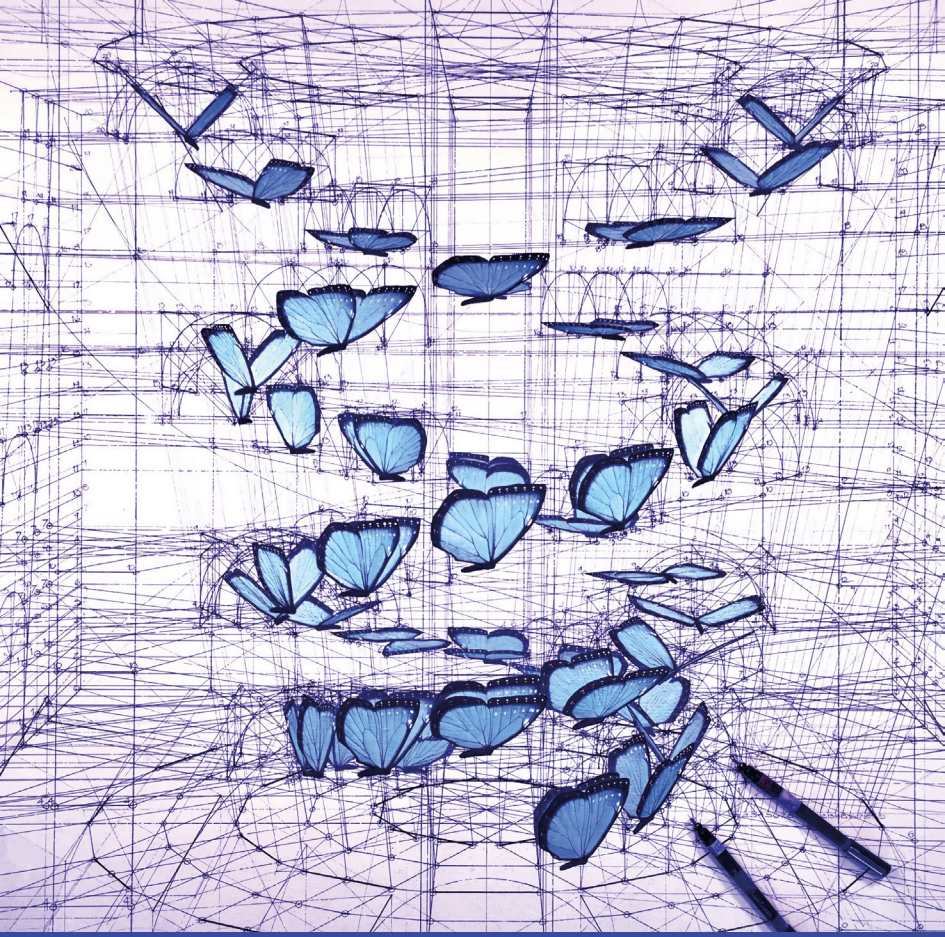


fear of physics

sebuah panduan awal

LAWRENCE M. KRAUSS

Alih Bahasa: Eko Firmansah

Lawrence M. Krauss

Lawrence Maxwell Krauss (lahir 27 Mei 1954) merupakan kosmolog dan fisikawan teoretik dari Amerika. Beberapa bukunya yang terkenal adalah *The Physics of Star Trek* (1995) dan *A Universe from Nothing* (2012)

fear of physics

sebuah panduan awal

LAWRENCE M. KRAUSS

Alih Bahasa: Eko Firmansah

ANTI NOMI
antinomi.org

Fear of Physics:
sebuah panduan awal

Lawrence M. Krauss

Diterjemahkan dari:

Fear of Physics: A Guide for the Perplexed,
Copyright © 2007 Basic Books,
A Member of the Perseus Books Group, New York

Edisi I: November 2020 (e-book)

Alih Bahasa dan editor: Eko Firmansah
Penyelaras Bahasa: Risalatul Hukmi
Tata Letak: Rée
Ilustrasi Sampul: Rafael Araujo

Hak Cipta dilindungi Undang-undang

Penerbit Antinomi
Jl. Kaliurang km 5,3 No. 12 Sleman 55281 Yogyakarta
Email: antinomi.inst@gmail.com
https://antinomi.org

ISBN 978-602-51908-7-2

Buku ini bebas untuk disebarluaskan untuk kepentingan diseminasi pemikiran. Dilarang keras menggunakannya untuk keperluan komersial.

---

*jika menemukan kesalahan penerjemahan maupun penulisan dalam buku ini, silakan kirimkan catatan ke email di atas.

Terima kasih

Antinomi secara khusus mengucapkan terima kasih kepada Lawrence M. Krauss yang telah memberikan izin penerjemahan buku ini, Eko Firmansah yang bersedia menerjemahkannya, dan Rafael Araujo yang telah mengizinkan kami menggunakan ilustrasinya sebagai sampul. Semuanya dilakukan secara suka rela demi ilmu pengetahuan. Sekali lagi, terima kasih.

Untuk Kate dan Lili

PENGANTAR EDISI BARU

Saya cukup bersemangat ketika editor saya di Basic menghubungi saya, menanyakan apakah saya tertarik untuk merevisi dan memperbarui *Fear of Physics*. Dalam lima belas tahun sejak buku ini pertama kali muncul, sejumlah besar telah berubah dalam pemahaman kita tentang konsep garis depan dalam dunia fisika, dan bahkan beberapa prinsip panduan kita telah berubah. Selain itu, perspektif saya sendiri tentang isu-isu apa yang penting, terutama vis-à-vis kepentingan umum dalam sains, juga telah berevolusi, baik karena evolusi saya sendiri sebagai ilmuwan, tetapi juga pengalaman saya selanjutnya sebagai seorang penulis.

Pada saat yang sama, sekitar sepuluh tahun lalu saya terkejut ketika saya menyampaikan serangkaian ceramah kepada para guru fisika sekolah menengah atas untuk menemukan bahwa buku ini telah menjadi suatu "kultus klasik", yang sering dibagikan kepada siswa sekolah menengah untuk membantu mereka masuk ke topik modern dalam fisika. Satu klub fisika mengirimi saya salinan T-shirt yang mereka rancang dengan seekor sapi sebagai bola untuk menghormati buku itu. Dengan demikian, terlepas dari kenyataan bahwa

saya awalnya menujukan buku ini untuk sedikit audiens atau yang tidak ada latar belakang dalam ilmu pengetahuan, memang untuk melibatkan banyak orang yang mungkin merasa terintimidasi oleh fisika, saya menyadari bahwa sesuatu tentang hubungan antara fisika terdepan dan ide-ide dasar bersemangat menumbuhkan para ilmuwan muda juga, sebagaimana mestinya. Dengan pemikiran-pemikiran ini, saya telah merevisi buku dari awal hingga akhir, menjaga kerangka aslinya, tetapi memperbaruinya dengan materi baru agar lebih mudah diakses oleh sebagian orang, lebih menarik bagi orang lain, dan untuk menangkap sifat sains yang berevolusi dengan tepat hingga saat ini saat kita menjelajahi jarak jauh dari alam semesta. Saya harap Anda menikmati versi baru ini sama seperti saya menikmati revisi ulang ini.

Lawrence M. Krauss
Cleveland, Ohio
November 2006

PENGANTAR

Ketika seseorang di sebuah pesta mengetahui bahwa saya adalah seorang fisikawan, dia segera (1) mengubah subjek, atau (2) bertanya tentang big bang, alam semesta lain, drive warp, quark, atau salah satu trilogi perkembangan 'super': superkonduktor, superstring, atau supercolliders. Bahkan orang-orang yang dengan bebas mengakui telah menghindari fisika di sekolah menengah dan tidak pernah menoleh ke belakang masih kadang-kadang terpesona dengan fenomena esoterik di garis depan bidang penelitian, meskipun mereka sering tidak menyadari bahwa itu adalah minatnya terhadap fisika. Fisika berurusan dengan banyak orang, pertanyaan kosmik yang, dalam satu atau lain hal, semua orang renungkan. Namun, fisika sering muncul asing dan tidak dapat diakses, sebagian karena fakta bahwa penelitian di garis depan kadang-kadang jauh dari pengalaman sehari-hari.

Tetapi ada kendala yang lebih mendasar yang menghalangi jalannya menuju ke mana fisika modern berjalan. Cara fisikawan mendekati masalah, dan bahasa yang mereka gunakan, juga dihapus dari arus utama aktivitas modern bagi

kebanyakan orang. Tanpa gestalt umum untuk memandu pengamat, fenomena dan konsep yang melekat pada fisika modern tetap terputus dan mengintimidasi.

Untuk menyajikan fisika modern seperti yang saya pahami, saya pikir saya tidak akan berkonsentrasi pada teori tertentu melainkan pada alat yang memandu ahli fisika dalam pekerjaan mereka. Jika seseorang ingin memperoleh apresiasi terhadap arah fisika modern saat ini, baik sebagai aktivitas intelektual manusia dan sebagai dasar bagi gambaran modern kita tentang alam semesta, jauh lebih mudah untuk melakukannya jika Anda terlebih dahulu memiliki beberapa gagasan tentang bagaimana masalah tersebut dibawa. Apa yang ingin saya sajikan di sini, kemudian, tidak begitu banyak panduan jejak melalui belantara fisika modern sebagai panduan tentang cara mendaki di tempat pertama: peralatan apa yang harus dibawa, bagaimana menghindari tebing dan jalan buntu, jejak seperti apa yang cenderung menjadi paling menarik, dan bagaimana pulang dengan selamat.

Fisikawan sendiri dapat mengikuti perkembangan modern hanya karena mereka sebagian besar didasarkan pada ide-ide fundamental yang sama yang telah berhasil diterapkan untuk mempelajari dunia sehari-hari. Teori fisika pada saat ini berkaitan dengan fenomena yang terjadi pada skala ruang dan waktu yang bervariasi oleh lebih dari enam puluh orde magnitude— yang berarti rasio terbesar ke terkecil adalah 1 diikuti oleh 60 nol. Eksperimen mencakup rentang yang agak lebih kecil, tetapi tidak jauh lebih kecil. Namun di tengah-tengah kebun binatang ini, setiap fenomena yang

digambarkan oleh satu fisikawan umumnya dapat diakses oleh yang lain melalui penggunaan mungkin selusin konsep dasar. Tidak ada bidang lain dari pengetahuan manusia yang begitu luas atau hanya dijebak begitu saja. Sebagian karena alasan ini, buku ini pendek. Alat-alat yang memandu fisika jumlahnya sedikit, dan sementara itu mungkin butuh tingkat yang lebih tinggi untuk menguasainya, tak perlu buku tebal besar untuk menjelaskannya. Jadi ketika Anda berjalan melalui masing-masing dari enam bab, Anda akan menemukan diskusi tentang ide kunci atau tema yang membimbing fisikawan dalam pencarian mereka. Untuk mengilustrasikan gagasan-gagasan ini, saya telah memilih contoh-contoh yang menjalankan keseluruhan fisika, dari hal-hal dasar hingga hal-hal yang ditulis para penulis sains New York Times minggu ini. Pilihannya mungkin kadang-kadang eklektik. Tetapi, ketika berkonsentrasi pada permulaan pada apa yang telah membimbing para fisikawan untuk mendapatkan tempat di mana kita berada, akhirnya saya akan berkonsentrasi pada apa yang menuntun kita untuk menuju ke mana kita akan pergi.

Juga, untuk alasan ini, saya telah mengambil kebebasan untuk memperkenalkan konsep-konsep yang cukup modern untuk mengilustrasikan sebuah tema. Beberapa pembaca mungkin menganggap ini sebagai bantuan yang menyenangkan dari gagasan-gagasan yang sudah mereka kenal. Orang lain mungkin menemukan mereka sesaat sulit dipahami. Beberapa gagasan ini, meski mendasar, belum pernah disajikan dalam literatur populer. Tidak penting Anda tidak akan diuji. Niat saya lebih untuk menghadirkan cita rasa

fisika daripada menguasai substansi. Saya pikir ini adalah wawasan, bukan pengetahuan kerja, yang paling berguna dan dibutuhkan oleh nonscientists di dunia saat ini, dan oleh karena itu adalah wawasan yang saya tuju.

Yang paling penting, ada hubungan yang halus dan indah antara banyak sketsa pendek yang akan saya sajikan yang berjalan di bawah permukaan. Koneksi inilah yang membentuk struktur fisika. Adalah kegembiraan dari fisikawan teoretis untuk menemukan mereka, dan para eksperimentalis untuk menguji kekuatan mereka. Pada akhirnya, mereka membuat fisika dapat diakses. Jika Anda cukup tertarik untuk mendambakan diskusi yang lebih komprehensif, ada banyak sumber daya lebih lanjut. Akhirnya, saya ingin menekankan bahwa fisika adalah aktivitas intelektual kreatif manusia, seperti seni dan musik. Fisika telah membantu menempa pengalaman budaya kita. Saya tidak yakin apa yang akan paling berpengaruh dalam warisan yang kita teruskan, tetapi saya yakin bahwa itu adalah kesalahan besar untuk mengabaikan aspek budaya dari tradisi ilmiah kita. Pada akhirnya, ilmu apa yang mengubah cara kita berpikir tentang dunia dan tempat kita di dalamnya. Menjadi buta huruf adalah tetap tidak berbudaya. Dan kebajikan utama dari kegiatan budaya baik itu seni, musik, sastra, atau sains adalah caranya memperkaya hidup kita. Melalui itu kita bisa mengalami kegembiraan, kesenagan, keindahan, misteri, petualangan. Satu-satunya hal yang saya pikir benar-benar membedakan ilmu dari hal-hal lain dalam daftar ini adalah bahwa ambangnya sedikit lebih tinggi sebelum umpan balik dimulai. Justru, pembenar-

an utama untuk banyak hal yang dilakukan oleh fisikawan adalah kesenangan pribadi yang kita dapat dari melakukan fisika. Ada sukacita universal dalam membuat koneksi baru. Ada kegembiraan dan keindahan di kedua keragaman dunia fisik dan kesederhanaan cara kerjanya yang mendasar. Jadi, dengan permintaan maaf kepada Erica Jong, buku ini didedikasikan untuk pertanyaan: Apakah mungkin bagi rata-rata orang untuk melepaskan hambatan, melepaskan, dan hanya menikmati kesenangan dasar dan sederhana dari fisika? Saya berharap begitu.

TERIMA KASIH

Buku ini tidak akan muncul sama sekali, atau setidaknya tidak akan muncul dalam bentuknya yang sekarang, kalau bukan karena sejumlah orang. Pertama, Martin Kessler, presiden Basic Books, menyontek saya selama sarapan hampir dua puluh tahun lalu untuk mengubah ide-ide saya tentang bagaimana fisikawan berpikir tentang fisika ke dalam apa yang terdengar seperti buku ambisius. Dalam setahun, kami telah menandatangani kontrak, yang dengan senang hati dia tangguhkan agar saya dapat menulis buku lain untuk Basic mengenai subjek yang saya pikir lebih tepat waktu. Editor saya untuk proyek itu, Richard Liebmann-Smith, menjadi teman baik, dan sebelum dia meninggalkan Basic Books, percakapan kami tentang buku ini membantu menyempurnakan visi saya tentang apa yang ingin saya capai. *Fear of Physics* menjadi sesuatu yang sangat berbeda dari apa yang awalnya saya bayangkan. Itu menjadi sesuatu yang kuharapkan istriku, Kate, ingin baca. Dan, faktanya, dia memberikan masukan konstan ketika saya menguji ide dan presentasi saya tentang dia. Memang, bab pertama tidak dikirim ke penerbit sampai itu telah mendapatkan mete-

rai persetujuan untuk keterbacaan dan menarik. Akhirnya, Susan Rabiner, editor sains senior di Basic Books, memainkan peran penting dalam membawa edisi pertama hingga selesai. Dialah yang meyakinkan saya bahwa visi baru saya dapat dikerjakan dan, yang lebih penting, bahwa *Basic Books* siap untuk memproduksi dan menjual buku jenis ini. Setelah kami menyelesaikan masalah ini dan akhirnya saya menghasilkan bab yang menyampaikan apa yang saya inginkan dalam gaya yang saya inginkan, Susan tak kenal lelah. Dukungannya yang antusias untuk buku ini memberikan motivasi yang konstan. Secara khusus, penjadwalannya tentang hal-hal seperti sampul dan penyalinan ulang jauh sebelumnya membuat komitmen saya tampak lebih nyata dan membantu saya menyelesaikan naskah kurang lebih tepat waktu sesuatu yang baru bagi saya. Selama penulisan, saya memiliki kesempatan untuk mendiskusikan berbagai ide yang ada di sini dengan orang-orang yang berbeda. Seperti yang telah saya katakan, istri saya sering memberikan filter yang tidak dilewati oleh berbagai hal. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada banyak siswa yang telah saya ajar selama bertahun-tahun dalam mata kuliah fisika untuk 'non-ilmuwan' yang telah membantu saya menyaring pikiran saya dengan memperjelas ketika sesuatu tidak berhasil. Saya khawatir saya mungkin memperoleh lebih banyak dari proses ini daripada yang mereka lakukan. Saya juga mendapat kesempatan, melalui pekerjaan saya sejak lama di Pusat Sains Ontario, untuk membantu membangun suatu penghargaan atas apa yang mungkin dipahami oleh para ahli non-fisika dan apa yang mungkin ingin mereka pahami

sering dua hal yang berbeda. Akhirnya, guru saya, dan kemudian rekan kerja dan kolaborator saya, telah memengaruhi pekerjaan ini baik secara langsung maupun tidak langsung. Ada terlalu banyak orang di grup ini yang harus disebutkan namanya. Mereka tahu siapa mereka, dan saya berterima kasih kepada mereka. Selanjutnya, karena siapa pun yang membaca buku ini akan segera menyadari, Richard Feynman memainkan peran yang berpengaruh dalam pemikiran saya tentang sejumlah bidang fisika, karena saya yakin dia melakukannya untuk banyak fisikawan. Saya juga ingin berterima kasih kepada Subir Sachdev untuk diskusi yang bermanfaat yang membantu saya memperbaiki diskusi saya tentang transisi fase dalam materi, Martin White dan Jules Coleman untuk membaca naskah dan memberikan komentar, dan Jatila Van der Veen-Davis dan Jennifer Elizabeth Marsh dalam kelas fisika dasar di UCSB untuk menggunakan versi draf dan menemukan kesalahan. Last but not least, saya ingin berterima kasih kepada putri saya, Lilli, karena meminjamkan saya komputernya selama beberapa periode ketika milik saya rusak. Dalam arti yang sebenarnya, buku ini tidak akan muncul sekarang tanpa bantuannya. Baik Lilli dan Kate mengorbankan waktu berharga yang bisa kami habiskan bersama ketika saya mengerjakan buku ini, dan saya berharap untuk menebusnya.

Misteri awal yang mengikuti setiap perjalanan adalah:
bagaimana pelancong mencapai titik awalnya di tempat
pertama?

Louise Bogan,
Journey Around My Room

Daftar Isi

Pengantar	**i**
BAGIAN PERTAMA: PROSES	
1. Melihat dari mana Cahaya	**3**
2. Seni Bilangan	**43**
BAGIAN KEDUA: PROGRESS	
3. Plagiasi Kreatif	**85**
4. Realitas-realitas Tersembunyi	**155**
BAGIAN KETIGA: PRINSIP-PRINSIP	
5. Pencarian Simetri	**221**
6. Tidak akan Berakhir Hingga Ini Selesai	**279**

BAGIAN SATU:
PROSES

MELIHAT DARI MANA CAHAYA

Jika satu-satunya alat yang Anda miliki adalah palu,
Anda cenderung memperlakukan segala sesuatu
seolah-olah paku.

Seorang fisikawan, seorang insinyur, dan seorang psikolog dipanggil sebagai konsultan ke peternakan sapi perah yang produksinya di bawah rata-rata. Masing-masing diberi waktu untuk memeriksa rincian operasi sebelum membuat laporan.

Yang pertama dipanggil adalah insinyur, yang menyatakan: "Ukuran kandang ternak harus dikurangi. Efisiensi dapat ditingkatkan jika sapi-sapi itu di tempatkan lebih berdekatan, dengan jatah luasan bersih 275 kaki kubik per sapi. Juga, diameter tabung pemerahan harus ditingkatkan sebesar 4 persen untuk memungkinkan laju aliran rata-rata yang lebih besar selama periode pemerahan."

Laporan berikutnya adalah psikolog, yang mengusulkan: "Bagian dalam lumbung (tempat sapi) harus dicat hijau.

Hijau adalah warna yang lebih lembut dari coklat dan membantu mendorong aliran susu yang lebih besar. Juga, lebih banyak pohon harus ditanam di ladang (tempat penggembalaan) untuk menambah keragaman pemandangan untuk ternak selama merumput, untuk mengurangi kebosanan."

Akhirnya, fisikawan dipanggil. Ia meminta papan tulis dan kemudian menggambar lingkaran. Ia memulai: "Asumsikan bahwa sapi adalah sebuah kulit bola ...."[1]

Ini lelucon lama, jika tidak terlalu lucu, mengilustrasikan bagaimana—setidaknya secara metaforis—seorang fisikawan menggambarkan dunia. Seperangkat alat fisikawan yang harus menjelaskan alam itu sendiri terbatas. Sebagian besar teori modern yang Anda baca tentang permulaan kehidupan sebagai model sederhana oleh fisikawan yang tidak tahu bagaimana lagi cara memecahkan masalah. Model-model kecil yang sederhana ini biasanya didasarkan pada model-model kecil yang lebih sederhana, dan seterusnya, karena sekumpulan hal-hal yang kita tahu bagaimana memecahkannya dapat dihitung dengan jari satu, mungkin dua, atau seluruh tangan. Untuk sebagian besar, fisikawan mengikuti pedoman yang sama yang telah membantu para produser film Hollywood tetap kaya: Jika berhasil, manfaatkan. Jika masih berfungsi, salin.

Saya suka lelucon sapi karena ini memberikan alegori[2] untuk berpikir secara sederhana tentang dunia, dan itu

[1] Kulit bola yang merupakan terjemahan dari *sphere* dipilih untuk membedakan dari terjemahan *ball* yang berarti bola.

[2] Alegori adalah cerita yang dipakai sebagai suatu majas (ibarat atau kias) perikehidupan manusia yang sebenarnya untuk mendidik (terutama moral) atau menerangkan sesuatu (gagasan, cita-cita, atau nilai kehidupan, seperti kebijakan, kesetiaan, dan kejujuran)

memungkinkan saya untuk melompat ke dalam ide yang tidak terlalu banyak ditulis, tetapi itu penting untuk pekerjaan harian sains: *Sebelum melakukan hal lain, abstraksikan seluruh rincian yang tidak relevan!*

Ada dua mode operatif di sini: abstrak dan tak-relevan. Menyingkirkan perincian yang tak-relevan adalah langkah pertama dalam membangun model dunia apapun, dan kita melakukannya secara tidak sadar sejak saat kita dilahirkan. Melakukannya secara sadar adalah masalah lain. Mengatasi keinginan alami untuk tidak membuang informasi yang tidak perlu mungkin adalah bagian yang paling sulit dan paling penting dalam pembelajaran fisika. Selain itu, apa yang mungkin tak-relevan dalam situasi tertentu tidaklah universal tetapi sebagian besar kasus bergantung pada apa yang menarik bagi Anda. Ini membawa kita pada kata mode operatif kedua: abstraksi. Dari semua pemikiran abstrak yang diperlukan dalam fisika, mungkin yang paling menantang terletak dalam pemilihan cara mendekati sebuah persoalan. Hanya deskripsi gerak sepanjang garis lurus—perkembangan besar pertama dalam fisika modern—membutuhkan abstraksi yang cukup sehingga sebagian besar menghindari beberapa intelek yang cukup mengesankan sampai Galileo, seperti yang akan saya bahas selanjutnya. Untuk saat ini, mari kembali ke fisikawan kita dan sapinya untuk contoh betapa abstraksi dapat menjadi sangat berguna bahkan luar biasa.

Perhatikan gambar sapi (Gambar 1).

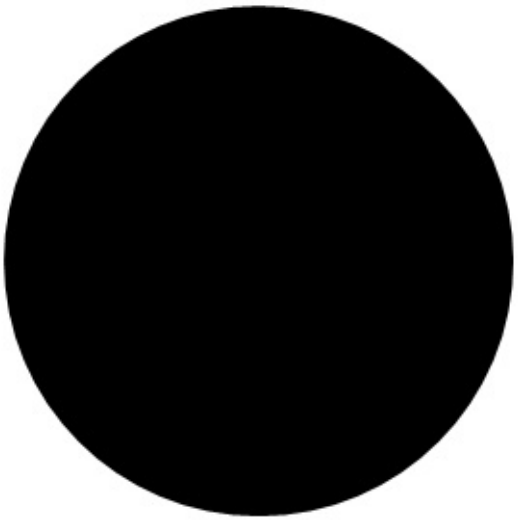
Sekarang bayangkan sebuah sapi-super—yang identik dengan seekor sapi normal (lihat Gambar 3), terkecuali bahwa semua dimensinya diperbesar dua kali lipat, seperti



Gambar 1: Sebuah kulit bola yang menggambarkan seekor sapi.

ditunjukkan pada Gambar 2.

Apa perbedaan antara dua sapi ini? Ketika kita mengatakan yang satu adalah dua kali lebih besar dari yang lain, apa yang sebenarnya kita maksudkan? Sapi-super dua kali ukurannya, tetapi apakah itu dua kali lebih besar? Berapa beratnya, misalnya? Nah, jika sapi terbuat dari bahan yang sama, masuk akal untuk mengandaikan bahwa berat mereka akan bergantung pada jumlah bersih dari bahan ini. Jumlahnya bergantung pada volume sapi. Untuk bentuk yang rumit, mungkin sulit memperkirakan volumenya, tetapi untuk sebuah kulit bola itu sangat mudah. Anda bahkan mungkin ingat apa yang diajarkan ketika SMA bahwa jika jari-jari r, volume sama dengan $(4\pi/3)r^3$. Tetapi kita tidak harus tahu volume persis sapi di sini, hanya rasio volumenya. Kita bisa menebaknya dengan mengingat bahwa volume dikutip dalam kubik-inci, kaki-kubik, mil-kubik, dan seterusnya. Kata yang penting di sini adalah *kubik*.



Gambar 2: Sebuah kulit bola yang lebih besar menggambarkan sapi-super yang identik dengan penggambaran seekor sapi normal.



Gambar 3: Sebuah kulit bola yang menggambarkan seekor sapi normal.

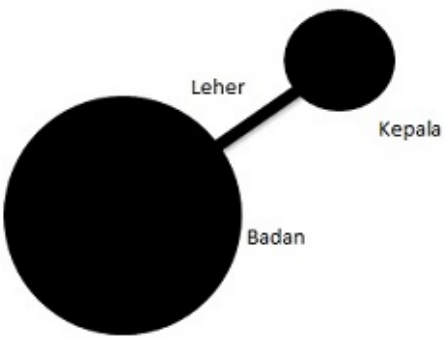
Jadi, jika saya meningkatkan dimensi linier sesuatu sebesar 2, volumenya meningkat sebesar kubus 2, yaitu $2 \times 2 \times 2$, atau 8. Jadi sapi-super sebenarnya beratnya 8 kali lebih banyak dari sapi normal. Tetapi bagaimana jika saya ingin membuat pakaian dari kulit sapi tersebut? Berapa banyak lagi yang bisa disembunyikan dari sapi normal? Nah, jumlah yang tersembunyi meningkat seiring luas permukaan sapi. Jika saya meningkatkan dimensi linier sebesar 2, luas permukaan—diukur dalam inci *persegi*, kaki, mil, dan seterusnya—meningkat sebesar *kuadrat* 2 atau 4.

Jadi sapi yang dua kali "lebih besar" beratnya 8 kali lebih banyak dan memiliki 4 kali lebih banyak kulit yang menyelimuti bersamanya. Jika Anda pikir, hal itu mengartikan bahwa sapi-super memiliki tekanan dua kali lebih banyak pada kulitnya sebagaimana dimiliki sapi normal, karena beratnya. Jika saya terus meningkatkan ukuran sapi kulit bola, pada titik tertentu kulit (atau organ di dekat kulit) tidak akan memiliki kekuatan untuk mendukung tekanan ekstra ini dan sapi akan pecah! Jadi ada batas seberapa besar peternak, bahkan yang paling berbakat, dapat membiakkan sapi-sapinya—bukan karena biologi tetapi karena hukum penskalaan alam.

Hukum-hukum penskalaan ini tidak bergantung pada bentuk sebenarnya dari sapi, jadi tidak ada yang hilang dengan membayangkannya sebagai bentuk sederhana seperti kulit bola, yang semuanya dapat dihitung dengan tepat. Jika saya telah mencoba untuk menentukan volume sapi yang berbentuk tidak beraturan dan untuk mengetahui bagaimana ia berubah ketika saya menggandakan semua

dimensi hewan, saya akan mendapatkan hasil yang sama tetapi itu akan menjadi lebih sulit. Jadi untuk tujuan saya di sini, seekor sapi adalah sebuah kulit bola!

Sekarang, saat kita meningkatkan perkiraan kita terhadap bentuk sapi, kita dapat menemukan hubungan skala baru. Misalnya, gambar sapi sedikit lebih realistis, seperti Gambar 4



Gambar 4: Sapi dengan dua kulit bola (dihubungkan dengan sebuah batang).

Argumen penskalaan masih berlaku tidak hanya untuk seluruh sapi tetapi juga untuk masing-masing bagiannya. Dengan demikian, seekor sapi-super sekarang akan memiliki kepala 8 kali lebih besar dari sapi normal. Sekarang perhatikan leher yang menghubungkan kepala ke tubuh, diwakili di sini oleh sebuah batang atau tongkat. Kekuatan batang ini proporsional dengan luas penampangnya (yaitu, batang yang lebih tebal akan lebih kuat dari batang yang lebih tipis

yang dibuat dari bahan yang sama). Batang yang dua kali lebih tebal memiliki luas penampang yang 4 kali lebih besar. Jadi berat kepala sapi-super 8 kali lebih besar dari sapi normal, tetapi lehernya hanya 4 kali lebih kuat. Sehubungan dengan sapi normal, leher hanya setengah efektif dalam mengangkat kepala. Jika kita terus meningkatkan dimensi sapi-super kita, tulang-tulang di lehernya dengan cepat menjadi tidak dapat menopang kepalanya. Ini menjelaskan mengapa kepala dinosaurus harus sangat kecil proporsional dengan tubuh raksasa mereka, dan mengapa hewan dengan kepala terbesar (proporsional dengan tubuh mereka), seperti lumba-lumba dan paus, hidup di air: Hewan-hewan tersebut bertindak seolah-olah mereka lebih ringan di dalam air, jadi lebih sedikit kekuatan yang diperlukan untuk menahan berat kepala.

Sekarang kita dapat memahami mengapa fisikawan dalam cerita itu tidak merekomendasikan menghasilkan sapi yang lebih besar sebagai cara untuk mengurangi masalah produksi susu! Lebih penting lagi, bahkan menggunakan abstraksi naifnya, kita mampu menyimpulkan beberapa prinsip umum tentang penskalaan di alam. Karena semua prinsip penskalaan sebagian besar tidak bergantung pada bentuk, kita dapat menggunakan bentuk paling sederhana yang mungkin untuk memahaminya.

Masih banyak lagi yang bisa kita lakukan dengan contoh sederhana ini, dan saya akan kembali lagi. Pertama saya ingin kembali ke Galileo. Yang paling menonjol di antara pencapaiannya adalah preseden[3] yang ia ciptakan 400 tahun

[3] Hal yang telah terjadi lebih dahulu dan dapat dipakai sebagai

yang lalu untuk mengabstraksikan ketidakrelevanan ketika ia benar-benar menciptakan sains modern dengan menguraikan gerak.

Salah satu ciri paling jelas tentang dunia, yang membuat deskripsi umum tentang gerak tampak tidak mungkin, adalah bahwa semuanya bergerak secara berbeda. Bulu-bulu jatuh dengan lembut ketika terlepas dari burung yang sedang terbang, tetapi kotoran merpati jatuh seperti batu tanpa ragu di kaca depan Anda. Bola-bola boling bergulinggguling sembarangan oleh seorang anak berusia tiga tahun secara kebetulan berjalan sepanjang jalan di gang, sementara mesin pemotong rumput tidak akan bergerak sedikit pun dengan sendirinya. Galileo mengakui bahwa kualitas dunia yang paling jelas ini juga yang paling tidak relevan, setidaknya sejauh menyangkut pemahaman tentang gerak. Marshall McLuhan barangkali mengatakan bahwa mediumnya adalah pesan, tetapi Galileo telah menemukan jauh lebih awal bahwa medium hanya menghalangi jalan. Filsuf sebelum dia berpendapat bahwa media sangat penting bagi keberadaan gerak, tetapi Galileo menyatakan bahwa esensi gerak dapat dipahami hanya dengan menghilangkan kebingungan yang diperkenalkan oleh keadaan tertentu di mana objek bergerak menemukan dirinya: “Apakah Anda tidak mengamati bahwa dua benda yang jatuh dalam air, satu dengan kecepatan seratus kali lebih besar dari yang lain, akan jatuh di udara dengan kecepatan hampir sama dengan yang satu tidak akan melampaui yang lain sebanyak seperseratus bagian? Jadi, misalnya, telur yang terbuat

contoh.

dari marmer akan turun dalam air seratus kali lebih cepat daripada telur ayam betina, sementara di udara yang jatuh dari ketinggian dua puluh hasta, telur itu akan jatuh dengan beda kurang dari empat jari-lebarnya dari yang lain."

Berdasarkan argumen ini, dia mengklaim, dengan benar, bahwa jika kita mengabaikan efek medium, semua objek akan jatuh dengan cara yang persis sama. Selain itu, dia mempersiapkan untuk serangan kritik dari mereka yang tidak siap untuk abstraksinya dengan mendefinisikan esensi tak-relevan: "Saya percaya Anda tidak akan mengikuti contoh dari banyak orang lain yang mengalihkan diskusi dari niat utamanya dan mengikat pada beberapa pernyataan saya yang tidak memiliki kebenaran tentang rambut dan, di bawah rambut ini, menyembunyikan kesalahan orang lain yang sebesar kabel kapal."[4]

Ini persis apa yang dia argumentasikan pada yang Aristoteles lakukan dengan tidak berfokus pada kesamaan dalam gerak benda tetapi pada perbedaan yang disebabkan oleh efek medium. Dalam pengertian ini, dunia "ideal" di mana tidak ada medium untuk menghalangi adalah hanya "luasan-rambut" jauh dari yang asli.

Ketika abstraksi yang mendalam ini telah dibuat, yang sisanya secara lugas: Galileo berpendapat bahwa benda-benda bergerak bebas, tanpa tunduk pada kekuatan eksternal, akan terus bergerak "lurus dan maju"—sejajar garis lurus dengan kecepatan konstan—terlepas dari gerak mereka sebelumnya.

[4] Galileo Galilei, Dialogues Concerning Two New Sciences, trans. Henry Crew and Alfonso de Salvio (New York: Dover, 1954; original ed., 1914), pp. 67, 64.

Galileo sampai pada hasil ini dengan beralih ke contoh di mana medium memberikan sedikit efek, seperti es di bawah kaki, untuk menyatakan bahwa benda-benda secara alami akan berlanjut pada kecepatan konstan, tanpa memperlambat, mempercepat, atau berputar. Apa yang Aristoteles katakan adalah keadaan gerak alami—mendekati keadaan berhenti (diam)—kemudian dilihat sebagai sekadar komplikasi yang timbul dari keberadaan medium luar.

Mengapa pengamatan ini sangat penting? Ini menghilangkan perbedaan antara objek yang bergerak dengan kecepatan konstan dan benda-benda yang diam. Mereka sama karena kedua objek akan terus melakukan apa yang mereka lakukan kecuali mereka dipengaruhi oleh sesuatu. Satu-satunya perbedaan antara kecepatan konstan dan kecepatan nol adalah besarnya kecepatan—nol hanyalah salah satu dari sejumlah kemungkinan tak-berhingga. Pengamatan ini memungkinkan Galileo untuk menghapus apa yang menjadi fokus studi gerak—katakanlah, posisi objek—dan mengalihkan fokus itu ke bagaimana posisi berubah, yaitu, apakah kecepatannya konstan atau tidak. Begitu Anda mengenali bahwa benda yang tidak terpengaruh oleh berbagai gaya apa pun akan bergerak dengan kecepatan konstan, maka itu adalah lompatan yang lebih kecil (meskipun salah satu yang menuntut kecerdasan Isaac Newton untuk menyelesaikan) untuk mengenali bahwa efek sebuah gaya akan mengubah kecepatan. Efek gaya konstan tidak akan mengubah posisi benda dengan jumlah yang konstan, melainkan kecepatannya. Demikian pula, gaya yang berubah akan tercermin oleh kecepatan yang perubahannya sendiri beru-

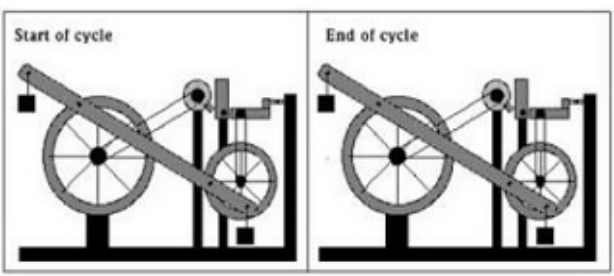
bah! Itu adalah Hukum Newton. Dengan hukum tersebut, gerak semua benda di bawah matahari dapat dipahami, dan sifat semua kekuatan di alam—hal-hal yang berada di balik semua perubahan di alam semesta—dapat diperiksa: Fisika modern menjadi mungkin. Dan semua ini tidak akan sampai jika Galileo tidak mengeluarkan rincian yang tidak perlu untuk mengetahui bahwa apa yang benar-benar penting adalah kecepatan, dan apakah itu konstan atau tidak.

Sayangnya, dalam mencoba memahami hal-hal secara tepat, kita sering kehilangan hal-hal fundamental yang penting dan terpaku pada masalah-masalah sampingan. Jika Galileo dan Aristoteles tampak sedikit terkesampingkan, berikut ini contoh yang lebih dekat dengan kehidupan saya pribadi. Seorang kerabat saya, bersama dengan beberapa orang lain—semua individu yang berpendidikan perguruan tinggi, seorang guru fisika sekolah menengah—menginvestasikan lebih dari satu juta dolar dalam proyek yang melibatkan pengembangan mesin baru dengan bahan bakar satu-satunya berasal dari medan gravitasi Bumi. Didorong oleh impian untuk memecahkan krisis energi dunia, menghilangkan ketergantungan domestik pada minyak asing, dan menjadi sangat kaya, mereka membiarkan diri mereka yakin bahwa mesin dapat disempurnakan hanya dengan sedikit lebih banyak uang.

Orang-orang ini tidak begitu naif untuk percaya bahwa Anda bisa mendapatkan sesuatu untuk hal yang sia-sia. Mereka tidak mengira mereka berinvestasi dalam mesin ‘perpetual motion‘. Mereka berasumsi bahwa itu entah bagaimana mengekstraksi ‘energi’ dari medan gravitasi Bumi.

Perangkat ini memiliki begitu banyak roda gigi, puli, dan pengungkit sehingga para investor merasa bahwa mereka tidak dapat mengisolasi mekanisme sebenarnya yang menggerakkan mesin atau mencoba analisis detail fitur-fitur teknisnya. Dalam demonstrasi yang sebenarnya, setelah rem pada mesin dilepaskan, roda gila besar mulai berputar dan muncul untuk mendapatkan kecepatan sesaat selama demonstrasi, dan ini tampak meyakinkan.

Terlepas dari kerumitan detail mesin, ketika rincian ini diabaikan, kemustahilan mesin menjadi nyata. Pertimbangkan konfigurasi prototipe yang saya gambar di bawah ini pada awal dan akhir dari satu siklus lengkap (ketika semua roda telah membuat satu revolusi lengkap), seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5: Prototipe mesin "perpetual motion".

Setiap roda gigi, setiap puli, setiap mur, setiap baut, berada di tempat yang sama! Tidak ada yang berubah, tidak ada yang 'jatuh', tidak ada yang menguap. Jika flywheel besar (dalam teknik disebut roda gila) berdiri diam di awal siklus, bagaimana bisa bergerak pada akhirnya?

Masalah dengan mencoba melakukan analisis 'rekayasa' perangkat adalah bahwa jika ada komponen manusia, mungkin sangat sulit untuk menentukan di mana dan kapan kekuatan pada komponen tertentu menyebabkan gerak berhenti. Analisis 'fisika' melibatkan konsentrasi pada hal-hal mendasar dan bukan detailnya. Masukkan semuanya ke dalam kotak hitam, misalnya (satu kulit bola jika Anda mau!), Dan pertimbangkan hanya persyaratan sederhana: Jika sesuatu, seperti energi, akan diproduksi, itu harus datang dari dalam; tetapi jika tidak ada perubahan di dalam, tidak ada yang bisa keluar. Jika Anda mencoba untuk terus melacak segalanya, Anda dapat dengan mudah kehilangan hutan hanya karena pepohonan.

Bagaimana Anda tahu sebelumnya apa yang penting dari apa yang dapat Anda buang? Seringkali Anda tidak tahu. Satu-satunya cara untuk mengetahuinya adalah untuk terus maju sebaik mungkin dan melihat apakah hasilnya masuk akal. Dalam kata-kata Richard Feynman, "*Torpedo sialan, majulah dengan kecepatan penuh!*."[5]

Pertimbangkan, misalnya, mencoba memahami struktur matahari. Untuk menghasilkan energi yang diamati yang dipancarkan dari permukaan matahari, setara dengan ratusan miliar bom hidrogen harus meledak setiap detik dalam inti yang sangat panas dan padat yang tak terbayangkan! Di hadapannya, orang tidak bisa membayangkan lingkungan yang lebih bergejolak dan kompleks. Beruntung bagi spesies manusia, tungku surya tetap sangat konsisten sela-

[5] Beberapa atribut ini untuk Admiral Dewey, tetapi ia mungkin mengacu pada sesuatu yang berbeda.

ma beberapa miliar tahun terakhir, jadi masuk akal untuk mengasumsikan bahwa materi-materi di dalam matahari cukup terkendali. Alternatif paling sederhana dan, yang lebih penting, mungkin satu-satunya yang cocok bahkan untuk kemungkinan perlakuan analitis, adalah menganggap bagian dalam matahari berada dalam 'keseimbangan hidrostatik'. Ini berarti bahwa reaksi nuklir terjadi di dalam matahari memanaskannya hingga hanya tekanan yang cukup dibuat untuk menahan bagian luar, yang jika tidak akan runtuh ke dalam karena gravitasi. Jika bagian luar matahari mulai runtuh ke dalam, tekanan dan termperatur di dalam matahari akan meningkat, menyebabkan reaksi nuklir terjadi lebih cepat, yang pada gilirannya akan menyebabkan tekanan meningkat lebih besar dan mendorong bagian luar kembali. Demikian pula, jika matahari mengembang dalam ukuran, inti akan menjadi lebih dingin, reaksi nuklir akan berjalan lebih lambat, tekanan akan turun, dan bagian luar akan turun sedikit. Jadi matahari terus menyala dengan kecepatan yang sama dalam interval waktu yang lama. Dalam pengertian ini, matahari bekerja seperti piston di mesin mobil Anda saat Anda berjalan di kelajuan yang konstan.

Bahkan penjelasan ini akan terlalu sulit untuk ditangani secara numerik jika kita tidak membuat beberapa penyederhanaan lebih lanjut. Pertama, kita asumsikan matahari adalah kulit bola! Yakni, kita mengasumsikan bahwa kerapatan matahari berubah dengan cara yang persis sama dengan kita melakukan perjalanan keluar dari pusatnya ke segala arah—kita mengasumsikan densitas, tekanan, dan temperatur sama di mana pun di permukaan kulit bola apa

pun di dalam matahari. Selanjutnya, kita mengasumsikan bahwa banyak hal lain yang secara dramatis dapat menyulitkan dinamika matahari, seperti medan magnet besar di intinya, tidak ada.

Berbeda dengan asumsi keseimbangan hidrostatik, asumsi ini tidak dibuat terutama berdasarkan fisis. Apalagi, kita tahu dari pengamatan bahwa matahari berotasi, dan ini menyebabkan variasi spasial yang dapat diamati sebagai salah satu bergerak di sekitar permukaan matahari. Demikian pula, keberadaan bintik matahari memberitahu kita bahwa kondisi di permukaan matahari bervariasi—periode aktivitasnya bervariasi secara teratur pada siklus sebelas tahun di permukaan. Kita mengabaikan komplikasi ini karena sebagian besar mereka terlalu sulit untuk ditangani, setidaknya pada awalnya, dan karena itu cukup masuk akal bahwa jumlah rotasi matahari dan kopling antara efek permukaan dan inti matahari keduanya cukup kecil untuk diabaikan tanpa membuang prediksi kita.

Jadi seberapa baik model matahari ini bekerja? Lebih baik daripada yang mungkin kita punya hak untuk mengharapkan. Ukuran, temperatur permukaan, kecerahan, dan usia matahari dapat sesuai dengan akurasi yang sangat tinggi. Lebih mengejutkan, mungkin, sama seperti gelas kristal yang bergetar dengan gelombang suara ketika pelek (jari-jari)-nya tertarik dengan jari Anda, sama seperti Bumi bergetar dengan 'gelombang seismik' karena tekanan yang dilepaskan oleh gempa bumi, matahari, juga, bergetar dengan frekuensi karakteristik karena semua kehebohan terjadi di dalam. Getaran ini menyebabkan gerak di per-

mukaannya yang dapat diamati dari Bumi, dan frekuensi gerak ini dapat memberi tahu kita banyak tentang interior matahari, dengan cara yang sama bahwa gelombang seismik dapat digunakan untuk menyelidiki komposisi Bumi ketika mencari minyak. Apa yang telah dikenal sebagai Standard Solar Model—model yang menggabungkan semua perkiraan yang baru saya gambarkan—memprediksi lebih atau kurang tepatnya spektrum osilasi di permukaan matahari yang kita amati.

Dengan demikian tampaknya aman untuk membayangkan bahwa matahari benar-benar seperti sebuah permukaan kulit bola sederhana—bahwa gambaran perkiraan kita sangat dekat dengan yang asli. Namun, ada masalah. Selain menghasilkan panas dan cahaya yang melimpah, reaksi nuklir yang terjadi di dalam matahari menghasilkan hal-hal lain. Yang paling penting, mereka menghasilkan partikel elementer yang aneh, objek mikroskopis yang mirip dengan partikel seperti elektron dan quark yang membentuk atom, yang disebut neutrino. Partikel-partikel ini memiliki perbedaan penting dari partikel yang membentuk materi biasa. Mereka berinteraksi sangat lemah dengan materi normal, pada kenyataannya, bahwa sebagian besar neutrino bergerak melalui Bumi tanpa pernah tahu ada di sana. Dalam waktu yang Anda butuhkan untuk membaca kalimat ini, seribu miliar neutrino yang berasal dari tungku surya yang berapi-api telah mengalir melalui tubuh Anda. (Entah siang atau malam, karena pada malam hari neutrino dari matahari juga menjelajah Bumi untuk menusuk Anda dari bawah!) Hal ini pertama kali diusulkan pada tahun 1930-an, bahwa

neutrino telah memainkan peran yang sangat penting dalam pemahaman kita tentang alam pada skala terkecil. Neutrino dari matahari, bagaimanapun, tidak menyebabkan apapun kecuali kebingungan.

Perhitungan Solar-Model yang sama yang memprediksi dengan baik semua fitur teramati lain dari matahari seharusnya memungkinkan kita untuk memprediksi berapa banyak neutrino energi yang akan tiba di permukaan Bumi setiap saat. Dan sementara Anda mungkin membayangkan bahwa makhluk yang sulit ditangkap ini mustahil untuk dideteksi, eksperimen besar bawah tanah telah dibangun dengan banyak kecerdikan, kesabaran, dan teknologi tinggi untuk melakukan hal itu. Yang pertama ini, di tambang yang dalam di Dakota Selatan, melibatkan tangki dari 100.000 galon cairan pembersih, di mana satu atom klorin setiap hari diperkirakan akan diubah menjadi atom argon oleh interaksi dengan neutrino yang mengalir dari matahari. Setelah dua puluh lima tahun, dua percobaan berbeda yang sensitif terhadap neutrino berenergi tinggi ini dari matahari sekarang telah melaporkan hasil mereka. Keduanya menemukan neutrino lebih sedikit dari yang diperkirakan, antara satu setengah dan seperempat dari jumlah yang diprediksi.

Reaksi pertama Anda terhadap hal ini mungkin karena itu tidak ada gunanya. Untuk memprediksi hasil yang secara singkat dapat dilihat sebagai kesuksesan besar, karena prediksi ini bergantung pada perkiraan tungku matahari yang telah saya diskusikan. Memang, banyak fisikawan menganggap ini sebagai tanda bahwa setidaknya satu dari prediksi ini tidak layak. Yang lain, terutama yang terlibat

dengan pengembangan Model Solar Standar, mengatakan ini sangat tidak mungkin, mengingat kesepakatan yang sangat baik dengan semua yang dapat diobservasi lainnya.

Tahun 1990-an, bagaimanapun, menghasilkan serangkaian eksperimen heroik yang akhirnya memecahkan misteri ini. Rangkaian percobaan pertama melibatkan detektor air tanah raksasa seberat 50.000 ton yang mampu mendeteksi begitu banyak peristiwa neutrino yang dapat dikonfirmasikan dengan akurasi sangat tinggi yang pada kenyataannya lebih sedikit neutrino muncul dari matahari daripada yang diperkirakan.

Selanjutnya, tipe baru detektor bawah tanah, menggunakan air berat bukan air biasa, dibangun di Sudbury, Kanada. Satu hal yang belum saya jelaskan adalah bahwa semua detektor neutrino sebelumnya sensitif terutama hanya pada satu jenis neutrino, dan ternyata ada tiga jenis neutrino yang berbeda di alam yang kita ketahui. Reaksi nuklir menghasilkan satu jenis neutrino, yang disebut neutrino-elektron, sehingga masuk akal bahwa semua detektor asli sensitif hanya pada elektronneutrino ini.

Salah satu cara eksotis yang mungkin untuk menyelesaikan masalah neutrino matahari, seperti yang diketahui, adalah jika entah bagaimana elektronneutrino yang dipancarkan oleh reaksi nuklir di matahari adalah untuk mengubah diri menjadi beberapa jenis neutrino lain di dalam matahari, atau pada jalan mereka ke Bumi. Hal ini akan memerlukan beberapa jenis proses fisis baru yang bukan bagian dari apa yang dikenal sebagai Model Standar fisika partikel—khususnya yang mengharuskan neutrino bukan

partikel tanpa massa, tetapi memiliki massa yang sangat kecil. Dalam kasus apapun, jika elektronneutrino diubah menjadi jenis neutrino lain sebelum mencapai detektor terestrial maka ini akan menjelaskan mengapa lebih sedikit yang diamati daripada yang diperkirakan.

Detektor air berat dapat secara bersamaan mendeteksi kedua neutrino-elektron dan dua jenis neutrino lainnya, menggunakan dua jenis interaksi neutrino yang berbeda dengan neutron dalam air berat. Lihatlah, ketika debu telah mengendap, dan semua jenis neutrino dihitung, ternyata jumlah total neutrino yang berasal dari matahari adalah jumlah yang diprediksi oleh Standard Solar Model! Neutrino 'osilasi' telah diamati, massa neutrino ditemukan, dan beberapa fisikawan yang sangat senang menerima Hadiah Nobel. Sekali lagi, mendekati matahari, seperti sapi, sebagai permukaan bola sederhana, telah terbukti sebagai pendekatan kuat yang mengungkapkan sisi lain permadani alam yang tersembunyi.

Kita dapat mendorong lebih jauh lagi aproksimasi bahwa matahari adalah kulit bola, untuk menyelidiki lebih banyak lagi tentang alam semesta. Kita dapat mencoba memahami bintang lain, lebih besar dan lebih kecil, lebih muda dan lebih tua, daripada matahari. Khususnya, gambaran sederhana dari keseimbangan hidrostatik seharusnya memberi kita gambaran kasar tentang perilaku umum bintang-bintang di sepanjang masa kehidupan mereka. Sebagai contoh, dari bintang waktu pertama mulai terbentuk dari gas runtuh sampai reaksi nuklir pertama kali dihidupkan, gas terus menjadi lebih panas dan lebih panas. Jika bintang terlalu

kecil, panas gas pada tingkat pranuklir dapat memberikan tekanan yang cukup untuk mendukung massanya. Dalam hal ini, bintang tidak akan pernah 'menyala', dan reaksi nuklir tidak akan dimulai. Jupiter adalah objek seperti itu, misalnya. Namun, untuk gumpalan yang lebih besar, keruntuhan terus berlanjut sampai pengapian nuklir dimulai dan panas yang dilepaskan memberikan tekanan tambahan yang dapat menghentikan keruntuhan lebih lanjut dan menstabilkan sistem. Akhirnya, ketika bahan bakar hidrogen untuk reaksi nuklir mulai berkurang, keruntuhan bagian dalam yang lambat dimulai lagi, hingga inti bintang itu cukup panas untuk membakar produk dari serangkaian reaksi pertama, helium. Untuk banyak bintang, proses ini terus berlanjut, setiap kali membakar produk dari serangkaian reaksi sebelumnya, sampai inti bintang—sekarang disebut raksasa merah atau biru, karena perubahan warna permukaannya saat kulit luar mengembang menjadi ukuran besar. Pada saat yang sama dengan inti bagian dalam menjadi lebih panas dan lebih padat —terutama terdiri dari besi. Di sini prosesnya harus berhenti, dengan satu atau lain cara, karena zat besi tidak dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir, karena fakta bahwa unsur-unsur dari nukleusnya—proton dan neutron—begitu terikat satu sama lain sehingga mereka tidak dapat melepaskan energi yang lebih mengikat dengan menjadi bagian dari sistem yang lebih besar. Apa yang terjadi pada titik ini? Satu dari dua hal. Entah bintang itu perlahan mati, seperti pertandingan di ujung tongkatnya atau, untuk bintang yang lebih masif, salah satu peristiwa paling menakjubkan di alam semesta

terjadi: Bintang meledak!

Bintang yang meledak, atau *supernova*, dihasilkan selama pertunjukan kembang api yang pendek, kurang lebih sama banyaknya dengan seluruh galaksi, lebih dari seratus miliar bintang normal. Sulit untuk bersusah payah dengan kekuatan yang dilepaskan selama kejadian semacam itu. Hanya beberapa detik sebelum ledakan akhir dimulai, bintang dengan tenang membakar sisa bahan bakar yang tersedia, sampai tekanan yang dihasilkan oleh hembusan terakhir bintang tidak lagi cukup untuk menahan inti besi yang sangat padat, mengandung massa sebanyak matahari kita tetapi dikompresi menjadi wilayah seukuran Bumi—satu juta kali lebih kecil. Dalam waktu kurang dari satu detik, seluruh massa ini runtuh ke dalam, dalam prosesnya melepaskan energi dalam jumlah besar. Keruntuhan ini berlanjut sampai seluruh inti terkandung dalam sebuah bola dengan radius kira-kira 10 kilometer (6 mil)—sekitar ukuran New Haven, Connecticut. Pada titik ini, materi ini begitu padat sehingga satu sendok teh akan memiliki ukuran berat ribuan ton. Lebih penting lagi, inti atom yang sangat padat dari besi mulai berkumpul bersama, 'bersentuhan', seolah-olah. Pada titik ini, materi tiba-tiba menegang, dan sumber tekanan baru, karena interaksi inti yang padat ini, menjadi penting. Keruntuhan berhenti, inti 'memantul', dan gelombang kejut didorong keluar, melalui inti, ribuan mil ke kulit terluar bintang, yang secara harfiah diledakkan dan terlihat oleh kita sebagai supernova.

Gambaran keruntuhan inti dari sebuah bintang yang meledak ini dibangun selama puluhan tahun kerja analitis dan

numerik yang melelahkan oleh tim peneliti setelah proposal pertama oleh S. Chandrasekhar pada tahun 1939 bahwa skenario yang tak terduga bisa terjadi. Ini semua merupakan hasil dari ide sederhana dari keseimbangan hidrostatik, yang kita yakini mengatur struktur matahari. Selama lima puluh tahun setelah pertama kali diusulkan, proses yang mengatur runtuhnya bintang tetap menjadi spekulasi murni. Sudah berabad-abad sejak supernova terakhir di galaksi kita telah diamati, dan bahkan kemudian, semua yang bisa dilihat adalah kembang api luar, terjadi jauh dari tempat tindakan nyata terjadi, jauh di dalam bintang.

Semua ini berubah pada 23 Februari 1987. Pada hari itu sebuah supernova diamati di Awan Magellan Besar, sebuah sistem satelit kecil di tepi luar galaksi kita, sekitar 150.000 tahun cahaya jauhnya. Ini adalah supernova terdekat yang diamati selama empat ratus tahun terakhir. Ternyata kembang api visual yang terkait dengan supernova hanya berupa puncak gunung es. Lebih dari seribu kali lebih banyak energi dipancarkan, bukan cahaya, tetapi Anda menebaknya di hampir neutrino yang tak terlihat. Saya mengatakan hampir tidak terlihat karena meskipun hampir setiap neutrino yang dipancarkan oleh supernova dapat menembus Bumi tanpa terdeteksi, hukum probabilitas memberi tahu kita bahwa, meskipun jarang, neutrino akan memiliki interaksi yang terukur dalam detektor dimensi yang lebih kecil. Bahkan, seseorang dapat memperkirakan bahwa pada saat itu 'ledakan neutrino' dari supernova jauh melewati Bumi, satu dari sejuta orang yang kebetulan matanya tertutup pada waktu yang tepat mungkin telah melihat kilatan yang disebabkan

oleh cahaya yang dihasilkan ketika neutrino memantul dari sebuah atom di mata mereka.

Namun, untungnya, kita tidak harus bergantung pada saksi mata dari fenomena luar biasa ini. Dua detektor besar, masing-masing berisi lebih dari 1.000 ton air, terletak jauh di bawah tanah di sisi berlawanan Bumi telah dilengkapi dengan mata untuk kita. Di setiap tangki detektor, ribuan tabung fotosensitif siap di kegelapan, dan pada 23 Februari, dalam periode sepuluh detik bertepatan di kedua detektor, sembilan belas peristiwa neutrino yang diinduksi terpisah diamati. Sedikit karena ini mungkin tampak, hampir persis jumlah peristiwa yang diprediksi akan dihasilkan dari supernova di sisi lain galaksi kita. Selain itu, waktu dan energi neutrino juga sesuai dengan prediksi.

Setiap kali saya memikirkan hal ini, saya masih takjub. Neutrino ini dipancarkan langsung dari inti runtuh padat, bukan dari permukaan bintang. Mereka memberi kita informasi langsung tentang periode krusial detik ini yang terkait dengan bencana kehancuran inti. Dan mereka mengatakan kepada kita bahwa teori runtuhnya bintang—bekerja dalam ketiadaan pengukuran empiris langsung selama tiga puluh tahun yang aneh, dan berdasarkan ekstrapolasi ke batas ekstrim fisika yang sama dari keseimbangan hidrostatik bertanggung jawab untuk menentukan struktur matahari—benar-benar konsisten dengan data dari supernova. Keyakinan dalam model sederhana kita membuat kita memahami salah satu proses paling eksotis di alam.

Masih ada satu lagi contoh kekuatan luar biasa dari pendekatan matahari sebagai kulit bola. Bahkan ketika

masalah neutrino matahari sedang diselesaikan, teka-teki lain mengenai struktur bintang sepertinya tetap ada. Jika kita mengasumsikan prosedur pemodelan matahari yang sama yang kita gunakan untuk memahami matahari untuk memprediksi bagaimana bintang berevolusi, kita dapat menggunakan perbandingan teori dan observasi hingga saat ini tidak hanya matahari kita (sekitar 4,55 miliar tahun), tetapi juga bintang tertua di dunia. galaksi kita. Ketika prosedur ini diterapkan pada bintang-bintang di beberapa sistem terisolasi di tepi galaksi kita yang disebut gugus bola (*globular clusters*), ditemukan bahwa sistem tersebut berusia lebih dari 15 miliar tahun.

Pada saat yang sama kita dapat menggunakan fakta bahwa jagad yang kita amati sedang berkembang—dan mengasumsikan ekspansi ini melambat, seperti yang diberikan secara alami bahwa gravitasi adalah gaya tarik—untuk menentukan usia alam semesta kita dengan mengukur tingkat ekspansi hari ini. Argumennya relatif sederhana: Kita mengamati seberapa cepat galaksi pada jarak yang diketahui dari kita saat ini bergerak menjauh dari kita, dan kemudian berasumsi bahwa mereka telah bergerak menjauh dari kita pada kecepatan ini atau lebih besar selama seluruh sejarah alam semesta, kita dapat menempatkan batas atas pada berapa lama itu akan membawa mereka mundur ke jarak mereka saat ini sejak *big bang.* Setelah delapan puluh tahun mencoba, akhirnya kita dapat mengukur tingkat ekspansi hingga sekitar 10 persen, dan kita menemukan bahwa jika perluasan alam semesta telah melambat, maka alam semesta harus kurang dari sekitar 11 miliar tahun.

Hal ini menyajikan sebuah persoalan, sebagaimana diusulkan bahwa bintang-bintang di galaksi kita lebih tua dari alam semesta! Ini bukan pertama kalinya zaman bintang telah menyebabkan masalah seperti itu, dan setiap kali menyelesaikan persoalan itu, kita memiliki wawasan baru atas alam semesta. Sebagai contoh, pada tahun 1800-an perkiraan dibuat dari usia matahari, dengan asumsi bahwa itu adalah bola besar karbon, terbakar seperti batu bara. Dengan massa matahari, seseorang dapat menentukan berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk sepenuhnya menggunakan semua bahan bakarnya, dan jawabannya sekitar 10.000 tahun. Sementara ini menyatu dengan baik dengan interpretasi literal dari Alkitab tentang umur alam semesta, pada saat ini bukti fosil dan lapisan geologi telah mengungkapkan bahwa Bumi jauh lebih tua dari ini. Menjelang akhir abad kesembilan belas itu kemudian ditunjukkan oleh dua fisikawan terkenal, Lord Kelvin di Inggris dan Helmoltz di Jerman, bahwa jika materi di matahari runtuh karena medan gravitasi besar matahari, ini bisa memberikan energi untuk menyalakan matahari, dan mereka berhasil bahwa proses ini bisa bertahan selama 100 juta tahun sebelum menghabiskan semua energi yang tersedia. Sementara ini adalah kemajuan besar, saat ini geologi dan biologi evolusioner telah menjelaskan bahwa Bumi berusia miliaran tahun, lagi-lagi menyebabkan masalah karena sulit membayangkan bagaimana Bumi bisa jauh lebih tua daripada matahari.

Pada 1920-an masalah ini begitu parah sehingga astrofisikawan terkemuka, Sir Arthur Stanley Eddington berpendapat bahwa harus ada mekanisme produksi energi lain yang

belum diketahui, yang bisa membuat matahari terbakar selama miliaran tahun. Banyak orang yang skeptis terhadap klaim ini, karena temperatur 10 juta derajat di bagian dalam matahari mungkin tampak sangat panas oleh standar terestrial, tampaknya tidak cukup panas untuk memungkinkan beberapa jenis fisika baru untuk campur tangan. Pada salah satu favorit saya dalam sains, Eddington mendesak semua orang yang tidak percaya klaimnya untuk "pergi dan menemukan tempat yang lebih panas!" Ternyata, Eddington dibuktikan pada tahun 1930 ketika fisikawan Hans Bethe, yang namanya akan muncul sebentar lagi, mengakui bahwa reaksi nuklir yang baru ditemukan yang dapat digunakan untuk membangun bom di Bumi bisa menjadi kekuatan matahari, yang memungkinkannya bertahan selama 10 miliar tahun dalam bentuk yang sekarang kita amati. Bethe memenangkan Hadiah Nobel untuk perhitungannya, yang sekarang menjadi dasar dari Standard Solar Model.

Untuk kembali ke pertanyaan tentang apakah pendekatan Standar Solar Model akan hancur ketika mencoba untuk menentukan usia bintang-bintang tertua, dengan beberapa rekan, saya dapat menguji kembali perkiraan usia gugus bola; dan kita dapat secara eksplisit memasukkan jumlah ketidakpastian yang diperkenalkan ke dalam hasil dengan pendekatan yang digunakan untuk memperolehnya dan menunjukkan bahwa gugus bola tertua di galaksi kita bisa semuda 12 miliar tahun, tetapi tidak jauh lebih muda, sehingga mengandaikan bahwa konflik nyata antara usia mereka dan usia alam semesta adalah nyata.

Sebagian dimotivasi oleh hasil ini, tetapi juga oleh data

lain yang tampaknya tidak konsisten dengan alam semesta bahwa ekspansi melambat, pada tahun 1995 seorang rekan dari Chicago dan saya didorong menuju bidah (dan mungkin juga agak licik) yang menunjukkan bahwa mungkin perluasan dari alam semesta tidak melambat tetapi malah semakin cepat! Ini mungkin kedengarannya tidak masuk akal tetapi pada kenyataannya kemungkinan eksotis dari bentuk gravitasi yang repulsif sebenarnya telah diusulkan oleh Albert Einstein pada 1916, tak lama setelah ia mengembangkan teori relativitas umum, untuk memungkinkan alam semesta statis—kemudian dianggap sebagai kasusnya—tetapi dibuang ketika ditemukan bahwa alam semesta mengembang. Selain itu, pengandaian kita tidak sepenuhnya gila karena mungkin terdengar bahwa ternyata kita sekarang memahami bentuk gravitasi 'repulsif' ekstra dapat secara alami terjadi jika ruang kosong memiliki bentuk energi baru yang, dalam konteks teori partikel modern, diperkenankan.

Hebatnya, pada tahun 1998 dua tim—menggunakan pengamatan terhadap kecerahan supernova yang tampak jelas dalam galaksi jauh untuk melacak laju ekspansi alam semesta dari waktu ke waktu—secara independen menemukan bahwa ekspansi alam semesta semakin cepat! Penemuan eksperimental ini benar-benar mengubah gambaran kita tentang alam semesta yang mengembang, sehingga mencoba memahami sifat energi gelap *(dark energy)* ini barangkali merupakan masalah luar biasa terpenting dalam kosmologi. Yang paling menarik dari sudut pandang diskusi saat ini, bagaimanapun, adalah fakta bahwa setelah seseorang menggabungkan fakta ini ke dalam penentuan usia alam semesta,

orang mendapat perkiraan usia sekitar 13-14 miliar tahun, yang dalam kesepakatan sempurna dengan penentuan usia bintang tertua di galaksi kita.

Dengan demikian, pendekatan sederhana bintang sebagai kulit bola telah berlangsung selama lebih dari 200 tahun untuk menuntun kita menemukan aspek-aspek baru dan mendalam dari alam semesta.

