نشریه علمی ترویجی
مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

دردسترس بصورت الکترونیک @ www.jscw.icrc.ac.ir

نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، جلد ۵/ شماره ۱ (۱۳۹۴)/ ۴۸-۳۱

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش

بررسی رنگ در ستارگان و دانش نجوم

حسین سعیدی[۱]، سعیده گرجی کندی[۲*]

۱-دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

۲- استادیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

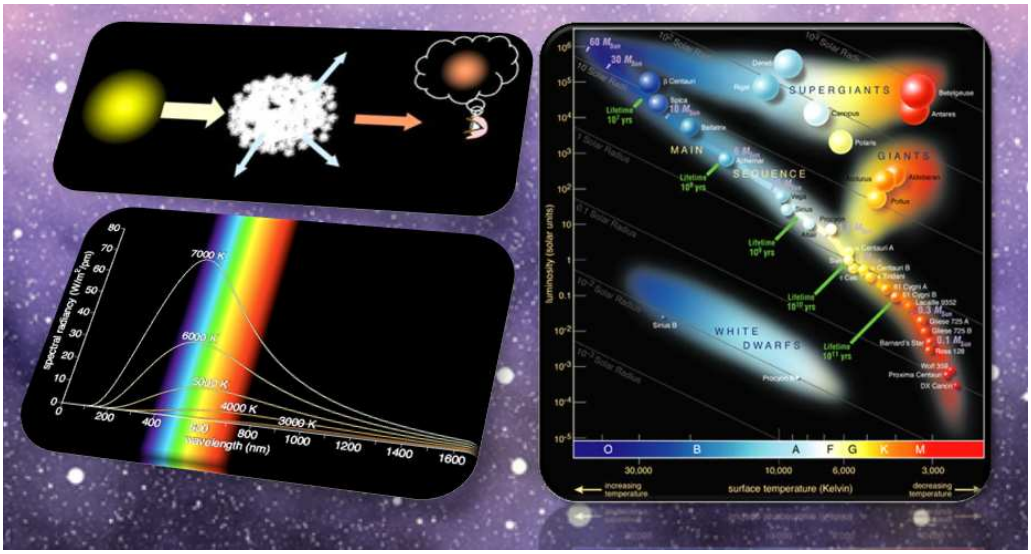
تاریخ دریافت: ۹۳/۱/۹ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۳/۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۳۰ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۳/۸/۵

چکیده

بررسی نورها و رنگ‌ها، ابزاری مهم در راستای شناخت کیهان و درک قوانین حاکم بر آن به‌شمار می‌رود. هدف از این مطالعه، مروری بر یافته‌های بشر در این حوزه و دست‌آوردهای علمی او در سایه شناخت و تحلیل نورها و رنگ‌های کیهانی است. بررسی این دستاوردها نشان می‌دهد واکنش‌ها و فعل و انفعالات هسته‌ای در قلب ستارگان و به‌تبع آن دمای آنها، موثرترین عامل در رنگ ستارگان به‌شمار می‌رود، قدر ستاره، به‌عنوان معیار اصلی سنجش تابندگی آن، وابستگی مستقیم به این دما دارد. از سوی دیگر عواملی هم‌چون فاصله ستاره تا زمین و وسعت سطح منتشرکننده نور بر ارزیابی ما از درخشندگی ستارگان تأثیرگذارند. هم‌چنین به‌طور عکس، به‌منظور اندازه‌گیری دمای ستارگان، علاوه بر روش‌های طیف‌سنجی می‌توان از ویژگی‌های رنگی آنها کمک گرفت. نمار رنگ ستاره که به‌صورت اختلاف قدر ستاره در دو محدوده مشخص از طیف نور (در محدوده نور مرئی و اطراف آن) تعریف می‌شود و هم‌چنین نمودارهای رنگ-رنگ و قدر-رنگ، ستاره‌شناسان را در راستای شناخت بیشتر ماهیت و ویژگی‌های ستارگان از جمله دمای آنها یاری می‌کند. نور در مسیرش به‌سمت زمین دست‌خوش تغییراتی خواهد شد که رنگ ستارگان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سرخ‌شوندگی میان‌ستاره‌ای، انتقال سرخ و انتقال سرخ گرانشی از جمله تغییراتِ مهم نور در طول مسیر به‌شمار می‌روند که تحلیل آن‌ها اطلاعات ارزشمندی را در اختیار اخترفیزیک‌دانان قرار می‌دهد. ستارگان تنها اجرام این دنیای پهناور نیستند، بخش اعظم کیهان را جرمی نادیدنی به‌نام ماده تاریک شکل می‌دهد که چیستی آن هنوز بر دانشمندان مشخص نیست. رنگ سیارات به‌عنوان اجرام منعکس‌کننده نور، تابعی از ضریب بازتاب، ماهیت و جو آنهاست. تحلیل ویژگی‌های رنگی سیارات زمینه‌ساز شناخت بیشتر مواد سازنده و ماهیت آنها به‌حساب می‌آید.

واژه‌های کلیدی

رنگ ستارگان، انتقال سرخ، سرخ‌شوندگی میان‌ستاره‌ای، نمودار رنگ-رنگ، رنگ سیارات.



*نویسنده مسئول: s.gorji@aut.ac.ir

Ministry of Science, Research and Technology
Institute for Color Science and Technology

Available online @ www.jscw.icrc.ac.ir

Journal of Studies in Color World, Vol. 5/ No. 1 (2015)/ 31-48

نشریه علمی ترویجی
مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

A Study on Color of Stars and Color in Astronomy

Hosein Saeedi[1], Saeideh Gorji Kandi[2]

1- Polymer Engineering and Color Technology Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, P. O. Box: 4413-15875.

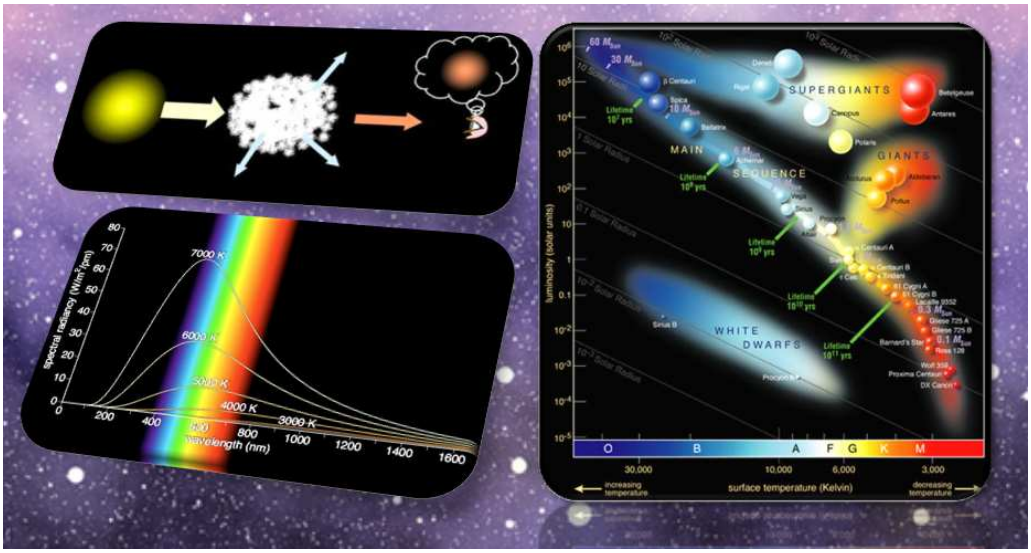
2- Polymer Engineering and Color Technology Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, P. O. Box: 4413-15875.

Abstract

Study of lights and colors is being considered as an important tool to know more about universe and the rules governing it. The aim of the present study is to review the human findings in this area and the scientific achievements of understanding and analysis of cosmos lights. The survey results show that nuclear reactions in the heart of stars as well as their resulting temperature are the most influential factors on the color of stars. So, the star magnitude, as the main indicator for star luminosity evaluation, is directly dependent to this temperature. On the other hand, factors such as the distance between Earth and the star and the light emitting surface area both affect our assessment of the star brightness. On the contrary, star temperature measurement could be implemented by using color characteristics of stars in addition to well-known spectroscopy methods. Star color index, defined as difference between star magnitude in two definite limits of light spectrum (in visible area and its nearby) and also color-color and color-magnitude diagrams can help astronomers to find out more regarding to star specifications like star temperature. The light is changed in its path toward earth, which affects the color of star. Inter stellar reddening, red shift and gravitational red shift are some of the most important changes of stars, and their analysis provides valuable information to the astrophysicists. Stars are not the only mass in this wide universe; the major part of the universe is contained of an invisible mass called dark matter which its essence is still unknown to scientists. Color of planets, considering planet as a light reflector mass, is a function of surface of planet, albedo and its characteristics and atmosphere. Analysis of color specification of planets leads to better understanding of planets, containing their structure and nature.

Keywords

Color of stars, Red shift, Interstellar reddening, Color-color diagram, Color of planets.



*Corresponding author: s.gorji@aut.ac.ir

۱- مقدمه

بنا به تعریف، رنگ پدیده‌ای فیزیکی-روانی[1] است. بُعد روانی رنگ هم‌چنان که بر پیچیدگی آن می‌افزاید، درک آن را برای انسان سهل می‌سازد [۱]. در حقیقت این سیستمِ بینایی انسان، شامل چشم و مغز، است که رفتار نوری اجسام و طول موج‌های متفاوت نور را در قالب رنگ‌ها ترجمه می‌کند و بخش مهمی از دنیای بصری انسان را می‌سازد. در پس هر رنگ، علاوه بر ویژگی‌های موثر انسانی، اطلاعات مهمی از ساختار ماده و برهم‌کنش‌های فراوان نور در طول سفرش از منبع تا درون جسم و در نهایت چشم نهفته است. در حقیقت ارزش واقعی اطلاعات حاصل از تحلیل رنگ‌ها آن‌گاه آشکار می‌گردد که از جمله معدود ابزار بشر در راستای شناخت کیهان و پدیده‌های کیهان‌شناختی واقع می‌شود. هدف از تبیین این مطالعه مروری، بررسی هرچند مختصر رنگ و پدیده‌های رنگی در کیهان، شرح کاربردهای تحلیل رنگی و جایگاه آن در دانش نجوم است. هر چند هدف، بررسی رنگ‌های کیهانی است، اما در این مسیر و در راستای درک بهتر، از به‌کارگیری و توضیح برخی اصطلاحات نجومی و شرح مختصر سرگذشت ستارگان و فعل و انفعالات درون آنها و همچنین نگاه فیزیکی به برخی پدیده‌ها گریز و گزیری نیست.

۱-۱- سرگذشت کیهان

۱-۱-۱- نخستین دوره: پیش از پیدایش ستارگان

بهتر است برای درک بهتر آسمان شب و قوانین حاکم بر آن، در ابتدا نگاهی به سناریوی پیشنهادی دانشمندان از نخستین و دورترین لحظاتی که دانش ما از مسیر شگرف خلقت متصور است بیاندازیم و خود را در جایگاه تماشاگری که پیدایش نخستین نورها و رنگ‌ها را از دیده می‌گذراند فرض بداریم و تا اکنون پیش آییم. در نخستین لحظات[2] پس از انفجار بزرگ یا مه‌بانگ[3] تنها کوارک‌ها[4] را می‌بینیم. کوارک‌ها که ذرات سازنده‌ی نوکلئون‌ها[5] پنداشته می‌شوند، در آن زمان در میان گرمایی بی‌مثال شناورند. شاید این تنها لحظاتی در تاریخ تکوین کیهان باشد که کوارک‌ها به‌صورت مستقل و تنها، و خارج از ساختار نوکلئون‌ها در حرکتند [۲]. پس از چند میلی‌ثانیه، نوترون‌ها، پروتون‌ها، نوترینوها[6]، فوتون‌ها[7] و الکترون‌ها به‌عنوان ذرات بنیادی نخستین، نقش‌آفرینی می‌کنند. با گذرکردن از چند دقیقه ابتدایی و کشمکش‌های فراوان میان نخستین هسته‌های تشکیل‌شده و فوتون‌ها، به‌تدریج و با کاهش دما، هسته‌های هیدروژن، دوتریم، هلیم-۳، هلیم-۴ و گاهی لیتیم-۷ شکل می‌یابند. با این وجود پایداری هسته هلیم-۴ از تشکیل هسته‌های مرکب پیچیده‌تر جلوگیری می‌کند [۲]. پس از گذر از فعل و انفعالات هسته‌ای، ادامه کاهش پیوسته دما، آغاز فعالیت سومین نیروی طبیعت، یعنی الکترومغناطیس را میسر می‌سازد. این دوره حیات کیهان که تا یک میلیون سال ادامه می‌یابد، برهم‌کنش هسته‌ها و الکترون‌ها و تولد نخستین اتم‌ها و مولکول‌ها را در پی دارد [۲]. در محدوده بحث ما، اهمیت این دوره از کیهان در شکل‌گیری شفافیت آن است. با جذب شدن الکترون‌ها و گرفتار آمدنشان در بند هسته، فوتون‌های نور قادرند بدون مزاحم در فضا جولان دهند و حیاتی طولانی‌مدت داشته باشند. هم‌چنین این برهه زمانی از تاریخ کیهان، آغاز پدید آمدن ریزموج‌های پس‌زمینه کیهانی[8] است [۲, ۳].

۱-۱-۲- تولد نخستین ستارگان

با ادامه یافتن روند کاهش دمای کیهان و پس از گذشت یک‌میلیون سال، نوبت به نقش‌آفرینی واپسین نیرو از نیروهای چهارگانه طبیعت، یعنی گرانش می‌رسد. این که با ورود جاذبه به فعل و انفعالات کیهانی، نخست ابرخوشه‌ها و پس از آن خوشه‌های کهکشانی و کهکشان‌ها و ستاره‌ها به‌وجود آمدند یا دقیقاً عکس این مسیر روی داده‌است، مشخص نیست اما با این حال، گرانش و در پی آن شکل‌گیری ستارگان، نقش اول داستان پیدایش حیات خواهد بود. بررسی دقیق‌تر مراحل متفاوت حیات ستارگان، به‌منظور درک بهتر از رنگ آن‌ها و کاربرد دانش رنگ در شناخت بیشترشان حائز اهمیت است، از همین روی زندگی ستارگان را کمی جزئی‌تر بررسی خواهیم‌کرد [۲]. با پیدایش کهکشان‌های گازیِ حاوی هیدروژن و هلیم-۴ و گاهی دوتریم و هلیم-۳ (به‌عنوان تنها عناصر موجود در جهان) و در حضور نیروی موثّر گرانش، نخستین ستاره‌ها وجود می‌یابند. تابش فروسرخ ستارگان در هنگام تولدشان از جمله راه‌های شناسایی آن‌هاست. با ادامه‌یافتن گرانش و منقبض‌شدن ستاره، دما افزایش می‌یابد و فوتون‌های پرانرژی‌تر ظاهر می‌شوند. این فوتون‌ها که دارای انرژی لازم برای جدا کردن الکترون‌ها از هسته‌ها هستند، موجبات مشاهده ستاره به‌وسیله انسان را فراهم می‌آورند [۲].

