

بنگ ازباج و غفر

مقدمه‌ای بر

کیهان‌شناسی نوین

مؤلف

الدرولیدل

مترجمان

کامبیز خالقی

فرهاد ذکاوت

ویراستاران

مهران کمرپور

محسن ایرجی

انتشارات

۱۳۹۲

سرشناسه	: لیدل، اندرو آر، ۱۹۶۵-م
عنوان و پدیدآورنده	: Little, Andrew R. مقدمه‌ای بر کیهان‌شناسی نوین / مؤلف: اندرو لیدل
مشخصات نشر	: تهران: هیمة، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	: ۱۹۱ ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۱۳۰۰۰۰ ریال، 978-600-6060-33-0.
وضعیت فهرست نویسی	: فیا
پادداشت	: عنوان اصلی: AN introduction to modern cosmology, 2nd, c2003
موضوع	: کیهان‌شناسی
شناسه افزوده	: خالقی، کامبیز، ۱۳۶۹، مترجم.
شناسه افزوده	: ذکاوت، فرهاد، ۱۳۵۹، مترجم.
شناسه افزوده	: کرپور، مهران، ۱۳۴۵، ویراستار.
شناسه افزوده	: ایرجی، محسن، ۱۳۵۰، ویراستار.
رده‌بندی گنگره	: ۱۰۹۲ QB۹۸۱/۹۴۴۵
رده‌بندی دیویی	: ۵۲۳.۸
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۴۴۴۵۱



نام کتاب	: مقدمه‌ای بر کیهان‌شناسی نوین
مؤلف	: اندرو لیدل
مترجمان	: کامبیز خالقی - فرهاد ذکاوت
ویراستاران	: مهران کرپور - محسن ایرجی
ناشر	: هیمة
نوبت چاپ	: اول ۱۳۹۲
حروفچینی و صفحه آرایی	: گروه فنی انتشارات هیمة (پاک‌نژاد)
تیراژ	: ۱۰۰۰ نسخه
قیمت	: ۱۳۰۰۰ تومان
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۶۰۶۰-۳۳-۰

ISBN: 978-600-6060-33-0

آدرس دفتر مرکزی: خیابان انقلاب، خیابان کارگر جنوبی، نرسیده به خیابان لبافی‌نژاد، نبش کوچه شعله‌ور، پلاک ۴، واحد ۱، انتشارات هیمة - تلفن: ۴۱-۴۰ ۶۶۵ ۶۶۵ تلفکس: ۶۶۵۶۹۳۸۸

حق چاپ و نشر برای ناشر و مؤلفین محفوظ است و هرگونه نسخه‌برداری از آن پیگرد قانونی دارد.

پیشگفتار مؤلف

بدون شک پیشرفت کیهانشناسی یکی از پیروزی‌های علم در قرن بیستم شناخته خواهد شد. کیهانشناسی در ابتدای کار (به عنوان شاخه‌ای جدا) به سختی جزئی از علم به معنای پژوهشی آن به حساب می‌آمد اما کیهانشناسی انفجار بزرگ با توصیف قابل پذیرشی از عالم، این جایگاه را بدست آورد. امروزه تلسکوپهایی همچون تلسکوپ فضایی هابل می‌توانند نور کهکشانهای دور دست را دریافت کنند. این نورها به اندازه‌ی سن عالم در سفر بوده‌اند تا به ما برسند. در این سال‌ها میکروموج زمینه‌ی کیهانی که فسیلی از دوره‌های اولیه‌ی شکل‌گیری عالم است، آشکارسازی شد و بررسی ویژگی‌های آن را امکان‌پذیر ساخت. بدین ترتیب فهمیدیم که در زمان شروع گسیل میکروموج زمینه‌ی کیهانی، عالم چگال‌تر و داغ‌تر بود فلذا هم اکنون بدون شک عالم ما در حال انبساط است.