Contoh-contoh sebelumnya menunjukkan kekuatan penemuan besar yang dimungkinkan oleh perkiraan dalam fisika, tetapi mereka seharusnya tidak mengalihkan perhatian kita dari fakta yang lebih mendasar yang tanpa pendekatan, hampir tidak ada yang dapat kita lakukan. Dengan itu, kita bisa membuat prediksi yang dapat diuji. Ketika prediksi salah, kita dapat fokus pada aspek yang berbeda dari perkiraan yang kita buat, dan dengan begitu kita telah belajar hampir semua yang kita ketahui tentang alam semesta. Dalam kata-kata James Clerk Maxwell, fisikawan teoretis yang paling terkenal dan sukses di abad kesembilan belas: "Keunggulan utama sebuah teori adalah bahwa ia akan memandu eksperimen, tanpa menghambat kemajuan teori sejati ketika muncul."[6]

Terkadang fisikawan menyederhanakan dunia atas dasar intuisi yang sehat, tetapi paling sering mereka melakukannya karena mereka tidak punya pilihan lain. Ada alegori terkenal yang sering dituturkan para fisikawan: "Jika Anda berjalan di malam hari di jalan yang buruk dan Anda menyadari bahwa kunci mobil Anda tidak ada di dalam saku

[6] James Clerk Maxwell, The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, ed. W.D. Niven (New York: Dover, 1965).

Anda, di mana tempat pertama yang Anda tuju? Di bawah lampu jalan terdekat, tentu saja. Mengapa? Bukan karena Anda berharap bahwa Anda akan kehilangan kunci Anda di sana, melainkan karena itulah satu-satunya tempat Anda akan menemukannya! Jadi, juga, banyak kasus fisika yang dipandu dengan melihat di mana cahaya berada."

Alam begitu sering berbaik hati kepada kita bahwa kita telah mengambilnya begitu saja. Masalah-masalah baru biasanya pertama kali didekati dengan menggunakan alat-alat yang sudah ada, apakah jelas atau tidak bahwa mereka sesuai, karena hanya itu yang bisa kita lakukan pada saat itu. Jika kita beruntung, kita dapat berharap bahwa bahkan dalam perkiraan kasar, beberapa elemen dari fisika esensial telah ditangkap. Fisika penuh dengan contoh tempat mencari di mana cahaya telah mengungkapkan jauh lebih banyak daripada yang berhak kita harapkan. Salah satunya terjadi tak lama setelah berakhirnya Perang Dunia II, dalam rangkaian peristiwa yang membawa unsur-unsur drama tinggi dan pada saat yang sama menggembar-gemborkan fajar era baru dalam fisika. Hasil akhirnya adalah gambaran yang sekarang kita miliki tentang bagaimana teori fisis berevolusi ketika kita menjelajahi alam semesta pada skala yang lebih kecil atau lebih besar. Ide ini, yang tidak pernah saya lihat dibahas dalam literatur populer, merupakan dasar bagi cara fisika modern dikerjakan.

Perang telah usai, para fisikawan sekali lagi mencoba menyelidiki pertanyaan-pertanyaan mendasar setelah bertahun-tahun bekerja yang berkaitan dengan perang, dan revolusi besar abad ke-20—relativitas dan mekanika kuantum—telah

selesai. Masalah baru muncul ketika fisikawan berusaha untuk mendamaikan kedua perkembangan ini, yang keduanya akan saya uraikan lebih rinci nanti dalam buku ini. Mekanika kuantum didasarkan pada fakta bahwa pada skala kecil, dan untuk waktu singkat, tidak semua besaran yang terkait dengan interaksi materi dapat diukur secara bersamaan. Jadi, misalnya, kecepatan suatu partikel dan posisinya tidak dapat ditentukan dengan tepat pada saat yang sama, tidak peduli seberapa bagus alat pengukur yang digunakan. Demikian pula, seseorang tidak dapat menentukan energi partikel secara tepat jika seseorang mengukurnya hanya pada interval waktu yang terbatas. Relativitas, di sisi lain, menetapkan bahwa pengukuran posisi, kecepatan, waktu, dan energi secara fundamental diikat bersama oleh hubungan baru yang menjadi lebih jelas ketika kecepatan cahaya didekati. Jauh di dalam atom, gerak partikel cukup cepat sehingga efek relativitas mulai menunjukkan diri, namun pada saat yang sama skalanya cukup kecil sehingga hukum mekanika kuantum mengaturnya. Konsekuensi yang paling luar biasa dari perkawinan kedua ide ini adalah prediksi bahwa untuk waktu yang cukup singkat sehingga tidak mungkin untuk mengukur secara akurat energi yang terkandung dalam volume tertentu, tidak mungkin untuk menentukan berapa banyak partikel yang bergerak di dalamnya. Sebagai contoh, perhatikan gerak elektron dari belakang tabung TV Anda. (Elektron adalah partikel bermuatan mikroskopis, yang, bersama dengan proton dan neutron, menyusun semua atom materi biasa. Dalam logam, elektron dapat bergerak di bawah aksi gaya listrik untuk menghasilkan

arus. Elektron tersebut dipancarkan oleh ujung logam dari suatu elektron. elemen pemanas di bagian belakang TV dan menghantam layar di depan dan menyebabkannya bersinar, menghasilkan gambar yang Anda lihat.) Hukum mekanika kuantum memberi tahu kita bahwa untuk setiap interval yang sangat pendek tidak mungkin untuk menentukan lintasan yang mana yang elektron ambil, sementara pada saat yang sama mencoba mengukur kecepatannya. Dalam kasus ini, ketika relativitas dimasukkan ke dalam gambar, itu menunjukkan bahwa jika ini kasusnya, selama interval pendek ini seseorang tidak dapat mengklaim dengan pasti bahwa hanya ada satu elektron yang melintas. Ada kemungkinan bahwa secara spontan baik elektron lain dan antipartikelnya dengan muatan berlawanan, yang disebut positron, dapat muncul dari ruang kosong dan berjalan bersama dengan elektron untuk waktu yang singkat sebelum dua partikel tambahan ini saling menghancurkan dan menghilang, tidak meninggalkan apa pun kecuali elektron asli! Energi ekstra yang diperlukan untuk menghasilkan dua partikel ini dari ketiadaan untuk waktu yang singkat diperbolehkan karena energi elektron asli yang bergerak bersama tidak dapat diukur secara akurat dalam waktu singkat seperti itu, menurut hukum mekanika kuantum.

Setelah mengatasi guncangan kemungkinan seperti itu, Anda mungkin berpikir kedengarannya terlalu dekat untuk mencoba menghitung jumlah sudut di kepala pin. Tetapi ada satu perbedaan penting. Pasangan elektron-positron tidak menghilang tanpa jejak. Sama seperti kucing Cheshire yang terkenal, ia meninggalkan kartu panggilan. Kehadiran

hal tersebut dapat secara halus mengubah ciri yang Anda sematkan ke elektron ketika Anda menganggap itu adalah satu-satunya partikel yang bergerak selama pengamatan.

Pada 1930-an, diakui bahwa fenomena seperti itu, termasuk keberadaan antipartikel seperti positron, harus terjadi sebagai konsekuensi dari penggabungan mekanika kuantum dan relativitas. Masalah bagaimana memasukkan kemungkinan-kemungkinan baru ke dalam perhitungan kuantitas fisis tetap tidak terpecahkan. Masalahnya adalah jika Anda mempertimbangkan skala yang lebih kecil dan lebih kecil, hal semacam ini dapat terus berulang. Sebagai contoh, jika Anda mempertimbangkan gerak elektron asli selama waktu yang lebih pendek, di mana energinya tidak pasti bahkan dengan jumlah yang lebih besar, itu menjadi sesaat mungkin untuk tidak satu pasangan elektron-positron tetapi dua yang saling bebas, dan seterusnya sebagai salah satu anggapan interval semakin pendek. Dalam upaya untuk melacak semua benda-benda ini, setiap perkiraan menghasilkan hasil tak-hingga untuk kuantitas fisis seperti muatan listrik yang diukur dari sebuah elektron. Ini, tentu saja, paling tidak memuaskan.

Dengan latar belakang inilah, pada April 1947, sebuah pertemuan diadakan di sebuah penginapan di Shelter Island, sebuah komunitas terpencil di ujung timur Long Island, New York. Yang hadir adalah sekelompok aktif fisikawan teoretis dan eksperimental yang bekerja pada masalah mendasar dalam struktur materi. Ini termasuk para lelaki tua yang agung dan juga kaum Turki Muda, yang sebagian besar telah menghabiskan waktu perang untuk mengembangkan bom

atom. Sebagian besar dari individu-individu ini, kembali ke penelitian murni setelah bertahun-tahun pengarahan pada upaya perang yang tidak mudah. Sebagian karena alasan ini, konferensi Shelter Island diadakan untuk membantu mengidentifikasi masalah-masalah terpenting yang dihadapi fisika.

Segalanya dimulai dengan penuh semangat. Bus yang berisi sebagian besar peserta itu disambut oleh polisi dengan sepeda motor ketika mereka memasuki Nassau County di Long Island barat, dan, yang mengejutkan mereka, mereka dikawal dengan sirene di dua kabupaten ke tujuan mereka. Kemudian mereka menemukan bahwa pengawalan polisi telah diberikan sebagai ucapan terima kasih oleh orang-orang yang telah melayani di Pasifik selama perang dan merasa bahwa hidup mereka telah diselamatkan oleh para ilmuwan yang telah mengembangkan bom atom.

Kehebohan prakonferensi dicocokkan oleh perkembangan sensasional pada hari pembukaan pertemuan. Willis Lamb, seorang fisikawan atom eksperimental, menggunakan teknologi microwave yang dikembangkan dalam kaitannya dengan pekerjaan perang terhadap radar di Universitas Columbia, memberikan hasil yang penting. Mekanika kuantum, sebagai salah satu keberhasilan awal utamanya, telah memungkinkan perhitungan energi karakteristik elektron yang mengorbit di sekitar bagian luar atom. Namun, hasil dari Lamb menyiratkan bahwa tingkat energi elektron dalam atom sedikit bergeser dari yang dihitung dalam teori kuantum, yang telah dikembangkan hingga saat itu tanpa secara eksplisit memasukkan relativitas. Temuan ini ke-

mudian dikenal sebagai 'Lamb shift'. Penemuan tersebut ditindaklanjuti oleh laporan dari fisikawan eksperimental I.I. Rabi dalam karyanya, dan juga P. Kusch, menunjukkan penyimpangan serupa dalam pengamatan lain tentang hidrogen dan atom dibandingkan dengan prediksi mekanika kuantum. Ketiga eksperimentalis AS ini—Lamb, Rabi, dan Kusch—nantinya akan mendapatkan Hadiah Nobel untuk pekerjaan mereka tersebut.

Tantangannya sudah keluar. Bagaimana orang dapat menjelaskan pergeseran semacam itu, dan bagaimana seseorang dapat melakukan perhitungan yang dapat mengakomodir keberadaan sesaat dari kemungkinan pasangan elektron-positron 'virtual' yang mungkin tak-hingga, sebagaimana disebut demikian? Pemikiran bahwa penggabungan relativitas dan mekanika kuantum yang menyebabkan masalah juga akan mengarah pada penjelasan pada saat itu hanya kecurigaan. Hukum relativitas mempersulit perhitungan begitu banyak sehingga sampai saat itu tidak ada yang menemukan cara yang konsisten untuk melakukannya. Bintang muda fisika teoretis, Richard Feynman dan Julian Schwinger, keduanya hadir dalam pertemuan itu. Masing-masing berkembang sendiri, seperti fisikawan Jepang Sin-Itiro Tomonaga, skema perhitungan untuk menangani 'teori medan kuantum', sebagai penyatuan mekanika kuantum dan relativitas menjadi dikenal. Mereka berharap, dan harapan mereka kemudian terbukti benar, bahwa skema ini akan memungkinkan seorang aman untuk mengisolasi, jika tidak menghapus sepenuhnya, efek dari pasangan elektron-positron virtual yang muncul untuk mengganggu

teori, sementara pada saat yang sama memberikan hasil yang konsisten dengan relativitas. Pada saat mereka selesai, mereka telah membentuk cara baru untuk menggambarkan proses dasar dan menunjukkan bahwa teori elektromagnetika dapat secara konsisten dikombinasikan dengan mekanika kuantum dan relativitas untuk membentuk kerangka teoretis yang paling sukses di seluruh fisika—pencapaian tiga pria ini sepatutnya berbagi Hadiah Nobel hampir 20 tahun kemudian. Tetapi pada saat pertemuan, tidak ada skema seperti itu. Bagaimana caranya menangani interaksi elektron dalam atom dengan segudang pasangan elektron-positron 'virtual' yang mungkin secara spontan berserakan dari ruang hampa sebagai respons terhadap medan dan gaya yang diciptakan oleh elektron itu sendiri?

Yang juga menghadiri pertemuan itu adalah Hans Bethe, yang sudah menjadi ahli teori terkemuka dan salah satu pemimpin dalam proyek bom atom. Bethe juga akan terus memenangkan Hadiah Nobel untuk pekerjaan yang menunjukkan bahwa reaksi nuklir memang merupakan sumber kekuatan bintang seperti matahari. Pada konferensi itu dia terinspirasi oleh apa yang dia dengar dari para eksperimentalis dan ahli teori untuk kembali ke Universitas Cornell guna mencoba menghitung efek yang diamati oleh Lamb. Lima hari setelah pertemuan berakhir, dia telah menghasilkan tulisan [paper] dengan hasil penghitungannya, yang menurutnya sangat sesuai dengan nilai yang diamati untuk pergeseran Lamb. Bethe selalu dikenal karena kemampuannya untuk melakukan perhitungan yang rumit secara langsung di papan atau di atas kertas tanpa cela.

Namun perhitungan luar biasa dari pergeseran Lamb tidak dalam arti suatu perkiraan konsisten-diri yang didasarkan pada prinsip-prinsip fundamental yang kuat dari mekanika kuantum dan relativitas. Sebaliknya, Bethe tertarik untuk mengetahui apakah ide-ide saat ini berada di jalur yang benar. Karena perangkat yang lengkap untuk menangani teori kuantum termasuk relativitas belum tersedia, ia menggunakan alat-alat yang ada.

Dia beralasan bahwa jika seseorang tidak dapat menangani gerak relativistik elektron secara konsisten, seseorang dapat melakukan perhitungan 'hibrida' yang menggabungkan secara eksplisit fenomena fisis baru yang dimungkinkan oleh relativitas—seperti pasangan elektron-positron virtual—sementara masih menggunakan persamaan untuk gerak elektron berdasarkan mekanika kuantum standar tahun 1920 dan 1930-an, di mana kompleksitas matematika relativitas tidak secara eksplisit dimasukkan. Namun, ia menemukan bahwa efek dari pasangan elektron-positron virtual masih belum terkendali. Bagaimana ia menghadapi itu? Berdasarkan saran yang ia dengar di pertemuan, ia melakukan perhitungan dua kali, satu kali untuk gerak elektron di dalam atom hidrogen dan satu kali untuk elektron bebas, tanpa atom bersamanya. Sementara hasil dalam setiap kasus begitu keras-kepala secara matematis (karena adanya pasangan partikel virtual), ia mencari selisih dari dua hasil dengan cara mengurangkannya. Dengan cara ini ia berharap bahwa perbedaan di antara mereka—mewakili pergeseran energi untuk sebuah elektron yang terletak di sebuah atom dibandingkan dengan elektron bebas yang tidak dalam se-

buah atom, tepatnya efek yang diamati oleh Lamb—akan bisa dikerjakan. Sayangnya, itu tidak benar. Dia kemudian beralasan bahwa jawaban tegas terakhir ini haruslah tidak bersifat fisik, jadi satu-satunya hal yang masuk akal adalah menyederhanakannya dengan beberapa cara, menggunakan intuisi fisis seseorang. Ia menyarankan bahwa sementara relativitas memungkinkan proses baru yang eksotis karena adanya pasangan elektron-positron virtual untuk memengaruhi keadaan elektron di dalam atom, efek relativitas tidak dapat menjadi besar untuk proses-proses yang melibatkan banyak pasangan elektron-positron virtual yang total energinya adalah jauh lebih besar daripada energi yang sesuai dengan massa sisa elektron itu sendiri.

Saya mengingatkan Anda bahwa mekanika kuantum memungkinkan proses-proses semacam itu, di mana banyak partikel maya energik hadir, terjadi hanya dalam waktu yang sangat kecil karena hanya di atas interval waktu yang begitu kecil sehingga ketidakpastian dalam energi total yang terukur dari sistem menjadi besar. Bethe berpendapat bahwa jika teori termasuk relativitas itu harus masuk akal, seseorang harus dapat mengabaikan efek dari proses eksotis yang bertindak atas interval waktu yang sangat kecil. Karena itu dia mengusulkan untuk mengabaikannya. Perhitungan terakhirnya untuk pergeseran Lamb, di mana hanya proses-proses yang melibatkan pasangan maya yang total energinya kurang dari atau sama dengan energi massa elektron, sisanya dianggap secara matematis dapat dikendalikan. Selain itu, ia sepenuhnya sesuai dengan pengamatan. Pada saat itu, tidak ada pembenaran nyata untuk pendekatan-

nya, kecuali bahwa itu memungkinkan dia untuk melakukan perhitungan dan melakukan apa yang dianggapnya sebagai teori yang masuk akal yang menggabungkan relativitas harus dilakukan.

Karya terakhir Feynman, Schwinger, dan Tomonaga akan menyelesaikan inkonsistensi pendekatan Bethe. Hasil mereka menunjukkan bagaimana dalam teori yang lengkap, melibatkan mekanika kuantum dan relativitas secara eksplisit pada setiap tahap, efek dari pasangan partikel-antipartikel virtual energetik pada kuantitas terukur dalam atom akan semakin kecil. Dengan cara ini, efek akhir dari penggabungan partikel virtual dalam teori akan dapat dikelola. Hasil yang dihitung saat ini dalam kesepakatan yang baik dengan pergeseran Lamb diukur bahwa ini adalah salah satu konvensi terbaik antara teori dan observasi dalam fisika! Tetapi pendekatan hibrida awal Bethe telah mengkonfirmasi apa yang sudah diketahui semua orang tentang dirinya. Dia adalah seorang 'fisikawannya fisikawan'. Dia dengan cerdik menemukan cara menggunakan alat yang tersedia untuk mendapatkan hasil. Dalam semangat kulit bola sapi, keberaniannya dalam mengabaikan detail-detail luar yang terkait dengan proses-proses yang melibatkan partikel-partikel virtual dalam mekanika kuantum membantu membawa kita ke ambang penelitian modern. Ini telah menjadi bagian sentral dari cara fisikawan mendekati fisika partikel dasar, subjek yang akan saya kembalikan dalam bab terakhir buku ini.

Di sini kita telah berpetualang dari persoalan sapi sampai neutrino surya, dari ledakan bintang ke alam semesta yang meledak, dan akhirnya ke Shelter Island. Benang

merah yang mengikat semua hal ini adalah benang yang mengikat semua fisikawan. Di permukaan, dunia adalah tempat yang rumit. Di bawahnya, aturan sederhana tertentu tampaknya bekerja. Tepat itulah salah satu tujuan fisika; mengungkap aturan-aturan ini. Satu-satunya harapan yang kita miliki adalah dengan bersedia memotong untuk mengejar—untuk melihat sapi sebagai permukaan kulit bola, untuk meletakkan mesin rumit di dalam kotak hitam, atau membuang partikel virtual dalam jumlah tak-hingga, jika perlu. Jika kita mencoba dan memahami semuanya sekaligus, seringkali akhirnya kita tidak mengerti apa-apa. Kita dapat menunggu dan mengharapkan inspirasi, atau kita dapat bertindak untuk memecahkan masalah yang dapat kita pecahkan, dan dengan demikian memperoleh wawasan baru tentang fisika yang benar-benar kita kejar.

SENI BILANGAN

Fisika untuk Matematika seperti Sex untuk Masturbasi.
- Richard Feynman

Bahasa, sebuah penemuan manusia, adalah cermin bagi jiwa. Melalui bahasa sebuah novel yang bagus, permainan, atau puisi mengajarkan kita tentang kemanusiaan kita sendiri. Matematika, di sisi lain, adalah bahasa alam dan memberikan cermin bagi dunia fisis. Tepat, bersih, beragam, dan batu-pejal. Sementara kualitas-kualitas ini membuatnya ideal untuk menggambarkan cara kerja alam, kualitas-kualitas tersebut sama dengan yang tampak membuatnya tidak sesuai dengan kelemahan drama manusia. Maka timbullah dilema sentral dari 'dua kebudayaan'.

Suka atau tidak, bilangan adalah bagian utama fisika. Semua yang kita lakukan, termasuk cara kita berpikir tentang dunia fisis, dipengaruhi oleh cara kita berpikir tentang bilangan. Untungnya, cara kita berpikir tentang mereka sepenuhnya bergantung pada bagaimana besaran-besaran ini muncul di dunia fisis. Dengan demikian, fisikawan ber-

pikir tentang bilangan yang sangat berbeda daripada yang dilakukan oleh matematikawan. Fisikawan menggunakan bilangan untuk memperluas intuisi fisis mereka, bukan untuk menyederhanakannya. Para matematikawan berurusan dengan struktur yang ideal, dan mereka benar-benar tidak peduli di mana, atau apakah, struktur-struktur tersebut mungkin benar-benar muncul di alam. Bagi mereka, bilangan murni memiliki realitas tersendiri. Bagi seorang fisikawan, bilangan asli biasanya tidak memiliki arti yang independen sama sekali.

Bilangan dalam fisika membawa banyak muatan karena hubungan mereka dengan pengukuran kuantitas fisis. Dan bagasi, seperti siapa pun yang bepergian, memiliki sisi baik dan sisi buruk. Mungkin sulit untuk mengambil dan melelahkan untuk dibawa, tetapi mengamankan barang berharga kita dan membuat hidup jauh lebih mudah ketika kita sampai ke tujuan kita. Itu mungkin terbatas, tetapi juga membebaskan. Jadi, bilangan-bilangan dan hubungan matematis di antara mereka membatasi kita dengan memperbaiki cara kita menggambarkan dunia. Tetapi bagasi yang dibawanya dalam fisika juga merupakan bagian penting dari penyederhanaan gambar ini. Ia membebaskan kita dengan menerangi apa yang dapat kita abaikan dan apa yang tidak bisa kita lakukan.

Gagasan semacam itu, tentu saja, bertentangan langsung dengan pandangan yang berlaku bahwa bilangan dan hubungan matematis hanya memperumit hal-hal dan harus dihindari dengan segala cara, bahkan dalam buku sains populer. Stephen Hawking bahkan menyarankan, dalam

A Brief History of Time, bahwa setiap persamaan dalam sebuah buku populer memotong penjualannya hingga setengahnya. Mengingat pilihan penjelasan kuantitatif atau yang verbal, kebanyakan orang mungkin akan memilih yang terakhir. Saya pikir banyak penyebab keengganan umum untuk matematika adalah sosiologis. Buta matematis dikenakan sebagai lencana kehormatan—seseorang yang tidak dapat menyeimbangkan buku ceknya, misalnya, tampaknya lebih manusiawi untuk kesalahan ini. Tetapi akar yang lebih dalam, saya pikir, adalah bahwa orang-orang entah bagaimana diajarkan sejak awal untuk tidak memikirkan tentang bilangan-bilangan yang mewakili dengan cara yang sama yang mereka pikirkan tentang apa yang diwakili oleh kata-kata. Saya terperangah beberapa tahun yang lalu ketika mengajar kursus fisika untuk non-ilmuwan di Yale—sekolah yang dikenal melek huruf, jika tidak berhitung—menemukan bahwa 35 persen siswa, banyak dari mereka yang lulus senior dalam sejarah atau studi Amerika, tidak tahu populasi Amerika Serikat dalam faktor 10! Banyak yang mengira populasi itu antara 1 dan 10 juta—kurang dari populasi New York City, yang terletak bahkan tidak sampai 100 mil jauhnya.

Pada awalnya, saya menganggap ini sebagai tanda kekurangan dalam kurikulum ilmu sosial dalam sistem pendidikan kita. Bagaimanapun, kedekatan New York, negara ini akan menjadi tempat yang sangat berbeda jika populasinya hanya berjumlah 1 juta. Saya kemudian menyadari bahwa bagi sebagian besar siswa ini, konsep seperti 1 juta atau 100 juta tidak memiliki makna objektif. Mereka tidak pernah

belajar menghubungkan sesuatu yang berisi sejuta hal, seperti kota Amerika berukuran menengah, dengan angka 1 juta. Banyak orang, misalnya, tidak dapat memberi tahu saya perkiraan jarak di Amerika Serikat dalam mil. Bahkan ini terlalu besar untuk dipikirkan. Namun, ada sedikit deduksi rasional, seperti menggabungkan perkiraan jarak tempuh yang dapat Anda kendarai dengan nyaman dalam sehari di interstate (sekitar 500 mil) dengan perkiraan jumlah hari yang diperlukan untuk berkendara di seluruh negeri (sekitar 5-6 hari) memberitahu saya jarak ini lebih dekat ke 2.500-3.000 mil daripada, katakanlah, 10.000 mil.

Berpikir tentang bilangan dalam hal apa yang mereka wakili mengambil sebagian besar misteri dari seluruh persoalan. Ini juga merupakan spesialisasi fisikawan. Saya tidak ingin berpura-pura bahwa pemikiran matematis adalah sesuatu yang setiap orang dapat merasa nyaman dengannya, atau bahwa ada beberapa obat paliatif ajaib untuk kecemasan matematika. Tetapi itu tidak begitu sulit—bahkan sering lucu dan, memang, penting untuk memahami cara fisikawan berpikir—untuk menghargai apa yang diwakilkan bilangan, untuk bermain dengan mereka di kepala Anda sedikit. Paling tidak, orang harus belajar untuk menghargai kegunaan besar bilangan-bilangan, bahkan tanpa harus mampu melakukan analisis kuantitatif secara rinci. Dalam bab ini, saya akan sedikit menyimpang dari pepatah Stephen Hawking (saya harap, tentu saja, bahwa Anda dan publik seluruhnya akan membuktikan bahwa dia salah!) Dan menunjukkan kepada Anda bagaimana fisikawan mendekati penalaran numerik, dengan cara yang seharusnya menjelas-

kan mengapa kita ingin menggunakannya dan apa yang kita dapatkan dari proses tersebut. Pelajaran objek sentral dapat dengan mudah dinyatakan: Kita menggunakan bilangan untuk membuat hal-hal tidak pernah lebih sulit dari yang seharusnya.

Di tempat pertama, karena fisika berhubungan dengan berbagai skala, bilangan yang sangat besar atau sangat kecil dapat terjadi bahkan dalam masalah yang paling sederhana sekalipun. Hal yang paling sulit dalam berurusan dengan kuantitas seperti itu, sebagaimana akan dibuktikan siapa pun yang pernah mencoba melipatgandakan dua angka 8-digit, adalah memperhitungkan dengan benar untuk semua digit. Sayangnya, hal yang paling sulit ini seringkali juga merupakan hal yang paling penting, karena jumlah digit menentukan skala keseluruhan suatu bilangan. Jika Anda mengalikan 40 dengan 40, yang merupakan jawaban yang lebih baik: 160 atau 2.000? Tidak tepat, tetapi yang terakhir jauh lebih dekat dengan jawaban sebenarnya dari 1.600. Jika ini adalah bayaran yang Anda terima selama 40 jam kerja, mendapatkan 16 hak tidak akan terlalu menghibur karena kehilangan lebih dari 1.400 dolar dengan mendapati besarannya salah.

Untuk membantu menghindari kesalahan seperti itu, fisikawan telah menemukan cara untuk membagi bilangan menjadi dua bagian, yang salah satunya segera memberi tahu Anda skala keseluruhan atau besarannya—apakah itu besar atau kecil?—untuk berada dalam kisaran faktor 10, sementara yang lain memberi tahu Anda nilai yang tepat dalam rentang ini. Selain itu, lebih mudah untuk menen-

tukan besaran sebenarnya tanpa harus menampilkan semua digit secara eksplisit, dengan kata lain, tanpa harus menulis banyak nol, seperti yang akan dilakukan jika seseorang menulis ukuran alam semesta yang terlihat dalam sentimeter: sekitar 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000. Ditampilkan dengan cara ini, yang kita tahu adalah bahwa jumlahnya besar!

Kedua tujuan ini dicapai melalui cara penulisan angka yang disebut notasi ilmiah. (Ini harus disebut notasi yang masuk akal.) Mulailah dengan menulis 10^n menjadi angka 1 diikuti oleh n nol, sehingga 100 ditulis sebagai 10^2, misalnya, sementara 10^6 mewakili angka 1 diikuti oleh 6 nol (1 juta), dan seterusnya. Kunci untuk menghargai ukuran bilangan tersebut adalah untuk mengingat bahwa angka seperti 10^6 memiliki satu lagi nol, dan karena itu 10 kali lebih besar, dari 10^5. Untuk jumlah yang sangat kecil, seperti ukuran atom dalam sentimeter, sekitar 0,000000001 cm, kita dapat menulis 10^{-n} untuk mewakili angka 1 dibagi dengan 10^n, yang merupakan angka dengan 1 di tempat ke-n setelah koma desimal. Dengan demikian, sepersepuluh akan menjadi 10^{-1}, satu miliar akan menjadi 10^{-9}, dan seterusnya.

Ini tidak hanya menghilangkan angka nol tetapi mencapai semua yang kita inginkan, karena angka apapun dapat ditulis hanya sebagai angka antara 1 dan 10 dikalikan dengan angka yang terdiri dari 1 diikuti oleh n nol. Angka 100 adalah 10^2, sedangkan nomor 135 adalah $1,35 \times 10^2$, misalnya. Keindahan dari hal ini adalah bahwa bagian kedua dari sebuah angka yang ditulis dengan cara ini, disebut *eksponen*, atau *perpangkatan sepuluh*, memberitahu kita segera jumlah

digit yang dimilikinya, atau 'urutan besarnya' dari angka (dengan demikian 100 dan 135 adalah urutan besarnya yang sama), sedangkan bagian pertama memberi tahu Anda secara tepat berapa nilai dalam kisaran ini (yaitu, apakah itu 100 atau 135).

Karena hal yang paling penting tentang suatu bilangan mungkin adalah besarnya, ia memberi pengertian makna yang lebih baik dari angka yang besar, terlepas dari fakta bahwa itu kurang rumit, untuk menulisnya dalam bentuk seperti 1.45962×10^{13} daripada sebagai 1.459.620.000.000, atau satu triliun, empat ratus lima puluh sembilan miliar, enam ratus dua puluh juta. Apa yang mungkin lebih mengejutkan adalah klaim saya akan segera membuat angka-angka yang mewakili dunia fisis masuk akal hanya ketika ditulis dalam notasi ilmiah.

Pertama, bagaimanapun, ada manfaat langsung menggunakan notasi ilmiah. Itu membuat angka manipulasi menjadi jauh lebih mudah. Misalnya, jika Anda menempatkannya dengan benar, Anda akan menemukan bahwa $100 \times 100 = 10.000$. Menuliskan ini bukan sebagai $10^2 \times 10^2 = 10^{(2+2)} = 10^4$, perkalian berubah menjadi tambahan. Demikian pula, menulis $1000/100 = 10$ sebagai $10^3/10^2 = 10^{(3-2)} = 10^1$, pembagian menjadi sesederhana pengurangan. Menggunakan aturan-aturan ini untuk *perpangkatan sepuluh*, persoalan yang paling memusingkan—melacak skala keseluruhan dalam perhitungan—menjadi hal yang sepele. Satu-satunya hal yang mungkin membutuhkan kalkulator untuk mengalikan atau membagi bagian pertama angka yang ditulis dalam notasi ilmiah,

bagian antara 1 dan 10. Tetapi bahkan di sini hal-hal yang lebih sederhana, karena keakraban dengan tabel perkalian hingga 10×10 memungkinkan seseorang untuk menebak lebih dulu apa hasilnya.

Inti dari diskusi ini adalah tidak mencoba mengubah Anda menjadi ahli perhitungan. Sebaliknya, jika menyederhanakan dunia berarti memperkirakannya, maka notasi ilmiah memungkinkan salah satu alat paling penting dalam semua bidang fisika: estimasi *nilai-pangkat*. Memikirkan angka-angka dengan cara notasi ilmiah mengarahkan Anda untuk memungkinkan Anda dengan cepat memperkirakan jawaban atas pertanyaan yang seharusnya sebagian besar tidak dapat dipecahkan. Dan karena sangat membantu untuk mengetahui apakah Anda berada di jalur yang benar ketika membuat jalan Anda melalui wilayah yang belum dipetakan, mampu memperkirakan jawaban yang benar untuk setiap masalah fisis sangat berguna. Ini juga menghemat banyak rasa malu. Cerita-cerita Apokrifa diceritakan tentang siswa Ph.D. yang mempresentasikan tesis dengan rumus kompleks yang dimaksudkan untuk menggambarkan alam semesta, hanya untuk menemukan selama pertahanan tesis mereka yang memasukkan angka realistis ke dalam rumus menunjukkan perkiraan menjadi konyol.

Estimasi *nilai-pangkat* membuka dunia di kaki Anda, seperti yang mungkin dikatakan Enrico Fermi. Fermi (1901-1954) adalah salah satu fisikawan hebat terakhir abad ini yang sama-sama ahli di bidang fisika eksperimental dan teoretis. Dia dipilih untuk bertanggung jawab atas Proyek Manhattan, upaya rahasia AS di masa perang untuk

mengembangkan reaktor nuklir dan dengan demikian menunjukkan kelayakan pembelahan nuklir terkontrol—pemisahan inti atom—sebelum membangun bom atom. Dia juga fisikawan pertama yang mengusulkan teori yang sukses untuk menggambarkan interaksi yang memungkinkan proses semacam itu terjadi, di mana ia dianugerahi Hadiah Nobel. Dia meninggal karena kanker pada usia yang terlalu dini, mungkin karena tahun-tahunnya dengan paparan radiasi yang pada masanya belum diketahui betapa berbahayanya hal itu. (Bagi Anda yang pernah mendarat di Bandara Logan dan terjebak dalam kemacetan besar-besaran yang mengarah ke terowongan yang membawa Anda ke Boston mungkin menghibur diri Anda mencari plakat yang didedikasikan untuk Fermi yang terletak di dasar jembatan kecil tepat sebelum gerbang tol di pintu masuk ke terowongan. Kita menamakan kota setelah presiden, dan stadion setelah pahlawan olahraga. Itu mengatakan bahwa Fermi mendapat jembatan di sebelah tol.)

Saya memunculkan Fermi karena, sebagai pemimpin tim fisikawan yang bekerja di Proyek Manhattan di laboratorium bawah tanah di bawah lapangan sepak bola di Universitas Chicago, ia digunakan untuk membantu menjaga moral dengan secara teratur menawarkan tantangan kepada kelompok. Ini bukan masalah fisika. Sebagai gantinya, Fermi mengumumkan bahwa fisikawan yang baik harus mampu menjawab setiap masalah yang ditimbulkannya - belum tentu menghasilkan jawaban yang benar, tetapi mengembangkan suatu algoritma yang memungkinkan perkiraan besaran-besaran yang akan diperoleh berdasarkan

pada hal-hal yang diketahui orang atau bisa dipercaya memperkirakan. Misalnya, pertanyaan yang sering ditanyakan pada kuis fisika tingkat sarjana adalah, Berapa banyak tuner piano yang ada di Chicago pada waktu tertentu?

Biarkan saya membawa Anda melalui semacam penalaran yang mungkin diharapkan Fermi. Kuncinya adalah bahwa jika yang Anda minati adalah urutan besarnya, itu tidak begitu sulit. Pertama, perkirakan populasi Chicago. Sekitar 5 juta? Berapa banyak orang di rumah tangga rata-rata? Sekitar 4? Jadi, ada sekitar 1 juta (10^6) rumah tangga di Chicago. Berapa banyak rumah tangga yang memiliki piano? Sekitar 1 dalam 10? Jadi, ada sekitar 100.000 piano di Chicago. Sekarang, berapa banyak piano yang piano tuner berbunyi setiap tahun? Jika dia mencari nafkah dengan piano, dia mungkin setidaknya menyetel dua kali dalam sehari, lima hari seminggu, atau sepuluh dalam seminggu. Bekerja sekitar lima puluh minggu setahun membuat 500 piano. Jika setiap piano disetel rata-rata setahun sekali, maka 100.000 tuning per tahun diperlukan, dan jika setiap tuner 500, jumlah tuner yang diperlukan adalah 100.000 / 500 = 200 (karena $100.000/500 = 1/5 \times 10^5/10^2 = 1/5 \times 10^3 = 0,2 \times 10^3 = 2 \times 10^2$).

Intinya adalah tidak mungkin ada atau mungkin tidak tepat 200 tuner piano di Chicago. Perkiraan ini, diperoleh dengan cepat, memberi tahu kita bahwa kita akan terkejut menemukan kurang dari sekitar 100 atau lebih dari sekitar 1.000 tuner piano. (Saya percaya sebenarnya ada sekitar 600.) Ketika Anda berpikir tentang fakta bahwa sebelum melakukan perkiraan seperti itu, Anda mungkin tidak tahu

berapa kisaran jawabannya, kekuatan teknik ini menjadi nyata.

Estimasi *nilai-pangkat* dapat memberi Anda wawasan baru tentang hal-hal yang mungkin tidak pernah Anda duga dapat diperkirakan atau diproyeksikan. Apakah ada lebih banyak butir pasir di pantai daripada ada bintang di langit? Berapa banyak orang di Bumi bersin setiap detik? Berapa lama waktu yang dibutuhkan angin dan air untuk menurunkan Gunung Everest? Berapa banyak orang di dunia. . . (*isi kemungkinan favorit Anda di sini*) ketika Anda membaca kata-kata ini?

Sama pentingnya, mungkin, estimasi *nilai-pangkat* memberi Anda wawasan baru tentang hal-hal yang harus Anda pahami. Manusia dapat langsung memotret angka hingga antara 6 dan 12. Jika Anda melihat 6 titik ketika Anda menggulirkan sebuah dadu, Anda tidak harus menghitungnya setiap waktu untuk mengetahui bahwa ada 6. Anda dapat membayangkan 'keseluruhan' sebagai hal berbeda dari jumlah bagian-bagiannya. Jika saya memberi Anda sebuah dadu dengan 20 sisi, bagaimanapun, tidak mungkin Anda dapat melihat 20 titik dan segera memahami mereka sebagai angka 20. Bahkan jika mereka disusun dalam pola biasa, Anda mungkin masih harus mengelompokkan titik-titik di kepala Anda, ke dalam, katakanlah, 4 kelompok dari 5, sebelum Anda dapat melihat totalnya. Itu tidak berarti kita tidak bisa dengan mudah memahami apa yang diwakili oleh angka 20. Kita mengenal banyak hal yang dijelaskan oleh angka itu: jumlah jari tangan dan kaki kita; mungkin jumlah detik yang dibutuhkan untuk meninggalkan rumah

dan masuk ke mobil Anda.

Namun, dengan jumlah yang sangat besar atau kecil, kita tidak memiliki cara independen untuk memahami apa yang mereka wakili tanpa sengaja membuat perkiraan yang dapat dilekatkan pada angka-angka ini untuk memberi mereka makna. Satu juta mungkin jumlah orang yang tinggal di kota Anda, atau jumlah detik dalam sekitar 10 hari. Satu miliar lebih dekat dengan jumlah orang yang tinggal di China. Ini juga merupakan jumlah detik dalam sekitar 32 tahun. Semakin banyak perkiraan Anda membuat jumlah yang memiliki angka-angka ini melekat pada mereka, semakin baik Anda dapat secara intuitif memahaminya. Itu sebenarnya bisa saja menyenangkan. Perkirakan hal-hal yang Anda ingin tahu, atau hal-hal yang tampak lucu: Berapa kali Anda akan mendengar nama Anda dipanggil dalam hidup Anda? Berapa banyak makanan yang Anda makan, dalam pon, dalam satu dekade? Kesenangan yang Anda dapatkan dari kemampuan untuk menangani, selangkah demi selangkah, apa yang mungkin menjadi masalah yang sulit untuk dijawab bisa menjadi kecanduan. Saya pikir jenis 'rush' ini memberikan banyak kenikmatan fisikawan dapatkan dari melakukan fisika.

Keutamaan notasi ilmiah dan estimasi *nilai-pangkat* bahkan lebih langsung bagi fisikawan. Ini memungkinkan penyederhanaan konseptual yang saya diskusikan pada bab terakhir untuk menjadi nyata. Jika kita dapat memahami *nilai-pangkat* yang benar, kita sering memahami sebagian besar dari apa yang perlu kita ketahui. Itu tidak berarti bahwa mendapatkan semua faktor 2 dan π benar tidak

penting. Ya, dan ini memberikan uji asam yang kita tahu apa yang kita bicarakan, karena kita dapat membandingkan prediksi dengan pengamatan dengan ketelitian yang lebih tinggi untuk menguji ide-ide kita.

Hal ini membawa saya pada pernyataan penuh rasa ingin tahu yang saya buat sebelumnya, bahwa angka-angka yang mewakili dunia *hanya* masuk akal ketika ditulis dalam notasi ilmiah. Ini karena angka dalam fisika umumnya merujuk pada hal-hal yang dapat *diukur*. Jika saya mengukur jarak antara Bumi dan matahari, saya bisa menyatakan jarak itu sebagai 14.960.000.000.000 atau $1,4960 \times 10^{13}$ sentimeter (cm). Pilihan antara keduanya mungkin tampak terutama salah satu semantik matematika dan, memang, untuk seorang matematikawan ini adalah dua representasi yang berbeda tetapi setara dari satu nomor identik. Tetapi bagi seorang fisikawan, angka pertama tidak hanya berarti sesuatu yang sangat berbeda dari yang kedua tetapi sangat dicurigai. Anda lihat, angka pertama menunjukkan bahwa jarak antara Bumi dan matahari adalah 14.960.000.000.000 cm dan tidak 14.959.790.562.739 cm atau bahkan 14.960.000.000, 001 cm. Ini menunjukkan bahwa kita tahu jarak antara Bumi dan matahari ke sentimeter terdekat!

Ini tidak masuk akal karena, antara lain, jarak antara Aspen, Colorado (pada siang hari, Waktu Standar Gunung), dan matahari, dan Cleveland, Ohio (pada siang hari, Waktu Standar Timur), dan matahari berbeda dengan 8.000 kaki, atau sekitar 250.000 sentimeter—perbedaan antara ketinggian Aspen dan Cleveland di atas permukaan laut. Dengan demikian, kita harus menentukan di mana di Bumi

kita membuat pengukuran semacam itu untuk membuatnya bermakna. Selanjutnya, bahkan jika kita menetapkan bahwa jarak ini dari pusat Bumi ke pusat matahari (pilihan yang masuk akal), ini berarti kita dapat mengukur ukuran Bumi dan Matahari ke sentimeter terdekat, belum lagi jarak antara keduanya, hingga ketepatan yang tepat ini. (Jika Anda berpikir tentang cara fisis yang praktis di mana Anda dapat mengukur jarak dari Bumi ke matahari, Anda dapat meyakinkan diri sendiri bahwa pengukuran dengan akurasi semacam ini tidak disukai, jika bukan tidak mungkin.)

Tidak: Jelas bahwa ketika kita menulis 14.960.000.000.000 cm, kita membulatkan jarak ke angka yang rapi. Tetapi dengan akurasi apa kita benar-benar tahu angkanya? Tidak ada ambiguitas seperti itu ketika kita menulis 1.4960×10^{13} cm. Ini memberitahu kita seberapa tepatnya kita tahu jarak ini. Secara khusus, ia memberitahu kita bahwa nilai sebenarnya terletak di suatu tempat antara $1,49595 \times 10^{13}$ cm dan $1,49605 \times 10^{13}$ cm. Jika kita tahu jaraknya dengan akurasi 10 kali lebih besar, kita akan menulis sebagai gantinya 1.49600×10^{13} cm.

Dengan demikian, ada perbedaan dunia antara $1,4960 \times 10^{13}$ cm dan 14,960,000,000,000 cm. Lebih dari dunia, sebenarnya, karena jika Anda berpikir tentang ketidakpastian yang tersirat dalam angka pertama, itu adalah sekitar $0,0001 \times 10^{13}$, atau 1 miliar, sentimeter—lebih besar dari radius Bumi!

Ini mengarah pada pertanyaan yang menarik. Apakah angka ini akurat? Sementara ketidakpastian sebesar 1 miliar sentimeter tampaknya sangat banyak, dibandingkan dengan

jarak Bumi-ke-Matahari, itu kecil—kurang dari 1 seperseribu jarak ini, tepatnya. Ini berarti kita tahu jarak Bumi-ke-Matahari lebih baik dari 1 bagian dalam 10.000. Pada skala relatif, ini sangat akurat. Ini akan seperti mengukur tinggi badan Anda sendiri dengan keakuratan sepersepuluh milimeter.

Keindahan menulis angka seperti $1,4960 \times 10^{13}$ adalah karena skala 10^{13} menetapkan 'skala' dari angka, Anda dapat langsung melihat seberapa akuratnya angka tersebut. Semakin banyak tempat desimal yang diisi, semakin tinggi akurasinya. Bahkan, ketika Anda memikirkannya dengan cara ini, angka yang ditulis dalam notasi ilmiah memberi tahu Anda, terutama, yang dapat Anda abaikan! Saat Anda melihat 10^{13} cm, Anda tahu bahwa efek fisis yang mungkin mengubah hasil dengan sentimeter, atau bahkan jutaan atau miliaran sentimeter, mungkin tidak relevan. Dan ketika saya menekankan pada bab terakhir, mengetahui apa yang harus diabaikan biasanya adalah hal yang paling penting dari semuanya.

Sejauh ini saya telah mengabaikan mungkin fakta paling penting yang membuat $1,49600 \times 10^{13}$ cm besaran fisis dan bukan yang matematis. Ini adalah 'cm' yang ditempelkan di bagian akhir. Tanpa atribut ini, kita tidak tahu apa jenis besaran yang dimaksud; 'cm' memberi tahu kita bahwa ini adalah ukuran panjang. Spesifikasi ini disebut *dimensi* sebuah besaran, dan inilah yang menghubungkan angka-angka dalam fisika dengan dunia nyata dari fenomena. Sentimeter, inci, mil, tahun cahaya—semuanya merupakan pengukuran jarak dan dengan demikian membawa dimensi panjang.

Hal yang mungkin paling bertanggung jawab untuk menyederhanakan fisika adalah ciri yang menarik dari dunia. Hanya ada tiga jenis besaran dimensi dasar (sering juga disebut besaran pokok) di alam: panjang, waktu, dan massa[7]. *Apapun, semua besaran fisis*, dapat dinyatakan dalam beberapa kombinasi dari unit-unit ini. Tidak masalah apakah Anda menyatakan kecepatan dalam mil/jam, meter/detik, sepanjang dua bulan, semuanya hanyalah cara penulisan panjang/waktu yang berbeda.

Ini memiliki implikasi yang luar biasa. Karena hanya ada tiga jenis besaran dimensi, ada sejumlah kombinasi independen dari jumlah ini yang dapat Anda rencanakan. Itu berarti bahwa setiap besaran fisis terkait dengan setiap besaran fisis lainnya dalam beberapa cara sederhana, dan itu sangat membatasi jumlah hubungan matematis yang berbeda yang mungkin dalam fisika. Mungkin tidak ada alat yang lebih penting yang digunakan oleh para ahli fisika daripada penggunaan dimensi untuk mengarakterisasi fisis yang dapat diamati. Tidak hanya sebagian besar tidak perlu menghafal persamaan, tetapi juga mendasari cara kita membayangkan dunia fisis. Seperti yang akan saya utarakan, menggunakan analisis dimensional memberi Anda perspektif fundamental tentang dunia, yang memberikan dasar yang masuk akal untuk menafsirkan informasi yang diperoleh oleh indra Anda atau dengan pengukuran lain. Ini memberikan perkiraan akhir: Ketika kita membayangkan sesuatu, kita membayangkan dimensi mereka.

[7] Seseorang mungkin memilih untuk menambahkan muatan listrik ke daftar ini, tetapi itu tidak perlu. Itu dapat diekspresikan dalam tiga hal lainnya.

Ketika kita sebelumnya menganalisis hukum penskalaan sapi kulit bola, kita benar-benar bekerja dengan keterkaitan antara dimensi panjang dan massa mereka. Misalnya, apa yang penting ada hubungan antara panjang dan volume dan, lebih eksplisit, rasio volume objek yang diperbesar ukurannya. Berpikir tentang dimensi, kita bisa melangkah lebih jauh dan mencari tahu bagaimana memperkirakan volume itu sendiri dari objek apa pun. Pikirkan setiap sistem unit untuk menggambarkan volume sesuatu: inci kubik, sentimeter kubik, kaki kubik. Kata kuncinya adalah kubik. Pengukuran ini semua menggambarkan dimensi yang sama: $panjang \times panjang \times panjang = panjang^3$. Dengan demikian, ini adalah taruhan yang baik bahwa volume suatu objek dapat diperkirakan dengan memilih beberapa panjang karakteristik, sebut saja d, dan kemudian kubik, atau mengambil d^3. Ini biasanya baik dalam sebuah nilai-pangkat. Sebagai contoh, volume bola yang saya berikan sebelumnya dapat ditulis ulang sebagai $\pi/6d^3 \approx [1/2]d^3$, di mana d adalah diameternya.

Berikut contoh lainnya: Mana yang benar: jarak = kecepatan × waktu, atau jarak = kecepatan / waktu? Meskipun jenis 'analisis dimensional' yang paling sederhana dapat segera memberikan jawaban yang benar, generasi demi generasi siswa yang menggunakan fisika bersikeras untuk mencoba menghafal rumus, dan mereka selalu salah. Dimensi kecepatan adalah panjang / waktu. Dimensi jarak adalah panjang. Oleh karena itu, jika sisi kiri memiliki dimensi panjang, dan kecepatan memiliki dimensi panjang / waktu, jelas Anda harus mengalikan kecepatan dengan waktu agar sisi kanan

memiliki dimensi panjang.

Analisis semacam ini tidak pernah dapat menjamin bahwa Anda memiliki jawaban yang benar, namun dapat memberi tahu ketika Anda salah. Dan meskipun itu tidak menjamin Anda benar, ketika bekerja dengan yang tidak dikenal itu sangat berguna untuk membiarkan argumen dimensi menjadi panduan Anda. Mereka memberi Anda kerangka untuk menyesuaikan yang tidak diketahui ke dalam apa yang sudah Anda ketahui tentang dunia.

Dapat dikatakan bahwa pikiran yang siap pada keterbukaan adalah hal menguntungkan. Tidak ada yang lebih benar dalam sejarah fisika. Dan analisis dimensi dapat mempersiapkan pikiran kita untuk hal yang tidak terduga. Dalam hal ini, hasil akhir dari analisis dimensi sederhana seringkali sangat kuat sehingga bisa tampak luar biasa. Untuk mendemonstrasikan ide-ide ini secara grafis, saya ingin melompat ke contoh modern berdasarkan penelitian di garis depan fisika—di mana gabungan yang diketahui dan tidak diketahui bersama. Dalam hal ini, argumen dimensi membantu mengarah pada pemahaman tentang salah satu dari empat kekuatan yang dikenal di alam: interaksi 'kuat' yang mengikat 'quark' bersama-sama untuk membentuk proton dan neutron, yang pada gilirannya membentuk inti semua atom. Argumennya mungkin tampak sedikit sulit dipahami saat pertama kali membaca, tetapi jangan khawatir. Saya menyajikannya karena mereka memberi Anda kesempatan untuk melihat secara eksplisit bagaimana argumen dimensi yang luas dan kuat dapat membimbing intuisi fisis kita. Bumbu argumen mungkin menjadi hal yang lebih penting

untuk Anda pertimbangkan daripada hasil apa pun.

Fisikawan yang mempelajari fisika partikel elementer —bidang fisika yang berhubungan dengan unsur pokok materi dan karakter kekuatan di antara mereka—telah menyusun sistem satuan yang memanfaatkan analisis dimensi sejauh yang Anda bisa. Pada prinsipnya, ketiga besaran dimensi—panjang, waktu, dan massa—adalah independen, tetapi dalam praktik alam memberi kita hubungan mendasar di antara mereka. Sebagai contoh, jika ada beberapa konstanta universal yang berhubungan dengan panjang dan waktu, maka saya dapat menyatakan panjang dalam jangka waktu dengan mengalikannya dengan konstanta ini. Nyatanya, alam telah berbaik hati untuk memberi kita konstanta seperti itu, seperti yang ditunjukkan Einstein pertama kali. Dasar teori relativitasnya, yang akan saya bahas nanti, adalah prinsip bahwa kecepatan cahaya, yang diberi label c, adalah konstanta universal, yang akan didapati nilai yang sama saat diukur oleh semua pengamat. Karena kecepatan memiliki dimensi panjang / waktu, jika saya mengalikan waktu dengan c, saya akan sampai pada sesuatu dengan dimensi panjang—yaitu, jarak cahaya akan berjalan pada saat ini. Untuk itu dimungkinkan kemudian mengungkapkan semua panjangnya secara jelas dalam hal berapa lama waktu yang diperlukan cahaya untuk melakukan perjalanan dari satu titik ke titik lainnya. Misalnya, jarak dari bahu ke siku Anda dapat dinyatakan sebagai 10^{-9} detik, karena ini merupakan perkiraan waktu yang diperlukan sinar cahaya untuk menempuh jarak ini. Pengamat yang mengukur seberapa jauh perjalanan cahaya saat ini akan mengukur

jarak yang sama.

Keberadaan konstanta universal, kecepatan cahaya, menyediakan korespondensi satu-satu antara setiap panjang dan waktu. Ini memungkinkan kita untuk menghilangkan salah satu dari jumlah dimensi ini untuk mendukung yang lain. Yaitu, kita dapat memilih apakah kita ingin menyatakan semua panjang sebagai waktu yang setara atau sebaliknya. Jika kita ingin melakukan ini, paling sederhana untuk menciptakan sistem satuan di mana kecepatan cahaya secara numerik sama dengan satu satuan. Sebut satuan panjang 'cahaya-detik' bukan sentimeter atau inci, misalnya. Dalam hal ini, kecepatan cahaya menjadi sama dengan 1 detik cahaya / detik. Sekarang semua panjang dan waktu ekuivalennya akan sama dengan angka!

Kita bisa melangkah lebih jauh. Jika nilai-nilai numerik panjang-cahaya dan waktu cahaya sama dalam sistem satuan ini, mengapa mempertimbangkan panjang dan waktu sebagai besaran dimensi yang terpisah? Kita bisa memilih untuk menyamakan dimensi panjang dan waktu. Dalam hal ini semua kecepatan, yang sebelumnya memiliki dimensi panjang / waktu, sekarang tidak berdimensi, karena dimensi panjang dan waktu dalam pembilang dan penyebut akan saling melenyapkan. Secara fisis ini sama dengan menulis semua kecepatan sebagai pembagi (tak berdimensi) dari kelajuan cahaya, sehingga jika saya mengatakan bahwa sesuatu memiliki kecepatan [1/2], ini berarti bahwa kecepatannya adalah [1/2] kelajuan cahaya. Jelas, sistem semacam ini membutuhkan kelajuan cahaya untuk menjadi konstanta universal bagi semua pengamat, sehingga kita dapat meng-

gunakannya sebagai nilai referensi.

Sekarang kita hanya memiliki dua besaran dimensi independen, waktu dan massa (atau, dengan kata lain, panjang dan massa). Salah satu konsekuensi dari sistem yang tidak biasa ini adalah memungkinkan kita untuk menyamakan jumlah dimensi lain selain panjang dan waktu. Misalnya, rumus terkenal Einstein $E = mc^2$ menyamakan massa suatu benda dengan jumlah energi yang setara. Dalam sistem satuan baru kita, bagaimanapun, c $(= 1)$ tidak berdimensi, sehingga kita menemukan bahwa 'dimensi' energi dan massa sekarang sama. Ini berlaku dalam praktek yang Einstein rumuskan secara formal: Itu membuat hubungan satu-satu antara massa dan energi. Rumus Einstein mengatakan kepada kita bahwa karena massa dapat diubah menjadi energi, kita dapat merujuk pada massa sesuatu di besaran yang dimilikinya sebelum diubah menjadi energi atau besaran dengan jumlah energi setara yang diubahnya. Kita tidak perlu lagi berbicara tentang massa suatu benda dalam kilogram, atau ton, atau pon, tetapi dapat berbicara tentang itu dalam satuan energi setara, dalam, katakanlah, 'Volts' atau 'Kalori'. Ini persis seperti apa yang dilakukan fisikawan partikel elementer ketika mereka mengacu pada massa elektron sebagai 0,5 juta elektron Volts (sebuah elektron Volt adalah energi elektron dalam kawat ketika didukung oleh baterai 1-Volt) bukan 10^{-31} gram. Karena eksperimen-eksperimen fisika partikel menangani secara teratur dengan proses-proses di mana massa diam partikel-partikel diubah menjadi energi, pada akhirnya adalah masuk akal untuk menggunakan satuan energi untuk melacak massa. Dan itu

adalah salah satu pedoman: Selalu gunakan satuan yang paling masuk akal secara fisis. Demikian pula, partikel dalam akselerator besar berjalan mendekati kelajuan cahaya, sehingga pengaturan $c = 1$ praktis secara numerik. Ini tidak akan praktis, namun, untuk menggambarkan gerak pada skala yang lebih akrab, di mana kita harus menggambarkan kecepatan dengan jumlah yang sangat kecil. Misalnya, kecepatan pesawat jet di satuan-satuan ini akan menjadi sekitar 0,000001, atau 10^{-6}.

Semua tidak berhenti di sini. Ada sifat konstan universal lainnya, yang diberi label h dan disebut konstanta Planck, merujuk pada fisikawan Jerman Max Planck (salah satu bapak mekanika kuantum). Ini menghubungkan besaran dengan dimensi massa (atau energi) untuk mereka dengan dimensi panjang (atau waktu). Melanjutkan seperti sebelumnya, kita dapat menciptakan sistem satuan di mana tidak hanya $c = 1$ tetapi $h = 1$. Dalam hal ini, hubungan antara dimensi hanya sedikit lebih rumit: Seseorang mendapati bahwa dimensi massa (atau energi) menjadi setara dengan 1 / panjang, atau 1 / waktu. (Secara khusus, besaran energi 1 elektron Volt menjadi setara dengan $1/6 \times 10^{-16}$ detik.) Hasil bersih dari semua ini adalah bahwa kita dapat mengurangi tiga *apriori*[8] besaran dimensi independen di alam untuk besaran tunggal. Kita kemudian dapat menggambarkan semua pengukuran di dunia fisis dalam hal besaran satu dimensi, yang dapat kita pilih untuk menjadi massa, waktu, atau panjang berdasar pada kenya-

[8] Apriori adalah pengetahuan yang ada sebelum bertemu dengan pengalaman. Lorens Bagus., Kamus Filsafat, Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 1996.

manan kita. Untuk melakukan konversi di antara mereka, kita hanya melacak faktor konversi yang membawa kita dari sistem satuan normal kita—di mana, misalnya, kecepatan cahaya $c = 3 \times 10^8$ meter / detik—ke sistem di mana $c = 1$. Sebagai contoh, volume, dengan dimensi panjang x panjang x panjang = panjang^3 dalam sistem satuan normal kita, ekuivalensi memiliki dimensi 1 / massa^3 (atau 1 / energi^3) dalam sistem baru ini. Dengan membuat konversi yang tepat ke unit-unit baru ini, kita menemukan, misalnya, bahwa volume 1 meter kubik (1 meter^3) setara dengan (1 / [10-20 elektron Volts^3]).

Sementara, ini adalah cara berpikir yang tidak biasa dan baru, keindahannya adalah bahwa dengan hanya satu parameter dimensi independen mendasar yang tersisa, kita dapat memperkirakan hasil dari fenomena intrinsik yang sangat rumit hanya dalam hal besaran tunggal. Dengan melakukan itu kita dapat melakukan keajaiban [sihir]. Sebagai contoh, katakanlah partikel elementer baru ditemukan yang memiliki tiga kali massa proton atau, dalam satuan energi, sekitar 3 miliar elektron Volts—3 GeV (Giga electron Volts), untuk singkatnya. Jika partikel ini tidak stabil, apa yang kita harapkan masa hidupnya sebelum meluruh? Kelihatannya mustahil untuk membuat perkiraan seperti itu tanpa mengetahui proses fisis terperinci apa pun yang terlibat di dalamnya. Namun, kita bisa menggunakan analisis dimensional untuk menebak. Satu-satunya besaran dimensi dalam persoalan tersebut adalah massa diam, atau energi yang setara dari partikel. Karena dimensi waktu setara dengan dimensi 1 / massa dalam sistem kita, perkiraan

yang wajar dari masa hidup akan k / (3 Ge V), dengan k adalah bilangan tanpa dimensi yang, dengan tidak adanya informasi lainnya, kita mungkin berharap tidak terlalu berbeda dari 1. Kita dapat mengonversi kembali ke satuan normal kita, katakan, detik, menggunakan rumus konversi kita $(1/1eV) = 6 \times 10^{-16}$ detik. Dengan demikian kita memperkirakan umur partikel baru kita sekitar $k \times 10^{-25}$ detik.

Tentu saja, tidak ada sihir di sini. Kita belum mendapatkan sesuatu untuk apa pun. Apa analisis dimensi yang telah memberi kita adalah *skala* bagi masalah tersebut. Ini memberitahu kita bahwa 'masa hidup alami' partikel-partikel tidak stabil dengan massa jenis ini sekitar $k \times 10^{-25}$ detik, sama seperti 'alamiah' seumur hidup manusia adalah urutan $k \times 75$ tahun. Semua fisika nyata (atau, dalam kasus terakhir, biologi) terkandung dalam besaran yang tidak diketahui k. Jika itu sangat kecil, atau sangat besar, pasti ada sesuatu yang menarik untuk dipelajari untuk memahami mengapa. Analisis dimensi telah, sebagai hasilnya, memberi tahu kita sesuatu yang sangat penting. Jika besaran k sangat berbeda dari 1, kita tahu bahwa proses yang terlibat harus sangat kuat atau sangat lemah, untuk membuat umur partikel seperti itu menyimpang dari nilai alaminya seperti yang diberikan oleh argumen dimensi. Ini akan seperti melihat sapi-super 10 kali ukuran sapi normal tetapi beratnya hanya 10 ons. Argumen skala sederhana dalam kasus itu akan memberi tahu kita bahwa sapi semacam itu terbuat dari beberapa bahan yang sangat eksotis. Kenyataannya, banyak hasil yang paling menarik dalam fisika adalah di mana argumen

skala abstrak yang naif terpecahkan. Apa yang penting untuk disadari adalah bahwa tanpa argumen skala ini, kita mungkin tidak tahu bahwa sesuatu yang menarik sedang terjadi di permulaan!

Pada tahun 1974, peristiwa yang luar biasa dan dramatis terjadi di sepanjang jalur-jalur ini. Selama tahun 1950-an dan 1960-an, dengan perkembangan teknik-teknik baru untuk mempercepat berkas-berkas berenergi tinggi bertabrakan, pertama dengan sasaran-sasaran tetap dan kemudian dengan berkas-berkas partikel lain dengan energi yang lebih tinggi, sekumpulan partikel elementer baru ditemukan. Seraya ratusan dan ratusan partikel baru ditemukan, tampaknya harapan pengharapan sederhana dalam sistem ini telah lenyap—sampai pengembangan model 'quark' pada awal 1960-an, sebagian besar oleh Murray Gell-Mann di Caltech, membawa tatanan keluar dari kekacauan. Semua partikel baru yang telah diamati dapat terbentuk dari kombinasi yang relatif sederhana—benda-benda mendasar yang disebut Gell-Mann quark. Partikel-partikel yang diciptakan di akselerator dapat dikategorikan hanya jika mereka terbentuk dari tiga quark atau satu quark dan antipartikelnya. Kombinasi baru dari kumpulan quark yang sama yang membentuk proton dan neutron diprediksi menghasilkan partikel yang tidak stabil, sebanding dalam massa terhadap proton. Ini diamati, dan masa hidup mereka ternyata cukup dekat dengan perkiraan dimensi kita (yaitu, sekitar 10^{-25} detik). Secara umum, masa hidup partikel-partikel ini berada di sekitar 10^{-24} detik, sehingga konstanta k dalam perkiraan dimensi akan menjadi sekitar 10, tidak terlalu

jauh dari kesatuan. Namun interaksi antara quark, yang memungkinkan partikel-partikel ini meluruh, pada saat yang sama tampaknya menahan mereka begitu terikat erat di dalam partikel seperti proton dan neutron yang tidak pernah ada satu pun yang pernah diamati. Interaksi semacam itu tampak begitu kuat sehingga menentang upaya untuk memodelkannya secara detail melalui skema kalkulasi apa pun.

Pada tahun 1973, penemuan teoretis yang penting mempersiapkan jalan. Bekerja dengan teori model setelah teori elektromagnetik dan teori interaksi lemah yang baru dibangun, David Gross dan Frank Wilczek di Princeton dan, secara independen, David Politzer di Harvard menemukan bahwa teori kandidat yang menarik untuk interaksi kuat antara quark memiliki keunikan dan ciri yang tidak biasa. Dalam teori ini, masing-masing quark bisa datang dalam salah satu dari tiga varietas yang berbeda, dengan cara sedikit aneh diberi label 'warna', sehingga teori itu disebut *quantum chromodynamics*, atau QCD. Apa yang Gross, Wilczek, dan Politzer temukan adalah bahwa ketika quark bergerak semakin dekat dan berdekatan, interaksi di antara mereka, berdasarkan 'warna' mereka, akan menjadi *lebih lemah dan lebih lemah*! Selain itu, mereka membuktikan bahwa ciri khas semacam itu unik untuk teori semacam ini—tidak ada jenis teori lain di alam yang dapat berperilaku sama.

Ini akhirnya menawarkan harapan bahwa seseorang mungkin dapat melakukan perhitungan untuk membandingkan prediksi teori dengan pengamatan. Karena jika seseorang dapat menemukan situasi di mana interaksi cukup lemah,

seseorang dapat melakukan aproksimasi aturan sederhana, dimulai dengan quark tanpa-interaksi dan kemudian menambahkan interaksi kecil, untuk membuat perkiraan-perkiraan yang reliabel tentang perilaku mereka yang seharusnya.

Sementara fisikawan teoretis mulai mengasimilasi implikasi dari sifat yang luar biasa ini, dijuluki 'kebebasan asimtotik', eksperimentalis di dua fasilitas baru di Amerika Serikat—satu di New York dan satu di California—sedang sibuk memeriksa tumbukan energi yang lebih tinggi antar partikel dasar. Pada bulan November 1974, dalam beberapa minggu berturut-turut, dua kelompok yang berbeda menemukan partikel baru dengan massa tiga kali lipat dari proton. Apa yang membuat partikel ini begitu nyata adalah benda itu memiliki masa hidup 100 kali lebih panjang daripada partikel dengan massa yang lebih kecil. Seorang fisikawan selibat berkomentar bahwa itu laiknya tersandung pada suku baru orang-orang di hutan, yang masing-masing berusia 10.000 tahun!