---

[1] Psychophysical phenomenon

[2] منظور از نخستین لحظات، چند نانو ثانیه ابتداییِ پس از انفجار بزرگ است.

[3] Big bang

[4] Quark

[5] به بیان ساده، پروتون‌ها و نوترون‌ها نوکلئون نامیده می‌شوند. دانش فیزیک امروز، نوکلئون‌ها را به‌عنوان کوچک‌ترین ذرّات هسته اتم نمی‌شناسد و خودِ آنها را متشکل از ذرات بنیادی دیگری به‌نام کوارک می‌داند.

[6] نوترینوها ذرات بنیادی خنثی هستند که بدون تأثیرپذیری از میدان الکترومغناطیس با سرعتی نزدیک به نور در حرکت هستند. به‌دلیل تولید این ذرات در واکنش‌های هسته‌ای و یا در اثر برخورد پرتوهای کیهانی با اتم‌ها، شناسایی نوترینوها از اهمیت بالایی در دانش نجوم برخوردار است.

[7] فوتون ذره‌ای بنیادی است که به‌عنوان بسته انرژی یا واحد کوانتومی پرتوهای الکترومغناطیس به‌شمار می‌رود.

[8] Cosmic microwave background radiation

تابشی که با کشف پنزاس و ویلسون، در سرتاسر جهان و در هر راستایی که بنگریم مشاهده می‌شود. تابشی که همانند تابش جسم سیاهی با دمای ۲/۷ کلوین سرتاسر عالم را فراگرفته است و میراثی پایدار از انفجار اوّلیه شمرده می‌شود. این تابش از نظر طول موج در دسته امواج رادیویی قرار می‌گیرد و اگر چشم موجودات زنده قادر به درک این ناحیه از طول موج امواج الکترومغناطیسی بود، همه دنیا غرق در این طیف دیده می‌شد.

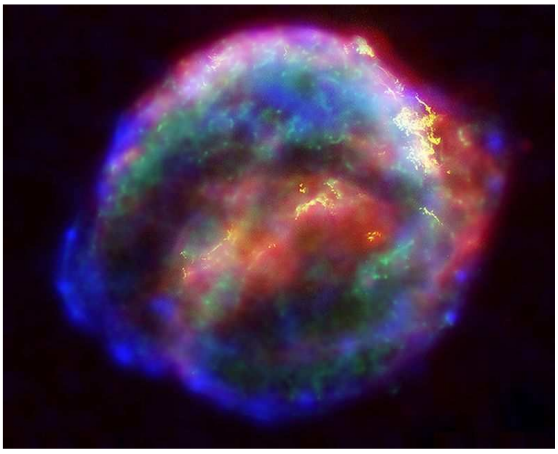
ادامه‌یافتن روند انقباض، با افزایش دمای مرکز ستاره تا حدود چند ده میلیون درجه همراه خواهد بود. این دما شرایط را برای غلبه مجدد بر نیروی هسته‌ای فراهم می‌آورد و در مرکز ستاره، فعل و انفعلات هسته‌ای همچون نخستین دوران کیهان از سر گرفته می‌شود[1]. در این زمان هسته‌های هیدروژن با یکدیگر هم‌خانه شده و هسته هلیم را شکل می‌دهند. در این دوران، ستاره به طولانی‌ترین بازه عمرش، یعنی دوره سکون و تعادل خواهد رسید. در حقیقت در قلب ستاره، همواره دو نیروی غول‌آسا در جدال با یکدیگر به‌سر می‌برند: نخست هم‌جوشی هسته‌ای که انرژی و تابش فوق‌العاده زیادی به سمت خارج از مرکز ستاره گسیل می‌کند و در حقیقت ستاره را به‌سوی انبساط سوق می‌دهد، و دوم گرانشی که پیوسته ستاره را در مسیر انقباض پیش می‌برد. تعادل دو نیروی فوق و سکونِ حاصل از آن، بخش عمده‌ای از درازای زندگی ستاره را در بر می‌گیرند؛ بخشی که خورشید ما، هم اکنون در میانه آن است. در این شرایط ابعاد، تابندگی و رنگ ستاره ثابت خواهند ماند [۳]. اما پس از طی زمانی طولانی (در حدود چندین میلیارد سال برای ستارگان سبک‌تر)، تمامی سوخت هسته‌ای مصرف می‌شود و قلب ستاره مملو از هسته‌های هلیومی می‌شود که تمایل به واکنش هسته‌ای ندارند. بنابراین با غلبه گرانش، ستاره در خود فرو می‌رود و چگال‌تر می‌شود و دمای مرکز آن از صد میلیون درجه تجاوز خواهد کرد. چنین دمایی شرایط را برای واکنش‌های هسته‌ای بیش از پیش آماده می‌سازد. هلیم، مایل به ترکیب‌شدن با هسته دیگری از جنس خود نیست. با این حال تحت شرایط خاصی از تصادفات هسته‌ای گاهی سه هسته هلیم طوری در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند که با هم هسته کربن را تشکیل دهند. پیدایش کربن زمینه‌ساز تبادلات هسته‌ای جدیدی می‌شود که منجر به تشکیل اکسیژن و ترکیبات سنگین‌تر در مرکز ستاره خواهد شد. این تحولات هسته‌ای سبب افزایش دما در سطوح بالاتر و خارج مرکز ستاره خواهد شد که آغازگر فرآیند تبدیل هیدروژن به هلیم، این بار در سطح ستاره- و نه مرکز آن- خواهد بود. بنابراین فرآیندهای هسته‌ای هم در مرکز ستاره و هم در سطح آن به‌وقوع می‌پیوندند. اما دیری نمی‌پاید که هلیم مرکز ستاره نیز به مصرف می‌رسد و ستاره مجدداً منقبض می‌شود. این بار قلب ستاره تا ۱ میلیارد درجه گرم می‌شود و انرژی لازم برای برهم‌کنش هسته‌های کربن فراهم می‌آید. این تحولات عناصر سنگین‌تری چون نئون، سیلیسیم، آلومینیم، سدیم و غیره را ایجاد می‌کند. حلقه فوق مجدداً به نقطه ابتدایی می‌رسد، انقباض دوباره، افزایش دما تا چند میلیارد درجه و هم‌جوشی سایر عناصر موجود در قلب ستاره. بدین‌سان سنگین‌ترین و پیچیده‌ترین عناصر در کوره هسته‌ای مرکز ستاره تولید می‌شوند [۲].

[1] به‌طورکلی با افزایش دما، دوران حکمرانی و اثرگذاری نیروهای هسته‌ای به‌عنوان قوی‌ترین نیروی طبیعت آغاز می‌گردد، در این شرایط فعالیت سایر نیروها چندان اثرگذار نخواهد بود. از سوی دیگر با کاهش دما، به‌ترتیب نوبت به اثرگذاری نیروی الکترومغناطیس و گرانش خواهد رسید.

۱-۱-۳- مرگ ستارگان

با افزایش دمای مرکز ستاره و رسیدن به درجه حرارت حدود ۵ میلیارد درجه، روند انقباض سرعت می‌یابد به‌علاوه این‌که انرژی و دما از سطوح هسته‌ای فراتر می‌رود و نوکلئون‌ها فرو می‌پاشند. اتم‌های سنگینی که چون فرزندان ستاره در قلب آن زاده شده‌اند به مرز فروپاشی می‌رسند. در این زمان، انفجاری عظیم رخ می‌دهد و مواد درون ستاره به داخل فضا پخش می‌شوند. پدیده‌ای که انفجار ابرنواختر[2] نامیده می‌شود. با مرگ ستاره و پیدایش ابرنواخترها دنیایی از رنگ‌ها و نورها آسمان را فرا می‌گیرد و خبر از تولد اجرامی جدید می‌دهد (شکل ۱) [۴].

اما مقداری از ماده فوق‌العاده چگال پدید آمده از رُمبش‌های پیشین، در قلب ستاره مرده باقی می‌ماند و جرم خاصی را به نام ستاره‌ی نوترونی شکل می‌دهد. چگالی ستاره‌های نوترونی در حدود چند صد میلیون تن در سانتی‌متر مکعب است، میدان گرانشی عظیم آن‌ها و چرخش‌های وضعی سریعشان، تأثیرات نوری عجیبی خواهد داشت که در ادامه به آن خواهیم پرداخت [۲].



شکل ۱- تصویر باقی‌مانده انفجار ابرنواختری کپلر که در طول موج‌های x تا فروسرخ گرفته‌شده است. این انفجار توسط کپلر[3] در سال ۱۶۰۴ کشف و مشاهده شد [۴].

سناریوی مرگ ستارگان سبک‌تر کمی متفاوت است. این ستارگان پس از شروع هم‌جوشی در سطح، به آرامی منبسط خواهند شد و ماده خود را در آسمان پراکنده خواهند کرد. در حقیقت در مورد ستارگان کم‌جرم‌تر دمای مرکزشان هیچ‌گاه تا آستانه فرا رفتن از بستگی‌های هسته‌ای و انفجار پیش نخواهد رفت. این ستارگان مرگی آرام و تدریجی خواهند داشت و در طول انبساطشان به جرمی به‌نام (غول سرخ)[4] تبدیل خواهند شد (البته اغلب ستارگان پرجرم نیز ناچار به گذرانِ این دوره خواهند بود و تفاوت اصلی ستارگان پرجرم با ستارگان سبک‌تر، در مرکز آنهاست) و این داستانی است که روزی خورشید ما در آن ایفای نقش خواهد کرد [۳].

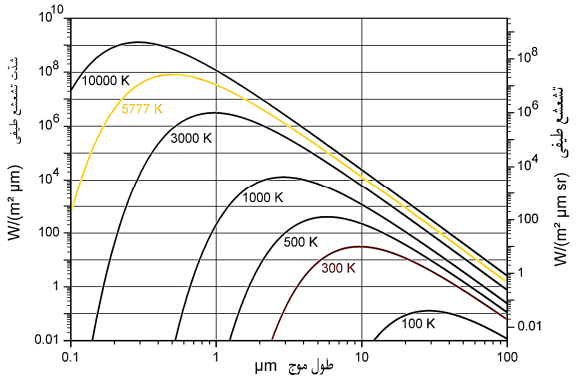
[2] Super nova
[3] Johannes kepler
[4] Red giant

پس از عبور از گذار غول سرخ، مرکز ستاره کماکان بـه رنـگ آبـی دیـده می‌شود ولی ماده پراکنده آن به رنگ زرد و قرمز مشاهده مـی‌شـود. ایـن پدیده به سحّابی سیاره‌ای شهرت دارد. مرکز آبی این سحّابی‌ها، به مـرور زمان سرد می‌شود و جرمی به‌نام (کوتوله‌ی سـفید[1]) را ایجـاد مـی‌کنـد. کوتوله‌های سفید میراث ستارگان کم‌جرم‌اند، همانگونه کـه سـتاره‌هـای نوترونی و سیاه‌چاله‌ها، باقی‌مانده ستارگان عظیم‌ترند فضای میان‌ستاره‌ای که با مرگ ستارگان مملو از عناصر مختلف می‌شود، در ادامه زمینه ظهور ستارگان نسل دوم و سیاره‌هـا را فـراهم مـی‌آورد [۲]. بـا ایـن مقدمـه و شناخت مختصر از ستارگان، به‌سراغ بحث اصلی‌مان یعنی رنگ در کیهان می‌رویم.

۲- نور در مبدأ

۲-۱- ستاره و تابش جسم سیاه[2]

واژه جسم سیاه به جسمی اطلاق می‌شود که تمام نور دریافتی را جـذب می‌کند و اجازه انتقال، انتشار و بازتاب سطحی را به آن نمی‌دهد [۵]. در حقیقت جسم سیاه تمـام طیـف الکترومغنـاطیس برخـوردی را در تمـام طول‌موج‌ها جذب می‌کند. وجه تسمیه این نام‌گذاری، سـیاه دیـده‌شـدن جسم سیاه در دماهای پایین است. به‌طور کلی با افزایش دما و داغ‌کردن جسم سیاه یا هر جسمی که در تعادل ترمودینامیکی با محیط قرار داشته باشد، شاهد نشر طیف الکترومغناطیس از آن خواهیم بـود. ایـن پدیـده، تابش جسم سیاه یا تابش حرارتی نام دارد. مشخصات این تابش مـستقل از شکل، ساختار و جنس ماده و تنها وابسته به درجه حرارت تعـادلی آن است [۶]. در بررسی روند انتشار طیف الکترومغناطیس از جسم سیاه، دو نکته حائز اهمیت است؛ نخست آن‌که با افزایش دما، طول مـوج بیـشینه نشر کاهش خواهد یافت و دوم این‌که شدت نور خروجی افزایش خواهـد یافت (شکل ۲) [۵].



شکل ۲- با افزایش دما، طول موج بیشینه نشرکاهش و تابندگی افزایش خواهدیافت [۷].

[1] White dwarfs
[2] Blackbody radiation

تلاش‌های پلانک[3]، وین[4] و بولتزمان[5] در بررسـی ایـن پدیـده، گـام‌هـای ارزش‌مندی در پیش‌برد مکانیک‌کوانتوم و همچنین کیهان‌شناسی به‌شمار می‌آید. در حقیقت با افزایش دمای جـسم سـیاه از حـدود ۱۰۰۰ درجـه کلـوین شـاهد نـشر نـور قرمـز و پـس از آن نـارنجی، زرد، سـفید، و از محدوده‌ی دمای ۶۰۰۰ کلوین به‌بعد، به‌تدریج شاهد نـشر آبـی کمرنـگ خواهیم بود. با ادامه افزایش دما تا محدوده‌ی ۲۵۰۰۰ کلـوین آبـی‌هـای پررنگ‌تر و مایل به بنفش ظاهر خواهند شد. هم‌چنین، چنان‌چه پـیش از این توضیح داده‌شد، نور آبیِ حاصل با تابندگی بیشتر همراه خواهد بـود. در حقیقت نمودار مربوط به شکل ۲ از طریق مـشاهدات تجربـی حاصـل آمده‌است و رابطه پلانک (رابطه ۱) بهترین رابطه توصیف کننده آن است. توضیح علت رفتار این‌چنینی نمودار و تابش جسم سـیاه (کـاهش طـول موج بیشینه نشر با افزایش دما) نیازمند ورود به حوزه مکانیک کوانتـوم و مشاهدات فیزیک‌دان‌ها در اوایل قرن بیستم است که از حیطه نگاه مقاله حاضر خارج است [۵].

