



جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

بسمه تعالی



دانشگاه تبریز

تاریخ: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷

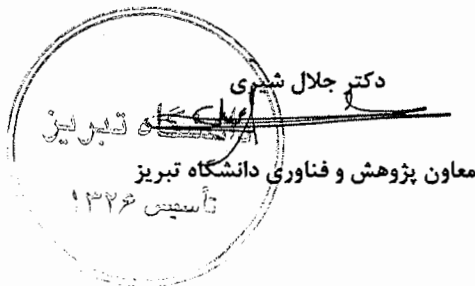
شماره: ۳۴۳۴/ص

پیوست: دارد

معاونان محترم پژوهش و فناوری دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزش عالی تحت پوشش وزارت عتف

با سلام و احترام

اخیراً کتاب «نقش دانشگاهیان دانشگاه تبریز در دفاع مقدس جلد دوم» تدوین و گردآوری آقای دکتر محمدعلی پرغو و کتاب «مقدمه‌ای بر اخترفیزیک ستاره‌ای» نوشته فرانسویس لی‌بلانک و ترجمه آقای دکتر حسین عبادی و محمد احمدی توسط انتشارات دانشگاه تبریز به زیور طبع آراسته شده است. به پیوست طرح روی جلد و صفحات مقدماتی این کتاب جهت اطلاع‌رسانی و بهره‌برداری لازم تقدیم حضور می‌گردد. امید است این اثر یاری‌رسان استادان، دانشجویان و پژوهشگران باشد. لطفاً دستور فرمایید در صورت درخواست نسخه‌هایی از این عنوان، با شماره تلفن‌های ۳۳۳۴۲۵۶۲-۳۳۳۴۲۵۶۲ و ۳۳۳۹۲۶۶۹-۳۳۳۹۲۶۶۹ (۰۴۱) تماس حاصل شود.



دکتر جلال شیری

دانشگاه تبریز

معاون پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز

تأسیسی ۱۳۲۲

سایت اینترنتی: www.tabrizu.ac.ir

تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز، حوزه ریاست / کدپستی: ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱

پست الکترونیکی: webmaster@tabrizu.ac.ir

تلفن: ۰۴۱-۲۲۲۴۱۳۰۴ - ۲۲۲۴۱۳۰۰ - ۲۲۲۴۱۳۰۰۰ - ۲۲۲۴۱۳۰۰۰ - ۲۲۲۴۴۰۱۲ - ۰۴۱ - دورنگار: ۰۴۱-۲۲۲۴۴۰۱۲

STELLAR ASTROPHYSICS

Francis LeBlanc

Translated by

Dr. Hossein Ebadi

Associate Professor, Faculty of Physics, University of Tabriz

Mohammad Ahmadi

Researcher of Astrophysics, University of Tabriz

مقدمه ای بر

اختر فیزیک ستاره ای

فرانسیس لی بلانک

ترجمه

دکتر حسین عبادی

دانشیار دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز

محمد احمدی

پژوهشگر اختر فیزیک دانشگاه تبریز





مقدمه ای بر اخترفیزیک ستاره‌ای

فرانسیس. لی. بلانک

ترجمه

دکتر حسین عبادی

دانشیار دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز

محمد احمدی

پژوهشگر اخترفیزیک دانشگاه تبریز

انتشارات دانشگاه تبریز

تبریز - ۱۴۰۰

سروشنامه: لی بلانک، فرانسیس / Leblanc, Francis

عنوان و نام پدیدآورنده: مقدمه‌ای بر اخترفیزیک ستارهای/فرانسیس لی بلانک؛ ترجمه حسین عبادی، محمد احمدی؛ ویراستار محمدعلی موسی‌زاده.
مشخصات نشر: تبریز: دانشگاه تبریز، ۱۴۰۰.

مشخصات ظاهری: ۳۹۸ ص: مصور، جدول، نمودار.

فروست: انتشارات دانشگاه تبریز؛ ۸۰۵.

شابک: ۶ - ۶ - ۷۷۱۱ - ۶۲۲ - ۹۷۸

وضعیت فهرست نویسی: فیبا

عنوان اصلی: An Introduction to Stellar Astrophysics

یادداشت: کتابنامه.

