

Лекция «Звезды: спектральная классификация, классы светимости, диаграмма Герцшпрунга-Рессела»

Введение

1. Спектральная классификация звезд.

1.1 Гарвардская спектральная классификация звезд.

1.2 Маунт-Вилсоновская спектральная классификация звезд.

1.3 Йеркская классификация с учётом светимости (МКК).

2. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела (Г-Р).

Введение

Звезды — наиболее распространенные объекты во Вселенной. С эволюцией звезд связано образование многих химических элементов. Поэтому звезды представляют интерес не только как космические объекты, являющиеся важным элементом структуры Вселенной, но и как тела, эволюция которых — важное звено в эволюции материи.

Основные свойства звезды определяются прежде всего ее массой, светимостью и радиусом. С точки зрения наблюдений первоочередная задача состоит в определении этих величин и в выяснении индивидуальных особенностей отдельных звезд, а также различных групп звезд.

Методы теоретической астрофизики позволяют найти физические условия в атмосферах и недрах звезд и проследить их эволюцию.

Звезды отличаются весьма большим разнообразием. Однако среди них можно выделить отдельные группы звезд, обладающих общими свойствами. Такое разделение необходимо для изучения всего множества существующих звезд. Особенно интересны те из подобных групп, члены которых, например, отличаются нестационарностью или совершают пульсации, взрываются и т.д. Как правило, наличие таких особенностей позволяет сделать важные выводы не только о природе отдельных звезд, но и в ряде случаев о более общих закономерностях Вселенной. **Звезды, не обладающие указанными особыми свойствами, называются нормальными.**

Спектры звёзд астрономы начали исследовать с середины XIX-го века. В настоящее время спектральный анализ является основным источником данных о физических свойствах поверхностных слоев звёзд и их химическом составе, так как наиболее полно использует информацию об излучении звезды. Спектрограммы звёзд получают с различными целями, используя для этого спектральные приборы с дисперсией от 1000 Å/мм - для спектральных обзоров слабых звёзд, до долей Å/мм - для детального исследования атмосфер ярких звёзд. Спектральная классификация является первым шагом в исследовании звезды, так как позволяет определить, к какому типу относится звезда, оценить ее эффективную температуру и светимость. Для многих звёздно-астрономических исследований уже этого оказывается достаточно. Поэтому спектральная классификация по сей день сохраняет свою актуальность.

1. Спектральная классификация звезд

1.1 Гарвардская спектральная классификация звезд

Начиная с первых исследований излучения звёзд, было установлено, что звёздные спектры чрезвычайно разнообразны. При этом быстро было понято на основе существовавших к концу XIX в. знаний, что главным параметром, управляющим видом спектра является температура поверхности звезды. Поэтому и классификация спектров является, прежде всего, температурной классификацией. Хронологически первой системой спектральной классификации является Гарвардская система, разработанная при подготовке звёздного каталога HD. Здесь первоначально были введены следующие обозначения спектральных классов (в порядке убывания эффективной температуры на поверхности звезды): P - O - B - A - F - G - K - M, где символ P использовался для обозначения спектров газовых туманностей. Впоследствии для холодных красных звёзд были добавлены обозначения S, R и N.

Класс О был разделен на подклассы Оа, Об, Ос, Од и подклассы эмиссионных звёзд Ое и Ое5. Для других спектральных классов были введены подклассы В0-В9, А0-А5, F0, F2, F5, F8, G0, G5, К0, К2. Для самых холодных звёзд были введены подклассы Ма, Мb, Мс, классифицируемые по интенсивностям полос окиси титана TiO, и подкласс Мd для долгопериодических переменных типа Миры Кита (мирид). Гарвардская система является одномерной, так как единственный параметр, определяющий спектральный класс, - это температура.

1.2 Маунт-Вилсоновская спектральная классификация звезд

В классификационной схеме обсерватории Mount Wilson были введены обозначения классов светимости *d* для карликов (звёзд главной последовательности диаграммы Герцшпрунга - Рессела, от английского слова *dwarf* - карлик), *g* - для гигантов (*giants*), *sd* и *sg* для субкарликов и субгигантов соответственно. Таким образом, спектральная классификация превратилась в двумерную - классификация проводилась как по температурному показателю (спектральный класс), так и по светимости (класс светимости). Для звёзд с резкими и узкими спектральными линиями использовалось обозначение *s*, такие звёзды обычно оказываются сверхгигантами. Вместо гарвардских обозначений для подклассов спектрального класса *M* были введены обозначения *M0* - *M6*. Так, например, для красного гиганта класса *K5* мы имеем обозначение *gK5*, а для субкарлика класса *G0* имеем обозначение *sdG0*. Кроме того, для обозначения звёзд с резкими линиями в данном спектральном подклассе использовался добавочный индекс *s*, а для спектров с широкими линиями - индекс *p*. Звёзды с индексом *p* обычно являются быстро вращающимися, а наиболее быстрые ротаторы даже могут иметь обозначения *pp*.

