

به نام ایزدانا

۱۵۲۷۹۸۴

درس هایی از

# نسبیت عام

ترجمه و گردآوری:

محمدرضا تنهایی اهری

علیرضا بهتاش

|                     |                                                                     |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه             | : تنهایی، محمدرضا                                                   |
| عنوان و نام پدیدآور | : درس‌هایی از نسبیت عام/ گردآوری محمدرضا تنهایی‌اهری، علیرضا بهتاش. |
| مشخصات نشر          | : تهران : دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، ۱۳۹۴.              |
| مشخصات ظاهری        | : ۳۳۲ص : مصور.                                                      |
| شابک                | : 978-964-10-3792-7                                                 |
| وضعیت فهرست نویسی   | : فیا                                                               |
| یادداشت             | : واژه‌نامه.                                                        |
| یادداشت             | : کتابنامه.                                                         |
| یادداشت             | : نمایه.                                                            |
| موضوع               | : نسبیت (فیزیک)                                                     |
| موضوع               | : نسبیت (فیزیک)-- مسائل، تمرین‌ها و غیره                            |
| شناسه افزوده        | : بهتاش، علیرضا، ۱۳۵۹ -                                             |
| شناسه افزوده        | : دانشگاه آزاد اسلامی. واحد تهران مرکزی                             |
| رده بندی کنگره      | : OC55/173ت/۹۴۹۴۱۳۹۴                                                |
| رده بندی دیویی      | : ۵۳۰/۱                                                             |
| شماره کتابشناسی ملی | : ۰۵۲۰۲۶                                                            |

عنوان کتاب: درس‌هایی از نسبیت عام

گردآوری: محمدرضا تنهایی‌اهری، علیرضا بهتاش

چاپ اول: ۱۳۹۴

شمارگان: ۲۰۰۰ جلد

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

ویراستار: زهرا زرین

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: سازمان چاپ و انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی

978-964-10-3792-7ISBN:

شابک:

قیمت: ۱۸۰۰۰۰ ریال

## فهرست

عنوان

شماره‌ی صفحه

پیشگفتار

۱

فصل اول: حساب تانسور

۱

۱

۱. اسکالرهای، بردارهای و تانسورهای

۷

۲. عملیات جبری؛ خواص تقریبی

۱۲

۳. چگالی‌های تانسوری

۱۸

۴. بردارهای پایه

۲۲

تمرین‌ها

فصل دوم: مشتق هموردا

۲۳

۵. مشتق‌گیری

۲۳

۶. ارتباط

۲۸

۷. قواعد مشتق هموردا

۳۳

۸. انتقال موازی

۳۹

۹. ژئودزیک‌ها

۴۱

۱۰. تانسور انحنا

۴۵

تمرین‌ها

۵۰

## ۵۱ فصل سوم: هندسه‌ی ریمانی

۵۱. فضای ریمانی
۵۴. دترمینان  $g_{\mu\nu}$ ؛ چگالی‌های متریکی
۷۲. ارتباط یک فضای ریمانی: نمادهای کریستوفل
۷۶. ژئودزیک‌ها در فضای ریمانی
۸۱. تانسور انحنای فضای ریمانی: تانسور ریمان
۸۸. ۱۶. ه. تنقات، لی؛ طولیایی‌ها، بردارهای کیلینگ
۹۴. تمرین‌ها

## ۹۹ فصل چهارم: میدان گرانشی

۹۹. ملاحظات مقدماتی
۱۰۷. اصل هم‌ارزی
۱۱۳. معادلات میدان نسبیت عام

## ۱۱۹ فصل پنجم: راه‌حل شوارتزشیلد

۱۱۹. ۲۰. متریک‌هایی با تقارن کروی
۱۲۳. ۲۱. راه‌حل شوارتزشیلد، قضیه‌ی بیرکهوف
۱۳۰. ۲۲. ژئودزیک‌ها در فضای شوارتزشیلد
۱۳۶. ۲۳. پیش‌روی حضيض یک ستاره
۱۴۰. ۲۴. انحراف پرتوهای نور
۱۴۴. ۲۵. انتقال به سرخ خطوط طیفی
۱۵۱. ۲۶. کروی شوارتزشیلد، افق (رویداد)؛ مختصات کروسکال
۱۶۱. ۲۷. رمبش گرانشی، سیاه‌چاله‌ها
۱۶۵. تمرین‌ها

