

سرشناسه	کارول، برادلی دبلیو. Carroll, Bradley W
عنوان و نام پدیدآور	مقدمه‌ای بر اخترفیزیک نوین / مؤلفان: [برادلی دبلیو کارول، دیل ا. استلی]؛ مترجمان: احسان مهرجو، کامبیز خالقی.
مشخصات نشر	تهران: دانش پژوهان جوان، ۱۳۹۳ -
مشخصات ظاهری	ج- مصور، جدول، نمودار.
فروست	نجوم: ۶۲۱
شابک	۲۰۹۰۰۰ ریال: دوره: ۵-۳۴-۰۳۸۸-۰۰۰-۹۷۸: ج. ۱: ۲-۳۵-۰۳۸۸-۰۰۰-۹۷۸: ج. ۲: ۶-۶۹-۸۵۴۷-۰۰۰-۹۷۸
یادداشت	مترجمان جلد دوم: فرهاد ذکاوت و کامبیز خالقی.
یادداشت	عنوان اصلی: An introduction to modern astrophysics, 2nd ed., 2007.
یادداشت	ج. ۲ (چاپ اول: ۱۳۹۷) (فیبیا).
یادداشت	ناشر جلد دوم: انتشارات رمز است.
یادداشت	واژه نامه.
موضوع	فیزیک نجومی
موضوع	Astrophysics
شناسه افزوده	استلی، دیل ا.
شناسه افزوده	Ostlie, Dale A.
شناسه افزوده	ناتلقی: ۱۳۶۹ مترجم
شناسه افزوده	مهرجو، احسان: ۱۱ مترجم
رده بندی کنگره	۱۳۹۷ ۶۱/۵۰۲
رده بندی دیویی	۶۲۹/۴۵۵
شماره کتابشناسی ملی	۳۶۴۵۷۰۴



نام کتاب	: مقدمه‌ای بر اخترفیزیک نوین (جلد دوم)
مؤلفان	: دیل استلی، برادلی کارول
مترجمان	: فرهاد ذکاوت، کامبیز خالقی
ویراستار	: پوریا میری و محمد مهدی ثناگستر
مدیر برنامه‌ریزی و تألیف	: کامبیز خالقی
تیراژ	: ۱۰۰۰ نسخه
قیمت	: ۸۰۰۰۰ تومان
نوبت چاپ	: اول ۱۳۹۷
تعداد صفحات	: ۳۷۹ صفحه
ناشر	: رمز (وابسته به شرکت منظومه اندیشه خالقی)
حروفچینی و صفحه‌آرایی	: موسسه فرهنگی - آموزشی ادب و دانش ماخ
طراح جلد	: موسسه فرهنگی - آموزشی ادب و دانش ماخ
شابک دوره	: ۵-۳۴-۰۳۸۸-۰۰۰-۹۷۸
شابک	: ۶-۶۹-۸۵۴۷-۰۰۰-۹۷۸

آدرس مراکز فروش:

شماره ۱: میدان انقلاب، خیابان کارگر جنوبی، خیابان مهدی‌زاده، پلاک ۲۷، واحد ۱۷.

تلفن: ۰۲۱-۶۶۹۲۵۲۴۴

شماره ۲: www.maakh.com

مقدمه‌ی نویسنندگان

از زمانی که نخستین چاپ از کتاب «مقدمه‌ای بر اخترفیزیک مدرن» و همتای خلاصه‌تر آن کتاب «مقدمه‌ای بر اخترفیزیک ستاره‌ای» در سال ۱۹۹۶ میلادی روانه‌ی بازار شد، انفجاری باورنکردنی در دانش ما از آسمان بالای سرمان روی داده است. حدود ۲ ماه قبل از چاپ اول این کتاب بود که میشل مایر (Michel Mayer) و دیدیه کولوز (Didier Queloz) خبر کشف جدیدشان را منتشر کردند: یک سیاره‌ی فراخورشیدی و گردش آن به دور ستاره‌ی ۵۱-فرس اعظم. و این نخستین سیاره‌ای بود که در گردش به دور یک ستاره‌ی رشته اصلی کشف شده بود. این قبیل کشف‌ها نه تنها نور تازه‌ای به نحوه‌ی شکل‌گیری ستارگان و منظومه‌های سیاره‌ای تاباندند، بلکه چگونگی تشکیل و تحول سیارات منظومه شمسی خودمان را هم برای ما آشکار کردند.

علاوه بر این، طی یک دهه‌ی گذشته شاهد اکتشافات مهمی در منظومه‌ی شمسی خودمان و ورای مدار پلوتون بوده‌ایم، که هم‌اندازه‌ی این سیاره‌ی کوچک هستند. در حقیقت یکی از اجرام تازه کشف شده در کمربند کویپر، که اتحادیه بین‌المللی نجوم نام 2003UB_{313} را برای آن برگزیده و کمی بزرگ‌تر از پلوتون است، تعریف ما از سیاره و اینکه منظومه شمسی میزبان چه تعداد سیاره است، به چالش کشید.