رابطه ماکس پلانک[6] به‌شکل رابطه ۱ نگاشته می‌شود [۶]:

$$B\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}}-1} \qquad (۱)$$

در این رابطه B نمایانگر تابش طیفی، T دمای مطلق، K_B ثابت اسـتفان-بولتزمان، h ثابت پلانک و c سرعت نور در محیط است.

از سوی دیگر، رابطه‌ی وین[7] (رابطه ۲) و رابطه استفان- بولتزمان[8] (رابطه ۳) از جمله مهم‌ترین روابط مربوط به تابش جسم سیاه به‌شمار مـی‌رونـد که به‌ترتیب رابطه دما با طول موج بیشینه و تابندگی را توصیف می‌کنند.

$$\lambda_{max}.T = 0.29\ \text{cm k} \qquad (۲)$$

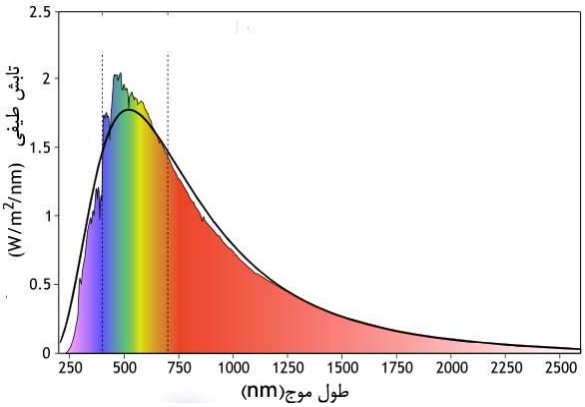
$$L = 4\pi R^2.\alpha.T^4 \qquad (۳)$$

در رابطـه ۳، α بـه‌عنـوان ثابـت اسـتفان-بولتزمـان مقـداری برابـر بـا $5.670 \times 10^{-5}\ \text{erg cm}^{-2}\ \text{s}^{-1}\ \text{K}^{-4}$ دارد. رابطـه ۲ و ۳ کـاهش طـول مـوج و افزایشِ تابندگی به‌صورت نمایی، در مقابل افزایش دما را نشان می‌دهنـد [۶]. در حقیقت، اجرام نجومی جسم سیاه ایده‌آل نیستند. با این‌حـال در بررسی‌های نجومی، اجرام کیهانی در ابتدا هم‌چون جـسم سـیاه ایـده‌آل فرض می‌شوند و پس از آن در صورت نیاز، تصحیح مناسب بر روی آن‌هـا اعمال خواهد شد [۸].

با این توضیح، طول موج طیف منتشر شده از ستاره و رنگ آن، وابستگی مـستقیم بـه دمـای سـطح سـتاره دارد. بنـابراین سـتارگانی کـه دمـای

[3] Max Planck
[4] Wilhem Wien
[5] Ludwig boltzmann
[6] Planck's law
[7] Wien's displacement law
[8] Stefan-boltzmann law

سطحشان در حدود ۵ تا ۷ هزار کلوین است به رنگ سفید، ستارگان با دمای کمتر به رنگ‌های زرد و قرمز و ستارگانی که دمایشان بیش از این مقدار باشد -که اکثر ستارگان را شامل می‌شوند- آبی‌رنگ می‌نمایند. از سوی دیگر با توجه به توضیحات پیشین، جای تعجب نیست که عموم ستارگانِ آبی تابنده‌ترند [۸]. به‌عنوان نمونه، با به‌کارگیری رابطه ۲ در مورد خورشید و با جای‌گذاری دمای سطح ۵۸۰۰، [۹] طول موج بیشینه نشر در حدود ۵۰۰ nm محاسبه خواهد شد. اما این طول موج در محدوده رنگ سبز مایل به آبی قرار می‌گیرد، حال آن‌که ما خورشید را به رنگ‌های زرد کم‌رنگ و سفید مشاهده می‌کنیم. در واقع علت این امر نحوه پراکندگی پای نمودار در این طیف است. توزیع تمامی رنگ‌ها در این نمودار منجر به مشاهده نهایی رنگِ سفید می‌شود. در واقع هرچه بیشینه نمودار تیزتر باشد و پای آن رنگ‌های کم‌تری را در برگیرد، رنگ خالص‌تری با فام طول موج بیشینه خواهیم داشت و هم‌چنین عکسِ آن، در برداشتن تمامی رنگ‌ها با اختلاف کم نسبت به طول موج بیشینه، موجب کاهش خلوص رنگی خواهد شد (شکل۳) [۱].



شکل ۳- توزیع طیف نشری خورشید [۱۰].

اما پرسش‌های مهمی ما را به چالش خواهند کشید؛ چرا غول‌های سرخ با وجود طول موج انتشاری زیاد، تا این اندازه درخشانند؟ سبب تفاوت‌های دمایی ستارگان و در پی آن تفاوت رنگ آنها، حتی با وجود محتوای یکسان چیست؟ آیا نور ستارگان به‌راستی به‌همان شکلی که از سطح ستاره منتشر می‌شود به ما می‌رسد یا در طول سیر و سفرشان، دست‌خوش تغییراتی خواهند شد؟

در ادامه بحث به این پرسش‌ها و چند ابهام مهم دیگر پاسخ داده خواهد شد. اما پیش از آن معرفی چند مفهوم جدید ضروری به‌نظر می‌رسد.

۲-۲- قدر

در حقیقت واژه قدر[1] دربردارنده معیاری کمی در مورد میزان درخشندگی اجرام نجومی است. تاریخچه پیدایش این مفهوم به ۲۵۰۰ سال پیش و فعالیت‌های منجم یونانیِ باستان، هیپارکوس[2] باز می‌گردد.

[1] Magnitude
[2] Hipparchus

هیپارکوس روشنایی ستارگان آسمان را دسته‌بندی و متناسب با اعداد ۱ تا ۶ نام‌گذاری کرد. او پرنورترین ستارگان آسمان را در دسته ۱، و ضعیف‌ترین ستارگان از نظر نوری را در دسته ۶ قرار داد. دسته‌بندی هیپارکوس در طی هزاران سال و تا کنون، اعتبار خویش را به‌سبب دقت بصری مناسب حفظ کرده است [۱۱]. درواقع در دنیای نورها و رنگ‌ها، نمودِ بصری اجسام و تقسیم‌بندی‌های انسانی که بر پایه مشاهدات چشمی صورت می‌پذیرند از اهمیت فراوانی برخوردارند. چنان‌چه فعالیت‌های مشاهداتی مانسل در دنیای رنگ‌ها، متر و مقیاسی برای سنجش سایر فضا-رنگ‌های کمی‌تر محسوب می‌شوند [۱]، مشاهدات چشمی هیپارکوس نیز معیار ستاره‌شناسان جهت تبیین ساختاری کمی و دقیق برای تقسیم‌بندی درخشندگی[3] ستارگان قرار گرفت. در واژه‌شناسی امروزه ستاره‌شناسان، واژه قدر به شکل کمی مطرح می‌شود. قدر ظاهری که در ادامه به توضیح آن خواهیم پرداخت به شکل رابطه ۴ نگاشته می‌شود.

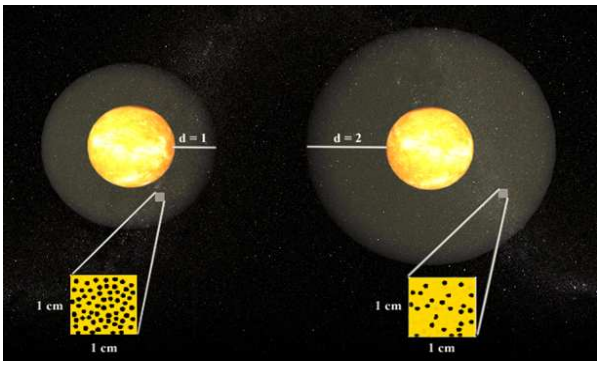
$$m = m_0 - 2.5\log(\frac{F}{F_0}) \qquad (۴)$$

در این رابطه، m_0 و F_0 به‌ترتیب قدر و شار نوری ستاره مرجع جهت کالیبره کردن، و m و F به‌ترتیب قدر ظاهری و شار نوری ستاره‌ی مورد نظر هستند [۳]. لازم به توضیح است که چشم انسان فواصل را به‌صورت لگاریتمی درک می‌کند، بنابراین روابط کمی تعریف شده در این زمینه، بعضاً دربردارنده این عملگر ریاضی می‌باشند [۱].

مشاهدات جدیدتر نشان داد که ستاره‌ای از دسته شش هیپارکوس، نسبت به ستاره دسته یک، ۱۰۰ مرتبه تابنده‌تر است. درواقع ضریب ۲/۵ برای عمل‌گر لگاریتم در رابطه ۴ برابر با $100^{1/5}$ و به اندازه ریشه پنجم عدد ۱۰۰ است. با جایگذاری مقادیر ۱ و ۶ به‌جای m در رابطه ۴، این‌گونه دریافت می‌شود که ستاره‌ای از درجه ۱ هیپارکوس نسبت به ستاره درجه ۶، ۱۰۰ مرتبه تابنده‌تر است. به‌طور کلی به ازای هر درجه کاهش در دسته‌بندی هیپارکوس، تابندگی ستاره ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد. البته در دانش کنونی نجوم ستارگانی با قدرهای ظاهری خارج از محدوده ۱ تا ۶ وجود دارند که در ادامه مقاله به برخی از آنها اشاره می‌شود [۳].

هم‌چنین واژه شار، بیان‌گر مقدار انرژی عبوری از واحد سطح در واحد زمان است. اندازه‌گیری شار نوری یک جسم، به فاصله آن تا ردیاب وابسته است، به‌طوری که با دو برابر شدن فاصله، شار نوری دریافت شده برابر ۰/۲۵ مقدار اولیه خواهد بود. در حقیقت با افزایش فاصله از منبع نور، فوتون‌های نور که بسته‌های انرژی به‌شمار می‌روند از هم دورتر و متعاقباً چگالی انرژی و شار نوری دریافت شده در یک نقطه خاص کاهش می‌یابد (شکل ۴) [۱۲].

[3] عموماً در واژه‌شناسی ستاره‌شناسی، درخشندگی (Brightness) متناسب با فاصله جرم کیهانی با زمین و از نقطه‌نظر مشاهده‌گر زمینی ارزیابی می‌شود. حال آن‌که تابندگی (luminosity)، شدت نور انتشاری ذاتی ستاره یا سایر اجرام کیهانی است.



شکل ۴- شار نوری یک ستاره، با افزایش فاصله نسبت به آن کاهش می‌یابد [۱۲].

شار نوری از نظرکمی به‌صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود [۳].

$$F = \frac{L}{A} = \frac{L}{4.\pi.R^2} \qquad (۵)$$

در این رابطه، L یا تابندگی[1] بیانگر میزان انرژی منتشر شده در واحد زمان است. نکته حائز اهمیت در مورد این ویژگی، وابستگی آن به دمای ستاره (که پیش از این شرح داده شد) و هم‌چنین مساحت منتشرکننده نور است. با افزایش سطح، میزان درخشندگی افزایش خواهد یافت، از این رو انتظار درخشندگی بیشتری از ستاره‌های بزرگ‌تر وجود دارد. ستاره‌شناسان و اخترفیزیک‌دانان ترجیح می‌دهند در این مورد از واحد ارگ به‌جای وات استفاده کنند. بنابراین در محاسبات مربوط به قدر ستاره، یکای شار می‌بایست $erg.cm^{-2}.s^{-1}$ لحاظ شود [۳]. واژه قدر در ستارگان به دو بخشِ قدر ظاهری[2] و قدر مطلق[3] تقسیم می‌گردد که در ادامه به معرفی هر یک پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱- قدر ظاهری

قدر ظاهری، معیاری جهت سنجش درخشندگی اجرام آسمانی با فرض مشاهده از زمین است. میزان نوری که ما از ستارگان یا سایر اجرام کیهانی دریافت می‌کنیم، علاوه بر خواص ذاتی‌شان هم‌چون دما و سطح که پیش از این بررسی شد، به فاصله‌شان از زمین وابسته است. طبیعتاً هرچه یک جرمِ منتشرکننده و یا منعکس‌کننده نور به زمین نزدیک‌تر باشد، به نظر مشاهده‌کننده زمینی تابنده‌تر خواهد رسید. بنابراین ممکن است ستاره A نسبت به ستاره B ذاتاً تابنده‌تر باشد اما با توجه به فاصله نزدیک‌تر ستاره B به زمین، آن را تابنده‌تر مشاهده کنیم. هر میزان که قدر یک ستاره کوچک‌تر و منفی‌تر باشد، آن ستاره از نظر ما تابنده‌تر خواهد بود. به‌عنوان مثال، قدر ظاهری خورشید ۲۶/۷۳-، قدر ظاهری ماه ۱۲/۶-، مریخ در نزدیک‌ترین فاصله‌اش به زمین ۲/۸- و قدر شعرای یمانی[4] ۱/۶- است. اما هرچه قدرِ ظاهری ستاره‌ای بزرگ‌تر باشد، از نظر ما کم‌نورتر خواهد بود. در حقیقت ستارگانی با قدرهای بیش از ۶ و ۷ با چشم غیر مسلح دیده نخواهند شد. رابطه‌ای که پیش از این در مورد قدر معرفی‌شد (رابطه ۴) مربوط به قدر ظاهری بود. لازم به توضیح است که واژه قدر در مورد تمامی اجرامِ آسمانی، خواه منبع نور و خواه منعکس‌کننده آن تعریف می‌شود [۱۱].