Bersamaan dengan hasil ini, Politzer dan kolaboratornya, Tom Appelquist, menyadari bahwa partikel berat baru ini harus terdiri dari jenis quark baru—yang sebelumnya dijuluki quark yang elok—yang keberadaannya sebenarnya telah diprediksi beberapa tahun sebelumnya oleh para ahli teori karena alasan yang tidak berkaitan. Selain itu, fakta bahwa status quark yang terikat ini hidup lebih lama daripada yang tampak memiliki hak untuk dapat dijelaskan sebagai konsekuensi langsung dari kebebasan asimtotik dalam QCD. Jika quark berat dan antiquark saling berdampingan sangat erat dalam keadaan terikat ini, interaksi mereka akan lebih

lemah daripada interaksi quark ringan di dalam partikel seperti proton. Kelemahan dari interaksi ini akan menyiratkan bahwa akan lebih lama bagi quark dan anti-quarknya untuk 'menemukan' dan memusnahkan kuantum satu sama lain. Perkiraan kasar dari waktu yang diperlukan, berdasarkan skala kekuatan interaksi QCD dari ukuran proton ke ukuran perkiraan partikel baru ini, menyebabkan kesepakatan yang wajar dengan pengamatan. QCD telah menerima konfirmasi langsung pertamanya.

Pada tahun-tahun sejak penemuan ini, percobaan dilakukan pada energi yang lebih tinggi, di mana ternyata pendekatan yang digunakan dalam perhitungan lebih dapat diandalkan, telah mengkonfirmasi dengan baik dan berulang kali prediksi QCD dan kebebasan asimtotik. Meskipun belum ada yang mampu melakukan perhitungan lengkap dalam rezim di mana QCD menjadi kuat, bukti eksperimental dalam rezim energi tinggi begitu luar biasa sehingga tidak ada yang meragukan bahwa kita sekarang memiliki teori interaksi yang benar antar quark. Bahkan, Gross, Wilczek, dan Politzer dianugerahi Hadiah Nobel pada tahun 2004 untuk penemuan kebebasan asimtotik, dan dengan itu, kemampuan untuk memverifikasi QCD sebagai teori Interaksi Kuat. Dan tanpa panduan dimensi untuk pemikiran kita, penemuan-penemuan kunci yang membantu meletakkan teori pada landasan empiris kokoh tidak akan dihargai sama sekali. Ini menggeneralisasi jauh melampaui kisah penemuan QCD. Analisis dimensi menyediakan kerangka kerja yang dapat digunakan untuk menguji gambaran realitas kita.

Jika cara pandang kita dimulai dengan angka yang kita

gunakan untuk menggambarkan alam, hal tersebut tidak berhenti di sana. Fisikawan bersikeras juga menggunakan hubungan matematika antara jumlah ini untuk menggambarkan proses fisis—eksperimen yang dapat membuat Anda mempertanyakan mengapa kita tidak menggunakan bahasa yang lebih mudah dipahami. Tetapi kita tidak punya pilihan. Bahkan Galileo menghargai fakta ini, sekitar 400 tahun yang lalu, ketika dia menulis: "Filsafat ditulis dalam buku besar ini, alam semesta, yang berdiri terus-menerus terbuka terhadap pandangan kita. Tetapi buku ini tidak dapat dipahami kecuali terlebih dahulu belajar untuk memahami bahasa dan membaca huruf-huruf yang menyusunnya. Semua itu ditulis dalam bahasa matematika, dan karakternya adalah segitiga, lingkaran, dan figur geometris lain yang tanpanya tidak mungkin secara manusiawi untuk memahami satu kata pun darinya; tanpa ini, seseorang laiknya mengembara di labirin gelap."[9]

Sekarang pernyataan bahwa matematika adalah 'bahasa' fisika mungkin tampak sebagai suatu hal basi seperti halnya mengatakan bahwa bahasa Perancis adalah 'bahasa' cinta. Itu masih tidak menjelaskan mengapa kita tidak bisa menerjemahkan matematika sebaik kita mungkin menerjemahkan puisi-puisi Baudelaire. Dan dalam masalah cinta, sementara mereka yang bahasa ibunya bukan orang Perancis mungkin hanya merugi, sebagian besar dari kita berhasil melakukannya ketika itu penting! Tidak, ada yang lebih dari sekadar bahasa. Untuk mulai menggambarkan berapa banyak lagi,

[9] Discoveries and Opinions of Galileo, trans. Stillman Drake (New York: Anchor Books, 1990).

saya akan meminjam argumen dari Richard Feynman. Selain menjadi pribadi yang karismatik, Feynman termasuk di antara pemikir-pemikir fisika teoretis terbesar di abad ini. Dia memiliki bakat yang langka untuk dijelaskan, saya pikir sebagian karena fakta bahwa dia memiliki caranya sendiri untuk memahami dan menurunkan hampir semua hasil klasik dalam fisika, dan juga sebagian dari aksen New York-nya.

Ketika Feynman mencoba menjelaskan perlunya matematika,[10] ia tidak lain beralih pada Newton untuk hal preseden. Penemuan terbesar Newton, tentu saja, adalah Hukum Gravitasi Universal. Dengan menunjukkan bahwa kekuatan yang sama yang mengikat kita pada bidang ini yang kita sebut Bumi bertanggungjawab untuk gerak semua objek langit, Newton menjadikan fisika sebagai ilmu universal. Dia menunjukkan bahwa kita memiliki potensi untuk memahami bukan hanya mekanisme kondisi manusia kita dan tempat kita di alam semesta tetapi alam semesta itu sendiri. Kita cenderung menerima begitu saja, tetapi tentu saja salah satu hal yang paling luar biasa tentang alam semesta adalah bahwa kekuatan yang sama yang memandu bisbol keluar dari taman mengatur gerak sublimet elegan Bumi kita di sekitar matahari, matahari kita di sekitar galaksi, galaksi kita di sekitar tetangganya, dan keseluruhannya sebagai alam semesta itu sendiri berevolusi. Tidak harus seperti itu (atau mungkin itu terjadi—masalah itu masih terbuka).

Sekarang hukum Newton dapat dinyatakan dalam kata-

[10] Richard Feynman, The Character of Physical Law (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1965).

kata sebagai berikut: Gaya tarik yang diberikan gravitasi antara dua benda diarahkan sepanjang garis yang menghubungkannya, dan bergantung pada hasil kali massa keduanya dan berbanding terbalik sebagai kuadrat jarak di antara mereka. Penjelasan verbal sudah agak rumit, tapi tidak masalah. Menggabungkan ini dengan hukum Newton yang lain—bahwa benda bereaksi terhadap gaya dengan mengubah kelajuannya ke arah gaya tersebut, dengan cara yang sebanding dengan gaya dan berbanding terbalik dengan massa mereka—Anda memiliki semuanya. Setiap konsekuensi gravitasi mengikuti hasil ini. Tapi bagaimana caranya? Saya dapat memberikan uraian ini kepada ahli bahasa terkemuka di dunia dan meminta dia untuk menyimpulkan dari jaman ini di jagat raya dengan argumen semantik, tetapi mungkin akan membutuhkan waktu lebih lama daripada saat ini untuk mendapatkan jawaban.

Intinya adalah bahwa matematika juga merupakan sistem koneksi, yang diciptakan oleh perangkat-perangkat logika. Misalnya, untuk melanjutkan dengan contoh terkenal ini, Johannes Kepler membuat sejarah pada awal abad ketujuh belas dengan menemukan analisis data seumur hidup bahwa planet-planet bergerak mengelilingi matahari dengan cara yang khusus. Jika seseorang menarik garis antara planet dan matahari, maka daerah tersebut tersapu oleh garis ini ketika planet bergerak di orbitnya selalu sama dalam interval waktu tertentu. Ini ekuivalen (menggunakan matematika!) terhadap pernyataan bahwa ketika planet lebih dekat ke matahari ini di orbitnya, ia bergerak lebih cepat, dan ketika lebih jauh, ia bergerak lebih lambat. Namun

Newton menunjukkan bahwa hasil ini juga identik secara matematis dengan pernyataan bahwa harus ada kekuatan yang diarahkan sepanjang garis dari planet ke matahari! Ini adalah awal dari Hukum Gravitasi.

Cobalah semampu Anda, Anda tidak akan pernah bisa membuktikan, hanya dengan alasan linguistik, bahwa kedua pernyataan ini identik. Tetapi dengan matematika, dalam hal ini geometri sederhana, Anda dapat membuktikannya sendiri secara langsung. (Baca *Principia* Newton atau, untuk terjemahan yang lebih mudah, bacalah Feynman.)

Inti dari pengajuan semua persoalan ini bukan hanya bahwa Newton mungkin tidak akan pernah bisa mendapatkan Hukum Gravitasi-nya jika dia tidak mampu membuat hubungan matematis antara pengamatan Kepler dan fakta bahwa matahari memberikan gaya pada planet-planet —meskipun demikian, ini saja sudah sangat penting untuk kemajuan sains. Juga bukan fakta bahwa tanpa menghargai dasar matematika fisika, seseorang tidak dapat memperoleh hubungan penting lainnya. Intinya adalah bahwa hubungan yang diinduksi oleh matematika benar-benar mendasar untuk menentukan seluruh gambaran realitas kita.

Saya pikir analogi sastra ada dalam urutan. Ketika saya menulis bab ini, saya telah membaca novel karya penulis Kanada Robertson Davies. Dalam beberapa kalimat, ia meringkas sesuatu yang sangat dekat dengan kita: "Apa yang benar-benar mengejutkan saya adalah kejutan dari orang-orang itu bahwa saya dapat melakukan hal semacam itu. . . Mereka hampir tidak dapat membayangkan siapa pun yang membaca. . . dapat memiliki sisi lain, yang tam-

paknya benar-benar berlawanan dengan karakternya. Saya tidak dapat mengingat saat ketika saya tidak menganggapnya dimengerti bahwa setiap orang memiliki setidaknya dua, jika tidak dua puluh dua, sisi padanya."[11]

Perkenankan saya membuatnya lebih personal. Salah satu dari banyak hal yang dilakukan istri saya bagi saya adalah membuka cara baru melihat dunia. Kita berasal dari latar belakang yang sangat berbeda. Dia berasal dari kota kecil, dan saya berasal dari kota besar. Sekarang, orang yang tumbuh di kota besar seperti saya cenderung melihat orang lain dengan sangat berbeda dari orang yang tumbuh di kota kecil. Sebagian besar orang yang Anda temui setiap hari di kota besar adalah satu dimensi. Anda melihat tukang daging sebagai tukang daging, tukang pos sebagai tukang pos, dokter sebagai dokter, dan sebagainya. Namun di kota kecil, Anda tidak bisa tidak bertemu orang-orang di lebih dari satu samaran. Mereka adalah tetangga Anda. Dokter mungkin mabuk, dan wanita perayu samping rumah mungkin adalah guru bahasa Inggris inspiratif di sekolah menengah setempat. Saya telah belajar, seperti yang dilakukan protagonis dalam novel Davies (dari kota kecil!), Bahwa orang-orang tidak dapat dengan mudah dikategorikan berdasarkan satu sifat atau aktivitas. Hanya ketika seseorang menyadari hal ini apakah mungkin benar-benar memahami kondisi manusia.

Dengan demikian, setiap proses fisis di alam semesta bersifat multidimensional. Hanya dengan menyadari bahwa kita dapat memahami masing-masing dalam sejumlah ca-

[11] Robertson Davies, Fifth Business (Toronto: Macmillan, 1970).

ra yang setara, tetapi tampaknya berbeda, cara-cara yang dapat kita hargai paling dalam tentang cara kerja alam semesta. Kita tidak bisa mengklaim memahami alam ketika kita hanya melihat satu sisi saja. Dan untuk lebih baik atau lebih buruk, itu adalah fakta bahwa hanya hubungan matematis memungkinkan kita untuk melihat keseluruhan di tengah-tengah bagian. Ini adalah matematika yang memungkinkan kita untuk mengatakan bahwa dunia adalah sapi bulat.

Di satu sisi, kemudian, matematika membuat dunia lebih kompleks, dengan menghadirkan kepada kita banyak wajah realitas yang berbeda. Namun dalam melakukannya, itu benar-benar menyederhanakan pemahaman kita. Kita tidak perlu menyimpan semua wajah di kepala kita pada saat bersamaan. Dengan bantuan matematika, kita bisa pergi dari satu ke yang lain sesuai keinginan. Dan jika, seperti yang akan saya klaim, itu adalah keterkaitan fisika yang pada akhirnya membuatnya paling mudah diakses, kemudian matematika membuat fisika dapat diakses.

Selain itu, fakta bahwa matematika memungkinkan kita untuk mengulang kembali fenomena yang sama dalam banyak samaran yang berbeda menawarkan kepada kita kegembiraan penemuan yang berkelanjutan. Visi baru dari hal yang sama selalu mungkin! Juga, setiap wajah baru realitas menawarkan kepada kita kemungkinan untuk memperluas pemahaman kita di luar fenomena yang mungkin telah memunculkan pandangan baru kita. Saya akan lalai jika saya tidak menjelaskan satu contoh terkenal tentang hal ini, yang masih saya temukan benar-benar menarik dua

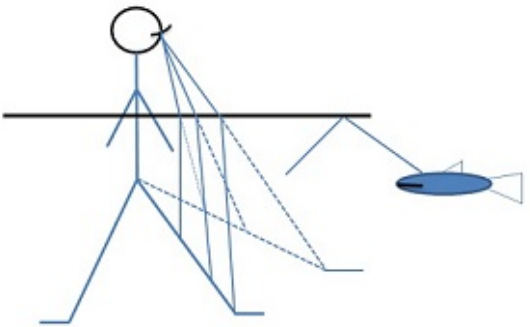
puluh lima tahun setelah saya pertama kali mempelajarinya dari Feynman.

Contoh ini melibatkan fenomena yang akrab tetapi membingungkan: sebuah fatamorgana. Siapa pun yang pernah mengemudi di jalan raya panjang lurus pada suatu hari saat musim panas yang terik akan memiliki pengalaman melihat ke bawah jalan dan melihatnya membiru di kejauhan, seolah-olah basah dan memantulkan langit di atas. Ini adalah versi yang kurang eksotis dari hal yang sama yang terjadi pada jiwa-jiwa malang yang mengembara di padang pasir mencari air dan melihatnya, hanya untuk menghilangkannya ketika mereka berlari menuju visi keselamatan mereka.

Ada penjelasan sederhana dan standar tentang fatamorgana yang ada hubungannya dengan fakta yang umum diketahui bahwa cahaya membelok ketika melintasi batas antara dua media yang berbeda. Inilah sebabnya mengapa ketika Anda berdiri di air, Anda terlihat lebih pendek dari yang sebenarnya. Sinar cahaya membengkok pada permukaan dan mengelabui Anda dengan berpikir kaki Anda lebih tinggi dari yang sebenarnya (lihat Gambar 6).

Ketika cahaya bergerak dari medium yang lebih padat ke medium yang kurang padat, seperti pada gambar 6 (perjalanan dari kaki Anda ke air lalu ke mata Anda di udara), ia selalu menekuk 'ke luar'. Akhirnya, jika ia menyentuh permukaan pada suatu titik yang cukup besar sudutnya, ia akan membengkok sejauh ini sehingga memantulkan kembali ke air. Dengan demikian, hiu yang hendak menyerang tetap tersembunyi dari pandangan.

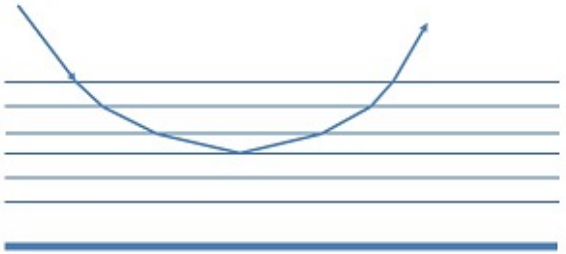
Pada hari yang masih panas, udara di atas permuka-



Gambar 6: Sinar cahaya membengkok pada permukaan dan mengelabui seseorang dengan berpikir kaki Anda lebih tinggi dari mereka.

an jalan menjadi sangat panas—jauh lebih panas daripada temperatur udara yang lebih tinggi. Apa yang terjadi adalah udara membentuk lapisan, dengan lapisan paling panas dan paling tidak padat di bagian bawah, naik ke atas ke lapisan yang lebih dingin dan lebih padat. Ketika cahaya yang datang dari langit mengarah ke jalan, itu membengkok/membelok di setiap lapisan, sampai, jika ada cukup lapisan, itu akan tercermin sepenuhnya hingga Anda melihatnya ketika Anda melihat ke jalan dari mobil. Dengan demikian, jalan tampak memantulkan langit biru. Jika Anda perhatikan dengan teliti di lain waktu ketika Anda melihat fatamorgana, Anda akan melihat bahwa lapisan biru berasal dari sedikit di atas permukaan jalan.

Sekarang ini adalah penjelasan standar, dan itu memuaskan, jika tidak selalu memberi inspirasi. Ada penjelasan lain dari fenomena yang sama, yang sekarang kita tahu

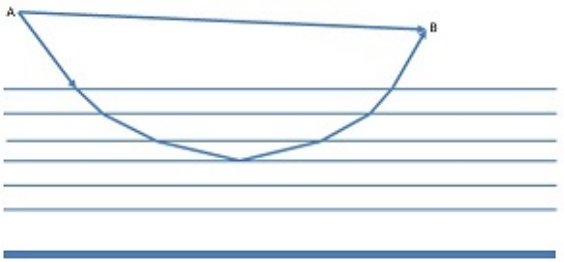


Gambar 7: Pembelokkan sinar pada lapisan kepadatan medium saat terjadi fatamorgana.

secara matematis setara dengan yang satu ini tetapi yang menyajikan gambaran yang sangat berbeda tentang bagaimana cahaya itu sampai ke mata Anda dari langit. Hal ini didasarkan pada prinsip waktu paling sedikit, yang diusulkan oleh matematikawan Perancis Pierre de Fermat pada tahun 1650, yang menyatakan bahwa cahaya akan selalu mengambil jalur yang membutuhkan waktu paling sedikit untuk bergerak dari A ke B.

Prinsip ini jelas cocok untuk perjalanan cahaya yang normal, yang berada dalam garis lurus. Bagaimana kita dapat menjelaskan fatamorgana? Nah, cahaya bergerak lebih cepat dalam medium yang kurang padat (ia bergerak paling cepat dalam ruang kosong). Karena udara di dekat jalan lebih panas dan kurang padat, semakin lama cahayanya berada di dekat jalan, semakin cepat ia bergerak. Jadi, bayangkan bahwa sinar cahaya ingin bergerak dari titik A, ke mata Anda, B. Jalur mana yang akan diambil?

Salah satu cara untuk melakukannya adalah dengan me-



Gambar 8: Gerak cahaya sampai ke mata saat terjadi fatamorgana.

lakukan perjalanan langsung ke mata Anda. Dalam hal ini, bagaimanapun, cahaya, saat menempuh jarak terpendek, akan menghabiskan sebagian besar waktunya di udara padat yang tinggi di atas jalan. Cara lain adalah dengan mengambil jalur yang ditunjukkan dalam ilustrasi. Dalam hal ini, cahaya berjalan lebih jauh, tetapi menghabiskan lebih banyak waktu di lapisan yang kurang padat di dekat jalan, di mana ia bergerak lebih cepat. Dengan menyeimbangkan jarak yang ditempuh dengan kelajuan yang dilaluinya, Anda akan menemukan bahwa jalan sebenarnya yang diperlukan, yang menghasilkan khayalan, adalah salah satu yang meminimalkan waktu.

Ini aneh, jika Anda memikirkannya. Bagaimana cahaya dapat menentukan terlebih dahulu saat dipancarkan, jalur mana yang tercepat? Apakah cahaya 'mengendus' di sekitar semua jalur yang mungkin sebelum akhirnya memilih yang benar? Jelas tidak. Ia hanya mematuhi hukum-hukum lokal fisika, yang memberitahukannya apa yang harus dilakukan pada setiap antarmuka, dan itu terjadi begitu saja, secara

matematis, bahwa ini ternyata selalu menjadi jalur yang membutuhkan waktu yang sangat singkat. Ada sesuatu yang sangat memuaskan tentang temuan ini. Tampaknya lebih mendasar daripada deskripsi alternatif dalam hal kelenturan cahaya pada lapisan yang berbeda di atmosfer. Dan dalam arti tertentu. Kita sekarang mengerti bahwa hukum gerak semua objek dapat diekspresikan kembali dalam bentuk yang mirip dengan prinsip Fermat untuk cahaya. Selain itu, bentuk baru dari pengungkapan hukum gerak Newton klasik ini mengarah ke metode baru, yang dikembangkan oleh Feynman, untuk menafsirkan hukum mekanika kuantum.

Dengan memberikan cara yang berbeda tetapi setara dalam menggambarkan dunia, matematika mengarah pada cara-cara baru memahami alam. Ada lebih dari sekadar kebaruan yang dipertaruhkan di sini. Gambar baru dapat memungkinkan kita untuk menghindari rintangan yang mungkin menghalangi penggunaan gambar lama. Sebagai contoh, metode berdasarkan analogi dengan prinsip Fermat telah memungkinkan mekanika kuantum untuk diterapkan pada sistem fisis yang hingga kini tetap tak tertembus, termasuk upaya terbaru yang dipelopori oleh Stephen Hawking untuk mencoba memahami bagaimana mekanika kuantum dapat memengaruhi teori relativitas umum Einstein.

Jika koneksi matematis membantu mengatur pemahaman kita tentang alam dengan mengekspos cara-cara baru menggambarkan dunia, mau tidak mau hal ini mengarah pada masalah berikut yang saya ingin tinggalkan pada Anda dalam bab ini. Jika abstraksi alam kita bersifat matematis, dalam arti apa kita bisa dikatakan memahami alam semesta?

Misalnya, dalam arti apakah Hukum Newton menjelaskan *mengapa* benda-benda bergerak? Untuk beralih ke Feynman lagi:

> Apa yang kita maksud dengan 'memahami' sesuatu? Bayangkan bahwa dunia adalah sesuatu seperti permainan catur hebat yang dimainkan oleh para *dewa/tuhan*, dan kita adalah pengamat pertandingan. Kita tidak tahu seperti apa aturan mainnya; yang bisa kita lakukan hanyalah menonton pertandingan. Tentu saja, jika kita menonton cukup lama, kita akhirnya dapat menangkap beberapa aturan. Aturan mainnya adalah apa yang kita sebut fisika fundamental. Meskipun kita tahu setiap aturan, kita mungkin tidak dapat memahami mengapa gerakan tertentu dibuat dalam permainan, hanya karena terlalu rumit dan pikiran kita terbatas. Jika Anda bermain catur, Anda harus tahu bahwa mudah untuk mempelajari semua aturan, namun seringkali sangat sulit untuk memilih langkah terbaik atau untuk memahami mengapa seorang pemain bergerak seperti yang dia lakukan. Jadi di alam, hanya lebih dari itu. . . Kita harus membatasi diri pada pertanyaan yang lebih mendasar dari aturan permainan. Jika kita tahu aturannya, kita menganggap bahwa kita 'memahami' dunia.[12]

Pada akhirnya, kita mungkin tidak pernah melangkah lebih jauh dari menjelaskan aturan, dan mungkin tidak pernah tahu mengapa mereka sebagaimana adanya. Tetapi kita telah berhasil luar biasa dalam menemukan aturan-aturan ini, dengan mengabstraksikan keluar dari situasi yang rumit, di mana aturan-aturan itu tidak mungkin dilacak, menjadi lebih sederhana, di mana aturan-aturannya terbukti dengan

[12] Richard P. Feynman, Robert B. Layton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, vol.2 (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1965).

sendirinya—menggunakan panduan dari alat-alat yang telah saya uraikan dalam bab ini dan yang terakhir. Dan ketika kita mencoba memahami dunia, sebagai fisikawan, itulah yang bisa kita harapkan. Namun demikian, jika kita berusaha sangat keras dan memiliki keberuntungan di pihak kita, kita setidaknya dapat dengan senang hati memprediksi bagaimana alam akan merespon dalam situasi yang belum pernah dilihat sebelumnya. Dengan melakukan itu, kita dapat berharap untuk mengamati secara langsung koneksi tersembunyi dalam fisika yang mungkin pertama kali diekspos oleh matematika dan itu, pada gilirannya, membuat dunia menjadi sangat menarik.

B A G I A N D U A :
P R O G R E S

PLAGIASI KREATIF

Plus a change, plus c'est la mme chose.
(Semakin banyak ia berubah,
semakin banyak hal yang sama..)

Kebijaksanaan Populer mungkin membuat Anda percaya bahwa penemuan baru dalam sains selalu berpusat pada ide-ide baru yang radikal. Faktanya, yang paling sering benar adalah yang sebaliknya. Ide lama tidak hanya bertahan tetapi hampir selalu tetap memungkinkan untuk berkembang di masa mendatang. Sementara alam semesta sangat beragam dalam fenomena, tampaknya agak terbatas dalam prinsip. Akibatnya, dalam fisika tidak ada banyak kontribusi pada ide-ide baru seperti yang ada pada ide-ide yang berhasil. Jadi, orang melihat konsep yang sama, formalisme yang sama, teknik yang sama, gambar yang sama, dipilin dan dibentuk dan dibengkokkan sejauh mungkin untuk diterapkan pada sejumlah situasi baru, selama mereka telah bekerja sebelumnya.

Ini mungkin tampak menjadi pendekatan yang agak

memalukan, bahkan tidak kreatif untuk membuka kunci rahasia alam, tetapi senyatanya tidak demikian. Jika diperlukan keberanian besar untuk menganggap bahwa katapel bisa membunuh raksasa, sama-sama berani untuk mengira bahwa metode yang sama yang menentukan seberapa jauh bidikan akan mengarah mungkin juga menentukan nasib alam semesta. Seringkali membutuhkan kreativitas yang besar juga, untuk melihat bagaimana gagasan yang ada dapat berlaku untuk situasi baru dan tidak biasa. Di dalam fisika, *yang kurang adalah yang lebih.*

Pemindahan ide-ide lama telah berhasil dengan begitu teratur sehingga kita mengharapkannya berguna. Bahkan konsep-konsep baru yang langka yang telah bekerja dengan cara mereka ke dalam fisika telah *dipaksa* menjadi ada oleh kerangka pengetahuan yang ada. Ini adalah plagiarisme kreatif yang membuat fisika dapat dipahami, karena itu mengartikan bahwa ide-ide fundamental terbatas jumlahnya.

Mungkin kesalahpahaman modern terbesar tentang sains adalah bahwa 'revolusi' ilmiah menyingkirkan semua yang telah terjadi sebelumnya. Dengan demikian, orang mungkin membayangkan bahwa fisika sebelum Einstein tidak lagi benar. Tidak begitu. Dari sini hingga kelestarian, gerak bola yang jatuh dari tangan saya akan dijelaskan oleh Hukum Newton. Dan sementara itu adalah cerita fiksi ilmiah yang terbuat dari, tidak ada hukum fisika baru yang akan membuat bola jatuh! Salah satu aspek fisika yang paling memuaskan adalah bahwa penemuan-penemuan baru harus sesuai dengan apa yang sudah diketahui benar. Jadi, juga, teori masa depan akan selalu terus meminjam banyak hal

dari masa lalu.

Metode kerja ini melengkapi gagasan tentang pendekatan terhadap realitas yang saya diskusikan sebelumnya. Mentalitas "*Torpedo sialan, majulah dengan kecepatan penuh*" yang sama menunjukkan bahwa seseorang tidak harus benar-benar memahami segalanya sebelum bergerak. Kita dapat menyelidiki perairan yang tidak diketahui dengan peralatan yang tersedia tanpa membuang waktu untuk membangun gudang senjata baru.

Preseden untuk tradisi ini juga diciptakan oleh Galileo. Saya berbicara dalam bab pertama penemuan Galileo bahwa konsentrasi pada aspek gerak yang paling sederhana dan membuang fakta yang tidak relevan menyebabkan reorganisasi besar dari gambaran realitas kita. Apa yang tidak saya jelaskan adalah dia menyatakan di depan bahwa dia tidak peduli *mengapa* benda-benda bergerak; semua yang ingin dilakukannya, dengan cara yang sangat sederhana, menyelidiki *bagaimana* caranya. "Tujuan saya adalah untuk mengemukakan ilmu yang sangat baru yang berhubungan dengan subjek yang sangat kuno. Ada, di alam, mungkin tidak lebih tua dari gerak, tentang mana buku-buku yang ditulis oleh para filsuf tidak sedikit atau kecil; namun saya telah menemukan dengan mencoba beberapa sifat yang layak diketahui."[13]

Pertanyaan *bagaimana* itu sendiri akan menawarkan wawasan baru yang luar biasa. Seketika setelah Galileo berpendapat bahwa benda yang diam hanyalah kasus khusus dari benda yang bergerak dengan kecepatan konstan,

[13] Galilei, *Dialogues Concerning Two New Sciences*, p. 153.

keretakan mulai muncul dalam filsafat Aristoteles, yang menegaskan status khusus dari yang pertama. Faktanya, argumen Galileo menyiratkan bahwa hukum-hukum fisika mungkin terlihat sama dari sudut pandang seorang pengamat yang bergerak dengan kelajuan konstan ketika mereka berada di dunia dari titik yang menguntungkan di saat diam. Apalagi, objek ketiga dalam gerak relatif konstan terhadap satu juga akan bergerak konstan relatif terhadap yang lain. Demikian pula, objek yang mempercepat atau memperlambat relatif terhadap seseorang akan melakukan hal yang relatif sama dengan yang lain. Kesetaraan antara dua titik yang menguntungkan ini adalah pernyataan relativitas Galileo, yang mendahului Einstein hampir tiga abad. Hal ini sangat menguntungkan bagi kita, karena sementara kita terbiasa mengukur gerak dibandingkan dengan *firma terra* tetap dan stabil, selama ini Bumi bergerak mengelilingi matahari, dan matahari bergerak di sekitar galaksi, dan galaksi kita bergerak di sekitar sekelompok galaksi, dan seterusnya. Jadi kita benar-benar tidak berdiam-diri, melainkan bergerak pada kelajuan besar relatif ke galaksi yang jauh. Jika gerak latar belakang ini harus diperhitungkan sebelum kita bisa menjelaskan secara tepat fisika bola yang terbang di udara relatif terhadap kita di Bumi, Galileo dan Newton tidak akan pernah bisa mendapatkan hukum ini di tempat pertama. Memang, itu hanya karena konstan (pada skala waktu manusia) gerak galaksi kita relatif terhadap tetangganya tidak mengubah perilaku benda bergerak di Bumi bahwa hukum gerak yang ditemukan, yang pada gilirannya memungkinkan perkembangan astronomi yang

menyebabkan untuk pengakuan bahwa galaksi kita bergerak relatif terhadap galaksi jauh di tempat pertama.

Saya akan kembali ke relativitas nanti. Pertama, saya ingin menggambarkan bagaimana Galileo memuluskan kesuksesannya yang pertama dengan gerak yang seragam. Karena kebanyakan gerak yang kita lihat di alam sebenarnya tidak seragam, jika Galileo benar-benar mengklaim untuk membahas realitas, ia harus mengatasi masalah ini. Sekali lagi, ia mengikuti prinsip-prinsip pertamanya: Buang yang tidak relevan, dan jangan tanya mengapa:

> Saat ini tampaknya bukan waktu yang tepat untuk menyelidiki penyebab akselerasi gerak alami yang mana berbagai pendapat telah diungkapkan oleh berbagai filsuf, beberapa menjelaskannya dengan tarikan ke pusat, yang lain menolak antara bagian-bagian yang sangat kecil dari benda, sementara yang lain menghubungkannya dengan tekanan tertentu di medium sekitarnya yang menutup di belakang benda yang jatuh dan mendorongnya dari salah satu posisinya ke yang lain. Sekarang, semua fantasi ini, dan yang lainnya juga, harus diperiksa; tetapi itu tidak benar-benar bermanfaat. Saat ini adalah tujuan Penulis kita hanya untuk menyelidiki dan mendemonstrasikan beberapa sifat dari gerak yang dipercepat—yang berarti gerak demikian, sedemikian rupa. . . kelajuannya terus meningkat setelah berangkat dari keadaan diam, dalam proporsionalitas sederhana ke waktu, yang sama dengan mengatakan bahwa dalam interval waktu yang sama benda menerima peningkatan kelajuan yang sama.

Galileo *mendefinisikan* gerak dipercepat menjadi jenis gerak tak seragam yang paling sederhana, yaitu, di mana kelajuan suatu objek berubah, tetapi pada tingkat yang konstan. Apakah idealisasi seperti itu relevan? Galileo de-

ngan cerdik menunjukkan bahwa penyederhanaan seperti itu pada kenyataannya menggambarkan gerak dari semua benda yang jatuh, jika seseorang mengabaikan efek luar dari benda-benda seperti hambatan udara. Penemuan ini membuka jalan bagi *Newton's Law of Gravity* atau Hukum Gravitasi Newton. Jika belum ada pengetahuan tentang keteraturan dalam gerak mendasari benda yang jatuh, kesederhanaan menetapkan suatu gaya yang proporsional dengan massa benda-benda tersebut tidak mungkin. Bahkan, untuk mencapai sejauh ini, Galileo harus mengatasi dua rintangan lain yang agak tidak relevan dengan poin yang saya buat, tetapi argumennya begitu sederhana dan pintar sehingga saya tidak bisa menolak menggambarkannya.

Aristoteles telah mengklaim bahwa benda-benda yang jatuh dengan cepat memperoleh kelajuan akhir mereka setelah dilepaskan. Ini adalah klaim yang masuk akal berdasarkan gagasan intuitif tentang apa yang kita lihat. Galileo adalah yang pertama menunjukkan dengan meyakinkan bahwa ini bukan kasusnya, menggunakan contoh yang sangat sederhana. Hal itu didasarkan pada eksperimen *gedanken* atau 'pikiran', dalam kata-kata Einstein, versi yang sedikit diperbarui yang akan saya ceritakan di sini. Bayangkan Anda menjatuhkan sepatu ke bak mandi dari 6 inci di atas air. Lalu jatuhkan dari 3 kaki (dan mundur). Jika Anda membuat asumsi sederhana bahwa ukuran percikan berhubungan dengan kecepatan sepatu ketika menyentuh air, Anda dapat dengan cepat meyakinkan diri Anda bahwa kecepatan sepatu meningkat saat jatuh.

Berikutnya adalah demonstrasi Galileo bahwa semua

benda jatuh pada tingkat yang sama, terlepas dari massa mereka, jika Anda mengabaikan efek dari hambatan udara. Sementara kebanyakan orang memikirkan ini dalam hal percobaan terkenal; menjatuhkan dua benda berbeda dari Menara Pisa yang miring, yang mungkin sebenarnya tidak pernah dilakukan, Galileo sebenarnya menyarankan eksperimen pemikiran yang jauh lebih sederhana yang menunjukkan paradoks dalam mengasumsikan bahwa benda-benda yang dua kali lebih besar jatuh dua kali lebih cepat. Bayangkan menjatuhkan dua peluru-meriam dengan massa yang persis sama dari menara. Mereka harus jatuh pada tingkat yang sama bahkan jika tingkat jatuh mereka bergantung pada massa mereka. Sekarang, ketika mereka jatuh, bayangkan bahwa pengrajin yang sangat terampil dan cepat menjangkau jendela menghubungkan mereka dengan sepotong pita yang kuat. Sekarang Anda memiliki satu objek yang massanya dua kali massa peluru-meriam. Akal sehat mengatakan kepada kita bahwa objek baru ini tidak akan tiba-tiba mulai jatuh dua kali lebih cepat daripada dua peluru-meriam yang jatuh sebelum rekaman itu ditambahkan. Dengan demikian, tingkat penurunan objek *tidak* sebanding dengan massanya.

Setelah menyingkirkan *herring-merah* ini, Galileo sekarang benar-benar siap untuk mengukur percepatan jatuhnya benda dan menunjukkan bahwa itu konstan. Ingat bahwa ini menyiratkan perubahan kecepatan pada tingkat yang konstan. Saya mengingatkan Anda bahwa dalam meletakkan fondasi di mana teori gravitasi dikembangkan di atasnya, Galileo melakukan tidak lebih dari upaya untuk menggambarkan bagaimana sesuatu jatuh, bukan menga-

pa. Ini seperti mencoba untuk belajar tentang permainan catur Feynman dengan terlebih dahulu memeriksa dengan teliti konfigurasi papan catur dan kemudian dengan hati-hati menggambarkan gerak potongan-potongan tersebut. Berulang kali sejak Galileo, kita telah menemukan bahwa deskripsi yang tepat dari 'papan permainan' di mana fenomena fisis terjadi berjalan jauh menuju kearah penjelasan tentang 'aturan' di balik fenomena tersebut. Dalam versi pamungkas ini, papan permainan menentukan aturan, dan saya akan berpendapat kemudian bahwa ini adalah persis di mana dorongan penelitian fisika modern sedang tertuju. . . namun saya ngelantur.

Galileo tidak berhenti di sini. Ia melanjutkan untuk menyelesaikan satu komplikasi utama gerak lainnya dengan menyalin apa yang telah dia lakukan. Sampai titik ini dia, dan kita, telah membahas gerak hanya dalam satu dimensi—entah jatuh atau bergerak secara horizontal. Namun, jika saya melempar bola baseball, keduanya berlaku. Lintasan baseball, sekali lagi mengabaikan hambatan udara, adalah kurva yang disebut ahli matematika parabola, bentuk *arclike*. Galileo membuktikan ini dengan melakukan ekstensi yang paling sederhana dari analisis sebelumnya. Ia menyarankan bahwa gerak dua dimensi dapat direduksi menjadi dua salinan independen dari gerak satu dimensi, yang tentu saja dia sudah jelaskan. Yakni, komponen ke bawah dari gerak bola akan dijelaskan oleh percepatan konstan yang telah dia uraikan, sedangkan komponen horizontal dari gerak akan dijelaskan oleh kelajuan seragam konstan, yang telah ia nilai semua objeknya, akan secara alami di-

pertahankan tanpa adanya gaya eksternal. Taruh keduanya bersama, dan Anda mendapatkan sebuah parabola.

Sementara ini mungkin terdengar sepele, keduanya menjelaskan seluruh fenomena yang sering dinyatakan salah dan menetapkan preseden yang telah diikuti oleh fisikawan sejak itu. Pertama, pertimbangkan lompat jauh Olimpiade, atau mungkin *dunk* Michael Jordan yang dilempar dari garis tembakan-pinalti. Ketika kita menyaksikan prestasi luar biasa ini, jelas bagi kita bahwa para atlet berada di udara untuk apa yang tampaknya abadi. Mengingat kecepatan mereka mengarah ke lompatan, berapa lama lagi mereka bisa meluncur di udara? Argumen Galileo memberikan jawaban yang mengejutkan. Dia menunjukkan bahwa gerak horizontal dan vertikal bersifat independen. Jadi, jika Carl Lewis atau bintang basket Michael Jordan melompat ke atas sambil berdiri diam, selama ia mencapai ketinggian vertikal yang sama seperti yang ia capai pada titik tengah lompatannya, ia akan tetap berada di udara *persis* dalam waktu lama. Demikian pula, menggunakan contoh yang dikhotbahkan dalam kelas fisika di seluruh dunia, sebuah peluru yang ditembakkan secara horizontal dari senapan akan menghantam tanah pada saat yang sama ketika *penny* jatuh saat pelatuknya ditarik, bahkan jika peluru itu berjalan satu mil sebelum melakukannya. Peluru hanya tampak jatuh lebih lambat karena bergerak sangat cepat sehingga pada waktu yang dibutuhkan untuk meninggalkan pandangan kita, baik itu peluru maupun uang logam tidak memiliki banyak waktu untuk benar-benar jatuh!

Keberhasilan Galileo dalam menunjukkan bahwa dua di-

mensi dapat dianggap sebagai dua salinan dari satu dimensi, sejauh menyangkut gerak, telah dirampas oleh fisikawan sejak itu. Sebagian besar fisika modern datang untuk menunjukkan bahwa masalah baru dapat dikurangi, dengan beberapa teknik atau lainnya, untuk masalah yang telah dipecahkan sebelumnya. Ini karena daftar jenis masalah yang dapat kita atasi dengan tepat mungkin dapat dihitung dengan jari dua tangan (dan mungkin beberapa jari kaki). Sebagai contoh, ketika kita hidup dalam ruang tiga dimensi, pada dasarnya tidak mungkin untuk dapat memecahkan masalah-masalah tiga dimensi yang paling lengkap, bahkan menggunakan kekuatan komputasi dari komputer tercepat. Yang dapat kita pecahkan selalu melibatkan baik secara efektif mereduksi mereka ke masalah satu atau dua dimensi yang dapat dipecahkan dengan menunjukkan bahwa beberapa aspek dari masalah itu berlebihan, atau setidaknya mereduksi mereka ke kumpulan independen dari masalah satu atau dua dimensi yang dapat dipecahkan dengan menunjukkan bahwa bagian berbeda dari masalah dapat diperlakukan secara mandiri.

Contoh prosedur ini ada di mana-mana. Saya sudah mendiskusikan gambar matahari kita, di mana kita berasumsi bahwa struktur internal sama di seluruh matahari pada jarak tetap dari pusat. Hal ini memungkinkan kita untuk mengubah bagian dalam matahari dari masalah tiga dimensi menjadi masalah satu dimensi yang efektif, yang dijelaskan sepenuhnya dalam jarak, r, dari pusat matahari. Contoh modern dari situasi di mana kita tidak mengabaikan tetapi memecahkan masalah tiga-dimensi menjadi

potongan-potongan yang lebih kecil dapat diperoleh lebih dekat dengan kita. Hukum mekanika kuantum, yang mengatur perilaku atom dan partikel yang membentuknya, telah memungkinkan kita untuk menjelaskan hukum kimia dengan menjelaskan struktur atom, yang menyusun semua materi. Atom yang paling sederhana adalah atom hidrogen, dengan hanya satu partikel bermuatan positif di pusatnya, proton, dikelilingi oleh partikel bermuatan negatif tunggal, sebuah elektron. Solusi mekanika kuantum dari perilaku bahkan sistem sederhana semacam itu cukup kaya. Elektron dapat ada dalam satu rangkaian keadaan terpisah dari energi total yang berbeda. Masing-masing 'tingkat energi' utama itu sendiri dibagi menjadi keadaan-keadaan di mana bentuk 'orbit' elektron berbeda. Semua perilaku kimia yang rumit—Bertanggung jawab kepada biologi kehidupan, di antara yang lain—mencerminkan, pada tingkat dasar, aturan penghitungan sederhana untuk jumlah keadaan yang tersedia tersebut. Unsur-unsur dengan semua kondisi ini tetapi satu dalam tingkat tertentu diisi oleh elektron seperti untuk mengikat secara kimia ke unsur-unsur yang hanya memiliki satu elektron tunggal yang menempati tingkat energi tertinggi. Garam, juga disebut natrium klorida, misalnya, ada karena natrium berbagi elektron tunggal dengan klorin, yang menggunakannya untuk mengisi satu-satunya keadaan kosong yang tidak terisi pada tingkat energi tertinggi.

Satu-satunya alasan kita telah mampu menyebutkan struktur tingkat bahkan atom yang paling sederhana seperti hidrogen adalah karena kita telah menemukan bahwa sifat tiga dimensi dari sistem ini 'terpisahkan' menjadi dua ba-

gian yang terpisah. Satu bagian melibatkan masalah satu dimensi, yang berhubungan dengan pemahaman hanya jarak radial elektron dari proton. Bagian lain melibatkan masalah dua dimensi, yang mengatur distribusi sudut elektron 'orbit' dalam atom. Kedua masalah ini diselesaikan secara terpisah dan kemudian digabungkan untuk memungkinkan kita mengklasifikasikan jumlah total keadaan atom hidrogen.

Berikut contoh yang lebih baru dan lebih eksotis, di sepanjang garis serupa. Stephen Hawking menjadi terkenal karena demonstrasi pada 1974 bahwa lubang hitam tidak benar-benar hitam—artinya, mereka memancarkan radiasi dengan karakteristik temperatur dari massa lubang hitam. Alasan penemuan ini begitu mengejutkan adalah bahwa lubang hitam dinamai demikian karena medan gravitasi di permukaannya begitu kuat sehingga tidak ada bagian dalam yang bisa lolos, bahkan cahaya. Jadi bagaimana mereka bisa memancarkan radiasi? Hawking menunjukkan bahwa, di hadapan medan gravitasi yang kuat dari lubang hitam, hukum mekanika kuantum memungkinkan hasil pemikiran klasik ini dihindarkan. Penghindaran teorema *'no go'* klasik adalah umum dalam mekanika kuantum. Sebagai contoh, dalam gambaran klasik kita tentang kenyataan, seorang pria yang berada di lembah di antara dua gunung mungkin tidak akan pernah bisa masuk ke lembah tetangga tanpa memanjat satu atau yang lain dari pegunungan tersebut. Namun, mekanika kuantum memungkinkan sebuah elektron dalam sebuah atom, katakanlah, dengan energi yang lebih kecil dari yang diperlukan untuk melepaskan diri dari atom, menurut prinsip-prinsip klasik, kadang-kadang un-

tuk 'terowongan' (*tunnel*) keluar dari dalam medan listrik yang mengikatnya, dan menemukan dirinya akhirnya bebas dari rantai sebelumnya! Contoh standar dari fenomena ini adalah peluruhan radioaktif. Di sini, konfigurasi partikel—proton dan neutron—yang terkubur jauh di dalam inti atom dapat berubah secara tiba-tiba. Bergantung pada sifat-sifat atom atau nukleus individual, mekanika kuantum memberi tahu kita bahwa adalah hal mungkin bagi satu atau lebih partikel-partikel ini untuk melepaskan diri dari nukleus, meskipun secara klasik mereka semua terikat secara tak tentu di sana. Dalam contoh lain, jika saya melempar bola ke jendela, bola akan memiliki cukup energi untuk melewatinya, atau bola akan terpental dari jendela dan kembali. Jika bola cukup kecil sehingga perilakunya diatur oleh prinsip-prinsip mekanika kuantum, bagaimanapun, semuanya berbeda. Elektron, katakanlah, menimpa penghalang tipis dapat melakukan keduanya! Dalam contoh yang lebih akrab, cahaya yang menimpa permukaan material seperti cermin biasanya dapat dipantulkan. Namun, jika cermin cukup tipis, kita menemukan bahwa meskipun sebagian besar dipantulkan, beberapa cahaya dapat 'menembus' melewati cermin dan muncul di sisi lain! (Saya akan menguraikan 'aturan' baru yang mengatur perilaku aneh ini nanti. Untuk saat ini, terimalah begitu saja.)

Hawking menunjukkan bahwa fenomena serupa dapat terjadi di dekat lubang hitam. Partikel dapat menembus penghalang gravitasi di permukaan lubang hitam dan meloloskan diri. Demonstrasi ini adalah *tour de force* karena itu adalah pertama kalinya hukum mekanika kuantum te-

lah digunakan sehubungan dengan relativitas umum untuk mengungkapkan fenomena baru. Namun, sekali lagi, itu mungkin hanya karena, seperti atom hidrogen, keadaan kuantum mekanik partikel di sekitar lubang hitam 'dapat dipisahkan'—yaitu, perhitungan tiga dimensi dapat secara efektif diubah menjadi masalah satu dimensi dan masalah dua dimensi independen. Jika bukan karena penyederhanaan ini, kita mungkin masih berada dalam kegelapan tentang lubang hitam.

Mungkin trik teknis ini begitu menarik karena mereka hanya membentuk puncak gunung es. Alasan sebenarnya kita terus mengulangi diri kita sendiri ketika kita menemukan hukum baru tidak begitu banyak karena karakter kita, atau ketiadaan, karena sifat karakter alam. Dia terus mengulangi dirinya sendiri. Karena alasan inilah kita hampir secara universal memeriksa apakah fisika baru benar-benar merupakan penemuan kembali fisika lama. Newton, dalam menemukan Hukum Gravitasi Universal, sangat diuntungkan dari pengamatan dan analisis Galileo, seperti yang telah saya jelaskan. Dia juga berutang pada serangkaian pengamatan yang cermat oleh ahli astronomi Denmark, Tycho Brahe, sebagaimana dianalisis oleh mahasiswanya Johannes Kepler—yang sezaman dengan Galileo.

Baik Brahe dan Kepler adalah karakter yang luar biasa. Brahe, dari latar belakang istimewa, menjadi astronom paling terkemuka di Eropa setelah pengamatannya tentang supernova tahun 1572. Ia diberi seluruh pulau oleh raja Denmark Raja Frederick II untuk digunakan sebagai situs observatorium, hanya saja dipaksa untuk pindah beberapa

tahun kemudian oleh penerus Frederick. Tanpa terhambat oleh, atau mungkin karena, arogansinya (dan hidung palsu yang terbuat dari logam), Brahe berhasil meningkatkan dalam satu dekade ketepatan dalam pengukuran astronomi dengan faktor 10 atas apa yang telah dipertahankannya selama seribu tahun sebelumnya—dan semua ini tanpa teleskop! Di Praha, di mana dia pergi di pengasingan dari Denmark, Brahe mengajak Kepler setahun sebelum kematiannya sendiri untuk melakukan analisis perhitungan rumit yang diperlukan untuk mengubah pengamatannya yang mendetail tentang gerak planet menjadi kosmologi yang konsisten.

Kepler berasal dari dunia lain. Seorang anak dari keluarga yang sederhana, hidupnya selalu di pinggiran, baik secara finansial maupun emosional. Selain pencarian ilmiahnya, Kepler mengalami masa di mana ia harus membela ibunya dari tuntutan sebagai penyihir dan penulis, yang barangkali merupakan novel fiksi ilmiah pertama, tentang perjalanan ke bulan. Meskipun pengalihan ini, Kepler mendekati tugas analisis data dalam buku catatan Brahe, yang diwarisinya atas kematian Brahe, dengan semangat yang tidak biasa. Tanpa bantuan Macintosh, apalagi superkomputer, ia melakukan keajaiban analisis data yang rumit yang akan menempati bagian yang lebih baik dalam karirnya. Dari tabel posisi planet yang tak berujung, ia sampai pada tiga hukum gerak planet yang terkenal yang masih menyandang namanya, dan itu memberikan petunjuk kunci yang akan digunakan Newton untuk mengungkap misteri gravitasi.

Saya telah menyebutkan salah satu Hukum Kepler se-

belumnya—yaitu, bahwa orbit planet-planet menyapu area yang sama dalam waktu yang sama—dan bagaimana Newton dapat menggunakan ini untuk menyimpulkan bahwa ada gaya yang menarik planet-planet ke arah matahari. Kita sangat nyaman dengan ide ini saat ini sehingga perlu menunjukkan betapa itu sebenarnya kontraintuitif. Selama berabad-abad sebelum Newton, diasumsikan bahwa gaya yang diperlukan untuk menjaga planet-planet bergerak di sekitar matahari harus berasal dari sesuatu yang *mendorong* mereka di sekitar. Newton cukup hanya mengandalkan Hukum Gerak Seragam Galileo untuk melihat bahwa ini tidak perlu. Memang, ia berpendapat bahwa hasil Galileo atas gerak benda yang dilemparkan di udara akan menelusuri parabola, dan bahwa kecepatan horizontal mereka akan tetap konstan, akan menyiratkan bahwa benda yang dilempar cukup cepat dapat mengorbit Bumi. Karena kelengkungan Bumi sebuah objek dapat terus 'jatuh' ke arah bumi, tetapi jika ia bergerak cukup cepat pada awalnya, gerak horizontal konstannya dapat membawanya cukup jauh sehingga dalam proses 'jatuh' ia akan terus menjaga jarak yang konstan dari permukaan bumi. Ini ditunjukkan dalam diagram (Gambar 9) yang disalin dari *Principia* Newton.

Setelah menyadari bahwa gaya yang dengan jelas menarik ke bawah menuju Bumi dapat mengakibatkan sebuah benda terus jatuh ke arahnya untuk selamanya—apa yang kita sebut orbit—itu tidak memerlukan lompatan imajinasi yang terlalu besar untuk menganggap bahwa benda-benda yang mengorbit matahari, seperti planet-planet, terus ditarik ke arah matahari, dan tidak mendorongnya. (Kebetulan,



Gambar 9: Salah satu hasil yang diperoleh oleh Newton.

itu adalah fakta bahwa benda-benda di orbit terus-menerus 'jatuh' yang bertanggung jawab atas bobot yang dialami oleh astronot. Ini tidak ada hubungannya dengan ketiadaan gravitasi, yang hampir sama kuatnya pada jarak yang biasanya dilalui oleh satelit dan angkutan seperti ini di Bumi.)

Dalam banyak kasus yang terjadi, hukum gerak planet Kepler yang lain memberikan lapisan gula pada kue. Hukum-hukum ini menghasilkan kunci kuantitatif yang membuka utama sifat tarikan gravitasi antar objek, karena memberikan hubungan matematis antara panjang setiap tahun planet—waktu yang diperlukannya untuk mengelilingi matahari dan jaraknya dari matahari. Dari hukum ini, seseorang dapat dengan mudah memperoleh bahwa kecepatan planet-planet di sekitar matahari jatuh dengan cara yang tetap dengan jarak mereka dari matahari. Secara khusus, hukum

Kepler menunjukkan bahwa kelajuan mereka berbanding terbalik dengan akar kuadrat jarak mereka dari matahari.

Dilengkapi dengan pengetahuan ini, dan generalisasi sendiri dari hasil Galileo bahwa percepatan gerak benda harus proporsional dengan gaya yang diberikan pada mereka, Newton mampu menunjukkan bahwa jika planet tertarik ke arah matahari dengan gaya yang proporsional terhadap hasil kali massa mereka dan massa matahari, dibagi dengan kuadrat jarak antar mereka, hukum kelajuan Kepler secara alami akan menghasilkan. Selain itu, ia mampu menunjukkan bahwa konstanta proporsionalitas akan persis sama dengan massa matahari dikali kekuatan gaya gravitasional. Jika besarnya gaya gravitasional antara semua benda bersifat universal, ini bisa diwakili oleh konstanta, yang sekarang kita beri label G.

Meskipun berada di luar kemampuan mengukur waktunya untuk menentukan konstanta G secara langsung, Newton tidak membutuhkan ini untuk membuktikan bahwa hukumnya benar. Dengan alasan bahwa kekuatan yang sama yang menahan planet-planet di sekitar matahari harus menahan bulan di orbit mengelilingi Bumi, ia membandingkan gerak bulan yang diprediksi di sekitar Bumi—berdasarkan ekstrapolasi percepatan benda yang diukur ke bawah di permukaan bumi dengan gerak yang terukur sebenarnya: yaitu, yang dibutuhkan sekitar 28 hari bagi bulan untuk mengorbit Bumi. Prediksi dan pengamatannya disepakati dengan sempurna. Akhirnya, fakta bahwa bulan Jupiter, yang pertama kali ditemukan Galileo dengan teleskopnya, juga mematuhi hukum gerak orbital Kepler, kali ini $vis - \acute{a} - vis$ orbitnya

di sekitar Jupiter, membuat universalitas Hukum Newton sulit dipertanyakan.

Sekarang, saya menyebutkan cerita ini bukan hanya untuk mengulangi bagaimana pengamatan semata tentang bagaimana benda-benda bergerak—dalam hal ini, planet-planet—mengarah pada pemahaman tentang mengapa mereka bergerak. Sebaliknya, ini adalah untuk menunjukkan kepada Anda bagaimana kita dapat memanfaatkan hasil ini bahkan dalam penelitian modern. Saya mulai dengan preseden elok yang diciptakan oleh ilmuwan Inggris Henry Cavendish, sekitar 150 tahun setelah Newton menemukan Hukum Gravitasi.

Ketika saya lulus dan menjadi rekan postdoctoral di Harvard University, saya dengan cepat mendapat pelajaran berharga di sana: Sebelum menulis makalah ilmiah, penting untuk membuat judul yang menarik. Saya pikir pada saat ini adalah penemuan baru dalam sains, tetapi saya telah belajar bahwa itu memiliki tradisi yang berbeda, akan kembali setidaknya sejauh Cavendish pada 1798.

Cavendish dikenang karena melakukan percobaan pertama yang langsung mengukur di laboratorium tarik-menarik gravitasional antara dua massa yang diketahui, sehingga memungkinkan dia untuk mengukur, untuk pertama kalinya, kekuatan gravitasi dan menentukan nilai G. Dalam melaporkan hasilnya kepada Royal Society dia tidak memberikan makalahnya *"On Measuring the Strength of Gravity"* atau *"A Determination of Newton's Constant G."* Tidak, dia menyebutnya *"Weighing the Earth."*

Ada alasan bagus untuk judul seksi ini. Pada saat ini Hu-

kum Gravitasi Newton diterima secara universal, dan begitu pula premis bahwa gaya gravitasi ini bertanggung jawab atas gerak bulan yang diamati di sekeliling Bumi. Dengan mengukur jarak ke bulan (yang mudah dilakukan, bahkan pada abad ketujuh belas, dengan mengamati perubahan sudut bulan sehubungan dengan cakrawala ketika diamati pada waktu yang sama dari dua lokasi yang berbeda—teknik surveyor yang sama menggunakan saat mengukur jarak di Bumi), dan mengetahui periode orbit bulan—sekitar 28 hari—seseorang dapat dengan mudah menghitung kelajuan bulan di sekitar Bumi. Izinkan saya menegaskan kembali bahwa keberhasilan besar Newton tidak hanya melibatkan penjelasannya tentang Hukum Kepler bahwa kelajuan benda yang mengorbit matahari berbanding terbalik dengan akar kuadrat jaraknya dari matahari. Dia juga menunjukkan bahwa hukum yang sama ini dapat berlaku untuk gerak bulan dan benda jatuh di permukaan Bumi. Hukum Gravitasi-nya menyiratkan bahwa konstanta proporsionalitas sama dengan produk G kali massa matahari dalam kasus sebelumnya, dan G kali massa Bumi pada yang terakhir. (Dia tidak pernah benar-benar membuktikan bahwa nilai G dalam dua kasus, pada kenyataannya, sama. Ini adalah prediksi, berdasarkan asumsi kesederhanaan dan pada pengamatan eksperimental bahwa nilai G tampaknya sama untuk objek jatuh di permukaan Bumi seperti untuk bulan, dan bahwa nilai G yang diterapkan ke planet-planet yang mengorbit matahari tampak seragam untuk semua planet ini. Jadi, ekstrapolasi sederhana menyarankan bahwa nilai tunggal G mungkin cukup untuk semuanya.)

Bagaimanapun juga, dengan mengetahui jarak bulan dari Bumi, dan kelajuan bulan di sekeliling Bumi, Anda bisa memasukkan Hukum Newton dan menentukan *produk* G kali massa Bumi. Sampai Anda mengetahui secara independen nilai G, bagaimanapun, Anda tidak dapat mengekstrak dari massa Bumi ini. Dengan demikian, Cavendish, yang merupakan orang pertama yang menentukan nilai G, 150 tahun setelah Newton mengusulkannya, juga yang pertama yang dapat menentukan massa Bumi. (Yang terakhir terdengar jauh lebih menarik, dan begitu judul artikelnya.)

Kita telah mendapatkan manfaat tidak hanya dari pengakuan cerdas Cavendish tentang nilai pers yang baik tetapi juga dari teknik yang ia awali untuk menimbang Bumi dengan mendorong Hukum Newton sejauh yang dia bisa. Ia tetap digunakan hari ini. Pengukuran terbaik kita terhadap massa matahari berasal dari prosedur yang persis sama, menggunakan jarak yang diketahui dan kecepatan orbit masing-masing planet. Kenyataannya, prosedur ini sangat baik sehingga pada prinsipnya kita bisa mengukur massa matahari menjadi satu bagian dalam sejuta, berdasarkan data planet yang ada. Sayangnya, konstanta Newton G adalah konstanta fundamental terukur termiskin di alam. Kita tahu itu hanya keakuratan 1 bagian dalam 100.000 atau lebih. Jadi, pengetahuan kita tentang massa matahari terbatas pada akurasi ini.

Kebetulan, tidak hanya ketidakpastian kita tentang kekuatan gravitasi yang tepat membatasi kemampuan kita untuk mengukur massa matahari, itu juga membatasi kemampuan kita untuk menyelidiki skala terkecil dan terbesar

di alam semesta. Karena, seperti yang akan kita lihat, ternyata pada skala kecil, kurang dari sekitar satu juta inci, kita tidak memiliki penyelidikan langsung bahwa gravitasi berperilaku seperti yang dijelaskan Newton, dan apakah penyimpangan dari hukum gravitasi Newton mungkin ada pada skala ini. yang dapat menjelaskan kemungkinan keberadaan dimensi ekstra, di luar tiga dimensi ruang yang kita kenal dan cintai.

Namun demikian ketika Anda memiliki hal yang baik, jangan berhenti. Matahari kita (dan dengan demikian tata surya kita) mengorbit di sekitar tepi luar galaksi Bimasakti, sehingga kita dapat menggunakan jarak matahari yang diketahui dari pusat galaksi (sekitar 25.000 tahun cahaya) dan kecepatan orbitalnya yang diketahui (sekitar 150 mil / detik), untuk 'menimbang' galaksi. Ketika kita melakukan ini, kita menemukan bahwa massa material yang dilingkari oleh orbit kita bersesuaian dengan sekitar seratus miliar massa matahari. Ini menggembirakan, karena cahaya total yang dipancarkan oleh galaksi kita kira-kira setara dengan yang dipancarkan oleh sekitar seratus miliar bintang kurang lebih seperti Matahari kita. (Kedua pengamatan ini memberikan alasan untuk pernyataan saya sebelumnya bahwa ada sekitar seratus miliar bintang di galaksi kita.)

Suatu hal yang luar biasa terjadi ketika kita mencoba memperluas pengukuran ini dengan mengamati kecepatan benda yang terletak lebih jauh dan lebih jauh lagi dari pusat galaksi kita. Alih-alih jatuh, sebagaimana seharusnya jika semua massa galaksi kita terkonsentrasi di wilayah di mana bintang-bintang yang diamati, kecepatan ini tetap konstan.

Ini menunjukkan bahwa, sebaliknya, ada lebih banyak massa yang terletak di luar wilayah tempat bintang-bintang bersinar. Bahkan, perkiraan saat ini menunjukkan bahwa ada setidaknya sepuluh kali lebih banyak benda di luar sana daripada yang terlihat! Selain itu, pengamatan serupa tentang gerak bintang di galaksi lain semuanya menunjukkan hal yang sama. Memperluas Hukum Newton lebih lanjut untuk menggunakan gerak galaksi yang diamati sendiri di tengah kelompok dan klaster galaksi menegaskan gagasan ini. Ketika kita menggunakan Hukum Newton untuk menimbang alam semesta, kita menemukan bahwa setidaknya 90 persen materi di dalamnya adalah 'gelap'.

Pengamatan bahwa kerumunan massa (*clusstere mass*) di alam semesta tampaknya didominasi oleh apa yang kita sebut *materi gelap* berada di jantung salah satu misteri yang paling menarik dan secara aktif dikejar dalam fisika modern. Itu akan membutuhkan seluruh buku untuk menggambarkan secara memadai upaya untuk menentukan apa hal ini mungkin (dan, kebetulan, saya sudah menulis satu). Namun, di sini, saya hanya ingin membuat Anda menyadarinya dan untuk menunjukkan bahwa masalah penelitian yang sangat modern ini berasal dari pemanfaatan analisis yang persis sama seperti yang digunakan Cavendish selama dua abad yang lalu untuk menimbang Bumi untuk pertama kalinya.

Pada titik ini, Anda mungkin tergoda untuk bertanya mengapa kita yakin kita dapat mendorong Hukum Newton sejauh ini. Apalagi, kebutuhan akan sumber baru materi nonluminous untuk mengisi alam semesta itu mengandaikan

banyak pertanyaan. Mengapa tidak berasumsi bahwa Hukum Gravitasi Newton tidak berlaku pada skala galaksi dan lebih besar? Sementara pada kenyataannya beberapa fisikawan telah mengajukan secara tepat kemungkinan itu, saya harap argumen saya sampai titik ini akan membantu membuatnya lebih bisa dimengerti mengapa fisikawan percaya bahwa mempostulatkan alam semesta yang dipenuhi materi gelap lebih konservatif daripada membuang Hukum Newton. Gravitasi Newton telah bekerja dengan sempurna sejauh ini untuk menjelaskan gerak harfiah di bawah matahari. Kita tidak memiliki alasan untuk percaya bahwa itu mungkin tidak berlaku untuk skala yang lebih besar. Selain itu, ada tradisi yang berbeda dalam mengatasi tantangan lain yang mungkin terjadi terhadap Hukum Newton. Sebagai contoh, setelah planet Uranus ditemukan, diakui bahwa gerak benda ini, objek terjauh dari matahari di tata surya kita yang diketahui pada saat itu, tidak dapat dipertanggungjawabkan oleh gravitasi Newton berdasarkan daya tarik matahari dan planet lainnya. Mungkinkah ini merupakan petunjuk pertama kehancuran Hukum Universal? Ya, tetapi lebih mudah untuk menganggap bahwa gerak yang diamati mungkin dipengaruhi oleh beberapa objek 'gelap' yang belum teramati. Perhitungan cermat menggunakan Hukum Newton yang dilakukan pada abad kedelapan belas menunjuk di mana objek tersebut mungkin berada. Ketika teleskop diarahkan ke wilayah ini, planet Neptunus seketika ditemukan. Pengamatan serupa dari gerak Neptunus menyebabkan penemuan tak sengaja Pluto pada tahun 1930.

Contoh yang lebih awal menunjukkan kegunaan melekat

dengan hukum yang berkerja. Sering menghadapi tantangan nyata terhadap hukum semacam itu dapat mengarah pada penemuan-penemuan fisis baru yang menarik yang tidak secara langsung terkait dengan hukum itu sendiri. Misalnya, pada abad ke-17, astronom Denmark, Ole Roemer mengamati gerak bulan-bulan Jupiter dan menemukan fakta yang aneh. Pada waktu tertentu dalam setahun, bulan muncul kembali dari belakang Jupiter sekitar empat menit lebih awal dari yang diharapkan dari penerapan Hukum Newton secara langsung. Enam bulan kemudian, bulan-bulan itu terlambat empat menit. Roemer menyimpulkan bahwa ini bukan kegagalan Hukum Newton, tetapi lebih merupakan indikasi fakta bahwa cahaya berjalan pada kelajuan berhingga. Anda mungkin ingat bahwa cahaya melintasi jarak antara Bumi dan matahari dalam waktu sekitar delapan menit. Dengan demikian, pada satu waktu dalam setahun, Bumi adalah delapan 'cahaya-menit' lebih dekat ke Jupiter daripada ketika ia berada di sisi lain dari orbitnya mengelilingi matahari. Ini menjelaskan perbedaan delapan menit dalam menentukan waktu orbit bulan-bulan Jupiter. Dengan cara ini, Roemer sebenarnya mampu memperkirakan kecepatan cahaya secara akurat, lebih dari 200 tahun sebelum diukur secara langsung.

