

# مکانیک آماری

مجموعه سخنرانی‌های

ریچارد پی. فاینمن

مترجم

دکتر داریوش شیری

(دانشگاه صنعتی چالمرز سوئد)

نیاز دانش

## فهرست مطالب

۵-۳ کاربرد از قضیهٔ وَرْدِش (Variation) .. ۱۰۲

**فصل ۴ سیستم کلاسیکی با N ذره .. ۱۱۱**

۱-۴ مقدمه .. ۱۱۱

۲-۴ ضریب VIRIAL دوم .. ۱۱۴

۳-۴ بسط خوشه‌ای مایر (MAYER) .. ۱۱۹

۴-۴ تابع توزیع شعاعی .. ۱۲۵

۵-۴ توابع ترمودینامیکی .. ۱۲۸

۶-۴ معادلهٔ بورن- گرین برای  $n_2$  .. ۱۲۹

۷-۴ گاز یک بُعدی .. ۱۳۱

۸-۴ گاز یک بُعدی با پتانسیل از نوع  $e^{-\lambda r}$  .. ۱۳۴

۹-۴ بحث کوتاهی دربارهٔ چگالش .. ۱۳۹

**فصل ۵ نظریهٔ نظم و بی‌نظمی .. ۱۴۱**

۱-۵ مقدمه .. ۱۴۱

۲-۵ نظم و بی‌نظمی در یک بُعد .. ۱۴۴

۳-۵ روش‌های تقریبی برای حالت دو بُعدی .. ۱۴۵

۴-۵ مسألهٔ آنراگر .. ۱۵۱

۵-۵ توضیحات اضافی .. ۱۶۴

**فصل ۶ عملگرهای پیدایش و نابودی .. ۱۶۷**

۱-۶ یک مسألهٔ ریاضی ساده .. ۱۶۷

۲-۶ نوسانگر هماهنگ خطی .. ۱۷۰

۳-۶ نوسانگر ناهماهنگ .. ۱۷۲

۴-۶ سیستمی از نوسانگرهای هماهنگ .. ۱۷۳

۵-۶ فونون‌ها .. ۱۷۵

۶-۶ کوانتش میدان .. ۱۷۸

۷-۶ سیستمی از ذرات غیر قابل تفکیک .. ۱۸۳

۸-۶ هامیلتونی و سایر عملگرها .. ۱۹۳

۹-۶ حالت پایهٔ سیستم فرمیونی .. ۱۹۹

۱۰-۶ هامیلتونی برای سیستم فونون- الکترون .. ۲۰۱

۱۱-۶ برهم کنش‌های فوتون- الکترون .. ۲۰۶

۱۲-۶ نمودارهای فاینمن .. ۲۰۸

**فصل ۱ آشنایی با مکانیک آماری .. ۱۳**

۱-۱ تابع پارش .. ۱۳

۲-۱ نوسانگرهای هماهنگ خطی .. ۲۱

۳-۱ تابش جسم سیاه .. ۲۲

۴-۱ ارتعاشات در یک جامد .. ۲۵

۵-۱ گرمای ویژهٔ یک کریستال .. ۳۰

۶-۱ اثر موسباور (MÖSSBAUER) .. ۳۶

۷-۱ آمار کوانتومی برای سیستم‌های بس ذره‌ای .. ۳۹

۸-۱ محاسبهٔ چند انتگرال .. ۴۳

۹-۱ گاز ایده‌آل بوز- آینشتاین .. ۴۳

۱۰-۱ گاز فرمی- دیراک .. ۴۷

**فصل ۲ ماتریس‌های چگالی .. ۵۳**

۱-۲ آشنایی با ماتریس‌های چگالی .. ۵۳

۲-۲ ویژگی‌هایی دیگر از ماتریس چگالی .. ۵۸

۳-۲ ماتریس چگالی در مکانیک آماری .. ۶۱

۴-۲ ماتریس چگالی برای ذرهٔ آزاد یک بُعدی .. ۶۳

۵-۲ نوسانگر هماهنگ خطی .. ۶۴

۶-۲ نوسانگر ناهماهنگ .. ۶۷

۷-۲ تابع ویگنر .. ۷۳

۸-۲ ماتریس چگالی متقارن شده برای N ذره .. ۷۴

۹-۲ زیر ماتریس چگالی .. ۷۹

۱۰-۲ بسط اختلال (PERTURBATION) ماتریس چگالی .. ۸۰

۱۱-۲ اثبات  $F \leq F_0 + \langle H - H_0 \rangle_0$  .. ۸۲

**فصل ۳ انتگرال‌های مسیر .. ۸۷**

۱-۳ فرمول‌بندی انتگرال مسیر برای ماتریس چگالی .. ۸۷

۲-۳ محاسبهٔ انتگرال‌های مسیر .. ۹۳

۳-۳ یافتن انتگرال مسیر از روی بسط اختلال .. ۹۸

۴-۳ اصل وَرْدِشی برای انتگرال مسیر .. ۱۰۰

## فصل ۱۰ ابر رسانایی..... ۲۸۷

- ۱-۱۰ نتایج آزمایشی و نظریه‌های اولیه..... ۲۸۷