۲-۲-۲- قدر مطلق

بر خلاف قدر ظاهری، قدر مطلق بیان‌گر میزان درخشندگی ذاتی ستاره، صرف نظر از فاصله‌اش با زمین است. در حقیقت جهت سنجش قدر مطلقِ یک جرم کیهانی، فاصله خویش با آن را ده پارسک یا ۳/۲۶ سال نوری فرض می‌کنیم و محاسبات مربوطه را انجام می‌دهیم. فرض فوق به‌سبب رهایی از معیار فاصله تا زمین است. برای تبدیل قدر ظاهری به قدر مطلق، می‌توان از رابطه ۶ بهره برد.

$$M = m + 5 - 5\log(d) \qquad (۶)$$

در این رابطه، M قدر مطلق، m قدر ظاهری و d فاصله ستاره مورد بحث تا زمین بر حسب پارسِک[5] است. طبیعتاً اگر d برابر با ۱۰ باشد، قدر ظاهری و مطلق ستاره یکسان خواهند بود. به‌عنوان مثال قدر مطلق خورشید ۴/۸۳، قدر مطلق شعرای یمانی ۱/۴ و قدر مطلق پای شکارچی[6] ۷- خواهد بود. حال آن‌که از نظر مشاهده‌گر زمینی، شعرای یمانی از پای شکارچی درخشنده‌تر می‌نماید [۱۱].

۲-۳- قدر و رنگ

با دقت در عوامل موثر بر قدر ستارگان و هم‌چنین توضیحات پیشین پیرامون رابطه میان فعل‌وانفعالات هسته‌ای، درجه حرارت و رنگ ستارگان، درک بهتری از پدیده رنگ در ستارگان پدید می‌آید. چنان‌چه پیش از این بحث شد، جرم ستاره رابطه مستقیم با درجه حرارت آن دارد و حرارت سطح ستاره، تعیین کننده انرژی فتون‌های منتشر شده و در پی آن رنگ ستاره خواهد بود. هم‌چنین در بحث مربوط به دمای ستارگان به این نکته اشاره شد که افزایش دمای ستاره، علاوه بر کاهش طول موج نشر، با افزایش شدت آن همراه خواهد بود. بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که هرچه جرم ستاره بیشتر باشد، آبی‌تر خواهد بود و قدر مطلق آن مقدارِ منفی‌تری خواهد شد (ستاره درخشنده‌تر می‌نماید) و هم‌چنین هرچه ستاره سبک‌تر باشد، قرمزتر و کم‌نورتر به نظر خواهد رسید. [۳].

---

[1] Luminosity
[2] Apparent magnitude
[3] Absolute magnitude
[4] Sirius این ستاره درخشان‌ترین ستاره آسمان شب است.
[5] Parsec پارسک از جمله آحاد سنجش فواصل کیهانی است، یک پارسک برابر ۳/۲۶ سال نوری است.
[6] Rigel

اما اگر دقیق‌تر به آسمان شب بنگریم، ستارگان بسیار درخشنده‌ای همچون سماک رامح[1] یا آلفای شکارچی[2] (شکل ۵) را خواهیم یافت که در عین این‌که جزو درخشنده‌ترین ستارگان آسمانند، با این‌حال قرمز رنگ دیده می‌شوند. برای تشریح این امر باید به توضیحات پیشین بازگردیم، آلفای شکارچی یک غول سرخ است که آخرین دوران حیاتش را سپری می‌کند. همان‌گونه که پیش از این بحث شد، غول‌های سرخ گلوله‌ای منبسط‌شونده و بسیار عظیم هستند که نور را از سطح وسیعشان منتشر می‌کنند. با افزایش سطح منتشرکننده نور، شدت نور و در پی آن شار نوری ستاره افزایش خواهد یافت، بنابراین قدر ستاره مقدار منفی‌تری می‌یابد. بنابراین غول‌های سرخ، اگرچه ذاتاً فوتون‌های پرانرژی تولید نمی‌کنند، اما از سوی دیگر سطح وسیعشان موجب افزایش تابندگی‌شان می‌شود و در نتیجه درخشان به‌نظر می‌رسند. به‌عنوان مثال آلفای شکارچی و پای شکارچی را به‌عنوان دو ستاره درخشانِ سحابی جبار در نظر بگیرید، آلفای شکارچی شعاعی معادل ۹۵۰ برابر خورشید دارد [۱۳].

شکل ۵- آلفای شکارچی، ستاره درخشان مشخص در شکل که علی‌رغم سبک بودن، این‌گونه درخشنده به‌نظر می‌رسد [۱۴].

و شعاع پای شکارچی حدود ۷۴ برابر خورشید ماست. پای شکارچی برخلاف آلفای شکارچی، ستاره‌ای آبی‌رنگ و ذاتاً تابنده است، با این حال سطح وسیع آلفای شکارچی موجب می‌شود هر دو ستاره با درخشندگی زیاد (قدرهای ظاهری به‌ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۵۸) مشاهده شوند. بنابراین سطح منتشرکننده نور، عاملی موثر در ارزیابی تابندگی ستاره به‌شمار می‌رود [۳]. از سوی دیگر آن‌چه موجب می‌شود ستاره‌ای از روی زمین درخشان به‌نظر برسد، قدر ظاهری آن است. بنابراین فاصله ستاره تا زمین، عامل مهمی در اندازه‌گیری درخشندگی ستاره به‌وسیله مشاهده‌گر زمینی است. آلفا قنطورس[3]، ستاره‌ای دوقلو که سومین ستاره پرنور آسمان شب به‌شمار می‌رود، با تهرنگ زرد و نارجی دیده می‌شود. بر طبق توضیحات پیشین، ستارگان زرد، نارنجی و قرمز ذاتاً سبک و کم‌نورند. در حقیقت علت درخشندگی زیاد این ستاره، فاصله نزدیک آن تا زمین و در پی آن قدر ظاهری کوچک آن است، در حالی که قدر مطلقش بسیار بزرگ‌تر است. بنابراین علاوه بر دمای ستاره که اثر مستقیم در کاهش طول موج انتشاری و افزایش تابندگی آن دارد، سطح منتشرکننده نور و هم‌چنین فاصله ستاره تا زمین، عوامل بسیار مهمی در ارزیابی درخشندگی و رنگ ستاره از زمین‌اند [۳]. ستاره‌شناسان و اخترفیزیک‌دانان دسته‌بندی‌های متفاوتی از ستارگان ارائه می‌کنند که بر اساس دمای سطحی یا تابندگی آن‌ها تبیین شده‌اند. به‌عنوان مثال ستارگان رشته اصلی در رده‌بندی هاوارد به دسته‌های O, B, A, F, G, K, M تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به عامل دما و تابندگی و ویژگی‌های طیفی به‌عنوان مبنای دسته‌بندی، طبیعی است که در پی آن رنگ ستارگان نیز در این دسته‌بندی نظم می‌یابد. با دقت در جدول ۱، رابطه میان عوامل اثرگذار در رنگ ستارگان بهتر درک می‌شود [۱۱، ۱۵].

۲-۴- نمارِ رنگ

واژه شاخصِ رنگ[4] برای متخصصین رنگ مفهومی بسیار پرکاربرد و آشناست:کتابی ۵ جلدی حاوی فام، نام عمومی و تجاری، ویژگی‌ها، ساختار، ثبات‌ها و سایر مشخّصات مهمّ مواد رنگی یعنی رنگ‌دانه‌ها[5] و رنگزاها[6] که سال‌ها مورد استفاده متخصصین رنگ قرار گرفته‌است. اما در نجوم و کیهان‌شناسی، با شنیدن این نام آن‌چه به ذهن متبادر می‌شود متفاوت است. در دانش نجوم نمار رنگ[7] معیار اصلی ستاره‌شناسان برای ارزیابی رنگ یک ستاره است [۸]. به بیان ابتدایی، نمار رنگ تفاوت قدر ستارگان در طول موج‌های متفاوت است. برای اندازه‌گیری نمار رنگ ستاره، عموماً از سیستم نورسنجی UBV استفاده می‌شود. به‌این‌منظور به‌وسیله‌ی سه فیلتر فرابنفش[8]، آبی[9] و مرئی[10] که اجازه عبور نور در نواحی ذکر شده را می‌دهند، شار نوری ستاره به صورت مجزا اندازه‌گیری و به‌واسطه آن قدر ستاره محاسبه می‌شود. اختلاف قدر اندازه‌گیری شده با دو فیلتر متفاوت، به‌عنوان مثال آبی و مرئی (B-V) یا ماوراء بنفش و آبی (U-B) نمار رنگ ستاره خوانده می‌شود. طبیعتاً با توجه به روابط مربوط به تعیین قدر ستاره، نمار رنگ به‌صورت رابطه ۷ نگاشته می‌شود.

$$B - V = -2.5\log\left(\frac{F_B}{F_V}\right) \qquad (۷)$$

[1] Arcturus
[2] Betelgeuse
[3] Alpha Centauri

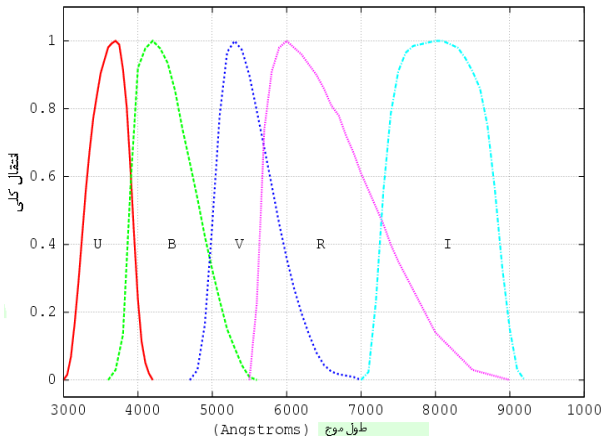
[4] Color index
[5] Pigments
[6] Dyes
[7] برخلاق دانش رنگ، ترجمه مصطلح واژه color index در دانش نجوم ((نمار رنگ)) است.
[8] Ultra violet
[9] Blue
[10] Visible

جدول ۱ - دسته‌بندی ستارگان و رابطه آن با رنگ آنها [۸، ۱۵].

نام ستاره	شدت روشنایی نسبت به خورشید	جرم خورشیدی	رنگ ظاهری	رنگ قراردادی	دمای حدودی (کلوین)	کلاس
۱۰ لاسرتا[1]	۱۴۰۰۰۰۰	۶۴	آبی	آبی	۳۰۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰	O
پای شکارچی[2] سماک اعزل[3]	۲۰۰۰۰	۱۸	سفید آبی	آبی متمایل به سفید	۱۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰	B
شعرای یمانی(شباهنک)[4] نسر واقع[5]	۴۰	۳/۱	سفید	سفید	۷۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰	A
سهیل[6] شعرای شامی[7]	۶	۱/۷	سفید	زرد متمایل به سفید	۶۰۰۰ تا ۷۵۰۰	F
خورشید[8] عیوق[9]	۱/۲	۱/۱	زرد متمایل به سفید	زرد	۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰	G
سماک رامح[10] آلفا گاو[11]	۰/۴	۰/۸	زرد نارنجی	نارنجی	۳۵۰۰ تا ۵۰۰۰	K
آلفا شکارچی[12] قلب عقرب[13]	۰/۰۴	۰/۴	زرد قرمز	قرمز	۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰	M

[1] 10 lacerta
[2] Rigel
[3] Spica
[4] Sirius
[5] Vega
[6] Conopus
[7] Procyon
[8] Sun
[9] Capella
[10] Arcturus
[11] Aldebaran
[12] Betelgeuse
[13] Antares

لازم به‌توضیح است که در اصل می‌توان از ۵ فیلتر و سیستم UBVRI مطابق شکل ۶ استفاده نمود، اما به‌سبب رواج بیشتر و کاربرد فراوان سه فیلتر مورد بحث، استفاده از سیستم UBV در مراجع نجومی متداول‌تر است [۳]. با تطبیق مباحث مربوط به نمار رنگ با دانسته‌های پیشین، اینگونه استنباط می‌شود که هرچه عدد مربوط به نمار رنگ کوچک‌تر باشد، به‌معنی نور بیشتر ستاره در ناحیه طول موج‌های کوچک‌تر و در پی آن دمای بیشتر سطح ستاره است. یکی از اطلاعاتی که در مورد ستاره‌ای خاص، در منابع نجومی ذکر می‌گردد عدد مربوط به نمار رنگ، عموماً به دو صورت U-B و B-V است.

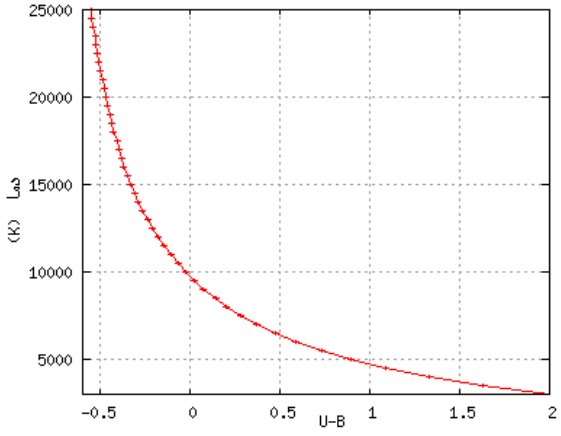


شکل ۶- سیستم نورسنجی UBVRI. در این نوع نور سنجی از ۵ فیلتر با بیشینه جذب در نواحی فرابنفش، آبی، سبز، قرمز و فروسرخ استفاده می‌شود [۱۶].

۲-۵- چرا رنگ ستارگان را اندازه‌گیری می‌کنیم؟

پرسش مهمی که در مورد مباحث مربوط به نمار رنگ و به‌طور کلی مفاهیم رنگی کیهان مطرح می‌شود، چرایی تأکید بر اندازه‌گیری رنگ ستارگان است.