Jadi, sementara kita tidak tahu bahwa kita dapat terus menimbang daerah yang lebih besar dan lebih besar dari alam semesta karena kita telah menimbang Bumi dan matahari, melakukannya adalah taruhan terbaik. Ini juga menawarkan harapan terbesar untuk kemajuan. Pengamatan definitif tunggal mungkin cukup untuk menyanggah

teori dalam fisika. Tetapi gerak mengamati benda-benda di galaksi kita dan galaksi lain bukanlah pengujian yang pasti. Hal ini dapat dijelaskan oleh keberadaan materi gelap, yang sekarang memiliki dukungan konkruen yang datang dari sejumlah argumen independen tentang pembentukan struktur berskala besar di alam semesta. Pengamatan lebih lanjut akan memberi tahu kita apakah kegetolan kita telah terbentuk dengan baik, dan dengan demikian kita dapat menemukan terbuat dari apa sebagian besar alam semesta ini.

Saya menerima banyak surat setelah menulis buku tentang materi gelap dari orang-orang yang yakin bahwa pengamatan yang saya jelaskan memberikan dukungan definitif untuk teori-teori baru mereka yang berani, yang mereka klaim 'profesional' telah terlalu berpikiran sempit untuk dipertimbangkan. Saya berharap saya dapat meyakinkan mereka bahwa keterbukaan pikiran dalam fisika melibatkan kesetiaan yang mati-matian terhadap ide-ide yang terbukti dengan baik sampai ada bukti yang pasti bahwa mereka harus dilampaui. Sebagian besar revolusi vital di abad ini tidak didasarkan pada penyingkiran gagasan lama seperti pada upaya untuk mengakomodasi mereka dan menggunakan kebijaksanaan yang dihasilkan untuk menghadapi teka-teki eksperimental atau teoretis yang ada. Dalam kata-kata Feynman lagi, ia adalah salah satu fisikawan paling orisinal pada zaman kita: "Kreativitas ilmiah adalah imajinasi dalam baju ketat."[14]

Anggaplah revolusi yang mungkin paling terkenal da-

[14] Feynman, *The Character of Physical Law.*

lam fisika pada abad ini: bangunan teori relativitas khusus Einstein. Meskipun tidak dapat disangkal bahwa hasil relativitas khusus adalah untuk memaksa revisi total dalam pengertian kita tentang ruang dan waktu, asal usul gagasan ini adalah upaya yang kurang ambisius untuk membuat dua hukum fisika yang konsisten. Faktanya, seluruh dorongan analisis Einstein adalah upaya untuk mengolah fisika modern menjadi cetakan yang akan mengakomodasi prinsip relativitas Galileo, yang dikembangkan sekitar tiga ratus tahun sebelumnya. Dilihat dengan cara ini, logika di balik teori Einstein dapat dibingkai cukup sederhana. Galileo berpendapat bahwa keberadaan gerak seragam mengharuskan hukum fisika, yang diukur oleh pengamat yang bergerak seragam—termasuk yang berdiri diam—harus identik. Ini menyiratkan hasil yang mengejutkan: Tidak mungkin melakukan eksperimen apa pun yang membuktikan secara pasti bahwa Anda sedang diam. Setiap pengamat yang bergerak dengan kecepatan konstan terhadap pengamat lain dapat mengklaim bahwa dia sedang diam dan yang lainnya bergerak. Tidak ada eksperimen yang dapat berlaku yang membedakan mana yang bergerak. Kita semua memiliki pengalaman ini. Ketika Anda melihat kereta di trek berikutnya dari yang Anda naiki saat berangkat, terkadang sulit untuk mengatakan pada awalnya kereta mana yang bergerak. (Tentu saja, jika Anda bepergian dengan kereta api di Amerika Serikat, dengan cepat menjadi mudah. Tunggu saja untuk merasakan gundukan.)

Barangkali dalam perkembangan utama fisika abad kesembilan belas, James Clerk Maxwell, fisikawan teoretis

terkemuka pada masanya, meletakkan sentuhan akhir pada teori elektromagnetik yang lengkap, yang menjelaskan secara konsisten semua fenomena fisis yang sekarang mengatur kehidupan kita—dari asal-usul arus listrik ke hukum di balik generator dan motor. Mahkota kemuliaan teori ini adalah bahwa ia 'memperkirakan' bahwa cahaya harus ada, seperti yang akan saya jelaskan.

Pekerjaan fisikawan lain di bagian awal abad kesembilan belas, khususnya, ilmuwan Inggris Michael Faraday—seorang mantan anak magang di penjilidan buku yang naik menjadi direktur pusat ilmu pengetahuan Inggris, *Royal Institution*—telah membangun hubungan yang luar biasa antara gaya listrik dan gaya magnetik. Pada awal abad ini, tampak bahwa kedua gaya ini, yang dikenal baik oleh para filsuf kealaman, berbeda. Memang, pada pandangan pertama, mereka demikian. Magnet, misalnya, selalu memiliki dua 'kutub', utara dan selatan. Kutub utara menarik kutub selatan dan sebaliknya. Jika Anda memotong magnet menjadi dua, Anda tidak menghasilkan kutub utara atau selatan yang terisolasi satu sama lain. Anda menghasilkan dua magnet baru yang lebih kecil, yang masing-masing memiliki dua kutub. Muatan listrik, di sisi lain, datang dalam dua jenis, bernama positif dan negatif oleh Ben Franklin. Muatan negatif menarik yang positif dan sebaliknya. Namun, tidak seperti magnet, muatan positif dan negatif dapat dengan mudah diisolasi.

Selama paruh pertama abad ini, koneksi baru antara listrik dan magnet mulai muncul. Pertama, diyakini bahwa medan magnet, yaitu magnet, dapat dibuat dengan memin-

dahkan muatan listrik, yaitu arus. Selanjutnya ditunjukkan bahwa magnet akan membelokkan gerak muatan listrik yang bergerak. Dalam kejutan yang jauh lebih besar, itu ditunjukkan (oleh Faraday dan, secara independen, oleh fisikawan Amerika Joseph Henry) bahwa magnet yang bergerak dapat benar-benar menciptakan medan listrik dan menyebabkan arus mengalir.

Ada cerita menarik terkait dengan yang terakhir, yang tidak dapat saya abaikan begitu saja (terutama dalam masa perdebatan politik tentang pendanaan proyek-proyek seperti Supercollider Superkonduktor, yang akan saya bicarakan nanti). Faraday, sebagai direktur *Royal Institution*, sedang melakukan penelitian 'murni'—yakni, ia berusaha untuk menemukan sifat fundamental dari gaya listrik dan magnet, tidak perlu dalam mencari kemungkinan penerapan teknologi. (Ini mungkin sebelum era di mana perbedaan seperti itu signifikan, dalam hal apapun.) Pada kenyataannya, bagaimanapun, pada dasarnya semua teknologi modern dimungkinkan karena penelitian ini: prinsip di balik semua gaya listrik yang dihasilkan hari ini, prinsip di balik konsep motor listrik, dan seterusnya. Selama masa jabatan Faraday sebagai direktur *Royal Institution*, laboratoriumnya dikunjungi oleh Perdana Menteri Inggris, yang mengeluhkan penelitian abstrak ini dan bertanya-tanya apakah ada gunanya sama sekali dalam *gimmick* yang sedang dibangun di lab ini. Faraday segera menjawab bahwa hasil ini sangat penting, sangat penting bahwa suatu hari pemerintahan Yang Mulia akan memajaki mereka! Dia benar.

Kembali ke titik sejarah ini, pada pertengahan abad

kesembilan belas sudah jelas bahwa ada beberapa hubungan mendasar antara listrik dan magnet, tetapi belum ada gambaran terpadu dari fenomena ini yang tersedia. Adalah Maxwell yang berkontribusi besar menyatukan gaya listrik dan magnet menjadi satu teori—untuk menunjukkan bahwa kedua gaya yang berbeda ini benar-benar merupakan sisi yang berbeda dari koin yang sama. Secara khusus, Maxwell memperluas hasil sebelumnya untuk berdebat secara umum bahwa setiap medan listrik yang berubah akan menciptakan medan magnet, dan, pada gilirannya, setiap medan magnet yang berubah akan menciptakan medan listrik. Jadi, misalnya, jika Anda mengukur muatan listrik saat diam, Anda akan mengukur medan listrik. Jika Anda melewati muatan yang sama, Anda juga akan mengukur medan magnet. Yang Anda lihat tergantung pada keadaan gerak Anda. Medan listrik seseorang adalah medan magnet orang lain. Mereka benar-benar hanya aspek yang berbeda dari hal yang sama!

Semenarik hasil ini untuk filsafat alam, ada konsekuensi lain yang mungkin lebih signifikan. Jika saya goncangkan muatan listrik naik dan turun, saya akan menghasilkan medan magnet karena gerak dari muatan yang berubah. Jika gerak muatan itu sendiri terus berubah, saya sebenarnya akan menghasilkan medan magnet yang berubah. Medan magnet yang berubah ini akan menghasilkan medan listrik yang berubah, yang pada gilirannya akan menghasilkan medan magnet yang berubah, dan seterusnya. Gangguan 'elektromagnetik', atau gelombang, akan bergerak keluar. Ini adalah hasil yang luar biasa. Yang lebih luar biasa mungkin adalah fakta bahwa Maxwell dapat menghitung,

berdasarkan pada kekuatan yang terukur secara murni dari gaya listrik dan magnetik antara muatan yang statis dan yang bergerak, seberapa cepat gangguan ini harus bergerak. Hasilnya? Gelombang medan listrik dan magnet yang bergerak harus menyebar pada kelajuan yang sama dengan perjalanan cahaya. Tidak mengherankan, pada kenyataannya, ternyata bahwa cahaya tidak lebih dari gelombang elektromagnetik, yang kelajuannya tetap dalam bentuk dua konstanta fundamental di alam: kekuatan gaya listrik antara partikel bermuatan dan kekuatan gaya magnetik antara magnet.

Saya tidak dapat melebih-lebihkan seberapa signifikan perkembangan ini untuk fisika. Sifat cahaya telah memainkan peran dalam seluruh perkembangan utama fisika di abad ini. Untuk saat ini saya ingin fokus hanya pada satu. Einstein, tentu saja, akrab dengan hasil-hasil Maxwell tentang elektromagnetik. Untuk pujiannya yang besar, ia juga mengakui dengan jelas bahwa mereka menyiratkan suatu paradoks mendasar yang dapat menggeser gagasan relativitas Galileo.

Galileo mengatakan kepada kita bahwa hukum fisika harus independen dari posisi seseorang yang mengukurnya, selama Anda berada dalam keadaan gerak seragam. Jadi, misalnya, dua pengamat yang berbeda, satu di laboratorium di atas perahu yang mengapung pada kecepatan konstan di hilir dan satu di laboratorium yang dipasang di pantai, harus mengukur kekuatan gaya listrik antara muatan listrik tetap yang berjarak 1 meter terpisah di laboratorium mereka masing-masing menjadi persis sama. Demikian pula, gaya

antara dua magnet terpisah sejauh 1 meter harus diukur sama-sama bebas dalam pengukuran di laboratorium.

Di sisi lain, Maxwell mengatakan kepada kita bahwa jika kita gerakkan muatan naik dan turun, kita akan selalu menghasilkan gelombang elektromagnetik yang bergerak menjauh dari kita dengan kelajuan yang ditetapkan oleh hukum elektromagnetik. Jadi, seorang pengamat di kapal yang menggerakkan muatan akan melihat gelombang elektromagnetik bergerak dengan kelajuan ini. Demikian pula, seorang pengamat di tanah yang menggerakkan muatan akan menghasilkan gelombang elektromagnetik yang bergerak menjauh dari dia pada kelajuan ini. Satu-satunya cara kedua pernyataan ini bisa konsisten adalah jika pengamat di tanah mengukur gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh pengamat di perahu untuk memiliki kecepatan yang berbeda dari gelombang yang dia hasilkan di tanah.

Tapi, seperti yang disadari Einstein, ada masalah dengan ini. Katakanlah saya 'menunggang kuda' di samping gelombang cahaya, usulnya, hampir pada kelajuan gelombang ini. Saya membayangkan diri saya sedang berhenti (diam), dan ketika saya melihat suatu tempat yang tetap di sebelah saya, yang mendapati gelombang elektromagnetik berjalan lambat di atasnya, saya melihat medan listrik dan magnet yang berubah di tempat itu. Maxwell mengatakan kepada saya bahwa bidang-bidang yang berubah ini harus menghasilkan gelombang elektromagnetik yang bergerak keluar dengan kelajuan yang ditentukan oleh hukum fisika, tetapi yang saya lihat hanyalah gelombang yang bergerak perlahan melewati saya.

Jadi Einstein dihadapkan pada masalah nyata berikut ini. Baik menyerahkan prinsip relativitas, yang tampaknya memungkinkan fisika dengan mengatakan bahwa hukum fisika tidak bergantung di mana Anda mengukurnya, selama Anda berada dalam keadaan gerak seragam; atau menyerahkan teori elektromagnetik dan gelombang elektromagnetik Maxwell yang elok. Dalam sebuah langkah yang benar-benar revolusioner, dia memilih untuk tidak menyerah. Sebaliknya, mengetahui bahwa ide-ide fundamental ini terlalu masuk akal untuk menjadi tidak benar, ia membuat keputusan yang berani bahwa, sebaliknya, orang harus mempertimbangkan mengubah pengertian tentang ruang dan waktu sendiri untuk melihat apakah dua persyaratan yang tampaknya bertentangan ini dapat dipenuhi pada saat yang bersamaan.

Solusinya sangat sederhana. Satu-satunya cara agar Galileo dan Maxwell bisa benar pada saat yang sama adalah jika kedua pengamat mengukur kelajuan gelombang elektromagnetik yang mereka hasilkan sebagai nilai yang diprediksi oleh Maxwell, dan jika mereka juga mengukur kecepatan gelombang yang dihasilkan oleh rekan mereka *juga* memiliki kelajuan yang sama ini. Jadi, ini pasti yang terjadi!

Persyaratan yang satu ini mungkin tidak terdengar aneh, tetapi pikirkan sejenak tentang apa yang disarankannya. Jika saya melihat seorang anak dalam mobil yang bergerak melewati saya melempar sesuatu, saya akan mengukur kelajuan lemparan terhadap saya untuk menjadi kecepatan mobil, katakanlah, 60 mil per jam, ditambah kelajuan lemparan terhadap mobil, katakanlah, 5 kaki per detik. Sang

ibu di kursi depan mobil, bagaimanapun, akan mengukur kelajuan lemparan terhadap dia untuk menjadi yang terakhir, 5 kaki per detik. Namun, jika alih-alih lemparan, anak menyinari sinar laser pada ibunya, Einstein mengatakan hasilnya akan berbeda. Relativitas khusus tampaknya mengharuskan saya mengukur kelajuan sinar cahaya terhadap saya sebagai kelajuan yang dihitung Maxwell, bukan kelajuan ini ditambah 60 mil per jam. Demikian pula, ibu anak juga akan mengukur kelajuan yang sama.

Satu-satunya cara yang mungkin adalah jika entah bagaimana pengukuran ruang dan waktu kita 'menyesuaikan diri' sehingga kita berdua mengukur kelajuan yang sama. Bagaimanapun, kelajuan diukur dengan menentukan seberapa jauh sesuatu bergerak dalam interval waktu yang tetap. Jika salah satu pengaturan di dalam mobil digunakan untuk mengukur 'penyusutan' jarak terhadap saya, atau jam yang terukur untuk mengukur waktu berjalan perlahan-lahan terhadap saya, maka akan mungkin bagi kita berdua untuk mencatat kelajuan yang sama untuk sinar cahaya. Faktanya, teori Einstein mengatakan bahwa keduanya terjadi! Selain itu, ia menyatakan bahwa segala sesuatunya sangat timbal balik. Yaitu, sejauh wanita di dalam mobil khawatir, pengaturan saya 'menyusut' terhadap dia dan jam saya berjalan lambat!

Pernyataan-pernyataan ini terdengar sangat absurd sehingga tidak ada yang percaya pada pembacaan pertama. Bahkan, diperlukan analisis yang jauh lebih rinci untuk menyelidiki sepenuhnya semua implikasi dari klaim Einstein bahwa kelajuan cahaya harus diukur agar sama untuk semua

pengamat dan untuk memilah semua paradoks yang terlihat. Diantara implikasi ini adalah fakta yang *diukur sekarang* bahwa jam yang bergerak melambat, bahwa partikel yang bergerak tampak lebih masif, dan bahwa kecepatan cahaya adalah batas kelajuan tertinggi—tidak ada benda yang dapat bergerak lebih cepat. Ini mengikuti secara logis dari pernyataan pertama. Sementara Einstein tidak diragukan lagi pantas mendapat penghargaan karena keberanian dan ketabahannya untuk menindaklanjuti semua konsekuensi ini, tugas yang sangat sulit muncul dengan klaimnya tentang keteguhan cahaya pada awalnya. Ini adalah kesaksian keberanian dan kreativitasnya bukan karena dia memilih untuk membuang hukum yang ada yang jelas berhasil, tetapi lebih karena dia menemukan cara kreatif untuk hidup dalam kerangka mereka. Sangat kreatif, sebenarnya, kedengarannya gila.

Di bab selanjutnya, saya akan kembali ke cara melihat teori Einstein sehingga tampak kurang gila. Untuk saat ini, bagaimanapun, saya ingin meninggalkan ini sebagai pengingat bagi siapa saja yang ingin menggunakan klaim bahwa "mereka mengatakan Einstein juga gila!" Untuk memvalidasi ide-idenya sendiri: Apa yang sebenarnya tidak dilakukan Einstein adalah mengklaim bahwa hukum fisika yang terbukti yang mendahuluinya itu salah. Sebaliknya, ia menunjukkan bahwa mereka menyiratkan sesuatu yang belum pernah dihargai sebelumnya.

Teori relativitas khusus, bersama dengan mekanika kuantum, memaksakan revisi dalam gambaran intuitif kita tentang realitas secara lebih mendalam daripada perkem-

bangan lain di abad ke-20. Di antara mereka berdua, mereka mengguncang fondasi dari apa yang biasanya kita anggap wajar dengan mengubah cara kita memahami pilar-pilar persepsi kita: ruang, waktu, dan materi. Untuk sebagian besar, sisa abad ini telah terlibat dengan kemunculannya untuk mengatasi implikasi dari perubahan ini. Ini kadang-kadang diperlukan seperti banyak asumsi dan kepatuhan terhadap prinsip-prinsip fisika terbukti seperti yang diperlukan untuk mengembangkan teori itu sendiri. Berikut adalah kasus yang terkait dengan perkawinan mekanika kuantum yang halus dengan relativitas khusus yang saya singgung dalam diskusi saya tentang pertemuan Shelter Island: penciptaan pasangan partikel-antipartikel dari nol.

Meskipun saya telah menyebutkan mekanika kuantum beberapa kali, saya belum membahas prinsip-prinsipnya dalam berbagai hal lebih detail, dan ada alasan bagus untuk ini. Jalan menuju penemuannya jauh lebih tidak langsung dari pada relativitas, dan juga fenomena yang diaplikasikannya—pada ranah fisika atom dan subatomik—kurang familiar. Namun demikian, seperti debu mengendap, kita sekarang mengakui bahwa mekanika kuantum, juga, berasal dari sesuatu yang tunggal, pernyataan tegas sederhana—yang juga tampak gila. Jika saya melempar bola ke udara dan anjing saya menangkapnya sejauh 20 kaki, saya dapat menonton bola selama perjalanannya dan memeriksa bahwa lintasannya mengikuti yang diprediksi oleh mekanika Galileo. Namun, karena skala jarak dan waktu perjalanan semakin kecil, kepastian ini perlahan menghilang. Hukum mekanika kuantum menyatakan bahwa jika suatu objek ber-

gerak dari A ke B, Anda tidak dapat menegaskan bahwa itu pasti melintasi titik tertentu di antara keduanya!

Reaksi alami seseorang terhadap klaim ini adalah bahwa hal itu segera dapat direalisasikan. Saya bisa menyinari objek dan melihat ke mana pun itu pergi! Jika Anda melakukan penyinaran dengan 'cahaya' antara A dan B, Anda dapat mendeteksi objek, katakanlah elektron, pada titik tertentu, C, di antara keduanya. Sebagai contoh, jika serangkaian detektor elektron diatur sepanjang garis yang memisahkan A dan B, hanya satu dari mereka yang akan mengklik ketika partikel lewat.

Jadi apa yang terjadi pada pernyataan asli jika saya ternyata bisa dengan mudah menyangkalnya? Nah, alam itu subtil. Saya pasti bisa mendeteksi jalannya partikel seperti elektron, tetapi saya tidak bisa melakukannya dengan impunitas! Jika, misalnya, saya mengirim seberkas elektron ke arah layar pendar, seperti layar TV, mereka akan menerangi area layar saat mereka menabraknya. Saya kemudian dapat memasang penghalang di jalan ke layar dengan dua celah sempit terdekat di jalan yang dilalui sinar (elektron), sehingga elektron harus melalui satu atau yang lain untuk membuatnya tampil di layar. Untuk mengatakan yang mana setiap elektron yang lewat, saya dapat mengatur detektor di setiap celah. Hal yang paling luar biasa kemudian terjadi. Jika saya tidak mengukur elektron saat mereka melewati celah, saya melihat satu pola di layar. Jika saya mengukurnya satu per satu, jadi saya bisa memastikan lintasan yang diperlukan masing-masing, pola yang saya lihat di layar berubah. Melakukan pengukuran akan mengubah hasilnya!

Jadi, sementara saya yakin dapat menyatakan bahwa setiap elektron yang saya deteksi benar-benar melewati salah satu celah, dari ini saya tidak dapat membuat kesimpulan apa pun tentang elektron yang saya *tidak* deteksi, yang jelas memiliki perilaku yang berbeda.

Perilaku seperti ini didasarkan pada kenyataan bahwa pada tingkat fundamental tertentu hukum mekanika kuantum memerlukan ketidakpastian intrinsik dalam pengukuran proses alam. Sebagai contoh, ada batas mutlak pada kemampuan kita untuk mengukur posisi partikel yang bergerak dan pada saat yang sama untuk mengetahui kelajuannya (dan karenanya kemana ia pergi). Semakin akurat saya mengukur salah satu, semakin tidak akurat saya bisa mengetahui yang lain. Tindakan pengukuran, karena mengganggu sistem, mengubahnya. Pada skala manusia normal, gangguan semacam itu sangat kecil hingga tidak diperhatikan. Tetapi dalam skala atom, mereka bisa menjadi penting. Mekanika kuantum mendapatkan namanya karena didasarkan pada gagasan bahwa energi tidak dapat diangkut dalam jumlah kecil dengan seenaknya, tetapi sebagai gantinya datang dalam beberapa 'paket' terkecil atau *quanta* (dari Jerman). Paket terkecil ini sebanding dengan energi partikel dalam sistem atom, dan jadi ketika kita mencoba untuk mengukur partikel-partikel seperti itu, kita selalu harus melakukannya dengan membiarkan beberapa sinyal ditransfer yang urutan besarnya sama dengan energi awal mereka. Setelah proses transfer tersebut, energi sistem akan diubah, dan begitu juga gerak partikel yang terlibat. Jika saya mengukur sistem dalam jangka waktu yang sangat lama, energi

rata-rata sistem akan tetap konstan, bahkan jika ia berubah secara tiba-tiba dari waktu ke waktu selama proses pengukuran. Dengan demikian, seseorang tiba pada 'hubungan ketidakpastian' terkenal lainnya: Semakin akurat saya ingin mengukur energi suatu sistem, semakin lama saya harus mengukurnya.

Hubungan ketidakpastian ini membentuk jantung dari perilaku mekanika kuantum. Mereka pertama kali dijelaskan oleh fisikawan Jerman Werner Heisenberg, salah satu pendiri teori mekanika kuantum. Heisenberg, sebagaimana bocah lain yang bertanya-tanya terlibat dalam pengembangan teori ini selama tahun 1920-an dan 1930-an, adalah seorang fisikawan yang luar biasa. Beberapa rekan saya bersikeras bahwa dia adalah yang kedua setelah Einstein dalam pengaruhnya terhadap fisika di abad ini. Sayangnya, reputasi Heisenberg yang populer saat ini agak ternoda karena dia tetap menjadi tokoh ilmiah terkemuka bahkan selama masa Nazi Jerman. Sama sekali tidak jelas bahwa dia secara terbuka mendukung rezim Nazi atau upaya perangnya. Tapi, tidak seperti sejumlah rekannya, dia tidak aktif menentangnya. Bagaimanapun, karyanya pada mekanika kuantum—khususnya, penjelasannya tentang prinsip ketidakpastian—berubah selamanya dalam cara kita memahami dunia fisis. Selain itu, mungkin tidak ada hasil fisika pada abad ini yang sangat memengaruhi filsafat ketimbang apa yang telah dilakukan Heisenberg.

Mekanika Newton menyiratkan determinisme lengkap. Hukum mekanika menyiratkan bahwa seseorang pada prinsipnya dapat sepenuhnya memprediksi perilaku masa depan

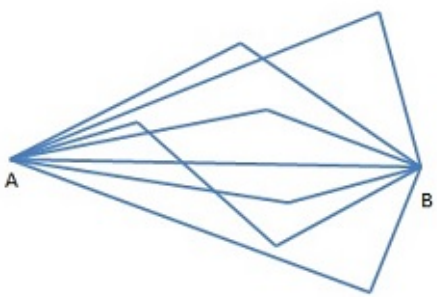
dari suatu sistem partikel (mungkin termasuk partikel yang membentuk otak manusia) dengan pengetahuan yang cukup tentang posisi dan gerak semua partikel pada satu waktu. Hubungan ketidakpastian mekanika kuantum tiba-tiba mengubah semua itu. Jika seseorang mengambil potret informasi yang tepat pada posisi semua partikel dalam suatu sistem, orang akan mengambil risiko kehilangan semua informasi tentang ke mana partikel-partikel itu pergi. Dengan kehilangan yang jelas ini—tidak ada lagi yang dapat membuat prediksi yang benar-benar akurat tentang perilaku masa depan semua sistem, bahkan secara *prinsip*—dalam determinisme muncul, setidaknya dalam pikiran banyak orang, kehendak bebas.

Sementara prinsip mekanika kuantum telah menggairahkan banyak kalangan nonfisikawan, terutama filsuf, perlu dicatat bahwa semua implikasi filosofis mekanika kuantum memiliki dampak yang sangat kecil pada fisika. Semua yang perlu dipertimbangkan fisikawan adalah aturan mainnya. Dan aturannya adalah ketidakpastian pengukuran yang melekat dan dapat dihitung, yang ada di alam. Ada banyak cara untuk mencoba menggambarkan asal-usul ketidakpastian ini, tetapi, seperti biasa, satu-satunya yang benar-benar konsisten (dan ada, seperti biasa, sejumlah yang berbeda tetapi setara) adalah matematika. Ada satu formulasi matematis yang sangat sesuai dengan visualisasi, dan itu tidak lain adalah Richard Feynman.

Salah satu kontribusi terbesar Feynman dalam fisika adalah menafsirkan ulang hukum mekanika kuantum dalam hal apa yang dikenal dalam bahasa matematika sebagai *jalur*

integral sepanjang garis bagi prinsip Fermat untuk cahaya yang saya diskusikan di bab terakhir. Apa yang dimulai sebagai skema kalkulasi 'belaka' kini telah memengaruhi cara seluruh generasi ahli fisika membayangkan apa yang mereka lakukan. Hal ini bahkan memperkenalkan trik matematika, yang disebut 'waktu imajiner', yang telah disinggung Stephen Hawking dalam buku populernya, *A Brief History of Time*.

Jalur integral Feynman memberikan aturan untuk menghitung proses fisis dalam mekanika kuantum, dan mereka melakukan hal seperti ini. Ketika sebuah partikel bergerak dari titik A ke titik B, bayangkan semua kemungkinan jalan yang bisa diambil:



Gambar 10: Jalur yang mungkin dilalui oleh partikel dari titik A ke titik B.

Dengan masing-masing jalur/lintasan, seseorang mengasosiasikan semacam kemungkinan bahwa partikel akan mengambilnya. Bagian yang sulit adalah menghitung probabilitas yang terkait dengan jalur yang diberikan, dan itu adalah

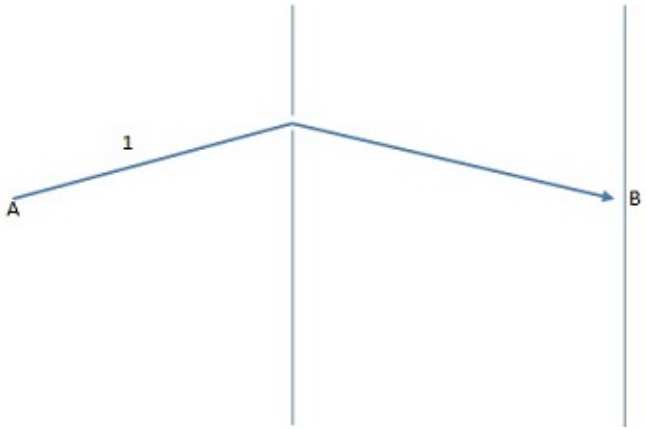
fungsi utama dari semua alat matematika; seperti waktu imajiner. Tapi bukan itu yang saya pedulikan di sini. Untuk objek makroskopik (yang besar dibandingkan dengan skala di mana efek mekanika kuantum berubah menjadi signifikan) seseorang menemukan bahwa satu jalur jauh lebih mungkin daripada jalur lainnya, dan semua yang lain dapat diabaikan. Itulah jalan yang diprediksi oleh hukum mekanika klasik, dan ini menjelaskan mengapa hukum gerak benda-benda makroskopik yang diamati begitu baik dijelaskan oleh mekanika klasik. Tetapi untuk partikel yang bergerak pada skala di mana mekanika kuantum dapat membuat prediksi yang jauh berbeda dari mekanika klasik, beberapa jalur yang berbeda mungkin sama kemungkinannya. Dalam hal ini, probabilitas akhir untuk sebuah partikel untuk bergerak dari A ke B akan bergantung pada pertimbangan akan lebih dari satu jalur yang mungkin. Sekarang probabilitas akhir ini, bahwa sebuah partikel yang dimulai pada A akan berakhir di B, ternyata bergantung pada jumlah dari 'probabilitas' individu untuk semua jalur yang mungkin.

Apa yang membuat mekanika kuantum pada dasarnya berbeda dari mekanika klasik adalah bahwa 'probabilitas' ini sebagai hasil perhitungan memiliki satu perbedaan mendasar dari probabilitas fisis aktual sebagaimana biasanya kita mendefinisikannya. Sementara probabilitas normal selalu positif, 'probabilitas' untuk jalur individu dalam mekanika kuantum bisa negatif, atau bahkan 'imajiner', yaitu, angka yang kuadratnya negatif! (Jika Anda tidak suka berpikir tentang probabilitas imajiner, Anda dapat menyingkirkan hal ini dengan membayangkan dunia di mana 'waktu' adalah

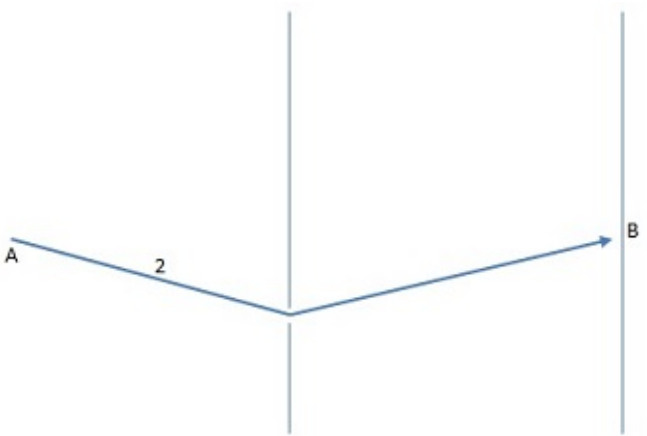
angka imajiner. Dalam hal ini, semua probabilitas dapat ditulis sebagai angka positif. Oleh karena itu disebut *waktu imajiner*. Tidak ada penjelasan lebih lanjut yang diperlukan tentang masalah ini, bagaimanapun, waktu imajiner hanyalah sebuah konstruksi matematis yang dirancang untuk membantu kita menangani matematika mekanika kuantum, dan tidak lebih.) Tidak ada masalah dalam menghitung probabilitas fisis nyata akhir sebuah partikel untuk bergerak dari A ke B, karena setelah menambahkan bersama-sama 'probabilitas' mekanika kuantum individu untuk masing-masing jalur, hukum mekanika kuantum kemudian memberi tahu saya untuk membuat kuadrat hasil sedemikian rupa sehingga probabilitas fisis aktual selalu berupa bilangan positif.

Poin penting tentang semua ini adalah bahwa saya dapat mempertimbangkan 'probabilitas' yang terkait dengan dua jalur yang berbeda, yang masing-masing, ketika diambil secara terpisah, mungkin menghasilkan probabilitas final tidak-nol tetapi, ketika ditambahkan bersama, saling melenyapkan untuk memberikan hasil nol. Inilah tepatnya yang bisa terjadi pada elektron yang bergerak ke layar pendar cahaya melalui dua celah. Jika saya mempertimbangkan titik tertentu di layar, dan saya menutupi satu celah, saya menemukan bahwa ada probabilitas tidak-nol untuk elektron untuk mengambil lintasan dari A ke B melalui celah ini dan sampai ke layar (Gambar 11):

Demikian pula, ada probabilitas tidak-nol untuk bergerak dari A ke B jika saya menutupi celah lainnya (Gambar 12):

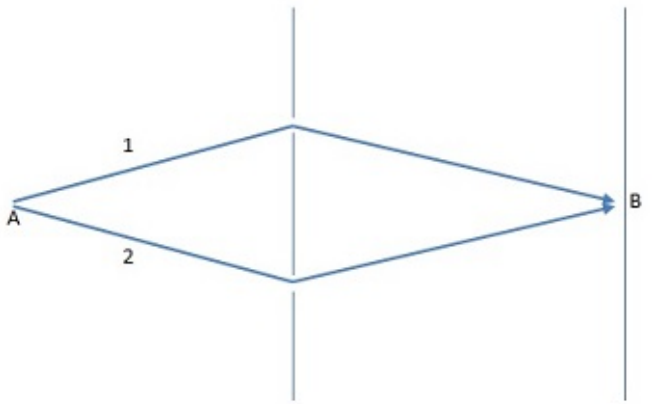


Gambar 11: Jalur yang dilalui oleh partikel dari A ke B.



Gambar 12: Jalur lain yang dilalui oleh partikel dari A ke B.

Namun, jika saya memperkenankan kedua jalur yang mungkin, probabilitas terakhir untuk bergerak dari A ke B, berdasarkan jumlah 'probabilitas' mekanika kuantum untuk setiap jalur, bisa nol:



Gambar 13: Probabilitas partikel yang melalui dua jalur yang diizinkan dapat memiliki 'probabilitas' nol.

Manifestasi fisis ini sederhana. Jika saya menutupi salah satu celah, saya melihat titik terang berkembang di layar di B ketika saya mengirim elektron melalui satu per satu. Namun, jika saya membiarkan keduanya terbuka, layar tetap gelap di B. *Meskipun hanya satu elektron pada waktu perjalanan ke layar, kemungkinan tiba di B tergantung pada kedua jalur yang tersedia, seolah-olah elektron entah bagaimana 'melewati' kedua celah!* Ketika kita ingin melihat seandainya ini adalah kasusnya, dengan meletakkan detektor di salah satu celah, kita menemukan bahwa setiap

elektron melewati satu atau yang lain, tetapi sekarang titik di B itu cerah! Mendeteksi elektron, memaksanya untuk mengkhianati kehadirannya, membuat pilihan jika Anda bersedia, memiliki efek yang sama dengan menutup salah satu celah: Ini mengubah aturan!

Saya telah mengalami kesulitan untuk mendeskripsikan ini secara mendetail bukan hanya untuk memperkenalkan Anda pada suatu fenomena yang fundamental tentang cara dunia berada pada skala atom. Sebaliknya, saya ingin menggambarkan bagaimana, tergantung pada hasil yang liar, tetapi terbukti, dan implikasinya terhadap relativitas khusus, kita dipaksa menerima konsekuensi yang bahkan mereka yang pertama kali diprediksi sulit diterima. Tetapi fisika berkembang dengan mendorong teori-teori yang terbukti ke arah yang paling ekstrem, bukan dengan meninggalkan mereka hanya karena keadaan menjadi sulit.

Jika kita percaya bahwa elektron, ketika mereka melakukan perjalanan, 'menjelajahi' semua lintasan yang tersedia untuk mereka, tahan terhadap kemampuan kita untuk memeriksa mereka, kita harus menerima kemungkinan bahwa beberapa lintasan ini mungkin 'mustahil' jika saja mereka terukur. Khususnya, karena pengukuran ulang posisi partikel yang berulang secara berulang-ulang pada waktu yang berurutan tidak dapat ditentukan dengan jelas kecepatannya di antara waktu-waktu ini, oleh prinsip ketidakpastian, boleh jadi untuk waktu yang sangat singkat partikel barangkali berjalan lebih cepat daripada kelajuan cahaya. Sekarang ini adalah salah satu konsekuensi mendasar dari hubungan khusus antara ruang dan waktu yang diusulkan

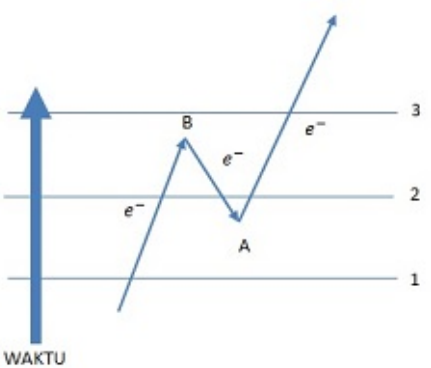
Einstein—dalam rangka, saya mengingatkan Anda, untuk mendamaikan keteguhan yang diperlukan dari kelajuan cahaya untuk semua pengamat—bahwa tidak ada yang dapat diukur untuk melakukan perjalanan lebih cepat daripada kelajuan cahaya.

Kita sekarang mengarah pada pertanyaan populer: Jika pohon tumbang di hutan dan tidak ada yang mendengarnya, apakah ia membuat suara? Atau yang mungkin lebih relevan untuk diskusi ini: Jika sebuah partikel elementer yang kecepatan pengukuran rata-rata kurang dari kelajuan cahaya sesaat bergerak lebih cepat daripada kelajuan cahaya selama selang waktu begitu kecil sehingga saya tidak dapat mengukurnya secara langsung, dapatkah ini memiliki konsekuensi yang dapat diamati? Jawabannya adalah ya dalam kedua kasus.

Relativitas khusus sangat erat menghubungkan ruang dan waktu yang membatasi kecepatan, yang menghubungkan jarak yang ditempuh dengan waktu tertentu. Ini adalah konsekuensi tak terelakkan dari hubungan baru antara ruang dan waktu yang dipaksakan oleh relativitas yang, merupakan objek yang diukur untuk melakukan perjalanan lebih cepat daripada kelajuan cahaya oleh satu rangkaian pengamat, itu bisa diukur oleh pengamat lain untuk mundur ke belakang. Waktu! Ini adalah salah satu alasan mengapa perjalanan itu dilarang (jika tidak, kausalitas bisa dilanggar, misalnya, karena semua penulis fiksi ilmiah sadar akan kemungkinan yang tak dapat diterima seperti seandainya saya menembak nenek saya sebelum saya lahir!). Sekarang mekanika kuantum tampaknya menyiratkan bahwa partikel,

pada prinsipnya, dapat bergerak lebih cepat daripada cahaya untuk interval yang sangat kecil sehingga saya tidak dapat mengukur kecepatannya. Selama saya tidak dapat mengukur kecepatan seperti itu secara langsung, tidak ada pelanggaran operasional terhadap relativitas khusus. Namun, jika teori kuantum tetap konsisten dengan relativitas khusus, maka selama interval-interval ini, bahkan jika saya tidak bisa mengukurnya, partikel-partikel semacam itu harus dapat berperilaku seolah-olah mereka berjalan mundur ke masa lalu.

Apa artinya ini, secara praktis? Nah, mari kita menggambar lintasan elektron seperti yang dilihat oleh pengamat hipotetis yang mungkin menyaksikan lompatan waktu ini, lihat Gambar 14.



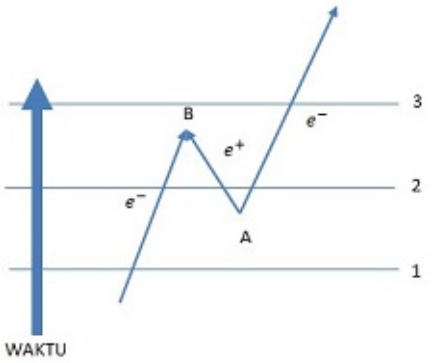
Gambar 14: Gambaran lompatan waktu.

Jika pengamat seperti itu merekam pengamatannya pada tiga kali berlabel 1, 2, dan 3, ia akan mengukur satu partikel

pada waktu 1, tiga partikel pada 2, dan satu partikel lagi pada 3. Dengan kata lain, jumlah partikel yang ada pada satu waktu tidak akan diperbaiki! Terkadang ada satu elektron yang bergerak di sepanjang lintasannya, dan di lain waktu elektron ini dapat ditemani oleh dua lainnya, meskipun salah satunya kelihatannya bergerak mundur pada waktunya.

Tapi apa artinya mengatakan elektron bergerak mundur pada waktunya? Baiklah, saya tahu partikel adalah elektron dengan mengukur massa dan muatan listriknya, yang terakhir adalah negatif. Elektron yang bergerak dari posisi B pada satu waktu ke posisi A pada waktu yang lebih awal menunjukkan aliran muatan negatif dari kiri ke kanan ketika saya mundur ke masa lalu. Bagi seorang pengamat yang dirinya sendiri bergerak maju dalam waktu, seperti yang cenderung dilakukan oleh pengamat, ini akan dicatat sebagai aliran muatan positif dari kanan ke kiri. Jadi, pengamat kita memang akan mengukur tiga partikel yang ada pada waktu antara 1 dan 3, yang semuanya akan tampak bergerak maju dalam waktu, tetapi salah satu partikel ini, yang akan memiliki massa yang sama dengan elektron, akan memiliki muatan positif. Dalam hal ini, rangkaian kejadian dalam diagram sebelumnya akan digambarkan seperti Gambar 15.

Dari sudut pandang ini, gambarnya sedikit kurang aneh. Pada waktu 1, pengamat melihat elektron bergerak dari kiri ke kanan. Pada posisi A, pada waktu antara 1 dan 2, pengamat tiba-tiba melihat sepasang partikel tambahan muncul dari ketiadaan. Salah satu partikel, dengan muatan positif, bergerak ke kiri, dan yang lainnya, dengan muatan



Gambar 15: Rangkaian kejadian berdasar gambaran lompatan waktu sebelumnya.

negatif, bergerak ke kanan. Beberapa waktu kemudian, di posisi B, partikel bermuatan positif dan elektron asli bertabrakan dan lenyap, hanya menyisakan elektron 'baru' yang terus bergerak dengan cara riang dari kiri ke kanan.

Sekarang, seperti yang saya katakan, tidak ada pengamat yang benar-benar dapat mengukur kecepatan elektron asli untuk interval waktu antara 1 dan 3, dan dengan demikian tidak ada pengamat fisis yang dapat secara langsung mengukur 'penciptaan' partikel spontan ini dari ketiadaan, sama seperti tidak akan pernah ada pengamat yang dapat mengukur partikel asli untuk bepergian lebih besar dari kelajuan cahaya. Tapi apakah kita bisa mengukurnya secara langsung, jika hukum mekanika kuantum memungkinkan untuk kemungkinan ini, mereka harus, jika mereka harus konsisten dengan relativitas khusus, memungkinkan penciptaan dan

pemusnahan spontan pasangan partikel pada skala waktu singkat bahwa kita tidak dapat mengukur kehadiran mereka secara langsung. Kita menyebutnya *partikel-partikel virtual*. Dan seperti yang saya jelaskan di Bab 1, proses seperti yang digambarkan di atas mungkin tidak dapat diamati secara langsung, tetapi mereka meninggalkan jejak tidak langsung pada proses yang dapat langsung diamati, sebagaimana yang dapat dihitung Bethe dan rekan-rekannya.

Persamaan yang menggabungkan hukum mekanika kuantum saat mereka berlaku untuk elektron dengan relativitas khusus pertama kali ditulis pada tahun 1928 oleh fisikawan Inggris Paul Adrian Maurice Dirac, salah satu kelompok yang membantu menemukan hukum mekanika kuantum beberapa tahun sebelumnya, dan akhirnya *Lucasian Professor of Mathematics*, posisi yang dipegang oleh Hawking dan sebelumnya ditempati oleh Newton. Teori gabungan ini, yang disebut elektrodinamika kuantum, yang membentuk subjek pertemuan Shelter Island yang terkenal, baru sepenuhnya dipahami sekitar dua puluh tahun kemudian, berkat karya Feynman dan yang lainnya.

Tidak ada dua fisikawan yang lebih istimewa dari Dirac dan Feynman. Feynman adalah seorang ekstrovert, sebaliknya Dirac adalah introvert. Anak tengah dari seorang guru bahasa Prancis Swiss di Bristol, Inggris, Paul muda dibentuk untuk mengikuti aturan ayahnya untuk berbicara kepadanya hanya dalam bahasa Prancis, agar anak itu belajar bahasa itu. Karena Paulus tidak dapat mengekspresikan dirinya dengan baik dalam bahasa Prancis, ia memilih untuk tetap diam, kecenderungan yang akan tetap bersamanya

selama sisa hidupnya. Dikatakan (dan mungkin benar) bahwa Niels Bohr, fisikawan paling terkenal pada zamannya, dan direktur institut di Kopenhagen tempat Dirac bekerja setelah menerima gelar Ph.D. di Cambridge, pergi mengunjungi Lord Rutherford, fisikawan Inggris, beberapa saat setelah kedatangan Dirac. Dia mengeluh tentang peneliti muda baru ini, yang tidak mengatakan apa-apa sejak kedatangannya. Rutherford membalas dengan menceritakan kepada Bohr sebuah cerita di sepanjang baris berikut: Seorang lelaki masuk ke toko yang ingin membeli seekor burung beo. Petugas itu menunjukkan padanya tiga burung. Yang pertama adalah kuning dan putih yang bagus, dan memiliki kosakata 300 kata. Ketika ditanyakan harganya, petugas menjawab, 5.000 dolar. Burung kedua bahkan lebih berwarna daripada yang pertama, dan berbicara dengan baik dalam empat bahasa! Sekali lagi pria itu meminta harga, dan diberitahu bahwa burung ini bisa dibeli seharga 25.000 dolar. Pria itu kemudian memata-matai burung ketiga, yang agak compang-camping, duduk di kandangnya. Dia bertanya kepada juru tulis berapa banyak bahasa asing yang bisa diucapkan oleh burung ini, dan diberi tahu, 'tidak ada'. Merasa sadar anggaran, pria itu bertanya-tanya berapa harga burung ini. "100.000 dolar" adalah jawabannya. Luar biasa, pria itu berkata, "Apa? Burung ini sama sekali tidak berwarna seperti yang pertama, dan sama sekali tidak semahir yang kedua. Bagaimana mungkin Anda bisa memungut biaya begitu banyak?". Petugas itu tersenyum sopan dan menjawab, "Burung ini berpikir!"

Sebab itu, Dirac bukan orang yang melakukan fisika

dengan visualisasi. Dia merasa jauh lebih nyaman dengan persamaan, dan itu hanya setelah bermain dengan satu rangkaian persamaan selama beberapa tahun bahwa ia menemukan hubungan luar biasa yang secara tepat menggambarkan perilaku mekanika kuantum dan khusus bagi elektron. Dengan cepat menjadi jelas bukan hanya bahwa persamaan ini memprediksi kemungkinan adanya mitra positif dari elektron, yang bisa ada sebagai partikel 'virtual' yang diproduksi sebagai bagian dari sepasang partikel virtual, tetapi objek baru ini juga harus dapat ada pada dirinya sendiri sebagai partikel nyata dalam isolasi.

Pada saat itu satu-satunya partikel yang bermuatan positif di alam adalah proton. Dirac dan kawan-kawan, yang melihat bahwa persamaannya dengan tepat memprediksi sejumlah fitur fenomena atom yang tidak dijelaskan tetapi tidak ingin terlalu jauh dari ortodoksi saat ini, sehingga diasumsikan bahwa proton harus menjadi partikel positif yang diprediksi oleh teori. Satu-satunya masalah adalah bahwa proton hampir 2.000 kali lebih berat daripada elektron, sementara interpretasi yang paling naif dari teori Dirac adalah bahwa partikel positif harus memiliki massa yang sama dengan elektron.

Berikut adalah contoh di mana dua teori dunia fisis yang diketahui dan terukur dengan baik, ketika didorong ke batasnya, memaksakan kesimpulan paradoksal kepada kita, seperti halnya relativitas untuk penyatuan gagasan Galileo dengan elektromagnetik. Namun, tidak seperti Einstein, fisikawan pada tahun 1928 tidak begitu siap untuk menuntut fenomena baru guna memvalidasi ide-ide mereka. Baru

pada tahun 1932, secara kebetulan, fisikawan eksperimental Amerika, Carl Anderson, mengamati sinar kosmik—partikel berenergi tinggi yang terus-menerus membombardir Bumi dan yang asalnya berkisar dari jilatan api matahari terdekat hingga bintang-bintang meledak di galaksi yang jauh—menemukan anomali dalam datanya. Anomali ini dapat dijelaskan hanya jika ada partikel baru bermuatan positif yang massanya jauh lebih dekat dengan elektron daripada proton. Jadi itu adalah 'positron', 'antipartikel' elektron yang diprediksi oleh teori Dirac, ditemukan. Kita sekarang tahu bahwa hukum mekanika kuantum dan relativitas yang sama mengatakan kepada kita bahwa untuk setiap partikel bermuatan di alam, harus ada antipartikel muatan yang sama dan muatan listrik yang berlawanan.

Berkaca pada rasa takutnya dalam menerima implikasi dari karyanya yang menggabungkan relativitas khusus dan mekanika kuantum, Dirac dikatakan telah membuat salah satu ucapannya yang langka: "Persamaan saya lebih pintar dari saya!" Jadi, tujuan saya dalam menghubungkan kisah ini adalah untuk mengilustrasikan kembali bagaimana hasil yang paling luar biasa dalam fisika sering muncul bukan dari membuang ide dan teknik saat ini, melainkan dengan mendorongnya sejauh mungkin—dan kemudian memiliki keberanian untuk mengeksplorasi implikasinya.

Saya pikir saya telah mendorong ide untuk mendorong ide-ide sejauh mana mereka dapat didorong, sejauh yang saya dapat mendorongnya. Tetapi dengan memberi judul pada bab ini 'Plagiarisme Kreatif', saya tidak bermaksud hanya merentangkan ide lama sampai batas mereka; Saya

juga bermaksud menyalin seluruh bagian utama mereka! Di mana-mana kita mengubah alam terus mengulangi dirinya sendiri. Sebagai contoh, hanya ada empat gaya yang kita ketahui di alam—gaya kuat, lemah, elektromagnetik, dan gravitasional—dan semuanya ada di dalam citra salah satu dari yang lain. Mulailah dengan Hukum Gravitasi Newton. Satu-satunya kekuatan jarak jauh lainnya di alam, gaya antara partikel bermuatan, dimulai sebagai salinan langsung gravitasi. Mengubah 'massa' menjadi 'muatan listrik' dan itu besar-besaran. Gambaran klasik elektron yang mengorbit proton untuk menyusun atom paling sederhana, hidrogen, *identik* dengan gambar bulan yang mengorbit Bumi. Kekuatan interaksi itu sangat berbeda, dan itu menjelaskan perbedaan skala yang bermasalah, tetapi sebaliknya semua hasil dibangun untuk menggambarkan gerak planet di sekitar matahari dan berlaku dalam kasus ini. Kita menemukan bahwa periode orbit elektron di sekitar proton adalah sekitar 10-15 detik, dibandingkan dengan satu bulan untuk bulan mengitari Bumi. Bahkan pengamatan langsung ini mencerahkan. Frekuensi cahaya tampak yang dipancarkan oleh atom adalah urutan 10^{15} siklus/detik, sangat mengandaikan bahwa elektron yang mengorbit di sekitar atom ada hubungannya dengan emisi cahaya, seperti yang memang terjadi.

Tentu saja, ada perbedaan penting yang membuat gaya listrik lebih kaya daripada gaya gravitasi. Muatan listrik datang dalam dua jenis: positif dan negatif. Dengan demikian, gaya listrik dapat sangat menarik. Selain itu, ada fakta bahwa muatan listrik yang bergerak mengalami gaya magnet.

Seperti yang saya jelaskan sebelumnya, ini mengarah pada keberadaan cahaya, sebagai gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh muatan yang bergerak. Teori elektromagnetik, di mana semua fenomena ini disatukan, kemudian berfungsi sebagai model untuk interaksi lemah antara partikel dalam inti yang bertanggung jawab untuk sebagian besar reaksi nuklir. Teori-teori ini sangat mirip sehingga akhirnya disadari bahwa mereka dapat disatukan menjadi satu teori, yang merupakan generalisasi elektromagnetik. Gaya keempat, gaya kuat antara quark yang membentuk proton dan neutron, juga dimodelkan pada elektromagnetik. Ini tercermin dalam namanya, *quantum chromodynamics*, turunan elektrodinamika kuantum. Akhirnya, dengan pengalaman yang diperoleh dari teori-teori ini kita dapat kembali ke gravitasi Newton dan menyamaratakannya, dan lihatlah, kita sampai pada relativitas umum Einstein. Seperti yang dikatakan oleh fisikawan Sheldon Glashow, fisika, seperti Ouroboros, ular yang memakan ekornya, kembali ke lingkaran penuh.

Saya ingin mengakhiri bab ini dengan contoh spesifik yang secara grafis menunjukkan seberapa kuat hubungan antara bidang fisika yang benar-benar berbeda. Ini ada hubungannya dengan *Large Hadron Collider* (LHC), akselerator partikel raksasa yang selesai pada tahun 2007 dengan total biaya sekitar 5-10 miliar dolar US.

Siapapun yang pernah mengunjungi situs laboratorium fisika partikel besar telah mengerti arti dari kata-kata ahli fisika/pendidik terkemuka Vicki Weisskopf, yang telah menggambarkan fasilitas ini sebagai katedral gothic abad

kedua puluh. Dalam skala dan kompleksitas, abad ke-20 adalah proyek-proyek gereja rekayasa besar di abad ke-11 dan ke-12 (meskipun saya ragu mereka akan bertahan lama). *The Large Hadron Collider* terletak sekitar seratus kaki di bawah pedesaan Swiss dan Prancis, dalam lingkaran besar 27 kilometer di sekitarnya, dengan lebih dari 6.000 magnet superkonduktor untuk memandu dua aliran proton dalam arah yang berlawanan di sekitar terowongan, menyebabkan mereka bertabrakan bersama pada energi dari 7.000 kali massa diam mereka. Setiap tabrakan dapat menghasilkan rata-rata lebih dari seribu partikel, dan bisa ada lebih dari 600 juta tabrakan per detik.

Tujuan mesin raksasa ini adalah untuk mencoba menemukan asal-usul 'massa' di alam. Saat ini kita tidak tahu mengapa partikel elementer memiliki massa yang mereka miliki, mengapa beberapa partikel lebih berat daripada yang lain, dan mengapa beberapa, seperti neutrino, sangat ringan. Sejumlah argumen teoretis kuat menunjukkan bahwa kunci misteri ini dapat diperiksa pada energi yang dapat diakses di LHC.

Large Hadron Collider (LHC) sangat penting untuk keberhasilannya pada banyak magnet superkonduktor yang membentuk 'mesin' pusatnya, magnet yang tanpa bantuan pendinginan ke temperatur yang sangat rendah sehingga kabel di dalamnya menjadi superkonduktor, akan sangat besar biaya yang dibutuhkan jika bukan malah mustahil untuk membangunnya. Untuk memahami mengapa fenomena superkonduktivitas yang membuat LHC secara teknis mungkin juga sesuai dengan dasar yang lebih dalam, kita harus

kembali sekitar delapan puluh tahun ke laboratorium di Leiden, Belanda, di mana fisikawan eksperimental Belanda, H. Kammerlingh Onnes, menemukan suatu fenomena yang menakjubkan yang sekarang kita sebut superkonduktivitas. Onnes mendinginkan merkuri logam dalam temperatur rendah di laboratoriumnya untuk memeriksa sifat-sifatnya. Ketika Anda mendinginkan material apapun, ketahanannya terhadap aliran arus listrik menurun, terutama karena gerak atom dan molekul dalam material yang cenderung menghalangi aliran arus menurun. Namun, ketika Onnes mendinginkan raksa hingga 270° di bawah nol (Celcius), dia menyaksikan sesuatu yang tidak terduga: Hambatan listrik lenyap sepenuhnya! Saya tidak mengatakan bahwa *hampir* tidak ada hambatan; melainkan *tidak ada* sama sekali. Sebuah arus, sekali mulai bergerak, akan terus mengalir tidak berubah untuk waktu yang lama dalam kumparan materi semacam itu, bahkan setelah sumber daya yang digunakan untuk memulai aliran arus dihilangkan. Onnes secara dramatis menunjukkan fakta ini dengan membawa satu lingkaran kabel superkonduktor yang berisi arus presisten dari rumahnya di Leiden ke Cambridge, Inggris.

Superkonduktivitas tetap menjadi misteri yang menarik selama hampir setengah abad sampai teori mikroskopis lengkap menjelaskan fenomena tersebut dikembangkan pada tahun 1957 oleh fisikawan John Bardeen, Leon Cooper, dan J. Robert Schrieffer. Bardeen sudah membuat kontribusi penting bagi sains dan teknologi modern dengan menjadi penemu-bersama transistor, dasar dari semua peralatan elektronik modern. Hadiah Nobel dalam Fisika yang diberikan

Bardeen bersama Cooper dan Schrieffer pada tahun 1972 untuk karyanya pada superkonduktivitas adalah yang kedua. (Beberapa waktu yang lalu saya membaca surat pengaduan ke majalah fisika yang membuat poin ironisnya bahwa ketika Bardeen—satu-satunya orang yang memenangkan dua Hadiah Nobel di bidang yang sama dan penemu-bersama perangkat yang mengubah cara dunia bekerja—meninggal pada tahun 1992, hampir tidak disebutkan di TV. Akan lebih baik jika orang dapat menghubungkan kesenangan yang mereka dapatkan dari stereo, TV, permainan, dan komputer yang digerakkan oleh transistor dengan ide-ide yang dihasilkan orang-orang seperti Bardeen.)

Ide kunci yang menyebabkan teori superkonduktivitas sebenarnya diusulkan oleh fisikawan Fritz London pada tahun 1950. Ia berpendapat bahwa perilaku aneh ini adalah hasil dari fenomena mekanika kuantum, yang biasanya memengaruhi perilaku hanya pada skala yang sangat kecil, tiba-tiba meluas ke skala makroskopik. Seolah-olah semua elektron dalam konduktor biasanya berkontribusi pada arus yang mengalir ketika Anda melampirkan konduktor ini ke sumber listrik tiba-tiba bertindak sebagai konfigurasi tunggal, 'koheren' dengan perilaku yang diatur lebih oleh hukum mekanika kuantum yang mengontrol elektron individu daripada oleh hukum klasik yang biasanya mengatur objek makroskopik. Jika semua elektron yang bertindak saat ini sebagai konfigurasi tunggal yang membentang sepanjang jalan di konduktor, maka aliran arus tidak dapat dianggap sebagai akibat gerak elektron individu yang dapat memantul dari rintangan saat mereka bergerak, menghasilkan resistensi

terhadap gerak mereka. Sebaliknya, konfigurasi koheren ini, yang membentangkan materi, memungkinkan muatan untuk diangkut melewatinya. Seolah-olah dalam satu keadaan, konfigurasi ini sesuai dengan sejumlah besar elektron saat diam. Pada keadaan lain, yang stabil dan independen dari waktu, konfigurasi sesuai dengan sejumlah besar elektron yang bergerak seragam.

Seluruh fenomena ini dapat terjadi hanya karena ciri penting mekanika kuantum. Karena jumlah energi yang dapat ditransfer ke atau dari sistem berukuran-berhingga hanya terjadi dalam jumlah tertentu, atau 'quanta', serangkaian keadaan energi yang mungkin untuk setiap partikel tertentu dalam sistem berhingga berkurang dalam mekanika kuantum dari serangkaian kontinyu ke diskrit. Ini karena partikel hanya dapat mengubah energi mereka dengan menyerap energi. Tetapi jika energi hanya dapat diserap dalam jumlah yang terpisah, serangkaian energi yang mungkin dimiliki oleh partikel juga akan bersifat diskrit. Sekarang, apa yang terjadi jika Anda memiliki sejumlah partikel dalam kotak? Jika ada banyak kemungkinan keadaan energi yang berbeda untuk partikel, seseorang mungkin mengharapkan masing-masing dari mereka untuk menempati keadaan diskrit yang berbeda, rata-rata. Namun kadang-kadang, dalam keadaan yang sangat khusus, adalah mungkin bahwa semua partikel mungkin ingin menempati keadaan tunggal.

Untuk memahami bagaimana hal ini bisa terjadi, pertimbangkan pengalaman familiar berikut: Anda menonton komedi di bioskop yang penuh sesak dan mendapatinya lucu. Anda kemudian menyewa video untuk menonton di rumah

sendiri, dan itu memang lucu. Alasannya? Tertawa itu menular. Ketika seseorang di sebelah Anda mulai tertawa terbahak-bahak, sulit untuk tidak tertawa bersama. Dan semakin banyak orang yang menertawakan Anda, semakin sulit untuk tidak bergabung dengan mereka.

Analog fisis dari fenomena ini dapat bekerja untuk partikel di dalam kotak. Katakanlah bahwa dalam konfigurasi tertentu, dua partikel dalam kotak dapat tertarik satu sama lain, dan dengan demikian menurunkan total energi mereka dengan berkumpul bersama. Setelah dua partikel melakukan hal ini, mungkin akan lebih menguntungkan bagi partikel ketiga untuk bergabung bersama. Sekarang, katakanlah jenis daya tarik khusus ini hanya terjadi jika partikel berada di salah satu dari semua konfigurasi yang mungkin mereka miliki. Anda bisa menebak apa yang akan terjadi. Jika Anda memulai partikel secara acak, segera mereka semua akan 'mengembun' ke dalam keadaan kuantum yang sama. Dengan demikian, 'kondensasi' yang koheren terbentuk.

Tapi ada lebih banyak lagi mengenai hal tersebut. Karena keadaan kuantum yang berbeda dalam suatu sistem dipisahkan menjadi tingkat diskrit, setelah semua partikel dalam sistem ini dikondensasikan menjadi satu keadaan, akan ada 'celah' yang besar dalam total energi antara keadaan ini dan keadaan keseluruhan sistem di mana, katakanlah, satu partikel bergerak secara independen dan sisanya tetap dikelompokkan. Inilah situasi dalam superkonduktor. Meskipun masing-masing elektron bermuatan negatif, dan karena itu menolak elektron lain, di dalam materi itu ada daya tarik residual kecil antar elektron karena kehadiran

semua atom dalam padatan. Hal ini pada gilirannya dapat menyebabkan elektron untuk berpasangan dan kemudian mengembun dalam konfigurasi kuantum tunggal koheren. Sekarang, katakanlah saya menghubungkan seluruh sistem ini ke baterai. Semua elektron ingin bergerak bersama di hadapan gaya listrik. Jika salah satu dari mereka melepaskan diri dari rintangan, memperlambat geraknya, itu harus mengubah keadaan kuantum pada saat yang sama. Tetapi ada 'penghalang energi' yang mencegah hal ini, karena elektron begitu erat berpasangan dengan semua mitranya. Dengan demikian, semua elektron bergerak bersama-sama dengan cara riang mereka, menghindari rintangan dan tidak menghasilkan hambatan.

Hanya dengan perilaku luar biasa dari konglomerasi elektron ini, Anda dapat menebak bahwa akan ada sifat-sifat lain dari material yang diubah dalam keadaan superkonduktor ini. Salah satu sifat ini disebut efek Meissner, merujuk pada fisikawan Jerman W. Meissner, yang menemukannya pada tahun 1933. Ia menemukan bahwa jika Anda menempatkan superkonduktor di dekat magnet, bahan superkonduktor akan melakukan segala upaya untuk 'mengusir' medan magnet karena kemagnetannya. Dengan ini saya maksudkan bahwa elektron dalam material akan mengatur diri mereka sendiri sehingga medan magnet di luar benar-benar dibatalkan dan tetap nol di dalam materi. Untuk melakukannya, medan magnet kecil harus dibuat pada permukaan material untuk membatalkan medan magnet eksternal. Jadi, jika Anda membawa material dekat kutub utara magnet, semua jenis kutub utara kecil akan dibuat di permukaan material

untuk mengusir medan awal. Ini bisa sangat dramatis. Jika Anda mengambil materi yang tidak superkonduksi dan meletakkannya di magnet, itu mungkin hanya tetap diam di sana. Jika Anda mendinginkan seluruh sistem sehingga materi menjadi superkonduksi, tiba-tiba ia akan naik dan 'melayang' di atas magnet karena semua medan magnet kecil yang dibuat di permukaan yang mengusir medan magnet awal.

Ada cara lain untuk menggambarkan fenomena ini. Cahaya, seperti yang telah saya nyatakan sebelumnya, tidak lebih dari gelombang elektromagnetik. Goncangkan muatan, dan medan listrik dan magnet yang berubah akan menghasilkan gelombang cahaya yang bergerak ke luar. Gelombang cahaya bergerak dengan kecepatan cahaya karena dinamika elektromagnetik sedemikian rupa sehingga energi yang dibawa oleh gelombang cahaya tidak dapat dianggap memiliki 'massa' yang terkait dengannya. Dengan kata lain, objek mekanika kuantum mikroskopis yang pada skala kecil sesuai dengan apa yang kita sebut gelombang elektromagnetik pada skala makroskopik, yang disebut foton, tidak memiliki massa.