- ۲-۱۰ نوشتن هامیلتونی..... ۲۹۱
- ۳-۱۰ یک قضیه مفید..... ۲۹۵
- ۴-۱۰ حالت پایه یک ابررسانا..... ۲۹۶
- ۵-۱۰ حالت پایه ابررسانا (ادامه)..... ۳۰۰
- ۶-۱۰ برانگیختگی‌ها..... ۳۰۲
- ۷-۱۰ دماهای محدود..... ۳۰۳
- ۸-۱۰ آزمون واقعی وجود حالت‌های زوج و گاف انرژی..... ۳۰۹
- ۹-۱۰ ابررسانای جریان‌دار..... ۳۱۳
- ۱۰-۱۰ جریان بر حسب میدان..... ۳۱۶
- ۱۱-۱۰ جریان در دمای محدود..... ۳۲۰
- ۱۲-۱۰ دیدگاهی دیگر..... ۳۲۶

## فصل ۱۱ آبر شارگی..... ۳۳۵

- ۱-۱۱ مقدمه: ماهیت گذار..... ۳۳۵
- ۲-۱۱ ابرشارگی - روش مقدماتی..... ۳۴۲
- ۳-۱۱ استخراج شهودی تابع‌های موج: حالت پایه..... ۳۴۴
- ۴-۱۱ فونون‌ها و روتون‌ها..... ۳۵۰
- ۵-۱۱ روتون‌ها..... ۳۵۵
- ۶-۱۱ سرعت بحرانی..... ۳۵۸
- ۷-۱۱ جریان غیر گردشی ابرشاره..... ۳۵۹
- ۸-۱۱ گردش ابرشاره..... ۳۶۱
- ۹-۱۱ یک استدلال که منجر به خطوط گردابی می‌شود..... ۳۶۴
- ۱۰-۱۱ گذار  $\lambda$  در هلیوم مایع..... ۳۶۷

## فصل ۷ امواج اسپین..... ۲۱۵

- ۱-۷ برهم‌کنش‌های اسپین - اسپین..... ۲۱۵
- ۲-۷ جبر پاولی برای اسپین..... ۲۱۸
- ۳-۷ موج اسپین در یک شبکه..... ۲۲۰
- ۴-۷ تعبیر شبه کلاسیکی از امواج اسپینی..... ۲۲۵
- ۵-۷ امواج دو اسپینی..... ۲۲۶
- ۶-۷ امواج دو اسپینی (تحلیل دقیق)..... ۲۲۸
- ۷-۷ پراکندگی موج‌های دو اسپینی..... ۲۳۱
- ۸-۷ نامتعامدی..... ۲۳۴
- ۹-۷ روش عمل‌گر (اپراتور)..... ۲۳۶
- ۱۰-۷ پراکندگی موج‌های اسپینی - مقایسه با نوسان‌گرها..... ۲۳۸

## فصل ۸ مسأله پلارون..... ۲۴۱

- ۱-۸ مقدمه..... ۲۴۱
- ۲-۸ حل مسأله پلارون با نظریه اختلال..... ۲۴۴
- ۳-۸ فرمول‌بندی مسأله به صورت وردشی (Variational)..... ۲۵۱
- ۴-۸ روش وردشی (variational)..... ۲۵۴
- ۵-۸ جرم مؤثر..... ۲۶۱

## فصل ۹ گاز الکترونی در یک فلز..... ۲۶۳

- ۱-۹ مقدمه: تابع حالت  $\phi$ ..... ۲۶۳
- ۲-۹ امواج صوتی..... ۲۶۶
- ۳-۹ محاسبه  $P(R)$ ..... ۲۶۷
- ۴-۹ انرژی همبستگی (Correlation)..... ۲۶۹
- ۵-۹ نوسان‌های پلاسما..... ۲۷۱
- ۶-۹ تقریب فاز تصادفی (RPA)..... ۲۷۳
- ۷-۹ روش وردشی (Variational)..... ۲۷۵
- ۸-۹ انرژی همبستگی (Correlation) و نمودارهای فاینمن..... ۲۷۶
- ۹-۹ اختلال مرتبه بالا..... ۲۸۲

## سپاسگزاری

این مجموعه بر اساس سخنرانی‌هایی است که به میزبانی آزمایشگاه‌های تحقیقاتی هیوز (Hughes) در سال ۱۹۶۱ برگزار شد. بیشتر متن را آر. کیکوچی (R.Kikuchi) و ایچ. آ. فیوسن (H. A. Feiveson) یادداشت برداشته‌اند.

دیگرانی که از یک یا چند سخنرانی یادداشت برداشته‌اند عبارتند از اف. ال. ورنون، دبلیو. آر. گراهام، آر. دبلیو. هل وارث، دی. پی. دوز، جی. آر. کریست من، آر. ان. بیرن و جی. ال. ایت.

این یادداشت‌ها را دکتر جاکوب شاهام برای کتاب ویرایش کرد و برای آن فهرست‌نویسی کرد.