موضوع: ستاره‌ها

موضوع: Stars

موضوع: فیزیک نجومی

موضوع: Astrophysics

شناسه افزوده: عبادی، حسین، ۱۴۰۰ - ۱۳۵۴، مترجم

شناسه افزوده: احمدی، محمد، ۱۳۷۲، مترجم

شناسه افزوده: دانشگاه تبریز

شناسه افزوده: University of Tabriz

رده‌بندی کنگره: Q B ۸۰۱

رده‌بندی دیویی: ۵۲۸/۸

شماره کتاب‌شناسی ملی: ۸۴۸۵۴۹۰

اطلاعات رگوردشناسی: فیبا



عنوان: مقدمه‌ای بر اخترفیزیک ستاره‌ای

تالیف: فرانسیس لی بلانک

ترجمه: دکتر حسین عبادی، محمد احمدی

ویراستار: دکتر محمدعلی موسی‌زاده

ناشر و فروست: انتشارات دانشگاه تبریز، ۸۰۵

تاریخ و نوبت چاپ: شهریور ۱۴۰۰ - اول

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

شابک: ۶ - ۶ - ۷۷۱۱ - ۶۲۲ - ۹۷۸

قیمت: ۸۸۰۰۰۰ ریال

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: اداره چاپ دانشگاه تبریز

طراح جلد: مهدی پور احمدی

سایت: <http://pprs.tabrizu.ac.ir>

این اثر مشمول قانون حمایت از مولفان، مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است. هر شخص حقیقی یا حقوقی که تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر

منتشر، پخش، عرضه، تکثیر یا تجدید چاپ نماید مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز، تلفن: ۰۴۱۳۳۳۹۲۶۵۵ و ۰۴۱۳۳۳۹۵۰۰۱، نمایه: ۰۴۱۳۳۳۹۴۱۱۹

به یاد حسین عزیزم...

هر آغازی را پایانی است

هر درودی را بدرودی

هر وصلی را هجری

و هر بهاری را خزانی

با تو هنوز ناگفته‌های بسیار دارم . می‌خواهم برایت از بغض نبودن‌هایت بگویم. هیچ میدانستی که تمامی روزهایمان با لبخند پُرمهر و نگاه مهربانت آفتابی بود؟! با رفتنت آنچه سرنوشت در من جا گذاشت، آهی به وسعت دل پاک و اخلاق نیکویت بود.

دلتنگی این روزهایم را با مرور خاطرات سپری می‌کنم. سال‌ها تلاش بی‌وقفه‌ات در راه پیشرفت علم که همراه با اخلاقی نیک و شرافتمندانه بود، چنان بر وجود من و امثالم نقش بسته که فراموشیت بسیار دشوار است. درنهایت ناباوری، باورم شده که دیگر در میان ما نیستی و ما را با خیال خواب شیرینت تنها گذاشتی. به پیروی از منش نیکویت، کمر به تلاش در وادی علم بسته و همواره مهربانی و صداقت سرلوحه کارم خواهد بود.

محمد احمدی

پیش‌گفتار مترجمان

به‌حرات می‌توان گفت که کتاب مقدمه‌ای بر اخترفیزیک ستاره‌ای، نوشته فرانسس.لی.بلانک یکی از بهترین کتاب‌های مرجع مقدماتی در زمینه اخترفیزیک ستاره‌ای است. همچنین مطالب این کتاب می‌تواند برای اغلب زمینه‌های مطالعاتی فیزیک از جمله؛ فیزیک ذرات بنیادی، اتمی و مولکولی، هسته‌ای و ... مورد استفاده قرار گیرند. شاید بارزترین ویژگی این کتاب، نثر روان و سلیس آن باشد. متن کتاب به‌گونه‌ای است که هر دانشجوی اخترفیزیک می‌تواند حتی به‌صورت خودخوان، اغلب مطالب آن‌را فرا گیرد. از دیگر ویژگی‌های این کتاب که آنرا از سایر کتاب‌های مشابه خود متمایز می‌کند، ارائه مثال‌ها، تصاویر و جداول گوناگون در هر فصل است تا خواننده بتواند مطالب را با درک عمیق‌تری فرا بگیرد. همچنین در پایان هر فصل بسته به نیاز، تمریناتی از سطوح پایه تا پیشرفته نیز گنجانده شده تا هم محکی برای آزمودن یادگیری مطالب فصل باشد و هم اینکه مطلب به‌طور کامل و کاربردی در ذهن خواننده نقش ببندد.