اکتشافات فضاپیماهای روباتک، و کاوشگرانی که به‌سوی اجسام منظومه شمسی رهسپار شده بودند اطلاعات فوق‌العاده ارزشمندی از همسایه‌های آسمانی‌مان را اختیار ما قرار داده‌اند. ناوگان مریخ‌نوردهایی که سیاره‌ی سرخ را هدف قرار داده بودند مثل روح (Spirit) و فرصت (Opportunity) تأیید کردند که مریخ در گذشته‌ی مریخ، بر سطح این سیاره آب مایع در جریان بوده است. به‌علاوه ما تعداد زیادی کاوشگر رهسپار مشتری و زحل کرده‌ایم. سطح قمر تیتان را لمس کرده‌ایم، از میان غبارهای گیسوی دنباله‌دارها گذشته‌ایم و حتی به‌سوی قلب یخی آن‌ها نیز برخورد کرده‌ایم.

مأموریت‌هایی مثل سوئیفت (Swift) به ما کمک کردند تا به پاسخ معمایی منشأ پرتوهای گامای کیهانی نزدیک شویم. امروزه می‌دانیم که احتمالاً دو رده از پرتوهای گاما وجود دارد که یکی از انفجارهای هسته‌ای ابرنواختری سرچشمه می‌گیرد و دیگری احتمالاً در فرآیند جذب و مخلوط شدن دو ستاره‌ی نوترونی یا یک ستاره‌ی نوترونی و یک سیاره به در قالب یک منظومه‌ی دوتایی به وجود می‌آیند.

بعد از انتشار ویرایش اول این کتاب و بررسی‌های دقیق رصدی که به مطالعه‌ی مرکز کهکشان راه‌شیری خودمان متمرکز بوده‌اند، فهمیدیم که احتمالاً بسیاری از کهکشان‌هایی که می‌شناسیم ماریچی باشند. این مطالعات همچنین نشان دادند که احتمالاً بسیاری از این کهکشان‌ها مثل راه‌شیری خودمان در هسته‌ی خود یک سیاه‌چاله پنهان کرده‌اند و دائماً خوراک لازم برای بزرگ و بزرگ‌تر شدن این سیاه‌چاله‌ها را تأمین می‌کنند: بنابراین امروزه چنین به نظر می‌رسد که بیشتر سیاه‌چاله‌های آبر پرجرمی که در مرکز این کهکشان‌ها قرار دارند، مسئول تابش‌های پرتانرژی و گامایی هستند که مبدأشان با کهکشان‌های راه‌شیری، کهکشان‌های سیفرت، بیلیزرها و کوازارها گره خورده‌اند.

همچنین در یک دهه‌ی گذشته فهمیده‌ایم که نه‌تنها انبساط عالم رو به گند شدن نیست، بلکه در حال شتاب گرفتن نیز هست! همین رصدها به ما نشان داده‌اند که ما امروزه در عالمی زندگی می‌کنیم که در حجم انبوهی از انرژی تاریک غوطه‌ور است که در آن ثابت کیهان‌شناختی آلبرت آینشتاین (خود او آن را بزرگ‌ترین اشتباهش نامیده بود) نقش مهمی در فهم ما از کیهان بازی می‌کند. در هنگام چاپ ویرایش اول این کتاب حتی احتمال وجود انرژی تاریک هم عاقلانه به نظر نمی‌رسید.

در واقع بعد از چاپ ویرایش اول این کتاب، کیهان‌شناسی وارد حیطه‌ی جدید اندازه‌گیری‌های دقیق شده است. بعد از استخراج اطلاعات حاصل از بررسی‌های تداخل سنج میکرو موج زمینه‌ی ویلکینسون (WMAP) سن کیهان با دقتی بیشتر در حدود ۲٪ کاهش پیدا کرد و به چیزی در حدود 13.7 ± 0.2 Gyr رسید. علاوه بر این مطالعات دقیق‌تر در حوزه‌ی تحولات ستاره‌ای هم نشان داد که این سن جدید اندازه‌گیری شده از ستاره‌های پیر مسن‌ترین خوشه‌های ستاره‌ای مطابقت کامل دارد.

ما در مقدمه‌ی ویرایش اول نوشته بودیم: «هیچ زمانی تا بدین اندازه اخترفیزیک مدرن را بررسی نکرده بودیم». این جمله عطف به بررسی‌های پیشرفته‌ی عظیمی نوشته شده بود که در دهه‌ی قبل از آن به انجام رسیده بود. بدیهی است که این مقدمه پیش از پیشرفت‌های آینده نوشته شده. پیوستن تلسکوپ فضایی هابل و تصویربرداری‌های باکیفیت بالای آن، رصدخانه‌ی پرتو X چاندرا و تلسکوپ فروسرخ اسپیتزر از همراهان اصلی ما در این مسیر بوده‌اند. از روی زمین هم، تلسکوپ‌های غول‌پیکری به بزرگی ۸ متر یا حتی بزرگ‌تر به