در حال حاضر در عصری قرار داریم که با بهبود فناوری‌های رصدی درک ما از کیهان به سرعت از نگاه کیفی به سوی درک کتی پیش می‌رود. شروع کار پروژه‌ی شبیه‌سازی هزاره (Millennium)، شروعی بر مدل استاندارد کیهانشناسی و بهترین توصیف برای عالم بود؛ ولی این مدل‌ها از وجود راز بزرگی خبر می‌دادند و آن چیزی نبود جز انبساط عالم. این مسئله ما را به سمت پاسخ دادن به سؤالاتی از قبیل خصوصیات ماده‌ی تاریک که به نظر می‌رسد ماده‌ی حاکم بر عالم است رهنمون کرد. از این رو پروژه‌هایی تعریف شد که در درک و به‌دست آوردن تصویری کلی عالم، به ما کمک کرد.

ادامه‌ی این تلاش‌ها در ساختار بررسی پروژه‌های کیهانشناسی، درک ما را از عالم پیرامون مان کامل‌تر کرده است. در سال‌های اخیر توجه روز افزونی به تدریس کیهانشناسی در دانشگاه‌ها شده است. همیشه و به صورت سنتی کیهانشناسی به عنوان یک سرفصل درسی تدریس می‌شده‌است من هم همین کار را در انتهای دوره‌های آموزشی نسبت عام با استنتاج متریک‌های مختلف برای انبساط عالم با چند مثال خاص حل می‌کردم. اما این روش تدریس مانع از دیده شدن زیبایی‌های ذاتی علم کیهانشناسی نوینی می‌شد که از فیزیک کلاسیک، ترمودینامیک، فیزیک اتمی، گرانش و کاربرد آن‌ها در مقیاس‌های بزرگ سرچشمه می‌گرفت. در واقع کتاب مقدمه‌ای بر کیهانشناسی نوین می‌تواند آوردگاهی با روش متفاوت و به دور از مسائل پیچیده‌ی نسبیت عامی باشد. در ادامه‌ی کتاب خواهید دید که با کمی خوش‌شانسی و تقلب، معادله‌های درست توصیف‌کننده‌ی عالم از گرایش خوبی هم درست مانند آن‌چه از فیزیک نسبیتی حاصل می‌شود؛ بدست می‌آیند. بنابراین به همین روش می‌توان تمام موفقیت‌های کیهانشناسی انفجار بزرگ داغ را بررسی کرد و حتی در مورد ایده‌های بیشتری چون کیهانشناسی تاریک گفت‌وگو کرد. پیش‌بینی سن عالم، انبساط عالم، تخمین فراوانی عناصر سبکی چون هلیوم، دوتریم و وجود میکروموج زمینه‌ی کیهانی از این دسته هستند.

متن این کتاب نخستین بار در سال ۱۹۹۸ به چاپ رسید و عملاً حاصل پیاده‌سازی یک دوره سخنرانی کوتاه (حدود ۲۰ سخنرانی) در دانشگاه ساسکس بود که برای دانشجویان سال آخر کارشناسی و سال آخر کارشناسی ارشد ارائه شده بود. بنابراین پیش‌نیازهای مطالعه‌ی این کتاب، همان فیزیک متداول دانشگاهی است و بیشتر با تأکید بر مفاهیم فیزیکی - ریاضیاتی تدریس شده در سال‌های اولیه‌ی دانشگاه نگاشته شده است. بعدها و پس از چاپ ویرایش اولیه‌ی این کتاب، به تدریج کیهانشناسی پیشرفت کرد و من متوجه شدم که باید موارد زیادی را به محتوای این کتاب اضافه کنم؛ در نتیجه این ویرایش دوم را آماده کردم. به طور خلاصه، تفاوت‌های ویرایش قبلی و این ویرایش،

مطالب بیشتر آن است که به روزتر هستند.