در ترجمه این کتاب سعی و تلاش مترجمان بر این بوده که شرط امانت رعایت گردد. همچنین تا جایی که مقدور بوده، از واژگان لاتین پرهیز و به جای آن معادل فارسی آن‌ها در ترجمه کتاب گنجانده شده است. امید است که این خدمت ناچیز، گامی در جهت پیشرفت جامعه‌ی علمی کشورمان باشد و موردپسند واقع گردد.

دکتر حسین عبادی

محمد احمدی

پیش‌گفتار مؤلف

این کتاب درسی به‌منظور استفاده دانشجویانی که برای اولین بار اخترفیزیک ستاره‌ای را دنبال می‌کنند، طراحی می‌شود. هدف این کتاب، بیشتر دانشجویان پیشرفته‌ی کارشناسی در رشته‌ی فیزیک یا برنامه‌های نجوم است. همچنین این کتاب می‌تواند به‌عنوان مرجعی پایه برای محققانی که در زمینه‌های دیگری غیر از اخترفیزیک ستاره‌ای کار می‌کنند، به‌کارگرفته شود.

این کار یک دایره‌المعارف در طبیعت نیست، بنابراین، برای مثال، انواع ستارگان موجود در جهان را پوشش نمی‌دهد بلکه تمایل به ارائه دانش متوسطی از ستارگان در قالب نسبتاً مختصر دارد. تمرکز این کتاب بیشتر روی تشریح عملکرد ستارگان با استفاده از مفاهیم پایه‌ای فیزیک و نتایج رصدی است. بیش‌تر نمودارها و تصاویر این کتاب، به‌منظور ارائه‌ی بهتر مفاهیم، قرار داده شده است. در این کتاب تنها داده‌های ضروری نجومی ارائه شده‌اند و بخشی از نتایج رصدی بنابر قرارداد، در بیان‌ها محدود شده‌اند چرا که تعداد کثیری از داده‌های رصدی برای مبتدیان رشته اخترفیزیک می‌تواند ملال‌آور و غیرمفید باشد.

این کتاب در حیطه نیاز دانشجویان نوشته شده است؛ گر چه دانشجویانی که از این منبع استفاده می‌کنند باید تمامی مفاهیم فیزیکی مورد نیاز را برای پژوهش اخترفیزیک ستاره‌ای دیده باشند. با این حال، بازگویی‌های مختصری از موارد مهم‌تر ارائه شده است. این کار نه تنها برای دانشجویان نجوم بلکه برای دانشجویان در یک برنامه فیزیک نیز می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. هدف این کتاب شرح واضحی از اخترفیزیک ستاره‌ای است و به‌گونه‌ای نوشته شده که یک دانشجوی فیزیک یا نجوم بتواند با اندکی کمک و یا هیچ کمکی از کسی، آن را بخواند و درک کند. در سرتاسر کتاب مثال‌های مفصلی برای کمک به درک بهتر خواننده از مفاهیم مهم‌تر ارائه شده است. فهرستی از تمرین‌ها در پایان هر فصل ارائه و به‌طور انتخابی، پاسخ‌هایی برای آن‌ها داده شده است. همچنین خلاصه‌ای برای هر فصل ارائه شده است.

در کتاب، بخش‌های کوتاه تاریخی نیز برای ارائه چشم‌اندازی از تاریخچه اکتشافات مختلف، به‌همراه ارائه سپاس‌گزاری‌های شایسته از محققانی که این پیشرفت‌ها را ممکن ساخته‌اند، اضافه شده است. برای یک مرور کامل

تاریخی از اختر فیزیک ستاره‌ای، خواننده به؛ تاریخچه‌ی مختصری از فیزیک خورشید و ستاره‌ای دانشگاه پرینستون نوشته جی تاسل در سال (۲۰۰۴)، ارجاع داده می‌شود.