از مجموعه کتاب‌های *ADVANCED BOOK CLASSICS* نوشته فاینمن به ویراستاری دیوید پاینز

*Feynman, R., Photon – Hadron Interactions*

*Feynman, R., Quantum Electrodynamics*

*Feynman, R., Statistical Mechanics*

*Feynman, R., The Theory of Fundamental Processes*

## مقدمه

مجموعه کتاب‌های مرزهای فیزیک (Frontiers in Physics) از انتشارات آدیسون-وزلی\*، از سال ۱۹۶۱ این امکان را فراهم کرده که فیزیک‌دانان برجسته، دیدگاه‌های خود را از جدیدترین پیشرفت‌ها و هیجان‌انگیزترین زمینه‌های فعال در فیزیک به دیگران منتقل کنند- بدون آن‌که لازم باشد وقت و انرژی زیادی برای آماده‌سازی یک مقالهٔ مروری رسمی یا تک‌نوشت (monograph) صرف کنند. در واقع تأکید این مجموعه در مدت این چهل سال، بر غیررسمی بودن سبک و محتوی و نیز ساده بودن ارائه است. انتظار می‌رفت که با گذشت زمان که این رشته‌های پیش‌تاز کم‌کم به پیکرهٔ اصلی دانش فیزیک ملحق شوند، و علاقهٔ خوانندگان هم افزایش یافت، این مجموعه‌ها به شکل کتاب‌های رسمی یا تک‌نوشت درآیند. ولی برای چندین جلد از کتاب‌های این مجموعه چنین چیزی رخ نداد؛ چون بعضی‌ها با درخواست خواننده دوباره چاپ می‌شد ولی بعضی کتاب‌ها چنان ارزش ذاتی داشت که جامعهٔ فیزیک ما را وادار کرد که آن‌ها را دوباره همان‌طور که هست منتشر کنیم.

کتاب‌های Advanced Book Classics برای برآورده کردن این تقاضا، طراحی شدند. در واقع هدف آن، ادامهٔ انتشار آن دسته از کتاب‌های Frontiers in Physics یا مجموعهٔ هم‌زاد آن، Lecture Notes and Supplement in Physics است که هنوز زمینه‌های پردرخواست فیزیک را منتشر می‌کند و با شمارگان بالا سعی شده است که بهای آن برای خواننده هنوز اقتصادی باشد. این مجموعه از سخنرانی‌های ریچارد فاینمن در مکانیک آماری حدود ۲۵ سال گذشته منتشر شد. همانند همهٔ سخنرانی‌های فاینمن، این یادداشت‌ها هم نمایانگر دیدگاه ژرف فاینمن در فیزیک هستند، تازگی و اصالتِ روش او در درک فیزیک، و به‌طور کلی جادوگری او در کار معلمی. این کتاب برای هر کسی که به یادگیری و تدریس مکانیک آماری علاقه دارد، افزون بر ارائه درآمدی زیبا و مختصر از مفاهیم اصلی فیزیک آماری، شرح برخی از دستاوردهای اصیل و مهم او همانند نظریهٔ پلارون (Polaron) و نظریهٔ هلیم مایع را نیز در بردارد.

دیوید پاینز (David Pines)

اوربانا، ایلی نوی

دسامبر ۱۹۹۷

---

\* Addison- Wesley

## پیشگفتار مترجم

انجمن جهانی مهندسان برق و الکترونیک (IEEE) در سال ۲۰۱۶ به دیوید فورنی<sup>۱</sup> از مهندسان بازنشسته شرکت موتورولا، مدال افتخاری بخشید به پاس چندین دهه تلاش‌های او در اختراع مودم<sup>۲</sup> (Modem)، قلب تپنده شبکه‌های اینترنت در سراسر دنیا. فورنی در خاطراتش می‌گوید<sup>۳</sup> دانشجوی بی‌انگیزه، بدون تصور از آینده و بی‌علاقه به مهندسی بوده تا اینکه درسی اختیاری با جان آرشیبالد ویلر<sup>۴</sup> در ترمودینامیک می‌گیرد و اولین جرعه‌های علاقه به مهندسی در او پدیدار می‌شود. از فروتنی این فیزیکدان نظری برجسته که درسی پر از ایده‌های مهندسی ارائه کرده به شغف می‌آید و برای پروژه<sup>۵</sup> درس، کتاب *دانش و نظریه اطلاعات* نوشته لئون بریلوین<sup>۵</sup> در سال ۱۹۵۶ را می‌خواند. این جاست که به ارتباط آنتروپی و نظریه اطلاعات و کدهای اصلاح خطا پی می‌برد و بقیه داستان...

شاید پرسید این قضیه چه ارتباطی با این کتاب و ریچارد فاینمن دارد؟

جان آرشیبالد ویلر استاد فیزیک نظری دانشگاه پرینستون بود و از جمله برجسته‌ترین معلمان فیزیک و استادان راهنما در تاریخ فیزیک آمریکا. در طول عمر خود چهل و شش دانشجوی دکتری تربیت کرد از جمله ریچارد فاینمن، وُچیچ زورک<sup>۶</sup>، چارلز میزنر<sup>۷</sup> و کیپ ثورن<sup>۸</sup>. این جمله معروف از اوست که «اگر نخواستید یاد بگیرید، درس بدهید.»