کیهانشناسی سرفصل جالبی برای تدریس است چراکه در علم کیهانشناسی هیچ درک آگاهانه‌ای از ساختار بندی بنیان‌ها بی‌چون و چرا وجود نداشته است. ترمودینامیک، الکترومغناطیس و حتی مکانیک کوانتوم و نسبیت عام از ابزار فیزیکی به کار رفته در مطالعات کیهانشناسی هستند. اما حتی با این وجود و با توجه به تصویر نه چندان واضحی که ما از عالم پیرمونمان در اختیار داریم بسیاری از جزئیات مبهم و بسیاری از پرسش‌ها بدون پاسخ باقی می‌مانند. هر قدر که درباره‌ی عالمی که در آن زندگی می‌کنیم بیشتر یاد می‌گیریم، دانش قبلی‌مان بیشتر تغییر می‌کند. در طول هر دوره‌ی آموزشی کیهانشناسی بیشتر در مورد نتایج جدید حاصل شده بحث می‌شود و کیهانشناسان، برداشت‌های جدید خودشان را ارائه می‌دهند. کیهانشناسی از جمله سرفصل‌هایی است که مدرس می‌تواند پیش داورهای خودش در مورد مشاهدات در حال تغییر را نیز در اختیار دانش‌پژوه قرار دهد. اگر دیدگاه من در مورد هر یک از مطالب مطرح شده در این کتاب تغییر کند مطمئناً جستجوگر گوگل منج مرا خواهد گرفت پس شما می‌توانید دیدگاه‌های کنونی و به روز شده‌ی مرا در مورد موضوعات این کتاب در صفحه‌ی وبگاه این کتاب بخوانید.

<http://astronomy.susx.ac.uk/andrewl/cosbook.html>

در این صفحه می‌توانید مشاهدات به روز شده و فهرستی از خطاهای این کتاب را که از آن‌ها اطلاع پیدا کرده‌ام، بیابید. اگر مطمئن شدید که شما هم اشتباهی در کتاب پیدا کرده‌اید که در این فهرست نیست، بسیار خرسند خواهم شد به من اطلاع دهید.

ساختار این کتاب یک ستون اصلی دارد که فصل‌های اصلی آن از ۱ تا ۱۵ هستند که حاصل ارائه‌ی مقدمات کیهانشناسی نوین در دانشگاه ساسیکس است. علاوه بر این فصل‌های اصلی، ۵ فصل نیز در بخش موضوعات پیشرفته اضافه کرده‌ام، که هر کدام پیش نیازهایی دارند. بهترین زمان برای مطالعه‌ی این موضوعات پیشرفته دقیقاً پس از پیش نیازهایی است که در ابتدای هر کدام اشاره کرده‌ام. در این جا باید از استیو ایلیس، کوئل هلیپر، لیندا اسمیت برای توضیحات مفصلی که منجر به بهتر شدن این ویرایش نسبت به نسخه‌ی قبلی‌اش شده است سپاسگزاری کنم و همچنین از همه‌ی کسانی که بر ویرایش قبلی نقدهایی داشتند بخصوص سینتیل روون، پدی لیهی، و البته تمام کارکنان انتشارات Wiley که در آماده‌سازی این کتاب نقش داشته‌اند، متیو کریس و مایکل ترنر و بریان اسمیت، که اجازه‌ی استفاده از سه شکل موجود در کتاب را در اختیار من قرار دادند. از مارتین هنری، سارترین کنتز و فرانتز شونک که مجوز استفاده از سه شکل دیگر را فراهم آوردند، و ناسا که دو تصویر را از Skyview برداشته‌ام نیز تشکر می‌کنم.

<http://skyview.gsfc.nasa.gov>

این صفحه بر وبسایت مرکز فضایی گودارد ناسا واقع شده است. برای این‌که هزینه چاپ کتاب را کم کنیم مجبور شدیم تصاویر رنگی را به صورت سیاه و سفید منتشر کنیم؛ ولی در سایت کتاب می‌توانید نمونه‌های رنگی آن‌ها را ببینید.

آندرو آر. لیدل

برایتون

فوریه ۲۰۰۳

پیشگفتار مترجمین

قرن بیست و یکم به یقین قرن فیزیک خواهد بود. دهه اول این قرن هرچند با پیش زمینه‌ی پیشرفت‌های ناگهانی قرن بیستم، ولی با نتایجی جدید و در مواردی تأیید کننده‌ی نظریه‌های قبلی در مدل استاندارد ذرات بنیادی و تعدادی از نظریه‌های کیهانشناسی همراه بوده است. بیش از چند دهه می‌شود که ذرات بنیادی و کیهانشناسی برای توصیف عالم اولیه و کنونی به ضرورت در کنار هم قرار گرفته‌اند. برای خواننده‌ای که در سطح مقدماتی با این دو شاخه‌ی ابعاد بزرگ و کوچک آشنا می‌شود، شاید چندان جالب نباشد که در بخش‌های مختلف این شاخه که در مواردی کاملاً به هم پیوسته‌اند، مدل‌های متنوعی برای توضیح یک پدیده یا توجیه نتایج حاصل از یک مدل یا آزمایش ارائه شوند.