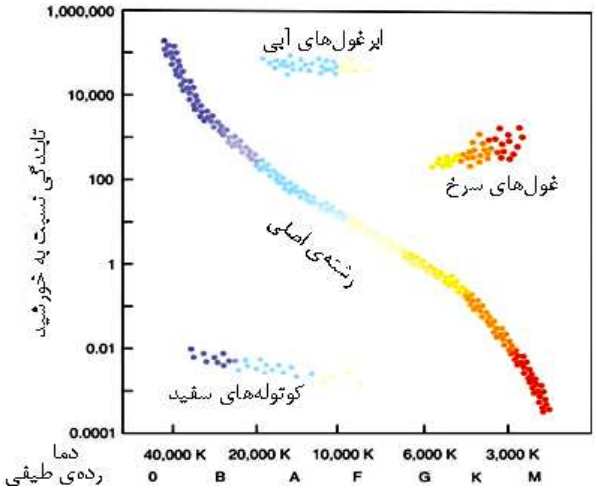
پاسخ به این پرسش را با مثالی ساده آغاز می‌کنیم و سپس در طول توضیح مفاهیم بعدی، درک کامل‌تری از این کاربردها شکل می‌گیرد. فرض کنید در نظر داریم حدود دمای ستاره‌ای را بیابیم. نخستین گزینه پیش رویمان طیف‌سنجی از آن خواهد بود. طیف‌نگاری از ستارگان انواع و روش‌های متفاوتی دارد. در یک طیف‌نمای منشوری ساده، با عبور نور ستاره از شکافی ریز و سپس موازی ساختن پرتوهای نور به‌وسیله عدسی و در نهایت عبور آن از منشور، نور به رنگ‌های مختلف تجزیه می‌شود و طیف رنگی به‌دست می‌آید. بر روی طیف حاصل از این فرآیند، خط‌های تاریکی که به خطوط فرانهوفر موسوم‌اند مشاهده می‌شود. خطوط تاریک میان طیف، ناشی از جذب بخش‌های مشخصی از طیف نوری ستاره به‌وسیله عناصر و مولکول‌های بر سر راه نور است. بنابراین با مقایسه خطوط موجود بر طیف جذبی ستاره با خطوط اندازه‌گیری شده عناصر مختلف در آزمایشگاه، اطلاعات ارزشمندی به‌دست می‌آید. علاوه بر طیف جذبی، طیف‌های نشری (خطوط روشن بر زمینه تاریک) و هم‌چنین طیف پیوسته از انواع دیگر طیف‌ها به شمار می‌آیند [۱۱]. با مشاهده طیف ستاره و اندازه‌گیری انرژی گرمایی آن در هر طول موج قادر به رسم منحنی توزیع انرژی طیفی[1] آن خواهیم بود. هم‌چنین با مشخص کردن طول موج بیشینه نشر و به‌کار بردن رابطه وین (رابطه ۲) می‌توانیم دمای ستاره را اندازه‌گیری کنیم. از سوی دیگر اندازه‌گیری سطح زیر منحنی SPD روش دیگری برای تعیین دمای ستاره است [۱۱]. اگر چه طیف‌نگاری از ستاره روشی دقیق و مؤثر برای اندازه‌گیری دمای ستارگان (و حتی به‌دست‌آوردن اطلاعات مفید دیگر در مورد آنان) است، با این‌حال زمان‌بر و گران بودن این روش ما را به اندیشه یافتن روشی متفاوت می‌اندازد. گزینه ساده‌تر و سریع‌تری که پاسخ‌گوی نیاز ما خواهد بود، به‌کارگیری نمار رنگ ستاره است. با عکس‌برداری از ستاره یا ستارگان مورد نظر به وسیله دو فیلتر متفاوت و مقایسه دو عکس و محاسبه نمار رنگ با در نظر داشتن روابط تجربی موجود، چنانچه در شکل ۷ مشاهده می‌شود قادر خواهیم بود دمای سطحی ستاره را محاسبه کنیم [۸]. با به‌کارگیری این فرآیند، دمای حدودی ستاره‌ی مورد نظر را در زمانی کوتاه‌تر از سایر روش‌ها خواهیم یافت. از سوی دیگر با استفاده از این روش و با به‌کارگیری دوربینی با میدان وسیع قادر خواهیم بود در زمانی کوتاه، دمای سطح هزاران ستاره را اندازه‌گیری کنیم [۸]. با این وجود تخمین دمای سطح ستاره با روش رنگ‌سنجی، کاملاً دقیق نخواهد بود. نور دریافتی ما از ستاره، با نور خروجی از ستاره در مبدأ، با توجه به عوامل مختلفی که در ادامه شرح داده می‌شود کاملاً یکسان نیست. بنابراین برای تخمین حدودی دمای گروهی از ستارگان و هم‌چنین قیاس میان دمای ستارگان متفاوت، رنگ‌سنجی روشی سریع و کارا خواهد بود اما اگر مشغول مطالعه بر روی ستاره‌ای خاص هستیم و دقت در تعیین دمای آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بهتر است روش دیگری هم‌چون طیف‌سنجی را به‌کار ببندیم [۸].



شکل ۷- رابطه میان دمای ستاره و نمار رنگ آن [۱۷].

۲-۶- نمودار هرتزاسپرانگ-راسل

در اوایل قرن نوزدهم میلادی، هرتزاسپرانگ از دانمارک و راسل از آمریکا به‌طور مستقل به رسم نمودار دمای ستارگان در مقابل تابندگی‌شان پرداختند، این نمودار که اکنون به نمودار هرتزاسپرانگ-راسل[2] شهرت دارد از جمله پرکاربردترین ابزار اخترفیزیک‌دانان در دسته‌بندی ستارگان و پراکندگی آنها به‌شمار می‌رود (شکل ۸).



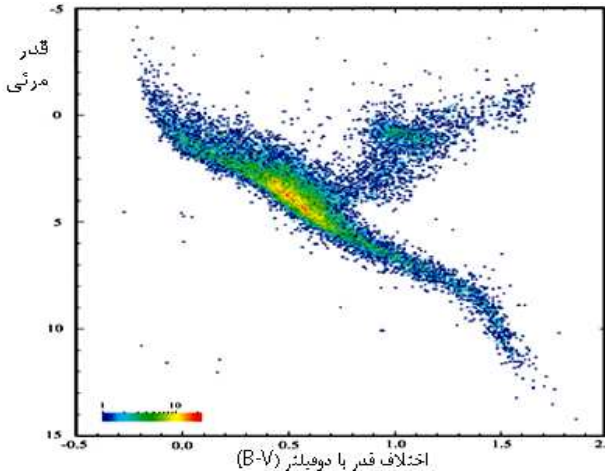
شکل ۸- نمودار هرتزاسپرانگ-راسل [۸].

محور افقی این نمودار، معرف دمای ستارگان است و از راست به چپ افزایش می‌یابد و محور عمودی تابندگی ستاره را نمایش می‌دهد. در

[1] Spectral Power Distribution

[2] Hertzsprung-Russell

شکل ۸، تابندگی در قیاس با خورشید نشان داده شده‌است، هر چند در این مورد از قدر مطلق نیز استفاده می‌شود. اگر به‌جای دما، نمار رنگ را بر محور افقی نمودار قرار دهیم، نمودار رنگ-قدر به‌دست می‌آید (شکل ۹) [۸]. بزرگترین قسمت نمودار هرتزاسپرانگ-راسل (شکل ۸) که به شکل S نمایان است، ستارگان رشته‌ی اصلی را نشان می‌دهد. این قسمت که از ستارگان بسیار تابنده (دسته O) در گوشه‌ی بالا و سمت چپ تصویر آغاز و به ستارگان کم‌نور قرمزرنگ (کوتوله‌های سرخ) در پایین نمودار ختم می‌شود، بیش از ۸۰٪ کلّ ستارگان را دربر می‌گیرد. هم‌چنین غول‌های سرخ، کوتوله‌های سفید و ابرغول‌ها به‌عنوان ستارگان غیر رشته‌ی اصلی در نمودار مشخّص‌اند. به‌عنوان مثال، پای شکارچی در گوشه‌ی بالای نمودار و آلفای شکارچی در قسمت بالا و راست نمودار قرار دارند [۸]. از سوی دیگر، با قرار دادن نمار رنگ با دو فیلتر مشخص در یک محور و نمار رنگ حاصل از دو فیلتر متفاوت بر محور دیگر منحنی رنگ-رنگ رسم می‌شود که کاربردهای فراوانی از جمله در ستاره‌شناسی فروسرخ، مطالعه شکل‌گیری ستارگان [۱۸]، نورسنجی، مطالعه طول عمر ستارگان جوان [۱۹] و غیره دارد.



شکل ۹- نمودار پراکندگی رنگ-قدرِ ۱۶۶۳۱ ستاره از تابنده‌ترین ستارگان آسمان. هر رنگ نماینده تعداد معینی از ستارگان است (قسمت پایین تصویر) [۸].

۳- نور در مسیر

پرسش مهم دیگری که حین بررسی پدیده‌های رنگی کیهان با آن مواجه خواهیم بود این است که آیا نورها و رنگ‌ها به همان شکلی که در منبعشان ظاهر می‌شوند به ما می‌رسند یا در مسیرشان دست‌خوش تغییراتی خواهند شد؟ اگر در مسیر رسیدن نور به زمین تغییراتی رخ می‌دهد، آیا میزان این تغییرات قابل محاسبه است؟ آیا محاسبه میزان این دگرگونی‌ها، اطلاعاتی را از مسیر حرکت نور در طول مسیرش در اختیار ما قرار می‌دهد؟ در این قسمت تلاش خواهیم‌کرد به این پرسش‌ها و ابهامات موجود دیگر در این زمینه پاسخ دهیم. اساساً اجسام چهار رفتار مختلف هنگام برخورد نور بروز می‌دهند، انعکاس سطحی، جذب، انتشار و انتقال. آن‌چه سبب پشت‌پوشی[1] اجسام می‌شود پدیده انتشار است. نور در اثر برخورد با ذرات مختلف نظیر رنگ‌دانه‌ها و یا غبارهای موجود در مسیر عبور متفرق می‌شود و پدیده انتشار رخ می‌دهد. ضریب شکست این ذرات و ابعاد آن‌ها عوامل موثر در چگونگی و میزان این انتشار به‌شمار می‌روند. نکته مهم در مورد این پدیده، وابستگی آن به‌طول موج است. ضریب شکست اجسام تابعی از طول موج نور تابیده شده است و هر چه طول موجِ نورِ برخوردی کمتر باشد، بیشتر شکسته خواهد شد. بنابراین در میان طول موج‌های متفاوت نور مرئی، نور آبی بیشترین شکست و نور قرمز کمترینِ آن را خواهد داشت [۱]. اگر فضای میان‌ستاره‌ای کاملاً عاری از ماده یا اصطلاحاً خلا کامل باشد، قاعدتاً نور منتشر شده در منبع و نور رسیده به زمین کاملاً یکسان خواهند بود، در غیر این صورت مواد موجود در این مسیر با توجه به رفتار نوریشان، بر آن تأثیر خواهند گذاشت [۸]. در واقعیت فاصله بین ستارگان کاملاً خالی نیست و از موادی که غبار میان ستاره‌ای نامیده می‌شوند پوشیده شده‌است. این غبارهای میان‌ستاره‌ای رفتار جذب و انتشار را در برابر نور عبوری از خویش نشان می‌دهند. با بازگشت به توضیحات پیشین در خواهیم یافت میزان این جذب و انتشار برای تمامی طول‌موج‌های نور یکسان نخواهد بود. بنابراین در مسیر رسیدن نور از ستاره به زمین، بخشی از طیف آن به‌واسطه انتشار و یا جذب به مقصدِ زمین نخواهد رسید و دقت ما را در محاسبه قدر و یا رنگ و دمای ستارگان کاهش خواهد داد. از این‌روی کمیتی به‌نام خاموشیِ میان‌ستاره‌ای[2] تعریف می‌شود که میزان این نورِ به‌مقصد نرسیده (زمین) را مشخّص می‌سازد. میزان این خاموشی به‌صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود [۳, ۸].

$$A = (2.5\log e)\tau \qquad (۸)$$

در رابطه ۸، τ بیانگر ضخامت نوری است که به‌صورت رابطه ۹ نگاشته می‌شود:

$$\tau = \int_0^r \alpha \, dr \qquad (۹)$$

در رابطه ۹، α میزان شفافیت را مشخص می‌کند.

با توجه به روابط استخراج‌شده در این بخش، اکنون می‌توانیم رابطه محاسبه قدر مطلق (رابطه ۴) را به‌شکل رابطه ۱۰ تصحیح کنیم.

$$m - M = 5\log\left(\frac{r}{pc}\right) + A \qquad (۱۰)$$

در رابطه ۱۰، pc یکای عدد و نمایانگر پارسک است.

بنابراین محاسبه خاموشی، افزایش دقت در محاسبات مربوط به قدر و رنگ ستارگان را در پی خواهد داشت [۳].

[1] Opaque
[2] Interstellar extinction

۳-۱- رنگ اضافه و سرخ‌شوندگی میان‌ستاره‌ای[1]

می‌دانیم که نور آبی بیشتر از نور قرمز پراکنده می‌شود، بنابراین نور قرمز بیشتری مسیر خویش به‌سمت زمین را به مقصد می‌رساند. از سوی دیگر با توجه به ماهیت ذرات میان‌ستاره‌ای- که با توجه به هدف نگارش متن، از توضیح در مورد آن خودداری می‌کنیم-، جذب آن‌ها در طول موج‌های کوتاه‌تر بیشتر خواهد بود بنابراین باز هم شانس موفقیت نور قرمز در به‌پایان رسانیدن سفرش به‌سوی زمین فزونی خواهد یافت. این اثر، سرخ‌شوندگی میان‌ستاره‌ای نام دارد [۱, ۳].

سرخ‌شوندگی میان‌ستاره‌ای نیز بر نمار رنگ ستاره اثر مستقیم خواهد داشت و می‌بایست در محاسبات مربوط به این بخش لحاظ شود.

اگر قدر ستاره را با فیلتر مرئی اندازه‌گیری کنیم، رابطه ۱۱ به‌صورت زیر حاصل می‌شود [۳].

$$V = M_{v+5\log\frac{r}{10pc}} + A_v \qquad (11)$$

در این رابطه M_v و A_v به ترتیب، قدر مطلق ستاره در محدوده مرئی و خاموشی در این ناحیه هستند. اگر رابطه ۱۱ را برای فیلتر آبی بازنویسی کنیم، B-V به صورت رابطه ۱۲ به‌دست می‌آید.

$$B - V = M_B - M_v + A_B - A_v \qquad (12)$$

با نام‌گذاری‌های جدید در رابطه ۱۲، رابطه ۱۳ به‌صورت زیر نگاشته می‌شود.

$$B - V = (B - V)_0 + E_{B-V} \qquad (13)$$

در رابطه ۱۳، $(B-V)_0$ نمار رنگ ذاتی ستاره و E_{B-V} رنگ اضافه یا همان سرخ‌شوندگی میان‌ستاره‌ای است [۳].

هم‌چنین مطالعات نشان می‌دهند نسبت دو کمیت خاموشی در محدوده مرئی و سرخ‌شوندگی میان‌ستاره‌ای تقریباً ثابت است و به‌صورت رابطه ۱۴ وجود دارد.

$$R = \frac{A_V}{E_{B-V}} \approx 3 \qquad (14)$$

مقدار R در رابطه ۱۴ با توجه به جهت دید، و در نقاط مختلف کیهان، ممکن است بین ۲/۵ تا ۶ نوسان کند [۳].