جمع کاوشگران کیهان پیوستند. پروژه‌های جاه‌طلبانه‌ای که روزگاری شاید در مخیله‌ی اخترشناسان نیز نمی‌گنجید، توانستند داده‌های آماری بسیاری استخراج کنند. پویش دیجیتالی آسمان (Sloan)، بررسی انتقال به سرخ دومیکرونی به نام ۲dF، تصاویر فوق عمیق هابل و بسیاری ابزارهای دیگر ما را در رسیدن به اکتشافات جدید و مطالعات دقیق‌ترمان همراهی کرده‌اند. همچنین در این مدت از رصدها و رصدخانه‌هایی در ارتفاعات بالا (۵۰۰۰ متر)، آرایه‌های ریز میلی‌متری آتاکاما و اخترنسج‌های دقیقی مثل تلسکوپ فضایی Gaia یا جستجوگر سیاره‌ای SIM نیز استفاده کرده‌ایم. البته همچنان به اکتشافات درون منظومه‌ی خودمان هم مشغولیم؛ تنها یک روز پیش از نوشتن این مقدمه، مدارگر کاوشگر مریخ (Mars Reconnaissance) وارد مدار سیاره‌ی سرخ شد.

از سوی دیگر در طی یک دهه‌ی گذشته ما یک انقلاب اطلاعاتی را هم‌پشت سر گذاشته‌ایم. آن روزهایی که ویرایش اول کتاب به چاپ رسید شبکه‌ی جهانی وب بسیار محدودتر بود. در آن روزها شاید کسی تصور نمی‌کرد که به این سرعت شبکه‌ای به وجود بیاید که با استفاده از یک موتور جستجوگر و چند کلیک ماوس، حجم انبوهی از اطلاعات، آرشیو آخرین مقالات پیش چاپ ژورنال‌ها و داده‌های عظیمی که به سرعت روند انقلاب علمی می‌کنند، در دسترس باشد.

بعد از نسخه‌ی اول این کتاب ویرایش دوم آن روانه‌ی بازار شد که بیشتر دانشجویان آن را با نام «کتاب نارنجی بزرگ» به یاد می‌آورند. این ویرایش از کتاب بر اخترفیزیک ستاره‌ها، سرچشمه‌ی انتشار آن تقریباً هم‌زمان بود با چاپ کتاب *An introduction to modern Galactic Astrophysics and Cosmology* از آنجا که این نسخه هم خیلی زود با استقبال دانشجویان روبرو شد، به‌سرعت و چندین بار در کلاس‌های درس فیزیک آرایه‌ای قرار گرفت و بارها و بارها نکاتی از سوی اساتید و دانشجویان به ما یادآوری می‌شد که نکاتی از کتاب از قلم افتاده است.

از سوی دیگر در نسخه‌ی دوم کتاب تمامی واحدها را از سیستم cgs به سیستم متداول‌تر SI تغییر دادیم. یا مثلاً در نسخه‌های قبلی از واحد erg s^{-1} برای تعریف درخشندگی استفاده می‌کردیم چرا که این واحد با واحدهای نجومی سازگار بود. اما خیلی زود دیدیم که دانشجویان مثل ما فکر نمی‌کنند و ترجیح می‌دهند واحدها برحسب وات باشند. نمی‌خواهیم دانشجویان در برخورد اول با مفاهیم اخترفیزیک مدرن، با سیستم واحدها در طول مطالعه سردرگم شوند. ولی واحدهای طبیعی پارسیک، انرژی‌های را نگه داشتیم چرا که در مقادیر عددی می‌توانیم از مقایسه استفاده کنیم. پیوستی برای تبدیل واحدها برای آنانکه نگاهی به مقالات حرفه‌ای و کشف دنیای آنگسترومی، اِرگ و واحد بار الکتریکی دارند، در نظر گرفته شده.

هدف ما از نوشتن این کتاب باز کردن دریچه‌ی اخترفیزیک مدرن برای شما با ابزارهای آریصیات بسیار ساده است؛ و در این کار از درک پیچیدگی عالم از طریق اصول بنیادی فیزیکی‌اش قانع کننده‌تر نیافتیم. مزیت‌های رهیافت ریاضی را درک این عالم جذاب برای افلاطون هم روشن بود؛ همانطور که در رساله‌ی معرفت خود نوشته:

باور ندارید که یک ستاره‌شناس واقعی باید فردی با دانایی بسیار باشد؟ من این حرف را به چند دلیل بیان می‌کنم. نخست و مهم‌ترین دلیل آن که چنین فردی باید با اعداد عجیب زیاد کار بکند. در مسیر مطالعاتش باید از روش‌های هندسی، دستگاه‌های مختلف عددی و بسیاری تحلیل‌هایی استفاده کند که به‌مانند یک نمایش‌نامه با دقت در کنار هم چیده شده‌اند و هیچ‌یک به‌تنهایی معنایی ندارند. به عقیده‌ی من، درک این نمایش امکان‌پذیر نخواهد بود، مگر با آنچه پیشتر شرحش آمد [روش‌های ریاضیات]، و از این رو می‌توانند به خود غره باشند که به سادگی بر آن فائق آیند.

حال ۲۴ قرن از آن زمان گذشته و حتی کمی کاربرد فیزیک و ریاضیات منجر به دیدگاهی عمیق‌تر می‌شود.