ولی پیش از مطالعات پیشرفته و بسیار خاص یک موضوع، علاقه‌مندان بخصوص دانشجویان دوره کارشناسی، باید مبانی کنونی و ایده‌های پذیرفته شده را بفهمند و با ساختارهای بزرگ یا کوچک مقیاس آشنا شوند. در این کتاب، آندرو لیدل، نویسنده و کیهانشناس مشهور انگلیسی بیش از اینکه دیدگاه ذراتی داشته باشد، با نگاه نسبیتی به حل معادلات در ابعاد بزرگ مقیاس پرداخته و هر جا که لازم دیده از ذرات بنیادی و مبانی ساده آن‌ها نیز بهره گرفته است. توصیفات مربوط به عالم اولیه، فارغ از معروف به کرومودینامیک عالم، و بسیاری موارد دیگر که در کتاب می‌بینید، از این دسته هستند.

در حوزه‌ی کیهانشناسی کتاب‌های متعددی به زبان انگلیسی و این سال‌ها تعدادی نیز به زبان فارسی تألیف یا ترجمه شده‌اند. در این میان، آندرو لیدل، عضو هیئت علمی و استاد دپارتمان اخترشناسی و فیزیک دانشگاه ساسکس انگلستان، یکی از کتاب‌های مهم آموزشی و مقدماتی کیهانشناسی را نگاشته است. برای مطالعه‌ی کتاب حاضر به عنوان خودآموز یا کتاب کلاسیک کیهانشناسی، دانش مقدماتی درحوزه‌ی فیزیک مدرن، آشنایی با پایه و اساس معادلات دیفرانسیل در حد ساده (و نه معادلات خاص) الزامی است. در این کتاب با وجود پُررنگ بودن استفاده از فیزیک کلاسیک و نسبیت عام، توضیحات شفاف و توصیفی زیادی در مورد ذرات بنیادی آمده و برای علاقه‌مندانی که با ساختارهای اولیه نسبیت عام، حساب تانسوری و معادلات خمشی آشنایی دارند روش استنتاج و استخراج معادلات آنیشتاین نیز در پیوست کتاب آورده شده است. این کتاب در سطح جهان به عنوان یکی از بهترین کتاب‌های مقدماتی درحوزه‌ی کیهانشناسی مورد توجه قرار گرفته است. لازم به یادآوری است که آندرو لیدل آثار پژوهشی دیگر نیز در همین حوزه‌ی کیهانشناسی نگاشته است. با مراجعه به سایت شخصی ایشان که در مقدمه‌ی کتاب ذکر شده، به مطالب و موضوعات تحقیقاتی و سرفصل‌های کتاب‌های ایشان دسترسی خواهید داشت.

در حال حاضر و در ایران نیز از این کتاب برای پروژه و تز دانشجویان دوره‌ی کیهانشناسی سال آخر کارشناسی و کارشناسی ارشد استفاده می‌شود و در موارد متعدد در این پایان‌نامه‌ها ارجاعات زیادی به آن داده شده است. لذا مترجمین کتاب بر آن شدند تا کتاب به زبان فارسی در کنار کتاب‌هایی چون ناریکار و چند کتاب نسبیت عام که اساتید داخلی نگاشته‌اند، در اختیار عزیزان علاقمند قرار بگیرد. چاپ فارسی این کتاب با مجوز رسمی انتشارات جان وایلی، پرداخت حق کپی رایت و در نهایت مکاتباتی که با آندرو لیدل انجام شده، در اختیار شما قرار گرفته است. به چند دلیل این مسئله اهمیت فراوان دارد. حضور غیرمستقیم تفکر علمی به صورت مکتوب و نه مجزای جامعه علمی ایران که فقط بخشی از آن چاپ مقالات تخصصی است، یکی از مهمترین این دلایل است! بخش اعظم آن چه در ایران مورد توجه قرار نگرفته، مسئله مهم آموزش در ایران است که نه تنها در داخل کشور باید مورد توجه قرار

بگیرد و ساختارهای آن به درستی چیده شوند، بلکه بخشی از دیدگاه دنیای آکادمیک بین المللی نسبت به آنچه در دنیای آکادمیک ایران می‌گذرد نیز با آگاهی از حضور همین منابع در ایران بدست خواهد آمد.