بنابراین دانستن رنگ اضافه، در محاسبه خاموشی ناحیه مرئی و متعاقباً فاصله ستاره تا زمین (با به‌کارگیری رابطه ۱۱) مفید خواهد بود [۳]. از سوی دیگر جو زمین، خود مانعی بر سر راه فوتون‌های نور خواهد بود و طیف عبوری از خویش را دستخوش تغییراتی خواهد کرد که پرداختن به آن خارج از بحث حاضر است. همچنین مطالعات و بررسی‌های بسیار زیادی در مورد خاموشی و روش محاسبه آن، غبارهای میان‌ستاره‌ای در نقاط مختلف کیهان و کهکشان راهِ شیری، جهت دید، ابرهای سیاه و غیره صورت گرفته‌است که با توجه به هدف ما در توضیح مختصر اثر سرخ‌شوندگی و تأثیر آن بر روابط مربوط به قدر ستارگان، از شرح بیشتر آن‌ها صرف نظر می‌کنیم [۳]. اما پیش از بررسی پدیده‌های رنگی بعدی در کیهان، نخست لازم است به توضیحِ یکی از مهم‌ترین پدیده‌های کیهان‌شناسی یعنی انبساط جهان بپردازیم.

۳-۲- جهانِ در حال انبساط

در اوایل دهه سوم قرن بیستم میلادی، ادوین هابل[2]، فیزیک‌دان و اخترشناس برجسته آمریکایی دریافت که اجرام کیهانی در حال دورشدن از یکدیگرند و سرعت این دور شدن با فاصله میان آنها رابطه مستقیم دارد، پدیده‌ای که پس از آن به قانون هابل شهرت یافت. در حقیقت با افزایش فاصله میان دو جرم کیهانی، سرعت دور شدن آن دو نیز افزایش می‌یابد. برای درک بهتر این جمله می‌توانید کیکی کشمشی را تصور کنید که در آن کشمش‌ها با فاصله معینی از یکدیگر قرار گرفته‌اند. اکنون کیک را به صورت متورم و منبسط‌شده در ذهنتان مجسم سازید، خواهید دید که کشمش‌های درون کیک از یکدیگر دور می‌شوند و فاصله میان کشمش‌هایی که از هم دورترند بیشتر افزایش خواهد یافت. قانون هابل به‌زبان ساده با رابطه ۱۵ بیان می‌شود [۲, ۳].

$$V = H_0 D \qquad (15)$$

در رابطه ۱۵، D فاصله دو ستاره از یکدیگر و V سرعت دور شدن آن‌هاست. در این معادله ترمِ H_0 ثابت هابل نامیده می‌شود. از زمان انتشار قانون هابل، کوشش‌های فراوانی در راستای اندازه‌گیری دقیق ثابت هابل انجام گرفته‌است که منجر به شکل‌گیری نتاج گوناگونی شده‌است. این نتایج عموماً در محدوده میان ۶۵ تا ۷۵ $km.s^{-1}.Mpc^{-1}$ قرار گرفته‌اند. یکای این ثابت نشانگر سرعت دور شدن بر حسب کیلومتر بر ثانیه در فاصله ۱ مگا پارسکی است [۳].

در مورد انبساط کیهان، حدود یک قرن است که بحث‌ها و نظریه‌های متفاوتی در میان کیهان‌شناسان جریان دارد که با توجه به موضوع اصلی بحثمان از شرح بیشتر آنها صرف نظر می‌کنیم اما علاقه‌مندان می‌توانند با جست‌وجو در زمینه انبساط متریک، قانون هابل و جهان درحال انبساط، اطلاعات مفیدی در این زمینه کسب کنند. هدف ما از ارائه توضیحات مختصر در مورد انبساط عالم و چگونگی آن، درک کامل‌تر و روشن‌تر از یکی دیگر از پدیده‌های رنگی کیهان، یعنی انتقال سرخ بود.

۳-۳- انتقال سرخ[3]

در اواسط قرن نوزدهم میلادی کریستین داپلر[4]، فیزیک‌دان برجسته

[1] Interstellar reddening

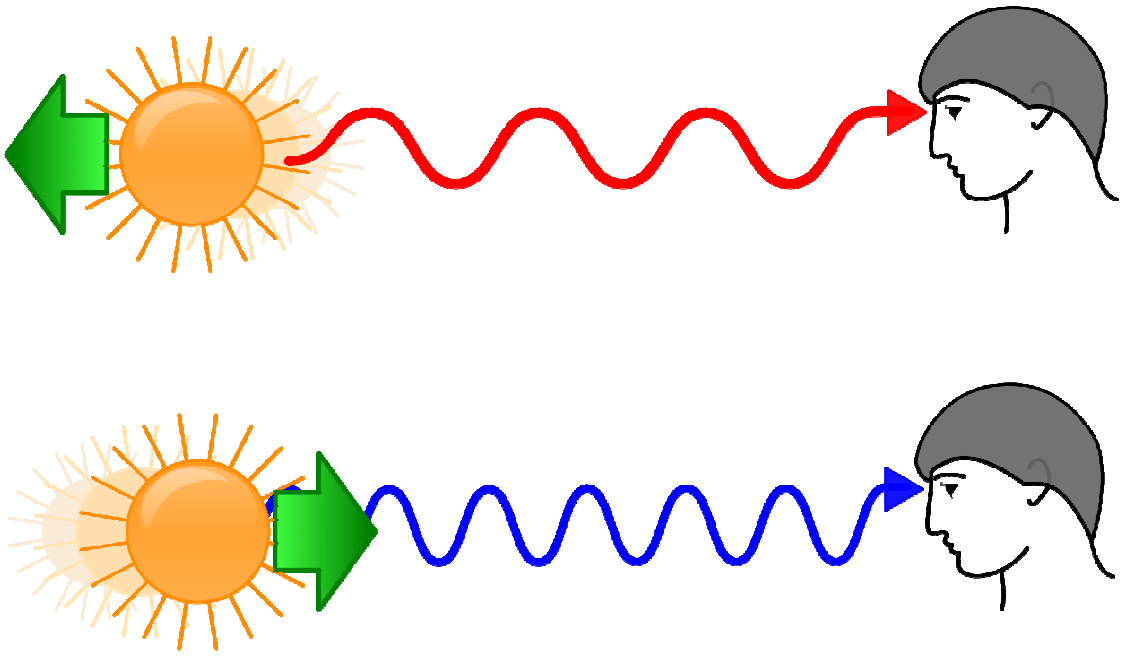
[2] Edwin Hubble
[3] Red shift
[4] Christian Doppler

اتریشی موفق به کشف و توضیح پدیده‌ای شد که بعدها اثرداپلر[1] نام گرفت. به‌بیان ساده اثر داپلر به تغییر فرکانس دریافتی یک موج، در اثر سرعت نسبی منبع و مشاهده‌کننده گفته می‌شود. در حقیقت اگر منبع موج و گیرنده آن به یک‌دیگر نزدیک شوند، فرکانس دریافتی موج افزایش می‌یابد و عکسِ آن، اگر منبع و گیرنده از یک‌دیگر دور شوند کاهش فرکانسِ دریافتی به‌وقوع می‌پیوندد. هم‌چنین داپلر دریافت که این پدیده در مورد تمامی امواج اعم از صوتی و الکترومغناطیس صادق است (شکل ۱۰) [۲۰]. برای درک بهتر این پدیده می‌توان به صدای آژیرِ آمبولانسی که از دور به سمت ما حرکت می‌کند دقت کرد، با نزدیک شدن آمبولانس به ما، صدا به سمت زیر شدن پیش می‌رود و پس از عبور از ما، صدای آژیر مجدداً به سمت بم شدن به‌گوش خواهد رسید. با همین استدلال، در مورد امواج نوری، اگر منبعِ نور به‌ما نزدیک شود، نوری که دریافت خواهیم کرد نسبت به زمان انتشار، طول موج کوتاه‌تری خواهد داشت یعنی آبی‌تر خواهد بود و عکسِ آن، اگر منبع از ما دور شود یا ما در جهت گریز از آن پیش رویم، نور دریافتی را قرمزتر خواهیم یافت.

[1] Doppler effect

نخستین گمانه‌زنی‌های علمی در مورد رنگ ستارگان با تبیین نظریه داپلر شکل گرفت که بر اساس آن رنگ ستارگان، تابعی از سرعت حرکت آن‌ها شناخته می‌شد. با این‌حال امروزه با توجه به درک کامل‌تر از رنگ ستارگان و رابطه میان دما و رنگ، فرض مذکور نادرست ارزیابی می‌شود، اما آیا حرکت نسبی ستارگان تأثیری بر رنگ دریافتی از آنان خواهد گذاشت؟ [۲, ۳]

همان‌گونه که در بخش انبساط کیهان بحث شد، اجرام کیهانی پیوسته در حال دور شدن از یکدیگرند. بنابراین ستارگان نسبت به زمین حرکتی در جهتِ دور شدن دارند و چنان‌چه شرح داده‌شد، سرعت این دور شدن با افزایش فاصله آنها افزایش می‌یابد. بنابراین نوری که از این ستارگان دریافت می‌کنیم، نسبت به زمان انتشارشان قرمزتر مشاهده می‌شوند این پدیده انتقال سرخ نام دارد. یکی از عواملی که هابل را در ارائه قانون مربوط به انبساط کیهان یاری نمود، اندازه‌گیری طیف انتقال سُرخ اجرام کیهانی بود. اما چگونه می‌توان انتقال سرخ این اجرام را اندازه‌گیری کرد و اساساً این اندازه‌گیری تا چه اندازه می‌تواند اخترشناسان را در راستای به‌دست آوردن اطلاعات بیشتر در مورد ستاره یاری رساند؟ [۳]



شکل ۱۰- اثر داپلر. اگر منبع نوری و مشاهده‌کننده به یکدیگر نزدیک شوند، طول موج دریافتیِ مشاهده‌گر کاهش خواهد یافت و هم‌چنین به‌طور عکس، اگر منبع نوری و مشاهده‌کننده از یکدیگر دور شوند، طول موج دریافتیِ مشاهده‌گر افزایش خواهد یافت [۲۰].

برای انجام محاسبات مربوط به انتقال سرخ ستارگان، کمّیّتی بی‌بعد به‌نام Z، به‌شکل رابطه ۱۶ تعریف می‌شود.

$$Z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{emit}}{\lambda_{emit}} \quad (۱۶)$$

در رابطه ۱۶، λ_{obs} و λ_{emit} به‌ترتیب، طول موج دریافتیِ مشاهده‌کننده و طول موج منتشر شده در منبع را نشان می‌دهند [۳].

در مورد سرعت‌های بسیار کوچک‌تر از سرعت نور، Z با استفاده از رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود.

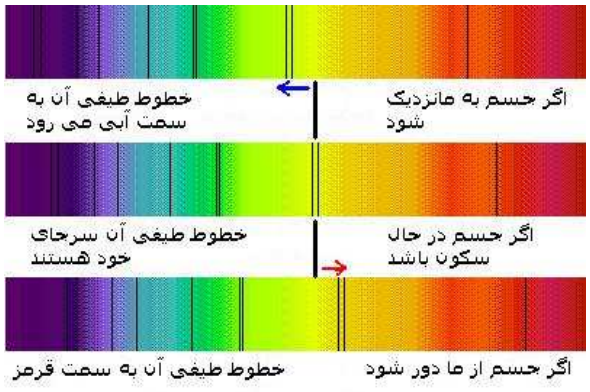
$$Z \approx \frac{V}{C} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

در این رابطه، V سرعت جسم نسبت به ناظر ساکن و C سرعت نور است [۲۱]. اما در مورد اجرامی که با سرعتی نزدیک به سرعت نور حرکت می‌کنند، با توجه به اتساع زمان پیش‌بینی‌شده به‌وسیله نسبیت خاص، Z از مقدار محاسبه‌شده در رابطه ۱۷ منحرف می‌شود. اما با دقت در رابطه ۱۵ درخواهیم یافت که در زندگی معمول با چنین پدیده‌ای مواجه نخواهیم بود. در حقیقت سرعت‌هایی که در زندگی زمینی با آن‌ها رو در رو هستیم در مقیاس داپلر ناچیزند.بر طبق محاسبات داپلر، با فرض این‌که منبع نوری که در زمین داریم با سرعت ۱۰۰۰۰ km/h در حال حرکت باشد، طول موج ۵۰۰ nm، تنها ۰/۰۰۴ nm تغییر خواهد یافت که بسیار کوچک‌تر از حداقل اختلافی است که چشم ما به‌آن حساس است.

از این‌روی آشکار است که بررسی پدیده‌هایی همچون اثر داپلر که در حوزه سرعت‌ها و میدان‌های عظیم رخ می‌نمایند در صنایع وابسته به رنگ اهمیت چندانی نداشته باشند، درحالی که بر خلاف آن، بررسی انتقال سرخ از جمله پایه‌ای‌ترین فعالیت‌های اخترشناسان است. لازم به توضیح است که حساسیت چشم انسان و حداقل اختلافِ طول موج قابل درک برای آن، وابسته به طول موج نور تابیده شده است. بیشترین حساسیت چشم مربوط به طول موج‌های بین ۵۰۰ تا ۶۰۰ nm و محدوده رنگ سبز است که در این محدوده نیز اختلاف طول موج قابل درک برای چشم انسان بیش از ۱ nm است [۲۲].