این کتاب‌ها زاده‌ی دورانی هستند که ما دوره‌های اخترفیزیک سال سوم دانشگاه را تدریس می‌کردیم، و خودمان از برخی منابع محروم بودیم. متون موجود در آن زمان، اکثراً توصیفی بودند و کمتر محاسبات ریاضی داشتند. دانشجویانی که در کلاس‌های دیگر معادله‌ی شرودینگر، توابع پارش و بسط‌های چندگانه را یاد می‌گرفتند، احساس ناامیدی می‌کردند زیرا کتاب‌های درسی‌شان از آموخته‌های فیزیکی آنها بهره‌ای نمی‌بردند و این باعث سرافکنندگی دوچندان ما می‌شد. زیرا اخترفیزیک فرصت منحصر به‌فردی را در اختیار افراد می‌گذارد تا با به‌کارگیری عملی دانش فیزیکی خود بسیاری از پدیده‌های هیجان‌انگیز نجومی را درک کنند. علاوه بر این، اخترفیزیک به عنوان یک رشته،

واقعا تمامی جنبه‌های فیزیک را به تصویر می‌کشاند. به همین دلیل اخترفیزیک به دانشجویان این فرصت را می‌دهد تا دانش خود را مرور کرده و گسترش دهند.

هر کس که یک دوره‌ی مقدماتی فیزیک محاسباتی را گذرانده باشد تقریباً می‌تواند تمامی مفاهیم اصلی اخترفیزیک مدرن را درک کند. سطح فیزیک استفاده شده در بخش‌های مختلف این کتاب، به میزان قابل توجهی متفاوت است. همان‌طور که در ادامه خواهید دید در یک فصل از کتاب به معرفی نظریه نسبیت خاص پرداخته‌ایم و در فصل دیگری فیزیک کوانتومی را آورده‌ایم تا پیش‌زمینه‌های فیزیکی لازم برای بحث‌های جدی‌تر را فراهم کنند. سایر مطالب به صورت خودآموز بوده و با مراجعه به بخش‌های دیگر همین کتاب قابل فهم می‌شوند و خللی در زنجیره‌ی استدلال‌ها و درک خواننده از مفاهیم و ایده‌های نجومی ایجاد نمی‌کنند.

اگرچه در این کتاب تلاش کرده‌ایم به نسبت دقیق باشیم، با این حال تمایل داشتیم تا محاسبات مربوطه را آنقدر ساده و دم‌دستی کنیم تا با استفاده از مدل‌های ساده به مطالعه‌ی سیستم‌های مورد نظر بپردازیم. نسبت نتیجه به تلاش در این حالت بسیار زیاد است به طوری که ۸۰ درصد از یادگیری با ۲۰ درصد تلاش به دست می‌آید و این نوع محاسبات سریع باید بخشی از ابزار هر اخترفیزیک‌دانی باشد. در واقع، زمانی که این کتاب را می‌نوشتیم دائم از تعداد پدیده‌هایی که با این روش قابل توصیف می‌شدند شگفت‌زده می‌شدیم. با وجود همه این‌ها تلاش ما خدمت صادقانه به شما بوده است و هر جا به مفاهیم مهمی که نیاز به درک بیشتری داشتند رسیدیم (مانند درون ستارگان، جوهای ستاره‌ای، نسبیت عام و کیهان‌شناسی)، سعی کردیم تا دست از ساده‌سازی مسئله برداریم و به جای توصیف سطحی محض، به تشریح عمیق و مفهومی آن‌ها بپردازیم.

امروزه اخترفیزیک محاسباتی (با کمک کامپیوتر) نقشی اساسی در پیشرفت درک ما از نجوم داشته است و از این روست که توانسته‌ایم تعداد بی‌شمار از مسائل رایانه‌ای را با کدنویسی تبدیل کرده و نتایج را در قالب مواد درسی در کتاب‌های اخترشناسی بیاوریم. اکنون شما می‌توانید مدارهای سیاره‌ای و نیز ویژگی‌های رصدی سیستم‌های ستاره‌ای دوتایی را محاسبه کنید، همچنین علاوه بر مدل‌سازی سیستم‌های ستاره‌ای دلخواهتان می‌توانید برهم‌کنش‌های گرانشی بین کهکشان‌ها را هم بازسازی کنید. این کدها باعث ساده‌تر شدن پیچیدگی‌های آموزشی می‌شوند و شما به راحتی می‌توانید کدهایی که ما در اختیارتان گذاشته‌ایم را بسط و گسترش دهید. اخترفیزیک‌دان‌ها از گذشته در تصویرسازی و محاسبه‌ی بزرگ مقیاس پیش‌قدم بوده‌اند، اکنون نیز ما تلاش می‌کنیم شما را با این آمیزه‌ی علم و هنر آشنا کنیم.