Alasan medan magnet tidak dapat memasuki superkonduktor adalah karena ketika foton yang terkait dengan bidang makroskopik ini masuk ke dalam dan berjalan melalui latar belakang semua elektron dalam keadaan koheren mereka, sifat-sifat foton itu sendiri berubah. Mereka bertindak seolah-olah mereka punya massa! Situasinya mirip dengan cara Anda bertindak ketika Anda bermain papan-luncur di trotoar, bukan dengan papan-luncur di lumpur. Kelengket-

an lumpur menghasilkan lebih banyak perlawanan terhadap gerak Anda. Jadi, jika seseorang mendorong Anda, Anda akan bertindak seolah-olah Anda lebih 'berat' di lumpur daripada di trotoar—dalam arti akan jauh lebih sulit untuk mendorong Anda. Jadi, juga, foton ini merasa jauh lebih sulit untuk menyebar di superkonduktor, karena massa efektif mereka dalam materi ini. Hasilnya adalah mereka tidak bergerak jauh, dan medan magnet tidak menembus materi.

Kita akhirnya siap untuk berbicara tentang bagaimana semua ini berhubungan dengan SSC. Saya mengatakan bahwa mesin ini diharapkan akan menemukan mengapa semua partikel elementer memiliki massa. Sebelum membaca beberapa halaman sebelumnya, Anda mungkin berpikir bahwa tidak ada dua subjek yang bisa lebih tidak terkait, tetapi pada kenyataannya kemungkinan solusi untuk misteri partikel elementer identik dengan alasan bahan superkonduktor mengusir medan magnet.

Sebelumnya saya mengatakan bahwa elektromagnetik berfungsi sebagai model untuk gaya di alam yang mengatur reaksi nuklir seperti daya matahari, yang disebut gaya 'lemah'. Alasannya adalah bahwa kerangka matematis untuk kedua kekuatan itu hampir identik, kecuali untuk satu perbedaan penting. Foton, yang merupakan entitas kuantum yang berhubungan dengan gelombang elektromagnetik, yang memancarkan kekuatan elektromagnetik, tidak bermassa. Partikel yang mengirimkan gaya lemah, di sisi lain, tidak. Karena alasan inilah gaya lemah antara proton dan neutron di dalam nukleus sangat pendek dan bahwa gaya ini tidak pernah dirasakan di luar nukleus, sementara gaya listrik dan

magnet terasa pada jarak yang jauh.

Setelah fakta ini diakui oleh fisikawan, itu tidak lama sebelum mereka mulai bertanya-tanya apa yang dapat bertanggung jawab atas perbedaan ini. Fisika yang sama bertanggung jawab atas perilaku aneh superkonduktor menunjukkan kemungkinan jawaban. Saya telah menggambarkan bagaimana dunia fisika partikel elementer, di mana relativitas khusus dan mekanika kuantum bekerja bersama, memiliki perilaku aneh tersendiri. Secara khusus, saya berpendapat bahwa ruang kosong tidak perlu benar-benar kosong. Ia dapat diisi oleh pasangan partikel virtual, yang secara spontan muncul dan kemudian menghilang, terlalu cepat untuk dideteksi. Saya juga menjelaskan dalam bab 1 bagaimana partikel virtual ini dapat memiliki efek pada proses yang diamati, seperti pergeseran Lamb.

Sekarang saatnya untuk menempatkan dua dan dua bersama. Jika partikel virtual dapat memiliki efek halus pada proses fisis, dapatkah mereka memiliki efek yang lebih dramatis pada sifat partikel elementer yang terukur? Bayangkan bahwa jenis partikel baru ada di alam yang memiliki daya tarik yang dekat dengan partikel-partikel sejenis. Jika satu pasang partikel semacam itu membengkak menjadi ada, seperti partikel-partikel virtual yang biasa dilakukan, dibutuhkan energi untuk melakukan hal ini, sehingga partikel-partikel itu harus menghilang dengan cepat jika energi tidak dilanggar. Namun, jika partikel-partikel ini tarik-menarik satu sama lain, itu mungkin sangat menguntungkan bukan hanya untuk mengeluarkan satu pasang tunggal, melainkan untuk meletuskan dua pasang. Tetapi jika dua pasang lebih

baik dari satu, mengapa tidak tiga? Dan seterusnya. Bisa jadi, jika seseorang mengatur tarik-menarik partikel-partikel ini dengan tepat, bahwa total energi yang dibutuhkan sistem koheren dari banyak partikel semacam itu, pada kenyataannya, kurang dari itu dalam suatu sistem di mana tidak ada partikel semacam itu di sekitarnya. Dalam hal ini, apa yang akan terjadi? Kita akan mengharapkan keadaan partikel yang koheren secara spontan untuk menghasilkan dirinya sendiri di alam. Ruang 'Kosong' akan diisi dengan latar belakang partikel yang koheren dalam keadaan kuantum tunggal yang khusus.

Apa yang akan menjadi efek dari fenomena seperti itu? Yah, kita tidak akan selalu berharap untuk mengamati partikel individu di latar belakang, karena untuk menghasilkan satu partikel nyata yang bergerak sendiri mungkin memerlukan jumlah energi yang luar biasa, sama seperti biaya energi untuk mencoba menendang elektron keluar dari konfigurasi koherennya dalam superkonduktor. Sebaliknya, ketika partikel bergerak di tengah latar belakang ini, kita mungkin mengharapkan ciri khas mereka terpengaruh.

Jika kita mengatur latar belakang ini untuk berinteraksi dengan partikel yang mentransmisikan gaya lemah, yang disebut partikel W dan Z, dan tidak dengan foton, maka kita mungkin berharap bahwa ini dapat menghasilkan partikel W dan Z secara efektif bertindak seolah-olah mereka memiliki sebuah massa besar. Dengan demikian, alasan sebenarnya gaya lemah bertindak sangat berbeda dari elektromagnetik akan karena tidak ada perbedaan intrinsik melainkan untuk latar belakang koheren universal partikel-partikel ini

bergerak.

Analogi hipotetis ini antara apa yang terjadi pada medan magnet dalam superkonduktor dan apa yang menentukan sifat-sifat dasar 'alam' mungkin tampak terlalu fantastis untuk menjadi kenyataan, kecuali bahwa itu menjelaskan setiap eksperimen yang dilakukan hingga saat ini. Pada tahun 1984, partikel W dan Z ditemukan dan sejak itu telah diselidiki secara terperinci. Ciri-ciri mereka dalam perjanjian sempurna dengan apa yang diprediksi jika sifat-sifat ini muncul karena mekanisme yang saya jelaskan di sini.

Lalu apa selanjutnya? Nah, bagaimana dengan massa partikel normal, seperti proton dan elektron? Dapatkah kita berharap untuk memahami ini juga, sebagai hasil dari interaksi mereka dengan keadaan kuantum koheren yang seragam ini yang mengisi ruang kosong? Jika demikian, asal semua massa partikel akan sama. Bagaimana kita bisa tahu dengan pasti? Sederhana: dengan menciptakan partikel-partikel, yang disebut partikel Higgs, merujuk fisikawan Skotlandia Peter Higgs, yang seharusnya mengembun menjadi ruang kosong untuk menyelesaikan seluruh permainan. Misi pusat Supercolling Supercollider biasanya dimaksudkan untuk menemukan partikel Higgs. Prediksi teoretis yang sama yang mengungkapkan dengan baik sifat-sifat partikel W dan Z memberitahu kita bahwa partikel Higgs, jika ada, harus memiliki massa dalam faktor 5 atau lebih dari partikel-partikel ini, dan kisaran ini adalah apa yang dieksplorasi oleh desain LHC.

Saya harus mengatakan bahwa gambar ini tidak memer-

lukan partikel Higgs menjadi partikel elementer fundamental, seperti elektron atau proton. Bisa jadi Higgs terdiri dari pasangan partikel lain, seperti pasangan elektron yang mengikat diri satu sama lain untuk membentuk keadaan superkonduktor dalam materi. Dan mengapa ada Higgs, jika memang demikian? Apakah ada teori yang lebih mendasar yang menjelaskan keberadaannya, bersama dengan partikel elektron, quark, foton, dan W dan Z? Kita akan dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan ini hanya dengan melakukan eksperimen untuk mencari tahu.

Saya pribadi tidak dapat melihat bagaimana orang dapat gagal terpesona pada dualitas yang mencolok ini antara fisika superkonduktivitas dan apa yang dapat menjelaskan asal mula semua massa di alam semesta. Tetapi menghargai penyatuan intelektual yang luar biasa ini dan ingin membayar untuk mempelajarinya adalah dua hal yang berbeda. Ini akan, bagaimanapun, memakan biaya hingga 10 miliar dolar tersebar selama sepuluh tahun untuk membangun LHC. Isu sebenarnya apakah membangun LHC bukanlah sesuatu yang ilmiah—tidak ada individu yang mendapat informasi yang benar dapat meragukan kelayakan ilmiah dari proyek tersebut. Ini adalah pertanyaan politik: Bisakah kita menjadikannya prioritas di saat sumber daya terbatas?

Sebagaimana yang saya tekankan pada awal buku ini, saya percaya bahwa pembenaran utama dari kemajuan dalam pengetahuan di SSC adalah budaya, bukan teknologi. Kita tidak berbicara banyak tentang fasilitas pipa dari Yunani kuno, tetapi kita ingat cita-cita filosofis dan ilmiah yang ditetapkan di sana. Ini telah disaring melalui budaya popu-

ler kita, membantu membentuk institusi yang kita gunakan untuk mengatur diri kita sendiri dan metode yang kita gunakan untuk mengajar anak-anak kita. Partikel Higgs, jika ditemukan, tidak akan mengubah kehidupan kita sehari-hari. Tapi saya yakin bahwa gambaran itu adalah bagian dari kehendak memengaruhi generasi masa depan, jika hanya dengan menggairahkan rasa ingin tahu dari beberapa orang muda, menyebabkan mereka mungkin memilih karir dalam sains atau teknologi. Saya diingatkan di sini tentang pernyataan yang dikaitkan dengan Robert Wilson, direktur pertama fasilitas Fermilab besar yang saat ini menempati akselerator berenergi tertinggi di dunia. Ketika ditanya apakah fasilitas ini akan berkontribusi pada pertahanan nasional, ia menjawab, "Tidak, tetapi itu akan membantu menjaga negara ini layak untuk dipertahankan."

REALITAS-REALITAS TERSEMBUNYI

Kita tidak akan berhenti dari eksplorasi
Dan akhir dari semua penjelajahan kita
Akan tiba di tempat kita mulai
Dan tahu tempat itu untuk pertama kalinya.
-T. S. Eliot,
"Little Gidding," Four Quartets

Anda bangun di pagi yang dingin dan melihat ke luar jendela. Tetapi Anda tidak melihat sesuatu yang akrab. Dunia penuh dengan pola-pola aneh. Butuh satu detik untuk menyadari bahwa Anda melihat es di jendela, yang tiba-tiba fokus ke tempatnya. Pola rumit yang memantulkan sinar matahari kemudian mulai memikat Anda.

Museum sains menyebutnya sebagai pengalaman "aha". Mistik mungkin memiliki nama lain untuk itu. Pengaturan ulang dunia yang tiba-tiba ini, gestalt[15] baru ini, ketika

[15] Gestalt adalah teori yang menjelaskan proses persepsi melalui pe-

data yang berbeda bergabung untuk membentuk pola baru, menyebabkan Anda melihat hal-hal lama yang sama lagi dalam cahaya yang sama sekali baru, hampir mendefinisikan kemajuan dalam fisika. Setiap kali kita telah mengupas lapisan lain, kita telah menemukan bahwa apa yang tersembunyi sering menutupi kesederhanaan yang mendasarinya. Tanda yang biasa? Hal-hal tanpa koneksi yang jelas dapat diakui sebagai satu dan sama.

Perkembangan utama dalam fisika abad ke-20 sesuai dengan tradisi ini, mulai dari penemuan-penemuan Einstein yang mempesona tentang ruang, waktu, dan alam semesta, sampai pentingnya menggambarkan bagaimana bubur gandum terebus. Dalam membahas 'realitas tersembunyi' ini, saya tidak ingin terjebak dalam argumen filosofis tentang sifat alamiah yang hakiki. Ini adalah jenis diskusi yang cenderung menegaskan pandangan umum saya tentang filsafat, yang paling baik diungkapkan oleh filsuf dan ahli logika abad kedua puluh, Ludwig Wittgenstein: "Kebanyakan proposisi dan pertanyaan yang telah ditulis tentang hal-hal filosofis tidak salah, tetapi tidak masuk akal."[16]

Bertanya-tanya, misalnya, seperti yang dilakukan Plato, apakah ada realitas eksternal, dengan keberadaan yang independen dari kemampuan kita untuk mengukurnya, dapat membuat diskusi panjang dan tidak banyak lagi. Setelah mengatakan ini, saya ingin menggunakan ide yang dikembangkan Plato dalam alegori gua yang terkenal—sebagian

ngorganisasian komponen-komponen sensasi yang memiliki hubungan, pola, ataupun kemiripan menjadi satu-kesatuan. [pen.]

[16] Ludwig Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus*, (Lon- don: Routledge and Kegan Paul, 1958).

karena itu membantu saya tampil wawas-literatur, tetapi yang lebih penting, hal itu memungkinkan saya untuk memberikan alegori saya sendiri.

Plato mengibaratkan tempat kita dalam skema besar hal-hal untuk seseorang yang tinggal di sebuah gua, yang seluruh gambar realitasnya berasal dari bayangan-bayangan yang terlempar pada dinding—dari 'objek nyata' yang ada selamanya dalam cahaya siang hari, di luar pandangan orang. Dia berpendapat bahwa kita, juga, seperti orang di dalam gua, dikutuk hanya untuk menggores permukaan realitas melalui batas-batas indra kita.

Seseorang dapat membayangkan kesulitan yang ada dalam kehidupan narapidana gua. Bayangan memberi refleksi yang buruk dari dunia. Namun demikian, kita juga bisa membayangkan saat-saat inspirasi. Katakanlah bahwa setiap Minggu malam sebelum matahari terbenam, bayangan berikut tercermin di dinding (lihat Gambar 16).



Gambar 16: Bayangan yang tercermin di dinding.

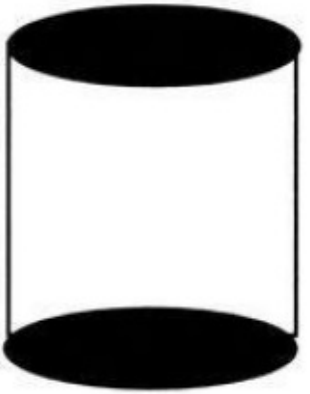
Dan setiap Senin malam, gambar di bawah menggantikannya (lihat Gambar 17).



Gambar 17: Pada Senin malam gambar menjadi berbentuk cakram.

Terlepas dari kemiripannya yang luar biasa dengan seekor sapi, ini benar-benar merupakan gambaran dari sesuatu yang lain. Minggu sebelum dan minggu sesudah keluar gambar yang sama akan dicerminkan ke dinding, tanpa henti berubah dan muncul kembali dengan keteraturan jam. Akhirnya pada hari Senin pagi, bangun lebih awal dari biasanya, tahanan kita juga akan mendengar suara truk yang digabungkan dengan bunyi logam. Menjadi seorang wanita dengan imajinasi yang luar biasa, dikombinasikan dengan bakat matematika, dia memiliki visi baru yang tiba-tiba muncul di kepalanya: Ini bukan objek yang berbeda! Mereka satu dan sama. Menambahkan dimensi baru ke imajinasinya, dia bisa membayangkan objek yang diperluas sebenarnya, tong sampah (lihat Gambar 18).

Berdiri tegak pada Minggu malam, dengan matahari



Gambar 18: Objek lama yang diperluas, yang dapat dikatakan sebagai tong sampah.

rendah di langit tepat di belakangnya, itu akan tercetak gambar persegi panjang. Pada hari Senin, setelah dilemparkan pada pihaknya oleh para kolektor, itu akan tercetak gambar lingkaran. Objek tiga dimensi mungkin, jika dilihat dari sudut yang berbeda, memberikan proyeksi dua dimensi yang sangat berbeda. Dengan lompatan inspirasi ini, tidak hanya teka-teki yang terpecahkan, tetapi fenomena yang berbeda sekarang dapat dipahami untuk mewakili refleksi yang berbeda dari hal yang sama.

Karena penataan kembali seperti itu, fisika tidak berkembang sebagai roda di dalam roda; kompleksitas yang lebih besar tidak selalu mengikuti dari detail yang lebih halus. Lebih sering, penemuan baru mencerminkan pergeseran tiba-tiba dalam persepsi seperti dalam contoh gua.

Terkadang realitas tersembunyi yang terekspos menghubungkan ide-ide sebelumnya yang berbeda, menciptakan lebih sedikit dari yang lain. Kadang-kadang, sebaliknya, mereka menghubungkan sejumlah fisis yang berbeda dan dengan demikian membuka bidang-bidang penyelidikan dan pemahaman baru.

Saya telah memperkenalkan penyatuan yang mewartakan era fisika modern: pencapaian intelektual peninggalan James Clerk Maxwell abad kesembilan belas, teori elektromagnetik dan, dengan itu, 'prediksi' tentang keberadaan cahaya. Adalah tepat bahwa dalam kisah Kejadian *(Genesis)*, cahaya diciptakan sebelum yang lainnya. Ini juga merupakan pintu masuk ke fisika modern. Perilaku aneh cahaya menyebabkan Einstein berspekulasi tentang hubungan baru antara ruang dan waktu. Hal ini juga menyebabkan para pendiri mekanika kuantum untuk menemukan kembali aturan perilaku pada skala kecil, untuk mengakomodasi kemungkinan bahwa gelombang dan partikel kadang-kadang bisa menjadi hal yang sama. Akhirnya, teori kuantum cahaya yang diselesaikan pada pertengahan abad ini membentuk dasar pemahaman kita saat ini tentang semua kekuatan yang diketahui di alam, termasuk penyatuan luar biasa antara elektromagnetik dan interaksi yang lemah dalam dua puluh lima tahun terakhir. Pemahaman cahaya itu sendiri dimulai dengan realisasi yang lebih mendasar bahwa dua gaya yang sangat berbeda, kelistrikan dan kemagnetan, benar-benar satu dan sama.

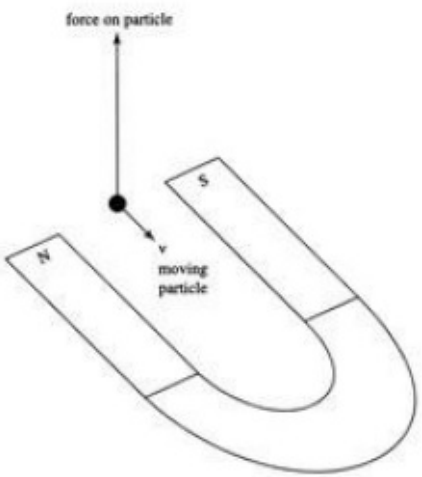
Sebelumnya saya membuat sketsa tentang penemuan Faraday dan Henry yang membangun hubungan antara lis-

trik dan magnet, tetapi saya rasa ini tidak memberi Anda gambaran langsung tentang kedalaman atau asal dari koneksi seperti yang saya inginkan. Sebaliknya, eksperimen pikiran menunjukkan langsung bagaimana bisa listrik dan magnetisme adalah aspek yang benar-benar berbeda dari hal yang sama. Sejauh yang saya tahu, eksperimen pikiran ini tidak pernah benar-benar dilakukan sebelum penemuan eksperimental yang mengarah pada wawasan, tetapi, dengan melihat ke belakang, itu sangat sederhana.

Percobaan atau eksperimen pikiran merupakan bagian penting dalam menjalankan fisika karena mereka memungkinkan Anda untuk 'menyaksikan' peristiwa dari perspektif yang berbeda pada saat yang bersamaan. Anda mungkin ingat film klasik *Rashomon* Akira Kurosawa, di mana satu peristiwa dilihat beberapa kali dan ditafsirkan secara terpisah oleh masing-masing orang yang hadir. Setiap perspektif yang berbeda memberi kita petunjuk baru untuk mendapatkan hubungan yang lebih luas, mungkin lebih obyektif, di antara peristiwa-peristiwa itu. Karena tidak mungkin bagi seorang pengamat untuk memiliki dua titik pandang sekaligus, fisikawan mengambil keuntungan dari eksperimen pikiran jenis yang akan saya jelaskan, mengikuti tradisi yang didirikan oleh Galileo dan mendapati kesempurnaannya di tangan Einstein.

Untuk melakukan eksperimen pikiran ini, ada dua fakta yang perlu Anda ketahui. Yang pertama adalah bahwa satu-satunya gaya sebuah partikel bermuatan saat diam terasa, selain gravitasi, adalah gaya listrik. Anda dapat menempatkan magnet terkuat di dunia di samping partikel

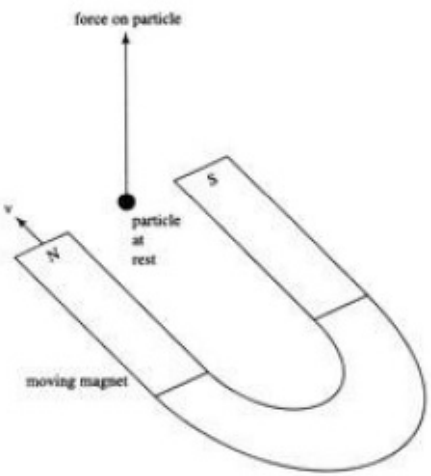
semacam itu dan itu hanya akan tetap diam di sana, tidak sadar. Di sisi lain, jika Anda memindahkan partikel bermuatan di hadapan magnet, partikel akan mengalami gaya yang mengubah geraknya. Ini disebut gaya Lorentz, merujuk fisikawan Belanda Henrik Lorentz, yang nyaris merumuskan relativitas khusus sebelum Einstein. Ini memiliki bentuk yang paling aneh. Jika partikel bermuatan bergerak secara horizontal di antara kutub magnet, seperti ditunjukkan di bawah ini, gaya pada partikel akan ke atas, tegak lurus dengan gerak aslinya, seperti ditunjukkan pada Gambar 19.



Gambar 19: Arah gaya pada partikel saat partikel bermuatan bergerak secara horizontal di antara kutub magnet.

Dua fitur umum ini cukup untuk memungkinkan kita mendemonstrasikan bahwa gaya listrik untuk satu orang

adalah gaya magnet yang lain. Listrik dan magnet dengan demikian terkait erat dengan lingkaran dan persegi panjang di dinding gua. Untuk melihat ini, perhatikan partikel di diagram sebelumnya. Jika kita mengamatinya di laboratorium, melihatnya bergerak dan dibelokkan, kita tahu gaya yang bekerja padanya adalah gaya magnet Lorentz. Tetapi bayangkan bahwa Anda berada di laboratorium bergerak dengan kecepatan konstan *bersama dengan* partikel. Dalam hal ini, partikel tidak akan bergerak relatif terhadap Anda, tetapi magnet akan tetap relatif terhadap Anda. Anda malah akan melihat seperti Gambar 20.



Gambar 20: Arah gaya pada partikel saat bergerak bersama dengan partikel dengan kecepatan kostan.

Karena partikel bermuatan saat diam hanya dapat merasakan gaya listrik, gaya yang bekerja pada partikel dalam kerangka ini harus listrik. Juga, karena Galileo kita telah mengetahui bahwa hukum-hukum fisika harus tampak sama untuk dua pengamat yang bergerak dengan kecepatan relatif konstan. Dengan demikian, tidak ada cara untuk membuktikan, tentu saja, bahwa partikel yang bergerak dan magnet yang berdiri diam, atau sebaliknya. Sebaliknya, kita hanya dapat menyimpulkan bahwa partikel dan magnet bergerak relatif terhadap satu sama lain. Tapi kita baru saja melihat bahwa dalam kerangka di mana magnet diam dan partikel bergerak, partikel akan dibelokkan ke atas karena gaya magnet. Dalam kerangka lain, di mana partikel sedang diam, gerak ke atas ini harus dikaitkan dengan gaya listrik. Seperti yang dijanjikan, gaya magnet satu orang adalah gaya listrik orang lain. Listrik dan magnet adalah 'bayangan' yang berbeda dari gaya tunggal, elektromagnetik, seperti yang dilihat dari titik pandang yang berbeda, yang bergantung pada keadaan relatif Anda dari gerak!

Selanjutnya saya ingin melompat ke masa sekarang, untuk melihat bagaimana perkembangan fisika yang jauh lebih baru—yang terjadi dalam dua puluh lima tahun terakhir dan yang saya singgung pada akhir bab terakhir—melihat dalam cahaya ini. Ketika saya membahas hubungan mengejutkan antara superkonduktivitas dan Supercollider, saya menggambarkan bagaimana orang dapat memahami asal mula massa itu sendiri sebagai 'kecelakaan' dari keadaan kita yang terbatas. Yaitu, kita mengasosiasikan massa hanya dengan beberapa partikel karena fakta bahwa kita mungkin

hidup di tengah 'medan' latar belakang universal yang secara istimewa 'menghambat' gerak mereka sehingga membuat mereka tampak berat. Saya mengingatkan Anda bahwa hal yang sama terjadi pada cahaya dalam superkonduktor. Jika kita hidup di dalam superkonduktor, kita akan berpikir bahwa pembawa cahaya, foton, sangat besar. Karena kita tidak demikian, kita memahami bahwa satu-satunya alasan cahaya tampak besar di dalam superkonduktor adalah karena interaksinya dengan keadaan materi tertentu di dalamnya.

Begini triknya. Terjebak dalam gua metaforis, seperti superkonduktor, bagaimana kita dapat membuat lompatan inspirasi untuk menyadari apa yang sebenarnya ada di luar lingkup pengalaman kita yang terbatas dengan cara yang mungkin menyatukan fenomena yang berbeda dan tampaknya tidak berhubungan? Saya pikir tidak ada aturan universal, tetapi ketika kita membuat lompatan, semuanya menjadi fokus dengan sangat jelas sehingga kita tahu kita telah melakukan hal yang benar.

Lompatan seperti itu dimulai pada akhir 1950-an, dan berakhir pada awal 1970-an dalam fisika partikel. Perlahan-lahan menjadi jelas bahwa teori yang mencapai penyelesaian setelah diskusi di Shelter Island, yang melibatkan mekanika kuantum elektromagnetik, mungkin juga membentuk dasar teori kuantum dari gaya lain yang dikenal di alam. Seperti yang saya tunjukkan sebelumnya, kerangka kerja matematika di belakang elektromagnetik dan interaksi lemah yang bertanggung jawab untuk sebagian besar reaksi nuklir sangat mirip. Satu-satunya perbedaan adalah partikel yang mentransmisikan gaya lemah itu berat, dan foton, pembawa

elektromagnetik, tidak bermassa. Bahkan, hal itu ditunjukkan pada tahun 1961 oleh Sheldon Glashow bahwa dua gaya yang berbeda ini sebenarnya bisa disatukan menjadi satu teori di mana gaya elektromagnetik dan gaya lemah adalah manifestasi yang berbeda dari hal yang sama, tetapi untuk masalah perbedaan massa yang besar antara partikel yang mentransmisikan gaya-gaya ini, foton dan partikel W dan Z.

Setelah diakui, bagaimanapun, bahwa ruang itu sendiri dapat bertindak seperti superkonduktor yang luas, dalam arti bahwa latar belakang 'medan' secara efektif dapat membuat partikel 'bertindak' masif, hal itu diajukan, pada tahun 1967, oleh Steven Weinberg dan, secara mandiri, Abdus Salam, bahwa inilah yang terjadi pada partikel W dan Z, seperti yang saya jelaskan di akhir bab terakhir.

Apa yang menarik di sini bukanlah mekanisme untuk memberikan massa partikel W dan Z telah ditemukan, tetapi tanpa mekanisme seperti itu, sekarang dipahami bahwa gaya lemah dan elektromagnetik hanyalah manifestasi yang berbeda dari suatu kejadian yang sama secara teori fisis. Sekali lagi, perbedaan besar yang diamati antara dua gaya di alam adalah kecelakaan dari situasi kita. Jika kita tidak hidup di ruang yang diisi oleh partikel koheren yang sesuai, elektromagnetik dan interaksi lemah akan tampak sama. Entah bagaimana itu dikelola, dari refleksi yang berbeda di dinding, untuk menemukan kesatuan mendasar yang hadir di luar bukti langsung dari indra kita.

Pada tahun 1971, fisikawan Belanda Gerard 't Hooft, yang kemudian menjadi mahasiswa pascasarjana, menun-

jukkan bahwa mekanisme yang diusulkan untuk memberikan massa W dan Z secara matematis dan fisis konsisten. Pada tahun 1979, Glashow, Salam, dan Weinberg dianugerahi Hadiah Nobel untuk teori mereka, dan pada tahun 1984, partikel-partikel yang mentransmisikan gaya lemah, partikel W dan Z, ditemukan secara eksperimental pada akselerator besar di *Centre Européen pour Recherche Nucléaire* (CERN) di Jenewa, dengan massa yang diprediksi. Dan akhirnya, pada tahun 1999 't Hooft sendiri, bersama dengan supervisor tesis, Martinus Veltman, dianugerahi Hadiah Nobel untuk karya asli mereka yang menunjukkan teori Glashow-Weinberg-Salam ternyata benar-benar masuk akal.

Hal tersebut bukan satu-satunya hasil dari perspektif baru ini. Keberhasilan melihat gaya lemah dan elektromagnetik dalam satu kerangka kerja yang keduanya meniru dan memperluas teori kuantum elektromagnetik 'sederhana' memberikan motivasi untuk mempertimbangkan apakah semua gaya di alam bisa jatuh dalam kerangka ini. Teori interaksi kuat, dikembangkan dan dikonfirmasi setelah penemuan teoretis tentang kebebasan asimtotik yang saya jelaskan di Bab 1, adalah bentuk umum yang sama persis, yang dikenal sebagai teori 'tera'. Bahkan nama ini memiliki sejarah mendalam dalam gagasan melihat gaya yang berbeda sebagai manifestasi berbeda dari fisika dasar yang sama. Kembali pada tahun 1918, fisikawan / matematikawan Herman Weyl menggunakan salah satu dari banyak kesamaan antara gravitasi dan elektromagnetik untuk mengusulkan bahwa mereka mungkin bersatu bersama menjadi satu teori. Dia menyebut fitur yang menghubungkan kedua-

nya dengan simetri tera (*gauge symmetry*)—terkait dengan fakta bahwa dalam relativitas umum, seperti yang akan segera kita lihat, ukuran, atau skala panjang, penggaris lokal yang digunakan oleh pengamat yang berbeda dapat bervariasi secara acak tanpa memengaruhi sifat dasar dari gaya gravitasi. Perubahan matematis yang serupa dapat diterapkan pada cara pengamat yang berbeda mengukur muatan listrik dalam teori elektromagnetik. Proposal Weyl, yang terkait elektromagnetik dan gravitasi klasik, tidak berhasil dalam bentuk aslinya. Namun, aturan matematikanya ternyata memainkan peran penting dalam teori kuantum elektromagnetik, dan ciri inilah yang dibagi bersama dalam teori interaksi lemah dan kuat. Ternyata ini juga terkait erat dengan banyak upaya saat ini untuk mengembangkan teori gravitasi kuantum dan menyatukannya dengan gaya lain yang diketahui.

Teori 'elektro-lemah', seperti yang sekarang dikenal, bersama dengan teori interaksi kuat yang didasarkan pada kebebasan asimtotik, bersama-sama menjadi dikenal sebagai Model Standar (*Standard Model*) dalam fisika partikel. Semua percobaan yang ada yang telah dilakukan dalam dua puluh tahun terakhir telah sesuai dengan prediksi teori-teori ini. Semua yang tersisa untuk melengkapi penyatuan interaksi lemah dan elektromagnetik secara khusus adalah untuk menemukan sifat yang tepat dari keadaan kuantum latar belakang koheren yang mengelilingi kita dan yang kita yakini memberikan massa ke W dan Z. Kita juga ingin tahu apakah fenomena yang sama ini bertanggung jawab untuk memberikan massa kepada semua partikel yang teramati

di alam. Inilah yang kita harapkan dari apa yang akan dilakukan LHC.

Sebagai seorang fisikawan teoretis, saya dengan mudah merasa senang dengan kenyataan-kenyataan yang mencolok ini, jika esoteris[17], tersembunyi dalam dunia fisika partikel. Namun saya tahu dari percakapan dengan istri saya bahwa ini mungkin tampak terlalu dihilangkan dari kehidupan sehari-hari bagi kebanyakan orang agar mereka merasa nyaman. Namun demikian, mereka sebenarnya terkait langsung dengan keberadaan kita sendiri. Jika partikel yang diketahui tidak mendapatkan massa yang tepat, dengan neutron menjadi hanya satu bagian dalam seribu lebih berat daripada proton, kehidupan seperti yang kita tahu itu tidak akan mungkin. Fakta bahwa proton lebih terang dari neutron, hal itu mengartikan bahwa proton stabil, setidaknya pada skala waktu dari masa sekarang di alam semesta. Jadi, hidrogen, terbuat dari satu proton dan satu elektron dan unsur paling melimpah di alam semesta serta menjadi bahan bakar bintang seperti matahari kita dan dasar molekul organik, adalah stabil. Selain itu, jika perbedaan massa antara neutron dan proton berbeda, ini akan mengubah keseimbangan sensitif di alam semesta awal yang menghasilkan semua elemen cahaya yang kita lihat. Kombinasi unsur-unsur cahaya ini berkontribusi pada evolusi bintang-bintang pertama yang terbentuk, yang tidak hanya berkontribusi pada pembentukan matahari kita sendiri sekitar 5 miliar hingga 10 miliar tahun kemudian tetapi juga menghasilkan

[17] Esoteris berarti suatu hal yang diajarkan atau dapat dimengerti oleh sekelompok orang tertentu dan khusus, dapat juga berarti suatu hal yang susah untuk dipahami. Dari: merriam-webster.

semua materi di dalam tubuh kita. Tidak pernah berhenti membuat saya takjub bahwa setiap atom dalam tubuh kita sendiri berasal dari tungku api dari bintang yang meledak jauh! Dalam pengertian langsung ini, kita semua adalah anak-anak bintang. Dalam pembuluh darah yang terkait, di inti matahari kita, itu adalah perbedaan massa antara partikel-partikel elementer yang menentukan laju reaksi-reaksi penghasil energi di sana yang memicu keberadaan kita sendiri. Akhirnya, massa partikel-partikel elementer ini bergabung bersama untuk menghasilkan pembacaan pada timbangan kamar mandi kita yang banyak dari kita takut menginjaknya.

Sekuat hubungan antara dunia partikel dan kita sendiri, kemajuan fisika abad ke-20 belum terbatas pada memberikan perspektif baru hanya pada fenomena di luar persepsi langsung kita. Saya ingin kembali, secara bertahap, dari skala ekstrem yang telah saya diskusikan kepada orang-orang yang lebih akrab.

Tidak ada yang lebih langsung daripada persepsi kita tentang ruang dan waktu. Ini merupakan bagian penting dari perkembangan kognitif manusia. Tonggak terkenal dalam perilaku hewan dikategorikan oleh perubahan persepsi spasial dan temporal. Sebagai contoh, seekor anak kucing akan berjalan tanpa malu di atas sebuah lubang Plexiglas-berlapis sampai suatu usia tertentu di mana hewan mulai menghargai makna berbahaya dari ruang kosong di bawah kakinya. Jadi, semua yang lebih luar biasa yang harus kita temukan, pada awal abad ke-20, ruang dan waktu itu terhubung erat dengan cara yang sebelumnya tidak dicurigai.

Hanya sedikit yang akan membantah bahwa penemuan Albert Einstein tentang hubungan ini melalui teori relativitas khusus dan umumnya merupakan salah satu pencapaian intelektual terkemuka di zaman kita. Dengan melihat ke belakang, jelas bahwa lompatannya sangat mirip dengan penghuni gua kita.

Sebagaimana telah saya bahas, Einstein mendasarkan teori relativitasnya pada keinginan untuk mempertahankan konsistensi dengan teori elektromagnetik Maxwell. Dalam teori yang terakhir ini, saya mengingatkan Anda bahwa kecepatan cahaya dapat diturunkan secara apriori dalam dua konstanta fundamental di alam: kekuatan gaya listrik antara dua muatan dan kekuatan gaya magnet antara dua magnet. Relativitas Galilean menyiratkan bahwa ini harus sama untuk dua pengamat yang berjalan dengan kecepatan konstan relatif terhadap satu sama lain. Tetapi ini akan mengimplikasikan bahwa semua pengamat harus mengukur kecepatan cahaya agar sama, terlepas dari kecepatan (konstan) mereka atau kecepatan sumber cahaya. Jadi, Einstein tiba pada postulat fundamentalnya tentang relativitas: Kecepatan cahaya dalam ruang kosong (hampa) adalah konstanta universal, tidak bergantung pada kecepatan sumber atau pengamat.

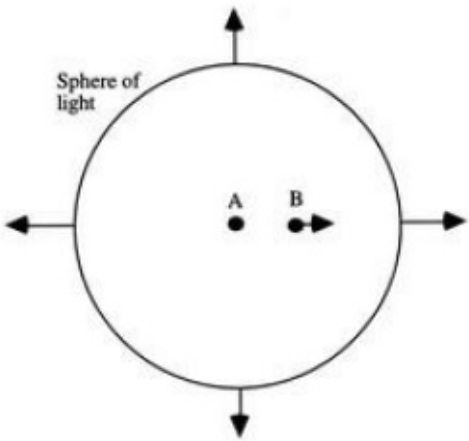
Dalam hal absurditas intuitif dari postulat ini belum sepenuhnya menjelaskan tentang hal di sekitar kita, izinkan saya memberi Anda contoh lain dari apa yang menjadi implikasinya. Untuk merebut Gedung Putih pada masa-masa ini, tampaknya penting bagi partai politik yang menang untuk menunjukkan bahwa itu mencakup pusat, sementara

partai lainnya berada di kanan atau kiri pusat. Oleh karena itu, beberapa ketidakpercayaan menggiurkan ketika, sebelum pemilihan, kedua pihak mengklaim telah merebut pusat tersebut. Postulat Einstein, bagaimanapun, membuat klaim seperti itu menjadi mungkin!

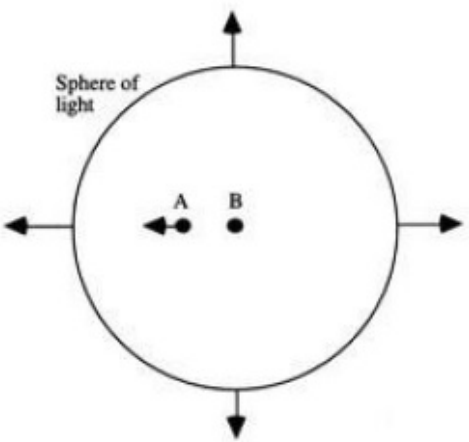
Bayangkan dua pengamat dalam gerak relatif yang lewat satu sama lain pada saat itu salah satu dari mereka menyalakan lampu. Cangkang cahaya bulat akan bergerak ke segala arah untuk menerangi malam. Cahaya berjalan sangat cepat sehingga kita biasanya tidak sadar akan waktu yang diperlukan untuk bergerak keluar dari sumber, tetapi memang demikian. Pengamat, A, yang diam terhadap bola lampu, akan melihat yang berikut segera setelah menyalakan lampu (lihat Gambar 21).

Dia akan melihat dirinya sendiri di pusat bola cahaya, dan pengamat B, yang bergerak ke kanan relatif terhadapnya, akan bergerak agak jauh pada waktu ia membawa cahaya untuk menyebar ke posisinya sekarang. Pengamat B, di sisi lain, akan mengukur sinar cahaya yang sama yang bergerak ke luar karena memiliki kecepatan tetap yang sama dengan dia dan dengan demikian melakukan perjalanan jarak yang sama ke luar relatif terhadapnya, dengan postulat Einstein. Dengan demikian, ia akan melihat *dirinya sendiri* berada di pusat bola, dan A telah pindah ke kiri pusat seperti Gambar 22.

Dengan kata lain, kedua pengamat akan mengklaim berada di pusat bola. Intuisi kita mengatakan ini tidak mungkin. Tapi, tidak seperti politik, dalam hal ini kedua protagonis sebenarnya *berada di* pusat! Mereka pasti seakan



Gambar 21: Pengamat A diam terhadap bola lampu.



Gambar 22: A telah pindah ke kiri pusat.

Einstein benar.

Bagaimana ini bisa terjadi? Hanya jika masing-masing pengamat entah bagaimana mengukur ruang dan waktu secara berbeda. Kemudian sementara seorang pengamat mempersepsikan bahwa jarak antara dirinya dan semua titik pada lingkup cahaya adalah sama dan jarak antara pengamat lain dan bola kurang dalam satu arah dan lebih besar di yang lain, pengamat lain dapat mengukur hal-hal yang sama dan sampai pada jawaban yang berbeda. Absolutisme ruang-waktu telah diperdagangkan untuk absolutisme kecepatan cahaya. Ini mungkin, dan faktanya semua paradoks yang ditimbulkan oleh relativitas pada kita adalah mungkin, karena informasi kita tentang peristiwa *jarak jauh* secara tidak langsung. Kita tidak bisa berada di sana-sini pada waktu yang sama. Satu-satunya cara kita dapat mengetahui apa yang terjadi *di sana sekarang* adalah menerima sinyal, seperti sinar cahaya. Tetapi jika kita menerimanya *sekarang*, itu dipancarkan *kemudian*.

Kita tidak terbiasa berpikir seperti ini, karena kecepatan cahaya begitu besar sehingga intuisi kita memberi tahu kita bahwa peristiwa-peristiwa terdekat yang kita saksikan sekarang benar-benar terjadi sekarang. Tapi ini hanya kebetulan dari situasi kita. Namun demikian, itu sangat meresapi ketaksengajaan yang Einstein tidak miliki, yakni masalah mendasar elektromagnetik untuk membimbingnya dalam berpikir tentang cahaya, mungkin tidak ada cara dia bisa 'melihat' di luar refleksi gua yang kita sebut sekarang.

Ketika Anda mengambil gambar dengan kamera Anda, Anda terbiasa membayangkannya sebagai potret tepat

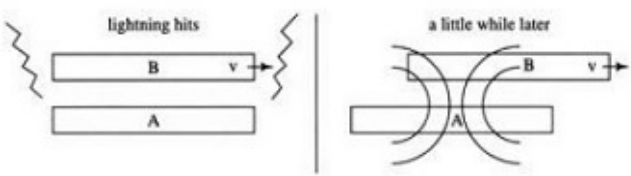
waktu: Ini adalah saat anjing melompat ke Lilli ketika dia sedang menari. Namun ini tidak sepenuhnya benar. Itu memang mewakili keadaan instan/sesaat, tetapi tidak pada waktunya. Cahaya yang diterima di kamera pada saat film merekam gambar pada titik yang berbeda pada film yang dipancarkan pada waktu yang berbeda, dengan titik-titik yang menampilkan objek paling jauh dari kamera memancarkan cahaya mereka paling awal. Dengan demikian, foto bukanlah potongan waktu, melainkan serangkaian irisan di ruang pada waktu yang berbeda.

Sifat ruang yang 'timelike'[18] ini biasanya tidak dirasakan karena perbedaan antara skala spasial manusia dan jarak cahaya dapat bergerak dalam skala waktu manusia. Misalnya, dalam seperseratus detik, lamanya waktu pemotretan konvensional, cahaya bergerak sekitar 3.000 kilometer, atau hampir jarak di Amerika Serikat! Namun demikian, meskipun tidak ada kamera yang memiliki kedalaman bidang seperti itu, *sekarang*, sebagaimana ditangkap dalam foto, tidak mutlak dalam arti apa pun. Ini unik bagi pengamat yang mengambil gambar. Ini mewakili 'di sini dan sekarang' dan 'di sana dan kemudian' untuk setiap pengamat yang berbeda. Hanya pengamat yang berada di tempat yang sama *di sini* yang dapat mengalami hal yang sama *sekarang*.

Relativitas mengatakan kepada kita bahwa, pada kenyataannya, pengamat yang bergerak relatif terhadap satu sama lain *tidak dapat* mengalami hal yang sama *sekarang*, bahkan

[18] Dalam percakapan dan pembahasan akademik kata *timelike* sering kali disebut sebagai *bak waktu*. [pen.]

jika mereka berdua *di sini* pada saat yang sama. Ini karena persepsi mereka tentang apa yang 'di sana dan kemudian' akan berbeda. Biarkan saya memberi Anda sebuah contoh. Meskipun saya tidak bermaksud untuk mengulangi semua presentasi standar dalam teks dasar tentang relativitas, saya akan menggunakan satu contoh yang terkenal di sini karena ini adalah berkat Einstein, dan saya belum pernah melihat yang lebih baik. Katakanlah bahwa dua pengamat berada di dua kereta yang berbeda, bergerak di trek paralel dengan kecepatan konstan terhadap satu sama lain. Tidak masalah siapa yang sebenarnya bergerak, karena tidak ada cara untuk mengatakannya, dalam arti yang mutlak. Katakanlah bahwa pada saat ini kedua pengamat, yang terletak di pusat kereta masing-masing, saling berpapasan, tersambar petir. Selain itu, katakan bahwa itu menyambar *dua kali*, sekali di depan dan satu kali di belakang kereta. Pertimbangkan pandangan pengamat A pada saat dia melihat gelombang cahaya karena kilatannya (lihat Gambar 23).

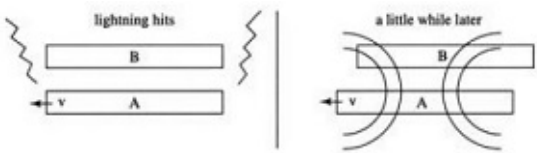


Gambar 23: Sambaran petir di depan dan di belakang kereta.

Karena dia mengamati kilat secara bersamaan dari kedua ujung kereta, dan dia berada di tengah-tengah kereta, dia

tidak akan punya pilihan selain menyimpulkan bahwa kedua kedipan terjadi pada waktu yang sama, yang bisa dia sebut sebagai *sekarang* meskipun sebenarnya *kemudian*. Selain itu, karena pengamat B sekarang di sebelah kanan A, B akan melihat cahaya kilat dari kilatan petir sisi kanan sebelum dia melihat kilat dari sisi kiri.

Ini biasanya tidak mengganggu siapa pun, karena kita semua akan menganggap perbedaan waktu pengamatan untuk B dengan fakta bahwa ia bergerak menuju satu sumber cahaya dan menjauh dari satu sumber cahaya lain. Namun, Einstein mengatakan kepada kita bahwa tidak ada cara bagi B untuk mengamati efek semacam itu. Kecepatan kedua sinar cahaya ke arahnya akan sama jika dia tidak bergerak sama sekali. Dengan demikian, B akan 'mengamati' hal-hal berikut, lihat Gambar 24.



Gambar 24: Kejadian yang diamati oleh B.

Dari sini, B akan menarik kesimpulan—karena (a) ia melihat satu kilat di depan yang lain, (b) cahaya dipancarkan dari salah satu ujung kereta di mana ia duduk di tengah, dan (c) cahaya sedang melaju di kecepatan yang sama di kedua arah—bahwa kilatan di sebelah kanan terjadi sebelum cahaya kilat di sebelah kiri. Dan baginya, itu benar-benar

terjadi! Tidak ada eksperimen yang dapat dilakukan A atau B yang akan menunjukkan sebaliknya. Baik A dan B akan setuju tentang fakta bahwa B melihat kilat yang tepat sebelum kilat sebelah kiri (mereka tidak dapat tidak setuju tentang apa yang terjadi pada satu titik di ruang pada satu keadaan sesaat), tetapi mereka akan memiliki penjelasan yang berbeda. Setiap penjelasan akan menjadi dasar dari setiap orang *sekarang*. Jadi, *sekarang* ini harus berbeda. Peristiwa jarak jauh yang simultan untuk satu pengamat tidak perlu simultan untuk yang lain.

Percobaan pikiran yang sama mendorong Einstein untuk menunjukkan bahwa dua segi lain dari gambaran kita tentang ruang absolut dan waktu mutlak harus diruntuhkan bagi pengamat yang bergerak relatif terhadap satu sama lain. A akan 'mengamati' jam B untuk berjalan lambat, dan B akan 'mengamati' jam A untuk berjalan lambat. Selain itu, A akan 'mengamati' kereta B agar lebih pendek dari miliknya, dan B akan 'mengamati' kereta A agar lebih pendek dari miliknya.

Supaya pembaca tidak berpikir bahwa ini hanyalah paradoks persepsi, biarkan saya menjelaskan bahwa mereka tidak mengalami. Setiap pengamat akan *mengukur* berlalunya waktu untuk menjadi berbeda dan akan *mengukur* panjang menjadi berbeda. Karena, dalam fisika, pengukuran menentukan realitas, dan kita tidak khawatir tentang realitas yang melampaui ukuran, ini berarti bahwa hal-hal ini *benar-benar* terjadi. Bahkan, mereka terjadi setiap hari dengan cara yang bisa kita ukur. Sinar kosmik yang membombardir Bumi setiap detik dari angkasa mengandung partikel-partikel de-

ngan energi sangat tinggi, berjalan sangat dekat dengan kecepatan cahaya. Ketika mereka mencapai atmosfer lebih tinggi, mereka bertabrakan dengan inti atom di udara dan 'memecah' menjadi hujan partikel-partikel elementer yang lebih ringan. Salah satu partikel paling umum yang dihasilkan dengan cara ini disebut *muon*. Partikel ini hampir identik dengan elektron familiar yang membentuk bagian terluar atom, kecuali yang lebih berat. Kita saat ini tidak tahu mengapa persis eksistensi elektron, mendorong fisikawan Amerika terkemuka I. I. Rabi untuk memprotes, "Siapa yang memerintahkan itu?" Ketika *muon* ditemukan. Dalam hal apapun, *muon*, karena lebih berat dari elektron, dapat meluruh menjadi elektron dan dua neutrino. Kita telah mengukur masa hidup untuk proses ini di laboratorium dan menemukan bahwa *muon* memiliki umur hidup sekitar satu juta detik. Sebuah partikel dengan umur satu juta detik perjalanan dengan kecepatan cahaya harus sekitar 300 meter sebelum meluruh. Dengan demikian, *muon* yang diproduksi di atmosfer seharusnya tidak pernah sampai ke Bumi. Namun mereka adalah bentuk dominan sinar kosmik (selain foton dan elektron) yang melakukannya!

Relativitas menjelaskan paradoks ini. 'Jam' *muon* berjalan lambat dibandingkan dengan kita, karena *muon* bergerak mendekati kecepatan cahaya. Oleh karena itu, dalam bingkainya sendiri, *muon* meluruh rata-rata dalam beberapa seperseribu detik. Namun, tergantung pada seberapa dekat dengan kecepatan cahaya, *muon* sedang melakukan perjalanan selama waktu yang singkat ini dalam kerangkanya, mungkin beberapa detik dapat berlalu dalam kerangka kita

di Bumi. Waktu *benar-benar* melambat untuk objek yang bergerak.

Saya tidak dapat menolak meninggalkan Anda dengan paradoks lain (favorit saya!) Yang menunjukkan betapa nyata efek ini dapat terjadi, sementara juga menggarisbawahi seberapa pribadi gagasan kita tentang realitas. Katakanlah Anda memiliki mobil Amerika baru yang besar yang ingin Anda pamerkan dengan mengemudi di sebagian besar kecepatan cahaya ke garasi saya. Sekarang mobil Anda, saat diam, adalah 12 kaki panjang. Garasi saya juga hanya 12 kaki panjangnya. Jika Anda bergerak sangat cepat, saya akan mengukur mobil Anda hanya, katakanlah, 8 kaki panjangnya. Jadi, seharusnya tidak ada masalah untuk menempatkan mobil Anda di garasi saya sesaat sebelum Anda menekan dinding belakang atau saya membuka pintu di belakang garasi untuk membiarkan Anda keluar. Anda, di sisi lain, melihat saya dan garasi saya melesat melewati Anda dan dengan demikian garasi saya hanya 8 kaki panjang, sementara mobil Anda tetap 12 meter. Jadi, tidak mungkin menempatkan mobil Anda di garasi saya.

Hal yang ajaib tentang paradoks ini adalah, sekali lagi, bahwa kita berdua benar. Saya memang bisa menutup pintu garasi saya untuk Anda dan mendapati Anda di garasi saya sejenak. Anda, di sisi lain, akan merasakan diri Anda menabrak dinding belakang sebelum saya menutup pintu.

Tidak ada yang lebih nyata bagi seseorang, tetapi seperti yang Anda lihat, kenyataan dalam hal ini ada di mata orang yang melihatnya. Intinya adalah bahwa setiap orang *sekarang* adalah subjektif untuk peristiwa yang jauh. Sopir

menegaskan bahwa *sekarang* bagian depan mobilnya menyentuh dinding belakang garasi dan bagian belakangnya mencuat keluar pintu depan, yang masih terbuka, sementara pemilik garasi bersikeras bahwa *sekarang* pintu depan tertutup dan bagian depan mobil belum mencapai dinding belakang.

Jika *sekarang*-Anda bukan *sekarang*-saya dan detik Anda bukan detik saya, dan inci Anda bukan inci saya, apakah ada sesuatu yang tersisa untuk dipertimbangkan? Jawabannya adalah ya, dan itu berkaitan dengan hubungan baru antara ruang dan waktu yang diungkapkan oleh relativitas. Saya telah menggambarkan bagaimana sekali kecepatan cahaya yang terbatas diperhitungkan, ruang memiliki karakter yang mirip waktu. Tetapi contoh-contoh ini mendorong gagasan itu lebih jauh. Interval satu orang dalam ruang, seperti jarak antara ujung-ujung kereta yang diukur pada saat yang sama, dapat, untuk orang lain, juga melibatkan selang waktu. Orang kedua akan bersikeras bahwa pengukuran yang sama ini sebenarnya dilakukan pada waktu yang berbeda. Dengan kata lain, 'ruang' seseorang dapat menjadi 'waktu' orang lain.

Saat mengingat kembali, ini tidak begitu mengejutkan. Keteguhan cahaya menghubungkan ruang dan waktu dengan cara di mana mereka tidak terhubung sebelumnya. Agar sebuah kecepatan—yang diberikan oleh jarak yang ditempuh dalam waktu yang tetap—untuk diukur sebagai kesamaan oleh dua pengamat dalam gerak relatif, baik pengukuran ruang maupun waktu harus berubah bersama di antara kedua pengamat. Ada yang mutlak, tetapi tidak

melibatkan ruang secara terpisah, atau waktu terpisah. Itu harus melibatkan kombinasi keduanya. Dan tidak sulit untuk mencari tahu apa yang mutlak ini. Jarak yang ditempuh oleh sinar cahaya dengan kelajuan c untuk waktu t adalah $d = ct$. Jika semua pengamat lain mengukur kelajuan c yang sama untuk sinar cahaya, maka waktu t' dan jarak d' harus sedemikian sehingga $d' = ct'$. Untuk menulisnya dengan cara yang lebih menarik, dengan menguadratkan ekspresi ini, besaran $s = ct - d = ct' - d'^2$ harus sama dengan nol dan harus sama untuk semua pengamat. Ini adalah kunci yang dapat membuka gambar ruang dan waktu kita dalam analogi yang tepat terhadap lompatan pandangan penghuni gua kita.

Bayangkan bayangan yang dilemparkan oleh penggaris di dinding gua. Dalam satu kasus, orang dapat melihat ini (Gambar 25).



Gambar 25: Salah satu pandangan yang dilihat oleh seorang.

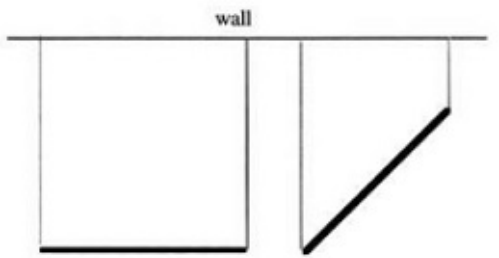
Dalam kasus lain, penggaris yang sama dapat memiliki bayangan yang tampak seperti berikut (Gambar 26).

Untuk wanita-gua kita yang malang, panjang tetap tidak akan konstan. Apa yang memberi? Kita, yang tidak harus bersaing dengan proyeksi dua dimensi tetapi hidup dalam ruang tiga dimensi, dapat melihat jalan di sekitar



Gambar 26: Bayangan lain yang tampak oleh orang yang berbeda.

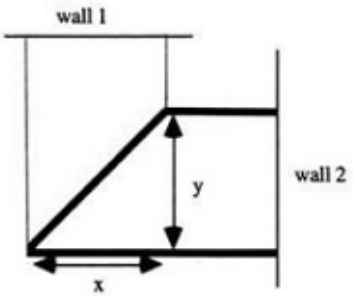
masalah. Melihat ke bawah pada penggaris dari atas, kita dapat melihat bahwa dalam dua kasus berbeda, penggaris dikonfigurasi seperti ditunjukkan pada Gambar 27.



Gambar 27: Konfigurasi penggaris.

Kali kedua, sudah diputar. Kita tahu bahwa rotasi tersebut tidak mengubah panjang penggaris tetapi hanya mengubah 'komponen' panjangnya yang diproyeksikan di dinding. Jika, misalnya, ada dua pengamat berbeda yang melihat bayangan yang diproyeksikan pada sudut kanan, penggaris yang diputar akan memiliki panjang proyeksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 28.

Jika panjang sebenarnya dari penggaris adalah L, Pythagoras memberi tahu kita bahwa $L = x + y^2$. Jadi, meskipun



Gambar 28: Penggaris yang diputar akan memiliki panjang proyeksi yang berbeda.

panjang individu, x dan y, berubah untuk kedua pengamat, kombinasi ini akan selalu tetap konstan. Untuk satu pengamat yang mengukur arah y, penggaris asli akan memiliki ekstensi nol, sementara untuk yang lain akan memiliki ekstensi maksimal dalam arah x. Penggaris yang diputar, di sisi lain, akan memiliki ekstensi y bukan nol tetapi ekstensi x lebih kecil.

Ini sangat mirip dengan perilaku ruang dan waktu untuk dua pengamat dalam gerak relatif. Sebuah kereta yang bergerak sangat cepat mungkin tampak lebih pendek untuk saya, tetapi itu akan memiliki beberapa 'waktu' ekstensi—yaitu, jam di kedua ujungnya tidak akan muncul disinkronisasi dengan saya jika mereka ke pengamat di kereta. Yang paling penting, besarannya analog dengan L spasial dalam contoh gua. Ingat bahwa hal tersebut didefinisikan sebagai 'ruang-waktu' interval $s = ct - d^2$. Ini merupakan

kombinasi ruang terpisah dan interval waktu antara peristiwa, yang selalu nol antara dua titik ruang-waktu terletak di lintasan sinar cahaya, terlepas dari fakta bahwa pengamat yang berbeda dalam gerak relatif akan menetapkan nilai-nilai individual yang berbeda dari d dan t ke ruang terpisah dan interval waktu antara titik-titik yang mereka ukur. Ternyata bahkan jika titik-titik ini tidak dihubungkan oleh sinar cahaya tetapi mewakili dua titik ruang-waktu yang dipisahkan oleh panjang d dan waktu t untuk satu pengamat, kombinasi s (yang tidak perlu nol lebih lama lagi) akan sama untuk semua pengamat, sekali lagi terlepas dari fakta bahwa interval waktu dan jarak terpisah yang diukur dapat bervariasi dari pengamat sampai pengamat.

Jadi, ada *sesuatu* tentang ruang dan waktu yang mutlak: besaran s. Ini untuk pengamat dalam gerak relatif apa yang L bagi pengamat dirotasi satu sama lain. Ini adalah panjang 'ruang-waktu'. Dunia yang kita tempati dengan demikian paling tepat digambarkan sebagai ruang empat dimensi: Tiga dimensi ruang dan 'dimensi' waktu digabungkan sebagai erat (meskipun tidak persis dengan cara yang sama) karena arah x dan y digabungkan di atas. Dan gerak memberi kita proyeksi yang berbeda dari ruang empat dimensi ini pada potongan tiga dimensi yang kita sebut *sekarang*, sama seperti rotasi memberikan proyeksi yang berbeda dari objek tiga dimensi ke dinding gua dua dimensi! Einstein, dengan wawasannya berdasarkan desakannya pada keteguhan cahaya, memiliki hak istimewa untuk melakukan apa yang banyak dari kita hanya impikan. Dia melarikan diri dari batas-batas gua kita untuk melihat sekilas untuk

pertama kalinya sebuah realitas tersembunyi di luar kondisi manusia kita yang terbatas, seperti halnya penghuni gua kita yang menemukan bahwa lingkaran dan persegi panjang benar-benar mencerminkan satu objek.

Untuk kreditnya, Einstein tidak berhenti di situ. Gambar itu belum lengkap. Sekali lagi dia menggunakan cahaya sebagai pembimbingnya. Semua pengamat yang bergerak pada kecepatan relatif konstan mengamati sinar cahaya untuk memiliki kecepatan yang sama c relatif terhadap mereka, dan dengan demikian tidak satu pun dari mereka dapat membuktikan bahwa ia yang berdiri diam dan yang lain yang bergerak. Gerak itu relatif. Tapi bagaimana kalau mereka tidak bergerak dengan kecepatan konstan? Bagaimana jika salah satu dari mereka berakselerasi? Akankah setiap orang dalam kasus ini dengan jelas setuju bahwa yang gazal adalah yang semakin cepat, termasuk pengamat yang sendirian ini? Untuk mendapatkan beberapa wawasan tentang masalah ini, Einstein mempertimbangkan pengalaman yang kita semua miliki. Ketika Anda berada di lift, bagaimana Anda tahu kapan dan ke arah mana ia mulai bergerak? Nah, jika mulai bergerak ke atas, Anda sejenak merasa lebih berat; jika bergerak ke bawah, Anda sejenak merasa lebih ringan. Tapi bagaimana Anda tahu bahwa itu benar-benar bergerak, dan bukankah gravitasi itu tiba-tiba menjadi lebih kuat?

Jawabannya adalah, Anda tidak tahu. Tidak ada satu eksperimen pun yang dapat Anda lakukan di lift tertutup yang dapat memberi tahu Anda apakah Anda sedang mempercepat atau di medan gravitasi yang lebih kuat. Kita

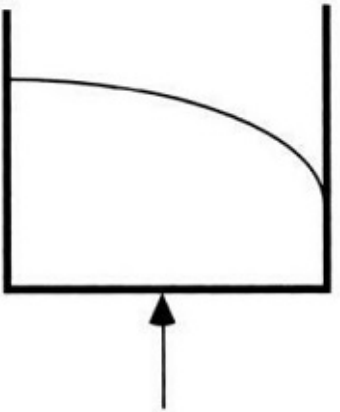
bisa membuatnya lebih sederhana. Letakkan lift di ruang kosong, tanpa ada Bumi di sekitarnya. Ketika lift diam, atau bergerak dengan kecepatan konstan, tidak ada yang menarik Anda ke lantai. Jika lift melaju ke atas, bagaimanapun, lantai harus mendorong ke atas dengan gaya untuk mempercepat Anda bersama dengan lift. Anda di dalam lift akan merasakan diri Anda menekan lantai. Jika Anda memiliki bola di tangan Anda dan membiarkannya terlepas, itu akan 'jatuh' ke lantai. Mengapa? Karena jika awalnya diam, ia ingin tetap seperti itu, oleh Hukum Galileo. Lantai, bagaimanapun, akan mempercepat ke atas, ke arah itu. Dari sudut pandang Anda, yang mempercepat ke atas bersama dengan lift, bola akan jatuh. Terlebih lagi, argumen ini tidak bergantung pada massa bola. Jika Anda memiliki enam bola, semua dengan massa yang berbeda, mereka semua akan 'jatuh' dengan akselerasi yang sama. Sekali lagi, ini karena lantai akan benar-benar mempercepat ke arah mereka semua pada tingkat yang sama.

Jika Galileo bersama Anda di lift, dia akan bersumpah dia kembali ke Bumi. Semua yang dia habiskan dalam karirnya membuktikan tentang cara benda-benda berperilaku di permukaan Bumi akan sama dengan benda-benda di dalam lift. Jadi, sementara Galileo menyadari bahwa hukum fisika harus identik untuk semua pengamat bergerak dengan kecepatan konstan, Einstein menyadari bahwa hukum fisika identik untuk pengamat bergerak pada percepatan konstan seperti pada medan gravitasi konstan. Dengan cara ini, ia berpendapat bahwa percepatan pun relatif. Percepatan satu orang adalah gravitasi orang lain.

Sekali lagi, Einstein mengintip ke luar gua. Jika gravitasi dapat 'diciptakan' di lift, mungkin kita *semua* hanya berada di lift metaforis. Mungkin apa yang kita sebut gravitasi benar-benar terkait dengan titik pandang khusus kita. Tapi apa yang khusus tentang sudut pandang kita? Kita berada di Bumi, massa besar. Mungkin apa yang kita lihat sebagai gaya antara kita dan massa Bumi dapat dilihat sebagai hasil dari sesuatu yang kehadiran massa ini terhadap lingkungan kita, ruang dan waktu.

Untuk menyelesaikan teka-teki itu, Einstein kembali ke cahaya. Dia baru saja menunjukkan bahwa itu adalah keteguhan/konsistensi cahaya yang menentukan bagaimana ruang dan waktu dijalin bersama. Apa yang akan dilakukan sinar cahaya di lift yang dipercepat di ruang angkasa? Nah, untuk pengamat luar, itu akan pergi dalam garis lurus dengan kecepatan konstan. Namun di dalam lift, yang mempercepat ke atas selama waktu ini, jalur sinar cahaya akan tampak seperti berikut, lihat Gambar 29.

Dalam kerangka lift, cahaya akan tampak melengkung ke bawah, karena lift melaju ke atas menjauh dari itu! Dengan kata lain, tampaknya jatuh. Jadi, jika lift kita yang berakselerasi harus sama dengan lift yang diam di medan gravitasi, cahaya juga harus membengkok di medan gravitasi! Ini sebenarnya tidak terlalu mengejutkan. Einstein telah menunjukkan bahwa massa dan energi setara dan dapat dipertukarkan. Energi sinar cahaya akan meningkatkan massa suatu benda yang menyerapnya. Demikian pula, massa suatu benda yang memancarkan sinar cahaya berkurang dengan jumlah yang sebanding dengan energi radiasi. Ja-



Gambar 29: Jalur sinar cahaya akan tampak seperti ini di dalam lift yang dipercepat.

di, jika cahaya dapat membawa energi, ia dapat bertindak seolah-olah memiliki massa. Dan semua benda besar jatuh dalam medan gravitasi.

Namun, ada masalah mendasar dengan gagasan ini. Sebuah bola yang jatuh, kelajuannya bertambah! Kecepatannya berubah terhadap posisi. Namun, konsistensi kecepatan cahaya adalah tumpuan di mana relativitas khusus dibangun. Ini adalah prinsip fundamental dari relativitas khusus bahwa cahaya bergerak dengan kecepatan konstan untuk semua pengamat, terlepas dari kecepatannya relatif terhadap sinar cahaya yang dilihat oleh orang lain. Jadi, seorang pengamat di sisi kiri atas lift yang mengamati cahaya masuk diharapkan untuk mengukur kecepatan cahaya seperti c, tetapi demikian juga seorang pengamat di bagian kanan ba-

wah, mengukur cahaya saat keluar dari lift. Tidak masalah bahwa pengamat bawah bergerak lebih cepat pada saat dia memandang cahaya daripada pengamat pertama ketika dia mengukurnya. Bagaimana kita dapat mendamaikan hasil ini dengan fakta bahwa cahaya secara global melengkung dan karenanya harus 'jatuh'? Selain itu, karena Einstein menyarankan bahwa jika saya berada di medan gravitasi saya seharusnya melihat hal yang sama seperti jika saya berada di lift yang berakselerasi, kemudian, jika saya *diam*, tetapi dalam medan gravitasi, cahaya juga akan jatuh. Ini dapat terjadi hanya jika kecepatan cahaya secara global bervariasi dengan posisi.