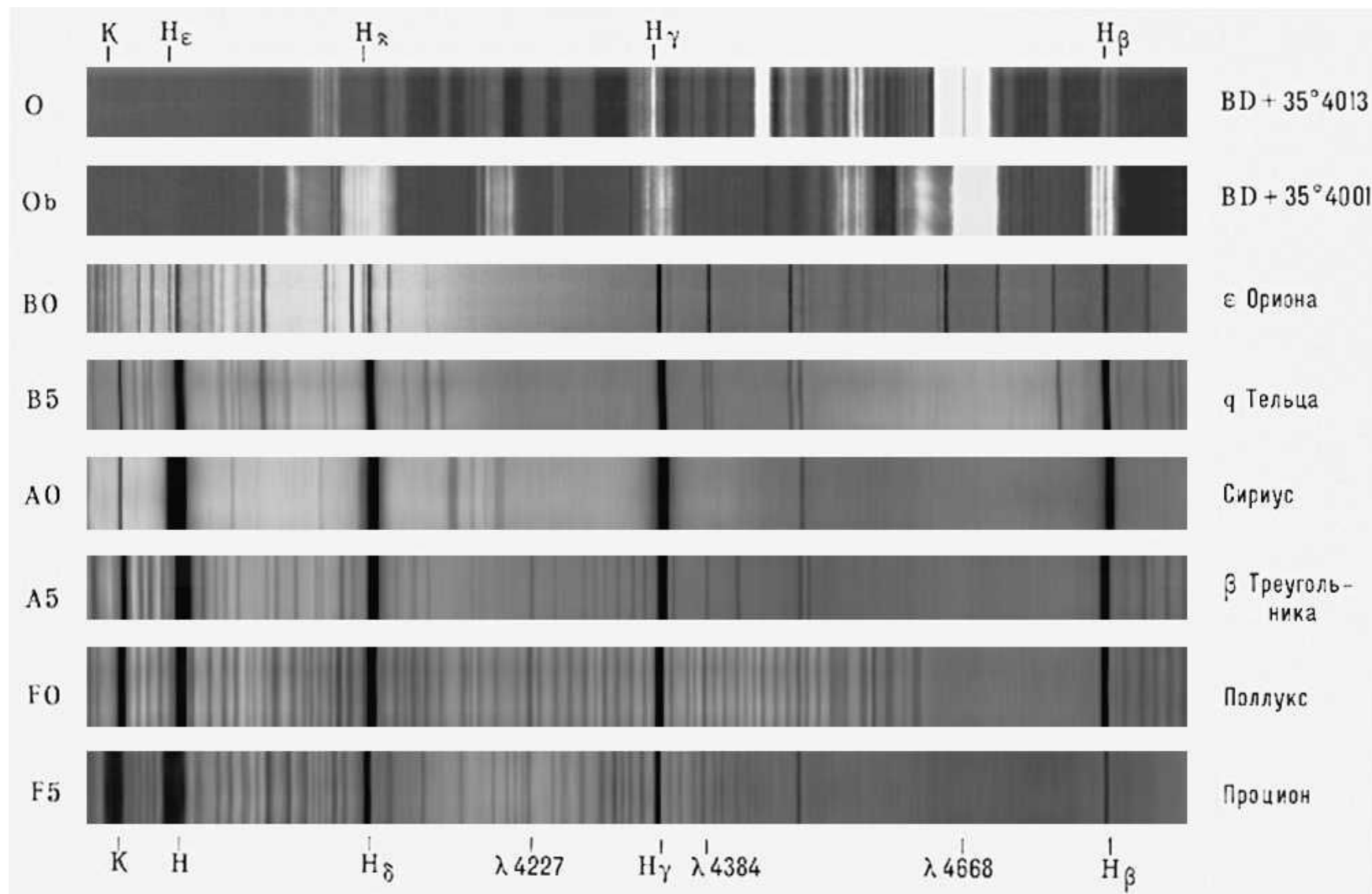
Отметим, что от первых работ по применению спектрального анализа в астрономии (работ Фраунгофера), в настоящее время сохранились особые обозначения некоторых ярких спектральных линий. Так линии однократно ионизованного кальция CaII с длинами волн 3970 Å и 3934 Å носят обозначения H и K, линии нейтрального натрия (желтый дублет) с длинами волн 5896 Å и 5890 Å обозначаются соответственно D2 и D1 и т.д..

Наиболее современной классификационной схемой является классификация Моргана и Кинана (система МКК), которая с некоторыми дополнениями живет уже почти пять десятилетий. Рассмотрим эту схему более подробно.