اساتید محترم می‌توانند متون این کتاب را به فراخور نیازهای ویژه‌ی خود انتخاب کرده و با رویکرد اخترفیزیکی، میز مناسبی از غذاهای اخترفیزیکی را برای دانشجویان خود آماده‌ی سرو کنند. ما خودمان با انتخاب سحاح مباحث مربوطه از بین ۱۸ فصل اول، از این کتاب برای تدریس یک دوره‌ی یک ترمی اخترفیزیک ستاره‌ای استفاده کرده‌ایم. سپس دانشجویان علاقه‌مند را به گذراندن یک دوره‌ی تکمیلی کیهان‌شناسی سوق دادیم. از سوی دیگر، استفاده از کل مطالب کتاب، به خوبی یک دوره‌ی یک ساله را پر می‌کند و تمامی مباحث اخترفیزیک مدرن را پوشش می‌دهد. برای کمک به تشخیص و انتخاب مباحث مهم بخش‌های کتاب، عناوین و سرفصل‌های فرعی را به ویرایش دوم کتاب اضافه کرده‌ایم.

وب سایتی با آدرس <http://www.cambridge.org/astrophysics> به مطالب این کتاب اختصاص یافته و شامل نسخه‌های قابل دانلودی از کدهای کامپیوتری به زبان‌های برنامه‌نویسی مختلف مانند فورترن، C++ و در برخی موارد جاوا است. همچنین به برخی از مهم‌ترین وب سایت‌های نجومی و نیز برخی تصاویر مرتبط با کتاب لینک داده شده است. ضمناً اساتید می‌توانند کتابچه‌ی پاسخ‌های تشریحی را مستقیماً از ناشر دریافت کنند.^۱

بردلی و. کارول

دیل ا. استلی

دانشگاه ایالتی ویر

اودگن، یوتا

modastro@weber.edu

فصل ۱۱

۱-۱۱	درون خورشید	۲
	تاریخ تحول خورشید	۲
	ساختار داخلی خورشید در زمان فعلی	۲
	مسأله‌ی نوترینوی خورشیدی: داستان کارآگاهی حل شده	۷
۲-۱۱	جو خورشیدی	۱۱
	نور سپهر	۱۱
	دانه‌بندی خورشیدی	۱۴
	چرخش تفاضلی	۱۵
	فام سپهر	۱۵
	منطقه‌ی گذار	۱۶
	تاج	۱۷
	حفره‌های تاج و باد خورشیدی	۲۰
	مدل باد پارکر	۲۴
	ماهیت هیدرودینامیکی جو بالایی خورشید	۲۵
	مغناطوسه‌ی هیدرودینامیک و امواج آلفین	۲۶
	جوه‌های بیرونی دیگر ستارگان	۲۸
۳-۱۱	چرخه‌ی خورشیدی	۲۹
	لکه‌های خورشیدی	۲۹
	پلازما	۳۲
	شراره‌های خورشیدی	۳۳
	زبانه‌های خورشیدی	۳۵
	فوران خرمی تاج	۳۶
	شکل وابسته به زمان تاج	۳۶
	نظریه‌ی دینامو مغناطیس	۳۷
	شواهد فعالیت مغناطیسی در سایر ستارگان	۳۸
	منابع پیشنهادی برای مطالعه	۴۰
	مسائل	۴۲

فصل ۱۲

محیط میان‌ستاره‌ای و تشکیل ستاره

۱-۱۲	غبار و گاز میان‌ستاره‌ای	۴۶
------	--------------------------	----

۴۶	خاموشی میان ستاره‌ای	
۴۸	نظریه‌ی مای	
۴۹	مشارکت مولکولی در منحنی‌های خاموشی میان ستاره‌ای	
۵۱	هیدروژن، به عنوان عنصر غالب بر ISM	
۵۱	تابش ۲۱ سانتی متری هیدروژن	
۵۳	ردیابان مولکولی H_2	
۵۴	دسته‌بندی ابرهای میان ستاره‌ای	
۵۵	شیمی میان ستاره‌ای	
۵۶	گرمایش و سرمایش ISM	
۵۷	منابع دانه‌های غبار	
۵۷	تشکیل پیش‌ستاره‌ها	۲-۱۲
۵۷	معیار جینز	
۵۹	رُمبش همسان	
۶۲	تلاشی ابرهای رُمبشی	
۶۴	فرایندهای فیزیکی دیگر در تشکیل پیش‌ستاره	
۶۵	پخش دوقطبی همسان	
۶۵	شبیه‌سازی‌های عددی تحول پیش‌ستاره‌ای	
۶۸	تحول پیش‌رشته‌ی اصلی	۳-۱۲
۶۸	رد هایاشی	
۶۹	محاسبات کلاسیک تحول پیش‌رشته‌ی اصلی	
۷۱	تشکیل کوتوله‌های قهوه‌ای	
۷۱	تشکیل ستارگان پُر جرم	
۷۱	تصحیح‌های احتمالی در مدل‌های کلاسیک	
۷۲	رشته‌ی اصلی عمر صفر (ZAMS)	
۷۲	تابع جرم اولیه (IMF)	
۷۳	مناطق H II	
۷۵	اثرات ستارگان پُر جرم بر ابرهای گازی	
۷۵	اجتماع OB	
۷۶	ستارگان تی‌تور	
۷۸	ستارگان FU جیاری	
۷۹	ستارگان Ac/Be هریگ	
۷۹	اجرام هریگ-هارو	