ویلر روزی تصمیم می‌گیرد که نظریه گرانش و نسبیت عام اینشتاین را برای دانشجویان کارشناسی درس بدهد. در پاسخ به ایرادهای دیگران می‌گوید که می‌خواهد دانش خود را در معرض معصومانه‌ترین و عمیق‌ترین پرسش‌های دانشجویان قرار دهد و در درک خود بازننگری کند. معتقد است که اگر نتوانید چیزی را ساده درس بدهید، خودتان آن را نفهمیده‌اید. هر روز با احساس ترس و ناامنی وارد کلاس می‌شود، پرسش‌های دانشجویان را پیش‌بینی می‌کند و برای یافتن پاسخ قانع‌کننده تلاش می‌کند. حاصل این دوره از درس‌ها یافتن دانشجویانی با انگیزه و علاقه‌مند برای پژوهش دکتری است و کارهای بنیادی او و شاگردانش در نظریه سیاه‌چاله‌ها.

کتاب *بزرگ‌گرانش*<sup>۹</sup>، نوشته او، میزنر و کیپ ثورن، حاصل این دوره است. کتابی که هنوز هیچ کتاب درسی به رقابت با آن برنخواسته و به شوخی گفته می‌شود آن قدر سنگین است که فضا و زمان را خمیده می‌کند.

از همه جالب‌تر این‌که یکی از این شاگردان، کیپ ثورن، برنده جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۷ شد برای چهل سال کار طاقت‌فرسا روی ساخت آشکارساز امواج گرانشی. آشکارسازی که سپتامبر ۲۰۱۶

1. G. David Forney Jr.

2. Modem : Modulator – demodulator

3. IEEE Spectrum , Modem Maestro, May 2016, PP. 43-45.

4. T. M. Christensen, John Wheeler's mentorship: An enduring legacy, Physics Today, April 2009, PP. 55-59.

5. Leon Brillouin, Science and Information Theory, Dover, NY, 2004

(انتشارات داوِر به دلیل ارزش تاریخی کتاب سال ۲۰۰۴ آن را دوباره چاپ کرد.)

6. Wojciech Zurek

7. Charles Misner

8. Kip Thorne

9. C. W. Misner, K. S. Thorne, and J. A. Wheeler, Gravitation, Princeton University Press, 2017.

در سال ۲۰۱۶ بعد از مشاهده امواج گرانشی، در جامعه فیزیک شایعه یا پیش‌بینی شد که برنده نوبل سال بعد کیپ ثورن است. ظاهراً ناشر به سرعت دست به کار شد و نسخه ۱۹۷۳ را تجدید چاپ کرد.)

بالاخره امواج گرانشی ناشی از برخورد دو سیاه‌چاله در فاصله ۱/۵ میلیارد سال نوری از ما را کشف کرد. امواجی که وجود آن را آلبرت آاینشتاین در سال ۱۹۱۶ با محاسبه پیش‌بینی کرده بود.<sup>۱</sup> و اما ریچارد فاینمن؛ او نیز شاخه‌ای است از درخت تنومند آموزش و راهنمایی ویلر که همین ژرف و ساده اندیشیدن را از استاد خود به ارث می‌برد. چون برای او هیچ چیز، «همین که هست» نیست، همه چیز را از ابتدا خودش باید بسازد و از این‌رو تعبیر جدیدی برای مکانیک کوانتومی براساس انتگرال‌های مسیر (Path Integrals) دوباره‌نویسی می‌کند که موضوع پایان‌نامه دکترای او و دو کتاب جذاب از اوست. نمودارهای ابداعی او به اسم نمودارهای فاینمن امروز ماشین حساب مطالعه برهم‌کنش‌های میان ذرات و میدان‌هاست.

به شو‌ند (دلیل) همین مهارت او در بازسازی و دوباره فهمیدن فیزیک است که کتاب‌ها و سخنرانی‌های او و حتی مقالات پژوهشی سطح بالای او، ساده، ژرف و دقیق هستند. در دهه ۶۰ به درخواست مسئولان مؤسسه تکنولوژی کالیفرنیا (Caltech) برای افزایش سطح علمی و به‌روز کردن درس‌های فیزیک دوره کارشناسی، درس‌هایی ارائه می‌کند که پس از آن توسط همکاران و دانشجویان او یادداشت‌برداری شد و به شکل کتابی سه جلدی به اسم سخنرانی‌های فاینمن در فیزیک<sup>۲</sup> درآمد. کتابی که تا کنون بیش از ۱/۵ میلیون نسخه از آن به فروش رفته و به بیش از ده زبان ترجمه شده است.