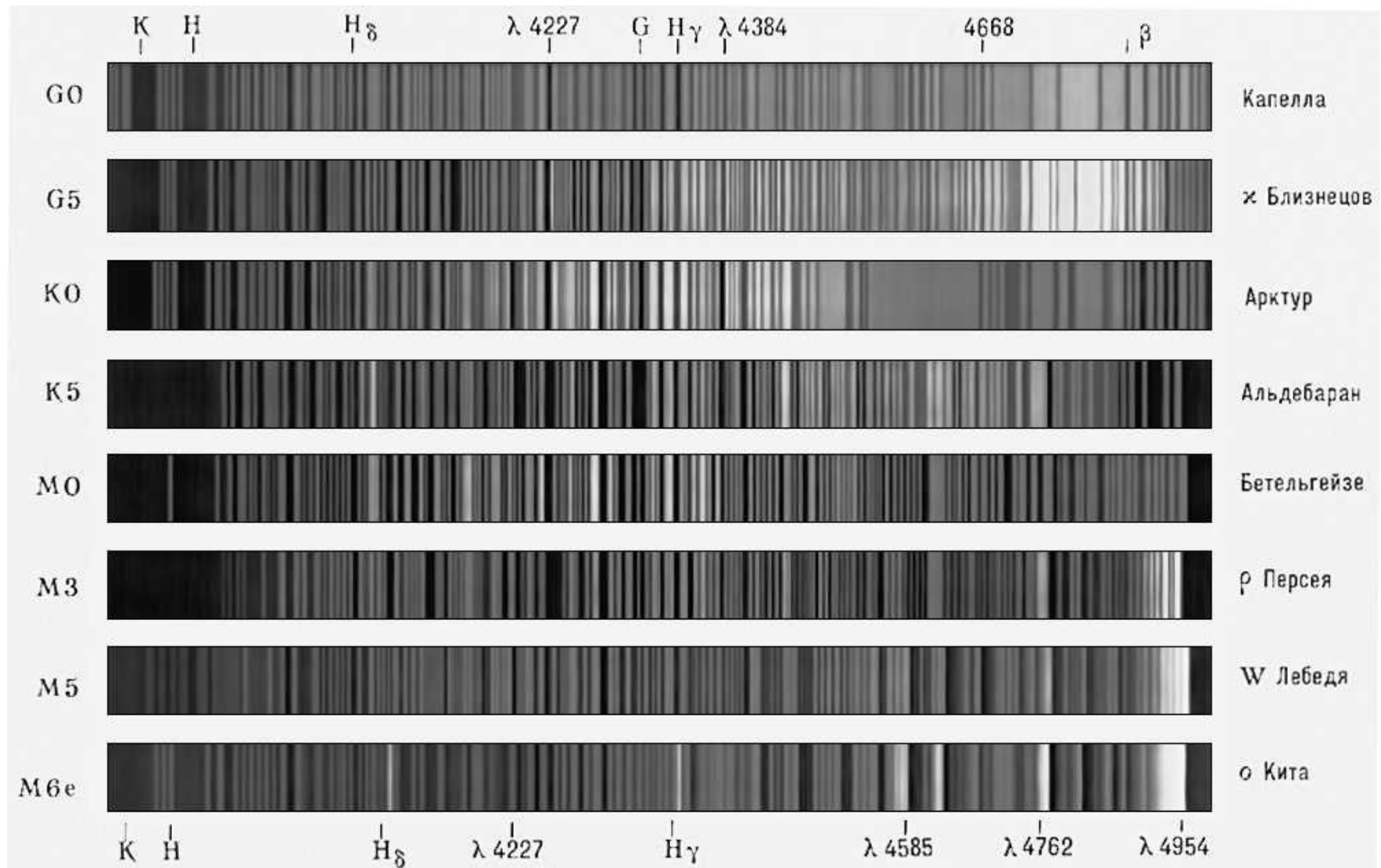
1.3 Йеркская классификация с учётом светимости (МКК)

В системе МКК для классификации используются спектрограммы средней дисперсии (50 - 70 Å/мм) в голубой области спектра. Классификация называется двумерной, так как использует не только меру температуры поверхности звезды - спектральный класс, но и меру светимости - класс светимости. Авторами системы разработаны объективные критерии классификации, основанные на глазомерных оценках отношений интенсивности тех или иных спектральных деталей, обычно - ярких линий, ясно видимых в спектре при указанной выше дисперсии спектрограмм. Чтобы обеспечить стандартный подход к классификации авторы выпустили атлас изображений стандартных спектров для всех спектральных классов и многих классов светимости. Вид спектра зависит от используемого телескопа, спектрографа и светоприемника. Поэтому на многих обсерваториях на основе стандартных критериев разрабатывают свои системы критериев, оставаясь в рамках МКК-классификации. В этой системе введены следующие обозначения спектральных классов: O-B-A-F-G-K(-R-N-C)-M-S.

Спектральные классы звёзд Oa – F5.



Спектральные классы звёзд G0 – M6e.



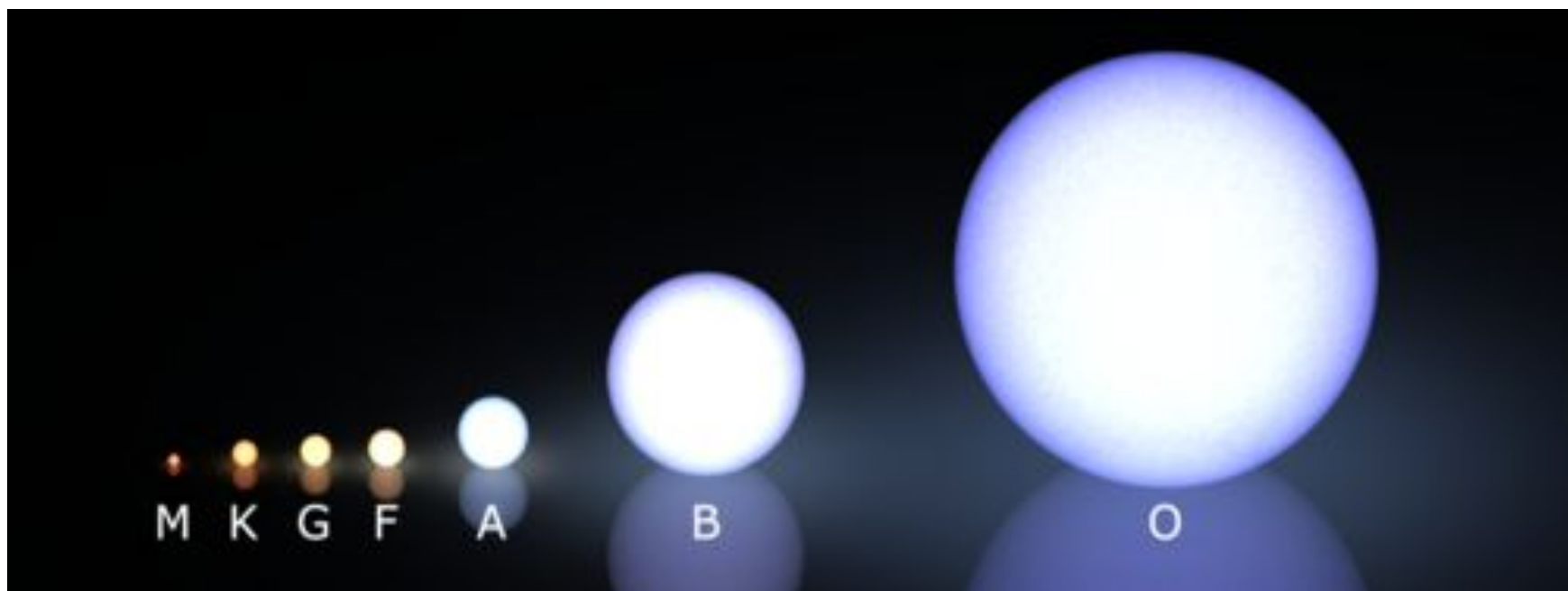
Спектральные классы начала последовательности (О, В) традиционно носят название ранних, а конца (К,М,С) - поздних, хотя никакого отношения к возрасту спектральная классификация не имеет. Спектральные классы оказываются слишком крупным делением, поэтому введены спектральные подклассы, обозначаемые арабскими цифрами от 1 до 9 (хотя не во всех спектральных классах используются все подклассы).