این کتاب به هفت فصل تقسیم شده است: مفاهیم پایه، تشکیل ستاره‌ای، انتقال تابشی در ستارگان، اتمسفر ستاره‌ای، درون ستاره‌ای، هسته‌زایی و تحول ستاره‌ای و ستارگان خاص شیمیایی و انتشار. موضوعاتی که در فصل آخر این کتاب دیده می‌شوند به ندرت در چنین کتاب‌های درسی ارائه می‌گردند و این ویژگی کتاب حاضر را از دیگر کتاب‌های اخترفیزیک ستاره‌ای متمایز می‌کند. این فصل شامل مفاهیم زیادی است که در سرتاسر کتاب دیده می‌شود.

این کتاب به محتوای اصلی (حدوداً ۷۵ درصد) که برای آگاهی از ستارگان بسیار ضروری است و محتوای اختیاری (در حدود ۲۵ درصد) تقسیم شده است. همچنین برخی از قسمت‌های اختیاری این کتاب، شامل موضوعات پیشرفته‌تر است. بخش‌های مشخص شده با † اختیاری هستند و مواردی که با † † مشخص شده‌اند، قسمت‌های اختیاری هستند که شامل موضوعات پیشرفته‌تر می‌باشند. این بخش‌ها می‌توانند بدون دخالت در روند عادی موضوعات اصلی، حذف شوند.

این کتاب اساساً، برای پوشش دادن جنبه‌های با اهمیت اخترفیزیک ستاره‌ای برای دوره‌ی یک ترم (یا نیم‌سال) طراحی شده است. با این وجود، کتاب حاضر برای ارائه در طول یک ترم تا حدودی طولانی است. بنابراین استاد می‌تواند تعدادی از بخش‌های اختیاری یا قسمت‌های پیشرفته را مطابق با طول دوره مدنظر، حذف کند. برخی از دانشگاه‌ها دو دوره یک‌ترمی مقدماتی (یا یک دوره یک ساله کامل) را برای اخترفیزیک ستاره‌ای در نظر می‌گیرند. معمولاً یک دوره درباره اتمسفرهای ستاره‌ای و نصف آن مربوط به ساختار و تحول ستاره‌ای می‌باشد. این کتاب می‌تواند به عنوان کتاب مرجع اصلی برای هر دو دوره مورد استفاده قرار بگیرد. فصل‌های ۱ و ۳ و ۴ همراه با سه بخش اول از فصل ۲ به عنوان یک دوره‌ی اتمسفر ستاره‌ای ارائه می‌شود، درحالی که مابقی فصل ۲ و فصل ۵ و فصل ۶ می‌تواند به عنوان دوره تحول و درون ستاره‌ای ارائه شود. همچنین فصل ۷ می‌تواند در پایان هر یک از این دوره‌ها مورد مطالعه قرار گیرد.

این کتاب همچنین می‌تواند به عنوان مرجع اصلی برای اولین دوره اخترفیزیک ستاره‌ای در سطح پیشرفته لیسانس استفاده شود که استاد می‌تواند متون انتخابی اضافی را برای دانشجویان برگزیند تا درک خود را از موضوعات خاص، تقویت کنند.

فرانسیس لی بلانک

مونکتون، کانادا

اُکتبر ۲۰۰۹

فهرست مطالب

| | | |
|----|-------------------------------|-----|
| ۱۷ | مفاهیم پایه | ۱ |
| ۱۷ | مقدمه | ۱.۱ |
| ۲۰ | طیف الکترومغناطیسی | ۲.۱ |
| ۲۲ | تابش جسم سیاه | ۳.۱ |
| ۲۶ | تابندگی، دمای موثر، شار و قدر | ۴.۱ |
| ۳۱ | معادلات بولتزمن و ساها | ۵.۱ |
| ۴۱ | رده‌بندی طیفی ستارگان | ۶.۱ |
| ۴۸ | نمودار هرتسپرانگ - راسل | ۷.۱ |
| ۵۳ | خلاصه | ۸.۱ |
| ۵۵ | تمرینات | ۹.۱ |
| ۵۹ | تشکیل ستاره‌ای | ۲ |
| ۵۹ | مقدمه | ۱.۲ |
| ۶۰ | تعادل هیدرواستاتیکی | ۲.۲ |
| ۶۵ | قضیه ویریالگی | ۳.۲ |
| ۷۱ | معیار جینز | ۴.۲ |
| ۷۷ | زمان سقوط آزاد † | ۵.۲ |
| ۸۰ | تحول پیش از رشته اصلی † | ۶.۲ |
| ۸۳ | خلاصه | ۷.۲ |
| ۸۴ | تمرینات | ۸.۲ |