۷۹	ستارگان جوان با قرص‌های محیط ستاره‌ای
۸۲	قرص‌های پیش‌ستاره‌ای یونیزه
۸۲	تشکیل قرص‌های محیط ستاره‌ای
۸۴	منابع پیشنهادی برای مطالعه
۸۶	مسائل

فصل ۱۳

۹۰	۱-۱۳ تحول در رشته‌ی اصلی
۹۰	مقیاس‌های زمانی تحول ستاره‌ای
۹۰	وسعت رشته‌ی اصلی
۹۰	تحول رشته‌ی اصلی کم جرم
۹۴	حد شونبرگ-چاندراسخار
۹۵	گاز الکترون تنه‌گین
۹۵	تحول رشته‌ی اصلی ستارگان پُر جرم
۹۶	استنتاج حد شونبرگ-چاندراسخار
۹۸	۲-۱۳ مراحل آخرین تحول ستاره‌ای
۹۹	تحول در خارج از رشته‌ی اصلی
۱۰۰	انشعاب زیرغول
۱۰۱	انشعاب غول سرخ
۱۰۲	رأس غول سرخ
۱۰۲	درخش هسته‌ی هلیومی
۱۰۳	انشعاب افقی
۱۰۳	انشعاب اولیه‌ی غول مجانبی
۱۰۴	انشعاب غول تپ گرمایی مجانبی
۱۰۶	لاروبی سوم و ستارگان کربنی
۱۰۷	فرایند هسته‌زایی S
۱۰۷	اُفت جرم و تحول AGB
۱۰۹	انشعاب غول پسمانجانبی
۱۱۰	سحابی‌های سیاره‌ای
۱۱۲	۳-۱۳ خوشه‌های ستاره‌ای
۱۱۳	ستارگان جمعیت I، II و III
۱۱۳	خوشه‌های کروی و خوشه‌های کهکشانی (باز)

۱۱۴	اختلاف منظر طیفی
۱۱۴	نمودارهای قدر-رنگ
۱۱۵	هم‌زمان‌ها و سن خوشه‌ها
۱۱۶	شکاف هرتشپرونگ
۱۱۶	تعداد نسبتاً کم ستارگان AGB و پسا AGB
۱۱۷	آوارگان آبی
۱۱۷	پژوهش در دست انجام
۱۱۸	منابع پیشنهادی برای مطالعه
۱۱۹	مسائل

فصل ۱۴

۱۲۲	۱-۱۴ رصدهای ستارگان تپنده
۱۲۳	رابطه‌ی درخشندگی-دوره تناوب
۱۲۶	فرضیه‌ی تپش برای تغییرات درخشندگی
۱۲۷	نوار ناپایداری
۱۲۸	دسته‌بندی‌هایی از ستارگان تپنده
۱۲۹	۲-۱۴ فیزیک تپش ستاره‌ای
۱۲۹	رابطه‌ی دوره تناوب-چگالی
۱۳۰	مُد‌های شعاعی تپش
۱۳۱	ماشین حرارتی ترمودینامیکی ادینگتون
۱۳۲	مکانیسم هسته‌ای ϵ
۱۳۳	سوپاپ ادینگتون
۱۳۳	اثرات کدری و مکانیسم‌های κ و γ
۱۳۴	مناطق یونش جزئی هلیوم و هیدروژن
۱۳۵	ستارگان بتا قیفاووسی و برآمدگی کدری آهن
۱۳۵	۳-۱۴ مدل‌سازی تپش ستاره‌ای
۱۳۵	مدل‌های هیدرودینامیکی غیر خطی
۱۳۶	خطی کردن معادلات هیدرودینامیک
۱۳۸	محاسبات غیربی‌دررو و غیرخطی
۱۳۸	پایداری دینامیکی
۱۳۹	۴-۱۴ تپش ستاره غیرشعاعی
۱۳۹	نوسانات غیرشعاعی و توابع هارمونیک کروی
۱۴۰	مُد‌های P و f

۱۴۰	فرکانس آکوستیک	
۱۴۱	مُد های g	
۱۴۱	فرکانس شناوری برانت-وایسالا	
۱۴۳	مُد های g و p به عنوان کاوشگرهای ساختار ستاره‌ای	
۱۴۳	خورلزده‌شناسی و اختزلرزه‌شناسی	۵-۱۴
۱۴۴	نوسانات خورشیدی پنج دقیقه‌ای	
۱۴۵	چرخش دیفرانسیلی و منطقه‌ی همرفت خورشید	
۱۴۵	آزمون ترکیب	
۱۴۵	کاوش اعماق داخل	
۱۴۶	ایجاد نوسانات خورشیدی	
۱۴۶	ستارگان دلتا سپر و ستارگان Ap: زمان سریع	
۱۴۷	منابع پیشنهادی برای مطالعه	
۱۴۸	مسائل	