Hanya ada satu cara di mana cahaya dapat melengkung dan berakselerasi secara global tetapi perjalanan lokal dalam garis lurus dan selalu diukur oleh pengamat di setiap titik untuk melakukan perjalanan dengan kecepatan c. Penggaris dan jam pengamat yang berbeda, *sekarang dalam satu kerangka*—yaitu lift yang berakselerasi, atau yang diam di medan gravitasi—harus bervariasi dengan posisinya!

Apa yang terjadi pada makna global ruang dan waktu jika hal semacam itu terjadi? Yah, kita bisa mendapatkan ide yang bagus dengan kembali ke gua kita. Perhatikan gambar berikut, yang menunjukkan lintasan pesawat terbang dari New York ke Bombay seperti yang diproyeksikan di dinding datar gua (lihat Gambar 30).

Bagaimana kita bisa membuat lintasan melengkung ini terlihat secara lokal seperti garis lurus, dengan pesawat bergerak dengan kecepatan konstan? Salah satu cara adalah dengan membiarkan panjang penggaris bervariasi ketika se-



Gambar 30: Lintasan pesawat terbang dari New York ke Bombay.

seorang bergerak melintasi permukaan, sehingga Greenland, yang terlihat jauh lebih besar dalam gambar ini daripada seluruh Eropa, sebenarnya diukur menjadi lebih kecil oleh pengamat yang pertama kali mengukur ukurannya. Greenland ketika dia ada di sana dan kemudian pergi dan mengukur ukuran Eropa dengan penggaris yang sama ketika dia ada di sana.

Mungkin terdengar gila untuk mengusulkan solusi semacam itu, setidaknya kepada orang di dalam gua. Tapi kita tahu lebih baik. Solusi ini benar-benar setara dengan mengenali bahwa permukaan yang mendasari gambar yang digambarkan, sebenarnya, *melengkung*. Permukaan benar-benar menyerupai kulit bola, yang telah diproyeksikan ke bidang datar. Dengan cara ini, jarak di dekat kutub direntangkan dalam proyeksi dibandingkan dengan jarak sebenarnya yang diukur di permukaan Bumi. Melihatnya sebagai kulit bola, yang bisa kita lakukan dengan manfaat perspektif tiga-dimensi, kita terbebaskan. Lintasan yang

ditunjukkan di atas adalah garis bujur, yang merupakan garis lurus yang digambar pada kulit bola dan merupakan jarak terpendek di antara dua titik. Sebuah pesawat yang berjalan dengan kecepatan konstan di jalur lurus di antara titik-titik ini akan menelusuri kurva seperti itu.

Kesimpulan apa yang bisa kita tarik dari ini? Jika kita harus konsisten, kita harus menyadari bahwa aturan yang kita temukan untuk kerangka yang dipercepat, atau untuk yang di dalamnya ada medan gravitasi, tidak masuk akal tetapi setara dengan membutuhkan ruang-waktu yang mendasari untuk melengkung! Mengapa kita tidak dapat merasakan lengkungan ini secara langsung jika ada? Karena kita selalu mendapatkan tampilan ruang lokal dari perspektif satu titik. Seolah-olah kita adalah *kesalahan* yang hidup di Kansas. Dunianya, yang terdiri dari permukaan dua dimensi yang ia telusuri, tampak datar sebagai papan. Hanya dengan membiarkan diri kita kemewahan membenamkan permukaan ini dalam kerangka tiga dimensi yang kita dapat langsung gambar permukaan bola kita. Demikian pula, jika kita ingin menggambarkan secara langsung kelengkungan ruang *tiga*-dimensi, kita harus membenamkannya dalam kerangka empat-dimensi, yang tidak mungkin bagi kita untuk membayangkan seperti itu untuk kesalahan yang hidupnya terikat pada Permukaan Bumi, dan untuk siapa ruang tiga-dimensi berada di luar pengalaman langsungnya.

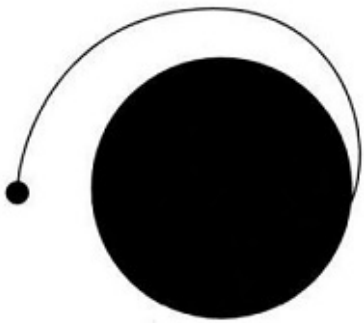
Dalam pengertian ini, Einstein adalah Christopher Columbus pada abad ke-20. Columbus berpendapat bahwa Bumi adalah sebuah kulit bola. Untuk memahami realitas tersembunyinya, dia berpendapat bahwa dia dapat

berlayar ke barat dan kembali dari timur. Einstein, di sisi lain, berpendapat bahwa untuk melihat bahwa ruang tiga-dimensi kita bisa melengkung, seseorang hanya harus menindaklanjuti perilaku sinar cahaya di medan gravitasi. Ini memungkinkan dia untuk mengajukan tiga uji klasik dari hipotesisnya. Pertama, cahaya harus membengkok ketika bergerak mendekati matahari dua kali lebih banyak daripada jika hanya 'jatuh' di ruang yang datar. Kedua, orbit elips mengelilingi matahari planet Merkurius akan bergeser orientasi, atau precess atau presesi, dengan jumlah yang sangat kecil setiap tahun, karena kelengkungan kecil ruang dekat matahari. Ketiga, jam akan berjalan lebih lambat di bagian bawah gedung tinggi daripada di bagian atas.

Orbit Merkurius sudah lama dikenal melenggok (terjadi presesi), dan ternyata bahwa tingkat ini persis yang dihitung oleh Einstein. Namun demikian, menjelaskan sesuatu yang telah dilihat tidak semenarik memprediksi sesuatu yang benar-benar baru. Dua prediksi Einstein lainnya tentang relativitas umum jatuh dalam kategori yang terakhir ini. Pada tahun 1919, sebuah ekspedisi yang dipimpin oleh Sir Arthur Stanley Eddington ke Amerika Selatan untuk mengamati gerhana matahari total melaporkan bahwa bintang-bintang di dekat matahari yang dapat diamati selama kegelapan bergeser dari tempat mereka diharapkan menjadi persis seperti jumlah yang diprediksi Einstein. Sinar cahaya dengan demikian muncul mengikuti lintasan melengkung di dekat matahari, dan Einstein menjadi *household name*! Baru setelah empat puluh tahun kemudian, uji klasik ketiga yang diajukan Einstein dilakukan, di ruang bawah tanah labora-

torium fisika Harvard dari semua tempat. Robert Pound dan George Rebka menunjukkan bahwa frekuensi cahaya yang dihasilkan di ruang bawah tanah diukur menjadi berbeda ketika sinar ini diterima di atas gedung. Pergeseran frekuensi, meskipun sangat kecil, sekali lagi tepat dimana Einstein memprediksi jam berdetik pada frekuensi seperti itu akan bergeser pada dua ketinggian yang berbeda.

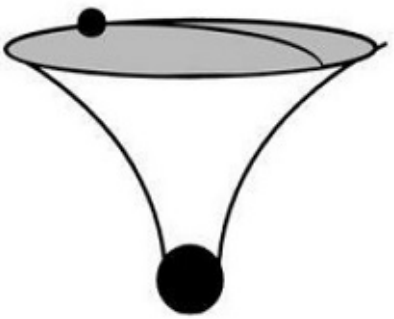
Dari sudut pandang relativitas umum, lintasan yang melengkung dan dipercepat diikuti oleh objek dalam medan gravitasi, termasuk cahaya, dapat dianggap sebagai artefak dari kelengkungan ruang yang mendasarinya. Sekali lagi, analogi dua dimensi bermanfaat. Pertimbangkan proyeksi dua dimensi dari gerak suatu benda yang berputar ke arah objek yang lebih besar, seperti yang terlihat di dinding gua (lihat Gambar 31).



Gambar 31: Proyeksi dua dimensi dari gerak sebuah benda.

Kita bisa mempostulatkan suatu gaya antara objek-objek untuk menjelaskan ini. Atau kita bisa membayangkan bahwa

permukaan sebenarnya di mana gerak ini terjadi melengkung, karena kita dapat membayangkan dengan menanamkannya dalam tiga-dimensi. Objek tidak merasakan gaya yang diberikan oleh bola yang lebih besar, melainkan mengikuti lintasan lurus pada permukaan melengkung ini (lihat Gambar 32).



Gambar 32: Objek tidak merasakan gaya yang diberikan oleh bola besar.

Sedemikian rupa, Einstein berpendapat bahwa gaya gravitasi yang kita ukur antara benda-benda besar dapat dianggap sebagai konsekuensi dari fakta bahwa kehadiran massa menghasilkan kelengkungan ruang di dekatnya, dan benda-benda yang bergerak di ruang ini hanya mengikuti garis lurus dalam ruang-waktu melengkung, menghasilkan lintasan melengkung. Dengan demikian, ada umpan balik yang luar biasa antara kehadiran materi dan kelengkungan ruang-waktu, yang sekali lagi mengingatkan kita pada Ouroboros, ular yang memakan dirinya sendiri. Kelengkungan

ruang mengatur gerak materi, yang konfigurasi selanjutnya pada gilirannya mengatur kelengkungan ruang. Umpan balik ini antara materi dan kelengkungan yang membuat relativitas umum jauh lebih rumit untuk dihadapi daripada gravitasi Newton, di mana latar belakang tempat objek bergerak adalah tetap.

Biasanya kelengkungan ruang sangat kecil sehingga dampaknya tidak terlihat, yang merupakan salah satu alasan mengapa gagasan ruang melengkung tampak asing bagi kita. Dalam perjalanan dari New York ke Los Angeles, sinar cahaya melengkung hanya sekitar 1 milimeter karena kelengkungan ruang yang disebabkan oleh massa Bumi. Namun, ada saat-saat ketika bahkan efek kecil dapat bertambah. Misalnya, Supernova 1987 yang saya sebut sebelumnya sebagai salah satu pengamatan astronomi paling menarik abad ini. Namun, seseorang dapat dengan mudah menghitung—dan, senyatanya, saya dan rekan kerja sangat terkejut dengan pentingnya hasil yang kita tulis dalam makalah penelitian—bahwa kelengkungan kecil di mana cahaya dari 1987 Supernova berlalu saat bergerak dari satu ujung galaksi kita ke yang lain untuk mencapai kita sudah cukup untuk menunda kedatangannya hingga sembilan bulan! Kalau bukan karena relativitas umum dan kelengkungan ruang, Supernova 1987 akan disaksikan pada 1986!

Tempat pengujian terakhir dari ide-ide Einstein adalah alam semesta itu sendiri. Relativitas umum tidak hanya memberitahu kita tentang kelengkungan ruang di sekitar massa lokal tetapi menyiratkan bahwa geometri seluruh alam semesta diatur oleh materi di dalamnya. Jika ada

kerapatan massa rata-rata yang cukup, kelengkungan rata-rata ruang akan cukup besar sehingga ruang pada akhirnya akan melengkung kembali pada dirinya sendiri dalam analog tiga dimensi dari permukaan kulit bola dua dimensi. Lebih penting lagi, ternyata dalam hal ini alam semesta harus berhenti berkembang akhirnya dan runtuh-kembali dalam 'keruntuhan besar' *(big crunch)*, kebalikan dari 'ledakan besar' *(big bang)*.

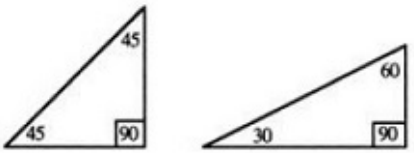
Ada sesuatu yang menarik tentang alam semesta 'tertutup', sebagaimana yang disebut alam semesta berdensitas tinggi. Saya ingat pertama kali belajar tentang hal itu sebagai siswa sekolah menengah atas ketika saya mendengar ceramah astrofisikawan Thomas Gold, dan sejak itu saya tetap bersama. Di alam semesta yang menutup dirinya kembali, sinar cahaya—yang, tentu saja, bergerak dalam garis lurus dalam ruang seperti itu—pada akhirnya akan kembali ke tempat mereka mulai, seperti garis lintang dan garis bujur di permukaan Bumi. Dengan demikian, cahaya tidak pernah bisa lepas hingga tak terbatas. Sekarang, ketika hal seperti itu terjadi pada skala yang lebih kecil, yaitu, ketika sebuah objek memiliki kepadatan yang sangat tinggi sehingga cahaya tidak bisa keluar dari permukaannya, kita menyebutnya lubang hitam. Jika alam semesta kita tertutup, kita sebenarnya hidup di dalam lubang hitam! Sama sekali tidak seperti yang Anda kira, atau seperti film Disney! Itu karena, ketika sistem menjadi lebih besar dan lebih besar lagi, kepadatan rata-rata yang diperlukan untuk menghasilkan lubang hitam semakin kecil. Lubang hitam dengan massa matahari akan menjadi sekitar satu kilometer

dalam ukuran ketika pertama kali terbentuk, dengan kepadatan rata-rata beberapa ton per sentimeter kubik. Sebuah lubang hitam dengan massa alam semesta kita yang kelihatan, bagaimanapun, akan terbentuk pertama dengan ukuran yang sebanding dengan alam semesta tampak dan kepadatan rata-rata hanya sekitar 10-29 gram per sentimeter kubik!

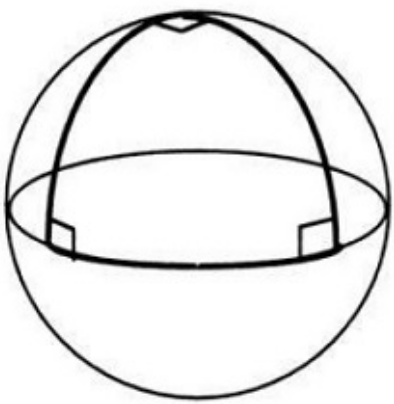
Namun, kebijaksanaan saat ini menunjukkan bahwa kita tidak hidup di dalam lubang hitam. Sejak awal 1980-an, kebanyakan ahli teori, paling tidak, meyakini bahwa kerapatan rata-rata ruang adalah sedemikian rupa sehingga alam semesta hanya berada di perbatasan antara alam semesta tertutup, yang tertutup pada dirinya sendiri dan yang secara umum akan terulang kembali, dan alam semesta terbuka, yang tak terbatas dan secara umum akan terus berkembang tanpa henti selamanya. Kasus batas ini, yang disebut alam semesta 'datar', juga tidak terbatas dalam jangkauan spasial, dan jika daya tarik gravitasional yang dominan berasal dari materi, itu akan terus berkembang selamanya, dengan ekspansi melambat tetapi tidak pernah berhenti. Karena alam semesta datar membutuhkan sekitar 100 kali lebih banyak daripada yang terlihat di semua bintang dan galaksi yang dapat kita lihat, para ahli teori telah menduga bahwa sebanyak 99 persen alam semesta tersusun dari materi gelap, tak terlihat oleh teleskop, sebagaimana saya jelaskan dalam bab 3, meskipun materi gelap yang telah disimpulkan dengan menimbang galaksi dan gugus adalah tentang faktor tiga lebih kecil dari jumlah yang dibutuhkan untuk alam semesta datar.

Bagaimana kita bisa tahu kebenaran anggapan ini? Salah satunya adalah dengan mencoba menentukan kerapatan total materi di sekitar galaksi dan kluster galaksi, seperti yang saya jelaskan di Bab 3, yang tidak memberikan indikasi langsung tentang alam semesta yang datar. Ada cara lain, setidaknya pada prinsipnya, yang pada dasarnya sama dengan kesalahan cerdas di Kansas mencoba untuk menentukan apakah Bumi itu bulat tanpa terjadi di sekitarnya dan tanpa meninggalkan permukaan. Bahkan jika kesalahan seperti itu tidak dapat mengandaikan kulit bola di dalam pikirannya, sama seperti kita tidak dapat membayangkan ruang tiga dimensi yang melengkung di dalam diri kita, ia mungkin membayangkannya dengan menggeneralisasi pengalaman dua dimensi yang datar. Ada pengukuran geometri yang dapat dilakukan di permukaan Bumi yang konsisten hanya jika permukaan ini adalah permukaan bola. Misalnya, Euclid memberi tahu kita lebih dari dua puluh abad yang lalu bahwa jumlah dari tiga sudut dalam segitiga apa pun yang digambar di selembar kertas adalah 180°. Jika saya menggambar segitiga dengan satu sudut 90°, penjumlahan dari dua sudut lainnya harus 90°. Jadi masing-masing sudut ini harus kurang dari 90°, seperti yang ditunjukkan pada dua kasus di bawah ini (Gambar 33).

Ini hanya berlaku pada selembar kertas datar. Di permukaan kulit bola, saya bisa menggambar segitiga yang masing-masing sudutnya 90°! Cukup gambar garis di sepanjang khatulistiwa, lalu naik garis bujur ke Kutub Utara, lalu buat sudut 90° dan turunkan lagi garis bujur ke khatulistiwa, seperti ditunjukkan pada Gambar 34.

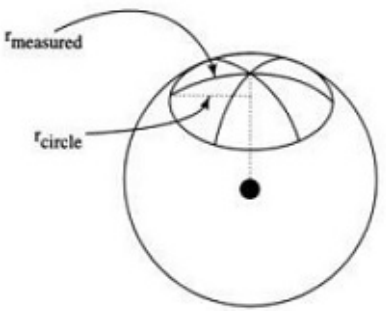


Gambar 33: Konsep sudut dalam segitiga.



Gambar 34: Segitiga pada permukaan kulit bola.

Demikian pula, Anda mungkin ingat bahwa keliling lingkaran dengan jari-jari r adalah $2\pi r$. Namun, pada kulit bola, jika Anda melakukan perjalanan jarak jauh ke segala arah dari, katakanlah, Kutub Utara, dan kemudian menggambar lingkaran yang menghubungkan titik-titik ini, Anda akan menemukan bahwa keliling lingkaran ini lebih kecil dari $2\pi r$. Ini lebih mudah dipahami jika Anda melihat kulit bola dari luar (lihat Gambar 35).



Gambar 35: Melihat kulit bola dari luar.

Jika kita meletakkan segitiga besar, atau lingkaran besar, di permukaan Bumi, kita bisa menggunakan penyimpangan dari prediksi Euclid untuk mengukur kelengkungannya dan kita akan menemukan bahwa itu adalah sebuah kulit bola. Seperti dapat dilihat dari gambar, bagaimanapun, untuk menyimpang secara signifikan dari prediksi permukaan datar Euclid, kita harus menghasilkan angka yang sangat besar, sebanding dengan ukuran Bumi. Kita juga bisa menyelidiki geometri ruang tiga-dimensi kita. Alih-alih menggunakan

keliling lingkaran, yang merupakan cara yang baik untuk memetakan kelengkungan permukaan dua dimensi, kita bisa menggunakan luasan atau volume kulit bola. Jika kita mempertimbangkan sebuah kulit bola yang cukup besar dengan jari-jari r berpusat pada posisi Bumi, volume di dalam kulit bola ini harus menyimpang dari prediksi Euclid jika ruang tiga-dimensi kita melengkung.

Bagaimana kita bisa mengukur volume sebuah kulit bola yang ukurannya adalah fraksi signifikan dari alam semesta yang terlihat? Nah, jika kita mengasumsikan bahwa kepadatan galaksi di alam semesta adalah konstan atas ruang setiap saat, maka kita dapat mengasumsikan bahwa volume setiap wilayah akan berbanding lurus dengan jumlah total galaksi di dalam wilayah itu. Yang harus kita lakukan, pada prinsipnya, *menghitung* galaksi sebagai fungsi jarak. Jika ruang melengkung, maka kita harus dapat mendeteksi penyimpangan dari prediksi Euclid. Ini, pada kenyataannya, dicoba pada 1986 oleh dua astronom muda yang pada waktu itu berada di Princeton, E. Loh dan E. Spillar, dan hasil yang mereka nyatakan konon memberi bukti untuk pertama kalinya bahwa alam semesta itu datar, seperti yang diharapkan oleh para ahli teori. Sayangnya, hal itu segera diperlihatkan setelah mereka mengumumkan hasil mereka yang tidak pasti, terutama karena fakta bahwa galaksi berevolusi dalam waktu dan menyatu, membuat tidak mungkin untuk menggunakan data kemudian di tangan untuk menarik kesimpulan yang pasti.

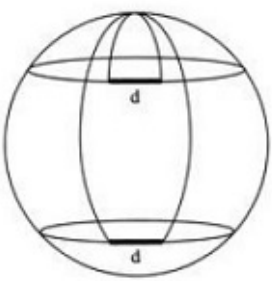
Cara lain untuk menyelidiki geometri alam semesta adalah mengukur sudut yang direntangkan oleh objek yang

dikenal seperti penggaris yang dipegang pada jarak tertentu dari mata Anda. Pada bidang datar, misalnya, jelas bahwa sudut ini terus menurun (mengecil) saat penggaris semakin jauh dan lebih jauh, seperti ditunjukkan pada Gambar 36.



Gambar 36: Sudut dari titik tinjauan akan semakin menurun seiring jarak yang semakin jauh.

Bagaimanapun, pada sebuah kulit bola, kasus ini tidak akan terjadi, lihat Gambar 37.



Gambar 37: Penurunan sudut tinjauan tidak akan terjadi jika pada kulit bola.

Pada awal 1990-an sebuah penelitian dilakukan dari

sudut yang membentang oleh benda-benda sangat padat di pusat galaksi jauh diukur dengan teleskop radio ke jarak hampir setengah ukuran alam semesta terlihat. Perilaku sudut ini dengan jarak yang semakin jauh hampir sama persis dengan apa yang diprediksi oleh alam semesta datar. Seorang rekan saya dan saya sendiri telah menunjukkan bahwa pengujian ini juga memiliki kemungkinan ambiguitas karena evolusi kosmik yang mungkin melalui waktu dari objek yang diuji.

Pada tahun 1998, kesempatan yang sama sekali berbeda dan tak terduga muncul karena hanya menggunakan prosedur ini untuk menentukan geometri alam semesta, berdasarkan pengukuran apa yang dikenal sebagai radiasi *Cosmic Microwave Background* (CMB), peredaran cahaya dari ledakan besar.

Radiasi ini, pertama kali diukur pada tahun 1965, datang pada kita dari segala arah dan telah melakukan perjalanan melalui ruang sebagian besar tanpa hambatan selama hampir 14 miliar tahun. Terakhir kali radiasi ini berinteraksi secara signifikan dengan materi adalah ketika alam semesta hanya berusia 100.000 tahun dan memiliki temperatur sekitar 3.000 derajat di atas nol mutlak pada skala Kelvin. Akibatnya, ketika kita mengamati radiasi ini hari ini memberi kita 'gambaran' dari apa distribusi materi dan radiasi pada saat itu sangat awal. Karena radiasi yang kita ukur saat ini telah berjalan pada kita dari segala arah untuk hampir seluruh usia alam semesta, mengukur radiasi ini hari ini di seluruh langit menyediakan 'gambar' dari permukaan kulit bola, ketika radiasi terakhir berinteraksi dengan

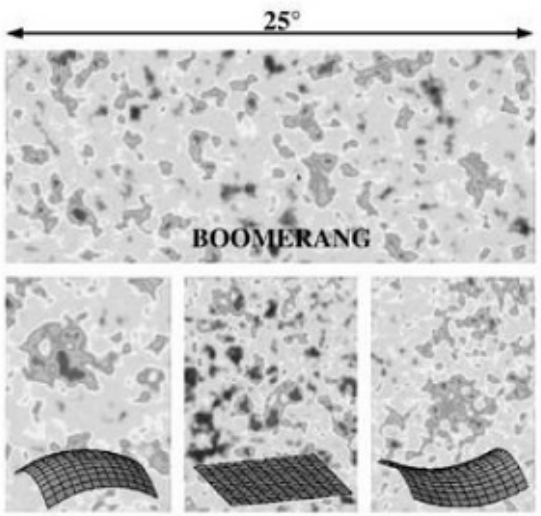
materi, terletak lebih dari 14 miliar tahun cahaya.

Permukaan kulit bola ini memberikan cara sempurna untuk menggunakan metode geometris yang dijelaskan sebelumnya, jika seseorang bisa menemukan semacam 'penggaris' di permukaan yang ukuran sudutnya bisa kita ukur. Untungnya alam telah memberikan penggaris seperti itu karena gravitasi. Karena untuk materi gravitasi selalu menarik, setiap gumpalan materi akan cenderung runtuh ke dalam kecuali beberapa bentuk tekanan menjauhkannya dari keluruhan. Sebelum alam semesta mendingin di bawah sekitar 3.000 derajat, ternyata materi, terutama dalam bentuk hidrogen, benar-benar terionisasi dan berinteraksi kuat dengan radiasi. Ini memberikan bentuk tekanan yang akan menghentikan bongkahan materi hingga ukuran tertentu dari keluruhan.

Kenapa hanya sampai ukuran tertentu? Nah, ketika alam semesta baru berusia 100.000 tahun, setiap sinar cahaya hanya dapat menempuh sekitar 100.000 tahun cahaya. Karena tidak ada informasi yang dapat berjalan lebih cepat daripada cahaya, tidak ada tekanan atau bahkan daya tarik gravitasional lokal yang dapat bertindak untuk memengaruhi bongkahan materi awal yang lebih besar dari sekitar 100.000 tahun cahaya. Begitu alam semesta mendingin di bawah 3.000 derajat, dan materi menjadi netral, tekanan radiasi pada materi turun mendekati nol, dan gumpalan bisa mulai runtuh, dengan gumpalan pertama runtuh menjadi gumpalan yang sebelumnya tidak terpengaruh oleh tekanan radiasi, yaitu, gumpalan itu sekitar 100.000 tahun cahaya.

Dengan mengukur CMB dan mencoba untuk mengamati

gumpalan tersebut dan menentukan ukuran sudut mereka, mengetahui ukuran fisis intrinsik mereka, astrofisikawan akhirnya mampu pada tahun 1998 untuk mencoba secara langsung membatasi geometri alam semesta. Dan jawabannya (lihat gambar di bawah), barangkali mengejutkan, tepatnya apa yang dibayangkan oleh para teoretis. Kita muncul, dengan presisi yang cukup tinggi, untuk hidup di alam semesta yang datar.



Gambar 38: Geometri alam semesta datar.

Gambar 38 menunjukkan citra warna yang salah dari CMB di wilayah kecil langit seperti yang diamati oleh *Boomerang Microwave Detector*, diluncurkan di Antartika pada tahun 1998. Di bawahnya ditunjukkan tiga gambar yang

dihasilkan komputer yang menunjukkan ukuran rata-rata temperatur yang diharapkan. Fluktuasi diprediksi jika alam semesta tertutup (kiri), terbuka (kanan) dan datar (tengah).

Namun, pada saat yang sama, penentuan langsung dari konten total materi yang terkait dengan galaksi dan gugus/kluster, termasuk materi gelap, telah secara definitif menunjukkan bahwa ia hanya terdiri dari 30 persen dari kepadatan energi total yang diperlukan untuk menghasilkan alam semesta yang datar. Hebatnya, 70 persen yang misterius adalah persis apa yang disarankan ada di ruang kosong untuk menjelaskan percepatan alam semesta yang dijelaskan di bab terakhir. Semua data disimpan bersama-sama jika kita hidup di alam semesta yang aneh di mana 99 persen dari total energi tersembunyi dari pandangan, dengan 30 persen berada dalam bentuk materi gelap dan hampir 70 persen yang ada sebagai energi gelap, didistribusikan ke seluruh ruang kosong!

Sungguh luar biasa sejauh mana pemahaman kita tentang ruang dan waktu telah berkembang sejak Einstein pertama kali menemukan hubungan tersembunyi di antara mereka. Kita sekarang mengerti bahwa alam semesta dari pengalaman kita sebenarnya adalah berdimensi empat, di mana setiap pengamat harus mendefinisikan dirinya sendiri sekarang dan, dengan demikian, membagi waktu-ruang ke dalam entitas terpisah yang kita rasakan sebagai ruang dan waktu. Kita memahami bahwa ruang dan waktu juga terkait erat dengan materi dan energi, dan bahwa kelengkungan ruang-waktu di dekat benda-benda besar menghasilkan apa yang kita anggap sebagai gravitasi. Dan kita baru saja

mengukur kelengkungan alam semesta kita, melepaskan cahaya baru pada susunannya dan evolusi masa depannya. Kita mungkin hidup di gua metafora, tetapi bayangan di dinding sejauh ini memberikan bukti yang tepat bahwa ada koneksi baru yang luar biasa yang membuat alam semesta kita lebih mudah dipahami dan akhirnya lebih dapat diprediksi.

Sebelum saya benar-benar mengungkap terlalu dalam, saya ingin kembali ke dunia fenomena sehari-hari untuk mengakhiri bab ini. Saya menjanjikan contoh yang dekat dengan lingkungan kita, dan meskipun saya memulai dengan sesuatu yang sederhana seperti ruang dan waktu, akhirnya berbicara tentang seluruh alam semesta. Tapi itu tidak hanya di garis depan skala mikroskopis dan makroskopik di mana koneksi tersembunyi menunggu untuk menyederhanakan gambaran kita tentang alam semesta. Bahkan ketika penemuan besar tentang ruang, waktu, dan materi yang telah saya uraikan dalam bab ini sedang dibuat, koneksi baru telah digali tentang sifat material yang eksotis seperti oatmeal, dan beragam seperti air dan besi. Seperti yang akan saya jelaskan di bab terakhir, sementara subjek dari penemuan-penemuan ini adalah fisika sehari-hari, dampaknya termasuk mengubah cara kita menggambarkan pencarian untuk teori 'pamungkas' (*ultimate*).

Material-material sehari-hari tampak sangat rumit. Mereka pasti karena mereka sangat berbeda dalam perilaku mereka. Salah satu alasan mengapa teknik kimia dan ilmu material adalah bidang yang sangat kaya, dan mengapa industri mendukung penelitian material yang signifikan,

adalah karena zat dapat dirancang untuk memenuhi hampir semua properti yang mungkin diperlukan. Terkadang material baru dikembangkan karena kecelakaan. Superkonduktivitas Temperatur Tinggi, misalnya, subjek yang sangat menarik saat ini, mulai hampir sebagai kecelakaan kimiawi oleh dua peneliti di laboratorium IBM yang mengeksplorasi satu rangkaian material baru dengan harapan menemukan superkonduktor baru, tetapi tanpa alasan teoretis yang kuat di belakang pendekatan mereka. Di sisi lain, lebih sering daripada tidak, bahan dikembangkan berdasarkan kombinasi keahlian empiris dan bimbingan teoretis. Silicon, misalnya, komponen utama dalam perangkat semikonduktor yang menjalankan komputer kita (dan kehidupan kita) menelurkan bidang penelitian untuk mencari material baru dengan properti yang mungkin lebih bisa menerima aplikasi semikonduktor tertentu. Salah satu bahan tersebut adalah galium, yang memainkan peran kunci dalam generasi semikonduktor berikutnya.

Bahkan bahan yang paling sederhana dan paling umum memiliki perilaku eksotis. Saya akan selalu ingat saat guru fisika SMA memberi tahu saya, dengan lidah pipi, tentu saja, bahwa ada dua hal dalam fisika yang membuktikan keberadaan Tuhan. Pertama, air, hampir semua material, mengembang ketika membeku. Jika karakteristik langka ini tidak begitu, danau akan membeku dari bawah ke atas, bukan dari atas ke bawah. Ikan tidak akan bertahan hidup di musim dingin, dan kehidupan seperti yang kita tahu mungkin tidak akan berkembang. Selanjutnya, ia menunjuk pada fakta bahwa 'koefisien ekspansi'—yaitu, jumlah mate-

rial yang mengembang ketika dipanaskan—beton dan baja hampir identik. Jika ini tidak terjadi, maka bangunan besar modern tidak akan mungkin karena mereka akan gesper di musim panas dan musim dingin. (Saya harus mengakui bahwa saya menemukan contoh kedua yang sedikit kurang menarik, karena saya yakin bahwa jika beton dan baja tidak memiliki koefisien ekspansi yang sama, beberapa bahan bangunan dapat dikembangkan untuk melakukannya.)

Kembali ke contoh pertama, fakta bahwa air, mungkin zat yang paling umum di Bumi, bereaksi berbeda dari kebanyakan bahan lain ketika membeku ini menarik. Faktanya, terlepas dari fakta bahwa air mengembang ketika membeku, ia memberikan setiap pengertian lain paradigma untuk bagaimana bahan berubah ketika kondisi fisis eksternal berubah. Pada temperatur yang ada di Bumi, air membeku dan mendidih. Setiap transisi di alam ini disebut sebagai 'fase transisi' karena fase perubahan material—dari padat menjadi cair menjadi gas. Adalah adil untuk mengatakan bahwa jika kita memahami fase dan kondisi yang mengatur transisi fase untuk materi apa pun, kita memahami sebagian besar dari fisika esensial.

Sekarang, yang membuat ini sangat sulit adalah bahwa di wilayah transisi fase, materi tampak serumit yang pernah ada. Seperti air mendidih, pusaran bergolak berputar, dan gelembung meledak dengan eksplosif dari permukaan. Namun, dalam kerumitan sering ada benih-benih keteraturan. Sementara seekor sapi mungkin tampak sangat kompleks, kita telah melihat bagaimana argumen skala sederhana mengatur sejumlah besar ciri khasnya tanpa mengharuskan kita

untuk melacak semua detailnya. Demikian pula, kita tidak pernah bisa berharap untuk mendeskripsikan secara khusus pembentukan setiap gelembung dalam panci berisi air mendidih. Namun demikian, kita dapat mencirikan beberapa fitur umum yang selalu ada ketika, katakanlah, air mendidih pada temperatur dan tekanan tertentu, dan periksa perilaku skala mereka.

Sebagai contoh, pada tekanan atmosfer normal, ketika air berada di titik didih, kita dapat memeriksa volume kecil dari material yang dipilih secara acak. Kita dapat bertanya pada diri sendiri pertanyaan berikut: Apakah wilayah ini terletak di dalam gelembung, atau di dalam air, atau tidak? Dalam skala kecil, semuanya sangat rumit. Sebagai contoh, jelas bahwa tidak masuk akal untuk menggambarkan molekul air tunggal sebagai gas atau cairan. Ini karena konfigurasi banyak, banyak molekul—seberapa dekat mereka rata-rata, misalnya—yang membedakan gas dari cairan. Juga jelas bahwa tidak masuk akal untuk mendeskripsikan sekelompok kecil molekul yang bergerak di sekitar seperti berada dalam keadaan cair atau uap. Ini karena ketika mereka bergerak dan bertabrakan, kita dapat membayangkan bahwa kadang-kadang sebagian besar molekul cukup jauh sehingga mereka dapat dianggap berada dalam keadaan uap. Di lain waktu, mereka mungkin cukup dekat untuk dianggap sebagai cairan. Namun, begitu kita sampai ke wilayah ukuran tertentu, mengandung cukup molekul, menjadi masuk akal untuk bertanya apakah mereka berbentuk cair atau gas.

Ketika air mendidih dalam kondisi normal, baik gelembung uap air dan cairan hidup berdampingan. Jadi air di-

katakan mengalami transisi 'orde-pertama' pada titik didih, 212° Fahrenheit di permukaan laut. Sampel makroskopik setelah waktu yang cukup pada titik didih yang tepat akan menetap dan dapat secara jelas dicirikan baik dalam bentuk cair atau gas. Keduanya mungkin tepat pada temperatur ini. Pada temperatur yang sedikit lebih rendah, sampel akan selalu mengendap dalam keadaan cair; pada temperatur yang sedikit lebih tinggi, ia akan menetap sebagai uap.

Terlepas dari kompleksitas rumit transisi lokal yang terjadi ketika air berubah dari cair ke gas pada titik didih, ada skala volume karakteristik, untuk tekanan tetap, di mana itu masuk akal untuk menanyakan yang menyatakan bahwa air berada dalam keadaan demikian. Untuk semua volume yang lebih kecil dari skala ini, fluktuasi kepadatan lokal dengan cepat terjadi yang mengaburkan perbedaan antara keadaan cair dan gas. Untuk volume yang lebih besar dari ini, kerapatan rata-rata berfluktuasi dengan jumlah yang cukup kecil sehingga sampel massal ini memiliki sifat baik berupa gas atau cairan.

Barangkali mengejutkan bahwa sistem yang demikian rumit itu memiliki keseragaman. Ini adalah hasil dari fakta bahwa setiap tetes air mengandung sejumlah besar molekul. Sementara kelompok-kelompok kecil dari mereka mungkin bertingkah tidak menentu, ada begitu banyak perilaku dalam cara biasa bahwa beberapa orang yang menyimpang tidak membuat perbedaan. Ini mirip dengan orang, saya kira. Secara individual, setiap orang memiliki alasannya sendiri untuk memilih kandidat politik. Beberapa orang bahkan menyiapkan surat suara untuk beberapa kandidat

lokal pilihan. Namun, ada cukup banyak dari kita, jadi hindari sikut-menyikut dengan mesin pemungut suara elektronik yang baru, atau mengacau dengan lagu gantung atau stasiun TV berdasarkan jajak pendapat, kita dapat memprediksi dengan cepat siapa yang akan menang dan sering mendapatkannya dengan benar. Rata-rata, semua perbedaan kita dibatalkan.

Setelah menemukan tatanan tersembunyi seperti itu, kita bisa memanfaatkannya. Kita dapat, misalnya, menanyakan apakah skala di mana perbedaan antara air dan cairan menjadi perubahan yang berarti saat kita mengubah kombinasi temperatur dan tekanan di mana air mendidih. Ketika kita meningkatkan tekanan, dan dengan demikian mengurangi perbedaan antara kepadatan uap air dan cairan air, temperatur di mana air mendidih meningkat. Jika kita sekarang mencapai temperatur baru ini, kita menemukan, seperti yang Anda duga setelah memikirkannya, bahwa karena perbedaan kepadatan antara uap dan cairan lebih kecil, ukuran daerah yang secara teratur berfluktuasi antara keduanya pada titik didih yang meningkat.

Jika kita terus meningkatkan tekanan, kita menemukan bahwa pada konjungsi tertentu dari tekanan dan suhu, yang disebut nilai kritis, perbedaan antara cairan dan gas gagal memiliki arti sama sekali, bahkan dalam sampel yang tak terbatas. Pada semua skala, fluktuasi kepadatan terjadi yang cukup besar sehingga mustahil untuk mengklasifikasikan bahan curah sebagai cairan atau gas. Sedikit di bawah temperatur ini, kerapatan material yang tepat untuk cairan, dan sedikit di atas kerapatan yang sesuai dengan gas.

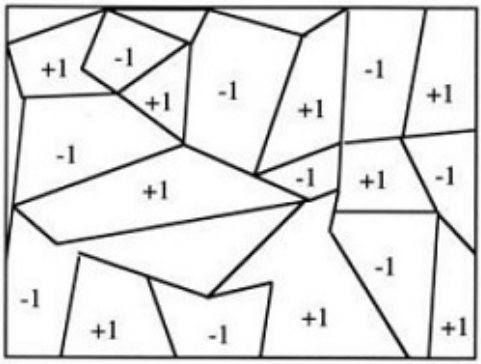
Tetapi pada temperatur kritis ini, air tidak atau keduanya, tergantung pada sudut pandang Anda.

Konfigurasi spesifik air pada titik kritis luar biasa. Pada semua skala, materialnya terlihat persis sama. Materi tersebut sangat 'mirip' ketika Anda meningkatkan skala di mana Anda memeriksanya. Jika Anda mengambil foto dengan pembesaran tinggi dari wilayah kecil, dengan perbedaan kepadatan yang muncul sebagai perbedaan warna, itu akan terlihat sama dengan foto yang diambil pada perbesaran normal, dengan variasi yang sama tetapi dengan daerah yang bersangkutan. mewakili volume yang jauh lebih besar. Bahkan, dalam air pada titik kritis, sebuah fenomena yang disebut *opulescence* kritis terjadi. Karena fluktuasi kepadatan terjadi di semua skala, fluktuasi ini menyebarkan cahaya dari semua panjang gelombang, dan tiba-tiba air tidak lagi terlihat jernih, tetapi menjadi keruh.

Bahkan ada sesuatu yang lebih menarik tentang keadaan air ini. Karena terlihat kurang lebih sama pada semua skala—apa yang disebut *skala invarian*[19]—sifat struktur mikroskopis air (yaitu fakta bahwa molekul air dibuat dari dua atom hidrogen dan satu atom oksigen) menjadi tidak relevan. Semua yang mencirikan sistem pada titik kritis adalah densitas. Seseorang dapat, misalnya, menandai +1 untuk wilayah dengan sedikit kelebihan kepadatan dan 1 untuk wilayah dengan defisit. Untuk semua maksud dan tujuan, air pada skala apa pun akan terlihat secara skematis seperti Gambar 39.

Ini lebih dari sekadar penyederhanaan bergambar. Fakta

[19] Tidak mengalami perubahan akibat dari berbagai transformasi.



Gambar 39: Gambaran kepadatan atau densitas pada titik kritis.

bahwa air dapat dibedakan secara fisis pada *semua skala* hanya dengan tingkat kebebasan yang efektif ini, yang dapat mengambil dua nilai ini, *sepenuhnya menentukan* sifat fase transisi di wilayah titik kritis ini. Hal ini mengartikan bahwa fase transisi cair-gas pada air menjadi *mutlak identik* dengan fase transisi dalam material lain, yang pada titik kritisnya sendiri dapat dijelaskan oleh rangkaian ± 1.

Misalnya, pertimbangkan besi. Hanya sedikit orang yang akan bingung balok besi dengan segelas air. Sekarang, karena siapa pun yang bermain dengan magnet tahu, besi dapat menjadi magnet di hadapan magnet. Secara mikroskopis yang terjadi adalah bahwa masing-masing atom besi adalah magnet kecil, dengan kutub utara dan selatan. Dalam kondisi normal, dengan tidak ada magnet lain di dekatnya, atom-atom besi ini secara acak sejajar, sehingga

rata-rata bidang magnet masing-masing meniadakan untuk tidak menghasilkan medan magnet makroskopik. Di bawah pengaruh magnet eksternal, bagaimanapun, semua magnet atom di besi akan berbaris ke arah yang sama dengan medan eksternal, menghasilkan magnet besi makroskopik. Jika medan magnet eksternal mengarah ke atas, maka semua magnet atom akan menjadi besi. Jika itu menunjuk ke bawah, mereka juga akan menunjuk ke bawah.

Sekarang perhatikan sepotong besi yang diandaikan, di mana magnet atom dibatasi untuk menunjuk hanya ke atas atau ke bawah, tetapi tidak ke arah lain. Pada temperatur rendah, jika medan magnet eksternal hadir yang bermula pada beberapa nilai yang mengarah ke atas, semua magnet atom akan sejajar dalam arah ini. Tetapi jika medan eksternal menurun ke nol, ia tidak akan lagi menentukan arah mana yang dapat ditunjukkan oleh magnet atom. Ternyata tetap bersemangat secara energik rata-rata untuk semua dari mereka untuk menunjuk ke arah yang sama satu sama lain, tetapi arah yang mereka pilih adalah acak. Mereka bisa menunjuk ke atas atau ke bawah. Ini berarti bahwa magnet besi dapat memiliki transisi fase. Ketika medan magnet dari luar disetel ke nol, magnet atom kecil yang telah mengikuti bidang ini sekarang bisa, karena beberapa fluktuasi termal acak bukannya secara spontan sejajar, menunjuk ke bawah sampel.

Secara matematis, ini mulai menyerupai kasus air. Ganti 'menunjuk ke atas' dengan 'kepadatan berlebih' dan 'menunjuk ke bawah' dengan 'defisit densitas'. Sama seperti dalam kasus air, orang menemukan bahwa untuk magnet

semacam itu ketika tidak ada medan magnet eksternal, ada skala karakteristik seperti bahwa jika seseorang meneliti sampel pada skala yang lebih kecil dari ini, fluktuasi termal masih dapat mengubah arah di mana titik magnet. Dengan demikian tidak mungkin untuk menyatakan bahwa wilayah tersebut memiliki orientasi magnetik bersih. Pada skala yang lebih besar dari ini, fluktuasi termal tidak akan mampu menyebabkan orientasi magnet rata-rata berubah dan akan tetap konstan. Selanjutnya, ketika seseorang meningkatkan temperatur sambil menjaga medan magnet luar nol, sampel akan memiliki titik kritis. Pada titik ini, fluktuasi arah akan bertahan sepanjang seluruh sampel dengan cara yang sama pada semua skala, sehingga akan sia-sia untuk mencoba mengkarakterisasi objek dengan orientasi magnet atomnya, bahkan dalam sampel tak terbatas.

Yang penting di sini adalah, pada titik kritis, air dan magnet semacam itu persis sama. Kenyataan bahwa struktur mikroskopis yang sebenarnya dari keduanya sangat berbeda adalah tidak relevan. Karena variasi material pada titik kritis dicirikan oleh hanya dua derajat kebebasan—naik dan turun, atau overdense dan underdense—di atas semua skala, bahkan yang jauh lebih besar daripada skala mikroskopik, fisika tidak peka terhadap perbedaan mikroskopis. Perilaku air saat mendekati titik kritisnya, seperti diberi label apakah itu adalah cairan atau gas, benar-benar identik dengan magnet, sebagaimana dilabeli apakah bidangnya mengarah ke atas atau ke bawah. Ukuran apa pun yang dapat Anda buat pada satu sistem akan identik untuk yang lain.

Fakta bahwa kita dapat menggunakan properti skala dari sistem yang berbeda, dalam hal ini invarian skala mereka di dekat titik kritis, untuk menemukan keseragaman dan ketertiban dalam situasi yang sangat rumit adalah salah satu keberhasilan besar dari apa yang telah dikenal sebagai terkondensasi material fisis. Pendekatan ini, yang telah merevolusi cara kita memahami fisika material, dipelopori pada 1960-an dan 1970-an oleh Michael Fisher dan Kenneth Wilson di Cornell dan Leo Kadanoff di Universitas Chicago. Ide-ide yang dikembangkan dalam upaya ini telah diimpor ke seluruh fisika setiap kali kompleksitas yang terkait dengan skala telah menjadi masalah. Wilson dianugerahi Hadiah Nobel pada tahun 1982 untuk penyelidikannya tentang penerapan teknik-teknik ini untuk memahami perilaku tidak hanya dari air tetapi juga partikel elementer, seperti yang akan saya jelaskan di bab terakhir. Yang penting di sini adalah bagaimana mereka mengekspos kesatuan yang mendasarinya yang terkait dengan dunia material yang beragam dan kompleks yang kita tangani setiap hari. Bukan hanya skala submikroskopik partikel elementer atau skala kosmologi yang berpotensi tak terbatas di mana koneksi tersembunyi dapat menyederhanakan realitas. Pikirkan tentang hal ini setiap kali siulan teapot, atau saat berikutnya Anda bangun dan melihat es di jendela.

BAGIAN TIGA:
PRINSIP-PRINSIP

PENCARIAN SIMETRI

"Apakah ada titik lain yang mungkin kamu inginkan untuk menarik perhatian saya?"
"Untuk kejadian penasaran bagi anjing di malam hari"
"Anjing itu tidak melakukan apa pun di waktu malam"
"Itu adalah kejadian yang aneh," kata Sherlock Holmes.
—Sir Arthur Conan Doyle

Ketika seorang seniman berpikir tentang simetri, dia mungkin berpikir tentang kemungkinan yang tak terbatas, dari butiran salju, berlian, atau pantulan di kolam. Ketika seorang fisikawan berpikir tentang simetri, dia berpikir tentang kemustahilan yang tak berujung. Apa yang benar-benar mendorong fisika bukanlah penemuan apa yang terjadi tetapi penemuan apa yang tidak. Alam semesta adalah tempat yang besar, dan pengalaman telah mengajari kita bahwa apa pun yang terjadi dapat terjadi. Apa yang memberi perintah kepada alam semesta adalah fakta yang dapat kita katakan dengan ketepatan mutlak bahwa hal-hal tertentu tidak pernah terjadi. Dua bintang mungkin bertabrakan

hanya sekali setiap juta tahun per galaksi, yang tampaknya langka. Menyimpulkan semua galaksi yang diketahui, bagaimanapun, itu adalah beberapa ribu kejadian per tahun di alam semesta tampak. Namun demikian Anda dapat menunggu 10 miliar tahun dan Anda tidak akan pernah melihat bola di Bumi jatuh. Itu adalah pesanan. Simetri adalah alat konseptual yang paling penting dalam fisika modern justru karena ia menjelaskan hal-hal yang tidak berubah atau tidak dapat terjadi.

Simetri di alam bertanggung jawab untuk membimbing fisikawan dalam dua cara penting: Mereka membatasi kekayaan kemungkinan, dan mereka memperbaiki cara yang tepat untuk menggambarkan mereka yang tersisa. Apa yang kita maksud ketika kita mengatakan sesuatu memiliki simetri tertentu? Ambil sebutir salju, misalnya. Itu mungkin memiliki apa yang disebut ahli matematika sebagai simetri segienam (*sixfold symmetry*). Apa artinya ini adalah bahwa Anda dapat memegang kepingan salju di salah satu dari enam sudut yang berbeda, dan itu akan terlihat persis sama. *Tidak ada yang berubah.* Sekarang, mari kita ambil contoh yang lebih ekstrim tetapi akrab. Bayangkan seekor sapi sebagai kulit bola! Mengapa sebuah kulit bola? Karena itu adalah hal yang paling simetris yang dapat kita pikirkan. Buat rotasi apa pun, putar di cermin, putar terbalik, dan masih terlihat sama. *Tidak ada yang berubah!* Tapi apa yang kita dapatkan ini? Yah, karena tidak ada rotasi atau flip dapat memengaruhi kulit bola, seluruh deskripsi objek ini berkurang menjadi satu variabel tunggal, radiusnya. Karena itu, kita mampu menggambarkan perubahan pada

propertinya hanya dengan menskalakan variabel yang satu ini. Fitur ini bersifat umum: Semakin simetris sesuatu, semakin sedikit variabel yang diperlukan untuk menggambarkannya secara lengkap.

Saya tidak bisa melebih-lebihkan pentingnya fitur yang satu ini, dan saya akan memujinya nanti. Untuk saat ini, penting untuk fokus pada bagaimana simetri melarang perubahan. Salah satu hal paling mencolok tentang dunia, seperti yang dijelaskan Sherlock Holmes pada Watson yang bingung, adalah bahwa hal-hal tertentu tidak akan terjadi. Bola tidak secara spontan mulai memantul ke atas tangga, juga tidak mengambil dan berguling di lorong mereka sendiri. Tangki air tidak secara spontan memanas, dan pendulum tidak naik lebih tinggi di siklus kedua daripada yang pertama. Semua fitur ini muncul dari simetri alam.

Pengakuan atas fakta ini dimulai dalam karya fisikawan matematika klasik abad kedelapan belas dan kesembilan belas, Joseph-Louis Lagrange di Prancis dan Sir William Rowan Hamilton, di Inggris, yang menempatkan mekanika Newton pada pijakan matematika yang lebih umum dan konsisten. Pekerjaan mereka mencapai hasil pada paruh pertama abad ini melalui matematikawan Jerman yang brilian, Emmy Noether. Sayangnya, kecerdasannya yang tajam tidak membantu wanita ini di dunia pria. Posisi yang tidak langgengkan dan tidak berubah di departemen matematika terkemuka di Göttingen University diakhiri oleh undang-undang anti-Semit pada tahun 1933 - terlepas dari dukungan dari ahli matematika terbesar saat itu, David Hilbert. (Dia berpendapat tidak berhasil ke fakultas Gt-

tingen bahwa mereka adalah bagian dari universitas dan bukan tempat mandi. Sayangnya, fakultas universitas tidak pernah menjadi sarang kesadaran sosial.)

Dalam teorema yang menyandang namanya, Noether menunjukkan hasil matematis yang sangat penting bagi fisika. Sesudah itu, teorema Noether tampaknya masuk akal. Perumusannya dalam fisika pada dasarnya berjalan sebagai berikut: Jika persamaan yang mengatur perilaku dinamis dari sistem fisis tidak berubah ketika beberapa transformasi dibuat pada sistem, maka untuk setiap transformasi tersebut harus ada beberapa besaran fisis yang dilestarikannya sendiri, yang berarti bahwa itu tidak berubah *seiring waktu*.

Temuan sederhana ini membantu menjelaskan salah satu konsep yang paling disalahpahami dalam sains populer (termasuk banyak teks sarjana) karena membantu menunjukkan mengapa hal-hal tertentu tidak mungkin. Misalnya, pertimbangkan mesin gerak abadi (*perpetual motion machines*), penemuan favorit ilmuwan crackpot. Seperti yang saya jelaskan di Bab 1, mereka bisa sangat canggih, dan banyak orang yang logis telah ditipu untuk berinvestasi di dalamnya.

Sekarang, alasan standar mengapa kebanyakan mesin jenis ini tidak dapat berfungsi adalah konservasi/kelestarian energi. Bahkan tanpa mendefinisikannya secara ketat, kebanyakan orang memiliki ide intuitif yang cukup baik tentang energi apa, sehingga orang dapat menjelaskan dengan mudah mengapa mesin seperti itu tidak mungkin. Pertimbangkan lagi alat yang diilustrasikan pada 5. Seperti yang saya jelaskan di sana, setelah satu siklus lengkap, masing-masing

bagiannya akan kembali ke posisi semula; jika saat diam di awal siklus, ia harus beristirahat di akhir. Kalau tidak, akan memiliki lebih banyak energi di akhir siklus daripada di awal. Energi harus diproduksi di suatu tempat; karena tidak ada yang berubah dalam mesin, tidak ada energi yang bisa diproduksi.

Tetapi penemu yang keras kepala berkata kepada saya: "Bagaimana saya tahu pasti bahwa energi tersebut lestari? Apa yang membuat hukum ini begitu istimewa sehingga tidak dapat dilanggar? Semua eksperimen yang ada dapat mendukung ide ini, tetapi mungkin ada jalan lain. Mereka pikir Einstein juga gila!"

Ada beberapa manfaat dalam keberatan ini. Kita tidak seharusnya mengambil apapun dari iman/kepercayaan. Jadi semua buku ini memberi tahu mahasiswa bahwa *Energy Is Conserved* (mereka bahkan memanfaatkannya). Dan diklaim bahwa ini adalah hukum alam universal, berlaku untuk energi dalam segala bentuknya. Tetapi sementara ini adalah sifat alam yang sangat berguna, masalah yang penting adalah *Mengapa?* Emmy Noether memberi kita jawaban, dan itu mengecewakan saya bahwa banyak teks fisika tidak peduli sejauh ini. Jika Anda tidak menjelaskan mengapa kualitas yang luar biasa seperti itu ada, hal itu mendorong gagasan bahwa fisika didasarkan pada beberapa aturan mistis yang ditetapkan pada ketinggian, yang harus diingat dan hanya yang diinisiasi bagi yang memiliki akses.

Jadi mengapa energi lestari? Teorema Noether memberi tahu kita bahwa itu pasti terkait dengan beberapa simetri alam. Dan saya mengingatkan Anda bahwa simetri alam

memberi tahu kita bahwa jika kita melakukan transformasi, semuanya tetap terlihat sama. Kelestarian energi, pada kenyataannya, terkait dengan sangat simetri yang memungkinkan fisika. Kita percaya hukum alam akan sama besok seperti sekarang. Jika tidak, kita harus memiliki teks fisika yang berbeda untuk setiap hari dalam seminggu.

Jadi kita percaya, dan ini sampai taraf tertentu merupakan asumsi—tetapi, seperti yang akan saya tunjukkan, *yang dapat diuji*—bahwa *semua* hukum alam bersifat invarian, yaitu, mereka tetap tidak berubah, di bawah terjemahan waktu. Ini adalah cara elegan untuk mengatakan bahwa mereka sama tidak peduli ketika Anda mengukurnya. Tetapi jika kita menerima ini untuk saat ini, maka kita dapat menunjukkan dengan ketat (yaitu, secara matematis) bahwa harus ada besaran, yang dapat kita sebut energi, yang konstan dari waktu ke waktu. Dengan demikian, ketika hukum-hukum alam baru ditemukan, kita tidak perlu khawatir pada setiap tahap apakah mereka akan mengarah pada beberapa pelanggaran hukum kelestarian energi. Yang harus kita asumsikan adalah bahwa prinsip-prinsip fisis yang mendasarinya tidak berubah seiring waktu.

Lalu, bagaimana kita bisa menguji asumsi kita? Pertama, kita dapat memeriksa untuk melihat bahwa energi memang lestari. Ini saja mungkin tidak memuaskan Anda atau penemu saya. Namun ada cara lain. Kita dapat memeriksa hukum sendiri dari waktu ke waktu untuk melihat bahwa prediksi mereka tidak bervariasi. Ini cukup untuk menjamin kelestarian energi. Tetapi selain metode baru untuk menguji kelestarian energi, kita telah belajar sesuatu

yang jauh lebih penting. Kita telah belajar apa yang menghentikan kelestarian energi sama saja dengan melakukannya. Jika kita memilih untuk tidak percaya bahwa energi dilestarikan, maka kita juga harus percaya bahwa hukum alam berubah seiring waktu.

Mungkin tidak terlalu bodoh untuk bertanya-tanya apakah, setidaknya pada skala waktu kosmik, berbagai hukum alam mungkin benar-benar berevolusi seiring berjalannya waktu. Apalagi, alam semesta itu sendiri berkembang dan berubah, dan mungkin entah bagaimana perumusan hukum-hukum mikroskopik terkait dengan keadaan makroskopik alam semesta. Bahkan, ide semacam itu diusulkan oleh Dirac pada 1930-an. Ada berbagai bilangan besar yang mencirikan alam semesta tampak, seperti usia, ukurannya, jumlah partikel elementer di dalamnya, dan sebagainya. Ada juga beberapa angka yang sangat kecil, seperti gaya gravitasi. Dirac menyarankan bahwa mungkin gaya gravitasi barangkali bervariasi saat alam semesta mengembang, semakin lemah seiring waktu! Dia berpikir ini mungkin secara alami menjelaskan mengapa gravitasi mungkin sangat lemah hari ini, dibandingkan dengan gaya lain di alam. Alam semesta sudah tua!

Sejak proposal Dirac, banyak pengujian langsung dan tidak langsung telah dilakukan untuk memeriksa apakah tidak hanya kekuatan gravitasi tetapi juga kekuatan dari gaya lain di alam telah berubah seiring waktu. Batas astrofisika dan terestrial yang sangat ketat sebenarnya telah ditetapkan pada variasi konstanta fundamental, dan tidak ada bukti definitif variasi telah diamati. Sementara satu kelompok

telah mengklaim bukti, berdasarkan pengamatan spektrum cahaya dari sumber yang jauh, untuk kemungkinan variasi 1 bagian dalam 100.000 dalam kekuatan elektromagnetik selama 10 miliar tahun terakhir, saat ini tidak ada konfirmasi independen dari klaim ini, yang menurut banyak fisikawan dapat dengan mudah disebabkan oleh interaksi atom yang rumit yang harus diperhitungkan. Pada bagian lain, pengamatan tentang kelimpahan unsur cahaya yang diciptakan pada big bang dibandingkan dengan prediksi teoretis yang diperoleh dengan memanfaatkan konstanta dasar saat ini dalam perhitungan cukup baik, misalnya, untuk menyatakan bahwa gaya gravitasi tidak bisa berubah lebih dari sekitar 20 persen dalam 10 miliar tahun atau lebih sejak alam semesta hanya berumur satu detik! Jadi, sejauh yang kita tahu, gravitasi tidak berubah seiring waktu.

Namun demikian, bahkan jika perumusan hukum-hukum mikroskopik diikat dengan beberapa cara ke keadaan makroskopik alam semesta, kita akan mengharapkan prinsip-prinsip fisis yang mendasari yang mengikat keduanya bersama untuk selalu tetap. Dalam hal ini, akan selalu dimungkinkan untuk menyamaratakan definisi energi kita sehingga tetap lestari. Kita selalu bebas menggeneralisasi apa yang kita maksud dengan energi ketika prinsip-prinsip fisis baru muncul pada skala yang lebih besar atau lebih kecil. Tetapi *sesuatu* itu, yang kemudian kita sebut energi, tetap lestari, asalkan prinsip-prinsip ini tidak berubah seiring waktu.

Kita telah memiliki sejumlah kesempatan untuk merevisi konsep energi kita. Contoh paling mencolok melibatkan teori relativitas khusus dan umum Einstein. Ini, saya ingatkan

Anda, menyiratkan bahwa pengamat yang berbeda dapat membuat pengukuran yang berbeda, tetapi sama validnya, terhadap besaran pokok. Akibatnya, pengukuran ini harus dianggap relatif terhadap pengamat khusus daripada sebagai penanda absolut.

Sekarang, ketika mencoba memahami alam semesta secara keseluruhan, atau memang sistem apa pun di mana efek gravitasi menjadi kuat, kita harus memanfaatkan generalisasi energi yang konsisten dengan kelengkungan ruang-waktu. Namun, jika kita mempertimbangkan dinamika alam semesta pada skala yang kecil dibandingkan dengan ukuran alam semesta yang terlihat, efek kelengkungan menjadi kecil. Dalam hal ini, definisi energi yang tepat akan berkurang ke bentuk tradisionalnya. Ini pada gilirannya memungkinkan suatu contoh betapa kuatnya kelestarian energi berlaku, bahkan pada skala kosmik. Ini adalah kelestarian energi yang menentukan nasib alam semesta, seperti yang saya gambarkan sekarang.

Dikatakan bahwa "apa yang naik harus turun." Tentu saja, seperti banyak pepatah lama, yang satu ini tidak benar. Kita tahu dari pengalaman kita dengan pesawat luar angkasa yang memungkinkan untuk mengambil gambar dari permukaan Bumi sehingga tidak kembali turun. Bahkan, kecepatan universal (yang sama untuk semua benda) diperlukan untuk melepaskan diri dari tarikan gravitasi Bumi. (Jika ini tidak terjadi, misi Apollo ke bulan akan jauh lebih sulit. Desain pesawat luar angkasa harus memperhitungkan secara eksplisit berapa banyak yang ditimbang oleh masing-masing astronot, misalnya.) Ini adalah kelestarian energi

yang bertanggung jawab atas keberadaan kecepatan lepas universal.

Kita dapat mendefinisikan energi dari setiap objek yang bergerak di tarikan gravitasi Bumi dalam dua bagian. Bagian pertama tergantung pada kecepatan objek. Semakin cepat perjalanannya, semakin banyak energi gerak ini—yang disebut energi *kinetik*, dari kata Yunani untuk gerak—yang ia memiliki. Objek saat diam memiliki energi kinetik nol. Bagian kedua dari energi suatu benda dapat memiliki medan gravitasi disebut energi *potensial*. Jika grand piano digantung dari tali lima belas tingkat, kita tahu bahwa itu memiliki potensial untuk melakukan kerusakan besar. Semakin tinggi sesuatu, semakin banyak energi potensial yang dimilikinya, karena semakin besar konsekuensinya akan jatuh.

Energi potensial benda-benda yang dipisahkan dengan baik dianggap sebagai besaran negatif. Ini hanyalah konvensi, tetapi logika di baliknya adalah ini. Sebuah benda yang sedang diam yang terletak jauh sekali dari Bumi atau benda masif lainnya didefinisikan memiliki nol energi total gravitasi. Karena energi kinetik benda seperti itu nol, energi potensinya harus nol juga. Tetapi karena energi potensial objek menurun ketika mereka semakin dekat dan lebih dekat satu sama lain—seperti yang dilakukan piano ketika semakin dekat ke tanah—energi ini harus menjadi lebih negatif ketika benda-benda disatukan.

Jika kita tetap berpegang pada konvensi ini, maka dua bagian energi gravitasi dari objek apa pun yang bergerak dekat permukaan Bumi memiliki tanda yang berlawanan—satu

positif, satu negatif. Kita kemudian dapat menanyakan apakah jumlah mereka lebih besar dari atau kurang dari nol. Ini adalah masalah krusial. Karena jika energi lestari, maka sebuah objek yang dimulai dengan energi gravitasi total negatif tidak akan pernah bisa lolos tanpa kembali. Setelah jauh tanpa batas, bahkan jika itu berhenti, itu akan memiliki nol energi total, seperti yang saya jelaskan di atas. Ini, tentu saja, lebih besar daripada nilai negatif apa pun, dan jika energi total mulai negatif, itu tidak akan pernah menjadi positif, atau bahkan nol, kecuali Anda menambahkan energi entah bagaimana caranya. Kecepatan di mana energi kinetik awal (positif) sama persis besarnya dengan energi potensial (negatif), sehingga total energi awal nol, adalah kecepatan lepas. Objek semacam itu pada prinsipnya bisa lolos tanpa kembali. Karena kedua bentuk energi itu bergantung pada massa benda, kecepatan lepasnya tidak bergantung pada massa. Dari permukaan Bumi, misalnya, kecepatan lepasnya sekitar 10 kilometer per detik, atau sekitar 20.000 mil per jam.

Jika alam semesta *isotropik*—sama di mana-mana—maka apakah alam semesta akan mengembang selamanya sama dengan apakah kumpulan rata-rata galaksi yang terpisah akan terus bergerak terpisah satu sama lain tanpa batas. Dan, pembatasan sumber energi baru yang eksotis, seperti energi ruang kosong, yang akan kita pertimbangkan sedikit, ini identik dengan pertanyaan apakah bola yang dilontarkan dari Bumi akan turun atau tidak. Dalam hal ini jika kecepatan relatif galaksi, karena perluasan latar belakang, cukup besar untuk mengatasi energi potensial negatif karena

saling tarik-menarik, mereka akan terus bergerak terpisah. Jika energi kinetik mereka persis menyeimbangkan energi potensial mereka, total energi gravitasi akan menjadi nol. Galaksi-galaksi akan terus bergerak terpisah selamanya, tetapi akan melambat seiring waktu, tidak pernah berhenti sampai mereka (atau yang tersisa dari mereka) jauh berjauhan satu sama lain. Jika Anda ingat karakterisasi saya tentang alam semesta datar di mana kita berpikir kita hidup, beginilah saya menggambarkannya. Jadi, jika kita hidup di alam semesta yang datar hari ini, total energi (gravitasi) dari seluruh alam semesta adalah nol. Ini adalah nilai yang sangat istimewa, dan salah satu alasan mengapa alam semesta datar begitu mempesona.