| | | |
|-----|-----------------------------------|--------|
| ۸۷ | انتقال تابشی در ستارگان | ۳ |
| ۸۷ | مقدمه | ۱.۳ |
| ۸۸ | کدری‌های تابشی | ۲.۳ |
| ۸۸ | برهمکنش ماده - تابش | ۱.۲.۳ |
| ۹۱ | انواع کدری‌های تابشی | ۲.۲.۳ |
| ۹۶ | شدت خاص و ممان تابشی | ۳.۳ |
| ۱۰۴ | معادله انتقال تابشی | ۴.۳ |
| ۱۰۹ | تبادل ترمودینامیکی موضعی | ۵.۳ |
| ۱۱۰ | حل معادله انتقال تابشی | ۶.۳ |
| ۱۲۰ | تبادل تابشی | ۷.۳ |
| ۱۲۲ | انتقال تابشی در عمق‌های نوری بزرگ | ۸.۳ |
| ۱۲۵ | کدری رزُلند و دیگر کدری‌های متوسط | ۹.۳ |
| ۱۲۸ | معادلات شوارزشیلد - میلن † | ۱۰.۳ |
| ۱۳۰ | اثبات معادله انتقال تابشی † | ۱۱.۳ |
| ۱۳۲ | شتاب تابشی ماده و فشار تابشی † | ۱۲.۳ |
| ۱۳۲ | شتاب تابشی ماده | ۱.۱۲.۳ |
| ۱۳۵ | فشار تابشی | ۲.۱۲.۳ |
| ۱۳۷ | خلاصه | ۱۳.۳ |
| ۱۳۸ | تمرینات | ۱۴.۳ |
| ۱۴۳ | اتمسفرهای ستاره‌ای | ۴ |
| ۱۴۳ | مقدمه | ۱.۴ |
| ۱۴۴ | اتمسفر خاکستری | ۲.۴ |
| ۱۴۵ | نمایه دما در اتمسفر خاکستری | ۱.۲.۴ |
| ۱۵۱ | شار تابشی در اتمسفر خاکستری †† | ۲.۲.۴ |
| ۱۵۴ | کدری و پهن‌شدگی خط | ۳.۴ |
| ۱۵۵ | پهن‌شدگی طبیعی | ۱.۳.۴ |
| ۱۵۷ | پهن‌شدگی دوپلر | ۲.۳.۴ |
| ۱۶۶ | پهن‌شدگی فشار | ۳.۳.۴ |