با توجه به هزینه‌های سرسام آور چاپ در ایران و بخصوص تلاش‌های کسانی که قبل از چاپ کتاب، آن را به صورت کنونی برای شما خواننده گرامی آماده سازی می‌کنند؛ نباید مورد بی توجهی یا کم لطفی قرار بگیرند. موارد مشکوک و مسائل جانبی در این حوزه نیز بسیار زیاد است، ولی به یقین کتاب از زمانی که با قلم نویسنده یا مترجم، مراحل اولیه را طی می‌کند، بارها و بارها مورد بازخوانی، ویرایش، حتی در موارد معدودی (در ایران) مورد مباحثه قبل از چاپ قرار گرفته تا با کمترین ایرادهای علمی و ادبی در اختیار علاقه‌مندان و دنیای آکادمیک قرار بگیرد. حتی گاهی میزان ویرایش به حد فرسایشی می‌رسد که مترجم و نویسنده قادر به بازخوانی مجدد به معنای چندباره اثر خود نیستند. ادبیات به تنهایی عامل این ویرایش‌های متعدد است. وسواس در ترجمه هیچگاه تمامی ندارد. هرچند برای کتاب‌های علمی کم یا اصلاً بکار برده نمی‌شود و در موارد بسیاری با فاجعه‌ی علمی-ادبی در کتاب‌های فارسی‌شده روبه‌رو هستیم، ولی کتاب‌هایی نظیر کتاب حاضر تا جایی که امکان داشته از طرف مترجمین مورد مباحثه و وسواس علمی و ادبی قرار گرفته و گاه منجر به بحث‌هایی جدی شده است. امیدواریم نتیجه حاصل مورد پسند اساتید، دانشجویان و علاقه‌مندان به پژوهش در زمینه کیهانشناسی قرار گرفته و مقدمه‌ای برای پژوهش‌های دانشجویان و منبعی مطلوب و کم اشتباه (اگر مدعی نباشیم) برای تدریس اساتید در دانشگاه‌ها و دوره‌های مقدماتی کیهانشناسی باشد.

در نهایت مترجمین این کتاب از دوستان فنی و ناشر این کتاب به خصوص گروه فنی انتشارات هیمه و پشتیبانی‌های علمی گروه آموزشی المپیادهای علمی ایران (آیریسک) و هم‌طور اندرو لیدل، نویسنده کتاب، و انتشارات جان وایلی برای همکاری در بازگرداندن این کتاب به زبان فارسی، کمال تشکر را دارند. در جایگاه ویژه‌ی دیگری نیز تشکر مجزا می‌شود از همکار و دوست ارجمندمان جناب آقای مهران کم‌پور که زحمت بازخوانی و ویرایش نهایی این کتاب را بر عهده داشتند و با توجه به شناختی که از نزدیک با دکتر لیدل در دانشگاه ساکس به عنوان دانشجویشان داشته‌اند ظرایفی را به ما یادآوری کردند که در فارسی‌سازی هر چه روان‌تر این اثر نقش به سزا و شمر ثمری بازی کرده است. یکی از مهمترین مسائل برای نویسنده و مترجم هر اثری، ارتباط با مخاطب است؛ بسیار خرسند خواهیم شد یا ما از طریق ایمیل در ارتباط باشید.

فرهاد ذکاوت (fzekavat@gmail.com) و کامبیز خالقی (khaleghi.kambiz@yahoo.com)

تابستان ۱۳۹۲ خورشیدی

کامبیز خالقی - فرهاد ذکاوت

Persian Translators acknowledge Prof. Andrew Liddle, The Author and John Wiley and Sons publication to make it possible to publish this book in Persian, as one of most interested academic resources on this subject in Iran.