Некоторые классы звёзд, такие как звёзды типа Вольфа-Райе, белые карлики, пульсары и др. оказываются вне классификационной схемы, и для таких звёзд разработаны системы классификации, дополняющие систему МКК.

В системе МКК звёзды подразделяются по светимости на следующие классы:

- I - яркие сверхгиганты, которые подразделяются на классы Ib, Iab и Ia по возрастанию яркости. (Впоследствии некоторые самые яркие сверхгиганты получили название гипергигантов и обозначение спектрального класса Ia+ (иногда - Ia-O).);
- II - сверхгиганты;
- III - гиганты;
- IV - субгиганты - это звёзды, имеющие несколько большие светимости, чем звёзды главной последовательности;
- V - звёзды главной последовательности, часто называемые карликами;
- VI - субкарлики - это также звёзды главной последовательности, но с очень малой металличностью;
- VII - белые карлики.
- Краткое описание особенностей каждого спектрального класса.

Спектральная классификация Моргана-Кинана



Звёзды спектрального класса O

Звёзды спектрального класса O (подклассы от O3 до O9.5) имеют наибольшую эффективную температуру поверхности среди нормальных звёзд ($T_{\text{eff}} = 25000$ К для подкласса O9 и большую для более ранних подклассов) и в основном излучают в УФ-диапазоне. Из-за высокой температуры поверхности в рассматриваемой области спектра присутствуют линии высокоионизованных элементов (например, C IV и др.), а также интенсивные линии ионизованного и нейтрального гелия. Бальмеровский скачок (депрессия спектра, вызванная сгущением линий водорода у границы серии Бальмера вблизи $3600 \text{ \AA}$ и связанно-свободными переходами за этой границей) слабо заметен у звёзд главной последовательности и совершенно не заметен у сверхгигантов этого спектрального класса.

Звёзды спектрального класса В

Во всех подклассах спектрального класса В водородные линии являются самыми яркими, и их яркость увеличивается с падением температуры поверхности звезды, то есть при переходе от подкласса В0 к более поздним. Хорошо видны линии гелия, несколько ослабевающие с падением температуры, при этом интенсивность линий нейтрального гелия HeI достигает максимума у подкласса В2. В каталогах могут встретиться обозначения спектрального класса типа В5n, Вnp или В2(n). Такое обозначение введено для выделения звёзд с линиями, в разной степени расширенными быстрым вращением звёзд. Могут встретиться обозначения, содержащие символ <e>, например В2Ve, этот символ обозначает эмиссию, в основном в водородных линиях. Большинство эмиссионных В-звёзд принадлежит к классам светимости V и IV. Не у всех эмиссионных звёзд эмиссия присутствует в спектре постоянно. Примером звёзды с переменной эмиссией в спектре является ярчайшая звезда рассеянного скопления Плеяды - Плейона. Звёзды, окруженные газовыми оболочками, могут иметь обозначение В-shell, в спектрах таких звёзд появляются в эмиссии линии, характерные для газовых туманностей. Распределение энергии в спектрах ранних В-звёзд характеризуется появлением ясно выраженного бальмеровского скачка, величина которого растет к поздним подклассам. Бальмеровский скачок создает ложный максимум на распределении энергии в спектре, так как реальный максимум приходится на УФ-область. Интересно отметить, что звёзды Ве вращаются заметно быстрее, чем неэмиссионные звёзды. По данным российского астрофизика Боярчука, скорость вращения Ве-звёзд в среднем больше на 100 км/с.

Звёзды спектрального класса A

В спектрах звёзд спектрального класса A доминируют линии водорода серии Бальмера, линии других элементов существенно слабее, хотя и усиливаются при переходе от подкласса A0 к подклассу A9. На распределении энергии ясно виден Бальмеровский скачок, его величина максимальна у звёзд именно этого спектрального класса. Глубина Бальмеровского скачка уменьшается с ростом светимости. Среди звёзд этого спектрального класса многочисленны пекулярные звёзды, что затрудняет их классификацию. Пекулярные звёзды будут рассмотрены в следующем параграфе. Выделяются немногочисленные звёзды типа ϵ Волопаса, в спектрах которых линии металлов ослаблены по сравнению с водородными линиями, но которые по кинематическим и вращательным свойствам не отличаются от нормальных A-звёзд окрестностей Солнца.

Звёзды спектрального класса F

Самыми заметными линиями в спектрах звёзд спектрального класса F являются линии H и K ионизованного кальция CaII и линии водородной серии Бальмера. Линии H и K являются сильнейшими для всех подклассов этого класса, тогда как водородные линии ослабевают с уменьшением температуры поверхности звёзд, и у поздних подклассов этого спектрального класса они уже не выделяются среди линий тяжелых элементов. Линия CaI - 4226 Å, слабая у звёзд подкласса F0, к поздним подклассам усиливается и приближается по интенсивности к линии водорода H_α. С уменьшением температуры появляется и усиливается так называемая полоса G (G-band), которая на самом деле является скоплением спектральных линий тяжелых элементов, в частности Fe и Ti.

