рассматривать как дополнение к школьному учебнику астрономии.

## 1. Измерения расстояния от Земли до Солнца (астрономической единицы)

Принцип измерения расстояний до небесных светил изложен в школьном учебнике по астрономии [2, с. 66]. Дополняя материал учебника, отмечаем, что непосредственно найти горизонтальный параллакс Солнца p не удаётся.

Если бы параллакс p был измерен с достаточной точностью, то было бы вычислено искомое расстояние $D = \dfrac{R}{\sin p}$, где $R$ – радиус Земли. Поэтому был применён косвенный метод.

Сначала по параллактическому смещению Марса находилось расстояние от Земли до Марса. Затем по сведениям об относительных значениях средних расстояний планет от Солнца из «Малого комментария» (1515 г.) Коперника вычислялось среднее расстояние от Земли до Солнца, которое принято за астрономическую единицу длины (а. е.). Школьникам можно предложить загадку: известно в километрах расстояние от Земли до Марса в противостояние, а также среднее расстояние от Марса до Солнца в а. е. найти значение астрономической единицы в километрах. Упомянутый косвенный метод был применён астрономом Парижской обсерватории в начале 70-х годов XVII века. Марс в противостоянии наблюдали Дж. Кассини с Ж. Пикаром в Париже и Ж. Рише в Каене (северное побережье Южной Америки, 5° северной широты). По результатам наблюдений был измерен параллакс Марса и определено расстояние до него. Значение астрономической единицы было найдено с точностью до 8%

[3, с. 136]. Большей точности удалось достичь при наблюдении астероида Эрос, параллакс которого может превысить максимальный параллакс Марса (23″) более, чем в 2 раза. Наблюдения Эроса в 1930-31 г.г. дали значения параллакса Солнца: p=(8,790±0,01)″ [4, с. 128], что соответствует величине а. е. 149 501 810,6 км. Проведённая в Советском Союзе обработка данных радиолокационных измерений расстояний до Венеры в 1962-75 г.г. дала значение: 1 а. е.= (149 597 867, 9±0,9) км [4, с. 553]. Более точное значение (по данным 2000 г.): 1 а. е.=149 597 870, 66 км [5, с. 397].

## 2. Определение радиуса Солнца

Радиус Солнца определён из измерений его углового диаметра и расстояния от Земли до Солнца.

Измерить угловой поперечник Солнца можно предложить самим учащимся. Пробуя простейшие приемы: по тени от шара, по изображению Солнца, полученному с помощью линзы и пр., учащиеся убеждаются, что измерения отягчены значительными погрешностями. Архимед (287-212 г.г. до н.э.) использовал для этого измерения горизонтальную линейку с поставленным на неё цилиндриком. Линейка наводилась на Солнце при его восходе, «когда на Солнце можно смотреть». Глядя вдоль линейки, Архимед двигал по ней цилиндрик и отмечал те его положения, когда он почти закрывал солнечный диск и когда перекрывал его полностью. Так получилось «вилка», в пределах которой лежала измеряемая величина. Результат Архимеда: 27′ и 32,5′ охватывал действительное значение углового диаметра Солнца 32′ [3, с. 53]. В дидактических пособиях для учащихся рассматриваются методы экспериментального определения углового диаметра Солнца с помощью телескопа, секундомера и других школьных приборов, например, [6, с. 103-108]. Современные данные: наибольший угловой диаметр Солнца 32′31,92″, наименьший – 31′27,88″, средний – 31′59,30″ [5, с. 408].

По среднему угловому диаметру и среднему расстоянию до Земли находим радиус Солнца: $R_o$=696003,75 км.

## 3. Определение массы Солнца

Массу Солнца можно найти, применив третий закон Кеплера к движению Земли (вместе с Луной) вокруг Солнца и движению Луны вокруг Земли : $\frac{a_З^3}{T_З^2(m_С+m_З)}=\frac{a_Л^3}{T_Л^2(m_З+m_Л)}$, где $a$ – большие полуоси орбит (средние расстояния), $T$ – сидерические периоды обращения [4, с. 381].

Также можно воспользоваться значением ускорения свободного падения Солнца на расстоянии, равном расстоянию от Земли до Солнца.