Saya memberi syarat bahwa argumen di atas didasarkan pada asumsi yang masuk akal bahwa tidak ada sumber energi baru yang eksotis di alam semesta, seperti energi ruang kosong. Namun, kita telah melihat bahwa asumsi yang masuk akal ini, pada kenyataannya, tidak benar. Satu memaafkannya, di satu sisi ini mengubah segalanya, karena dengan demikian semua taruhan tidak aktif: alam semesta terbuka dapat runtuh, dan alam semesta tertutup dapat berkembang selamanya, tergantung pada tanda dan besarnya komponen energi ekstra ini. Tetapi dalam pengertian yang lebih mendasar tidak, karena akuntansi energi yang tepat masih akan menentukan masa depan alam semesta.

Pertimbangkan, misalnya, alam semesta tempat kita hidup, yang datar, yang berarti ia memiliki energi total gravitasi nol, namun sebagian besar energi ini tampaknya berada di ruang kosong. Dalam hal ini alam semesta yang dapat

diobservasi akan berkembang selamanya, dengan tingkat ekspansi yang terus meningkat bukannya menurun seperti yang dijelaskan sebelumnya untuk alam semesta datar. Apa yang telah berubah? Nah, ternyata karena energi ruang kosong secara gravitasi repulsif, total energi yang terkandung dalam wilayah yang meluas tidak tetap konstan. Sebaliknya, alam semesta bekerja di wilayah ini saat meluas. Pekerjaan tambahan ini berarti bahwa energi tambahan terus dipompa ke alam semesta yang mengembang yang memungkinkannya untuk mempercepat meskipun total energi gravitasi tetap nol.

Pada akhirnya, apakah alam semesta akan berakhir dengan bang atau *whimper* akan ditentukan oleh energi, eksotis atau lainnya. Jawaban atas salah satu pertanyaan paling mendalam tentang eksistensi manusia—bagaimana alam semesta akan berakhir?—dapat ditentukan dengan mengukur kecepatan ekspansi dari seperangkat galaksi tertentu, mengukur massa totalnya, dan akhirnya menentukan kelimpahan dan sifat dari 'energi gelap' yang mungkin. Kita tidak akan tahu mata uang apa yang akan mengatur akuntansi energi sampai kita mengetahui keluar sifat energi gelap misterius saat ini membentuk 70 persen energi alam semesta, tetapi pada akhirnya nasib yang belum ditentukan dari alam semesta akan menjadi masalah sederhana pembukuan energi.

Simetri alam lainnya bergandengan tangan dengan invarian terjemahan waktu. Sama seperti hukum alam tidak bergantung ketika Anda mengukurnya, maka mereka tidak harus bergantung pada tempat Anda mengukurnya. Seperti yang telah saya jelaskan pada beberapa siswa horor, jika



Gambar 40: Gambaran simetri alam.

tidak demikian maka kita akan membutuhkan kelas pengantar fisika bukan hanya di setiap universitas tetapi di setiap gedung!

Konsekuensi dari simetri ini di alam adalah adanya besaran lestari yang disebut *momentum*, yang sebagian besar dari Anda kenal sebagai inersia—fakta bahwa benda-benda yang telah mulai bergerak cenderung terus bergerak dan benda-benda yang masih diam tetap seperti itu. Kelestarian momentum adalah prinsip di balik pengamatan Galileo bahwa objek akan terus bergerak dengan kecepatan konstan kecuali jika diganggu oleh beberapa gaya eksternal. Descartes menyebut momentum sebagai 'besaran gerak', dan menyarankan bahwa itu telah ditetapkan di alam semesta pada awal alam semesta, 'diberikan oleh Tuhan'. Kita sekarang mengerti bahwa pernyataan bahwa momentum harus dilestarikan adalah benar karena hukum fisika tidak berubah dari satu tempat ke tempat lain.

Tetapi pemahaman ini tidak selalu begitu jelas. Faktanya, ada satu waktu di tahun 1930-an ketika tampak bahwa kelestarian momentum, pada tingkat partikel-elementer, mungkin harus ditiadakan. Inilah alasannya. Kelestarian Momentum mengatakan bahwa jika suatu sistem diam dan tiba-tiba pecah menjadi beberapa bagian—seperti ketika

sebuah bom meledak—semua bagian tidak dapat terbang ke arah yang sama. Hal ini jelas secara intuitif, tetapi kelestarian momentum membuatnya eksplisit dengan menyaratkan bahwa jika momentum awal adalah nol, karena untuk sistem yang diam, itu harus tetap nol selama tidak ada gaya eksternal yang bekerja pada sistem. Satu-satunya cara agar momentum itu bisa nol sesudahnya adalah jika, untuk setiap bagian yang terbang ke satu arah, ada potongan-potongan yang terbang ke arah yang berlawanan. Ini karena momentum, tidak seperti energi, merupakan besaran arah yang sama dengan kecepatan. Dengan demikian, momentum nol yang dibawa oleh satu partikel dapat dibatalkan hanya oleh momentum nol dalam arah yang berlawanan.

Salah satu partikel elementer yang menyusun nukleus atom, *neutron*, tidak stabil ketika diisolasi dan akan meluruh dalam waktu sekitar 10 menit. Neutron meluruh menjadi proton dan elektron, yang keduanya dapat dideteksi karena mereka membawa muatan listrik (sama dan berlawanan). Dengan demikian, orang mungkin mengamati jejak-jejak berikut dalam detektor setelah neutron, awalnya saat diam, meluruh menjadi seperti ditunjukkan pada Gambar 41.

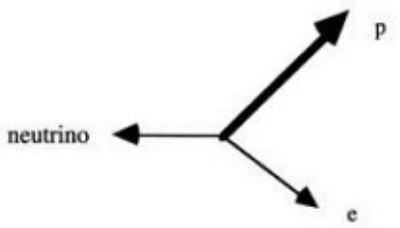
Namun, kelestarian momentum memberi tahu kita bahwa, sama halnya dengan bom, proton dan elektron seharusnya tidak terbang bergerak ke kanan. Salah satu dari mereka harus menuju ke kiri. Sebagai gantinya, setidaknya beberapa waktu, konfigurasi dalam diagram ini diamati. Pertanyaannya muncul: Apakah kelestarian momentum tidak berlaku untuk partikel elementer? Apalagi, tidak ada yang pada saat itu memahami sifat alamiah gaya yang bertang-



Gambar 41: Sebuah partkel elementer yang meluruh menjadi proton dan elektron.

gung jawab untuk peluruhan neutron di tempat pertama. Tetapi pemikiran untuk melepaskan hukum kelestarian ini (dan juga kelestarian energi, yang juga ternyata dilanggar dalam pengamatan ini) sangat tidak menyenangkan sehingga Wolfgang Pauli, salah satu fisikawan teoretis terkemuka pada masa itu, menyarankan kemungkinan lain. Dia mengusulkan bahwa partikel tidak terdeteksi mungkin diproduksi dalam peluruhan neutron bersama dengan proton dan elektron. Ini bisa menjadi kasus jika partikel itu netral secara elektronik, sehingga tidak dapat dideteksi dalam detektor partikel bermuatan standar. Itu juga harus sangat ringan, karena jumlah massa proton ditambah elektron hampir sama dengan massa neutron. Untuk alasan ini, kolega Pauli dari Italia, Fermi menyebut partikel ini sebagai neutrino, bahasa Italia untuk 'neutron kecil'. Ini adalah partikel yang saya bicarakan sebelumnya sehubungan dengan reaksi nuklir yang menggerakkan matahari. Jika neutrino diproduksi dalam peluruhan neutron, arahnya bisa sedemikian sehing-

ga momentumnya akan *membatalkan* dua partikel lainnya (lihat Gambar 42).



Gambar 42: Munculnya konsep neutrino salah satunya adalah untuk mempertahankan konsep kelestarian momentum (dan juga energi).

Sekarang, menciptakan partikel yang sampai saat ini tidak terdeteksi bukanlah sesuatu yang bisa dianggap enteng, tetapi Pauli juga tidak bisa dianggap enteng. Dia telah membuat kontribusi penting untuk fisika, terutama 'prinsip ekslusif Pauli', yang mengatur cara elektron dalam atom dapat berperilaku. Si jenius kelahiran Austria ini juga memiliki kepribadian yang mengintimidasi orang lain. Dia terkenal karena kebiasaannya beranjak dari tempat duduk ketika mendengarkan ceramah dan mengambil kapur dari tangan pembicara jika dia pikir pembicara itu mengoceh omong kosong. Selain itu, gagasan untuk melepaskan momentum dan kelestarian energi, yang telah bekerja dengan sangat baik di bidang fisika, tampak jauh lebih radikal—dalam semangat plagiarisme kreatif yang saya diskusikan sebelumnya—daripada apa yang ia usulkan. Jadi neutrino menjadi bagian fisika yang mapan jauh sebelum secara eksperimen

diamati pada tahun 1956, dan sebelum itu menjadi bagian standar astrofisika.

Hari ini, tentu saja, kita akan lebih ragu-ragu untuk melepaskan kelestarian momentum, bahkan pada skala kecil ini, karena kita mengenalinya sebagai konsekuensi dari simetri alam yang benar-benar mendasar. Kecuali kita mengharapkan hukum-hukum alam baru yang dinamis untuk bergantung pada posisi tertentu, kita dapat mengandalkan kelestarian momentum untuk menjadi valid. Dan, tentu saja, itu tidak hanya berlaku pada skala subatomik. Ini adalah bagian mendasar dalam memahami aktivitas skala manusia seperti baseball, skating, mengemudi, atau mengetik. Setiap kali seseorang menemukan sistem yang terisolasi, tanpa ada gaya eksternal yang berlaku padanya, momentum sistem ini dilestarikan; tetap konstan sepanjang waktu.

Di mana orang menemukan sistem terisolasi seperti itu? Jawabannya adalah di mana saja Anda pilih! Ada kartun terkenal yang menunjukkan dua ilmuwan di papan tulis yang penuh dengan persamaan, dengan satu ucapan kepada yang lain: "Ya, tapi saya tidak berpikir menggambar kotak di sekitarnya membuatnya menjadi *Unified Theory*." Ini mungkin benar, tetapi yang harus Anda lakukan untuk mendefinisikan sistem adalah menggambar kotak imajiner di sekitarnya. Triknya terletak pada memilih kotak yang tepat.

Perhatikan contoh berikut. Anda bergerak ke arah dinding bata dengan mobil Anda. Sekarang gambar kotak di sekitar mobil, dan sebut itu sistem. Awalnya Anda bergerak dengan kecepatan konstan; momentum mobil itu konstan.

Tiba-tiba dinding datang dan menghentikan Anda. Karena momentum Anda berubah menjadi nol pada saat Anda diam, dinding harus mengerjakan gaya pada sistem Anda, mobil. Dinding harus mengerjakan gaya tertentu untuk menghentikan Anda, tergantung pada kecepatan awal Anda.

Selanjutnya, gambarlah kotak di sekitar mobil dan dinding. Dalam sistem baru ini, tidak ada gaya eksternal yang bekerja. Tampaknya satu-satunya hal yang bertindak pada Anda adalah dinding, dan satu-satunya hal yang bertindak di dinding adalah Anda. Dari sudut pandang ini, apa yang terjadi ketika Anda menabrak dinding? Nah, jika tidak ada gaya eksternal yang bertindak dalam sistem ini, momentum harus lestari - yaitu, harus tetap konstan. Awalnya, Anda bergerak bersama dan memiliki beberapa momentum, dan dinding sedang diam, dengan momentum nol. Setelah kecelakaan itu, Anda dan tembok tampaknya sedang diam. Apa yang terjadi dengan momentumnya? Itu harus pergi ke suatu tempat. Fakta yang tampaknya telah hilang di sini hanyalah sinyal bahwa kotak itu masih belum cukup, yaitu, sistem Anda dan dinding tidak benar-benar terisolasi. Dinding itu berlabuh ke Bumi. Maka jelas bahwa momentum dapat lestari dalam tabrakan ini hanya jika Bumi sendiri mengambil momentum yang awalnya dibawa oleh mobil Anda. Sistem yang benar-benar terisolasi ini terdiri dari Anda, dinding, dan Bumi. Karena Bumi jauh lebih besar daripada mobil Anda, ia tidak harus bergerak terlalu banyak untuk mengambil momentum ini, namun geraknya harus berubah! Jadi, pada saat seseorang memberitahu Anda Bumi bergerak, yakinlah bahwa itu terjadi!



Gambar 43: Prinsip simetri.

Pencarian untuk simetri inilah yang mendorong fisika. Kenyataannya, semua realitas tersembunyi yang dibahas dalam bab terakhir harus dilakukan dengan memaparkan simetri baru alam semesta. Mereka yang saya gambarkan terkait dengan kelestarian energi dan momentum adalah apa yang disebut simetri ruang-waktu, karena alasan yang jelas bahwa mereka harus melakukan dengan simetri-simetri alam yang terkait dengan ruang dan waktu, dan untuk membedakannya dari yang tidak . Dengan demikian mereka secara terintegrasi terkait dengan Teori Relativitas Khusus Einstein. Karena relativitas menempatkan waktu pada pijakan yang sama dengan ruang, ia memperlihatkan simetri baru di antara keduanya. Ini mengikat mereka bersama-sama menjadi entitas tunggal baru, ruang-waktu, yang membawa serta satu rangkaian simetri tidak hadir jika ruang dan waktu dianggap secara terpisah. Memang, invariansi dari kelajuan cahaya itu sendiri merupakan sinyal simetri baru di alam yang menghubungkan ruang dan waktu.

Kita telah melihat bagaimana gerak meninggalkan hukum fisika invarian dengan menyediakan hubungan baru antara ruang dan waktu. 'Panjang' ruang-waktu empat-dimensi tertentu tetap invarian di bawah gerak seragam, sama seperti jarak spasial tiga-dimensi standar tetap invarian

di bawah rotasi. Simetri alam ini hanya mungkin jika ruang dan waktu diikat bersama. Jadi, terjemahan spasial murni dan terjemahan waktu murni, yang bertanggung jawab untuk momentum dan kelestarian energi, masing-masing, harus diikat bersama. Ini adalah konsekuensi dari relativitas khusus bahwa kelestarian energi dan momentum bukanlah fenomena yang terpisah. Bersama-sama mereka adalah bagian dari besaran tunggal yang disebut—'energi-momentum'. Kelestarian besaran tunggal ini—yang, pada kenyataannya, membutuhkan beberapa redefinisi baik energi dan momentum secara terpisah, karena mereka secara tradisional didefinisikan dalam konteks Hukum Newton—kemudian menjadi satu konsekuensi dari invariansi dunia di mana ruang dan waktu terikat bersama. Dalam pengertian ini, relativitas khusus memberi tahu kita sesuatu yang baru: Ruang-waktu adalah sedemikian rupa sehingga kita tidak dapat memiliki kelestarian energi tanpa kelestarian momentum dan sebaliknya.

Ada satu lagi simetri ruang-waktu yang sejauh ini saya singgung hanya secara tidak langsung. Hal ini terkait dengan simetri yang menghasilkan kelestarian momentum energi dalam relativitas khusus, tetapi jauh lebih akrab karena ini berkaitan dengan tiga dimensi dan bukan empat. Ini melibatkan simetri alam di bawah rotasi di ruang angkasa. Saya telah menggambarkan bagaimana pengamat yang berbeda mungkin melihat berbagai segi dari sebuah objek yang telah dirotasi, tetapi kita tahu bahwa besaran pokok seperti total panjangnya tetap tidak berubah di bawah rotasi tersebut. Ketidaktentuan hukum fisis ketika saya

merotasi laboratorium saya untuk menunjukkan arah yang berbeda adalah simetri alam yang sangat penting. Kita tidak mengharapkan, misalnya, sifat sistematis untuk memilih arah tertentu dalam ruang. Semua arah harus identik sejauh masih di bawah hukum yang mendasarinya.

Kenyataan bahwa hukum-hukum fisis tidak berubah di bawah rotasi berarti bahwa ada besaran yang terkait yang dilestarikan. Momentum terkait dengan invariansi alam di bawah terjemahan spasial, sementara besaran baru ini terkait dengan invariansi alam di bawah terjemahan dengan sudut. Untuk alasan ini, ini disebut *momentum sudut*. Seperti momentum, kelestarian momentum sudut memainkan peran penting dalam proses mulai dari skala atom hingga skala manusia. Untuk sistem yang terisolasi, momentum sudut harus dilestarikan. Memang, untuk setiap contoh kelestarian momentum, seseorang dapat mengganti kata 'jarak' dengan 'sudut' dan 'kecepatan' dengan 'kecepatan sudut' untuk menemukan beberapa contoh kelestarian momentum sudut. Ini adalah manifestasi utama dari plagiarisme kreatif.

Ini satu contoh. Ketika mobil saya menabrak mobil lain yang sedang diam, dan bemper terkunci sehingga keduanya bergerak bersama, gabungannya akan bergerak lebih lambat daripada mobil saya sendiri dengan gerak awalnya. Ini adalah konsekuensi klasik dari kelestarian momentum. Momentum sistem gabungan kedua mobil harus sama setelah tabrakan seperti sebelumnya. Karena massa gabungan sistem lebih besar dari massa objek asli yang bergerak, objek gabungan harus bergerak lebih lambat untuk menghemat momentum.

Di sisi lain, anggaplah seorang pemain skater berputar sangat cepat dengan kedua lengannya dipegang erat oleh sisinya. Ketika dia merentangkan lengannya ke luar, rotasinya melambat, seolah-olah dengan sihir. Ini adalah konsekuensi dari kelestarian momentum sudut, seperti contoh sebelumnya adalah konsekuensi dari kelestarian momentum. Sejauh rotasi dan kecepatan sudut yang bersangkutan, objek dengan radius yang lebih besar bertindak seperti sebuah benda dengan massa yang lebih besar. Dengan demikian, tindakan mengangkat lengannya meningkatkan radius tubuh skater berputar. Sama seperti kedua mobil bergerak bersama lebih lambat daripada satu mobil selama tidak ada gaya eksternal yang bekerja pada sistem, maka, juga, skater dengan radius yang ditingkatkan akan berputar lebih lambat daripada ketika radiusnya lebih kecil, selama tidak ada gaya eksternal bekerja padanya. Alternatif lain, seorang skater yang mulai berputar perlahan dengan lengan terulur dapat meningkatkan kecepatan rotasinya dengan menarik lengannya. Demikianlah medali Olimpiade dimenangkan.

Ada besaran-besaran lain yang dilestarikan di alam yang muncul dari simetri selain daripada ruang waktu, seperti muatan listrik. Saya akan kembali ke ini nanti. Untuk saat ini, saya ingin melanjutkan dengan satu sisi aneh dari invariansi rotasi bagi alam, yang akan memungkinkan saya memperkenalkan aspek simetri di mana-mana yang tidak selalu termanifestasi. Sebagai contoh, meskipun hukum gerak yang mendasarinya adalah invarian secara rotasi—yaitu, tidak ada arah yang dipilih yang diambil oleh hukum yang mengatur dinamika—dunia tidak. Jika ya, maka kita ha-

rus menemukan tidak mungkin memberikan petunjuk ke toko kelontong. Waktu tampak berbeda dari kanan; utara berbeda dari selatan; atas berbeda dari bawah.

Sangat mudah bagi kita untuk menganggap ini sebagai kecelakaan semata-mata dari keadaan kita, karena itulah tepatnya mereka. Kalau kita berada di tempat lain, perbedaan antara kiri dan kanan, utara dan selatan, mungkin sama sekali berbeda. Namun demikian, kenyataan bahwa kecelakaan keadaan kita dapat menyembunyikan simetri yang mendasari dunia adalah salah satu ide paling penting yang mengarahkan fisika modern. Untuk membuat kemajuan, dan agar memanfaatkan kekuatan simetri seperti itu, kita harus melihat ke bawah permukaan.

Banyak contoh klasik dari realita tersembunyi yang saya diskusikan di bab terakhir terkait dengan gagasan ini bahwa simetri dapat ditutupi. Ide ini berjalan dengan nama intimidasi *spontaneous symmetry breaking*, dan kita telah menemukannya dalam sejumlah samaran yang berbeda.

Contoh yang baik berasal dari perilaku magnet mikroskopis dalam sepotong besi, yang saya diskusikan pada akhir bab terakhir. Pada temperatur rendah, ketika tidak ada medan magnet eksternal yang diterapkan pada magnet ini, sangat menguntungkan bagi mereka untuk berbaris di beberapa arah, tetapi arah yang mereka pilih adalah acak. Tidak ada apa pun dalam fisika elektromagnetik yang mendasari yang memilih satu arah di atas yang lain, dan tidak ada prediksi sebelumnya yang dapat secara tepat menentukan arah mana yang akan mereka pilih. Namun begitu mereka telah memilih, arah itu menjadi sangat istimewa. Seekor

serangga, peka terhadap medan magnet, hidup di dalam magnet semacam itu akan tumbuh dengan asumsi ada sesuatu yang secara intrinsik berbeda dengan 'utara', yang menjadi arah di mana magnet mikroskopik disejajarkan.

Trik fisika adalah untuk menaikkan di atas keadaan tertentu yang mungkin melekat pada keberadaan kita sendiri dan berusaha untuk mengintip melampaui mereka. Dalam setiap kasus yang saya ketahui, ini berarti mencari simetri sejati dunia. Dalam kasus yang baru saja saya jelaskan, itu berarti menemukan bahwa persamaan yang mengatur magnet adalah invarian di bawah rotasi dan bahwa utara dapat diputar menjadi selatan dan fisika akan tetap sama.

Contoh prototipikal dari ini adalah penyatuan interaksi lemah dan elektromagnetik. Di sana, fisika yang mendasari tidak membedakan antara foton tanpa massa dan partikel Z yang sangat masif. Bahkan, ada simetri dari dinamika yang mendasari di mana Z dapat diubah menjadi foton dan semuanya akan terlihat persis sama. Di dunia di mana kita hidup, bagaimanapun, dengan fisika yang sama ini telah menghasilkan realisasi yang spesifik, sebuah solusi dari persamaan—'kondensat' partikel yang menempati ruang yang kosong—di mana foton dan Z berperilaku cukup berbeda.

Secara matematis, hasil ini dapat diterjemahkan untuk dibaca: Sebuah solusi khusus dari persamaan matematika tidak perlu invarian di bawah serangkaian transformasi yang sama di mana persamaan yang mendasari adalah invarian. Setiap realisasi spesifik dari tatanan matematika yang mendasari, seperti realisasi yang kita lihat ketika kita melihat sekeliling ruangan, dapat merusak simetri dasar yang terkait.

Perhatikan contoh yang ditemukan oleh fisikawan Abdus Salam, salah satu dari mereka yang memenangkan Hadiah Nobel untuk karyanya pada penyatuan elektromagnetik dan interaksi lemah: Ketika Anda duduk di meja makan melingkar, itu benar-benar simetris. Gelas anggur di sebelah kanan dan gelas anggur di sebelah kiri setara. Tidak ada tetapi hukum etika (yang saya tidak pernah ingat) menentukan yang menjadi milik Anda. Setelah Anda memilih gelas anggur—katakanlah, yang di sebelah kanan—pilihan orang lain tetap, yaitu, jika semua orang menginginkan gelas anggur. Ini adalah fakta universal kehidupan yang kita jalani dalam satu realisasi khusus dari apa yang mungkin merupakan kemungkinan tanpa batas. Mengutip Rousseau: Dunia dilahirkan bebas, tetapi di mana-mana berantai!

Mengapa kita harus begitu peduli tentang simetri di alam, bahkan yang tidak nyata? Apakah itu hanya kenikmatan estetis yang khas yang didapat oleh fisikawan, semacam masturbasi intelektual? Mungkin sebagian, *tetapi* ada juga alasan lain. Kesimetrian, bahkan yang tidak secara langsung dimanifestasikan, dapat sepenuhnya menentukan besaran fisis yang muncul dalam deskripsi alam dan hubungan dinamis di antara keduanya. Singkatnya, simetri mungkin fisika. Dalam analisis terakhir, mungkin tidak ada yang lain.

Pertimbangkan bahwa, misalnya, energi dan momentum yang merupakan konsekuensi langsung dari dua simetri ruang-waktu, bersama-sama memberikan deskripsi gerak yang sepenuhnya setara dengan semua Hukum Newton yang menggambarkan gerak benda di medan gravitasi

Bumi. Semua dinamikanya—memaksa menghasilkan percepatan, misalnya—ikuti dari dua prinsip ini. Simetri bahkan menentukan sifat dari kekuatan fundamental itu sendiri, seperti yang akan saya jelaskan.

Simetri menentukan bagi kita apa variabel yang diperlukan untuk menggambarkan dunia. Setelah ini selesai, semua yang lain diperbaiki. Ambil contoh favorit saya lagi: sebuah kulit bola. Ketika saya mewakilkan sapi sebagai kulit bola, saya mengatakan bahwa satu-satunya proses fisis yang perlu kita perhatikan akan bergantung pada jari-jari sapi. Apa pun yang bergantung secara eksplisit pada lokasi bersudut spesifik harus berlebih, karena semua lokasi sudut pada radius tertentu identik. Simetri besar pada kulit bola telah mengurangi masalah dengan sejumlah besar parameter yang berpotensi menjadi satu dengan parameter tunggal, yakni radius.

Kita bisa mengubah ini. Jika kita dapat mengisolasi variabel-variabel yang penting untuk deskripsi yang tepat dari beberapa proses fisis, maka, jika kita pintar, kita mungkin dapat bekerja mundur untuk menebak simetri intrinsik apa yang terlibat. Kesimetrian ini pada gilirannya dapat menentukan semua hukum yang mengatur proses. Dalam pengertian ini kita sekali lagi mengikuti jejak Galileo. Ingat bahwa dia menunjukkan kepada kita bahwa hanya belajar bagaimana hal-hal bergerak sama saja dengan belajar *mengapa* benda-benda bergerak. Definisi kecepatan dan percepatan membuatnya jelas apa yang penting untuk menentukan perilaku dinamis objek bergerak. Kita hanya melangkah satu langkah lebih jauh ketika kita berasumsi

bahwa hukum yang mengatur perilaku seperti itu tidak hanya dibuat jelas dengan mengisolasi variabel-variabel yang relevan; sebaliknya, variabel-variabel ini sendiri *menentukan* yang lainnya.

Mari kembali ke deskripsi Feynman tentang alam sebagai permainan catur hebat yang dimainkan oleh para tuhan, yang istimewa untuk kita saksikan. Aturan permainan adalah apa yang kita sebut fisika fundamental, dan memahami aturan-aturan ini adalah tujuan kita. Feynman mengklaim bahwa memahami aturan-aturan ini adalah semua yang bisa kita harapkan ketika kita mengklaim 'memahami' alam. Saya pikir sekarang kita bisa mengklaim melangkah lebih jauh. Kita menduga bahwa aturan-aturan ini dapat sepenuhnya ditentukan hanya dengan menjelajahi konfigurasi dan simetri dari 'papan' dan 'potongan-potongan' yang memainkan permainan. Dengan demikian untuk memahami alam, yaitu memahami aturannya, setara dengan memahami simetrinya.

Ini adalah klaim yang sangat kuat, dan yang dilakukan dalam generalitas yang agak besar. Karena saya berharap Anda sekarang bingung dan skeptis, saya ingin membahas beberapa contoh untuk menjadikan hal-hal lebih eksplisit. Dalam prosesnya, saya berharap untuk memberikan beberapa gagasan tentang bagaimana fisika pada hasil terdepan.

Pertama, izinkan saya menggambarkan gagasan-gagasan ini dalam konteks analogi Feynman. Papan catur adalah objek yang agak simetris. Pola papan berulang setelah satu ruang ke segala arah. Papan terbuat dari dua warna, dan jika kita menukarnya, polanya tetap identik. Selain itu, fakta bahwa papan catur memiliki 8×8 kotak memungkinkan

pemisahan alami menjadi dua bagian, yang juga dapat dipertukarkan tanpa mengubah tampilan papan.

Sekarang ini saja tidak cukup untuk menentukan permainan catur karena, misalnya, permainan catur juga bisa dimainkan di papan seperti itu. Namun, ketika saya menambahkan ini fakta bahwa ada enam belas buah pada masing-masing dari dua sisi permainan catur, delapan di antaranya identik, dan yang lain ada tiga rangkaian dua buah identik ditambah dua penyendiri, banyak hal menjadi jauh lebih terbatas. Sebagai contoh, adalah wajar untuk menggunakan simetri refleksi dari papan untuk menyusun tiga bagian dengan pasangan yang identik—benteng, ksatria, dan uskup—dalam pola cermin-bayangan yang dipantulkan di sekitar pusat papan. Dua warna lawan yang berbeda kemudian mereplikasi dualitas papan. Selain itu, rangkaian gerakan dari semua bidak catur konsisten dengan serangkaian gerakan paling sederhana yang diizinkan oleh tata letak papan. Membutuhkan sepotong untuk bergerak hanya dalam satu warna membatasi gerakan ke arah diagonal, seperti halnya untuk uskup. Membutuhkan pion untuk menangkap sepotong hanya ketika berada di ruang yang bersebelahan dengan warna yang sama membutuhkan juga menangkap yang dibuat pada diagonal, dan seterusnya. Sementara saya tidak mengklaim di sini bahwa ini adalah bukti yang kuat bahwa permainan catur benar-benar ditentukan oleh simetri papan dan potongan-potongan, perlu dicatat bahwa hanya ada satu variasi permainan yang bertahan hari ini. Saya berharap bahwa jika ada kemungkinan lain yang memungkinkan, mereka juga akan tetap dalam mode tersebut.

Anda mungkin ingin menghibur diri dengan mengajukan pertanyaan yang sama tentang olahraga favorit Anda. Apakah sepakbola akan sama jika tidak dimainkan di lapangan 100 yard dibagi menjadi bagian 10-halaman? Lebih penting lagi, seberapa besar aturan itu bergantung pada simetri tim yang bermain? Bagaimana dengan baseball? Berlian bisbol tampaknya merupakan bagian penting dari permainan. Jika ada lima pangkalan yang disusun di atas pentagon, apakah Anda perlu empat angka?

Tapi mengapa membatasi diskusi dengan olahraga? Berapa hukum negara yang ditentukan oleh konfigurasi legislator? Dan untuk mengajukan pertanyaan bahwa banyak orang khawatir tentang pengeluaran militer di Amerika Serikat telah bertanya: Berapa banyak perencanaan pertahanan yang ditentukan oleh keberadaan empat angkatan bersenjata yang berbeda: angkatan udara, tentara, angkatan laut, dan marinir?

Untuk kembali ke fisika, saya ingin menggambarkan bagaimana simetri itu, bahkan yang tidak nyata, dapat mengatur untuk memperbaiki bentuk hukum fisis yang dikenal. Saya akan mulai dengan satu hukum kelestarian yang belum saya bahas yang memainkan peran penting dalam fisika: kelestarian muatan. Semua proses di alam tampaknya melestarikan muatan—yaitu, jika ada satu muatan negatif bersih pada awal proses apa pun, maka tidak peduli betapa rumitnya proses ini, akan ada satu muatan negatif bersih tersisa di bagian akhir. Di antara, banyak partikel bermuatan dapat dibuat atau dihancurkan, tetapi hanya di pasangan muatan positif dan negatif, sehingga total muatan setiap

saat sama dengan yang di awal *dan* di akhir.

Kita mengakui, dengan teorema Noether, bahwa hukum kelestarian universal ini adalah konsekuensi dari simetri universal: Kita dapat mengubah semua muatan positif di dunia menjadi muatan negatif, dan sebaliknya, dan tidak ada apa pun tentang dunia akan berubah. Ini benar-benar setara dengan mengatakan bahwa apa yang kita sebut positif dan negatif adalah sewenang-wenang, dan kita hanya mengikuti konvensi ketika kita memanggil elektron bermuatan negatif dan proton bermuatan positif.

Simetri yang bertanggung jawab untuk kelestarian muatan, pada kenyataannya, sama dalam semangat untuk simetri ruang-waktu yang telah saya bahas sehubungan dengan relativitas umum. Jika, misalnya, kita secara bersamaan mengubah semua penggaris di alam semesta, sehingga apa yang 1 inci sebelumnya mungkin sekarang dibaca 2 inci, kita akan mengharapkan hukum fisika terlihat sama. Berbagai konstanta fundamental akan berubah nilainya untuk memberi kompensasi perubahan skala, tetapi sebaliknya tidak akan ada yang berubah. Ini setara dengan pernyataan bahwa kita bebas menggunakan sistem satuan apa pun yang kita ingin untuk menggambarkan proses fisis. Kita dapat menggunakan mil dan pon di Amerika Serikat, dan setiap negara maju lainnya di dunia mungkin menggunakan kilometer dan kilogram. Selain ketidaknyamanan membuat konversi, hukum fisika adalah sama di Amerika Serikat seperti di bagian dunia lainnya.

Tapi bagaimana jika saya memilih untuk mengubah panjang penggaris dengan jumlah yang berbeda dari titik ke

titik? Apa yang terjadi kemudian? Nah, Einstein mengatakan kepada kita bahwa tidak ada yang salah dengan prosedur ini. Itu hanya menyiratkan bahwa hukum yang mengatur gerak partikel di dunia seperti itu akan setara dengan yang dihasilkan dari kehadiran beberapa medan gravitasi.

Apa yang dikatakan oleh relativitas umum, adalah bahwa ada simetri umum dari alam yang memungkinkan kita mengubah definisi panjang dari titik ke titik hanya jika kita juga mengizinkan keberadaan benda seperti medan gravitasi. Dalam hal ini, kita dapat mengimbangi perubahan lokal dalam panjangnya dengan memperkenalkan medan gravitasi. Atau, kita mungkin dapat menemukan deskripsi global di mana panjang tetap konstan dari titik ke titik, dan kemudian tidak perlu ada medan gravitasi. Simetri ini, yang disebut invariansi koordinat umum, sepenuhnya menentukan teori yang kita sebut relativitas umum. Ini menyiratkan bahwa sistem koordinat yang kita gunakan untuk menggambarkan ruang dan waktu itu sendiri sembarang, sama seperti satuan yang kita gunakan untuk menggambarkan jarak yang sembarang. Namun ada perbedaan. Sistem koordinat yang berbeda mungkin setara, tetapi jika konversi di antara mereka bervariasi secara *lokal*—yaitu, panjang standar bervariasi dari titik ke titik—konversi ini juga akan memerlukan pengenalan medan gravitasi untuk pengamat tertentu agar gerak yang diprediksi dari benda tetap sama. Intinya adalah ini: Di dunia aneh ini di mana saya memilih untuk memvariasi definisi panjang dari titik ke titik, lintasan objek yang bergerak di bawah aksi tidak ada gaya lain akan tampak melengkung, dan tidak lurus. Saya

sebelumnya menggambarkan ini dalam contoh saya tentang sebuah pesawat yang berkeliling dunia seperti yang dilihat oleh seseorang yang melihat proyeksi pada peta yang datar. Saya dapat menjelaskan hal ini, dan masih sesuai dengan peraturan Galileo, hanya jika saya memungkinkan gaya nyata untuk bertindak dalam bingkai baru ini. Gaya ini adalah gravitasi. Bentuk gravitasi, luar biasa, kemudian dapat dikatakan sebagai hasil dari invasif umum dari alam.

Ini tidak berarti bahwa gravitasi adalah isapan jempol dari imajinasi kita. Relativitas umum mengatakan kepada kita bahwa massa *menentukan* kurva ruang. Dalam hal ini, semua sistem koordinat yang dapat kita pilih akan memperhitungkan kelengkungan ini dengan satu atau lain cara. Bisa jadi secara lokal mungkin dapat mengabaikan medan gravitasi—yaitu, seorang pengamat yang jatuh bebas tidak akan 'merasakan' gaya apa pun pada dirinya, seperti astronot yang mengorbit Bumi jatuh bebas dan karena itu tidak merasakan tarikan gravitasi. Namun, lintasan pengamat jatuh bebas yang berbeda akan melengkung satu sama lain—tanda bahwa ruang melengkung. Kita dapat memilih kerangka acuan apa pun yang kita inginkan. Ditetapkan di Bumi, kita akan mengalami gaya gravitasi. Pengamat yang jatuh secara bebas mungkin tidak. Namun, dinamika partikel dalam kedua kasus akan mencerminkan kelengkungan ruang yang mendasarinya, yang nyata dan yang disebabkan oleh keberadaan materi. Sebuah medan gravitasi mungkin 'fiktif' dalam arti bahwa pilihan koordinat yang tepat dapat menyingkirkannya di mana-mana, tetapi ini hanya mungkin jika ruang yang mendasari dalam kasus ini benar-benar

datar, yang berarti bahwa tidak ada masalah. Salah satu contohnya adalah sistem koordinat berotasi, seperti Anda mungkin menemukan jika Anda berdiri melawan dinding di salah satu wahana karnaval di mana ruang silinder besar berubah dan Anda terdorong ke luar. Di dalam ruang yang berotasi, Anda mungkin membayangkan bahwa ada medan gravitasi menarik Anda keluar. Faktanya, tidak ada massa yang bertindak sebagai sumber dari medan semacam itu, seperti Bumi untuk medan gravitasi kita. Para penonton yang menonton mengakui bahwa apa yang Anda sebut medan gravitasi hanyalah sebuah kebetulan dari pilihan sistem koordinat yang buruk, yang tetap pada ruang berotasi. Kelengkungan adalah nyata; medan gravitasi bersifat subyektif.

Saya mulai berbicara tentang muatan listrik dan akhirnya berbicara tentang gravitasi. Sekarang saya ingin melakukan untuk muatan listrik apa yang saya lakukan untuk panjangnya di ruang-waktu. Apakah ada simetri alam yang *secara lokal* memungkinkan saya secara sembarang memilih konvensi saya tentang tanda muatan listrik dan masih menyimpan prediksi hukum fisika yang sama? Jawabannya adalah ya, tetapi hanya jika ada bidang lain di alam yang bekerja pada partikel yang dapat memberi 'kompensasi' untuk muatan lokal saya dengan cara yang sama seperti medan gravitasi memberi 'kompensasi' untuk pilihan sistem koordinat yang berubah-ubah.

Bidang yang dihasilkan dari simetri alam semacam itu bukanlah medan elektromagnetik itu sendiri, seperti yang Anda bayangkan. Sebaliknya, bidang ini memainkan peran

kelengkungan ruang-waktu. Itu selalu ada jika muatan berada di dekatnya, seperti kelengkungan ruang selalu ada jika ada massa di sekitarnya. Itu tidak sembarang. Sebaliknya, ada bidang lain, yang terkait dengan medan elektromagnetik, yang memainkan peran analog dengan medan gravitasi. Medan ini disebut *potensial vektor* dalam elektromagnetik.

Kesimetrian alam yang aneh ini, yang memungkinkan saya secara lokal mengubah definisi saya tentang muatan atau panjang dengan mengorbankan gaya ekstra, disebut simetri tera (*gauge symmetry*), dan saya sebutkan secara singkat di bab sebelumnya. Kehadirannya, dalam berbagai bentuk, dalam relativitas umum dan elektromagnetik adalah alasan Hermann Weyl memperkenalkannya dan mencoba menyatukan keduanya. Ternyata jauh lebih umum, seperti yang akan kita lihat. Apa yang ingin saya tekankan adalah simetri seperti itu (1) *membutuhkan* keberadaan berbagai gaya di alam, dan (2) memberi tahu kita berapa jumlah yang benar-benar 'fisis' dan berapa jumlah yang hanya artefak dari khusus kita acu. Sama seperti variabel sudut pada kulit bola yang berlebihan jika semuanya hanya bergantung pada jari-jari kulit bola, maka dalam beberapa hal simetri alam menunjukkan bahwa medan elektromagnetik dan kelengkungan ruang-waktu adalah fisis dan medan gravitasi dan potensial vektor adalah bergantung-pengamat.

Bahasa eksotis dari simetri tera akan menjadi ilmu matematika belaka jika hanya digunakan untuk mendeskripsikan sesuatu setelah fakta. Apalagi, elektromagnetik dan gravitasi dipahami dengan baik sebelum simetri tera yang pernah diajukan. Apa yang membuat simetri tera penting adalah

implikasinya untuk *rest of physics*. Kita telah menemukan dalam dua puluh lima tahun terakhir bahwa semua gaya yang diketahui di alam dihasilkan dari simetri tera. Ini pada gilirannya memungkinkan kita membangun pemahaman baru tentang hal-hal yang sebelumnya tidak kita pahami. Pencarian simetri tera yang terkait dengan gaya-gaya ini telah memungkinkan para fisikawan untuk membedakan jumlah fisis yang relevan yang mendasari gaya-gaya ini.

Ini adalah ciri umum dari simetri tera yang harus ada beberapa bidang yang dapat beraksi jarak jauh, terkait dengan kemampuan mengganti kebebasan untuk memvariasikan definisi sifat-sifat tertentu dari partikel atau ruang-waktu dari titik ke titik lebih panjang menjauhkan tanpa mengubah fisika yang mendasarinya. Dalam kasus relativitas umum, ini dimanifestasikan oleh medan gravitasi; dalam elektromagnetik, itu dimanifestasikan oleh medan listrik dan magnet (yang merupakan hasil dari potensi vektor). Tetapi interaksi lemah antara partikel dalam inti hanya terjadi pada jarak yang sangat pendek. Bagaimana itu bisa dikaitkan dengan simetri ukur yang mendasari alam?

Jawabannya adalah bahwa simetri ini "secara spontan rusak." Densitas yang sama dari partikel di ruang kosong yang menyebabkan partikel Z tampak masif, sementara foton, yang mentransmisikan elektromagnetik, tetap tak bermassa, memberikan latar belakang yang dapat merespon secara fisis muatan lemah dari suatu objek. Untuk alasan ini seseorang tidak lagi bebas untuk mengubah secara lokal apa yang dimaksud dengan muatan lemah positif dan negatif dan dengan demikian simetri tera yang jika tidak ada tidak akan

termanifestasi. Seolah-olah ada medan listrik latar di alam semesta. Dalam hal ini, akan ada perbedaan besar antara muatan positif dan negatif dalam satu jenis muatan yang akan tertarik oleh bidang ini dan jenis lainnya akan ditolak olehnya. Dengan demikian, perbedaan antara muatan positif dan negatif tidak akan lagi sembarang. Simetri alam yang mendasar ini sekarang akan disembunyikan.

Yang luar biasa adalah bahwa simetri tera yang secara spontan rusak tidak sepenuhnya tersembunyi. Seperti yang telah saya jelaskan, efek dari 'kondensasi' partikel di ruang kosong adalah membuat partikel W dan Z tampak berat, sementara menjaga foton tidak bermassa. Ciri khas dari *broken gauge theory* adalah keberadaan partikel-partikel berat, yang mentransmisikan gaya-gaya yang dapat bertindak hanya jarak pendek—disebut gaya jarak-pendek (*short-range forces*). Rahasia menemukan simetri yang mendasarinya yang rusak adalah dengan melihat gaya jarak-dekat dan mengeksplorasi kesamaan dengan gaya jarak-jauh (*long-range forces*)—gaya-gaya yang dapat beraksi dalam jarak jauh, seperti gravitasi dan elektromagnetik. Ini, dalam arti heuristik setidaknya, adalah persis bagaimana interaksi lemah akhirnya 'dipahami' menjadi sepupu elektrodinamika kuantum, teori kuantum elektromagnetik.

Feynman dan Murray Gell-Mann mengembangkan teori fenomenologis di mana interaksi lemah dimasukkan ke dalam bentuk yang sama dengan elektromagnetik untuk mengeksplorasi konsekuensinya. Dalam satu dekade sebuah teori menyatukan elektromagnetik dan interaksi lemah sebagai teori tera yang dituliskan. Salah satu prediksi utamanya

adalah bahwa harus ada satu bagian dari gaya lemah yang belum pernah diamati sebelumnya. Hal itu tidak akan melibatkan interaksi yang mencampur muatan partikel, seperti yang mengambil neutron netral dan memungkinkannya meluruh menjadi proton positif dan elektron negatif. Sebaliknya, akan memungkinkan interaksi yang akan menjaga muatan partikel yang sama, sama seperti listrik dapat bertindak antara elektron tanpa mengubah muatannya. 'Interaksi netral' ini adalah prediksi fundamental dari teori, yang akhirnya tidak diragukan lagi diamati pada tahun 1970-an. Ini barangkali merupakan kasus pertama penemuan simetri yang meramalkan keberadaan gaya baru, bukannya menamakannya di belakang.

Kelemahan dari interaksi lemah adalah karena fakta bahwa simetri tera yang terkait dengannya secara spontan rusak. Dengan demikian—pada skala panjang yang lebih besar daripada jarak rata-rata antar partikel di kondensat latar belakang yang memengaruhi sifat partikel W dan Z—partikel-partikel ini tampak sangat berat dan interaksi yang dimediasi oleh mereka ditekan. Jika yang lain, simetri tera baru ada di alam yang secara spontan putus pada skala jarak yang lebih kecil, gaya yang terlibat dapat dengan mudah terlalu lemah untuk dideteksi. Mungkin ada jumlah yang tak terbatas. Mungkin juga tidak.

Kemudian menjadi relevan untuk menanyakan apakah semua gaya di alam harus dihasilkan dari simetri tera, bahkan jika mereka secara spontan rusak. Apakah tidak ada alasan lain untuk gaya ada? Kita belum memiliki pemahaman yang lengkap tentang masalah ini, tetapi kita pikir

jawabannya sepertinya tidak ada. Anda lihat, semua teori yang tidak melibatkan simetri seperti itu secara matematis 'sakit', atau secara internal tidak konsisten. Begitu efek mekanika kuantum benar-benar diperhitungkan, tampaknya jumlah parameter fisis yang tak terbatas harus diperkenalkan dalam teori-teori ini untuk menggambarkannya dengan benar. Setiap teori dengan jumlah parameter yang tak terbatas bukanlah teori sama sekali! Simetri tera bertindak untuk membatasi jumlah variabel yang diperlukan untuk menggambarkan fisika, sama seperti simetri kulit bola bertindak untuk membatasi jumlah variabel yang diperlukan untuk menggambarkan seekor sapi. Dengan demikian, apa yang tampaknya diperlukan untuk menjaga berbagai gaya matematis dan fisis yang sehat adalah simetri yang sangat bertanggung jawab atas keberadaan mereka di tempat pertama.

Inilah sebabnya mengapa fisikawan partikel terobsesi dengan simetri. Pada tingkat fundamental, simetri tidak hanya menggambarkan alam semesta; mereka menentukan apa yang mungkin, yaitu, apa *itu* fisika. Kecenderungan dalam *spontaneous symmetry breaking* sejauh ini selalu sama. *Symmetry breaking* pada skala makroskopik dapat bermanifestasi pada skala yang lebih kecil. Ketika kita terus mengeksplorasi skala yang lebih kecil, alam semesta terus tampak lebih simetris. Jika seseorang ingin memaksakan konsep manusia tentang kesederhanaan dan keindahan alam, ini harus menjadi manifestasinya. Batasnya *adalah* simetri.

Pertimbangan simetri telah membawa kita ke batas pengetahuan kita tentang dunia. Tetapi dalam dua puluh

tahun terakhir ini mereka telah mulai mendorong kita jauh melampaui batas ini, ketika para fisikawan telah bergulat untuk mengeksplorasi simetri apa yang mungkin menentukan mengapa alam semesta pada skala paling mendasar berperilaku seperti itu dan apakah simetri alam yang diamati mungkin memaksa kita menuju konsepsi realitas fisis yang sama sekali baru.

Bagian dari motivasi berasal dari hubungan antara elektromagnetik dan gravitasi yang baru saja saya bahas dan sebutkan dalam konteks upaya Herman Weyl dalam penyatuan. Pengakuan bahwa kedua gaya muncul dari simetri lokal alam sangat memuaskan, namun demikian tetap ada perbedaan mendasar antara keduanya. Gravitasi terkait dengan simetri ruang, sedangkan elektromagnetik dan gaya alam yang dikenal lainnya tidak. Gaya yang kita rasakan sebagai gravitasi mencerminkan kelengkungan ruang yang mendasarinya, sedangkan apa yang kita rasakan sebagai elektromagnetik tidak. Pada tahun 1919, perbedaan ini ditangani oleh seorang matematikawan Polandia muda, Theodor Kaluza, yang mengusulkan bahwa mungkin ada dimensi ruang lain, di luar tiga yang kita alami secara langsung. Dapatkah elektromagnetik dihasilkan dari beberapa kelengkungan yang mendasarinya dalam dimensi ruang angkasa yang tidak teramati?

Hebatnya, jawabannya ternyata ya. Seperti yang dikonfirmasi secara independen beberapa tahun kemudian oleh fisikawan Swedia Oskar Klein, jika seseorang menambahkan dimensi kelima, yang disarankan Klein dapat meringkuk dalam lingkaran yang sangat kecil sehingga tidak dapat

dideteksi oleh eksperimen yang ada, maka baik elektromagnetik dan gravitasi empat dimensi dapat dihasilkan dari teori lima dimensi yang mendasari dengan simetri lima dimensi, di mana kelengkungan dalam empat dimensi yang kita amati akan menghasilkan apa yang kita amati sebagai gravitasi, dan kelengkungan dalam dimensi kelima dapat menghasilkan apa yang kita amati sebagai elektromagnetik.

Anda akan berpikir bahwa dengan hasil yang luar biasa seperti Kaluza dan Klein akan menjadi setenar Einstein dan Dirac, tetapi ternyata teori mereka, seindah itu, juga memprediksi jenis tambahan gaya gravitasi yang tidak diamati, dan dengan demikian ide ini tidak mungkin benar karena mereka telah merumuskannya. Namun demikian, penyatuan Kaluza-Klein tetap di belakang pikiran para ahli teori saat sisa fisika abad kedua puluh dibuka.

Pada tahun 1970-an dan 1980-an, ketika menjadi jelas bahwa semua gaya lain di alam, seperti elektromagnetik, dijelaskan oleh simetri tera, fisikawan mulai sekali lagi mengambil cawan suci Einstein untuk mempersatukan semua gaya di alam, termasuk gravitasi, dalam teori tunggal.

Untuk menceritakan kisah yang tepat tentang apa yang dibeberkan akan membutuhkan sebuah buku utuh, tetapi untungnya saya baru-baru ini telah menulisnya, seperti juga sejumlah orang lain. Cukuplah untuk mengatakan bahwa fisikawan mengusulkan pada tahun 1984 bahwa jika kita memperluas ruang-waktu kita tidak hanya dengan satu dimensi, tetapi setidaknya enam dimensi tambahan, maka seseorang dapat menanamkan semua simetri yang diamati terkait dengan semua gaya yang diamati di alam, *termasuk*

gravitasi, dengan cara itu juga muncul untuk memungkinkan teori gravitasi kuantum yang konsisten, sesuatu yang sejauh ini menghindari semua upaya, untuk dikembangkan. 'Teori' yang dihasilkan dikenal sebagai teori Superstring, karena sebagian didasarkan pada asumsi bahwa semua partikel yang kita amati di alam sebenarnya terdiri dari benda-benda seperti tali yang dapat bergetar dalam dimensi ekstra.

Teori string telah mengalami pasang surut selama dua dekade terakhir, dan kegembiraan awal tahun 1980-an telah dilunakkan oleh kesadaran bahwa seseorang tidak dapat dengan jelas menulis satu teori string yang secara unik memprediksi apa pun seperti dunia kita ada dan kesadaran bahwa bahkan jenis-jenis simetri matematis yang lebih canggih mungkin diperlukan untuk membuat teori itu konsisten, sehingga mungkin bahkan gagasan string-string fundamental itu sendiri bisa menjadi ilusi, dengan objek-objek yang lebih mendasar menjadi sesuatu yang lain. Bahkan, ketika saya akan kembali ke bagian akhir buku ini, kegagalan teori string untuk memprediksi apa pun yang menyerupai alam semesta kita baru-baru ini mendorong beberapa ahli teori untuk menyatakan bahwa *mungkin tidak ada* penjelasan fisis mendasar tentang mengapa alam semesta adalah seperti sekarang ini. Itu mungkin hanya kecelakaan lingkungan!

Namun saya tidak, memperkenalkan ide-ide teori string dan dimensi tambahan di sini baik untuk memuji mereka atau mengubur mereka. Juri tentu masih keluar dari semua masalah ini. Sebaliknya, apa yang penting untuk disadari adalah bahwa ini merupakan pencarian simetri yang telah mendorong para ahli teori untuk menjelajahi dunia baru

yang hipotetis ini. Seorang fisikawan telah menyebut keindahan yang terkait dengan kesimetrian dimensi ekstra sebagai 'keanggunan'. Waktu akan mengatakan apakah keindahan ini benar-benar dari alam atau hanya di mata yang melihatnya.

Sekali lagi, saya terbawa oleh fenomena di perbatasan energi-tinggi. Ada juga banyak contoh bagaimana simetri mengatur perilaku dinamis dunia kita sehari-hari dan yang tidak terkait dengan keberadaan gaya baru di alam. Mari kembali ke ini.

Sampai sekitar tahun 1950, tempat utama di mana simetri telah memanifestasikan dirinya secara eksplisit dalam fisika adalah sifat-sifat bahan seperti kristal. Seperti papan catur Feynman, kristal melibatkan pola simetris atom yang terletak pada kisi kristal rigid. Ini adalah pola simetris dari atom-atom ini yang tercermin dalam pola permukaan kristal yang indah seperti berlian dan batu mulia lainnya. Dari relevansi langsung ke fisika, gerak muatan elektronik di dalam kisi kristal, seperti pion dalam permainan catur, dapat sepenuhnya ditentukan oleh simetri kisi. Sebagai contoh, fakta bahwa pola kisi berulang dengan periodisitas tertentu dalam ruang yang memperbaiki kisaran kemungkinan momentum elektron yang bergerak di dalam kisi. Ini karena periodisitas materi di dalam kisi menyiratkan bahwa Anda dapat membuat terjemahan hanya hingga jarak maksimum tertentu sebelum hal-hal tampak persis sama, yang setara dengan tidak membuat terjemahan sama sekali. Saya tahu kedengarannya sedikit seperti sesuatu yang mungkin Anda baca di *Alice in Wonderland*, tetapi itu memiliki efek

yang signifikan. Karena momentum terkait dengan simetri hukum fisis di bawah terjemahan dalam ruang, membatasi ukuran ruang yang efektif oleh jenis periodisitas ini membatasi rentang momentum yang tersedia yang dapat dibawa oleh partikel.

Fakta tunggal ini bertanggung jawab atas karakter semua mikroelektronika modern. Jika saya meletakkan elektron di dalam struktur kristal, mereka akan dapat bergerak bebas hanya dalam rentang waktu tertentu. Ini berarti bahwa mereka akan memiliki rentang energi yang tetap juga. Tergantung pada kimia atom dan molekul dalam kisi kristal, bagaimanapun, elektron dalam rentang energi ini dapat terikat pada atom individu dan tidak bebas bergerak. Hanya dalam kasus bahwa 'band' momentum dan energi yang dapat diakses ini sesuai dengan rentang energi di mana elektron bebas mengalir, apakah material dengan mudah menghantarkan listrik. Dalam semikonduktor modern seperti silikon, seseorang dapat, dengan menambahkan kepadatan impuritas tertentu yang memengaruhi rentang energi elektron mana yang terikat pada atom, mengatur perubahan yang sangat sensitif dalam konduktivitas material yang terjadi karena kondisi eksternal bervariasi.

Argumen seperti ini mungkin sebenarnya relevan dengan misteri terbesar dalam *modern condensed matter physics*. Antara 1911, ketika Onnes menemukan superkonduktivitas dalam merkuri, dan 1987, tidak ada bahan yang pernah ditemukan yang menjadi superkonduktor pada temperatur lebih tinggi dari 20° di atas nol mutlak. Menemukan materi seperti itu telah lama menjadi cawan suci subjek.

Jika sesuatu dapat ditemukan yang superkonduktor pada temperatur kamar, misalnya, mungkin merevolusi teknologi. Jika resistensi dapat diatasi sepenuhnya tanpa perlu skema pendinginan yang rumit, berbagai perangkat listrik baru akan menjadi praktis. Pada tahun 1987, seperti yang saya sebutkan sebelumnya, dua ilmuwan yang bekerja untuk IBM secara kebetulan menemukan material yang menjadi superkonduktor pada 35° di atas nol mutlak. Bahan serupa lainnya segera diselidiki, dan sampai saat ini bahan yang menjadi superkonduktor di lebih dari 100° di atas nol mutlak telah ditemukan. Ini masih jauh dari superkonduktivitas temperatur kamar, tetapi di atas titik didih nitrogen cair, yang dapat diproduksi secara komersial relatif murah. Jika generasi superkonduktor 'temperatur-tinggi' ini dapat disempurnakan dan dimanipulasi menjadi kawat, kita mungkin berada di ambang jangkauan teknologi yang sama sekali baru.

Apa yang begitu mengejutkan tentang superkonduktor baru ini adalah bahwa mereka tidak menyerupai, dengan cara yang jelas, bahan superkonduktor yang sudah ada sebelumnya. Bahkan, dalam bahan-bahan ini, superkonduktivitas membutuhkan *pengenalan* bahan-bahan impuritas. Banyak dari bahan-bahan ini, pada kenyataannya, *isolator* dalam keadaan normal mereka—yaitu, mereka tidak menghantarkan listrik sama sekali.

Meskipun ada upaya keras dari ribuan fisikawan, tidak ada pemahaman yang jelas tentang superkonduktivitas temperatur-tinggi yang belum ada. Tetapi hal pertama yang mereka fokuskan adalah simetri kisi kristal dalam bahan-

bahan ini, yang tampaknya memiliki urutan yang terdefinisi dengan baik. Terlebih lagi, itu terbuat dari lapisan-lapisan atom terpisah yang tampak bertindak secara independen. Arus dapat mengalir di sepanjang lapisan dua-dimensi ini, tetapi tidak di sepanjang arah tegak lurus. Masih harus dilihat apakah simetri khusus superkonduktor temperatur-tinggi ini bertanggung jawab untuk bentuk interaksi yang menghasilkan keadaan superkonduktor makroskopis elektron, tetapi jika sejarah adalah panduan apa pun, itu adalah taruhan terbaik.

Apakah atau tidak seperti kesimetrian kisi merevolusi teknologi listrik, mereka telah memainkan peran dalam revolusi biologi. Pada 1905, Sir William Bragg dan putranya Sir Lawrence Bragg dianugerahi Hadiah Nobel untuk penemuan luar biasa. Jika sinar-X, yang panjang gelombangnya sebanding dengan jarak antara atom dalam kisi kristal biasa, bersinar pada bahan tersebut, sinar-X yang tersebar membentuk pola teratur pada layar pendeteksi. Sifat pola dapat dilacak langsung ke simetri kisi. Dengan cara ini, kristalografi sinar-X, seperti yang telah diketahui, telah memberikan alat yang kuat untuk mengeksplorasi konfigurasi spasial atom dalam material dan, dengan ini, struktur sistem molekul besar yang mungkin mengandung puluhan ribu atom yang tersusun secara teratur. Aplikasi yang paling terkenal dari teknik ini mungkin adalah data kristalografi sinar-X yang ditafsirkan oleh Watson dan Crick dan rekan-rekan mereka, yang mengarah pada penemuan pola double-helix DNA.

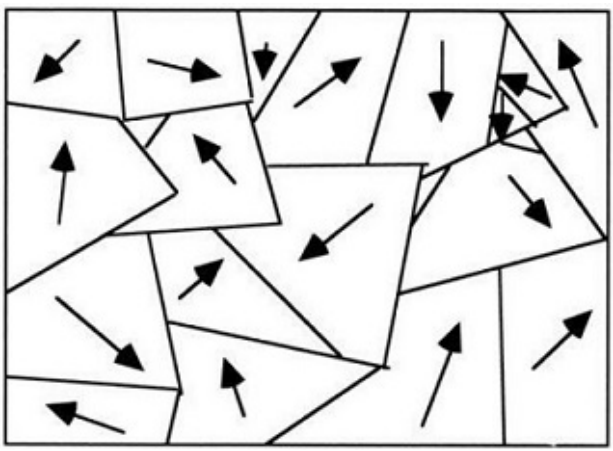
Fisika material tidak terbatas pada perkembangan tek-

nologi. Ini telah memberikan mungkin hubungan paling akrab yang dikenal antara simetri dan dinamika, melalui pemahaman transisi fase modern. Saya telah menjelaskan bagaimana, di dekat nilai kritis tertentu dari beberapa parameter seperti temperatur atau medan magnet, bahan yang benar-benar berbeda dapat bertindak secara efektif. Ini karena pada titik kritis, mikrofisika yang paling terperinci menjadi tidak relevan dan simetri mengambil alih.

Air pada titik kritisnya dan magnet besi pada titik kritisnya berperilaku sama karena dua alasan terkait. Pertama, saya mengingatkan Anda bahwa pada titik kritis ini, fluktuasi kecil terjadi secara simultan di semua skala sehingga, misalnya, tidak mungkin untuk mengatakan pada skala apa pun apakah seseorang mengamati air atau uap air. Karena bahan tampak sama pada semua skala, sifat mikrofisika lokal seperti konfigurasi atom molekul air tertentu harus menjadi tidak relevan. Kedua, karena ini, semua yang perlu untuk mengkarakterisasi konfigurasi air adalah densitasnya: Apakah wilayah yang sedang dipertimbangkan terlalu banyak atau kekurangan? Air dapat sepenuhnya dicirikan oleh dua angka yang sama, $+1$ atau -1, yang dapat kita gunakan untuk mengidentifikasi konfigurasi magnet mikroskopik di dalam besi.

Kedua fitur penting ini terintegrasi terkait dengan gagasan simetri. Air, dan magnet besi kita pada titik kritisnya, telah menjadi semacam papan catur kita. Ada dua derajat kebebasan yang dapat dipetakan menjadi satu sama lain—hitam menjadi putih, *overdense* ke *underdense*, atas ke bawah. Tidak harus seperti ini. Parameter fundamental

yang menjelaskan keadaan yang mungkin dari sistem di dekat titik kritisnya dapat memiliki, misalnya, memiliki serangkaian kemungkinan yang lebih besar, seperti menunjuk di mana saja di sekitar lingkaran, seperti magnet mikroskopis mungkin dalam materi di mana mereka tidak dibatasi untuk menunjuk naik dan turun. Materi seperti itu, pada titik kritisnya, mungkin akan terlihat secara skematis seperti Gambar 44.



Gambar 44: Materi yang tidak dibatasi untuk menunjuk naik dan turun seperti magnet mikroskopis.

Anda mungkin membayangkan bahwa karakteristik mendasar dari material seperti itu ketika mendekati titik kritisnya akan berbeda dari air atau magnet besi ideal yang dibandingkan dengan air. Dan Anda akan benar. Tapi apa perbedaan utama antara gambar ini dan yang ditunjukkan untuk air pada titik kritisnya? Ini adalah himpunan

nilai yang mungkin dari parameter yang menggambarkan transisi—kepadatan, arah medan magnet, dan seterusnya. Dan apa yang mencirikan rangkaian nilai yang mungkin ini? Simetri yang mendasari dari '*order parameter*' ini, menggambarkan perubahan dalam 'urutan' materi. Bisakah itu mengambil nilai pada lingkaran, persegi, garis, kulit bola?

Dilihat dengan cara ini, simetri sekali lagi menentukan dinamika. Sifat dari fase transisi pada titik kritis sepenuhnya ditentukan oleh sifat dari *order parameter*. Tetapi *order parameter* ini dibatasi oleh simetrinya. Semua bahan dengan *order parameter* memiliki seperangkat simetri yang sama berperilaku *identik* ketika mereka mengalami transisi fase pada titik kritis. Sekali lagi, simetri sepenuhnya menentukan fisika.

Penggunaan simetri ini, pada kenyataannya, memungkinkan kita untuk membuat hubungan yang kuat antara fisika material dan fisika partikel elementer. Untuk gambar di atas tidak lain adalah contoh *spontaneous symmetry breaking*. *Order parameter* yang menggambarkan arah medan magnet lokal pada gambar sebelumnya dapat mengambil nilai apa pun pada lingkaran. Ini memiliki simetri melingkar intrinsik. Setelah mendapatkan beberapa nilai, di beberapa wilayah, hal tersebut 'merusak' simetri ini dengan memilih satu manifestasi khusus di antara semua kemungkinan. Dalam contoh di atas, pada titik kritis, nilai ini terus mengalami fluktuasi, tidak peduli skala apa yang Anda ukur. Namun, jauh dari titik kritis sistem akan tersisa menjadi satu konfigurasi yang mungkin pada skala yang cukup besar, yaitu, air cair, semua magnet yang mengarah ke atas, semua magnet mengarah ke

timur, dan seterusnya. Dalam fisika partikel elementer, kita menggambarkan konfigurasi keadaan dasar alam semesta, 'ruang hampa', dengan karakteristik konfigurasi koheren bidang-bidang dasar yang memiliki beberapa nilai tetap di keadaan ini. *Order parameter* dalam hal ini hanya bidang dasar itu sendiri. Jika mereka tersisa dengan nilai yang tidak nol dalam ruang kosong, maka partikel yang berinteraksi dengan bidang ini akan berperilaku berbeda dari partikel yang tidak berinteraksi. Simetri yang sudah ada sebelumnya yang mungkin ada di antara berbagai partikel elementer telah rusak.

Sebagai hasilnya, kita berharap bahwa *spontaneous symmetry breaking* yang mencirikan alam seperti yang kita amati sekarang mati dalam skala yang cukup kecil—di mana *order parameter*, yaitu bidang latar belakang, keduanya mengalami fluktuasi sangat besar dan, dalam hal apa pun, tidak dapat mengubah sifat-sifat gerak partikel pada skala kecil semacam itu. Selain itu, kita juga berpikir bahwa *spontaneous symmetry breaking* menghilang pada tahap yang sangat awal dalam ekspansi big bang. Saat itu, alam semesta sangat panas. Transisi fase yang sama yang mencirikan pencairan air karena perubahan temperatur dekat titik kritis dapat, pada kenyataannya, terjadi untuk keadaan dasar alam semesta itu sendiri. Pada temperatur yang cukup tinggi, simetri dapat menjadi nyata karena *order parameter*, bidang dasar di alam, tidak dapat bertumpu dengan nilai temperaturnya yang rendah. Dan sama seperti simetri yang mengantar air melalui fase transisi, simetri alam juga dapat mengantarkan alam semesta melalui transisi. Kita percaya bahwa untuk

setiap simetri yang secara spontan rusak pada skala dasar hari ini, ada pada beberapa waktu yang cukup awal transisi fase 'kosmik' yang terkait dengan pemutusannya. Banyak kosmologi saat ini dikhususkan untuk mengeksplorasi implikasi dari transisi semacam itu, sekali lagi diatur oleh simetri.

Kembali ke Bumi, simetri memainkan peran yang bahkan lebih kuat dalam transisi fase yang mengatur perilaku materi-materi biasa. Kita telah melihat bahwa simetri dari *order parameter* air, atau magnet, atau oatmeal, atau apa pun, dapat sepenuhnya menentukan perilaku materi-materi ini pada titik-titik kritisnya. Tetapi mungkin simetri yang paling kuat yang dikenal di alam mengatur kemampuan kita untuk mendeskripsikan transisi-transisi ini. Simetri ini, yang telah memainkan peran dari awal buku ini, adalah skala invarian.