Звёзды спектрального класса G

К спектральному классу G относится наше Солнце (G2V). Наиболее яркими линиями в спектрах звёзд этого спектрального класса являются линии H и K CaII. Следующей по интенсивности является линия CaI - 4226 Å. Водородные линии, в отличие от более ранних спектральных классов, слабы, и не выделяются среди линий тяжелых элементов, причем продолжают ослабляться при переходе от подкласса G0 к более поздним подклассам. Полоса G видна очень ясно. Отметим, что спектр в зеленой области (там, где расположена линия H_β) слабее заселен линиями металлов, чем более коротковолновая область, что используется в звёздной фотометрии для выбора полосы пропускания, на измерения в которой особенности химического состава оказывают слабое влияние. Например, такой полосой является полоса V фотометрической системы UBV.

Звёзды спектрального класса К

Желтовато-красные звёзды, наиболее многочисленные среди видимых на небе невооруженным глазом, принадлежат к спектральному классу К. В спектрах звёзд этого спектрального класса очень сильны и широки линии H и K CaII, причем в ядрах этих линий имеется эмиссионный компонент, сильный, но узкий по сравнению с самой линией поглощения. Интенсивность эмиссионного компонента связана со светимостью звёзды (эффект Вильсона - Баппу), что используется для определения абсолютных звёздных величин. Очень сильна также и линия CaI - 4226 Å, причем ее интенсивность растет с падением температуры поверхности, что используется для уточнения спектрального подкласса. Хорошо видна полоса G, но к поздним подклассам полоса G распадается, так как температура поверхности звёзд становится слишком низкой для возбуждения линий ионизованного титана. При этом в спектре появляются полосы молекулы CN. Максимум распределения энергии в спектрах звёзд класса К находится в красной области оптического интервала длин волн. Бальмеровский скачок практически не выделяется из-за слабости водородных линий. Распределение энергии сильно искажено скоплениями линий металлов, а у звёзд поздних подклассов этого спектрального класса уже сильно поглощение в широких молекулярных полосах окислов титана.

Звёзды спектрального класса М

Наиболее красные звёзды принадлежат спектральному классу М и классам углеродной последовательности С и S. Красный цвет таких звёзд соответствует низкой эффективной температуре поверхностей (2500 - 3000 K). Спектры звёзд этого спектрального класса характеризуются очень сильной линией CaI - 4226 Å и наличием молекулярных полос окислов металлов. Очень сильны и широки линии поглощения H и K CaII, причем они содержат узкую, но интенсивную эмиссионную компоненту в ядре линии, образующуюся в хромосферах этих звёзд. Интересно, что у поздних подклассов спектрального класса М настолько сильно поглощение в полосах TiO в зеленой области спектра, что распределение энергии в спектрах таких звёзд напоминает распределение энергии существенно более горячих звёзд, что, в частности, проявляется на фотометрических диаграммах цвет - цвет и цвет - светимость. Интересно также отметить, что у М-звёзд главной последовательности наблюдается эмиссия в водородных линиях, причем интенсивность эмиссии связана с возрастом звезды.

C-звёзды

C-звёзды - это класс красных звёзд с сильными полосами углеродосодержащих молекул в спектре. Он подразделяется на подклассы Co-C9. Подклассу Co соответствует по температуре подкласс G5 нормальных звёзд. Так как углеродные звёзды имеют низкую температуру поверхности, их классификация обычно проводится по красной области спектра. Ранее (в Гарвардской классификационной схеме) вместо класса C использовали классы R и N с подразделениями на R0, R3, R5, R8 и Na, Nb и Nc. Выделение классов R и N до сих пор встречается при проведении наблюдений с объективной призмой с очень низкой дисперсией. Звёзды класса N подобны звёздам класса R, но у них наблюдается значительная депрессия в фиолетовой области спектра, вызываемая сильным поглощением света в молекулярных полосах. Звёзды поздних подклассов R и N не всегда удается различить, что иногда приводило к путанице, послужившей причиной отказа от такой схемы, и вызвало введение единого класса C. Для спектров всех углеродных звёзд характерны полосы поглощения молекулярного углерода (в том числе полос C12C13, играющих большую роль при изучении изотопного состава звёздного вещества), молекул CN и SiC. В спектрах поздних подклассов наблюдаются полосы поглощения молекул HCN и C₂H₂ (в инфракрасной области спектра). У некоторых C-звёзд потеря массы из богатой углеродом атмосферы приводит к образованию молекул SiC₂, которые проявляют себя, образуя полосы у длин волн 4640 Å, 4866 Å, 4905 Å, 4977 Å и др. C-звёзды являются основными поставщиками пыли в межзвёздную среду. Многие углеродные звёзды являются долгопериодическими переменными типа Миры Кита (миридами).

S-звёзды

S-звёзды - это класс редко встречающихся звёзд - красных гигантов, близких по эффективной температуре к звёздам классов M или C, у которых кроме сильных линий CaII наблюдаются линии CaI - 4226 Å и BaII - 4554 Å. Отсутствуют или слабы, в отличие от спектров звёзд класса M, полосы молекулы TiO, встречаются линии неустойчивого химического элемента технеция (TcI), но особенно типичны для таких звёзд полосы окислов химических элементов, образующихся в процессе медленного захвата нейтронов ядрами (s-процесс). Это полосы ZrO, ScO, YO и LaO. Именно полосы ZrO и LaO ярче всего сигнализируют о принадлежности звезды к классу S. В настоящее время известно около 700 звёзд этого класса.