هم‌چنین با طیف‌نگاری از ستاره و مقایسه طیف جذبی یا نشری یک عنصر آن (همچون هیدروژن) با طیفِ اندازه‌گیری شده از عنصر زمینی در آزمایشگاه‌ها، می‌توان میزان انتقال خطوط جذبی و نتیجتاً انتقال سرخ ستارگان را اندازه‌گیری کرد (شکل ۱۱) [۲]

از سوی دیگر یکی از نتایج نسبیت عام اینشتین در بررسی میدان‌های گرانشی بزرگ، رابطه انتقال سرخ گرانشی است. انتقال سرخ گرانشی، حاصل از تأثیر میدان‌های گرانشی بزرگ بر طول موج امواج است. بر اساس این پدیده، طول موج نور هنگام خروج از یک میدان گرانشی بزرگ و ورود به میدان گرانشی کوچک‌تر افزایش خواهد یافت و بالعکس، هنگام ورود به میدان گرانشی بزرگ‌تر، کاهش خواهد یافت. بنابراین نور منتشرشده از منابع نوری، یعنی ستارگان، که عمدتاً جرم بیشتری از زمین دارند و منجر به خمیدگی بیشتر فضا-زمان می‌گردند، با کاهش انرژی نسبت به زمان انتشار، قرمزتر به ما می‌رسند. مسلماً اهمیت انتقال سرخ در نزدیکی میدان‌های گرانشی بزرگ (ستارگانِ آبی‌تر، ستارگان نوترونی و غیره) دوچندان است. با محاسبه انتقال سرخ می‌توان اطلاعات مفیدی از سرعت نسبی اجرام کیهانی، فاصله ستارگان و میدان گرانشی آنها به‌دست آورد و با استفاده از روابط انتقال سرخِ متریک، گام‌های موثری در تخمین عمر ستارگان برداشته می‌شود [۲۴]. از سوی دیگر، انتقال سرخ گرانشی و روابط مربوط به آن، نقش تعیین‌کننده‌ای در راستای کشف ماهیت ستاره‌های نوترونی بازی می‌کنند. همان‌گونه که پیش از این توضیح داده‌شد، ستاره‌های نوترونی اجرامی بسیار چگالند که میدان گرانشی آنها اثر انتقال سرخِ قابل توجهی بر طیف نور خواهد داشت. اندازه‌گیری این انتقال سرخ گام ارزشمندی در راستای محاسبه جرم، شعاع، فشار و متعاقباً سایر عوامل دخیل در ماهیتِ آن به‌شمار می‌رود [۲, ۸]



شکل ۱۱- تأثیر انتقال سرخ بر خطوط طیفی ستارگان [۲۲].

۳-۴- چرا کیهان تاریک است؟

گاهی تلاش در راستای پاسخ به پرسش‌های به‌ظاهر ساده و بدیهی می‌تواند به دست‌آوردهای بزرگی بیانجامد. یکی از این پرسش‌ها، چراییِ تاریکی آسمان است. برای پاسخ‌گویی به این پرسش می‌توان از سه‌عامل تأثیرگذار نام برد. نخست آن‌که، کم بودن چگالی ماده در کیهان سبب می‌شود نور به اندازه کافی منتشر نشود. همان‌طور که علت اصلی آبی بودن آسمان، پدیده انتشار (و در پی آن شکست بیشتر نور آبی) است، روشن بودن آن نیز تا حدودی متأثر از این پدیده است. به‌بیان ساده‌تر، عدم وجود ماده کافی بر سر راه نور ستارگان موجب انتشار کم نور می‌شود و طبیعتاً از یکی از دلایل تاریکی کیهان به‌شمار می‌رود. اثر این پدیده در مورد تاریکی آسمان سیارات فاقد جو، به خوبی قابل مشاهده‌است [۸].

اما پدیده انتشار پاسخ‌گوی پرسش جالب کپلر در این زمینه نیست. تصور کنید که در میان یک جنگل بزرگ و ظاهراً نامتناهی ایستاده‌اید، در چنین شرایطی شما تنه درختان را در تمام جهات و تا جایی که چشم‌تان کار می‌کند مشاهده می‌کنید و به‌هر سو که بنگرید ناگزیر به تنه یکی از

درختان خواهید رسید. در سال ۱۶۱۰ میلادی، کپلر با توجه به ایده کپرنیک و جهان نامتناهی، پرسش خود را چنین مطرح کرد که اگر کیهان به حد کافی بزرگ باشد، مشابه مثال جنگل، به هر طرف که بنگرید خط نگاه شما به یک ستاره برخورد می‌کند و با توجه به تابندگی ستارگان، می‌بایست در هر جهت، نوری از یک یا چند ستاره به چشم شما برسد و متعاقباً آسمان شب روشن باشد [۳].

پرسش کپلر در طول سالیان بعد، با بحث‌ها و پاسخ‌های گوناگونی روبه‌روشد که هیچ‌کدام به خوبی توجیه‌کننده کامل مسأله نبودند. به‌عنوان مثال هاینریش البرس[1]، نشان داد که ایده‌ی جهانِ ایستا و ساکن با تاریکی شب در تناقض است، این گزاره بعدها به (تناقض البرس) شهرت یافت. برخی دانشمندان وجود ابرهای جذب‌کننده نور در مسیر را سبب اصلی این تناقض می‌دانستند اما از آن‌جا که چنین فرضی به گرم شدن ابرهای مذکور و در پیِ آن نشر نور از خود آن‌ها می‌انجامد، نادرست به‌نظر می‌رسد [۳].

با انجام یک‌سری عملیات ریاضی ساده (که با توجه به هدف اصلی متن از پرداختن به آن چشم‌پوشی می‌کنیم) قادر خواهیم بود با توجه به چگالی ستارگان، وسعت جهان لازم برای روشن بودن آسمان و فرض کپلر را 10^{23} سال نوری محاسبه کنیم و با توجه به عمر کیهان، طبیعتاً نور هیچ ستاره‌ای در این فاصله به ما نمی‌رسد (توجه داشته‌باشید که اگر نور ستاره‌ای با فاصله 10^{23} سال نوری به ما برسد یعنی ما در حال مشاهده وضعیت 10^{23} سال گذشته آن هستیم در حالی که کیهانِ ما تنها ۱۴ میلیارد سال عمر دارد). بنابراین شاید یکی از پاسخ‌ها، جوان بودن کیهان برای روشنایی آسمان باشد. اما آیا این نکته به‌معنی روشنی تدریجی آسمان در آینده خواهد بود؟ پاسخ این پرسش منفی است چرا که عمر ستارگان -چنان‌چه پیش از این نیز شرح داده شد- محدود است و با گذشت زمان، ستارگان نزدیک‌تر به ما از بین می‌روند [۳]. اما سومین عامل مهم اثرگذار در این پدیده، فاصله میان ستارگان و انبساط کیهان است. همان‌گونه که در بخش ۱-۳ توضیح داده شد، جهان ما درحال انبساط است و اجرام کیهانی در حال دور شدن از یک‌دیگر هستند، می‌دانیم که شارّ نوری ستارگان وابسته به فاصله آن‌ها از زمین است و طبیعتاً این افزایش فاصله و اصطلاحاً دایره افق، عامل موثر دیگری در بحث تاریکی کیهان است. به بیان دیگر پاسخ اصلی تناقض البرس در این است که جهان ایستا نیست و ستارگان پیوسته از یک‌دیگر دور می‌شوند [۲۵].

۳-۵- شیرقهوه کیهانی[2]

در سال ۲۰۰۲ کارل گلازبروک[3] و ایوان بالدری[4]، در خلال تحقیقاتشان در مورد شکل‌گیری کهکشان‌ها، در قالب مقاله‌ای به ارائه‌ی رنگ کلّی کیهان پرداختند. به‌بیان بهتر، آن‌ها رنگ و طیف انتشاری ۲۰۰۰۰۰ کهکشان را مورد بررسی قرار دادند و رنگ کیهان را با فرض اختلاط افزایشی این انوارِ بی‌شمار محاسبه کردند. پس از آن برای نام‌گذاری این رنگ به بررسی پیشنهادات مردم پرداختند که در نهایت این رنگ، شیرقهوه‌ی کیهانی نام‌گذاری شد (شکل۱۲).کدِ شانزده‌شانزدهی این رنگ #FFF8E7 است [۲۶].

شکل ۱۲- شیر قهوه کیهانی، رنگ کلّی کیهان [۲۶].

۳-۶- رنگ در سیارات

در مورد شکل‌گیری سیارات و جزئیات آن، نظریه‌ای کاملاً قطعی و پذیرفته‌شده وجود ندارد، اما آن‌چه تا کنون مطرح بوده‌است، شکل‌گیری سیارات در بستر زمین‌های حاصل‌خیزِ اطراف ستارگان (صفحات سیاره‌ای) است. دیسک‌های گازی حاوی گرد و غبار کیهانی در قلب سحابی، حول نطفه ستاره گرد هم می‌آیند. مسیر پیچیده شکل‌گیری سیارات با متراکم‌شدن بخش‌های مختلف این دیسک آغاز می‌گردد و لخته‌هایی بزرگ و کوچک در حین چرخش به‌دور ستاره پدید می‌آیند. برخورد این اجرام با یکدیگر و اثرات پیچیده و متفاوت گرانشی، منجر به تشکیل پیش‌سیاره‌ها، و سیاره‌های بزرگ و کوچک می‌شود. گلوله‌های در ابتدا سوزانی که به سبب شدت برخوردها و فعالیت برخی عناصر رادیواکتیو همچون اورانیوم گرم شده بودند در مسیر چرخششان به دور ستاره، گرد و غبارا حول خود مجتمع ساختند و برخی از آنان دارای جو شدند [۲۷]. بحث در مورد جزئیات شکل‌گیری سیارات و داستان پیدایش عناصر مختلف حیات، بحثی طولانی و گاهی مبهم است که شرح آن تا همین اندازه اندک کافی به‌نظر می‌رسد. اکنون قصد داریم در مورد رنگ‌های متفاوت این سیارات و چرایی آنان بحث کنیم. آن‌چه مبرهن است، به‌سبب عدم وقوع هرگونه فعل و انفعالات هسته‌ای، سیارات منبع نور نیستند. آنها صرفاً بازتاباننده نور برخوردی به خویش‌اند. بنابراین روشنایی و رنگ سیارات تابعی از عوامل متفاوت هم‌چون میزان و درصد عناصر مختلف، وجود یا عدم وجود جو و یا ضریب بازتاب سیاره خواهد بود. ضریب بازتاب[5] بیانگر میزان نور بازتابیده شده از سیاره است و به‌طور دقیق‌تر نسبت نور بازتابیده شده از سیاره به نور تابیده شده به آن را مشخص می‌کند. به‌عنوان مثال ضریب بازتاب زمین، در مجموع ۰/۳۷ تا

[1] Heinrich Wilhelm Olbers
[2] Cosmic latte
[3] Karl Glazebrook
[4] Ivan Baldry
[5] Albedo

۰/۳۹ ارزیابی می‌شود. اقیانوس‌ها که بخش عظیمی از این کره را تشکیل می‌دهند در حدود ۳/۵٪ از نور تابیده شده به خویش را باز می‌تابانند (در جهت غیرِ آینه‌ای). ابرها ۷۸٪ از نور را بازتاب می‌دهند و در حدود ۵۰٪ از سطح زمین در هر لحظه به‌وسیله ابرها پوشیده شده‌است. اما زمین‌های خاکی، طیف متفاوتی را در بر می‌گیرند، جنگل‌ها ضریب بازتابی در حدود ۴/۳٪ دارند و پوشش‌های گیاهی دیگر ضریب بازتابی معادل ۰/۷ خواهند داشت. هم‌چنین بازتاب زمین‌های خاکی و خشک معادل با ۱۳٪ است [۳, ۱۷]. علاوه بر ضریب بازتاب، جو سیارات عامل موثر دیگری در ارزیابی رنگ آن‌هاست. به‌عنوان مثال در مورد زهره، از آن‌جایی که ما تنها لایه ضخیم ابرهای اسیدسولفوریکی آن را می‌بینیم، چیزی جز سفید متمایل به زرد نخواهیم یافت اما اگر سفری فرضی به سطح زهره داشته‌باشیم آن‌جا را مملو از سنگ‌های قرمز-قهوه‌ای خواهیم‌دید. اگر به عکس‌های گرفته‌شده توسط فضاپیماهای ناسا از زهره نگاه کنیم، عکس‌ها قرمزتر از آن‌اند که در سطح زهره پیش‌بینی می‌شود. در حقیقت وقوع این امر به‌سبب جذب انتخابی طول موج‌های خاص توسط جو زهره است [۱۷]. از سوی دیگر عناصر تشکیل دهنده سطح سیاره، به‌خصوص در مورد سیارات فاقد جو، عاملی اثرگذار در شکل‌دادن رنگ آن‌هاست. به‌عنوان مثال رنگ عمومی قرمز-نارنجی مریخ که سبب شده بود مردم رم باستان نام آن را بر خدای جنگشان بنهند، به‌علت وجود سنگ‌های زنگی سرتاسر آن، و عدم یا وجود اندک جو و ابر بر فراز سطح آن است. (شکل ۱۳) ضریب بازتاب مریخ ۱۶٪ است و از همین‌روی جزو ستارگان تاریک محسوب می‌شود [۲۸].

شکل ۱۳- تصویر گرفته‌شده از مریخ به وسیله تلسکوپ فضایی هابل. فقدان جو قابل توجّه و عدم شکل‌گیری اثرات حاصل از تفرّق نور، موجب زنگی دیده‌شدن مریخ (رنگ سنگ‌های آن) می‌شود [۲۹].

هم‌چنین بروز برخی پدیده‌های نوری، بر مشاهده رنگ سیارات تأثیر می‌گذارند. مثلاً حلقه‌های قهوه‌ای-خاکستری اطراف زحل دارای خلوص رنگی بالاتری نسبت به آنچه ما از روی زمین مشاهده می‌کنیم هستند، در حقیقت هم‌راستایی ما با خورشید و بروز پدیده انتشار بازگشتی موجب می‌شود که رنگ حلقه‌های زحل را از روی زمین سفید ارزیابی کنیم. زحل سیاره‌ای گازی است که ابرهای آن از آمونیاک و آمونیم هیدروسولفید شکل‌یافته‌اند که به‌ترتیب رنگ‌های سفید و نارنجی را فراهم‌آورده‌اند. در برخی تصاویر، نیم‌کره شمالی زحل آبی‌تر به‌نظر می‌رسد. دانشمندان در این مورد بر این باورند که حلقه زحل موجب کاهش رسیدن نور خورشید به آن بخش و سرد شدن آن است. این امر موجب فرو آمدن ابرهای آمونیاک می‌گردد که در عمل به‌سایر قسمت‌های جو آن اجازه‌ی منتشر کردن بیشتر نور را می‌دهد و نهایتاً پدیده‌ای شبیه آن‌چه در جو زمین روی می‌دهد به‌وقوع می‌پیوندد [۳, ۱۷]. بنابراین رنگ سیارات می‌تواند اطلاعات کلی مفیدی از ساختار سیاره، درصد عناصر و جو سیاره در اختیار ما قرار دهد و ویژگی‌های دیداری‌شان موجب شکل‌گیری تحلیل‌های فراوان و در پی آن پیشرفت دانش ما از چیستی‌شان می‌گردد و از سوی دیگر سبب بهبود درک ما نسبت به پیشینه و علل شکل‌گیری آن‌ها خواهد شد. البته پدیده‌های نوری و رنگی فراوان در طول مسیر نور به سمت مشاهده‌گر و هم‌چنین مشکلات مربوط به عکس‌برداری کاملاً مطمئن، تحلیل دقیق و خالی از اشکال تصاویر را دشوار می‌سازد.