ایده به‌کار بردن سیستم‌های کوانتومی برای محاسبه، شبیه‌سازی و یا «کامپیوتر کوانتومی» را در همین سخنرانی‌ها مطرح می‌کند که بعدها در کتابی ویژه به اسم سخنرانی‌های فاینمن درباره محاسبه (رایانش)<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۶ چاپ شد. در سخنرانی معروف دیگری در سال ۱۹۵۹ با عنوان (آن پایین برای همه جا هست)<sup>۴</sup>، چشم‌اندازها، فرصت‌ها و چالش‌هایی که با رفتن به مقیاس نانومتری پیش روست برمی‌شمارد. این سخنرانی را آغاز عصر میکروماشین‌ها و نانوفناوری می‌دانند و آن را IEEE در اولین شماره از مجله میکروسیستم‌ها در سال ۱۹۹۲ چاپ کرد.<sup>۵</sup> فاینمن در فصل ۱۸، جلد ۳ از سخنرانی‌های خود در مثال‌هایی ساده از جذب و گسیل فوتون توسط اتم، ایده درهم‌تافتگی (entanglement) را نمایش می‌دهد، که امروز روشی برای اصلاح خطای بیت‌های کوانتومی (کیوبیت)‌هاست.

برای مطالعه این سه جلد می‌توانید سایت [www.feynmanlectures.caltech.edu](http://www.feynmanlectures.caltech.edu) را نگاه کنید که توسط Caltech نگهداری می‌شود و دارای همه مدارک و فایل‌های مرتبط با این سه کتاب است به اضافه مسأله‌ها و پاسخ آن‌ها.

کتاب دیگری به اسم راهنمای فاینمن در حل مسأله<sup>۶</sup>، سال ۲۰۱۳ چاپ شد که افزون بر مثال‌های حل شده با راهنمایی فاینمن و گفتگو با او درباره کتاب، فصلی نیز درباره ناوبری اینرسی<sup>۷</sup> و

1. Andrew Grant, Weiss, Barish, and Thorne share 2017 Nobel prize in physics, Physics Today, December 2017, pp.16-18.

2. Feynman, Leighton, Sands, The Feynman Lectures on Physics, Basic Books, New York, 2011. (New Millenium Edition)

3. R. P. Feynman, Feynman Lectures on Computation, Westview Press, June 2000.

4. There's Plenty of Room at the Bottom.

5. R. P. Feynman, IEEE Journal of Microelectromechanical Systems (MEMS), Vol.1, No.1, March 1992, PP.60-66.

6. R. P. Feynman, M. A. Gottlieb, and R. Leighton, Feynman's Tips on Physics, Basic Books, New York, 2013.

7. Inertial Navigation

ژيروسکوپها در بردارد. این سخنرانی ظاهراً به دلیل مسائل طبقه‌بندی مربوط به جنگ سرد ناپدید شد تا این که در این کتاب دوباره چاپ شده است.

داستان‌های بسیاری هست از تأثیرگذاری فاینمن روی شاگردان، دوستان و همکاران و حتی کسانی که یک نیم‌کره آن طرف‌تر از کتاب‌های او بهره‌مند شده‌اند. تمام نامه‌نگاری‌های او توسط دخترش در کتابی گردآوری شده که خواندن این نامه‌ها نه تنها سرگرم‌کننده است، نکات جالبی درباره تاریخ فیزیک و به‌طور کلی تاریخ آن دوره به تصویر می‌کشد.<sup>۱</sup>

امیدوارم که روزی سه جلد سخنرانی فاینمن به فارسی هم برگردانده شود و در دسترس همه علاقه‌مندان به فیزیک و مهندسی به‌ویژه دانشجویان کارشناسی و دانش‌آموزان دبیرستانی قرار گیرد. خوشبختانه کتاب *الکترودینامیک کوانتومی (QED)* را خانم دکتر شجاعی باغبینی ترجمه کرده بودند و انتشارات دانشگاه صنعتی شریف آن را چاپ کرده بود. این کتاب سخنرانی فاینمن درباره نظریه خودش و نمودارهای اوست که به دعوت شهرداری لس‌آنجلس برای دانش‌آموزان و مردم آن شهر برگزار شد. کتاب آن قدر ساده و جذاب است که در آن فرض شده است شنونده (خواننده) جمع و تفریق بردار را هم نمی‌داند.

گاهی دکتر معصومی همدانی گزیده‌هایی از سخنرانی‌های فاینمن و مقاله‌های او را برای مجله فیزیک مرکز نشر دانشگاهی یا مجله رشد آموزش فیزیک ترجمه می‌کردند.