S-звёзды подразделяются на две группы, "внутренние" и "внешние", согласно причинам возникновения особенностей спектра. В первую включают звёзды, в спектрах которых имеются линии нестабильного элемента Tc с периодом полупаспада $2 \cdot 10^5$ лет, и их иногда называют технециевыми звездами. Обычно такие звёзды являются переменными типа Миры Кита, на диаграмме Герцшпрунга-Рессела они лежат на асимптотической ветви гигантов. Ко второй группе относят звёзды, не имеющие линий Tc в спектре и не показывающие изменений блеска. Вероятно, звёзды этой группы являются членами тесных двойных систем, второй компонент которых - белый карлик. Они по своим характеристикам близки к симбиотическим звездам. Со стороны низких температур звёзды этого типа примыкают к бариевым, по крайней мере по причинам, приводящим к особенностям в спектре.

Встречаются звёзды промежуточных между M и S типов, поэтому иногда вводят более подробную последовательность M-MS-S-SC-C, видимо характеризующую последовательное возрастание содержания углерода и кислорода в атмосферах звёзд. Звёзды SC иногда обозначают и CS, такие звёзды в спектрах в дополнение к полосам ZrO содержат полосы молекулярного углерода и интенсивные полосы CN, что приводит к сильному поглощению в области линий NaI D1-D2.

На рис. 4-1 показаны зависимости интенсивностей линий некоторых элементов и ионов в зависимости от температуры поверхности звезды. На рисунке видно, какие линии характерны для спектров звёзд того или иного спектрального класса, и как ведут себя интенсивности линий при переходе от одного спектрального класса (подкласса) к другому.