فهرست مطالب

بخش اول مباحث عمومی

فصل ۱ تاریخچه مختصر نظریه‌های کیهان‌شناسی

فصل ۲ مرور مشاهدات

۶	۱-۲ نور مرئی
۶	۱-۱-۲ ستارگان
۶	۲-۱-۲ کهکشان‌ها
۷	۳-۱-۲ گروه محلی
۸	۴-۱-۲ خوشه‌های کهکشانی، ابر خوشه‌ها و فضای خالی
۹	۵-۱-۲ یکنواختی‌های بزرگ مقیاس:
۹	۲-۲ در گروه امواج رادیویی دیگر
۱۰	۱-۲-۲ میکروموج‌ها
۱۰	۲-۲-۲ امواج رادیویی
۱۱	۳-۲-۲ فروسخ
۱۱	۴-۲-۲ پرتو ایکس
۱۱	۳-۲ همگنی و همسانگردی
۱۲	۴-۲ انبساط عالم
۱۵	۵-۲ ذرات در عالم
۱۵	۱-۵-۲ چه ذراتی وجود دارند؟
۱۷	۲-۵-۲ توزیع‌های دمایی و طیف جسم سیاه

فصل ۳ گرانش نیوتنی

۲۴	۱-۳ معادله فریدمن
۲۷	۲-۳ مفهوم انبساط
۲۷	۳-۳ اجسام سریع‌تر از نور

۲۸	معادله‌ی شاره	۴-۳
۳۰	معادله‌ی شتاب	۵-۳
۳۰	جرم-انرژی و حذف ضریب c^2	۶-۳

فصل ۴ هندسه عالم ۳۳

۳۳	هندسه تخت	۱-۴
۳۴	هندسه کره‌ای	۲-۴
۳۶	هندسه هذلولی	۳-۴
۳۷	عالم‌های قابل مشاهده و بی‌نهایت	۴-۴
۳۸	انفجار بزرگ کجا روی داده است؟	۵-۴
۳۹	مقادیر k	۶-۴

فصل ۵ مدل‌های ساده کیهان‌شناسی ۴۱

۴۵	قانون هابل	۱-۵
۴۳	انبساط و انتقال به سرخ	۲-۵
۴۴	حل معادلات	۳-۵
۴۴	۱-۳-۵ ماده	
۴۶	۲-۳-۵ تابش	
۴۷	۳-۳-۵ ترکیب‌ها	
۴۸	چگالی‌های تعداد ذرات	۴-۵
۴۹	تحول همراه با انحناء	۵-۵

فصل ۶ پارامترهای مشاهده‌ای ۵۳

۵۳	سرعت انبساط هابل H_0	۱-۶
۵۵	پارامتر چگالی Ω_0	۲-۶
۵۷	پارامتر شتاب کاهنده q_0	۳-۶

فصل ۷ ثابت کیهان‌شناسی ۶۱

۶۱	معرفی Λ	۱-۷
۶۳	توصیف شاره‌ی Λ	۲-۷
۶۴	مدل‌های کیهان‌شناسی با Λ	۳-۷

۷۳

چگالی عالم و ماده‌ی تاریک

فصل ۹

- ۷۳
- ۱-۹ وزن کردن عالم
- ۷۳
- ۱-۱-۹ شمارش ستارگان
- ۷۴
- ۲-۱-۹ پیش فرض هسته‌زایی
- ۷۵
- ۳-۱-۹ منحنی چرخش کهکشان‌ها
- ۷۷
- ۴-۱-۹ ترکیب خوشه‌ی کهکشان
- ۷۹
- ۵-۱-۹ حرکت‌های شامه‌ای در عالم
- ۷۹
- ۶-۱-۹ تشکیل ساختار
- ۸۰
- ۷-۱-۹ هندسه‌ی عالم و درخشش ابرنواخترها
- ۸۰
- ۸-۱-۹ مرور
- ۸۱
- ۲-۹ ماده‌ی تاریک چه می‌تواند باشد؟
- ۸۵
- ۳-۹ تحقیقات ماده‌ی تاریک