| | | |
|-----|--|-------|
| ۱۷۰ | گسیل تحریکی و میزرها | ۴.۳.۴ |
| ۱۷۲ | ضرایب انیشتین †† | ۵.۳.۴ |
| ۱۷۴ | پهنای معادل و تشکیل خطوط اتمی | ۴.۴ |
| ۱۷۵ | پهنای معادل | ۱.۴.۴ |
| ۱۷۷ | تشکیل خطوط اتمی ضعیف | ۲.۴.۴ |
| ۱۸۰ | منحنی رشد † | ۳.۴.۴ |
| ۱۸۱ | مدل سازی اتمسفری | ۵.۴ |
| ۱۸۲ | داده‌های ورودی و تقریب‌ها | ۱.۵.۴ |
| ۱۸۳ | الگوریتم برای مدل سازی اتمسفری †† | ۲.۵.۴ |
| ۱۸۷ | مثالی از مدل اتمسفر ستاره‌ای | ۳.۵.۴ |
| ۱۹۰ | روش تصحیح دما †† | ۴.۵.۴ |
| ۱۹۱ | خلاصه | ۶.۴ |
| ۱۹۲ | تمرینات | ۷.۴ |
| ۱۹۵ | ۵ فضای درون ستاره‌ای | |
| ۱۹۵ | مقدمه | ۱.۵ |
| ۱۹۶ | معادلات ساختار ستاره‌ای | ۲.۵ |
| ۱۹۶ | معادله تعادل هیدرواستاتیک | ۱.۲.۵ |
| ۱۹۷ | معادله پایستگی جرم | ۲.۲.۵ |
| ۱۹۹ | معادله‌ی انتقال انرژی | ۳.۲.۵ |
| ۲۰۱ | معادله پایستگی انرژی | ۴.۲.۵ |
| ۲۰۲ | سایر موارد مورد نیاز | ۵.۲.۵ |
| ۲۰۵ | انتقال انرژی در ستارگان | ۳.۵ |
| ۲۰۵ | شار تابشی تک‌رنگ در فضای درون ستاره‌ای | ۱.۳.۵ |
| ۲۰۸ | هدایت | ۲.۳.۵ |
| ۲۰۹ | همرفت | ۳.۳.۵ |
| ۲۱۹ | مدل‌های پلی‌تروپیک | ۴.۵ |
| ۲۲۶ | ساختار خورشید | ۵.۵ |
| ۲۲۸ | معادله حالت | ۶.۵ |

| | | |
|-----|---|-------|
| ۲۲۸ | مقدمه | ۱.۶.۵ |
| ۲۳۰ | گاز ایده‌آل | ۲.۶.۵ |
| ۲۳۴ | تبهگنی | ۳.۶.۵ |
| ۲۳۶ | فشار تابشی | ۴.۶.۵ |
| ۲۳۷ | ستارگان متغیر و اختر لرزه‌شناسی | ۷.۵ |
| ۲۳۷ | ستارگان متغیر | ۱.۷.۵ |
| ۲۴۴ | اختر لرزه‌نگاری † | ۲.۷.۵ |
| ۲۴۹ | فیزیک پشت پرده‌ی روابط دوره تناوب - تابندگی † | ۳.۷.۵ |
| ۲۵۰ | خلاصه | ۸.۵ |
| ۲۵۱ | تمرینات | ۹.۵ |
| ۲۵۵ | هسته‌زایی و تحول ستاره‌ای | ۶ |
| ۲۵۵ | مقدمه | ۱.۶ |
| ۲۵۷ | کلیات مربوط به همجوشی هسته‌ای | ۲.۶ |
| ۲۶۲ | مدل‌های هسته † | ۳.۶ |
| ۲۶۲ | مدل قطره مایع | ۱.۳.۶ |
| ۲۶۶ | مدل پوسته‌ای | ۲.۳.۶ |
| ۲۶۹ | فیزیک پایه همجوشی هسته‌ای | ۴.۶ |
| ۲۷۱ | رشته اصلی سوزی | ۵.۶ |
| ۲۷۳ | زنجیره‌های پروتون - پروتون | ۱.۵.۶ |
| ۲۷۵ | چرخه‌های CNO | ۲.۵.۶ |
| ۲۷۹ | طول عمر ستارگان بر روی رشته اصلی | ۳.۵.۶ |
| ۲۸۱ | مسئله نوترینوی خورشیدی † | ۴.۵.۶ |
| ۲۸۶ | مرحله هیلیم سوزی | ۶.۶ |
| ۲۸۹ | هسته‌ای سوزی پیشرفته | ۷.۶ |
| ۲۹۰ | مرحله کربن سوزی | ۱.۷.۶ |
| ۲۹۱ | مرحله نئون سوزی | ۲.۷.۶ |
| ۲۹۱ | مرحله‌ی اکسیژن سوزی | ۳.۷.۶ |
| ۲۹۲ | مرحله سیلیکون سوزی | ۴.۷.۶ |