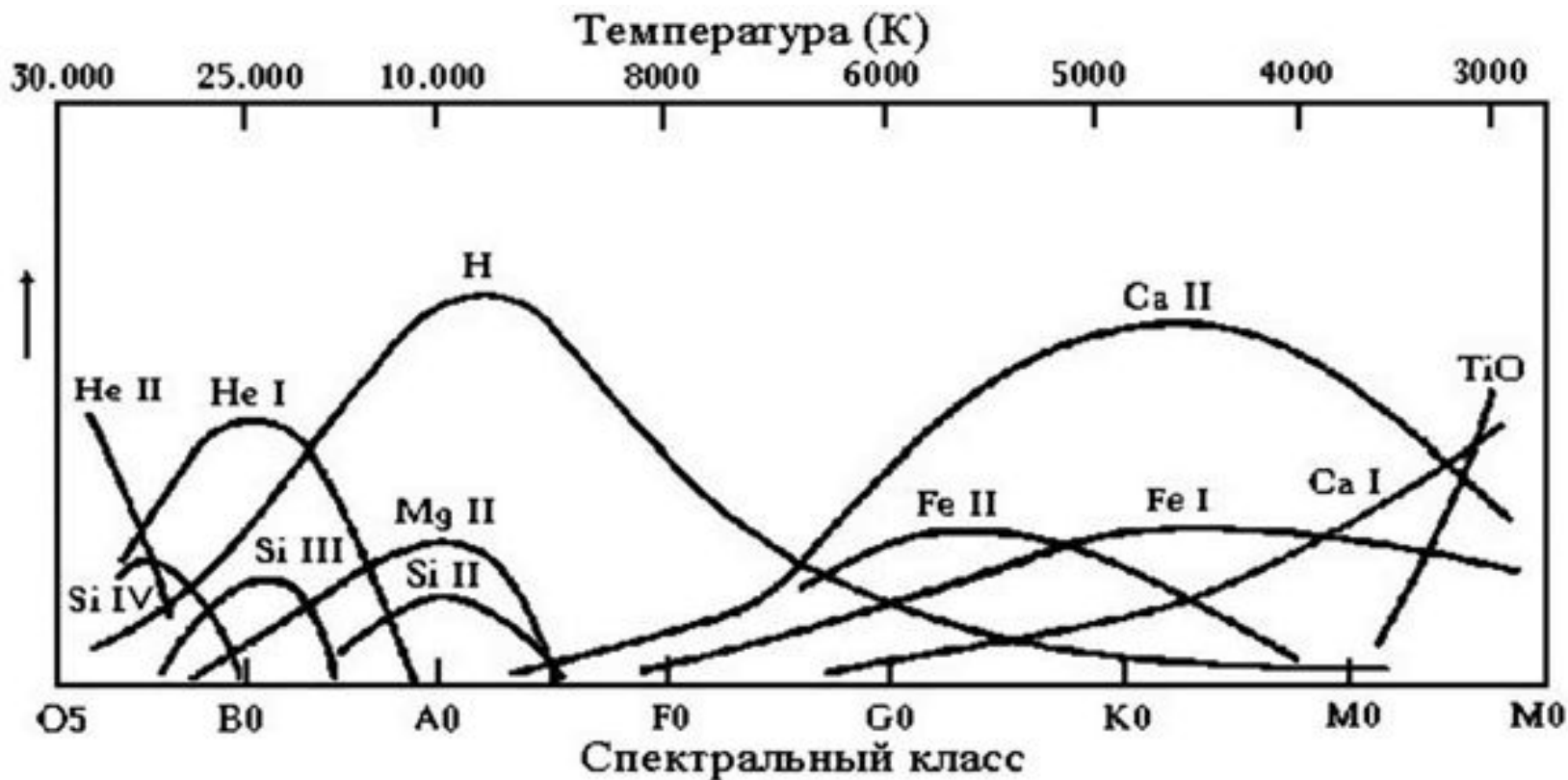


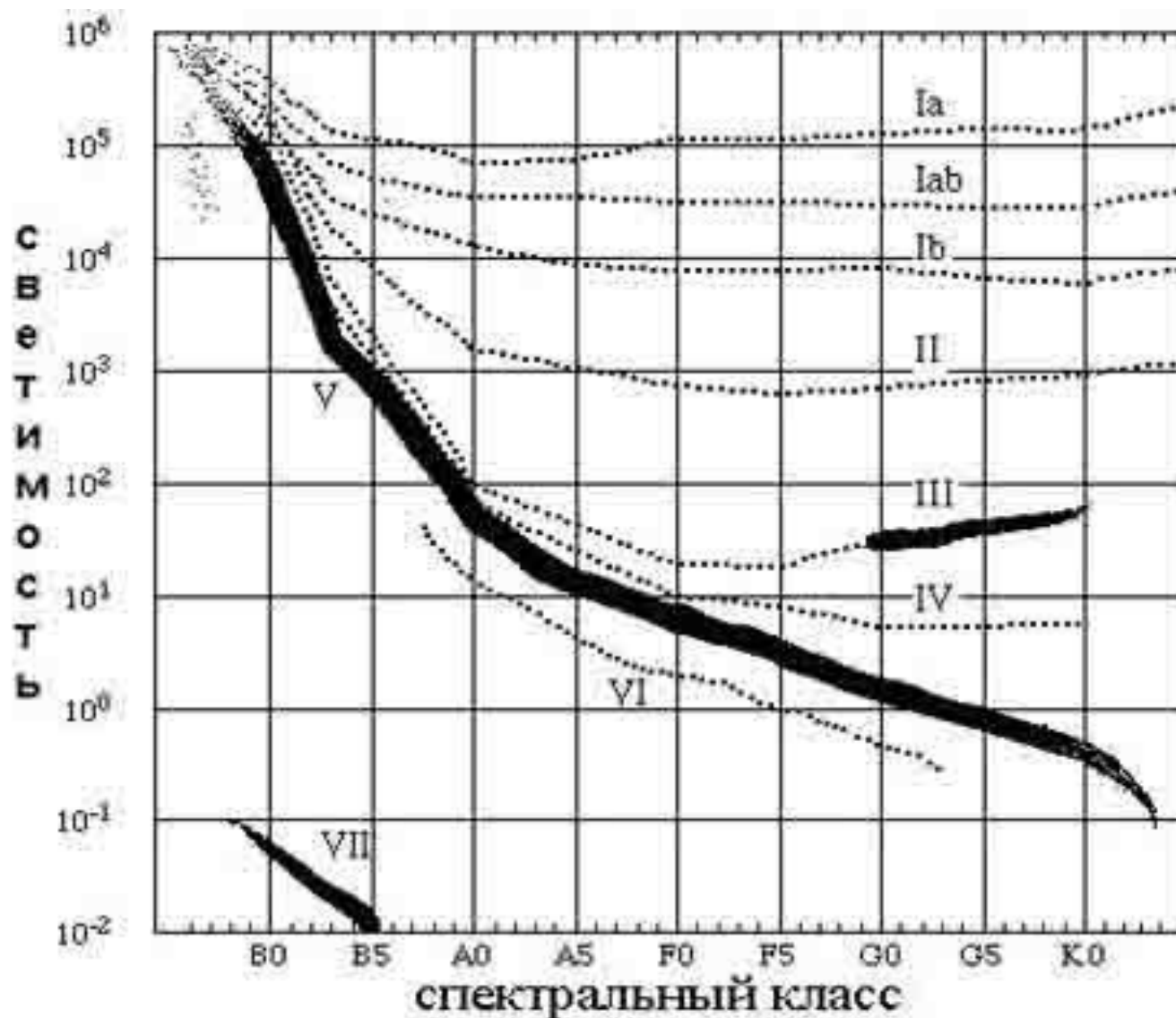
Рис.4-1

2. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела (Г-Р).

В самом начале XX в. датский астроном Герцшпрунг и несколько позже американский астрофизик Рессел установили существование зависимости между видом спектра (т.е. температурой) и светимостью звезд. Эта зависимость иллюстрируется графиком, по одной оси которого откладывается спектральный класс, а по другой — абсолютная звездная величина. *Такой график называется диаграммой спектр — светимость или диаграммой Герцшпрунга — Рессела.* Вместо абсолютной звездной величины можно откладывать светимость (обычно в логарифмической шкале), а вместо спектральных классов — показатели цвета или непосредственно эффективную температуру.

Положение каждой звезды в той или иной точке диаграммы определяется ее физической природой и стадией эволюции. Поэтому на диаграмме Герцшпрунга — Рессела как бы запечатлена вся история рассматриваемой системы звезд. В этом огромное значение диаграммы спектр — светимость, изучение которой является одним из важнейших методов звездной астрономии. Оно позволяет выделить различные группы звезд, объединенные общими физическими свойствами, и установить зависимость между некоторыми их физическими характеристиками, а также помогает в решении ряда других проблем (например, в исследовании химического состава, и эволюции звезд).