۱۶۷ فصل ششم: برخی دیگر از راه‌حل‌های دقیق

۱۶۷ ۲۸. سیال بدون فشار، مختصات (دستگاه) خودهمراه

۱۷۳ ۲۹. راه‌حل تولمان

۱۸۰ ۳۰. راه‌حل کِر

۱۸۶ تمرین‌ها

۱۸۷ فصل هفتم: میدان‌های گرانشی

۱۸۷ ۳۱. تقریب خطی

۱۹۴ ۳۲. کاربردها، جرم و اندازه حرکت، زاویه‌ای

۱۹۴ الف) جرم کل در حالت ایستا

۱۹۶ ب) جسم مرکزی با اندازه حرکت زاویه‌ای

۲۰۲ تمرین

۲۰۳ فصل هشتم: اصل وردشی؛ اتحادها و قوانین پایستگی

۲۰۳ ۳۳. اصل وردشی

۲۱۰ ۳۴. اتحادهای منتسب به لاگرانژین<sup>۱</sup>

۲۱۷ ۳۵. قوانین پایستگی

۲۲۴ تمرین‌ها

۲۲۵ فصل نهم: معادلات انیشتین-ماکسول

۲۲۵ ۳۶. میدان گرانشی و الکترومغناطیسی

۲۳۰ ۳۷. راه‌حل رایزنر-نورداشتروم

۲۳۳ ۳۸. تکنیکی و افق راه‌حل رایزنر-نورداشتروم

۲۴۲ ۳۹. برخی ملاحظات پیرامون «نظریه‌های میدان وحدت یافته»

۲۴۶ تمرین

۲۴۷ فصل دهم: معادلات حرکت در نسبیت عام

۲۴۷ ۴۰. مسئله‌ی معادله‌ی حرکت

۲۵۰ ۴۱. مسئله‌ی نجومی

۲۵۲ ۴۲. حرکت ذرات آزمون

۲۶۰ تمرین

۲۶۱ فصل یازدهم: تابش گرانشی

۲۶۱ ۴۳. ملاحظات مقدماتی

۲۶۳ ۴۴. تقریب خطی

۲۶۸ ۴۵. بردار پویتینگ گرانشی

۲۷۵ ۴۶. چندقطبی‌های گرانشی؛ تابش ۴-قطبی

۲۷۹ ۴۷. امواج ضربه‌ای گرانشی، بررسی جامع وکلا

۲۸۸ تمرین‌ها

۲۸۹ فصل دوازدهم: مسئله‌ی کیهانشناسی

۲۸۹ ۴۸. پیشینه‌ی تاریخی

۲۹۳ ۴۹. اصل کیهانشناسی، شکل متریک

۲۹۶ ۵۰. برخی از راه‌حل‌های کیهانشناسی

۳۰۲ تمرین‌ها

۳۰۳ فصل سیزدهم: مطالبی برای مطالعه‌ی بیشتر

۳۰۳ ۵۱. تانسور انحنا و انتقال موازی

۳۰۷ ۵۲. تغییر وردشی تانسور خطای خطی‌سازی فضای تخت

۳۱۴ ۵۳. دو قضیه پیرامون اتحادهای منتسب به لاگرانژین<sup>۲</sup>

۳۲۰ تمرین‌ها

۳۲۱ نمایه

۳۲۶ واژه‌نامه

## پیش‌گفتار

لزوم توجه به نسبیت از آن جا که به عنوان ابزاری پایه در علم فیزیک محسوب می‌شود. از قرن پیش تاکنون توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است. خصوصاً انجام آزمایش‌های مکرر، شواهد تجربی و نتایج ضمنی آن‌ها که در توافق با پیش‌بینی‌های نسبیت بوده‌اند، در اهمیت یافتن این شاخه‌ی وسیع علم فیزیک در سده‌ی اخیر نقش بسزایی داشته‌اند. از این‌رو با پیدایش و گسترش نظریه‌های عظیمی همچون «مکانیک کوانتومی»، «رسمان» و «میدان کوانتومی» می‌بینیم که همواره تلاش شده است تا نسبیت و چهارپایه‌های نظری آن به صورت اصلی بنیادین در سازگاری با اصول این نظریه‌ها ابقاء شوند.