Этот способ аналогичен описанному в учебнике астрономии способу определения массы Земли, исходя из формулы $g=G\frac{m_З}{R_З^2}$ [2, с. 62-63].

Решение задачи по нахождению массы Солнца можно сильно упростить, считая (заранее) массу Солнца на много порядков больше массы Земли и всех остальных планет. Считая орбиты планет круговыми, имеем согласно второму закону Ньютона: $m\frac{4\pi^2}{T^2}a=G\frac{m_0 m}{a^2}$, где $m$ – масса планет, $a$ – большая полуось планеты (радиус окружности). Наиболее близкий к табличному ($m_С=1{,}989\cdot 10^{30}$ кг) результат получается для Венеры и Нептуна, может быть потому, что эксцентриситеты их орбит наименьшие среди планет солнечной системы. Впрочем, и для других планет (кроме Марса) округление даёт табличное значение.

На качественном уровне можно сообщить учащимся как была найдена масса Луны [5, с. 49]. Строго говоря, вокруг Солнца движется ли Земля, а центр масс системы Земля-Луна, так называемый барицентр. Земля и Луна, в свою очередь, движутся синхронно вокруг барицентра по подобным эллипсам. Движение Земли с периодом в один месяц вызывают периодически колебания в долготах Солнца и планет. Точное определение амплитуды этих колебаний дало возможность определить расстояние между центром Земли и барицентром (4672 км). Далее учащиеся сами могут вычислить массу Луны на основе знаний нахождения центра тяжести системы из двух материальных точек. В итоге, на основе данных справочника [5] получаем по формуле уточненного закона Кеплера: $m_C = 1{,}9945 \cdot 10^{30}$ кг. Возможно, в будущем этот способ найдёт применение и для определения массы Солнца, в сопоставлении с массой Земли (в настоящее время точность измерения позволяет определять массы Солнца сопоставляя её с массой Юпитера). Этот момент важен, так как таким способом определяют массу внесолнечных планет.

### 4. Определение плотности Солнца

Плотность Солнца (средняя) рассчитывается по формуле $\rho_C = \dfrac{3m_C}{4\pi R_C^3} = 1409 \dfrac{кг}{м^3}$. Полученный результат используем для расчёта давления внутри Солнца в рамках простейшей однородной модели Солнца. При этом считаем давление электромагнитного излучения в солнечной плазме ничтожно малым по сравнению с давлением вещества: $p_{изл} \ll p_в$, что вполне соответствует действительности. В однородной модели плотность солнечной плазмы одна и та же по всему объему Солнца. Тогда $dp = -\rho_C g dr$, где $g = G\dfrac{m_r}{r^2} = G\dfrac{4\pi\rho_C r^3}{3r^2}$, и $dp = -\dfrac{4}{3}\pi G\rho_C^2 r dr$. Интегрируя, получим $p = \dfrac{2}{3}\pi G\rho_C^2 (R_C^2 - r^2)$. Согласно этой формуле давление на расстоянии $\dfrac{R_C}{2}$ от центра Солнца равно $p_{R_C/2} = \dfrac{\pi}{2} G\rho_C^2 R_C^2$. В учебнике [2, с. 127] произведен приближённый расчёт это величины, результат в полтора раза меньше: $p_{R_C/2} = \dfrac{\pi}{3} G\rho_C^2 R_C^2$.

### 5. Вычисление молярной массы солнечной плазмы

Молярная масса солнечной плазмы определяется с помощью спектрального анализа [2, с. 125-126]. По результатам спектроскопических исследований фотосферы Солнца установлено относительное содержание в ней числа атомов химических элементов: H – 92,54%, He – 7,35%, на остальные 66 – 0,1% [5, с. 410]. Ясно, что с приближением к центру Солнца отношение числа атомов H к числу атомов He уменьшается (из-за выгорания водорода в результате термоядерных реакций). Теоретический расчёт дает в среднем по Солнцу отношение числа атомов H к числу атомов He равным десяти [2, с. 126]. Это позволяет оценить среднюю молярную массу солнечного вещества (считаем ничтожным содержание тяжелых элементов и нейтральных атомов). Найдём в атомных единицах массы (а.е.м.) среднюю массу одной частицы солнечной плазмы. Десять атомов водорода в плазме состоят из двадцати частиц: 10 протонов и 10 электронов имеют массу 10 а.е.м. Соответственно, один атом гелия состоит из трех частиц (ядра и два электрона) с общей массой 4 а.е.м. На одну частицу в плазме приходится $\dfrac{10 а.е.м. + 4 а.е.м.}{10+10+3} \approx 0{,}6 а.е.м.$ Таким образом, относительная молекулярная масса солнечного вещества равна 0,6, а молярная масса $\mu_C = 0{,}6 \cdot 10^{-3} \dfrac{кг}{моль}$.