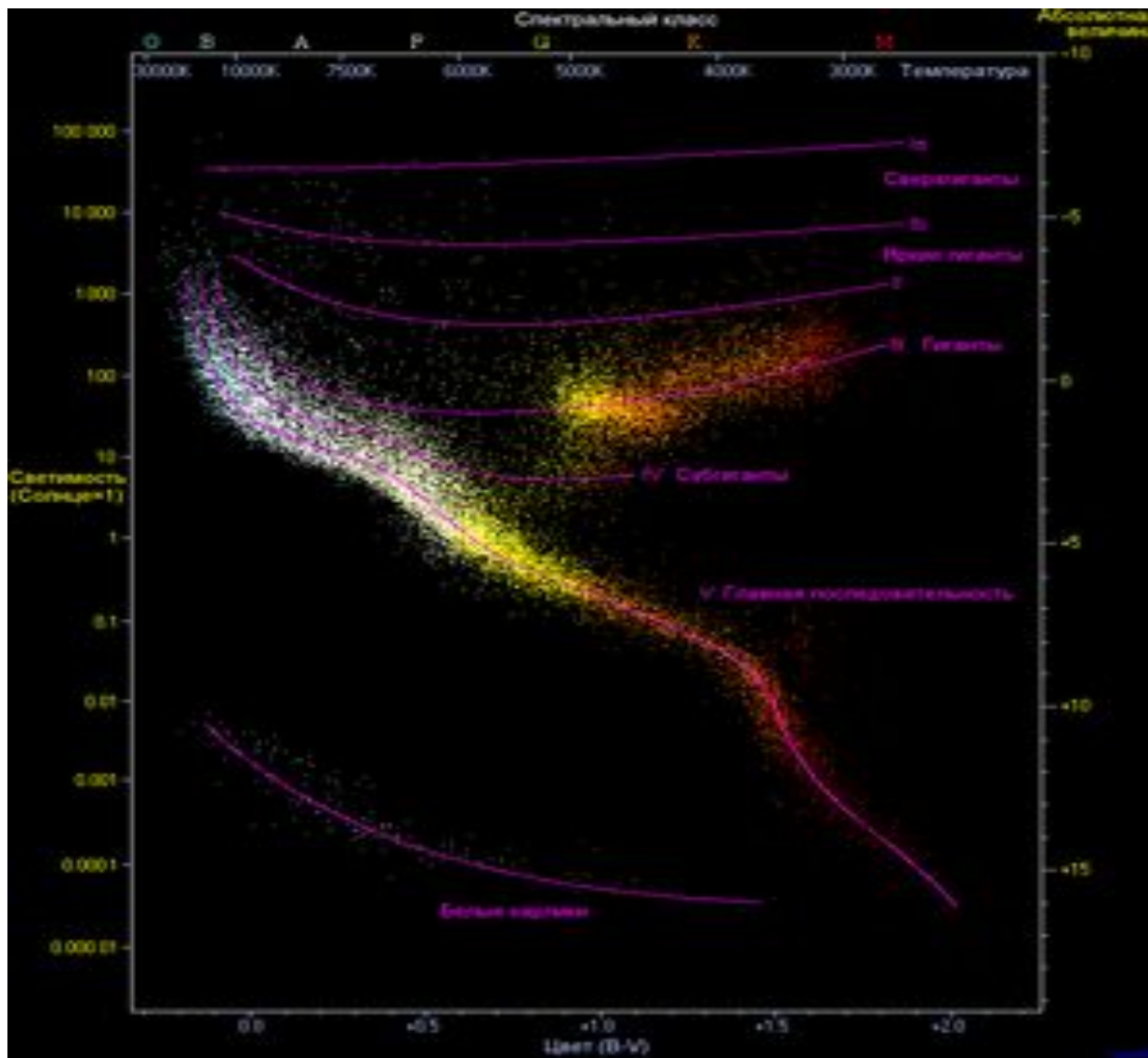
Основные последовательности на диаграмме Герцшпрунга-Рессела



На рис. показаны последовательности звёзд и положения звёзд разных классов светимости. Отметим, что сверхгиганты практически не образуют выделенных последовательностей, и разделение сверхгигантов на подклассы по светимости (II, Ia, Iab и Ib) является условным. Хорошо выделенной является область красных гигантов III-го класса светимости, главная последовательность (V-ый класс светимости), последовательность субкарликов (VI-ой класс светимости) и белых карликов (VII-ой класс светимости). Статус последовательности субкарликов долго не могли определить: если карлики (звёзды главной последовательности), гиганты и белые карлики есть состояния, связанные с определенными стадиями эволюции звёзд, то с субкарликами какой-либо эволюционной стадии связать оказалось невозможным. Тщательные исследования показали, что субкарлики на самом деле являются звездами главной последовательности, но имеющими существенно (в 10 - 100 раз) более низкие содержания тяжелых элементов.

Построить ГР-диаграмму, отражающую не только качественное разделение звёзд на определенные классы, но и количественные соотношения между плотностями населенности звездами различных частей диаграммы очень трудно. Это связано с тем, что самые яркие звёзды - верхней части главной последовательности, сверхгиганты и гиганты - наблюдаются на больших расстояниях и, следовательно, выбираются из значительно большего объема, чем слабые красные карлики и белые карлики. Такое явление называется селекцией, с этим явлением астрономы встречаются очень часто.

Диаграмма Герцшпрунга-Рессела по звездам каталога Hipparcos



На рис. показана ГР-диаграмма, построенная по звездам каталога Hipparcos, для которых абсолютные звёздные величины вычислены по точным тригонометрическим параллаксам. Из рисунка хорошо видно, насколько мало в окрестностях нашего Солнца встречается звёзд большой светимости главной последовательности и сверхгигантов по сравнению со звездами главной последовательности умеренных светимостей. Также много наблюдается и красных гигантов, заметны на рисунке и субгиганты. Относительно малое количество слабых звёзд главной последовательности объясняется исключительно селекцией, так же как и полное отсутствие белых карликов. Оценить, какие звёзды в основном подвергаются селекции можно исходя из того, что предельная видимая звёздная величина каталога Hipparcos близка $V \approx 10^m$. Сейчас известно, что на самом деле плотность красных карликов в объеме Галактики значительно больше, чем более ярких звёзд главной последовательности и гигантов. Рис. отражает количественные соотношения между звездами, видимыми на небе в небольшой телескоп или даже невооруженным взглядом. Из рисунка следует, что невооруженным взглядом в основном видны звёзды спектральных классов А и F главной последовательности, а также красные гиганты, тогда как небольшой телескоп лишь несколько увеличивает относительную численность звёзд спектрального класса G.

ГР-диаграмма является важнейшим инструментом при исследовании звёздных скоплений.