۸۹

میکروموج زمینه‌ی کیهانی

فصل ۱۰

- ۸۹
- ۱-۱۰ ویژگی‌های میکروموج زمینه‌ی کیهانی
- ۹۱
- ۲-۱۰ نسبت فوتون به باریون
- ۹۳
- ۳-۱۰ منشاء میکروموج زمینه‌ی کیهانی
- ۹۵
- ۴-۱۰ منشاء میکروموج زمینه‌ی کیهانی (بخش تکمیلی و اختیاری)

۹۹

عالم اولیه

فصل ۱۱

۱۰۷

هسته‌زایی: منشأ عناصر سبک

فصل ۱۲

- ۱۰۷
- ۹-۱۲ هیدروژن و هلیوم
- ۱۱۰
- ۳-۱۲ مقایسه با مشاهدات
- ۱۱۳
- ۳-۱۲ مقایسه واجفت‌شدگی و هسته‌زایی

۱۱۵

عالم تورمی

فصل ۱۳

- ۱۱۵
- ۱-۱۳ مشکلات نظریه‌ی انفجار بزرگ داغ
- ۱۱۵
- ۱-۱-۱۳ مشکل تخت بودن

۱۱۷	۲-۱-۱۳ مسئله‌ی افق
۱۱۹	۳-۱-۱۳ فراوانی‌های ذره‌ی قدیمی
۱۱۹	۲-۱۳ انبساط تورمی
۱۲۱	۳-۱۳ حل مشکلات انفجار بزرگ
۱۲۱	۱-۳-۱۳ مسئله‌ی تخت بودن
۱۲۲	۲-۳-۱۳ مسئله‌ی افق
۱۲۳	۳-۳-۱۳ فراوانی اثر ذرات
۱۲۳	۴-۱۳ چه مقدار نور؟
۱۲۴	۵-۱۳ تورم و فیزیک ذرات

فصل ۱۴ تکینگی اولیه ۱۲۹

فصل ۱۵ مدل استاندارد کیهان‌شناسی ۱۳۳

بخش دوم مباحث پیشرفته ۱۳۷

فصل ۱۶ کیهان‌شناسی نسبیت عام ۱۳۹

۱۳۹	۱-۱ متریک فضا- زمان
۱۴۱	۲-۱ معادلات انیشتین
۱۴۲	۳-۱ توپولوژی عالم

فصل ۱۷ فاصله‌ها و درخشندگی‌ها ۱۴۵

۱۴۵	۱-۲ انتشار نور با انتقال به سرخ
۱۴۸	۲-۲ عالم قابل مشاهده
۱۴۹	۳-۲ فاصله‌ی درخشندگی
۱۵۳	۴-۲ فاصله‌ی قطر زاویه‌ای
۱۵۵	۵-۲ شمارش منبع

فصل ۱۸ کیهان‌شناسی نوترینو ۱۵۹

۱۵۹	۱-۳ حالت بدون جرم
۱۶۱	۲-۳ نوترینوهای سنگین

۱۶۱	نوترینوهای سبک	۱-۲-۳
۱۶۲	نوترینوهای سنگین	۲-۲-۳
۱۶۳	نوترینوها و تشکیل ساختار	۳-۳

۱۶۵	باریون‌زایی	فصل ۱۹
-----	-------------	--------

۱۶۹	ساختارهای عالم	فصل ۲۰
-----	----------------	--------

۱۶۹	ساختارهای مشاهده شده	۱-۵
۱۷۲	ناپایداری گرانشی	۲-۵
۱۷۳	خوشه‌سازی کهکشان‌ها	۳-۵
۱۷۶	ناهمسانگردی‌های میکروموج زمینه‌ی کیهانی	۴-۵
۱۷۶	توصیف آماری از ناهمسانگردی‌ها	۱-۴-۵
۱۷۸	محاسبه‌ی Ω	۲-۴-۵
۱۷۹	مشاهدات میکروموج زمینه	۳-۴-۵
۱۸۲	منشأ ساختار	۵-۵
۱۸۵	کتابت‌تاسی	
۱۸۷	پاسخ‌های عددی و راهنمای مسائل	