فصل ۱۵

۱۵۴	تحول پسارشته‌ی اصلی ستارگان پُرجرم	۱-۱۵
۱۵۴	متغیرهای آبی درخشان	
۱۵۶	ستارگان ولف-رایت	
۱۵۷	شیمای کلی تحول برای ستارگان پُرجرم	
۱۵۸	حد درخشندگی هامفریز-دیویدسون	
۱۵۸	دسته‌بندی آبرنواخترها	۲-۱۵
۱۶۰	دسته‌بندی‌های آبرنواختر	
۱۶۳	آبرنواخترهای رُمبش هسته‌ای	۳-۱۵
۱۶۳	مکانیسم آبرنواختری رُمبش-هسته‌ای	
۱۶۶	بقایای ستاره‌ای آبرنواختر هسته-رُمبشی	
۱۶۷	منحنی‌های نور و واپاشی رادیواکتیو خروجی‌ها	
۱۶۹	ماهیت زیر-درخشان SN 1987A	
۱۶۹	بقایای آبرنواختر	
۱۷۱	شناسایی نوترینوها در SN 1987A	
۱۷۲	در جستجوی بقایای متراکم SN 1987A	
۱۷۲	نسبت‌های فراوانی شیمیایی در عالم	

۱۷۳	۴-۱۵	فوران‌های پرتو گاما
۱۷۴		آیا منابع GRB درون کهکشانی هستند یا برون کهکشانی؟
۱۷۷		دو دسته از GRB
۱۷۷		آبرنواخترهای هسته-رُمبشی و GRB های بلند-نرم
۱۷۷		مدل‌های GRB بلند-نرم
۱۷۹	۵-۱۵	پرتوهای کیهانی
۱۷۹		ذرات باردار فضایی
۱۸۰		منابع پرتوهای کیهانی
۱۸۳		منابع پیشنهادی برای مطالعه
۱۸۵		مسائل

فصل ۱۶

۱۸۸	۱-۱۶	کشف شعرای یمانی B
۱۸۹	۲-۱۶	کوتوله‌های سفید
۱۹۰		دسته‌های ستارگان کوتوله‌ی سفید
۱۹۰		شرایط مرکزی کوتوله‌های سفید
۱۹۱		ترکیب سطحی و طیف
۱۹۱		کوتوله‌های سفید تپنده
۱۹۳	۳-۱۶	فیزیک ماده‌ی تبهگن
۱۹۳		اصل طرد پاولی و تبهگنی الکترون
۱۹۳		انرژی فرمی
۱۹۵		شرط تبهگنی
۱۹۶		فشار تبهگنی الکترون
۱۹۸	۴-۱۶	حد چاندراسیخار
۱۹۸		رابطه‌ی جرم-حجم
۱۹۹		ناپایداری دینامیکی
۱۹۹		تخمین حد چاندراسیخار
۲۰۰	۵-۱۶	سرمایش کوتوله‌های سفید
۲۰۰		ترابرد انرژی
۲۰۲		مقیاس زمانی سرمایش
۲۰۳		تغییر درخشندگی در طول زمان
۲۰۴		تَبَلُور

۲۰۴	مقایسه‌ی نظریه با مشاهدات	
۲۰۵	ستارگان نوترونی	۶-۱۶
۲۰۵	تبه‌گنی نوترون	
۲۰۶	جگالی ستاره‌ی نوترونی	
۲۰۶	معادله‌ی حالت	
۲۰۸	مدل‌های ستارگان نوترونی	
۲۱۰	حد چاندراسیخار برای ستاره‌های نوترونی	
۲۱۰	چرخش سریع و پایداری تکانه‌ی زاویه‌ای	
۲۱۱	خطوط میدان مغناطیسی «منجمد»	
۲۱۲	دمای ستاره‌های نوترون	
۲۱۲	تپ‌آخترها	۷-۱۶
۲۱۴	ویژگی‌های کلی	
۲۱۴	مدل‌های احتمالی تپ‌آختر	
۲۱۵	تپ‌آخترها به عنوان ستاره‌های نوترونی چرخشی سریع	
۲۱۵	چمینگا	
۲۱۶	گواهی بر منشاء آبرنواختر هسته-رُمبشی	
۲۱۷	سینکروترون و تابش انحنای	
۲۱۷	منبع انرژی تابش سینکروترون خردچنگ	
۲۱۹	ساختار تپ‌ها	
۲۲۱	مدل پایه‌ی تپ‌آختر	
۲۲۳	همبستگی بین مشتق‌های دوره تناوب و رده‌های تپ‌آخترها	
۲۲۴	به‌سوی مدلی برای گسیل تپ‌آختر	
۲۲۵	مغناطیسارها و تکرارشونده‌های گامای نرم	
۲۲۶	منابع پیشنهادی برای مطالعه	
۲۲۸	مسائل	

فصل ۱۷

نسبیت عام و سیاه‌چاله‌ها

۲۳۴	نظریه‌ی عام نسبیت	۱-۱۷
۲۳۴	انحنای فضا-زمان	
۲۳۷	اصل هم‌ارزی	
۲۴۰	خمیدگی نور	
۲۴۱	انتقال به سرخ‌گرانشی و اتساع زمان	