Apa yang mendasar dalam kemampuan menghubungkan materi yang beragam seperti magnet dan air pada titik-titik kritisnya adalah fakta bahwa fluktuasi pada titik kritis terjadi pada semua skala. Materi menjadi skala-invarian: Terlihat sama pada semua skala. Ini adalah ciri yang sangat istimewa, sangat istimewa sehingga bahkan tidak diberikan oleh sapi bulat! Ingat bahwa saya dapat membuat pernyataan-pernyataan saya tentang sifat biologis dengan mempertimbangkan bagaimana sapi bola berperilaku ketika Anda mengubah ukurannya. Jika fisika yang relevan tetap berskala invarian, maka sapi dengan magnitudo acak akan dimungkinkan. Tetapi tidak, karena material yang membentuk sapi tidak berubah dalam kerapatan saat Anda

memperbesar ukuran sapi. Hal ini penting untuk besaran seperti tekanan pada permukaan perut sapi untuk tetap sama, dan untuk kekuatan leher sapi-super untuk tumbuh dalam proporsi tetap sesuai ukurannya.

Tetapi material pada titik kritis dari fase transisi *adalah* skala invariant. Diagram-diagram skematik air dan magnet seperti yang saya gambarkan secara sepintas sepenuhnya mengarakteristikkan sistem pada semua skala. Jika saya menggunakan mikroskop dengan kekuatan penyelesaian yang lebih tinggi, saya akan melihat distribusi fluktuasi yang sama. Karena itu, hanya model yang sangat, sangat khusus yang akan mendeskripsikan sistem semacam itu dengan tepat di dekat titik kritisnya. Matematika yang menarik dari model-model tersebut telah menjadi fokus bagi sejumlah besar baik matematikawan dan fisikawan dalam beberapa tahun terakhir. Jika seseorang dapat, misalnya, mengategorikan semua model yang mungkin yang memiliki skala invarian, maka seseorang dapat mengkategorikan semua kemungkinan fenomena kritis di alam. Ini, salah satu fenomena paling kompleks di alam, setidaknya dalam skala mikroskopis, dapat diprediksi sepenuhnya dan dengan demikian, setidaknya dari perspektif fisika, dipahami. Mereka yang tertarik pada skala invarian adalah, atau, fisikawan partikel. Ini karena ada alasan untuk percaya, seperti yang saya harap jelaskan dalam bab berikutnya, bahwa *Theory of Everything*, jika ada hal semacam itu, dapat bersandar pada skala invarian.

Saya ingin kembali, pada akhir bab ini, ke beberapa komentar tambahan tentang di mana simetri membawa kita.

Seperti yang saya singgung dalam pengantar teori string, ini, pada kenyataannya, salah satu dari beberapa area di mana seseorang dapat melihat sekilas asal-usul kemajuan ilmiah di perbatasan, ketika paradigma bergeser dan kenyataan baru muncul. Di sinilah saya dapat berbicara bukan hanya tentang hal-hal yang terkendali tetapi juga tentang hal-hal yang tidak. Karena, seperti yang saya jelaskan sebelumnya dalam bab ini, pertanyaan yang ditanyakan oleh fisikawan tentang alam sering dipandu oleh simetri yang tidak sepenuhnya kita pahami. Biarkan saya memberi Anda beberapa contoh konkret dari ini.

Diam-diam saya telah, sepanjang bab ini, membuat asumsi-asumsi tertentu tentang alam yang tampaknya tak tercela. Bahwa alam seharusnya tidak peduli di mana dan kapan kita memilih untuk menggambarkannya, misalnya, adalah sumber dari dua kendala paling penting di dunia fisis: kelestarian energi dan momentum. Selain itu, sementara saya biasanya dapat mengatakan tangan kanan saya dari kiri, alam tampaknya tidak peduli yang mana. Akankah fisika dunia yang dilihat di cermin berbeda? Jawaban yang masuk akal sepertinya tidak. Namun, gambaran kita tentang apa yang masuk akal berubah secara dramatis pada tahun 1956. Untuk menjelaskan fenomena membingungkan yang berkaitan dengan peluruhan nuklir, dua ahli teori Cina-Amerika mengusulkan hal yang mustahil: Mungkin alam sendiri dapat mengatakannya dari kiri! Proposal ini dengan cepat diuji. Peluruhan neutron, yang menghasilkan elektron keluar dan neutrino, di dalam inti kobal dengan medan magnet lokal yang disejajarkan dalam arah tertentu,

diamati. Jika invarians kiri-kanan lestari, sebanyak elektron harus dipancarkan rata-rata pergi ke kanan seperti akan pergi ke kiri. Sebaliknya, distribusi ditemukan tidak simetris. Paritas, atau simetri kiri-kanan, *bukanlah* ciri dari interaksi lemah yang mengatur peluruhan ini!

Ia muncul sebagai kejutan bagi komunitas fisika. Dua fisikawan, Chen Ning Yang, dan Tsung Dao Lee, dianugerahi Hadiah Nobel dalam waktu satu tahun dari prediksi mereka. *Pelanggaran paritas*, sebagaimana diketahui, menjadi bagian integral dari teori interaksi lemah, dan itu adalah alasan bahwa neutrino, sendirian di antara partikel di alam yang hanya merasakan interaksi ini (sejauh yang kita tahu), memiliki ciri yang sangat khusus. Partikel seperti neutrino, dan juga elektron, proton, dan neutron, berperilaku seolah-olah mereka '*spinning*', dalam arti bahwa dalam interaksi mereka, mereka bertindak seperti *little top* atau giroskop. Dalam kasus elektron dan proton, yang dibebankan, pemintalan ini menyebabkan mereka bertindak seperti magnet kecil, dengan kutub utara dan selatan. Sekarang, untuk sebuah elektron yang bergerak bersama, arah medan magnet internalnya pada dasarnya berubah-ubah. Neutrino, yang netral, mungkin tidak memiliki medan magnet internal, tetapi putarannya masih mengarah ke beberapa arah. Ini adalah ciri dari pelanggaran paritas dari interaksi lemah, bagaimanapun, bahwa hanya neutrino yang spin pointnya sepanjang arah yang sama dengan gerak mereka yang dipancarkan atau diserap selama proses dimediasi oleh interaksi ini. Kita menyebutnya neutrino *left-handed*, tanpa alasan yang baik kecuali bahwa ciri ini terkait erat dengan 'wenangan' yang

diamati dalam distribusi partikel yang dipancarkan selama peluruhan nuklir.

Kita tidak tahu apakah neutrino *'left-handed'* ada di alam. Jika demikian, mereka tidak perlu berinteraksi melalui interaksi lemah, jadi kita mungkin tidak tahu tentang mereka. Tetapi ini tidak berarti mereka tidak ada. Seorang dapat menunjukkan, pada kenyataannya, bahwa jika neutrino tidak persis bermassa, seperti foton, sangat mungkin neutrino *left-handed* mungkin ada. Jika memang ada neutrino yang ditemukan memiliki massa bukan nol, ini akan menjadi sinyal langsung bahwa beberapa fisika baru, di luar Model Standar, diperlukan. Karena alasan inilah ada begitu banyak minat dalam eksperimen yang sekarang dilakukan untuk mendeteksi neutrino yang dipancarkan dari inti matahari. Telah ditunjukkan bahwa jika defisit yang diamati pada neutrino ini nyata, maka salah satu kemungkinan yang paling mungkin dari defisit semacam itu adalah keberadaan massa neutrino bukan-nol. Jika benar, kita akan membuka jendela baru di dunia. Pelanggaran paritas, yang mengejutkan dunia tetapi kini telah menjadi bagian sentral dari model kita, dapat mengarahkan kita ke arah yang benar untuk mencari hukum alam yang lebih mendasar.

Tak lama setelah pelanggaran paritas ditemukan, simetri lain yang jelas dari alam ditemukan kurang. Ini adalah simetri antara partikel dan antipartikel mereka. Sudah dipikirkan sebelumnya, karena antipartikel identik dalam semua cara untuk pasangan partikel mereka kecuali untuk, katakanlah, muatan listrik mereka, bahwa jika kita mengganti semua partikel di dunia dengan antipartikel mereka, dunia

akan identik. Sebenarnya tidak sesederhana ini, karena beberapa partikel dengan antipartikel yang berbeda adalah netral secara elektris, dan hanya dapat dibedakan dari mitra antipartikel mereka melalui mengamati bagaimana setiap peluruhan. Pada tahun 1964, ditemukan bahwa salah satu partikel semacam itu, yang disebut Kaon netral, meluruh dengan cara yang tidak dapat didamaikan dengan simetri partikel-antipartikel. Sekali lagi, tampak bahwa interaksi lemah adalah pelakunya. Interaksi kuat antara quark yang membentuk Kaons telah diukur secara independen untuk menghormati kesimetrian paritas dan interpolasi[20] partikel-antipartikel ke presisi tinggi.

Namun, pada tahun 1976, Gerard 't Hooft, dalam salah satu dari banyak penemuan teoritisnya yang inovatif, menunjukkan bahwa apa yang telah menjadi teori yang diterima dari interaksi yang kuat, chromodinamika kuantum, sebenarnya *harus* melanggar baik paritas dan partikel-antipartikel simetri. Beberapa proposal teoretis yang cerdas telah dibuat untuk mendamaikan kelestarian kelestarian partikel yang diamati secara nyata dalam interaksi yang kuat dengan hasil 't Hooft. Sampai saat ini, kita tidak tahu apakah ada yang benar. Mungkin yang paling menarik melibatkan kemungkinan adanya partikel elementer baru, yang disebut *axion*. Jika ini ada, mereka bisa dengan mudah menjadi materi gelap yang mendominasi massa alam semesta. Jika mereka terdeteksi seperti itu, kita akan membuat dua penemuan yang mendalam. Kita akan belajar beberapa

[20] Interpolasi adalah metode membangun titik-titik data baru dalam rentang bilangan diskrit dari titik data yang diketahui. [pen.]

hal mendasar tentang fisika mikroskopik, serta menentukan apa evolusi masa depan alam semesta. Jika kita membuat penemuan seperti itu, pertimbangan simetri akan menjadi cahaya penuntun.

Ada simetri lain dari alam yang eksis, atau tidak eksis, karena alasan yang tidak kita pahami. Mereka membentuk makanan penelitian teoretis modern. Masalah-masalah seperti itu mendorong pertanyaan-pertanyaan besar yang luar biasa dari fisika partikel-elementer: Mengapa ada dua perangkat lain yang berbeda, atau 'keluarga' partikel elementer yang menyerupai partikel-partikel yang sudah sangat dikenal yang menyusun materi biasa, kecuali bahwa partikel-partikel lain ini semuanya jauh lebih berat? Mengapa massa dalam masing-masing keluarga berbeda? Mengapa 'skala' dari interaksi lemah dan gravitasi sangat berbeda? Sudah menjadi hal biasa bagi fisikawan untuk membingkai pertanyaan-pertanyaan ini dalam hal simetri, dan itu tidak masuk akal untuk diharapkan, berdasarkan semua pengalaman kita sampai saat ini, bahwa jawabannya akan juga demikian.

TIDAK AKAN BERAKHIR HINGGA INI SELESAI

Kita tidak mengklaim bahwa potret yang kita buat adalah keseluruhan kebenaran, hanya bahwa itu adalah kemiripan.
—Victor Hugo, Les Misérables.

Ada adegan dari film Woody Allen yang sangat saya sukai dimana seorang pria yang terobsesi dengan makna hidup dan mati mengunjungi orang tuanya, mengungkapkan kebingungan, dan berteriak minta petunjuk. Ayahnya mendongak dan mengeluh, "Jangan tanya saya tentang arti hidup. Saya bahkan tidak tahu bagaimana cara kerja pemanggang roti!"

Di sepanjang buku ini saya juga telah menekankan, mungkin tidak berbagai hal, hubungan yang kuat antara masalah-masalah yang kadang-kadang esoteris yang menarik di ujung tombak dan dalam fisika fenomena sehari-hari. Jadi sepertinya tepat untuk fokus dalam bab terakhir tentang bagaimana hubungan ini mendorong kita menuju penemuan-penemuan yang ada di abad ke dua puluh satu.

Untuk ide-ide yang telah saya diskusikan—kembali kepada gagasan-gagasan yang muncul dari pertemuan kecil di Shelter Island hampir lima puluh tahun lalu—telah merevolusi hubungan antara penemuan-penemuan masa depan yang mungkin dan teori-teori yang ada. Hasilnya mungkin adalah penataan kembali yang paling mendalam, dan tidak mengikat, dalam pandangan dunia kita yang telah terjadi selama era modern. Apakah ada orang yang berpikir bahkan ada hal seperti itu sebagai *Jawaban Akhir* masih sebagian besar tetap merupakan masalah prasangka pribadi. Namun, fisika modern telah membawa kita ke ambang pemahaman mengapa, paling tidak secara langsung, *itu tidak terlalu penting.*

Pertanyaan utama yang ingin saya sampaikan di sini adalah: Apa yang memandu pemikiran kita tentang masa depan fisika, dan mengapa? Saya telah menghabiskan bagian yang lebih baik dari buku ini yang menjelaskan bagaimana para fisikawan mengasah peralatan mereka untuk membangun pemahaman dunia kita saat ini, paling tidak karena justru alat-alat ini yang akan memandu pendekatan kita saat ini terhadap hal-hal yang belum kita pahami. Untuk alasan inilah pembahasan yang akan saya bahas membawa saya lingkaran penuh, kembali ke pendekatan dan skala. Dengan demikian kita akan berakhir di mana kita mulai.

Fisika memiliki masa depan hanya sejauh teori yang ada tidak lengkap. Untuk mendapatkan beberapa wawasan tentang ini, ada gunanya bertanya apa yang akan menjadi sifat-sifat teori fisis lengkap jika kita memilikinya. Jawaban yang paling sederhana hampir tautologis: Sebuah teori

selesai jika semua fenomena yang dikembangkan untuk diprediksi secara akurat diprediksi. Tetapi apakah teori semacam itu harus 'benar', dan, yang lebih penting, apakah teori yang benar harus lengkap? Misalnya, apakah Hukum Gravitasi Newton benar? Ia memprediksi dengan ketepatan luar biasa gerak planet-planet di sekitar matahari dan bulan di sekeliling Bumi. Ini dapat digunakan untuk menimbang matahari hingga hampir satu bagian dalam satu juta. Selain itu, Hukum Newton adalah semua yang diperlukan untuk menghitung gerak proyektil di dekat permukaan Bumi ke akurasi lebih baik dari 1 bagian dalam 100 juta. Namun, kita sekarang tahu bahwa pembengkokan sinar cahaya di dekat Bumi adalah dua kali lipat dari jumlah yang orang mungkin harapkan dengan menggunakan Hukum Newton. Prediksi yang benar diperoleh daripada menggunakan relativitas umum, yang menggeneralisasikan Hukum Newton dan menguranginya dalam kasus-kasus di mana medan gravitasi kecil. Dengan demikian, Hukum Gravitasi Newton tidak lengkap. Tetapi apakah itu tidak benar?

Diskusi sebelumnya mungkin membuat jawabannya tampak jelas. Apalagi, seseorang dapat mengukur penyimpangan dari Hukum Newton. Di sisi lain, jika setiap pengamatan yang pernah Anda lakukan secara langsung dalam hidup Anda konsisten dengan prediksi Hukum Newton, untuk semua maksud dan tujuan, itu benar. Untuk mengatasi masalah teknis ini, anggaplah bahwa orang mendefinisikan kebenaran ilmiah untuk hanya menyertakan ide-ide yang sepenuhnya sesuai dengan semua yang kita ketahui tentang dunia. Hukum Newton tentu saja tidak memenuhi kriteria

ini. Namun, hingga setidaknya akhir abad kesembilan belas, itu terjadi. Apakah itu benar? Apakah kebenaran ilmiah tergantung waktu?

Anda mungkin berkata, terutama jika Anda seorang pengacara, bahwa definisi kedua saya juga memiliki framing yang buruk. Saya harus menghapus kata-kata 'semua yang kita tahu' dan mungkin menggantikannya dengan 'segala sesuatu yang ada/eksis'. Penjelasannya kemudian tidak dapat dibantah. Tetapi itu juga tidak berguna! Itu menjadi filsafat. Itu tidak bisa diuji. Kita tidak akan pernah tahu apakah kita mengetahui segala sesuatu yang ada. Yang bisa kita ketahui adalah semua yang kita tahu! Masalah ini tentu saja tidak dapat diatasi, tetapi memiliki implikasi penting yang tidak sering dihargai. Ini adalah prinsip dasar sains yang *tidak pernah bisa kita buktikan benar; kita hanya bisa membuktikannya salah.* Ini adalah ide yang sangat penting, yang merupakan dasar dari semua kemajuan ilmiah. Setelah kita menemukan contoh di mana teori yang mungkin telah bekerja dengan benar selama ribuan tahun tidak lagi sesuai dengan pengamatan, kita kemudian tahu bahwa itu harus dilengkapi—dengan data baru atau teori baru. Tidak ada perdebatan.

Namun demikian, ada masalah yang lebih dalam dan saya harap, kurang semantik yang terkubur di sini, dan itulah yang ingin saya konsentrasikan. Apa artinya mengatakan, bahkan pada prinsipnya, bahwa teori apa pun adalah teori yang benar? Pertimbangkan elektrodinamika kuantum (QED/quantum electrodynamics), teori yang mencapai penyelesaian sebagai hasil dari pertemuan Shel-

ter Island pada tahun 1947. Beberapa dua puluh tahun sebelumnya, Dirac muda telah menuliskan persamaan relativistiknya untuk gerak mekanika kuantum sebuah elektron. Persamaan ini, yang dengan benar memperhitungkan segala sesuatu yang kemudian diketahui tentang elektron, masalah yang disajikan, sejumlah pertemuan Shelter Island diadakan untuk menangani, seperti yang saya jelaskan. Inkonsistensi matematika yang buruk terus bermunculan. Pekerjaan Feynman, Schwinger, dan Tomonaga akhirnya mempresentasikan metode yang konsisten untuk menangani masalah ini dan menghasilkan prediksi yang berarti, yang sepenuhnya disetujui dengan semua data. Dalam dekade sejak pertemuan Shelter Island, setiap pengukuran yang telah dilakukan dari interaksi elektron dan cahaya telah sesuai dengan prediksi teori ini. Faktanya, ini adalah teori teruji terbaik di dunia. Perhitungan teoretis telah dibandingkan dengan pengukuran eksperimental ultrasensitif, dan perjanjian sekarang lebih baik dari 9 desimal dalam beberapa kasus! Kita tidak pernah bisa berharap untuk teori yang lebih akurat daripada ini.

Apakah QED, kemudian, teori interaksi elektron dan foton? Tentu saja tidak. Kita tahu, misalnya, bahwa jika seseorang menganggap proses pada energi yang cukup tinggi yang melibatkan partikel W dan Z yang berat, maka QED menjadi bagian dari teori yang lebih besar, teori '*elektrolemah*'. Pada tahap ini, QED sendiri tidak lengkap.

Ini bukan kecelakaan yang buruk. Bahkan jika partikel W dan Z tidak ada dan elektromagnetik adalah satu-satunya gaya yang kita ketahui di alam selain gravitasi, kita tidak

dapat memanggil QED teori elektron dan foton. Karena apa yang telah kita pelajari di tahun-tahun setelah pertemuan Shelter Island adalah bahwa pernyataan ini, tanpa kualifikasi lebih lanjut, tidak masuk akal secara fisis. Penggabungan relativitas dan mekanika kuantum, di mana QED adalah contoh sukses pertama, telah mengajarkan kita bahwa setiap teori seperti QED hanya bermakna sejauh kita mengasosiasikan skala dimensi dengan setiap prediksi. Misalnya, bermakna untuk mengatakan bahwa QED adalah teori interaksi elektron dan foton yang terjadi pada jarak, katakanlah, 10^{10} cm. Pada skala seperti itu, partikel W dan Z tidak memiliki efek langsung. Perbedaan ini mungkin tampak seperti rewel saat ini, tetapi percayalah pada saya, sebenarnya tidak.

Dalam Bab 1, saya memahami perlunya mengasosiasikan dimensi dan skala dengan pengukuran fisis. Pengakuan akan kebutuhan untuk mengasosiasikan skala, panjang atau energi, dengan teori fisis benar-benar dimulai dengan sungguh-sungguh ketika Hans Bethe membuat pendekatan yang memungkinkan dia menghitung pergeseran Lamb lima hari setelah pertemuan Shelter Island. Saya mengingatkan Anda bahwa Bethe mampu mengubah perhitungan yang tidak terkendali menjadi prediksi menggunakan penalaran fisis sebagai dasar untuk mengabaikan efek yang tidak ia pahami.

Ingat apa yang Bethe hadapi. Relativitas dan mekanika kuantum menyiratkan bahwa partikel dapat secara spontan 'meletus' keluar dari ruang kosong hanya untuk menghilang dengan cepat, selama mereka melakukannya untuk waktu

yang terlalu singkat untuk diukur secara langsung. Namun demikian, seluruh titik perhitungan pergeseran Lamb adalah untuk menunjukkan bahwa partikel-partikel ini dapat memengaruhi sifat terukur dari partikel biasa, seperti elektron dalam atom hidrogen. Masalahnya, bagaimanapun, adalah bahwa efek dari semua partikel virtual yang mungkin, dengan energi tinggi yang sembarang, muncul untuk membuat perhitungan sifat-sifat elektron matematis ketat. Bethe berpendapat bahwa entah bagaimana, jika teori itu harus masuk akal, efek partikel virtual dari energi tinggi yang sembarang yang bertindak hanya untuk interval waktu yang sangat singkat seharusnya dapat diabaikan. Dia tidak tahu pada waktu bagaimana bekerja dengan teori yang lengkap, jadi dia hanya membuang efek dari partikel virtual berenergi tinggi dan berharap yang terbaik. Itulah tepatnya yang dia dapatkan.

Ketika Feynman, Schwinger, dan Tomonaga tahu bagaimana menangani teori yang lengkap, mereka menemukan bahwa efek partikel virtual energi tinggi, memang, secara konsisten dapat diabaikan. Teori ini memberikan jawaban yang masuk akal karena setiap teori harus masuk akal. Lagi pula, jika efek pada skala waktu dan jarak yang sangat kecil dibandingkan dengan skala atom yang diukur harus signifikan, tidak akan ada harapan untuk melakukan fisika. Seperti mengatakan bahwa untuk memahami gerak bola bisbol, seseorang harus mengikuti secara detail gaya yang bekerja pada tingkat molekuler selama setiap seperseribu detik perjalanannya.

Ini telah menjadi bagian implisit fisika sejak Galileo bah-

wa informasi yang tidak relevan harus dibuang, fakta yang saya juga tekankan dalam Bab 1. Hal ini benar bahkan dalam perhitungan yang sangat tepat. Coba perhatikan bisbol lagi. Bahkan jika kita menghitung geraknya ke milimeter terdekat, kita masih membuat asumsi bahwa kita dapat memperlakukannya sebagai bisbol. Sebenarnya, ini adalah campuran sekitar 10^{24} atom, yang masing-masing melakukan banyak getaran dan rotasi rumit selama penerbangan bola. Ini adalah ciri mendasar dari Hukum Newton, bagaimanapun, bahwa kita dapat mengambil objek sembarang yang rumit dan membagi geraknya menjadi dua bagian: (1) gerak 'pusat massa', ditentukan oleh rata-rata posisi semua massa individu dalam pertimbangan, dan (2) gerak semua objek individu tentang pusat massa. Perhatikan bahwa pusat massa tidak perlu berada di lokasi di mana massa benar-benar ada. Misalnya, pusat massa donat tepat di tengah, di mana lubang donat berada! Jika kita melemparkan donat ke udara, itu mungkin berputar-putar dan ber-spin dengan cara yang rumit, tetapi pergerakan pusat massa, lubang donat, akan mengikuti gerak parabola sederhana yang pertama kali dijelaskan oleh Galileo.

Jadi, ketika kita mempelajari gerak bola atau donat menurut Hukum Newton, kita benar-benar mempelajari apa yang sekarang kita sebut teori efektif. Teori yang lebih lengkap harus berupa teori quark dan elektron, atau setidaknya atom. Tapi kita bisa menyatukan semua derajat kebebasan yang tidak relevan ini menjadi sesuatu yang kita sebut bola—yang kita maksud adalah pusat massa bola. Hukum gerak semua objek makroskopis melibatkan teori

efektif tentang gerak, dan tentang, pusat massa mereka. Teori gerak bola yang efektif adalah yang kita butuhkan, dan kita dapat melakukan banyak hal dengan itu sehingga kita cenderung menganggapnya sebagai fundamental. Apa yang akan saya sampaikan sekarang adalah bahwa semua teori alam, paling tidak yang paling menggambarkan fisika, adalah teori-teori yang efektif. Setiap kali Anda menulis satu, Anda melemparkan sesuatunya.

Utilitas teori efektif diakui dalam mekanika kuantum sejak dini. Misalnya, dalam analogi atom dengan gerak pusat-massa bola yang baru saja saya bahas, salah satu metode klasik untuk memahami perilaku molekul dalam mekanika kuantum—yang kembali ke setidaknya 1920-an adalah dengan memisahkan molekul ke dalam derajat kebebasan 'cepat' dan 'lambat'. Karena nuklei dalam molekul sangat berat, respons mereka terhadap gaya molekul akan melibatkan variasi yang lebih kecil, dan lebih lambat daripada, katakanlah, elektron dengan cepat mengorbit mereka. Dengan demikian orang mungkin mengikuti prosedur seperti ini untuk memprediksi sifat mereka. Pertama, bayangkan nuklei tetap dan tidak berubah dan kemudian hitung gerak elektron terhadap benda-benda tetap ini. Kemudian, selama nuklei bergerak perlahan, seseorang tidak akan mengharapkan gerak ini secara signifikan memengaruhi konfigurasi elektron. Satu gabungan elektron hanya akan lancar melacak gerak inti, yang pada gilirannya akan terpengaruh hanya oleh konfigurasi elektron rata-rata. Efek dari masing-masing elektron sehingga 'decouples' dari gerak inti. Seseorang kemudian dapat menggambarkan teori efektif dari gerak

nuklir yang hanya melacak derajat kebebasan nuklir secara eksplisit dan mengganti semua elektron individu dengan beberapa besaran tunggal yang mewakili konfigurasi muatan rata-rata. Pendekatan klasik dalam mekanika kuantum ini disebut teori Born-Oppenheimer, setelah dua fisikawan terkenal yang pertama kali mengajukannya, Max Born dan Robert Oppenheimer. Ini seperti menggambarkan gerak bola hanya dengan melacak pusat massa bola, ditambah mungkin juga gerak kolektif semua atom di sekitar pusat massa—katakanlah, cara bola berputar.

Ambil contoh lain yang lebih baru, terkait dengan superkonduktivitas. Saya telah menjelaskan bagaimana, dalam superkonduktor, pasangan elektron mengikat bersama ke dalam konfigurasi yang koheren. Dalam keadaan seperti itu, orang tidak perlu menggambarkan materi dengan melacak semua elektron secara individual. Karena dibutuhkan begitu banyak energi untuk menyebabkan elektron individu menyimpang dari pola kolektif, seseorang dapat secara efektif mengabaikan partikel individu. Sebagai gantinya, seseorang dapat membangun teori efektif dalam hal besaran tunggal yang menggambarkan konfigurasi koheren. Teori ini, yang diajukan oleh London pada 1930-an dan dikembangkan lebih lanjut oleh fisikawan Soviet Landau dan Ginsberg pada tahun 1950, mereproduksi dengan benar semua fitur makroskopik utama bahan superkonduktor—termasuk efek Meissner yang sangat penting, yang menyebabkan foton berperilaku seperti benda besar di dalam superkonduktor.

Saya telah menunjukkan bahwa memisahkan masalah menjadi variabel yang relevan dan tidak relevan bukanlah

suatu teknik baru. Apa yang telah dilakukan oleh integrasi mekanika kuantum dan relativitas, adalah mengharuskan penghapusan variabel-variabel yang tidak relevan. Untuk menghitung hasil dari setiap proses fisis mikroskopis yang dapat diukur, kita harus mengabaikan tidak hanya beberapa, tetapi jumlah besaran yang tak terbatas. Untungnya, prosedur yang dimulai oleh Feynman dan yang lain telah menunjukkan bahwa ini dapat diabaikan tanpa dihukum.

Biarkan saya mencoba untuk menggambarkan titik kunci ini dalam konteks yang lebih konkret. Pertimbangkan 'tabrakan' dua elektron. Elektromagnetik klasik memberitahu kita bahwa elektron akan saling tolak. Jika elektron pada awalnya bergerak sangat lambat, elektron tidak akan pernah berdekatan, dan argumen klasik mungkin semua yang diperlukan untuk menentukan perilaku akhir mereka dengan benar. Tetapi jika mereka bergerak cukup cepat pada awalnya untuk berdekatan, pada skala atom, argumen mekanika kuantum menjadi penting.

Apa yang elektron 'lihat' ketika bereaksi terhadap medan listrik elektron lain? Karena adanya pasangan virtual partikel dan antipartikel yang berserakan keluar dari ruang hampa, setiap elektron membawa banyak bagasi. Partikel-partikel positif yang sebentar lagi keluar dari ruang hampa akan tertarik ke elektron, sementara pasangan negatif mereka akan ditolak. Dengan demikian, elektron dalam arti membawa 'awan' partikel virtual di sekitarnya. Karena sebagian besar partikel ini keluar dari ruang hampa untuk waktu yang sangat singkat dan menempuh jarak yang sangat kecil, awan ini sebagian besar cukup kecil. Pada jarak yang jauh

kita dapat menyatukan efek semua partikel virtual dengan hanya 'mengukur' muatan pada elektron. Dengan demikian, kita kemudian disatukan ke dalam satu bilangan yang merupakan aspek medan listrik yang sangat rumit karena masing-masing partikel virtual yang mengelilingi elektron. Ini 'mendefinisikan' muatan pada elektron yang kita lihat tertulis di buku teks. Ini adalah muatan *efektif* yang kita ukur pada jarak jauh dalam suatu alat di laboratorium, dengan memeriksa gerak elektron dalam, katakanlah, satu set TV, ketika bidang eksternal diterapkan.

Dengan demikian, muatan pada elektron adalah besaran fundamental hanya sejauh yang menggambarkan elektron yang diukur pada *skala tertentu*! Jika kita mengirim elektron lain lebih dekat ke elektron pertama, elektron dapat menghabiskan waktu di dalam pinggiran partikel virtual ini dan secara efektif menyelidiki muatan yang berbeda di dalamnya. Pada prinsipnya, ini adalah contoh dari jenis efek yang sama seperti pergeseran Lamb. Partikel virtual dapat memengaruhi sifat terukur partikel nyata. Apa yang penting di sini adalah bahwa mereka memengaruhi ciri seperti muatan elektron secara berbeda tergantung pada skala di mana Anda mengukurnya.

Jika kita mengajukan pertanyaan yang sesuai untuk eksperimen yang dilakukan pada skala panjang tertentu atau lebih besar, melibatkan elektron yang bergerak dengan energi yang lebih kecil dari jumlah tertentu, maka kita dapat menuliskan teori efektif lengkap yang akan memprediksi setiap pengukuran. Teori ini akan menjadi QED dengan parameter bebas yang sesuai, muatan pada elektron, dan

seterusnya, sekarang *tetap* menjadi yang sesuai dengan skala percobaan, sebagaimana ditentukan oleh hasil eksperimen. Semua perhitungan semacam itu, bagaimanapun, kebutuhan secara efektif membuang informasi dalam jumlah yang tak terbatas—yaitu informasi tentang proses virtual yang bekerja pada skala yang lebih kecil dari pengukuran yang dapat kita selidiki.

Ini mungkin tampak seperti mukjizat bahwa kita bisa begitu bodoh dengan membuang begitu banyak informasi, dan untuk sementara waktu tampak seperti itu bahkan bagi para fisikawan yang menemukan prosedur. Tetapi pada refleksi, jika fisika adalah memungkinkan untuk semuanya, maka hal tersebut harus bekerja dengan cara ini. Bagaimanapun, informasi yang kita buang tidak perlu benar! Setiap pengukuran dunia melibatkan beberapa skala panjang atau energi. Teori-teori kita juga *ditentukan* oleh skala fenomena fisis yang bisa kita selidiki. Teori-teori ini dapat memprediksi berbagai hal tak terbatas pada skala di luar jangkauan kita setiap saat, tetapi mengapa kita harus mempercayai salah satu dari mereka sampai kita mengukurnya? Akan luar biasa jika sebuah teori yang dirancang untuk menjelaskan interaksi elektron dengan cahaya harus benar-benar tepat dalam semua prediksinya, sampai ke skala yang merupakan orde dan besaran orde yang lebih kecil dari apa yang kita ketahui saat ini. Ini mungkin merupakan kasusnya, tetapi bagaimanapun juga, haruskah kita mengharapkan kebenaran teori pada skala yang sekarang dapat kita selidiki untuk disandera oleh kemampuan potensinya untuk menjelaskan semuanya pada skala yang lebih kecil? Tentu tidak. Namun

dalam kasus ini, semua proses eksotis yang diprediksi oleh teori untuk terjadi pada skala yang jauh lebih kecil daripada yang sekarang bisa kita selidiki lebih baik menjadi tidak relevan dengan prediksi untuk perbandingan dengan eksperimen saat ini, justru karena kita memiliki setiap alasan untuk percaya bahwa proses eksotis ini bisa dengan mudah menjadi sisa imajiner mendorong teori di luar domain penerapannya. Jika teori harus benar pada semua skala untuk menjawab pertanyaan tentang apa yang terjadi pada skala tertentu, kita harus mengetahui *The Theory of Everything* sebelum kita bisa mengembangkan *A Theory of Something*.

Menghadapi situasi ini, bagaimana kita bisa tahu apakah suatu teori 'fundamental'—yaitu, apakah itu memiliki harapan untuk menjadi benar pada semua skala? Yah, kita tidak bisa. Semua teori fisis yang kita ketahui harus dilihat sebagai teori efektif karena kita harus mengabaikan efek fenomena kuantum baru yang mungkin terjadi pada skala yang sangat kecil untuk melakukan perhitungan untuk menentukan apa yang diprediksi teori pada skala yang lebih besar, yang terukur saat ini.

Tetapi seperti yang sering terjadi, kekurangan yang nyata ini benar-benar merupakan berkah. Sama seperti kita bisa memprediksi, pada awal buku ini, apa sifat sapi-super seharusnya dengan meningkatkan dari sifat sapi yang diketahui, sehingga fakta bahwa hukum fisis kita bergantung pada skala menunjukkan bahwa kita mungkin bisa memprediksi bagaimana mereka juga berevolusi ketika kita menjelajahi skala yang lebih kecil di alam. Fisika hari ini dapat memberikan tanda yang jelas untuk fisika masa depan! Pa-

da kenyataannya, kita bahkan dapat memprediksi terlebih dahulu ketika penemuan baru diperlukan.

Setiap kali teori fisis memprediksi omong kosong atau tidak menjadi matematis yang tidak terkendali karena efek dari proses skala mekanika kuantum virtual efek yang lebih kecil dan lebih kecil lagi yang diperhitungkan, kita percaya bahwa beberapa proses fisis baru harus masuk dalam skala tertentu untuk 'menyembuhkan' perilaku ini. Perkembangan teori modern dari interaksi lemah adalah contoh kasusnya. Enrico Fermi menulis pada 1934 sebuah teori yang menjelaskan peluruhan 'beta' dari neutron menjadi proton, elektron, dan neutrino—peluruhan prototipikal lemah. Teori Fermi didasarkan pada eksperimen dan setuju dengan semua data yang diketahui. Namun, interaksi 'efektif' yang ditulis untuk menjelaskan neutron yang membusuk menjadi tiga partikel lainnya adalah sebaliknya, karena itu tidak didasarkan pada prinsip-prinsip fisis lain di luar perjanjian dengan eksperimen.

Setelah elektrodinamika kuantum dipahami, segera menjadi jelas bahwa interaksi Fermi yang lemah berbeda secara mendasar di alam dari QED. Ketika seseorang melampaui peluruhan beta sederhana, untuk mengeksplorasi apa yang mungkin diprediksi teori terjadi pada skala yang lebih kecil, satu masalah yang dihadapi. Proses virtual yang dapat terjadi pada skala ratusan kali lebih kecil dari ukuran neutron akan membuat prediksi teori tidak dapat dikelola setelah seseorang mencoba memprediksi hasil eksperimen yang mungkin pada skala tersebut.

Ini bukan masalah langsung, karena tidak ada ekspe-

rimen yang secara langsung mampu mengeksplorasi skala tersebut selama lebih dari lima puluh tahun setelah Fermi menemukan modelnya. Namun demikian, jauh sebelum ini, para ahli teori mulai mengeksplorasi cara-cara yang mungkin untuk memperluas model Fermi untuk menyembuhkan penyakitnya. Langkah pertama untuk mengatasi masalah ini adalah jelas. Seseorang dapat menghitung skala jarak di mana masalah untuk prediksi teori akan mulai menjadi berat. Skala ini berhubungan dengan sekitar 100 kali lebih kecil dari ukuran neutron—jauh lebih kecil daripada yang dapat diakses di setiap fasilitas yang ada saat itu. Cara paling sederhana untuk menyembuhkan masalah adalah mengira bahwa beberapa proses fisis baru, yang tidak diprediksi dalam konteks teori Fermi saja, dapat menjadi signifikan pada skala ini (dan tidak lebih besar), dan entah bagaimana dapat mengatasi perilaku buruk dari proses virtual dalam teori Fermi. Kemungkinan paling langsung adalah memperkenalkan partikel virtual baru dengan massa sekitar 100 kali massa neutron, yang akan membuat teori lebih baik berperilaku. Karena partikel-partikel ini begitu masif, mereka dapat diproduksi sebagai partikel virtual hanya untuk waktu yang sangat singkat, dan dengan demikian dapat bergerak hanya pada skala jarak yang sangat kecil. Teori baru ini akan memberikan hasil yang identik dengan teori Fermi, selama eksperimen dilakukan pada skala yang tidak akan menyelidiki struktur interaksi, yaitu pada skala yang lebih besar daripada jarak yang ditempuh oleh partikel virtual masif.

Kita telah melihat bahwa positron, yang diprediksi ada

sebagai bagian dari pasangan partikel virtual dalam QED, juga ada sebagai partikel terukur nyata, jika saja Anda memiliki cukup energi untuk membuatnya. Begitu juga untuk partikel virtual superheavy baru yang diperkirakan ada untuk menyembuhkan teori Fermi. Dan partikel-partikel W dan Z superheavy yang akhirnya langsung terdeteksi sebagai objek nyata dalam akselerator partikel energi yang sangat tinggi yang dibangun di Jenewa pada tahun 1984, sekitar dua puluh lima tahun setelah mereka pertama kali diusulkan atas dasar teoretis.

Sebagaimana telah saya jelaskan, partikel-partikel W dan Z membentuk bagian dari apa yang sekarang dikenal sebagai Model Standar fisika partikel yang menjelaskan tiga gaya nongravitational di alam: gaya kuat, lemah, dan elektromagnetik. Teori ini adalah teori 'fundamental', di mana tidak ada apapun tentang kemungkinan proses virtual pada skala panjang yang sangat kecil yang diprediksi terjadi dalam teori secara langsung memerlukan proses baru di luar yang diprediksi dalam teori pada skala ini. Jadi, sementara tidak ada yang benar-benar percaya, teori ini bisa dalam pengertian ini menjadi lengkap. Dengan cara yang sama, tidak ada yang menghalangi keberadaan operasi fisika baru pada skala panjang yang sangat kecil. Memang, ada argumen teoretis kuat lainnya yang menunjukkan bahwa ini adalah kasusnya, seperti yang akan saya jelaskan.

Sementara teori seperti Fermi, yang 'sakit', memberikan bukti yang jelas untuk kebutuhan akan fisika baru, teori seperti Model Standar, yang tidak, dapat juga melakukannya hanya karena formulasinya bergantung pada skala—yaitu,

mereka bergantung secara intrinsik pada skala apa yang kita lakukan eksperimen untuk mengukur parameter fundamental mereka. Karena proses yang melibatkan partikel virtual yang bekerja pada skala yang lebih kecil digabungkan untuk membandingkan dengan hasil eksperimen yang lebih sensitif, nilai parameter ini diperkirakan akan berubah, dengan cara yang dapat diprediksi! Untuk alasan ini, sifat-sifat elektron yang berpartisipasi dalam proses atom pada skala atom tidak persis sama dengan elektron yang berinteraksi dengan inti atom pada skala nuklir yang jauh lebih kecil. Tetapi yang paling penting, perbedaannya dapat dihitung!

Ini adalah hasil yang luar biasa. Sementara kita harus melepaskan gagasan bahwa Model Standar adalah teori tunggal yang tidak dapat diganggu gugat, sesuai pada semua skala, kita memperoleh suatu kontinuitas teori efektif, masing-masing sesuai pada skala yang berbeda dan semuanya terhubung dengan cara yang dapat dihitung. Untuk teori yang berperilaku baik seperti Model Standar, maka, kita benar-benar dapat menentukan bagaimana hukum fisika harus berubah terhadap skala!

Pemahaman yang luar biasa ini tentang ketergantungan skala fisika sebagaimana yang telah saya jelaskan sebagian besar adalah karya Ken Wilson, yang hanya berasal dari tahun 1960-an dan di mana ia dianugerahi Hadiah Nobel. Itu berasal dari banyak studi fisika material seperti yang dilakukan dari fisika partikel. Ingat bahwa perilaku penskalaan material adalah fitur penting yang memungkinkan kita untuk menentukan ciri mereka dekat fase transisi. Sebagai contoh, pembahasan saya tentang apa yang terjadi ketika

air mendidih didasarkan pada bagaimana deskripsi materi berubah ketika kita mengubah skala yang kita amati. Ketika air dalam bentuk cairnya, kita dapat, jika kita amati pada skala yang sangat kecil, mendeteksi fluktuasi yang secara lokal membuat densitasnya setara dengan nilainya dalam bentuk gas. Namun, rata-rata pada skala yang lebih besar dan lebih besar lagi, kerapatan mengendap menjadi nilai cairnya begitu kita mencapai beberapa skala karakteristik. Apa yang kita lakukan ketika kita rata-rata dari skala yang lebih besar? Kita biasanya mengeluarkan efek dari fenomena skala yang lebih kecil, yang rinciannya dapat kita abaikan jika yang kita minati adalah sifat makroskopik dari air cair. Namun, jika kita memiliki teori dasar air—yang dapat menggabungkan perilaku skala kecil—kita dapat mencoba untuk menghitung dengan tepat bagaimana pengamatan kita harus bervariasi dengan skala sebagai efek dari fluktuasi pada skala yang lebih kecil digabungkan. Dengan cara ini, seseorang dapat menghitung semua sifat material dekat titik kritis di mana, seperti yang saya katakan, perilaku penskalaan material menjadi sangat penting. Teknik yang sama diterapkan pada bahan normal berlaku untuk deskripsi kekuatan fundamental di alam. Teori-teori seperti QED mengandung benih-benih ketergantungan skala mereka sendiri.

Pertimbangan skala membuka dunia baru fisika sama seperti ketika kita pertama kali menjumpai mereka dalam konteks kulit bola sapi kita di awal buku ini. Memang, kembali ke contoh itu, kita dapat melihat secara eksplisit bagaimana ini terjadi. Pertama, jika saya menentukan de-

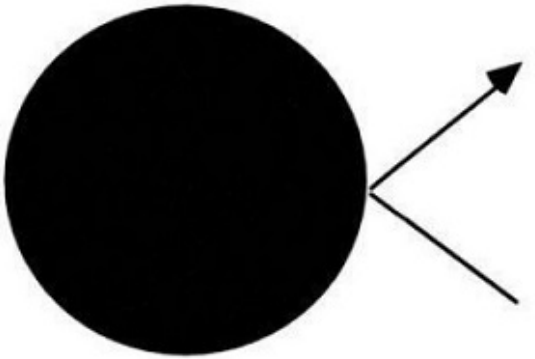
ngan menguji densitas dan kekuatan kulit sapi yang normal, saya dapat memberi tahu Anda apa yang akan menjadi densitas sapi-super, yang dua kali lebih besar. Selain itu, saya dapat memprediksi hasil pengukuran apa pun yang dilakukan pada sapi-super tersebut.

Apakah kemudian Teori Spherical Sapi merupakan Teori Ultimate Sapi? Apriori kita tidak pernah bisa membuktikan itu, tetapi ada tiga cara yang berbeda untuk mengetahui apakah jawabannya tidak atau tidak mungkin: (1) pada skala tertentu teori itu sendiri memprediksi omong kosong, (2) teori sangat menyarankan bahwa sesuatu yang bahkan lebih sederhana daripada bola dapat melakukan pekerjaan yang sama, atau (3) kita dapat melakukan percobaan pada skala tertentu yang membedakan fitur yang tidak diprediksi dalam teori. Hal ini merupakan eksperimen semacam itu. Katakanlah saya melemparkan sepotong garam ke sapi bulat. Prediksinya adalah ia akan terpental:

Pada kenyataannya, jika saya melemparkan sepotong garam ke salah satu arah pada sapi, itu tidak akan terpental. Saya akan menemukan fitur yang tidak diperhitungkan dalam teori asli—lubang, di mana mulut berada.

Dengan cara yang sama, mengeksplorasi ketergantungan skala pada hukum alam menyediakan mekanisme penting untuk berburu fisika fundamental baru. Sejarah singkat saya tentang interaksi lemah adalah salah satu contoh klasik. Saya sekarang akan menjelaskan beberapa yang lain, yang lebih baru.

Hukum penskalaan fisika fundamental bisa mengikuti trickle-down atau bottom-up. Tidak seperti ekonomi, kedua



Gambar 45: Prediksi pantulan hasil lemparan.

teknik bekerja dalam fisika! Kita dapat menjelajahi teori-teori yang kita pahami pada skala panjang yang dapat diakses dan melihat bagaimana mereka berevolusi ketika kita menurunkan skala dalam upaya untuk mendapatkan wawasan baru. Sebagai alternatif, kita dapat menemukan teori yang mungkin relevan pada skala panjang yang jauh lebih kecil daripada yang kita dapat selidiki di laboratorium dan memperbesarnya, secara sistematis rata-rata dalam proses skala kecil, untuk melihat apa yang mereka prediksi tentang proses fisis pada skala yang kita dapat sekarang ukur.

Kedua pendekatan ini mencakup rentang penelitian di perbatasan hari ini. Saya jelaskan di Bab 2 bagaimana teori interaksi kuat, yang mengikat quark di dalam proton dan neutron, ditemukan. Gagasan kebebasan asimtotik memainkan peran penting. Quantum chromodynamics (QCD),

teori interaksi kuat, berbeda dari QED dalam satu hal yang mendasar: efek partikel virtual pada skala kecil pada evolusi parameter teori berbeda. Dalam QED, efek awan partikel virtual yang mengelilingi elektron adalah 'melindungi' sampai batas tertentu muatan listriknya dari pengamat yang jauh. Jadi, jika kita menyelidiki hingga sangat dekat dengan elektron, kita akan menemukan muatan yang kita ukur meningkat secara efektif dibandingkan dengan nilai yang akan kita ukur jika kita mengoreksinya dari sisi lain ruangan. Di sisi lain, dan ini adalah kejutan yang Gross, Wilczek, dan Politzer temukan, QCD (dan *hanya* teori seperti QCD) dapat berperilaku hanya dengan cara yang berlawanan. Saat Anda memeriksa interaksi quark yang semakin dekat dan berdekatan, muatan kuat efektif yang mereka rasakan semakin lemah. Setiap awan partikel virtual mereka secara efektif meningkatkan interaksi mereka dengan pengamat yang jauh. Saat Anda menyelidiki lebih jauh di dalam awan ini, kekuatan interaksi yang kuat di antara quark semakin lemah!

Lebih jauh lagi, dipersenjatai dengan teori yang secara tepat menggambarkan interaksi jarak kecil dari quark, kita dapat mencoba untuk melihat bagaimana banyak hal berubah dengan skala saat kita meningkatkan skala. Pada saat Anda mencapai ukuran proton dan neutron, orang mungkin berharap mendapatkan rata-rata di atas semua quark individu dan sampai pada teori efektif hanya proton dan neutron. Karena dengan skala ini interaksi quark begitu kuat, namun, belum ada yang dapat melaksanakannya secara langsung, meskipun komputer besar dikhususkan untuk tugas tersebut

dan sejauh ini telah menghasilkan hasil yang sesuai dengan pengamatan.

Sukses besar argumen skala yang diterapkan pada interaksi kuat pada awal 1970-an para fisikawan yang berani untuk mengubahnya, untuk melihat skala lebih kecil daripada yang dapat diselidiki menggunakan energi yang tersedia di laboratorium saat ini. Dalam pengertian ini, mereka mengikuti jejak Lev Landau, Feynman Soviet. Pada 1950-an fisikawan brilian ini telah menunjukkan fakta bahwa muatan listrik pada elektron secara efektif meningkat ketika Anda mengurangi skala jarak di mana Anda menyelidiki elektron. Bahkan, ia menunjukkan bahwa, pada skala kecil yang tak terbayangkan, jika proses berlanjut seperti yang diprediksi QED, muatan listrik yang efektif pada elektron akan menjadi sangat besar. Ini mungkin sinyal pertama, meskipun tidak terlihat pada saat itu, bahwa QED sebagai teori yang terisolasi membutuhkan perubahan sebelum skala kecil tersebut tercapai.

QED semakin kuat karena skala energi meningkat, dan QCD semakin lemah. Kekuatan interaksi lemah tepat di tengah. Sekitar tahun 1975, Howard Georgi, Helen Quinn, dan Steven Weinberg melakukan perhitungan yang mengubah persepsi kita tentang perbatasan energi-tinggi. Mereka mengeksplorasi perilaku penskalaan dari interaksi kuat, lemah, dan elektromagnetik, di bawah berbagai asumsi tentang jenis-jenis fisika baru yang mungkin masuk ketika skala energi meningkat, dan menemukan hasil yang luar biasa. Hal tersebut cukup masuk akal bahwa, dalam skala kira-kira lima belas kali lipat lebih kecil dalam jarak

daripada yang pernah diperiksa di laboratorium, kekuatan ketiga interaksi fundamental bisa menjadi identik. Ini persis dengan apa yang orang harapkan jika beberapa simetri baru mungkin menjadi nyata pada skala ini yang akan menghubungkan semua interaksi ini, sebuah ide yang telah secara independen disarankan oleh Sheldon Glashow, bersama dengan Georgi. Gagasan bahwa alam semesta akan tampak lebih simetris saat kita menyelidiki skala yang lebih kecil dan lebih kecil lagi cocok dengan penemuan ini. Era Grand Unified Theories, di mana semua interaksi alam, selain gravitasi, muncul dari satu interaksi pada skala yang cukup kecil, telah dimulai.

Hampir dua puluh tahun kemudian dan kita masih tidak memiliki bukti langsung lebih lanjut bahwa ekstrapolasi luar biasa dalam skala ini benar. Pengukuran presisi terbaru dari kekuatan semua kekuatan di fasilitas laboratorium yang ada, bagaimanapun, memberikan dukungan lebih lanjut untuk kemungkinan bahwa mereka semua bisa menjadi identik pada skala tunggal. Tapi, menariknya mereka tidak melakukannya kecuali kita melengkapi Model Standar yang ada dengan fisika baru, yang secara alami bisa terjadi jika kita menempatkan simetri baru alam, yang disebut Supersimetri.

Supersimetri menghubungkan berbagai partikel elementer di alam dengan cara-cara baru. Ternyata partikel elementer dapat diklasifikasikan dalam dua jenis yang berbeda, baik sebagai 'fermion', atau 'boson'. Klasifikasi, dinamai Enrico Fermi, menggambarkan partikel di mana momentum sudut mekanika kuantum dikuantisasi dalam setengah bilangan bulat beberapa satuan fundamental, dan kita sebut mereka

spin [fr 1/2] partikel dll. Yang terakhir, dinamai berdasarkan fisikawan India Satyendra Nath Bose, menggambarkan partikel yang momentum sudut mekanika kuantum terkuantisasi dalam kelipatan bilangan bulat, dan kita menyebutnya spin 1 partikel.

Ternyata boson dan fermion berperilaku dengan cara yang sangat berbeda. Fakta bahwa elektron, misalnya, adalah fermion, bertanggung jawab untuk semua kimia, karena, seperti ditunjukkan Wolfgang Pauli pertama kali, dua fermion tidak dapat eksis dalam keadaan kuantum yang persis sama di tempat yang sama. Jadi, ketika seseorang menambahkan elektron ke atom, misalnya, elektron harus menempati tingkat energi yang semakin tinggi dan lebih tinggi lagi.

Boson, di sisi lain, bisa ada dalam keadaan kuantum yang sama di tempat yang sama, dan pada kenyataannya, jika kondisi memungkinkan, ini adalah konfigurasi yang mereka sukai, disebut 'Bose kondensasi'. Latar belakang bidang yang telah dikemukakan untuk secara spontan memecah fundamental simetri di alam semesta, misalnya, dibayangkan sebagai kondensat Bose. Baru-baru ini, dalam kondisi yang sangat khusus, para eksperimentalis telah menciptakan kondensat Bose di laboratorium, yang terbuat dari konfigurasi ratusan atau ribuan atom. Harapannya adalah bahwa konfigurasi yang sangat khusus ini dapat menghasilkan teknologi baru, sehingga para pelaku pertama yang menghasilkan konfigurasi ini diberi Hadiah Nobel beberapa tahun yang lalu.

Sementara boson dan fermion tampaknya sama sekali

berbeda, supersimetri adalah kemungkinan simetri baru dari alam yang menghubungkan boson dan fermion, dan memprediksi, misalnya, bahwa untuk setiap partikel fermion di alam harus ada partikel bosonik dari massa yang sama, muatan, dll. Sekarang pada titik ini Anda mungkin berkomentar bahwa ini jelas bukan kasus yang teramati di alam. Namun, sekarang Anda juga dapat mengantisipasi tanggapan saya. Jika supersimetri adalah simetri *breaking*, maka ternyata 'superpartners' fermion dan bosonik dari partikel biasa yang kita amati di alam mungkin begitu berat hingga belum ditemukan dengan memproduksinya dalam akselerator.

Apa yang bisa menjadi motivasi yang mungkin untuk memperkenalkan simetri matematika baru di alam yang tidak terwujud dalam apa yang kita amati? Sama halnya dengan kasus model standar, memperkenalkan simetri seperti itu dapat menyelesaikan beberapa paradoks dalam teori yang sudah ada sebelumnya. Kenyataannya, motivasi lengkap untuk mengasumsikan supersimetri yang rusak dalam teori partikel terlalu berbelit-belit untuk melakukan keadilan di sini, dan sekali lagi saya telah mencoba melakukannya secara panjang lebar dalam sebuah buku baru-baru ini. Salah satu alasan utama, bagaimanapun, adalah bahwa simetri ini mungkin membantu menjelaskan mengapa skala *elektro-lemah* jauh lebih rendah daripada skala gravitasi.

Karena itu mungkin, sangat menarik bahwa jika seseorang mengasumsikan supersimetri itu ada sebagai simetri baru alam yang rusak pada skala jarak hanya sedikit lebih kecil daripada skala *electroweak*, kemudian menggabungkan

sejumlah partikel berat baru yang harus kemudian eksis ke dalam perhitungan kekuatan bagi gaya-gaya yang diketahui di alam menyebabkan mereka menjadi identik dalam kekuatan pada skala tunggal sekitar enam belas kali lipat lebih kecil dari ukuran proton.

Terlepas dari apakah gagasan ini benar atau tidak, hasil ini, lebih dari yang lain di era pascaperang, mengubah pikiran fisikawan teoretis dan eksperimental untuk menjajaki kemungkinan fisika baru pada skala yang sangat berbeda dari yang bisa kita ukur langsung di laboratorium. Menurut saya, hasilnya sudah beragam. Hubungan dekat sebelumnya antara teori dan eksperimen, yang sebelumnya selalu mengatur kemajuan fisika partikel (dan memang semua sisa fisika) telah berkurang sedikit, bahkan ketika taruhannya meningkat ketika fisikawan mengalihkan perhatian mereka untuk kemungkinan menyatukan semua gaya di alam, termasuk gravitasi.

Ada, dalam fisika, pada skala energi-tinggi astronomi yang telah menatap wajah kita untuk bagian yang lebih baik dari abad ini. Teori interaksi lemah Fermi bukanlah satu-satunya teori fundamental yang jelas sakit pada energi-tinggi dan jarak kecil. Relativitas umum adalah hal lain. Ketika seseorang mencoba untuk menggabungkan mekanika kuantum dan gravitasi, banyak masalah muncul. Yang terpenting di antara mereka adalah fakta bahwa pada skala sekitar sembilan belas orde besarnya lebih kecil dari ukuran proton, efek partikel virtual dalam interaksi gravitasi menjadi tidak terkendali. Seperti teori Fermi, gravitasi tidak tampak sebagai teori yang dapat menjadi teori kuantum

fundamental sebagaimana ia berdiri. Beberapa fisika baru mungkin memainkan peran untuk mengubah perilaku teori pada skala kecil ini.

Teori string saat ini adalah kandidat paling populer untuk fisika baru ini. Pada skala di mana partikel-partikel virtual sebaliknya akan menyebabkan gravitasi runtuh sebagai teori kuantum, sifat-sifat *string-like* partikel dalam teori ini mengubah cara kerja matematika, menjinakkan apa yang jika tidak menjadi tidak terkendali. Selain itu, gravitasi itu sendiri muncul secara alami dalam teori string fundamental. Satu-satunya tangkapan adalah bahwa string itu sendiri tidak masuk akal sebagai objek kuantum dalam empat dimensi. Untuk mendapatkan teori yang konsisten diperlukan setidaknya sepuluh atau sebelas dimensi, enam atau tujuh yang sejauh ini tidak terlihat.

Ketika teori string pertama muncul, itu disebut-sebut sebagai Theory of Everything, atau, untuk meletakkannya dalam istilah yang lebih relevan dengan diskusi ini, Akhir Fisika (*End of Physics*). Itu adalah teori yang seharusnya benar-benar mendasar dan bisa diterapkan di semua skala. Simetri baru akan menyebabkan ketergantungan skala teori untuk berhenti, dan teori akan benar-benar lengkap, tidak pernah digantikan oleh teori yang lebih mendasar pada skala yang lebih kecil dan mengurangi hukum fisika yang dikenal pada skala yang lebih besar.

Pada saat klaim ini dibuat, banyak dari kita yang skeptis, dan skeptisisme kita sejauh ini telah terbukti benar. Sekarang jelas bahwa bahkan string itu sendiri mungkin, dalam konteks model matematika yang saat ini sedang di-

selidiki, menjadi objek yang efektif, untuk digantikan oleh objek lain yang lebih mendasar yang mungkin beroperasi di dimensi yang lebih tinggi. Terlebih lagi, bahkan setelah dua puluh tahun kerja keras oleh beberapa ahli teori paling cemerlang di sekitar, sedikit sekali kemajuan yang telah dibuat. Teori string tetap lebih merupakan harapan teori daripada teori aktual, dan tidak ada bukti apa pun, di luar motivasi teoretis yang saya jelaskan di atas, teori string itu ada hubungannya dengan alam.

Sembarang *Theory of Everything* harus menjawab pertanyaan mendasar yang paling diminati Einstein, dan yang paling menarik bagi saya: Apakah ada pilihan dalam penciptaan Alam Semesta? Yakni, apakah hanya ada satu rangkaian hukum fisis yang konsisten yang bertahan bersama secara konsisten, sehingga jika seseorang mengubah satu bilangan saja, seluruh bangunan akan runtuh? Tentu saja ini adalah harapan yang telah mendorong fisika selama beberapa ratus tahun dan yang telah dipuji oleh para ahli teori string di masa awal: Harapan besar untuk menjelaskan dengan tepat mengapa alam semesta adalah seperti semula, dan mengapa alam semesta harus seperti itu. . .

Ada kemungkinan lain, bagaimanapun, dan luar biasa itu adalah salah satu teori string banyak yang beralih ke karena telah menjadi jelas bahwa teori mereka adalah sesuatu tetapi unik. Bahkan pengembaraan tentatif di alam semesta string telah membuat jelas bahwa sangat mungkin apa pun yang menggantikan teori string dan apa pun yang mungkin menjelaskan bagaimana enam atau tujuh dimensi tambahan menjadi tidak terlihat bagi kita, kemungkinan ada setidak-

nya 10^{500} kemungkinan empat-dimensi alam berbeda yang dihasilkan, masing-masing yang mungkin memiliki hukum fisika sendiri. Daripada menjelaskan mengapa alam semesta harus terlihat seperti itu, maka, teori string akan melakukan hal yang sebaliknya. Itu akan menjelaskan mengapa alam semesta pada umumnya akan terlihat sangat berbeda!

Dalam skenario seperti itu, para ilmuwan telah terdesak ke dalil yang mungkin berharap menjelaskan mengapa alam semesta tempat kita tinggal memiliki sifat-sifatnya: karena kita hidup di dalamnya! Yakni, bisa jadi kehidupan hanya mungkin dalam sub-himpunan yang sangat kecil dari banyak kemungkinan alam semesta, yang semuanya bisa ada di wilayah ruang dan waktu yang terpisah. Dalam hal ini, satu-satunya alam semesta dengan fisikawan di dalamnya yang dapat bertanya tentang alam semesta mereka, adalah alam semesta yang sangat mirip dengan kita. Jika ide ini, yang telah diangkat menjadi 'prinsip' oleh beberapa orang, yang disebut Prinsip Antropik, terdengar seperti Anda ingin keluar, seharusnya, karena memang demikian. Tetapi sama saja, mungkin benar, dalam hal ini hukum fisika tidak akan berarti apa-apa selain kebetulan saja.

Namun, saya tidak ingin mengakhiri buku ini dengan spekulasi tentang *Theory of Everthing* atau bahkan *Theory of Nothing*. Kesamaan yang kemungkinan sama adalah bahwa pencarian Kebenaran Universal malah bisa salah paham. Mungkin ada hukum-hukum fisis yang tak terbatas yang tersisa untuk ditemukan sementara kita terus menyelidiki skala ekstrem. Dan poin utamanya adalah, itu tidak terlalu penting! Kita telah belajar bahwa kita dapat, dan pada

saat ini harus, melakukan fisika dalam dunia teori yang efektif, yang melindungi fenomena yang kita pahami dari yang belum kita temukan. Bahkan jika teori String berubah menjadi *Theory of Everything*, teori itu sebenarnya masih sangat sedikit. Bahkan jika itu menjelaskan energi gelap, yang tidak, itu akan sedikit berguna saat langsung mencoba untuk memahami bagaimana sapi mencerna makanan, atau bahkan mengapa mereka ukurannya demikian.

Kebenaran ilmiah tidak memerlukan harapan bahwa teori yang kita gunakan benar-benar fundamental. Dalam pengertian ini, fisika masih jelas dipandu oleh prinsip-prinsip yang sama yang diperkenalkan oleh Galileo 400 tahun yang lalu dan memang prinsip yang sama yang saya perkenalkan di awal dan sepanjang buku ini. Semua teori alam kita yang indah melibatkan perkiraan yang kita gunakan dengan impunitas. Kita dituntun untuk mengabaikan yang tidak relevan. Apa yang tidak relevan umumnya dipandu dengan mempertimbangkan sifat dimensi besaran fisis, yang menentukan skala masalah yang kita minati dan yang dapat kita abaikan dengan aman. Sementara itu kita secara kreatif berusaha menyesuaikan apa yang telah berhasil dengan situasi baru. Dengan demikian, kita telah mengungkapkan alam semesta tersembunyi yang luar biasa yang ada di luar indra manusia kita yang terbatas, alam semesta yang jauh lebih sederhana dan lebih simetris. Sejauh ini, di mana-mana kita melihat, sapi bulat masih ada di sekitar kita.

Jika kalian suka dengan
publikasi-publikasi Antinomi,
silakan bantu kami melalui:

antinomi.org/urundana

Produksi pengetahuan hari-hari ini nyaris selalu membutuhkan topangan (pe)modal. Tepat ketika produksi pengetahuan itu menyandarkan diri sepenuhnya pada modal, maka saat itulah juga terjadi produksi kekuasaan—yang pada akhirnya juga akan memproduksi ketidaksetaraan: ada orang yang mampu mengakses pengetahuan, juga ada yang tidak mampu mengaksesnya. **Antinomi Institute**, sebuah organisasi nonprofit yang membaktikan dirinya untuk pengembangan pengetahuan, ingin memutus ketergantungan produksi pengetahuan pada modal—yang watak primordialnya adalah selalu untuk melipatgandakan dirinya—dan juga ingin memastikan bahwa pengetahuan itu bisa dinikmati oleh semua orang.

Sejauh ini, **Antinomi Institute** telah melakukan produksi dan distribusi pengetahuan melalui dua bentuk: situs web dan buku. Semuanya dikerjakan dengan semangat untuk memproduksi pengetahuan, bukan untuk mengakumulasi kapital. Semua konten di situs web kami bisa diakses secara gratis, beberapa buku cetak dijual hanya untuk mengganti biaya produksi, selebihnya dibagikan secara gratis, dan semua buku elektronik *(ebook)* yang kami buat juga dibagikan secara gratis. Namun, untuk memastikan keberlanjutan itu semua, kami memerlukan keterlibatan Anda sebagai pembaca dan penikmat pengetahuan untuk memberikan bantuan dan dukungan material.

Sebagaimana moto "Sci-Hub", kami ada untuk ***"removing barriers on the way of knowledge".***

Be the lights in the dark!

Bantu kami melalui:

BCA: 521-1386-747 (Fajar Nurcahyo)*
HSBC: 623-608643-844 (Fajar Nurcahyo)*
DANA: 081294567235 (Fajar Nurcahyo)*
OVO: 081294567235 (Fajar Nurcahyo)*
LINKAJA: 081294567235 (Fajar Nurcahyo)*

fear of **physics**

sebuah panduan awal

Buku ini ditujukan untuk siapa saja yang ingin mengetahui garis besar problem dalam fisika; bagaimana fisika bekerja dan apa yang menjadi tujuannya.

Buku ini ingin mempertegas bahwa pengetahuan, terutama fisika, bukanlah monopoli para fisikawan semata. Semua orang harus mengerti dan menyadari bahwa fisika adalah pengetahuan umat manusia dan selayaknya dimiliki oleh seluruh umat manusia pula.

Jika diperlukan keberanian besar dengan menganggap bahwa sebuah ketapel dapat digunakan untuk membunuh raksasa, hal yang sama juga berlaku bahwa dengan metode yang ada saat ini, manusia mampu menentukan nasib alam semesta.

(Lawrence M. Krauss)

ANTI NOMI
antinomi.org

ISBN 978 602 51908 7 2
9 786025 190872