در آن سال‌ها که تنها چند کامپیوتر در کتابخانه مرکز تحقیقات فیزیک نظری و ریاضی (IPM) در نیوران به اینترنت دسترسی داشتند، خواندن این‌گونه ترجمه‌ها لذتی صدچندان داشت و تأثیری جاودانه. یکی از این ترجمه‌ها گزارش فاینمن بود از سفرش به برزیل به عنوان پژوهشگر میهمان و ممتحن افتخاری چند دانشجوی دکتری در برزیل.<sup>۲</sup> در آزمون شفاهی، فاینمن از دانشجویی می‌پرسد که تابش لیان کریستال چیست و دانشجو پاسخی را که از بر کرده بود تعریف می‌کند. فاینمن از او می‌پرسد که آیا تابش لیان را دیده است و پاسخ این بود که نه. در این نامه فاینمن از سیستم آموزشی برزیل گلایه می‌کند که چرا حفظ کردن و امتحان و نمره ارزش است و به دانشجو فرصت اندیشیدن و آزمایش کردن نمی‌دهند. از این گله‌مند است که چرا دانشجوی دکتری به فکرش نرسیده که یک تکه قند یا نبات را ببرد در اتاقی تاریک و بشکند تا ببیند نور لیان چیست؟

خوشبختانه امروز با بودن اینترنت و مجهر بودن کتابخانه‌ها به مجله‌ها و کتاب‌ها، می‌توانید به سادگی به کتاب‌ها و مقاله‌های فاینمن دسترسی داشته باشید و بنابراین لازم نمی‌دانم که درباره تک‌تک کتاب‌های او و حکایت‌های تاریخی مربوط به پیدایش و تأثیر آن‌ها بیشتر بنویسم.

و اما این کتاب: پیش‌گفتار ویراستار به اندازه کافی گویای این است که چرا پس از چهل سال باز هم سخنرانی فاینمن در مکانیک آماری را چاپ کرده‌اند: اصالت و سادگی. با خواندن این کتاب قانع می‌شوید که فاینمن می‌خواهد آبرسانایی و آبرشارگی را که زمینه‌های جوان در زمان خودش بوده

1. Michelle Feynman, *The Letters of Richard P. Feynman*, Basic Books, New York, 2008.

2. *Physics Today*, Vol. 42, February 1989, No. 2.

(این شماره ویژه ریچارد فاینمن بود یک سال پس از درگذشت او.)



است و او نیز در حال پژوهش روی آن‌ها بوده، برای کارکنان صنایع هوایی هیوز (Hughes) درس بدهد. برای همین همه پیش‌نیازهای لازم برای درک این دو زمینه دشوار را پشت سر هم می‌چیند. کتاب حالت جزوه درسی داشته است که چند تن از شرکت‌کنندگان آن دوره نوشته‌اند و با اینکه دو بار ویرایش شده است باز چندین اشتباه در تایپ معادله‌ها در اصل کتاب بود که آن‌ها را درست کردم. وقتی کتاب را می‌خوانید فرض کنید که روزی این معادله‌ها با گج و تخته سیاه نوشته شده بودند به همین دلیل لحن کتاب رسمی نیست و بین معادله‌ها با جملاتی مثل «بنابراین،...»، «نتیجه می‌گیریم...» کمتر پُر شده است. هر جا چنین چیزی لازم بوده آن را در [ ] آورده‌ام. اگر پانوشتی برای به روز کردن جمله‌های فاینمن لازم بوده آن‌ها را با نوشتن مرجع جدیدتر، افزوده‌ام. در نخستین برخورد با واژگان تخصصی، معادل انگلیسی آن‌ها را در ( ) آورده‌ام. برای *creation* و *annihilation* به ترتیب پیدایش / زایش و نابودی را به کار برده‌ام که از «خلق» و «فنا» بهتر هستند. در این موارد کتاب واژگان فیزیک مرکز نشر دانشگاهی راهنمای سودمندی است.

فصل یک درآمدی است بر مکانیک آماری شامل آمار بوز-آیشتاین، فرمی-دیراک، مفهوم انرژی آزاد و روش محاسبه گرمای ویژه که درک آن برای ابررساناها و ابرشاره‌ها مهم است.

فصل دو ماتریس‌های چگالی برای محاسبه مقادیر متوسط (چشم‌داشتی) در سیستم‌های کوانتومی را معرفی می‌کند. در پایان قضیه بوگولیوبوف (Bogoliubov) را ثابت می‌کند که مبنای روش وردشی است. یعنی برای هر سیستم فیزیکی داده شده اگر انرژی آزاد را به گونه‌ای بنویسید و آن را نسبت به یک متغیر کمینه کنید (با برابر قرار دادن مشتق آن با صفر)، آن‌گاه می‌توانید ویژگی دیگری از این سیستم را حساب کنید.

برای این فصل و فصل ۷ می‌توانید مثال‌های ساده کتاب آشنایی با کامپیوترهای کوانتومی نوشته دیوید مک ماهون، چاپ انتشارات نیاز دانش را ببینید.<sup>۱</sup>

فصل سوم خلاصه‌ای از روش انتگرال‌های مسیر است. این فصل امروز هم مرجع مقالات پژوهشی برای محاسبه زمان همدوسی بیت‌های کوانتومی است. البته انتگرال مسیر روشی است عمومی که در دیگر شاخه‌های فیزیک و حتی اقتصاد و بیولوژی کاربرد دارد. کتاب *انتگرال‌های مسیر نوشته هاگن کلاینرت*<sup>۲</sup> شرح این روش و تمام کاربردها با مثال است. کتاب فاینمن و شاگردش آلبرت هییز<sup>۳</sup> هم فقط ویژه این روش برای مکانیک کوانتومی است، مثال‌های فراوانی دارد و پیش‌نیازهای لازم در فیزیک کلاسیک مثل لاگرانژی و معادله حرکت را درس می‌دهد.