| | | |
|-----|---|--------|
| ۲۹۴ | مسیرهای تحولی در نمودار $H - R$ | ۸.۶ |
| ۲۹۴ | کلیات | ۱.۸.۶ |
| ۲۹۸ | تحول ستارگان کم جرم ($M_* \leq 0.5M_{\odot}$) | ۲.۸.۶ |
| ۳۰۰ | تحول ستاره $1M_{\odot}$: خورشید ما | ۳.۸.۶ |
| ۳۰۴ | تحول ستارگان پر جرم ($M_* \geq 10M_{\odot}$) | ۴.۸.۶ |
| ۳۰۸ | خوشه‌های ستاره‌ای | ۹.۶ |
| ۳۰۹ | جمعیت‌های ستاره‌ای، کهکشان‌ها و راه شیری | ۱.۹.۶ |
| ۳۱۲ | خوشه‌های باز | ۲.۹.۶ |
| ۳۱۳ | خوشه‌های کروی | ۳.۹.۶ |
| ۳۱۴ | سن خوشه‌های ستاره‌ای | ۴.۹.۶ |
| ۳۱۶ | فاصله تا ستارگان و خوشه‌های ستاره‌ای | ۵.۹.۶ |
| ۳۱۹ | بقایای ستاره‌ای | ۱۰.۶ |
| ۳۱۹ | کوتوله‌های سفید | ۱.۱۰.۶ |
| ۳۲۱ | ستارگان نوترونی، تپ‌اخترها و ستارگان مغناطیسی | ۲.۱۰.۶ |
| ۳۲۵ | سیاه چاله‌ها | ۳.۱۰.۶ |
| ۳۳۳ | نواختر و ابرنواختر † | ۱۱.۶ |
| ۳۳۹ | هسته‌زایی عناصر سنگین: فرایندهای s، r، p † | ۱۲.۶ |
| ۳۳۹ | فرآیندهای آهسته و سریع | ۱.۱۲.۶ |
| ۳۴۲ | فرآیند p | ۲.۱۲.۶ |
| ۳۴۴ | سطح مقطع و نرخ واکنش هسته‌ای †† | ۱۳.۶ |
| ۳۴۸ | خلاصه | ۱۴.۶ |
| ۳۴۹ | تمرینات | ۱۵.۶ |
| ۳۵۳ | ستارگان خاص شیمیایی و انتشار † | ۷ |
| ۳۵۳ | مقدمه و زمینه تاریخی | ۱.۷ |
| ۳۵۵ | ستارگان خاص شیمیایی | ۲.۷ |
| ۳۵۶ | ستارگان Am | ۱.۲.۷ |
| ۳۵۷ | ستارگان Ap | ۲.۲.۷ |
| ۳۵۸ | ستارگان $HgMn$ | ۳.۲.۷ |

| | | |
|-----|-------|---|
| ۳۵۹ | ۴.۲.۷ | ستارگان غیر طبیعی <i>He</i> |
| ۳۵۹ | ۳.۷ | نظریه انتشار اتمی †† |
| ۳۶۷ | ۴.۷ | شتاب‌های تابشی †† |
| ۳۷۳ | ۵.۷ | دیگر ساز و کارهای انتقال †† |
| ۳۷۴ | ۱.۵.۷ | رانش ناشی از نور |
| ۳۷۶ | ۲.۵.۷ | انتشار دو قطبی هیدروژن |
| ۳۷۷ | ۶.۷ | خلاصه |
| ۳۷۷ | ۷.۷ | تمرینات |
| ۳۸۱ | | آ ثابت‌های فیزیکی |
| ۳۸۳ | | ب یکاها در سیستم <i>SI</i> و <i>cgs</i> |
| ۳۸۵ | | پ ثابت‌های نجومی |
| ۳۸۷ | | ت انرژی‌های یونیزاسیون (در <i>eV</i>) برای پنج مرحله اول یونیزاسیون مهم‌ترین عناصر |
| ۳۸۹ | | ث فراوانی‌های خورشیدی برای مهم‌ترین عناصر |
| ۳۹۱ | | ج جرم‌های اتمی |
| ۳۹۳ | | چ پارامترهای فیزیکی برای ستارگان رشته اصلی |
| ۳۹۵ | | ح جدول تناوبی عناصر |