### 6. Определение температуры и давления внутри Солнца

Для солнечной плазмы выполняется уравнение Клапейрона-Менделеева [2, с. 128]. Согласно ему $T_C = \dfrac{p_C \mu_C}{R\rho_C} = \dfrac{2\pi G\rho_C (R_C^2 - r^2)\mu_C}{3R}$. В таблице 1 приведены результаты расчётов давления и температуры на расстоянии $r$ от центра Солнца на основе однородной модели Солнца и более точный модели [7, с. 482].

 

Таблица 1.

| $\frac{r}{R}$ | P, Па однородная модель | P, Па точная модель | $T_к$ однородная модель | $T_к$, точная модель |
|---|---|---|---|---|
| 0 | $1{,}34*10^{14}$ | $2{,}2*10^{17}$ | $6{,}88*10^{6}$ | $14{,}6*10^{6}$ |
| 0,1 | $1{,}3*10^{14}$ | $1{,}4*10^{17}$ | $6{,}8*10^{6}$ | $12{,}6*10^{6}$ |
| 0,3 | $1{,}1*10^{14}$ | $1{,}2*10^{16}$ | $6{,}3*10^{6}$ | $6{,}6*10^{6}$ |
| 0,5 | $1{,}0*10^{14}$ | $6{,}1*10^{14}$ | $5{,}2*10^{6}$ | $3{,}4*10^{6}$ |
| 0,7 | $6{,}8*10^{13}$ | $3{,}1*10^{13}$ | $3{,}5*10^{6}$ | $1{,}8*10^{6}$ |
| 0,9 | $2{,}5*10^{13}$ | $7{,}9*10^{11}$ | $1{,}3*10^{6}$ | $0{,}6*10^{6}$ |

**7. Светимость (мощность излучения) Солнца** находится по значению солнечной постоянной и расстоянию до Солнца [6, с. 113-119]. Там же вычисляется температура поверхности (фотосферы) Солнца.

В заключение отметим возможное применение представленных в статье данных. При наличии достаточного времени определение физических параметров Солнца можно изложить в рамках отдельного учебного занятия, что будет эффективным для достаточно подготовленной аудитории, например, в физико-математическом классе. Другой подход состоит во включении отдельных пунктов статьи при углублённом повторении учебного материала, при изучении схожих по тематике вопросов. Например, определение массы Солнца аналогично определению масс звёзд и внесолнечных планет, поэтому целесообразно уделить внимание этому вопросу при изучении темы «Двойные звёзды» и «Планеты у других звёзд».

**Литература**


1. www.nasa.gov – сайт Национального аэрокосмического агентства США
2. *Воронцов-Вельяминов Б.А.* Астрономия. 11 кл.: Учеб. для общеобразоват. учеб. заведений. – М.: Дрофа, 2000. – 224 с.
3. Энциклопедия для детей. Т.8. Астрономия.- М.: Аванта+, 1997.- 688 с.
4. Физика космоса. Маленькая энциклопедия. – М. Советская энциклопедия, 1986. – 783 с.
5. *Куликовский П.Г.* Справочник любителя астрономии. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 688 с.
6. *Николаев О.С.* Физика и астрономия: Курс практических факультативных работ для средней школы: Учебное пособие. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 152 с.
7. *Соболев В.В.* Курс теоретической астрофизики. – М.: Наука, 1985. – 504 с.


## ELEMENTARY CALCULATION OF THE BASIC SUN PARAMETERS

**I.N. Zhukova, V.S. Malykh, A.I. Shambin**

We consider ways to determine the basic parameters of the Sun, some of which can be obtained by students themselves in the course of solving the simplest problems of the theory and practice of astronomical observations. The presentation of the material is accompanied by a brief excursion into the history of astronomy.

 