۲۴۴	بازدها و ژئودزیک‌ها	۲-۱۷
۲۴۵	جهان خطاها و مخروط‌های نور	
۲۴۶	بازدهای فضا-زمان، ویژه زمان و ویژه فاصله	
۲۴۸	متریک فضا-زمان تخت	
۲۵۰	فضا-زمان منحنی و متریک شوارتزشیلد	
۲۵۲	مدار ماهواره	
۲۵۴	سیاهچاله‌ها	۳-۱۷
۲۵۴	شعاع شوارتزشیلد	
۲۵۶	سفری به سیاهچاله	
۲۵۸	گستره‌های جرم سیاهچاله‌ها	
۲۵۹	سیاهچاله‌ها مو ندارند!	
۲۵۹	کشیدگی چارچوب فضا-زمان	
۲۶۱	تونل‌هایی در فضا-زمان	
۲۶۲	کاندیداهای سیاهچاله‌ی جرم ستره‌ای	
۲۶۳	تابش هاوکینگ	
۲۶۵	منابع پیشنهادی برای مطالعه	
۲۶۶۰	مسائل	

فصل ۱۸

۲۷۴	گرانش در منظومه‌های ستاره‌ای دوتایی همبسته	۱-۱۸
۲۷۴	نقاط لاگرانژی و سطوح هم پتانسیل	
۲۷۷	گونه‌های منظومه‌های ستاره‌ای دوتایی	
۲۷۸	آهنگ تراژد جرم	
۲۸۰	قرص‌های برآفرایشی	۲-۱۸
۲۸۱	نمایه‌ی دما و درخشندگی	
۲۸۳	حد شعاعی قرص برآفرایشی	
۲۸۴	ستارگان دوتایی نیمه‌مجزای گرفتی	
۲۸۵	بررسی ستارگان دوتایی برهم‌کنشی	۳-۱۸
۲۸۵	اثرات انتقال جرم	
۲۸۶	تحول یک منظومه‌ی دوتایی	
۲۸۸	گونه‌های منظومه‌های دوتایی برهم‌کنش کننده	
۲۸۹	کوتوله‌های سفید در دوتایی‌های نیمه‌مجزا	۴-۱۸
۲۸۹	متغیرهای طغیانی	

۲۹۰	نواخترهای کوتوله	
۲۹۲	تغییرات آهنگ انتقال جرم	
۲۹۴	نواخترهای کلاسیک	
۲۹۸	قطبی‌ها: پرتوهای ایکس منظومه‌های کوتوله‌ی سفید	
۲۹۹	ابرنواخترهای گونه‌ی Ia	۵-۱۸
۲۹۹	مشاهدات	
۳۰۰	مدل‌های ابرنواخترهای گونه‌ی Ia	
۳۰۱	ستارگان نوترونی و سیاهچاله‌های در دوتایی‌ها	۶-۱۸
۳۰۲	تشکیل دوتایی‌ها با ستاره‌های نوترونی یا سیاهچاله‌ها	
۳۰۲	گیراندازی ستاره‌های نوترونی منزوی	
۳۰۳	تپ اخترهای دوتایی پرتو ایکس	
۳۰۵	قیاس قطبی در یک منظومه‌ی ستاره‌ی نوترونی	
۳۰۵	تپ اختر پرتو ایکس دوتایی گرفتی	
۳۰۷	فَورانی‌های پرتو ایکس	
۳۰۸	دوتایی‌های پرتو ایکس کم‌جرم و پُر جرم	
۳۰۹	SS 433	
۳۱۰	سرنوشت منظومه‌های دوتایی پرتو ایکس	
۳۱۰	تپ اخترهای رادیویی میلی ثانیه‌ای	
۳۱۲	تپ اخترهای بیوه‌ی سیاه	
۳۱۳	دوتایی‌های ستاره‌ی نوترونی دوگانه	
۳۱۵	انفجارهای پرتو گامای کوتاه-سخت	
۳۱۶	منابع پیشنهادی برای مطالعه	
۳۱۸	مسائل	

پیوست‌ها

۳۱۶	منابع پیشنهادی برای مطالعه
۳۲۴	پیوست الف: ثابت‌های نجومی و فیزیکی
۳۲۸	پیوست ب: تبدیل واحدها
۳۳۰	پیوست ج: داده‌های منظومه شمسی
۳۳۲	پیوست د: صورت‌های فلکی
۳۳۵	پیوست ز: روشن‌ترین ستارگان
۳۳۷	پیوست ز: نزدیک‌ترین ستارگان

- پیوست ح: فهرست مسیه ۳۴۳
- پیوست خ: constant، مازول برنامه‌نویسی ۳۴۷
- پیوست د: Orbits، کُد مدار سیاره‌ای ۳۴۸
- پیوست ک: TwoStars، کُد ستارگان دوتایی ۳۴۹
- پیوست ل: StatStar، کُد ساختار ستاره‌ای ۳۵۳
- پیوست م: Galaxy، کُد اندرکنش کشندی ۳۵۶
- پیوست ن: داده‌های WMAP ۳۵۹
- منابع پیشنهادی ۳۶۱