علاوه بر این‌ها، پس از نسبیت خاص، تجربیات نسبیت عام در کشف چندهزار سیاه‌چاله و تپ‌اختر، موفقیت در توصیف مغزل - همان مستی و حرکت اجرام نجومی پراکنده در سرتاسر گیتی؛ از بدو تولد نسبیت در اوایل قرن بیستم تا به حال، دست‌کم در پیش‌برد اصول نظری و تجربی حوضه‌ی اخترفیزیک و جهان‌شناسی آن را به یک نظریه‌ی بی‌بدیل مبدل ساخته است.

گرایش دانشجویان به مطالعه‌ی مبانی نسبیت خاص و عام، به ویژه در سال‌های اخیر توسعه‌ی چشم‌گیری یافته است و این علاقه‌مندی، حکایت از ارزش و ضرورت آموزش نسبیت داشته و مستلزم تحقیقات گسترده پیرامون جنبه‌های گوناگون آن در دانشگاه‌ها می‌باشد.

کتاب‌هایی که نظریه‌ی نسبیت عام را تحت پوشش قرار می‌دهند، طی سال‌های متمادی به صورت روزافزونی توسعه یافته‌اند. اما با این وجود، پیشرفت در نگارش کتاب‌های نسبیتی، همچنان ملاحظه می‌شود که تعداد انگشت‌شماری از این کتاب‌ها به فارسی برگردانده و منتشر شده است. بنابراین نیاز به ترجمه و انتشار این نوع کتاب‌ها احساس می‌شود. حتی در گام‌های محکم‌تر بعدی می‌توان در کنار رفع این نیاز به وسیله‌ی ترجمه‌ی منابع و مراجع مرتبط؛ کتاب‌هایی با این مضمون را به نحوی مطلوب به دست‌های تحریر درآورد.

کتاب حاضر مجری‌هایی از مباحث کلی و جزئیات متعددی از نظریه‌ی نسبیت عام را به خوانندگانش عرضه می‌کند که می‌تواند برای دانشجویان دوره‌ی کارشناسی و بالاتر مفید باشد. اما به عنوان پیش‌نار و ممالعه‌ی قبلی لازم است که در مورد ریاضیات به کار رفته در شالوده‌ی نسبیت عام و همچنین نسبیت خاص مطالعات مختصری صورت گیرد تا هر کاستی ممکن از این باب، دلیل کمبود زمان در نگارش کتاب، برطرف گردد. با این حال، سعی شده است که با درج تعاریف فراوان و نیز گنجانیدن برخی مطالب مهم این کمبودها برطرف شوند.

کتاب حاضر به صورت عمده سخنرانی دکتر پایاپتر در دانشگاه بوستون - در ترم بهاری سال ۱۹۷۲- را پوشش می‌دهد. با حضور کتاب‌های بسیار مفید در این زمینه، علت انتخاب را می‌توان در سادگی ارائه‌ی مطالب عنوان کرد. خوانندگان این کتاب در کنار سایر دروس دانشگاهی به دانشجویان توصیه می‌شود، زیرا نه تنها آن‌ها را بیش‌تر با نسبیت عام مأنوس می‌کند، بلکه چندی از افق‌های زیبا و ناشناخته‌ی این نظریه را نیز با زبانی نسبتاً ساده و گویا برای ایشان بازگو می‌سازد. امید است که این تلاش ناچیز صورت گرفته در جهت اعتلای علم، مورد توجه علاقه‌مندان فیزیک نسبیتی قرار گیرد.

یقیناً دوری کامل از اشتباه غیر ممکن بوده است، لذا انتقاد شما عزیزان سازنده خواهد بود.

در پایان از سرکارخانم زهرا زرین و جناب آقای علیرضا یعقوبی به پاس مساعدت‌های بی‌وقفه‌شان و از سرکارخانم مهدیه ابوالحسنی و سایر دوستان و همکاران عزیز به دلیل قبول زحمت بازخوانی مطالب و ارائه‌ی پیشنهادهایشان سپاس‌گزاریم و همچنین از سرکارخانم مولود سحابی‌راد برای طراحی جلد.

محمدرضا تنهایی‌اهری

علیرضا بهتاش

پاییز ۱۳۹۴