۳-۷- آیا تمام کیهان دیده می‌شود؟

تا کنون دریافتیم که رنگ‌ها و نورها نقش پررنگی در شکل‌گیری درک ما از کیهان و نظریه‌پردازی در مورد آن بازی می‌کنند. اما بزرگ‌ترین معماهای ما را نادیدنی‌های این دنیای مرموز شکل می‌دهند. در حقیقت در مسیر یافتن پاسخ‌هایی در مورد اجرامی که هزاران سال نوری با ما فاصله دارند، تنها می‌توانیم به قدرت تعقل خویش تکیه کنیم و از میان ادراکات حسی، تنها ادراک دیداری ما کارآمد خواهد بود. با این‌حال بیشترین جرم کیهان را موادی تشکیل می‌دهند که آن‌ها را نمی‌بینیم و این جرم سترگ، معمای حل‌نشده این دنیای رازآلود است. این جرم نامرئی، ماده تاریک نامیده می‌شود. در حقیقت با بررسی سرعت حرکت محوری ستارگان و هم‌چنین لبه‌های کهکشان‌هایی هم‌چون راه شیری، در می‌یابیم که این سرعت، بسیار بیش از آن است که دانش ما با توجه به ماده موجود پیش‌بینی می‌کند. به‌بیان بهتر، ما اثرات گرانشی جرمی را مشاهده می‌کنیم که قادر به مشاهده خود آن نیستیم، جرمی که در حدود ۳۰ برابر بیشتر از جرم ماده مرئی است. کشف ماهیت و میزان ماده تاریک و هم‌چنین انرژی تاریک (انرژی که موجب انبساط افزایشی کیهان می‌گردد) گام ارزشمندی در راستای پاسخ‌گویی به بخشی از معماهای بی‌شمار هستی به‌شمار می‌رود و آینده کیهان، وابسته به چگالی عالم و طبیعتاً میزان این ماده مرموز خواهد بود. در مورد ماهیت ماده تاریک نظریه‌ها و مقالات فراوانی ارائه گشته‌است که علاقه‌مندان می‌توانند با جست‌وجویی ساده به آن دست یابند [۲, ۳].

۳-۸- مشاهدات نجومی

نخستین ابزار بشر جهت مشاهده ستارگان و اجرام کیهانی، سیستم بینایی اوست. با توجه به سطح روشنایی پایین در مشاهدات نجومی، دو نوع تطبیق تاریکی[1] برای سامانه بینایی انسان هنگام نگریستن به ستارگان رخ می‌دهد. نخستین تطبیق که در زمانی حدود ۲۰ ثانیه به‌وقوع می‌پیوندد، گشاد شدن مردمک چشم‌ها به‌هدف عبور بیشتر نور از آنهاست. ابعاد مردمک‌های چشم انسان در شرایط طبیعی و نور روز، در حدود ۲/۵ تا ۳ میلی‌متر است که به‌هنگام روشنایی و در راستای عمل تطبیق به ۵ تا ۷ میلی‌متر می‌رسد. با این‌حال با افزایش سن و گذر از دوران جوانی بیشینه این ابعاد به ۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد [۸]. اما دومین تطبیق تاریکی پس از زمانی معادل ۳۰ دقیقه رخ می‌دهد. با کاهش سطح روشنایی، واکنش باز تولید رودوپسین، یعنی تبدیل ویتامین A به رتینن و پس از آن به رودوپسین، بیش از واکنش مصرف روی می‌دهد و شرایط پایای طبیعی از بین می‌رود. این عمل حساسیت مخروط‌ها و میله‌های چشم را افزایش می‌دهد و بهبود دید در سطح روشنایی پایین را فراهم می‌آورد. با این وجود، نور شدید سبب می‌شود این فرآیند به سرعت در جهت عکس پیش رود و سامانه بینایی به شرایط طبیعی بازگردد. در میان طول موج‌های متفاوت طیف مرئی، نور قرمز کمترین تأثیر را بر بازگشت روند تطبیق تاریکی دارد، از این رو منجمان برای مشاهده نقشه‌ها و نمودارهای خویش به هنگام رصد، از نور قرمز استفاده می‌کنند. حتی با وجود تطبیق تاریکی، فعالیت پایین‌تر مخروط‌های چشمی در سطح روشنایی پایین سبب می‌شود اجرام کیهانی در هنگام مشاهده با تلسکوپ با خلوص رنگی کمتری مشاهده شوند [۱، ۳، ۸]. از سوی دیگر، غبار و بخار آب موجود در اتمسفر با جذب و انتشار نور ستارگان، مشاهده‌ی آن‌ها را به‌خصوص در مورد ستارگان کم‌نورتر دشوار می‌سازد. هم‌چنین این ذرات موجود در جو، با عمل انتشار، نورهای دیگری را -به‌جز نور ستارگان- به چشم انسان می‌رساند که به این پدیده اصطلاحاً آلودگی نوری[2] گفته می‌شود. به‌همین دلیل همواره توصیه می‌شود مشاهده ستارگان از مکانی دور از این ذرات و آلودگی‌ها انجام گیرد [۸].

۴- نتیجه‌گیری

در پس هر رنگ که آسمان شب را چنین زیبا می‌سازد، پرسشی مهم در مورد چرایی شکل‌گیری آن رنگ نهفته است و تلاش ما در مسیر یافتن پاسخ این پرسش‌ها، به درک بهتر ما از جهان پیرامون منجر می‌شود. ارزش تسلط کامل بر نورها و رنگ‌ها و قوانین حاکم بر رفتار آنها در دانش نجوم و در شرایطی که قصد بررسی اجرام دور و دست‌نیافتنی نجومی را داشته باشیم، به خوبی قابل درک است. ستارگان که عامل اصلی نشر نور و رنگ در کیهان به‌شمار می‌روند به رنگ‌های متفاوتی دیده می‌شوند. این رنگ، تابعی از دمای سطح آنها و متعاقباً جرم و فعالیت هسته‌ای مرکز آنهاست. بر این اساس ستارگان داغ‌تر و سنگین‌تر عموماً به رنگ آبی، و ستارگان سرد تر به ترتیب به رنگ‌های سفید، زرد، نارنجی و قرمز مشاهده می‌شوند. هم‌چنین میزان تابندگی و درخشندگی ستارگان، وابسته به دمای سطح آنهاست. قدر ستارگان، به‌عنوان معیاری از این تابندگی، رابطه مستقیم با همین دما دارد. از سوی دیگر سطح منتشرکننده‌ی نور در اجرام کیهانی و هم‌چنین فاصله‌ی آنها با ما، در ارزیابی ما از درخشندگی یک ستاره (قدر ظاهری) موثر خواهند بود. هرچه قدر ستاره‌ای کوچک‌تر باشد، تابندگی آن بیشتر است. اگر قدر ستارگان را در دو ناحیه‌ی مختلف از طیف الکترومغناطیس (عموماً در محدوده مرئی و اطراف آن)، اندازه‌گیری کنیم و اختلاف آن را محاسبه کنیم، به معیاری کمی جهت بررسی رنگ آنها می‌رسیم. ستاره‌شناسان از این معیار به‌عنوان (نمارِ رنگ) یاد می‌کنند. هرچه عدد مربوط به نمار رنگ ستاره، کوچک‌تر باشد، دمای سطح آن بیشتر است و آبی‌تر می‌نماید. نور در طی سفرش به سوی زمین، دستخوش تغییراتی می‌شود و به همان شکلی که از مبدأ منتشر شده به ما نمی‌رسد. از جمله مهم‌ترین این تغییرات، سرخ‌شوندگی میان‌ستاره‌ای است که حاصل جذب و انتشار طول موج‌های کوتاه به‌وسیله غبارهای میان‌ستاره‌ای است. انتقال سرخ حاصل از پدیده داپلر و انبساط کیهان، و هم‌چنین انتقال سرخِ گرانشی از جمله دیگر اثرات رنگی کیهانی است که اندازه‌گیری آن به ما در راستای شناخت بیشتر انبساط کیهان و هم‌چنین سرعت حرکت اجرام مختلف کیهانی یاری می‌رساند. با توجه به انبساط کیهان و قانون هابل، هر چه ستاره‌ای از ما دورتر باشد، سرعت گریزش بیش‌تر است و متعاقباً طول موج دریافتی ما از آن، بیشتر افزایش خواهد یافت. رنگ در سیارات تابعی از مواد تشکیل دهنده، جوّ و ضریب بازتاب آنها است. به کمک تحلیل رفتار نوری سیارات و رنگ آنها می‌توانیم گام‌های ارزشمندی در مسیر شناخت مواد سازنده و سایر ویژگی‌های آنها به‌دست آوریم. شناخت بیشتر سامانه بینایی، به‌عنوان آخرین مقصد نور در طول سفرش از اجرام کیهانی، سبب بهبود روش‌ها و ابزار مشاهدات نجومی می‌شود. با توجه به سطح روشنایی پایین در هنگام رصد ستارگان، ستاره‌شناسان ترجیح می‌دهند با فراهم‌آوردن شرایط تطبیق تاریکی، بر کیفیت مشاهدات خویش بیافزایند. به‌همین منظور ستاره‌شناسان به‌هنگام رصد از نور قرمز برای مطالعه نقشه ستارگان یا سایر فعالیت‌های خویش استفاده می‌کنند. در بین طول موج‌های نور مرئی، نور قرمز در از بین بردن شرایط تطبیق تاریکی، کم‌ترین اثر را دارد. نور و رنگ، از جمله مهم‌ترین ابزار ما در کیهان‌شناسی با هدف درک بهتر ماهیت جهان به‌شمار می‌آیند. به‌این منظور می‌بایست از مفهوم عامیانه آنها فراتر رویم و در نظر داشته باشیم که رنگ و نور حاوی پیام‌های مهمی از ماهیت هر ماده‌اند. از این‌روی شناخت پدیده‌های مربوط به این دو می‌تواند زمینه‌ساز درک بهتر جهان و پاسخ به معماهای بی‌شمار آن باشد.

[1] Dark adaptation
[2] Light pollution

۵- مراجع

1. R. S. Berns, Billmeyer and Saltzman, "Principles of color technology", 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, **2000**.
۲. ه. ریوز، ترجمه علی‌اصغر سعیدی، "صبوری در سپهر لاجوردی"، نشر چشمه، **۱۳۷۵**.
3. wikimedia, "keplers supernova", viewed 30 April **2015**, http:// upload. wikimedia. Org/Wikipedia/commons/ d/d4/ Keplers_ supernova .jpg
4. P. T. Landsberg, "Thermodynamics and statistical mechanic", Courier Dover Publications, **1990**.
5. Wikimedia, "Blackbody spectrum", viewed 30 April **2015**, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_en.png.
6. T. Kogure, K. Leung, "The astrophysics of emission-line stars", Springer, **2007**.
7. I. Morison, "Introduction to astronomy and cosmology", J Wiley & Sons, **2008**.
8. K. R. Lang, "Astrophysical formulae: Radiation, Gas processes, and high energy physics", 1, 3rd edition., Springer, **2006**.
9. QDL, "solar Spectrum", viewed 30 April **2015**, http://qdl.scs-inc.us/2ndParty/Images/Charles/Sun/SolarSpectrum2_wbg.png
۱۰. د. مایر، ترجمه محمدرضا خواجه پور، "نجوم به زبان ساده"، چاپ هشتم، تهران: موسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی، **۱۳۷۹**.
11. The Astroinfo project, "Flux", viewed 30April **2015**, http://docs-staging.kde.org/stable5/en/kdeedu/kstars/ai-flux.html
12. G. M. Harper, "A newvla-hipparcosdistanceto betelgeuseand itsimplications", The Astronomical Journal, 135 (4): 1430-1440, **2008**.
13. New Forest observatory:Adventure in imaging deep-sky objects," betelgeuse_nfo", viewed 30 April **2015**, http:// www.newforestobservatory.com/ wordpress/wp-content/gallery/ quasarsandother/ betelgeuse_nfo.jpg
14. J. S. Allen, "The classification of stellar spectra", ucl astrophysics group, viewed 25 August **2014**, http://www.star.ucl.ac.uk/~pac/spectral_classification.html
15. C. Lada, F. Adams, "Interpreting infrared color-color diagrams – Circumstellar disks around low- and intermediate-mass young stellar objects", Astrophysical Journal 393: 278-288, **1992**.
16. M. Richmond's classes, "The bessel approximation to UBVRI passbands", viewed 30 April **2015**, http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/filters/bessell.png
17. Astronomy Education at University of Nebraska-Lincoln, "Blackbody curves & UBV filters lab", viewed 31 April **2015**, http:// astro.unl.edu /naap/blackbody/ graphics/ temp_ub .png
18. C. wiki, "Color-magnitude and Color-color plots", coolwiki, viewed 25 August 2014 http:// coolwiki. ipac. caltech. edu/ index. php/ Color-Magnitude_and_Color-Color_plots, 20 December **2012**.
19. H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja ,M. Poutanen, K. J. Donner, "Fundamental astronomy", 5th edition, springer, **2006**.
20. wikimedia, "Redshift, blueshift", viewed 30 April **2015**, http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e4/Redshift_blueshift.svg
21. L. D. landau, E. M. Lifshitz, "The classical theory of fields" Vol. 2, 4th edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, **1980**.
22. C. W. Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler, "Gravitation", W. H. Freeman company, **1973**.
23. هفت آسمان: دانشنامه ستاره‌شناسی, "Redshift", viewed 30 April **2015**, http:// www. haftaseman.ir/ images/ webdb/ redshift. jpg
24. I. Baldry, K. Glazebrook, "The 2dF galaxy redshift survey: constraints on cosmic star formation history from the cosmic SPectrum", The Astrophysical Journal, 569 (2): 582-594, **2002**.
25. D. Dutkevitch, "The evolution of dust in the terrestrial planet region of circumstellar disks around young stars", PhD thesis, University of Massachusetts Amherst, **1995**.
26. The Hubble Heritage Project, "MArs", viewed 30 April **2015**, http://heritage.stsci.edu/2005/34/images/p0534aw.jpg
27. M. Cuk, "What color is each planet?", Curious about Astronomy?, viewed 25 August **2014** , http://curious.astro. cornell. edu/ question. php? number= 236, 22 November **2007**.
28. G. Wysezecki, W. S. Stiles, "Color science", John Wiley, **1967**.
29. F. J. Keller, W. E. Gettys, M. J. Skove, "Physics: classic and modern", 2nd edition, McGraw-Hill Companies, **1993**.