فصل ۴ گازی از  $N$  ذره کلاسیکی می‌سازد و ویژگی‌های ترمودینامیکی آن را با روش سه فصل گذشته به دست می‌آورد. در مبحث پتانسیل‌های چند ذره‌ای، مفهوم بسط مایر (Mayer) و نمودارهای ترسیمی مربوط به آن ارائه می‌شود. در مکانیک شاره‌ها هم برای بررسی تلاطم (turbulence) و حل معادله ناویر - استوکس به معادله‌هایی برمی‌خورند که از نظر ریاضی همانند بسط مایر هستند و آنجا

۱. آشنایی با کامپیوترهای کوانتومی، دیوید مک‌ماهون، ترجمه داریوش شیری، انتشارات نیاز دانش، تهران، ۱۳۹۶.

۲. Hagen Kleinert, *Path Integrals in Quantum Mechanics, Statistics, Polymer Physics, and Financial Markets*, 5th Edition, World Scientific, Singapore (2009).

۳. R. P. Feynman, and Albert R. Hibbs, *Quantum Mechanics and Path Integrals*, Dover, NY, 2010 (Emended Edition).

بسط Wyld نامیده می‌شوند.<sup>۱</sup> دانستن این‌که بسیاری از زمینه‌های به ظاهر بسیار متفاوت در علم، پایه ریاضی یکسانی دارند، سودمند است. اگر بخواهید هدایت گرما یا مقاومت الکتریکی در جامدی غیر کریستالی، شیشه‌ای یا آمورف را حساب کنید، دانستن ابزارهای فصل ۵ ضروری است. اگرچه در این فصل هدف مطالعه گذار فاز و رقابت بین اسپین‌های هم‌سایه برای فرومغناطیس یا پادفرومغناطیس کردن ماده است.<sup>۲</sup>

مکانیک آماری نوشته پاتریا و بیل که انتشارات نیاز دانش چاپ کرده<sup>۳</sup>، بسیار روزآمد است و مثال‌های حل‌شده خوبی در این زمینه دارد. می‌توانید فصل ۱ و ۴ و ۵ را هم از این کتاب فرابگیرید. فصل ۶، پیش‌نیاز فصل‌های پس از خود است ولی از فصل‌های گذشته مستقل است، و می‌توانید آن را زودتر بخوانید یا حتی آن را از کتابی دیگر فرا بگیرید مثلاً مباحث ویژه در مکانیک کوانتومی<sup>۴</sup>، نوشته والتر گرینر (Walter Greiner) از مجموعه کتاب‌های فیزیک نظری نوشته او.

فصل ۷ باز به برهم‌کنش دوقطبی‌های مغناطیسی در یک جامد یا برهم‌کنش اسپین - اسپین می‌پردازد که مبنای درک گذار فاز در مواد مغناطیسی و امروزه ابزار نظری درک ابررسانای دمای بالا و یافتن منحنی‌های گذار فاز است. باز هم می‌توانید برای تکمیل این فصل کتاب پاتریا و بیل را ببینید. کتاب آشنایی با کامپیوترهای کوانتومی نوشته دیوید مک ماهون مثال‌های فراوانی از کار با ماتریس‌های پاولی (Pauli) دارد که مکمل خوبی برای این فصل است. در فصل ۸ و ۹ ابزارهای محاسباتی برای فصل ۱۰ و ۱۱ ارائه می‌شوند.

باید دید چگونه دو الکترون به سوی هم «جذب» می‌شوند و زوج کوپر (Cooper) می‌سازند تا با مقاومت صفر از ماده عبور کنند (ابررسانایی). چیزی که این دو الکترون را به هم جذب می‌کند برخاسته از برهم‌کنش آن‌ها با فونون است یعنی کوانتوم ارتعاش شبکه کریستال. یاد می‌گیرید که چگونه الکترونی با عبور از شبکه کریستالی منظره یون‌های کریستال را دچار اعوجاج می‌کند و همین باعث می‌شود احساس سنگینی کند (جرم مؤثر بیشتر) و مفهوم پلارون را که در اصل هربرت فروهلیش (H. Fröhlich) آغازگر آن بوده است فرا می‌گیرید.

طرز کار پیوند جوزفسون<sup>۵</sup> و SQUID<sup>۶</sup> به ساده‌ترین زبان ولی بسیار دقیق در فصل ۱۰ ارائه می‌شود. امروزه SQUID سنگ‌بنای مدارهای کامپیوترهای کوانتومی روی تراشه‌های سیلیسیوم، سنسورهای مغناطیسی بسیار حساس در MRI<sup>۷</sup>، استاندارد یکای جهانی ولتاژ و مدارهای حافظه و ریزپردازنده کلاسیک بر اساس منطق RFSQ<sup>۸</sup> است. نظریه ابررسانای معمولی (دمای پایین) یا نظریه باردین - کوپر - شریف<sup>۹</sup> (BCS) که در این فصل ارائه شده است هنوز از توضیح ابررسانایی دمای بالا

1. W. D. McComb, Renormalization methods: A guide for beginners, Oxford University Press, 2004.

2. J. M. Ziman, Models of disorder, Cambridge University Press, 1979.

۳. مکانیک آماری، آر. کی. پاتریا و پاول. دی. بیل، ترجمه دکتر محمد بهتاج لجبینی، دکتر محمد کریمی، انتشارات نیاز دانش، تهران ۱۳۹۳.

4. Walter Greiner, Quantum Mechanics: Special Chapters, Springer - Verlag, 1998.

5. Josephson Junction

6. SQUID = Superconducting Quantum Interference Device

7. MRI = Magnetic Resonance Imaging

8. RFSQ = Rapid Single Flux Quantum

9. BCS = Bardeen - Cooper - Schrieffer

(در ترکیبات اکسید مس یا کوپرات‌ها) ناتوان است و این هنوز از داغ‌ترین زمینه‌های پژوهشی در فیزیک نظری و تجربی است. کتاب پیشرفت‌های ابررسانایی دمای بالا (در دو جلد) نوشته استاد گرامی پروفیسور محمد اخوان فرشی از دانشگاه صنعتی شریف را بخوانید و نیز کتاب ۱۰۰ سال ابررسانایی ویراسته روگالا و کز<sup>۱</sup> جالب است بدانید که باردین، شریفر و کوپر به ترتیب استاد، پژوهشگر پس از دکتری و دانشجوی دکتری بودند و در سال ۱۹۷۲ جایزه نوبل فیزیک را به دلیل یافتن نظریه موفق BCS که توانسته بود پدیده ابررسانایی را بعد از ۵۰ سال از زمان کشف آن توسط هایکه کامرلینخ اونس<sup>۲</sup> (۱۹۱۱) توضیح دهد، بگیرند. باردین تنها کسی است که در تاریخ فیزیک دو بار جایزه نوبل گرفته است و یک بار دیگر به خاطر اختراع ترانزیستور دوقطبی (BJT) در آزمایشگاه‌های بل (Bell). برای فصل ۱۱، آموزنده است اگر فیلم‌های جالبی را از آزمایش با ابرشاره هلیوم در بوتیوب یا سایت دانشگاه‌های ارائه‌دهنده درس‌های فیزیک دمای پایین ببینید، تا در کنار مدل‌هایی که فاینمن از ابرشارگی نشان می‌دهد و پرسش‌هایی که برمی‌انگیزد، برای کتاب‌های جدیدتر و پیشرفته‌تر آماده شوید. فصل ابرشارگی از کتاب والتر گراینر را می‌توانید در کنار این کتاب بخوانید. مفهوم صدای دوم (second sound) را در سیستم‌هایی که انتشار گرما از قانون فوریه پیروی نمی‌کند و دما به شکل پالس منتقل می‌شود هم می‌توان دید. ویتالی گینزبورگ، سیر آنتونی لگت و آلکسی آبریکوزوف<sup>۳</sup> سهم بزرگی در تکمیل نظریه ابرشارگی و پاسخ به پرسش‌های فاینمن در این فصل داشتند که جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۰۳ را در پی داشت. امیدوارم که این ترجمه را خواننده گرامی سودمند بیابد و انگیزه‌ای باشد برای مطالعه دیگر نوشته‌های فاینمن و فراگیری فیزیک، حتی اگر فیزیک رشته اصلی شما نیست و یا مثل دیوید فورنی مهندس برق هستید و به دنبال منابعی پر از دید وسیع و ژرف می‌گردید، یا به دنبال ایده‌هایی برای روش تدریس فیزیک هستید.

لازم می‌دانم که از آقای مهندس حمیدرضا شیرازی، مدیر محترم انتشارات نیاز دانش که چاپ این ترجمه را با بلندنظری پذیرفتند و نیز از زحمات همکاران گرامی ایشان صمیمانه سپاسگزاری کنم. از پدر بزرگوارم آقای ملک‌محمد شیری که پیگیر انتشار ترجمه‌هایم بودند و هنوز هم هم‌چون روزهای قدیم ایشان را به خیابان انقلاب می‌فرستم برای یافتن کتاب، سپاسگزارم. از همسر گرامی‌ام خانم دکتر آیتا فدوی برای تشویق و نظرات سازنده درباره ترجمه‌هایم سپاسگزارم. در پایان این ترجمه کوچک را تقدیم می‌کنم به همه معلمان دلسوز و تلاشگر میهنم ایران که با دلسوزی و امیدواری به پرورش نسلی دانا، چندبُعدی و ژرف‌اندیش می‌کوشند.

داریوش شیری  
زمستان ۹۶- سوئد

1. Horst Rogalla, and Peter H. Kes (Editors), 100 Years of Superconductivity, CRC Press, 2011.

2. Heike Kammerlingh Onnes

3. Vitaly L. Ginzburg, Anthony J. Leggett, Alexei A. Abrikosov.